

第160研究部会

氷海商船に関する研究

報告書

昭和53年3月

社団法人

日本造船研究協会

本研究は、氷海商船の設計、建造に関する技術資料に供するため、耐氷船に対する各國船級協会規則及び氷海船舶とその環境条件に関する技術文献を調査検討したものである。

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会の昭和52年度補助事業として、日本造船研究協会第160研究部会においてとりまとめたものである。

第160研究部会委員名簿(敬称略、五十音順)

部会長	浜田 昇 (日本船用機器開発協会)	
委員	芦野民雄 (日本船用機器開発協会)	伊藤達郎 (船舶技術研究所)
	井上 勝 (三菱重工業)	大島正直 (三井造船)
	上村 晃 (船舶技術研究所)	北川弘光 (船舶技術研究所)
	城野隆史 (日立造船)	宝田直之助 (住友重機械工業)
	寺沢一雄 (大阪大学)	中村昭和 (川崎重工業)
	成田仁 (三井造船)	浜村建治 (石川島播磨重工業)
	藤田謙 (東京大学)	藤本幸夫 (日本钢管)
	村山雅美 (国立極地研究所)	元良誠三 (東京大学)

目 次

第1部 耐氷船舶に関する船級協会規則	
○ 本調査内容の要約	1
第1章 ソ連船舶管理局(レギストル USSR) (ソ連船級協会)最新(1974~75年)	
船級規則にみられる耐氷船舶と船舶の着氷に関するルール	1
第2章 1970年迄に日本で実施された耐氷船舶船級規則調査の内容	25
(a) Polar vessel またはIce class boatと呼ばれる商船の船級規則の調査	25
(b) NK規則耐氷補強案とUSSR耐氷補強規則の比較	32
(c) フィンランド耐氷船級の新諸規定(1966年)	33
第3章 各国氷海航行船の船級規則の比較検討	37
(a) 氷海航行のための補強に関する各国船級協会規則の比較表	38
(b) ソ連船級協会耐氷構造規則	42
(c) 各国船級協会耐氷構造規則の中の冬季北バルト海航行船舶に関する規定の比較	58
(d) 各国船級協会耐氷構造規則の比較	62
(e) 1971年以降各規則改定の基礎資料の一つ「船舶の耐氷補強」(要約)	66
第2部 氷海商船設計・建造に関する技術文献調査	
○ I まえがき	67
II 北極・南極研究所紀要第331巻「氷の構造と物理的・機械的特性」(1976年)抜粋	68
1. 氷の機械的特性値の最大確率値の選定	68
2. 着氷時に構造物に生成する氷の特性に及ぼす自由表面エネルギーの影響	90
3. 氷を取囲む氷の吸着による氷の強度低下	95
4. 氷の表面エネルギーと物理的・機械的・特性	98
5. 載荷速度との関係における氷の強度について	107
6. 天然水域の氷の分類	111
7. 海氷の強度別分類	113
10. 氷盤の変形と応力	127
11. 氷盤の変形と応力の実地研究に関する若干の問題点	132
12. 氷盤中のエピソード的応力が結晶構造に及ぼす影響	136
13. 春期のラップチエフ海の一年氷の構造	141
14. 北極水域における海水の塩分組成と海水中の塩分に及ぼすその影響	145
16. 北極と南極の定着氷の比較	150
17. 平坦な切削氷面中の粒子の平均寸法の決定方法	154
18. 標準水平観測面の海水温度の計算について	157
19. 複雑な荷重条件下におけるさまざまな塩分の人工試験氷片の圧縮強度の測定	159
20. 高圧衝撃噴射水による氷の破壊	167
III 北極・南極研究所紀要第326巻「雪氷の物理学的調査法」(1975年)抜粋	173
12. 実験室試験および実地試験で孤立支柱構造に与える氷圧	173
27. 実験室条件および実地条件での氷の付着に関する実験研究	177

32. 天然雪と加工雪の強度特性の測定法	181
33. 氷盤の主要パラメータの空間分布の統計的評価	186
36. 氷盤の物理的・機械的特性の実地研究	190
IV 氷海航行の経験 M. B. Gotsky(1961年)抜粋	194
第1章 概論	194
第3節 氷海に関する基礎知識	194
13. 氷状図の作成と読み方	194
第2章 氷海における海洋型船舶の自力航行	198
第4節 氷との遭遇が確実な海域での航行の特徴：氷塊への突入	198
14. 一般的注意事項	198
15. 氷塊接近の主な徵候	199
16. 電波探知方式による氷像確認可能距離	201
17. 氷中への突入	202
第5節 氷海航行の特徴	205
18. 方位決定の基本原則	205
19. 最適進路の選定	208
20. 海洋型船舶の速度	212
21. 氷海航行の危険性	215
22. 操船上の特徴	221
第3章 碎氷船と航空機の誘導による船舶の航行・氷海内での止むを得ない漂流	228
第7節 碎氷船に誘導される船舶のための規程	228
27. 碎氷船による船舶誘導の規則とその準備	228
28. 氷縁での碎氷船待機規則と誘導のための船隊編成の一般原則	230
29. 碎氷船長と被誘導船長との相互関係	233
第8節 碎氷船に誘導される船舶のための規則(碎氷船隊における船舶の移動および曳航手順を定めた規則)	233
30. 碎氷船隊における船舶の移動手順	233
31. 碎氷船による船舶の曳航	238
32. 碎氷船に誘導された船舶の事故	242
33. 碎氷船による船舶誘導時の信号表示の手段と方法	243
34. 碎氷船に誘導される船舶のためのその他の規則	246
35. 碎氷船に従って航行する際に「規程」に反映されていない若干の特徴	246
第5章 碎氷活動	248
第13節 碎氷船隊の編成	248
49. 碎氷船による船舶の誘導・碎氷船隊の編成	248
50. 氷域誘導のための船隊編成の基本原則	252

第1部 耐氷船舶に関する各國船級協会規則

本調査内容の要約

各國の氷海航行船舶の構造規則は、資料1～4に示す通り1956年頃から1966年～67年当時までに相当な規模にまで整備されていることは知られているが、その後10年を経過した現在、どのような発展を遂げているのか、この点について、ソ連船級協会の耐氷規則を中心として、各國船級協会現行規則の比較を行ったものが本報告である。その概要を列挙すれば次の通りである。

- (1) ソ連の耐氷規則は、1966年当時UL_{ARKT}, UL, Lの3クラスであったのが、1974年の規則では一般船舶14クラスと曳船3クラスとなっており、クラスの形の上でもまた内容に於いても各國船級協会の規則の中でも、最も大きく変わっていることが認められる。而もソ連規則の特色として、これ迄と同様、各國の船級協会の規則のゆき方と異った独自の内容を持っている。詳細は資料5及び6を参照されたい。
- (2) LR, AB, BV, NV及びNKの各船級協会の耐氷構造に関する規則を、1976乃至1977年版によって比較してみると資料7及び8に示す通り各國規則に共通していることは、いづれにも1971年のFinnish-Swedish Ice class Rules(資料9)に基いて、冬期の北バルト海を航行する船舶のための耐氷構造規則の章が追加されている点である。
- (3) 唯、LR, AB, BV及びNKの各規則は、1966～67年当時に制定されていた耐氷の4クラスの規定をそのまま残して、それに北バルト海の耐氷4クラスを追加しているのに対し、NVは北バルト海の規則の外にIcebreakerとArctic Icebreakerの規則を加えている点に特色がある。
- (4) 冬期北バルト海航行船舶に対する耐氷構造の規則制定の目的は、この海域の冬期氷海の特殊性に基き、こゝを航行する船舶の耐氷構造の程度を、それ迄各國船級協会が定めていた構造規則の要求値より軽減させて、その代り経済性を高めることにあると考えられる。
- (5) 氷海航行船舶の現行の構造規則は、各國の氷海航行の需要の増大に伴い、過去のこの種の耐氷船舶の蒙った損傷の事例の解析を基とし、それを規則に反映させることによって益々技術的に信頼度の高いものに向上させていく過程にあるものと思われる。
今後、海水が航行する船体に及ぼす力の推定の精度が高まることにより、より完璧な耐氷構造規則が制定されるものと考えられる。

第1章 ソ連船舶管理庁の最新船級規則(1974～75年版) にみられる氷海船舶と着氷に関するルール

24 制限された海域(氷海)を航行する船舶

24.1 一般状況

24.1.1 本章で適用される船舶は、氷などのため航行が制限された海域を航行する貨物船(たとえばドライカーゴ船やオイルタンカー)であってそれは第1部「船級」の2.2.6に関する標示記号I, IIまたはIIIのクラスのもので、航行海域IおよびIIに対して船長20～160m, 航行海域IIIに対して20～60mのものである。

24.1.2 標示記号IあるいはIIに属するクラスで、制限された海域を航行しようとする船舶の構造部材の最小厚さは、1.6.1に従って決める。記号IIIのクラスの船舶では、1.6.1に従って決めた部材の最小厚さは、それより10%少くしても良い。いかなる場合にも構造部材の厚さは5mm以下としてはならない。

24.2 船体横の断面係数

24.2.1 制限された海域 I および II を航行する船舶の船体横の断面係数は次の長さを満足させるものでなければならない。

$$\frac{L}{D} > 14 \text{ のとき, } L \geq (150 - 5 \frac{L}{D}) m$$

$$\text{および } \frac{L}{D} \leq 14 \text{ のとき } L \geq 80 m$$

24.2.2 ミドシップのデッキストリンガ頂部（普通型のハッチ側コーミングおよび連続ハッチ側コーミングを持つサイドコーミングの頂部）は、cm³で、次の方程式で計算したものより小さくなってはいけない。

$$W_d = k_1 (k_2 + k_3 k_4 C_{B\varphi}) BL^{2.3} \quad (24.2.2)$$

ここで

普通の型のハッチサイドコーミングを持つドライカーゴ船に対しては $k_1 = 65$,

連続ハッチサイドコーミングを持つドライカーゴ船に対しては $k_1 = 62$,

オイルタンカーに対しては $k_1 = 71$ とし、 k_2 は次の様にとる。

$$k_2 = \frac{|M_{S,w}|}{BL^{2.3}} \text{ at } \frac{|M_{S,w}|}{BL^{2.3}} > k_{4\varphi} k_0$$

$$\left[k_2 = \frac{|M_{S,w}|}{10BL^{2.3}} \right] \text{ at } \left[\frac{|M_{S,w}|}{10BL^{2.3}} > k_{4\varphi} k_0 \right] ;$$

$$k_2 = 0.9 k_{4\varphi} k_0 + \frac{|M_{S,w}|}{10BL^{2.3}}$$

$$\text{at } \frac{|M_{S,w}|}{BL^{2.3}} < k_{4\varphi} k_0$$

$$\left[k_2 = 0.9 k_{4\varphi} k_0 + \frac{|M_{S,w}|}{10^2 BL^{2.3}} \right]$$

$$\text{at } \left[\frac{|M_{S,w}|}{10BL^{2.3}} < k_{4\varphi} k_0 \right]$$

ここで、

$M_{S,w}$ は 1.5.3 によって計算した静水の曲げモーメントで

φ は次に等しいファクター

記号 I を持つ船に対しては 0.82

記号 II を持つ船に対しては 0.72

k_4 = 次の式から出したファクター

$$k_4 = d \left(1.36 - 5 \frac{d}{L} + \frac{120-L}{2000} \right)$$

ここで $d = 1.0$ サッギングに対して

$d = 0.85$ ホッギングに対して

如何なる場合でも $k_4 \geq 1$ とする。

k_3 と k_0 とは表 1.5.2 からとった

C_B = 夏季満載、喫水における方形係数で、ドライカーゴ船では 0.6 より大きく、タンカーに対しては 0.75 より大きい。

$\eta = 1.5.4$ によって決められたファクター

24.2.3 制限された海域を航行するバルクカーゴ船の、船体ガーダ（桁）の断面係数は、 k_1 および $M_{S,W}$ を第4章の通りとて（24.22）の式で計算する。

24.3 分離構造物に対する規定

24.3.1 船体構造部材の構造と寸法は、1, 2 および 3 章の規定に従うこと。構造部材の寸法を Rule 公式で決めるときは、 d, D および $\frac{d}{D}$ の値はそれぞれ、0.046L, 0.07L および 0.65 より小さくとってはならない。こうして得られた値は、慣性モーメントを除いて次の様に低くすることができる。

制限海域 I の船は 5%

制限海域 II の船は 10%

制限海域 III の船は 15%

24.3.2 24.3.1 に述べた寸法の減少は、次のものに対しては許されない。

1. 船首材、方形キール、推進軸プラケット
2. 水密フロア、内底板（試験水頭が明確なパラメーターである）
3. 荷重高さが 2.6.2 によって決められる甲板部材；この場合暴露甲板に対して式（2.6.2.1）により決められる p の値のみが、航海制限区域 II の船に対して 10%，航海制限区域 III の船に対して 15%だけ、夫々減ずることが認められる。
4. あらゆる船の隔壁とタンク構造の部材ならびにタンカーの船側肋骨。
5. 対氷補強構造部材で、その要求仕様が第26章によるもの。
6. 重いばら積み貨物の荷重に直接さらされる構造部材で、その要求仕様が第4章によるもの。

3.7 氷海用錨とそのワイヤロープ

氷海用錨の数、設計および製造方法等は、その錨につけるワイヤロープの長さ、強度、構造および亜鉛メッキの種類等と共に、それぞれの場合毎に本船級協会によって特に考慮される。

2.4 着氷に対する許容

2.4.2 項に次の補足をつける。

「漁船および魚類処理工場船等の着氷による復原性を検討する際、氷の重さ（かさ）の数値は、2.4.3 ならびに 2.4.4 に述べたよりも更に詳しく付録 8 に従って決められる。」

2.4.6 「2.4.3 から 2.4.5 に従へと書いた字句の後に、「または付録 8」という字句が追加される。それに続く本文はそのままとする。」

2.4.9 着氷に対する許容

「2.4.9 漁船または魚類処理工場船が着氷した場合の静的復原力曲線のパラメーターは、2.2 章の要求を満したものでなければならない。」

之等修正が発効する前に設計された漁船または魚類処理工場船は、改造するか大修理をする時に、2.4.7 による要求を満すようにしなければならない。

付 錄 8

着氷に基く漁船の附加荷重の計算決定

1. 船舶着氷の詳細計算には基線に関する氷の重さと静的モーメントは項目 2-9 に従い、船舶構造物の主要グループに対する成分を合計し、着氷、速度に基き乾舷の高さと船舶の寸法の影響を考慮してファクターメータを、得られた合計数に掛け合わせることによって決められる。

ファクターメータは、モノグラム（第1図）によって決められる。このモノグラムの中の記号 f_0 は、前部垂線における

乾舷の高さで、玄檣、船首樓、内部腰板が船の前部から全長の10%を超えるところにある場合は、玄檣、船首樓、内部腰板の高さを計算に入れなければならない。

f_0 の値はトリムを考慮し最小である負荷状態に対して決める。

上述のモノグラムから決められる係数 χ の値が0.5より小さいときは χ を0.5とする。

2. 暴露甲板および船首樓甲板の水平投影面上の、平方メートル当りの氷の重量は40kgf [40kg]と推定される。計画する面積は、天幕があるなしにかゝわらずすべての暴露甲板水平投影面積の総計とする。甲板機械、装置、ハッチカバー等は甲板の投影に含み、別個計算してはならない。

例

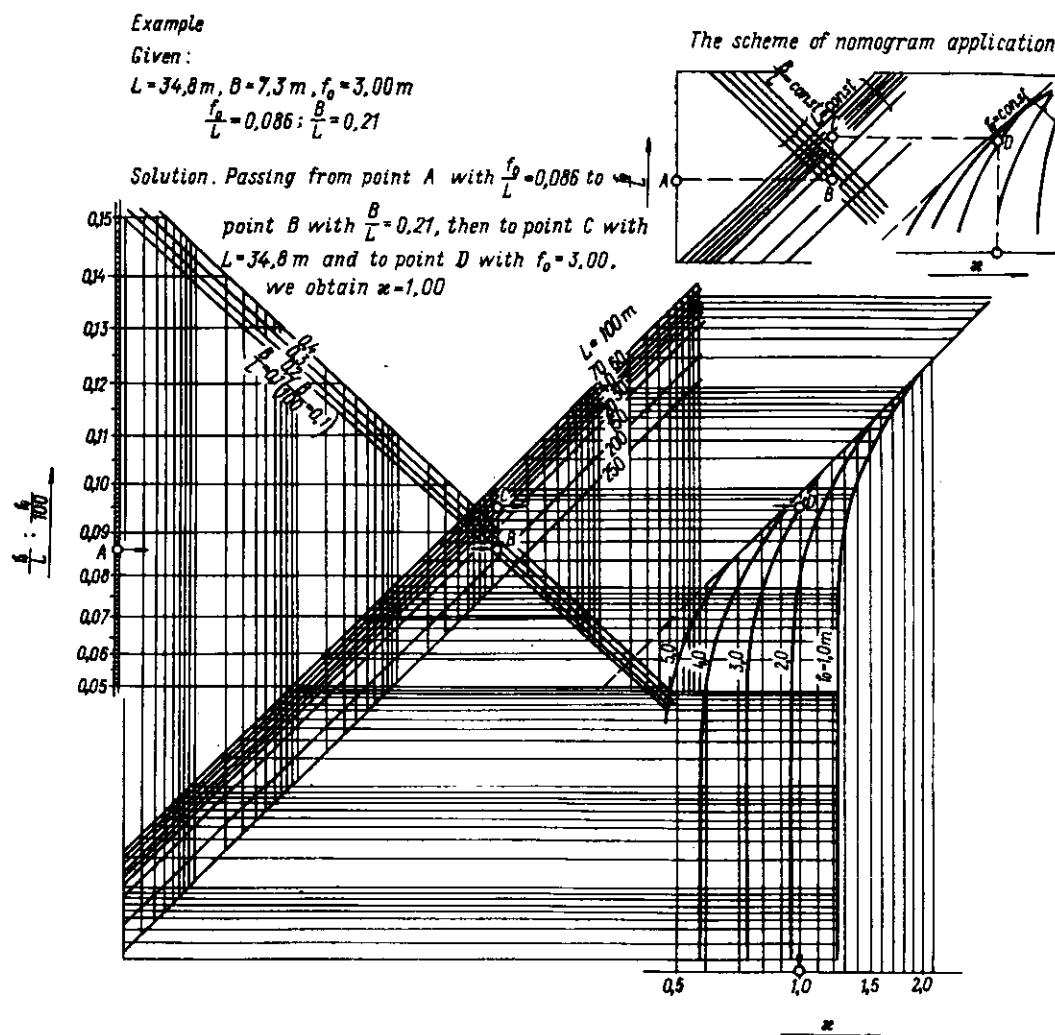
$$L = 34.8 \text{ m}, B = 7.3 \text{ m}, f_0 = 3.00 \text{ m}$$

$$\frac{f_0}{L} = 0.086 ; \frac{B}{L} = 0.21$$

するとその答を出すには、

$\frac{f_0}{L} = 0.086$ で点A通り、 $\frac{B}{L} = 0.21$ で点B通り、さらに $L = 34.8 \text{ m}$ でC通り、 $f_0 = 3.00 \text{ m}$ でD通りとする。

そこで $\chi = 1.00$ を得る。



第 1 図

3. 上甲板下の乾舷中心線および船首樓甲板の下(片側の投影面積が計算に入る)の投影面積平方メートル当りの着氷の重量は、 15kgf [15kg]と推定する。乾舷の投影面積を決めるには、この章の第3項で規定される最少載貨状態での喫水 d_{min} から進める必要がある。
4. 倒配壁の中心線への投影面積平方メートル当り氷の重量は 10kgf [10kg]と見積る(壁1つの場合でも計算に入る)
5. 甲板上部構造物(船首樓を除く)，甲板室，上部構造の玄牆の面積の平方メートル当り着氷重量は 10kgf [10kg]と見積る。これらの面積は次の様にして計算する。
 - 天幕の有無にかゝわらず、上部構造物および甲板室甲板の水平投影面積。甲板機械、装置、ハッチカバー等も甲板投影に含め、別個には計算しない。
 - 上部構造物や、甲板室(1個の壁の投影面積は計算に入る)のそれぞれの玄牆や側面は中心線への投影面積。
 - 各上部構造物およびデッキ室前面とその玄牆等の中央部フレーム面への投影面積。
6. 救命ボートの計画面積の平方メートル当りの着氷重量を 10kgf [10kg]と見積る。その計画面積は、各ボート中心線への水平投影面積を総計したものとする。
7. 総てのガードレールの1メートル当りの着氷重量は 10kgf [10kg]と見積る。
8. 直径 0.15m 以下の円材、索具装置、アンテナ等の直線メートル当りの着氷重量は 3kgf [3kg]とする。各柱、マスト、デリック、その他の直径 0.15m または他のsparring等の平方メートル当り着氷重量は 20kgf [20kg]と見積る。
9. 船舶表面にデッキカバーを取付け、着氷が 0.5kgf/cm^2 [50kPa]以内の場合の着氷重量は、上記アイテム番号2から5、7および8で指示したものより20%減らして良い。
ハッチやリールおよび主要甲板機械(ウインチ、ウインドラス、キャプスタン等)に対して電気加熱付覆を取付けてる場合は、上記アイテム2に反して上部甲板および船首樓甲板の全着氷重量を20%減らして良い。
その他の船舶着氷防止手段が講じられている場合は、着氷荷重の減少について、登録当局の特別な承諾をうけることができる。

第4部「復原性」に使われている数値の表に、次の2つを補足する。

$$M_\phi = \text{クレーン配置の最も好ましくない作業状態のとき最大荷重時のクレーン重量によるトリミングモーメント}$$

$$H = \text{修正された縦メタセンタ高さ(自由水影響に対し修正したもの)}$$

2.4 着氷に対する余裕

2.4.1 國際満載喫水線法で決められた季節冬期帶域を冬期航行しようとする船舶は、本章で規定されるような着氷に対する正当な考慮を払った復原性が、主な積載条件に加えて検討されなければならない。この計算には、着氷による排水量の増大、重心の高さの上昇および風圧面積の増大を考慮に入れなければならない。着氷下の復原性の計算は復原性に対して最悪の載荷条件に対して行う。着氷下で復原性を検討するときは着氷の重量は、過負荷と具做し船の載荷重量に含まれない。

2.4.2 季節冬期帶域を航行する船舶の、北緯 $66^{\circ}30'$ 以北、南緯 $60^{\circ}00'$ 以南、冬季のベーリング海、オホツク海タタルスキ海峡等を航行する船舶の傾斜モーメントや転覆モーメントを決めるための着氷の通常の割合は2.4.3および2.4.4に従うべきである。

2.4.3 暴露甲板の水平投影全面積の、平方メートル当りの着氷の重量は 30kg [300N]と推定すべきである。デッキの全水平投影面積には、天幕で覆ひ得ると否とにかくわらず、すべての暴露されている甲板と通路とを含ませるべきである。着氷による重量モーメントの高さは、甲板および通路の相当する面積の重心の高さで決める。

2.4.4 船舶の風上面の平方メートル当りの着氷重量は、 15kg [150N]と想定する。この際風上面とその重心の高さは1.4.7で規定した喫水 d_{min} で決るが、着氷による許容は加えない。

2.4.5 本船級協会と、着氷を考慮に入れない覚書で交した海域以外の、他の季節冬期海域では、2.4.3および

2.4.4 で決めた着水の丁度半分と想定すべきである。

2.4.6 着水情報を出す場合は、着水の量と、2.4.3から2.4.5に従って計算された高さについての重量モーメントは、すべての負荷状況下で考慮に入れる。

2.4.7 着水の余裕を以て静的復原力曲線を描くとき、復元力減失角は55°より小さくしてはならない。また制限された用途の船舶の、静的復元力の最大挺は、傾斜角25°以上で少くとも0.2 mなければならない。

B/D の比が>2 の船舶に対しては、復元力減失角 θ_v を、表2.2.2に示した数値の半分の数値までさらに減らすことが許される。

2.4.8 冬季に、黒海およびアゾフ海ならびに北緯44° - 00 以北の海域を航行する船舶は、カスピ海北方北緯42° - 00 以北の海域を航行する船舶と同様、2.4.5に従って、着水を考慮せねばならない。

3. 氷海航行船舶の耐氷補強

3.1 一般規定

3.1.1 ガラス繊維補強プラスチック船体で、長さ12mを超え、下に述べる規定によって耐氷補強された船舶をそのクラス表示法に従ってA3またはA4のマークを取得することができる。

水分類マークの定義は、第1部「分類」の項に記載してある。

3.2 分類A3の船舶の耐氷補強

3.2.1 外板にはアイスペルトを着けなければならない。アイスペルトの上端は、冬季満載喫水線上0.5 mとし、下端はバラスト状態の喫水下0.5 mまでとしなければならない。

アイスペルトは船首からトランソムまたは船尾骨材まで伸ばし、船の全長にわたるものとする。

3.2.2 長さ12m以上の船のアイスペルトはガラス繊物を型取型に入れて作った（モウルド）（ガラスレンホースドプラスチック型III₁およびIV₁）帶か、または織ってよりをかけた（ガラス・レンフォースドプラスチック型II₁）ものを船体へ何層も取付けたものとする。

3.2.3 帯を取付ける前に、船体外板の表面を清潔にし、粗くして置く。

3.2.4 アイスペルトの厚さは、それを取付ける外板の厚さの1/3より薄くしてはならない。帯は上端から100 mm下端から100 mmのところまでそれぞれ勾配をつけて両端を薄くする。

3.2.5 帯の先端が裂けないようにすべきである。型II、IIIまたはIVに対するこのガラス繊維補強プラスチック帶は、玄側厚板と同じ厚さとして、アイスペルトと同じように船に取付けなければならない。この帶はフレーム間隔1つ分だけアイスペルトと重なるようにする。帶の厚さは勾配を持たせてフレーム間隔の中央から後の方へ薄くなるようにする。

3.2.6 アイスペルトに合成材料を使うときは、本船級協会と覚書を取交せば許可される。

3.2.7 長さ12m以下の船では、材料寸法とアイスペルトの厚さは、本船級協会と覚書を交せば、減らすことができる。

3.2.8 長さ15mおよび15m以上の船では、船側縦通材1条が、冬季満載喫水線の高さに取付けられねばならない。

3.2.9 長さ15mおよび15m以上の船のフレーム間隔は、規則の1.6で示されたものと比較した上で50mm減らしてもよい。そして肋骨の断面係数は、肋骨心臣の減少を考慮に入れず、2.4に従って、その数値をとる。

3.3 A4分類の船の耐氷強化

3.3.1 外板のアイスペルトは、3.2.1～3.2.7に従って造らなければならない。

3.3.2 長さ20mおよびそれ以上の船の船側縦通材は、冬季満載喫水線に取付けなければならない。

3.3.3 船側肋骨の間隔と補強の減少は許されない。

3.3.4 3.2.5に従った帶を、3.2.5で決められた厚さの半分の厚さとして船に取付けなければならない。

26.2 γ A分類船舶の耐氷強化

26.2.6.2 「2.10.7」参照は「2.11.4.4」参照に訂正する。

2.4 着氷に対する余裕

新らしい節2.4.8が追加された。

「2.4.8 長さ20m以下の船舶は、原則として着氷する海域での航行は許可されない。しかし、この船舶が着氷状態に遭遇する可能性が充分排除されないときには着氷に対する余裕をもって描かれた静的復原力曲線のメタセンターハイさおよびその他のパラメーターの数値は2.2および2.3に示したものより少くしてはならない」。既存の節2.4.8は2.4.9に読みかえられた。

26.2 γ A分類船舶の耐氷補強

26.2.8 新しく26.2.8.8という節が追加された。「26.2.8.8 固定ノズルの附属品ならびに耐氷補強が特に本船級協会から承認された」。

26.3 A1分類船舶の耐氷補強

26.3.4 最初の文章の終りに、関連追記が追加された。「(2.11.3.3)を参照」。

26.3.5 新しく26.3.5.9という項目が追加された。「26.3.5.9 プロペラが固定ノズルで固定されてる場合は、船体につける横ウエッププレートの間隔を0.3m以上にしてはならない。ノズルの外板は、2.2.10.2による要求仕様に反し、厚さを15%厚くする。

半すき型かじの場合は、プロペラノズルが船尾材に連結する断面を、2.2.3.2で要求されたより15%大きくしなければならない」。

26.4 A2分類船舶の耐氷補強

26.4.4 新しく26.4.4.4という項目が追加された。

「26.4.4.4 プロペラが固定ノズルで固定されている場合は、船体につける横ウエッププレートの間隔0.3m以上にしてはならない。ノズルの外板は、2.2.10.2による要求仕様に反し、厚さを15%厚くする。

半すき型かじの場合は、プロペラノズルが船尾材に連結する断面を、2.2.3.2で要求されたより10%大きくしなければならない。

25.6 水海航行船の耐氷補強

25.6.1 A3級の耐氷補強

1. 外板

26.5.11に規定してる範囲にアイスペルトをつけなければならない。

アイスペルトの厚さは、船体中央部外板の厚さに下記kを乗じた数値よりも小さくしてはならない。

— 船首から、船首垂線より舵へ向かって015Lの距離までの範囲に対して

$$k = 1.41 - 0.11L \cdot 10^{-2}$$

— 船首垂線より舵へ向かって0.15Lの点から、冬季満載喫水が最大幅となる距離までの範囲に対して

$$k = 1.275 - 0.125L \cdot 10^{-2}$$

2. 26.5.1.1で規定した範囲の主肋骨と中間肋骨の断面係数は、船体中央部のものよりも少くとも40%大きくする。

25.6.2 A4級の耐氷補強

25.1 — 25.5の種類に合った船をA4級とする。

26. 氷海航行船舶の耐氷補強

26.1 一般規定

26.1.1 下記規定に従って耐氷補強された船舶は次の耐氷級別マークのいずれかを与へられる。船級記号中のマークは、y A A, y A, A 1, A 2, A 3 および A 4 である。

この耐氷級別マークの定義は、第1部「格付け」の中の2.2.3に明示した。

26.1.2 耐氷級別マーク y A A の指定をうけるには船体の耐氷補強範囲とその型式は本級船協会の特別認定をうけなければならない。

26.1.3 呉船の耐氷補強については26.7, 26.8, 26.9に明記した。

26.2 Y A 級の船舶の耐氷補強

26.2.1 外板

26.2.1.1 外板のアイスベルトは船の全長にわたり設けられなければならない。アイスベルトの上端は、夏季満載喫水線上 0.65mまで伸ばし、下端はバラスト状態の喫水線下 1.0mまでとする。

船首垂線から竜骨の平坦部が終る点より 0.05L 後方の断面までの範囲では、アイスベルトは船の竜骨線まで拡張しなければならない。

バラスト状態の時船底が喫水線下 1m未満にある船体の総ての部分は、アイスベルトと同じ厚さとし、船底肋骨は本級船協会により認定された方法で補強されなければならない。

26.2.1.2 上記上下限界内の外板の厚さ (mm) は次式で出された数値より小さくしてはならない。

$$s = 112.5a \sqrt{\frac{p}{\sigma_y}} \quad s > 21.8 \text{ のときは}$$

$$\left(s = 356a \sqrt{\frac{p}{\sigma_y}} \right) \quad (26.2.1.2.1)$$

$$s = 92a \sqrt{\frac{p}{\sigma_y}} + 4 \quad s < 21.8 \text{ のときは}$$

$$\left(s = 292a \sqrt{\frac{p}{\sigma_y}} + 4 \right) \quad (26.2.1.2.2)$$

ここで a = 当該部分の主肋骨の心距 (m)

p = 条件的水荷重強度 (t_f/m^2 (MPa))

船首垂線から $1.1b$ (b は 船首垂線から、夏季満載喫水線が最大幅となる部分に最も近い所までの距離) 以内の船体前部に対しては、

$$p = 0.144L \left(1 + \frac{2L}{1000} \right) \alpha^{\frac{1}{6}} u_1$$

$$\left[p = 0.144L \left(1 + \frac{2L}{1000} \right) \alpha^{\frac{1}{6}} u_1 \cdot 10^{-2} \right]$$

ここで α = 船首垂線から $0.1L$ の断面において、船体前部の夏季満載喫水線への切線と、船の中心線とのなす角 (度)

u_1 = 表 26.2.1.2 で示される数値

表 26.2.1.2

β	11 以下	20	30	40
u_1	1.00	0.97	0.90	0.82

β = 船首垂線から $0.1L$ のところの断面において肋骨への切線と夏季満載喫水線における垂線との角度(度)

船首垂線から 1.1 b の断面から、艤へかけた船体の部分に対しては、

$$p = L - 15 t f / m^2 \quad [p = (L - 5) \cdot 10^{-2} \text{ MPa}]$$

但し 75 tf/m^2 [0.75 MPa] より小さくしてはならない。

26.2.2 特設肋骨を用いない船側肋骨構造

26.2.2.1 肋 骨

1. 中間肋骨は、船首隔壁と、船尾隔壁との間に設けられる。その寸法は主肋骨と同じとする。
2. 主肋骨の心距は、次の追加規定も考慮して、1.6 および 2.5 記載の規定に従って定められるものとする。

— 700 mm を超えない前端部の主肋骨の心距は、船首隔壁より後方、船首垂線から 1.1 b 以上の位置の断面までの船の長さの部分に適用されなければならない。

— 上記断面から後方船尾隔壁までの主肋骨の心距は、800 mm よりも大きくしてはならない。

3. 舱内主肋骨の断面係数 (cm^3) は、次式による計算値より小さくしてはならない。

$$W = 0.5 k a l \frac{p}{\sigma_y} \cdot 10^3 \quad (26.2.2.1.3)$$
$$[W = 5 k a l \frac{p}{\sigma_y}]$$

ここで、 a = 主肋骨の心距 (m)

l = 内底板から甲板までの船側弦に沿って測った主肋骨のスパン (m)

k = 一層甲板船の場合は 16 で、多層甲板船の場合は 13.5 とする。

p = 条件的水荷重強度、 tf/m [kN/m]

船首垂線より 1.1 b 以内の船の前部に対しては (b の数値は 26.2.1.2 を参照のこと)

$$p = 0.12 L \left(1 + \frac{2L}{1000} \right) \alpha^{\frac{1}{5}} u_2$$
$$[p = 1.2 L \left(1 + \frac{2L}{1000} \right) \alpha^{\frac{1}{5}} u_2]$$

ここで、 α = 船首垂線から 0.2 L の位置の断面における夏季満載喫水線の前部への切線と船体中心線との角度 (度) である。

u_2 = 26.2.2.1 表から得られる数値である。

表 26.2.2.1

β	8 以下	10	12	14	16	18
u_2	1.00	0.87	0.78	0.72	0.66	0.62

β は船首垂線から 0.21 にある断面において、夏季満載喫水線の高さでの肋骨への切線と垂直線との間の角度 (度)

船首垂線から 1.1 b の距離の断面から後方船尾隔壁までの船の長さの部分に対しては

$$p = 0.455 L \text{ tf/m} \quad [4.55 L \text{ kN/m}]$$

であるが 50 tf/m [500 kN/m] より小さくしてはならない。

いかなる場合も、船首垂線から 1.1 b までの範囲に対する条件的水荷重強度は、船の長さの残りの部分に対するものより小さくとってはならない。

4. 甲板間の主肋骨の断面係数は、主肋骨のスパンが甲板間の高さに等しいと仮定して、26.2.2.1.3 で決める値より小さくとってはならない。この場合係数 k は次の値とする。

上方、甲板間に対して $14 \left(1 + 0.86 \frac{l}{L} \right)$

$$\text{下方, 甲板間に対して } 13 \left(1 + 0.92 \frac{l_1}{l} \right)$$

ここで, $\frac{l_1}{l}$ は肋骨の全体のスパンに対するアイスペルトで覆れた部分のスパンの比とする。

$\frac{l_1}{l}$ の値は $\frac{1}{2}$ より大きくとってはならない。

$\frac{l_1}{l} < \frac{1}{3}$ の場合は, 甲板間の主肋骨の断面係数は 2.5.5 で決められた数値と同じとして良い。

5. 如何なる場合でも, 船首隔壁の後方, 船首垂線から 1.1 b にある断面までの, 甲板間の主肋骨のみならず船内主肋骨の断面係数は 2.5.2, 2.5.5, 2.11.3 で決められた数値よりも小さくしてはならない。

6. 主肋骨ならびに中間肋骨のウェップの厚さは h を肋骨のウェップの厚さ (mm) としたとき $0.015 h + 5$ mm より小さくしてはならない。

26.2.2.2 肋骨端の固着

1. 主肋骨の固着は 2.5.3 及び 2.5.6 の規定に準じて行われなければならない。

2. 艦内中間肋骨の下端は内底の高さより下まで伸ばされ, 縁板から 250 mm を超えない点迄達しなければならない。水平縁板が設けられている場合は, この中間肋骨は内底板に固着されなければならない。

3. 艦内中間肋骨はアイスペルトの上方の最も近い甲板まで伸ばされなければならない。肋骨のウェブはその甲板に溶接されなければならない。

4. アイスペルト上縁が甲板間にある場合は, 中間肋骨はこの縁より少くとも 600 mm 伸ばされ, 船側縦通桁に達しなければならない。但しこれは下層甲板上 1.4 m を超えて配置されることを要しない。もしこの状態において中間肋骨が 1.4 m を超えて伸ばされなければならない時は, それらは次の甲板まで伸ばされ 26.2.2.2.3 の規定に従って固着されなければならない。中間肋骨はアイスペルトの上縁より下方にある甲板に肘板により固着させなければならない。

26.2.2.3 船側縦通桁

1. 船首尾隔壁の間に荷重分布用縦通桁は, 船首尾艤内の船側縦通桁に連続させて設けなければならない。この船側縦通桁の間隔は 1.4 m 以下でなければならない。この船側縦通桁のうち 1 条はその全長に亘り夏季満載吃水線より約 300 mm 下方に設けられ, 他はバラスト状態の吃水線より約 100 mm 下方に設けられなければならない。

2. 船側縦通桁のウェブの厚さ並びに面材の断面積は肋骨のものと同一でなければならない。

26.2.3 特設肋骨を用いる船側肋骨構造

26.2.3.1 肋 骨

1. 特設肋骨を用いる肋骨構造が使われる場合は, 船首尾隔壁間の船の長さのどの部分でも, 主肋骨と同一の断面を持つ中間肋骨が設けられなければならない。

2. 船の前部であって, 船首垂線から 1.1 b の断面より後方の主肋骨の心距は 26.2.2.1.2 に従わなければならぬ。

3. 特設肋骨の間隔は主肋骨の心距の 4 倍以下でなければならない。

4. 主肋骨の断面係数 (cm^3) は次の算式による値以上でなければならない。

$$W = 0.5 k_0 a l \frac{p}{\sigma_y} \cdot 10^3 \quad (26.2.3.1.4)$$

$$\left[W = 5 k_0 a l \frac{p}{\sigma_y} \right]$$

ここで a = 主肋骨の心距 (m)

l = 内底板から甲板までの, 船側の弦に沿って測った主肋骨の全長 (m)

p = 26.2.2.1.3 により定められる条件の水荷重強度

$k_0 = 26.2.3.1.4$ 表に与えられた係数

5. 特設肋骨の断面係数 (cm^3) は次の算式による値以上でなければならない。

$$W = 1.5 k_1 a_1 l \frac{P}{\sigma_y} \cdot 10^3 \quad (26.2.3.1.5)$$

$$\left[W = 15 k_1 a_1 l \frac{P}{\sigma_y} \right]$$

ここで a_1 = 特設肋骨の心臓 (m)

l = 内底板から甲板までの船側の弦に沿って測った特設肋骨の全長 (m)

$P = 26.2.2.1.3$ により定められる条件的水荷重強度

$k_1 = 26.2.3.1.5$ 表に与えられた係数

表 26.2.3.1.4

c	係数 k_0		
	船側縦通桁の数		
	1	2	3
0	9.9	5.7	5.0
0.5	10.1	6.2	5.3
1	10.2	6.7	5.7
3	10.6	7.7	6.7
5	10.9	8.5	7.6
10	11.5	10.0	9.3

$c = 26.2.3.1.6$ により定められる係数

表 26.2.3.1.5

c	係数 k_1		
	船側縦通桁の数		
	1	2	3
0	8.3	8.3	8.3
0.5	7.9	7.6	7.1
1	7.6	6.9	6.4
3	6.6	5.7	4.8
5	5.9	5.0	4.1
10	5.0	4.3	3.5

$c = 26.2.3.1.6$ により定められる係数

6. 表 26.2.3.1.4 及び 26.2.3.1.5 に示される係数 c は次の算式により定められなければならない。

船側縦通桁が 1 条の場合

$$c = 1.26 \frac{e}{1 - 0.19e} \quad (26.2.3.1.6-1)$$

船側縦通桁が 2 条の場合

$$c = 0.70 \frac{e}{1 - 0.26e} \quad (26.2.3.1.6-2)$$

船側縦通桁が 3 条の場合

$$c = 0.51 \frac{e}{1 - 0.35e} \quad (26.2.3.1.6-3)$$

ここで

$$e = 6 \frac{a_1}{l} \sqrt[3]{\left(\frac{a_1}{l}\right)^2 \cdot \frac{1}{n}}$$

上記において、 n は特設肋骨間の肋骨心距の数（中間肋骨を含む）である。

a_1 及び l の値については 26.2.3.1.5 を参照のこと。

7. 船側縦通桁の幅が特設肋骨の深さに等しいものと仮定された場合、またその断面係数が 26.2.3.2.1 により定められる断面係数を超過する場合は、算式 (26.2.3.1.4) 及び (26.2.3.1.5) により定められる 断面係数の値は次の算式により定められる係数 e を用い修正されなければならない。

$$e = \frac{3.52}{\frac{W_1}{W} \sqrt{\frac{W_1}{W} n}} \cdot \left(\frac{a_1}{l}\right)^3 \quad (26.2.3.1.7)$$

ここで W_1 = 容認された船側縦通桁の断面係数

W = 第 1 次の近似として、係数 e が算式 (26.2.3.1.6-3) により定められるものと仮定して、26.2.3.1.5 の規定により定められた特設肋骨の断面係数

8. 特設肋骨の断面積 (cm^2) は次の算式により定められる値以上でなければならない。

$$S = 0.830 a_1 \frac{p}{\sigma_y} \cdot 10^3 \quad (26.2.3.1.8)$$
$$\left[S = 8.3 a_1 \frac{p}{\sigma_y} \right]$$

ここで a_1 については 26.2.3.1.5 を、

p については 26.2.2.1.3 を参照のこと。

9. 肋骨のウェブの厚さは $0.01h + 4 \text{ mm}$ でなければならない。ここで h はウェブの深さ (mm) である。

26.2.3.2 船側縦通桁

1. 船側縦通桁の断面係数 (cm^3) は次の値以上でなければならない。

$$W_1 = 0.67 \frac{a_1}{l} W \quad (26.2.3.2.1)$$

ここで $W = 26.2.3.1.5$ により定められる特設肋骨の断面係数。

a_1 及び l の値も 26.2.3.1.5 によること。

2. 船側縦通桁のウェブの厚さは特設肋骨のウェブの厚さと等しくなければならない。

3. 特設肋骨と交叉する部分の船側縦通桁の幅は特設肋骨のウェブの深さに等しくなければならない。

船側縦通桁のウェブの幅を特設肋骨の深さより小さくしなければならない場合は、ウェブの大きい方の深さから小さな方の深さへの移行は、特設肋骨の深さと、スパンの中央における（船側縦通桁の）幅との差の 2 倍以上に等しい長さにわたって行われなければならない。

4. 船側縦通桁は特設肋骨の面材に溶接された面材を備えなければならない。

5. 船側縦通桁の心距並びに船側縦通桁と甲板との間又は船側縦通桁と内底との間の距離は 2.5 m 以下でなければならない。

6. 26.2.3.2 に規定される距離が 2 m を超える場合は、26.3.4.3 に規定された通りの構造の水平断切材が、船側縦通桁と船側縦通桁の間及び船側縦通桁と甲板又は内底との間に設けられなければならない。

26.2.4 船首尾倉内舷側肋骨

1. 主肋骨と同一寸法の中間肋骨が設けられなければならない。

2. 主肋骨の心距は 600 mm 以下でなければならない。

3. 肋骨の断面係数(cm^3)は次の値以上でなければならない。

$$W = \frac{6.25}{m+1} a I \frac{p}{\sigma_y} \cdot 10^3 \quad (26.2.4.1)$$

$$\left[W = \frac{62.5}{m+1} a I \frac{p}{\sigma_y} \right]$$

ここで a = 主肋骨の心距(m)

I = 肋板の上縁からアイスペルトの上方最も近く配置された甲板又は台甲板までの、船側弦に沿って側った肋骨のスパン(m)

m = 肋骨のスパンをいくつかの部分に区分する船側縦通桁又は台甲板の数

p = 算式(26.2.2.1.3)により定められる条件的水荷重強度、但し $u_2 = 1$ とする。

26.2.4.2 肋骨の端部の固着

倉内中間肋骨の下端は可能な限り船の竜骨線に近く設けられなければならない。これらの肋骨の上端はアイスペルトより上方にある、最も近い甲板又は台甲板まで伸ばされなければならない。中間肋骨の両端は固着されなくても良い。

26.2.4.3 船側縦通桁

1. 船側縦通桁の心距は $1.4 m$ 以下でなければならない。船側縦通桁のうちの 1 条は夏季満載吃水線より約 $300 mm$ 下方に配置されなければならない。

2. 船側縦通桁の幅 b (mm)及び厚さ s (mm)は次の値以上でなければならない。

$$s = 7 + 0.05L$$

$$b = 400 + 5L$$

3. 船側縦通桁は 1 本おきの主肋骨に取付けられた梁の上に載っていなければならない。これらの梁の断面積及び最小慣性能率は 2.11.2.5 の規定による値より 50% 大きくなければならない。

4. 船側縦通桁の自由縁にはその厚さの 10 倍以上の幅の面材を取付けなければならない。梁が設けられていない場合は、船側縦通桁は主肋骨の面に削えて、その肋骨の断面以上の高さの肘板により補強されなければならない。この肘板は肋骨及び船側縦通桁のウェブ及び面材に溶接されなければならない。

26.2.5 甲板

26.2.5.1 アイスペルトの範囲内に位置する甲板及び台甲板は通常横肋骨構造でなければならない。

26.2.5.2 甲板下縦桁の厚さ(mm)は次の値以上でなければならない。

$$s = 1.13a \sqrt{p+50} \quad (26.2.5.2)$$
$$\left[s = 11.3a \sqrt{p+0.5} \right]$$

ここで a = 梁の心距(m)

p = 26.2.2.1.3 の規定により定められた条件的水荷重強度

26.2.5.3 甲板下縦桁の幅は $2.5a$ 未満としてはならない。

26.2.5.4 アイスペルトの範囲内の外板と大きな開口の線との間の甲板又は台甲板の片舷断面積(cm^2)は下記に規定された値以上でなければならない。

— 船首垂線から $1.1 b$ の長さの範囲の船首部に対しては (b の値については 26.2.1.2 を参照のこと)

$$S = 0.580 I \frac{p}{\sigma_y} \cdot 10^3 \quad (26.2.5.4-1)$$

$$\left[S = 5.8 I \frac{p}{\sigma_y} \right]$$

— 船首垂線から 1.1 l の断面より後方の船の部分に対しては

$$S = 0.830 l \frac{p}{\sigma_y} \cdot 10^3 \quad (26.2.5.4 - 2)$$
$$\left[S = 8.3 l \frac{p}{\sigma_y} \right]$$

ここで l = 開口の長さ (m)

p = それぞれの船の区間に對し 26.2.2.1.3 の規定により定められた条件的水荷重強度の値

26.2.5.5 アイスベルトの範囲内に位置する甲板及び台甲板の梁の断面係数 (cm^3) は次の算式により定められた値以上でなければならない。

$$W = W_0 + 0.42 \frac{pa l^2}{\sqrt{W_0}} \quad (26.2.5.5)$$
$$\left[W = W_0 + 0.042 \frac{pa l^2}{\sqrt{W_0}} \right]$$

ここで a = 梁の心距 (m)

l = 船側より貨物倉口の縁材、甲板下縦桁又は縦通隔壁までの梁のスパン (m)

W_0 = 2.6.1 の規定により定められた梁の断面係数 (cm^3)

p については 26.2.2.1.3 を参照のこと。

26.2.6 船底

26.2.6.1 すべての場合に、各主肋骨に実体肋板が取付けられ船首隔壁から、船首垂線から 0.2 L の断面までの間に横肋骨構造が採用されなければならない。

26.2.6.2 上記の長さの範囲の船底外板は 2.10.7 の規定により中間防撓材を用いて補強されなければならない。

26.2.7 隔壁

26.2.7.1 船側より 1.4 m 以上の幅の部分の横隔壁には水平防撓材を設けなければならない。

船首尾隔壁にはその全幅に対し水平防撓材を設けなければならない。

水平防撓材の心距は船倉横隔壁については 700 mm 以下、船首尾隔壁については 600 mm 以下でなければならない。

26.2.7.2 アイスベルトの範囲内では、横隔壁の船側から 1.2 m までの幅の部分は厚さが 9 mm 以上でなければならない。

26.2.8 船首材及び船尾材

26.2.8.1 実体の鍛鋼、圧延鋼又は鋳鋼製船首材が、夏季満載吃水線上 0.75 m の高さまで設けられていないければならない。

26.2.8.2 船首材の断面積 (cm^2) は次の値以上でなければならない。

$$S = S_0 + f \cdot \frac{A}{100} \quad (26.2.8.2)$$

ここで A = 夏季満載吃水線迄の吃水における船の排水量 (t)

S_0 及び f は表 26.2.8.2 に与えられる値。

表 26.2.8.2

φ	$A < 2500t$		$A > 2500t$	
	S_0	f	S_0	f
25 - 30	75	3.75	120	1.85
40 - 60	85	5.00	150	2.30
70 - 80	100	6.00	180	2.80

φ = 船首材の満載吃水線に対する傾斜(度)

2.2.2の規定による船首材の縦横比が守られなければならない。

26.2.8.3 夏季満載吃水線の上方0.75mより高い所に取付けられる船首材の部分は成形した鋼板でつくられる。その厚さは外板のアイスペルトの厚さに等しくなければならないが、25mmを超えることを要しない。上記の厚さは上甲板の位置における外板の厚さを漸減させても良い。外板と船首材との結合は平滑でなければならない。

26.2.8.4 夏季満載吃水線の上方0.75mの高さまで、船首材は竜骨板迄伸びる中心線ウエブ並びに0.7m以下の間隔に配置された水平ウエブにより補強されなければならない。各ウエブの長さは600mm以上でなければならない。ウエブは最も近い肋骨まで伸ばされそれに固着されなければならない。

船側縦通桁に揃えて取付けられたウエブはそれに固着されなければならない。

上記に規定する高さより上方においては、水平補強ウエブの心距は、船首材の上端における1.5mまで漸増させても良い。

26.2.8.5 船尾材は鍛鋼、圧延鋼又は鋳鋼製でなければならない。

26.2.8.6 2.2.3及び2.2.4の規定による推進器柱及び舵柱の断面積並びにソールピースの断面係数は次の様に増加されなければならない。推進器柱は25%。舵柱及びソールピースは40%。

2.2.5.1の規定による、半釣下げ舵用のラダー・ホーンの寸法の決定は、第Ⅲ部“設備、配置及び機器”の2.2.2に述べられたy A級の耐水補強の船に対する計画速力以上の速力を用いて行われなければならない。

26.2.8.7 船尾の形状は推進器及び舵を保護する様なものでなければならない。船尾材は舵より後方100mm以内にアイスナイフを備えなければならない。

アイスナイフは船尾材の一部でなくても良い。但しこの場合、それは船の船殻に強固に固着されなければならない。

26.3 A1級の船の耐水補強

26.3.1 外 板

26.3.1.1 外板のアイスペルト1条が船の全長にわたり設けられなければならない。

アイスペルトの上縁は夏季満載吃水線の上方0.5mまで拡張しなければならず、下縁はバラスト状態の吃水線より0.5m下方になければならない。

船底がバラスト状態の吃水より下方0.5m未満である船のすべての部分では、船底外板の厚さはアイスペルトの厚さに等しくされなければならない、船底肋骨構造は本船級協会の承認した所に従って補強されなければならない。

26.3.1.2 上記の上下方向の限界内の外板の厚さは船首垂線から1.1bの範囲内の船の中央部分に対して2.10.2により規定された所よりも50%増加されなければならない、この断面より更に後方においては25%増加されなければならない。（ここで、bは船首垂線から、夏季満載吃水線の幅が最大である断面の最も近いものまでの距離）但し、外板の厚さ（mm）は次の算式により定められる値以上でなければならない。

$$s = 112.5 a \sqrt{\frac{p}{\sigma_y}} \quad \text{when } s \geq 21.8 \text{ mm} \\ s = 356 a \sqrt{\frac{p}{\sigma_y}} \quad (26.3.1.2-1)$$

$$s = 92 a \sqrt{\frac{p}{\sigma_y}} + 4 \quad \text{when } s < 21.8 \text{ mm} \\ s = 292 a \sqrt{\frac{p}{\sigma_y}} + 4 \quad (26.3.1.2-2)$$

ここで a = 問題の区域内の主肋骨の心距 (m)

p = 条件的水荷重強度 (tf/m [MPa]) で下記により定められた値。

— 船首垂線から $1.1 b$ の範囲内の船首部分に対しては次の算式による。

$$p = 0.0865L \left(1 + \frac{2L}{1000}\right) \alpha^{\frac{4}{5}} u_1$$

$$p = 0.0865L \left(1 + \frac{2L}{1000}\right) \alpha^{\frac{4}{5}} u_1 \cdot 10^{-2}$$

ここで α 及び u_1 については 26.2.1.2 を参照のこと。

— 船首垂線から $1.1 b$ の断面より後方の船の長さの部分に対しては次の算式による。

$$p = L - 35$$

$$\left[p = (L - 35) \cdot 10^{-2} \right]$$

但し $45 \text{ tf}/\text{m}$ [0.45 MPa] 以上であること。

外板のアイスペルトの厚さは 25 mm 以下、 12 mm 以上としなければならない。

26.3.2 肋骨

26.3.2.1 主肋骨と同一寸法の中間肋骨が船の全長にわたり設けられなければならない。

特設肋骨を用いる船側肋骨構造の場合は、26.2.3 の規定が適用されなければならない。但し条件的水荷重強度 p は 26.3.2.2 の規定による値とすること。

26.3.2.2 船倉主肋骨の断面係数 (cm^3) は 2.5.2 及び 2.11.3 により定められなければならない。但し次の算式により定められる値以上でなければならない。

$$W = 0.5ka l \frac{p}{\sigma_y} \cdot 10^3 \quad (26.3.2.2)$$
$$\left[W = 5ka l \frac{p}{\sigma_y} \right]$$

ここで a = 主肋骨の心距 (m)

l = 内底板から甲板迄の船側弦に沿って測った主肋骨のスパン (m)

k = 次の係数

单層甲板船に対しては 16

多層甲板船に対しては 13.5

p = 下記により定められる条件的水荷重強度 (tf/m [KN/m])

— 船首垂線から $1.1 b$ の範囲内の船の前部に対しては次の算式

$$p = 0.055L \left(1 + \frac{2L}{1000}\right) \alpha^{\frac{4}{5}} u_2$$

$$\left[p = 0.55L \left(1 + \frac{2L}{1000}\right) \alpha^{\frac{4}{5}} u_2 \right]$$

ここで α 及び u_2 については 26.2.2.1.3 を参照のこと。

— 船首垂線から $1.1 b$ の断面から後方、船尾隔壁までの船の長さの部分に対しては次の算式

$$p = 0.3L$$

$$\left[p = 3L \right]$$

但し $27 \text{ tf}/\text{m}$ [270 KN/m] 以上とする。

いかなる場合にも、船首垂線から $1.1 b$ までの範囲に対する条件的水荷重強度は船の長さの残りの部分に対するもの以上としなければならない。

26.3.2.3 甲板間部分の主肋骨の断面係数は 2.5.5 によって定められなければならない。

26.3.2.4 船首尾倉内の主肋骨の断面係数は2.5.4の規定によるものより40%以上増加されなければならない。

26.3.3 肋骨端の固着

26.3.3.1 肋骨端の固着は2.5.3、2.5.6及び2.6.5の規定により行われなければならない。

26.3.3.2 船倉の中間肋骨の下端は縁板から40mm以内の点まで延長されていなければならない。

二重底を持たない船の場合は、中間肋骨は肋板の上端より下の点まで伸ばされ、船底外板の外縁まで延長されなければならない。

中間肋骨の下端の固着は26.3.3.4の中の上端に対する規定と同様であることを勧告する。この場合、断切材を縁板から250mm以内に設けなければならない。

26.3.3.3 船首尾倉内の中間肋骨の下端は出来る限り船の竜骨線に近い位置になければならない。

26.3.3.4 船倉の中間肋骨の上端及び船首尾倉内の中間肋骨の上端は夏季満載吃水より上方650mm以上の所に配置され、主肋骨の間に設けられた水平断切材により固着されなければならない。これらの部材は肋骨と同一の寸法を持ち一線上に配置されなければならない。

26.3.3.5 甲板又は台甲板の所で終る中間肋骨はそれに固着することを要しない(切り放しで良い)。

26.3.4 船側縦通桁

26.3.4.1 船首尾倉内の船側縦通桁の寸法及び配置に対する規定は2.11.2の中に含まれている。

26.3.4.2 船首倉と船尾倉の間には荷重を分布する船側縦通桁が、船首尾倉内の船側縦通桁の延長を形成する様に設けられなければならない。

船首倉内の船側縦通桁のうちの1条は夏季満載吃水線より約300mm下方に配置されなければならない。

26.3.4.3 船側縦通桁と船側縦通桁の間又は、船側縦通桁と甲板又は内底との間の肋骨の支持されていない長さが1.4mを超える場合は、少くとも船首垂線から1.1b(bの値については26.3.1.2を参照のこと)後方までの区間においては、肋骨のウェブの厚さと同一の厚さの曲線を持つ分離した肘板から成る水平断切材が設けられなければならない。これらの肘板は一線上に配置され、外板並びに主及び中間肋骨のウェブに固着されなければならない。

26.3.5 船首材及び船尾材

26.3.5.1 鍛鋼、圧延鋼又は鋳鋼製の実体船首材が夏季満載吃水線の上方0.65mまで設けられなければならない。

26.3.5.2 2.2.2の規定による船首材の断面積は25%増加されなければならない。この際船首材の縦横比は変更しないものとする。

26.3.5.3 アイスベルトの高さの範囲では、船首材は750mm以下の間隔で設けられた水平ウェブにより補強されなければならない。このウェブの長さは600mm以上でなければならない。このウェブは最も近い肋骨まで伸ばされそれに固着されなければならない。船側縦通桁に揃えて設けられたウェブが上記のウェブに固着されなければならない。

26.3.5.4隣接する船側外板の増厚された板と組合せた十分な断面の棒又は長材で作られた組立船首材を用いても差支えない。この場合、船首材の強度は26.3.5.2の規定によるもの以上でなければならない。夏季満載吃水線より上方0.65mの高さまでの、棒(長材)に接続する外板の板はアイスベルトの厚さに比べ10%増しの厚さでなければならない。但し25mmを超えてはならない。

26.3.5.5 組立船首材は中心線桁板から夏季満載吃水線の上方0.6mの高さに伸びる中心線ウェブにより補強されなければならない。このウェブは600mm以下の間隔で密接された水平ウェブにより補強されなければならない。長さについては、このウェブは船首板と外板との接続部に重り、最も近い肋骨まで伸びそれに固着されなければならない。船側縦通桁に揃えて設けられたウェブは上記のウェブに固着されなければならない。

26.3.5.6 26.3.5.1に示された高さの上方では成形板製の船首材を設けても差支えない。成形板の厚さはアイスベルトの厚さの10%増しでなければならないが、25mmを超えてはならない。これは上甲板の位置における外板の厚

まで漸次変化されなければならない。水平ウェブの心臓は船首材の上端における 1.5 mまで漸次増大されても差支えない。

26.3.5.7 船首材（組立船首材が用いられる場合には長材又は棒について）の外板への接続は平坦でなければならぬ。

26.3.5.8 船尾材の断面積は 2.2.3 及び 2.2.4 に規定されるものに比べ 15% 増加されなければならない。舵柱の無い、即ち舵軸のある、単プロペラ船の船尾材に対してはソールピースの寸法は、第Ⅲ部“設備、配置及び機器”の 2.2.2 に述べられた A1 級の耐水補強の船に対する設計速力以上に対するソールピースの断面係数を確保するに必要なもの、及び 2.2.3.7 によるソールピースの最小寸法の 15% 増しのうち、大きな方としなければならない。

船尾材が半釣下げ舵のためのラダーホーンを持つ場合は、2.2.5.1 によるラダーホーンの寸法の決定は、第Ⅲ部“設備、配置及び機器”の 2.2.2 に述べられた A1 級の耐水補強の船に対する設計速力により行われなければならない。

26.4 A2 級船の耐水補強

26.4.1 外 板

26.4.1.1 船の全長にわたり 1 条の外板のアイスベルトが設けられなければならない。

アイスベルトの上縁は冬季満載吃水線の上方 0.5 mまで拡張していかなければならず、その下縁はバラスト状態における吃水線より 0.5 m下方になければならない。船底がバラスト状態における吃水線より 0.5 m未満にある船の全部分では、船底外板の厚さはアイスベルトの厚さと等しくされなければならない、船底肋骨は適当に補強されなければならない。

26.4.1.2 上記の上下方向の限界内の外板の厚さは、船首垂線から冬季満載吃水線の幅が最大になる最も近い断面までの間の船の中央部分に対する 2.10.2 により規定される厚さより、50% 増加されなければならない、それより後方では 15% 増加されなければならない。

但し外板の厚さは 25 mm 以下及び 10 mm 以上でなければならない。

26.4.1.3 下縁が冬季満載吃水線より下方にある様な載貨門用の開口を船側外板に設けてはならない。但し別の場合として、この様な載貨門の配置はその部分の外板及び船側肋骨が本船級協会により承認される方法で補強されることを条件として許容されることがある。

26.4.2 肋 骨

26.4.2.1 主肋骨の断面係数並びにその固着は 2.5.2, 2.5.3, 2.5.5, 2.5.7, 2.11.3, 及び 2.11.5 の規定に適合しなければならない。

26.4.2.2 船首部の船の長さ $b + 4a$ (ここで、 b は船首垂線から冬季満載吃水線が最大の幅になる最初の断面までの距離、 a は船の長さの中央部の主肋骨の心距) の範囲には、主肋骨と同一の寸法の中間肋骨が設けられなければならない。

26.4.2.3 船首尾倉間の主肋骨の断面係数は 2.5.4 に規定されるものより 20% 以上増加されなければならない。

26.4.2.4 中間肋骨の延長範囲及び固着については 26.3.3 を参照のこと。

26.4.3 船側縦通桁

2.11.2 に規定される船首倉内の船側縦通桁のうちの 1 条は冬季満載吃水線の下方 200 mm 及び 300 mm の間に配置されなければならない。この船側縦通桁の延長として、船首隔壁から後方 $b + 4a$ の距離の断面まで達する荷重分布用の船側縦通桁が設けられなければならない。（ b は船首垂線から冬季満載吃水線の幅が最大である最も近い断面までの距離、 a は船の長さの中央部の主肋骨の心距）

26.4.4 船首材及び船尾材

26.4.4.1 鍛鋼、圧延鋼又は鋳鋼で作られた船首材の断面積は 2.2.2 により規定されるものより 15% 大きくなければ

ればならない。縦横比は不变でなければならない。

26.4.4.2 冬季満載吃水線から上方 0.65 m の高さまでの成形鋼板製の船首材の厚さはアイスベルトの厚さよりも少くとも 10% 大きくなければならない。但しこの厚さは 25 mm を超えることを要しない。船首材は 600 mm 以下の心臓に設けられた水平ウェブにより防撲された中心線ウェブにより補強されなければならない。水平ウェブは長さにおいては船首材板の外板への接続部に重なり、最も近い肋骨まで伸ばされ、それに固着されなければならない。船側縦通桁に揃えて設けられたウェブは上記のウェブに固着されなければならない。

アイスベルトより上方の船首材構造に対する規定は 26.3.5.6 に含まれている。

船首材の外板への結合は平坦でなければならない。

26.4.4.3 船尾材の補強については 26.3.5.8 を参照のこと。但し増加率 15% を 10% に、耐水補強 A1 級を A2 級に読みかえるものとする。

26.5 A3 級の船の耐氷補強

26.5.1 外 板

26.5.1.1 1 条の外板アイスベルトが設けられなければならない。アイスベルトの上縁は冬季満載吃水線より上方に 0.5 m 拡張しなければならず、その下縁はバラスト状態における吃水線の下方 0.5 m になければならない。

長さについては、アイスベルトは船首材から冬季満載吃水線が最大の幅を持つ最も近い断面まで伸びなければならない。

船底がバラスト状態における吃水線の下方 0.5 m 未満にある船のすべての部分において、船底外板の厚さはアイスベルトの厚さに等しくされなければならない。船底肋骨は適当に補強されなければならない。

26.5.1.2 アイスベルトの厚さは、2.10.2 の規定による船の長さの中央部の船側外板の厚さより少くとも 25% 大きくなければならない。この外板の厚さの増加は 2 mm 以上でなければならない。アイスベルトの厚さは 25 mm 以下としなければならない。

26.5.2 肋 骨

26.5.2.1 主肋骨の断面係数及びその固着は 2.5.2, 2.5.3, 2.5.5 から 2.5.7 まで、2.11.3, 2.11.5 に述べられた規定に従わなければならない。

26.5.2.2 中間肋骨が、26.5.1.1 に指示された外板のアイスベルトの延長の範囲の船の長さにわたって設けられなければならない。船首隔壁より後方に設けられる中間肋骨の断面係数はその範囲内の主肋骨の断面係数の 75% 以上でなければならない。

26.5.2.3 船首倉の中の中間肋骨は主肋骨と同一の寸法を持たなければならない。

26.5.2.4 船首尾倉内の主肋骨の断面係数は 2.5.4 により規定された値より 20% 以上増加されなければならない。

26.5.2.5 中間肋骨の延長範囲及び固着に対する規定は 26.3.3 に含まれている。

26.5.3 船側縦通桁

船側縦通桁の寸法及び配置は 26.4.3 に規定されている。船首垂線から 0.15 L の断面と、同じく $b + 4a$ の断面との間に對して要求される荷重分布用縦通桁は、船首隔壁から与えられた断面までの範囲の中間肋骨の寸法が主肋骨の寸法と同一である限り、設けることを要しない。この縦通桁はまた第 2 甲板が吃水線に近接して配置されている限り省略しても良い。

26.5.4 船首材及び船尾材

26.5.4.1 鍛鋼、圧延鋼又は鋳鋼で製造された船首材の断面積は 2.2.2 により規定されるものより 7% 大きくなければならない。縦横比は不变で保たれなければならない。

26.5.4.2 冬季満載吃水線から上方 0.60 m の高さまでの成形鋼板製の船首材の厚さはアイスベルトの厚さの少くとも 20% 増しでなければならない。但しこの厚さは 25 mm を超えることを要しない。

上記の高さより上方では、船首材は上甲板の位置における外板の厚さまで漸次減少させて差支えない。

26.6 14級の船の耐氷補強

26.6.1 外 板

26.6.1.1 26.5.1.1に述べられた範囲に外板のアイスペルトが設けられなければならない。

26.6.1.2 アイスペルトの厚さは 2.10.2により規定される船の長さの中央部分の船側外板の厚さより25%以上とされなければならない。このアイスペルトの厚さは25mmを超えてはならない。

26.6.2 肋 骨

船首材から0.075Lの範囲内の肋骨の心距は 1.6.2によって船の長さの中央部分に対し定められた心距に関連し40%減少されなければならない。但しこれの心距は0.5m以下でなければならない。肋骨の寸法は心距の変更にかゝわらず2.5.2により定められなければならない。

心距を減少させる代りに中間肋骨を設けても差支えない。但しこれはバラスト状態の吃水より下方0.9mの高さから冬季満載吃水線の上方0.65mの高さまで伸び、その断面係数は船首尾介内の肋骨の断面係数の75%であるものとする。

26.6.3 船側縦通桁

26.6.1.1に述べられた区域内に、船首倉内の船側縦通桁の延長として船側縦通桁が設けられなければならない。もし可能ならば、上方及び下方の船側縦通桁はアイスペルトの縁がそれらの上に来る様に設けられなければならない。中間肋骨の端を船側縦通桁に接する様勧告する。

26.6.4 船首材及び船尾材

26.5.4.2を参照のこと。

26.7 Y4級の曳船の耐氷補強

26.7.1 外 板

26.7.1.1 1条の外板のアイスペルトが船の全長にわたり設けられなければならない。

アイスペルトの上縁は夏季満載吃水線より0.5m上方に拡張しなければならず、下縁は最小吃水（燃料及び貯蔵品が全く積載されていない）に相当する吃水線より0.8m下方になければならない。

船首垂線から0.15Lまでの範囲ではアイスペルトは船の竜骨線まで下方に拡張されなければならない。

26.7.1.2 上記の上下方向の限界内の外板の厚さは下記により定められた条件的氷荷重強度 p (t_f/m^2 [MPa]) を用い、算式(26.2.1.2-1)及び(26.2.1.2-2)により得られた値以上でなければならない。

— 船首垂線から0.35L以上の長さの範囲の船の前部に対しては

$$p = 1.9 \sqrt{A} v_s \alpha u_1 \cdot 10^{-2}$$

$$[p = 0.19 \sqrt{A} v_s \alpha u_1 \cdot 10^{-2}]$$

ここで A = 夏季満載吃水線までの吃水に相当する船の排水量 (t_f [MN])

v_s = 静水上の船の速力 (kt)

α = 船首垂線から0.1Lの断面において、夏季満載吃水線の前部への切線と船の中心線とのなす角(度)

u_1 = 表26.7.1.2に規定される係数

表26.7.1.2

β	11	20	30	40
u_1	1.0	0.88	0.78	0.68
β = 船首垂線から0.1Lの断面内の夏季満載吃水線の高さにおいて肋骨への切線と垂直線とのなす角(度)				

— 船首垂線から 0.35L 後方の断面及び船尾垂線から 0.2L 前方の断面との間の船の長さの中央部に対しては

$$p = 2.4L - 33$$

$$[p = (2.4L - 33) \cdot 10^{-2}]$$

— 船尾垂線から 0.2L 以上前方までの船尾部に対しては p は船首部の水の荷重の 75% に等しくとるものとする。

いかなる場合も、船首部及び船尾部に対する条件的水荷重強度は船の長さの中央部分に対するもの未満としてはならない。

26.7.2 特設肋骨を用いない船側肋骨構造

26.7.2.1 肋 骨

1. 船首尾隔壁間にわたり中間肋骨が設けられなければならない。これらの肋骨の寸法は主肋骨のものと同一でなければならない。

2. 主肋骨の断面係数は、条件的水荷重強度 p (t_f/m [KN/m]) を下記の様にとり算式 (26.2.2.1.3) により得られた値以上でなければならない。

— 船首垂線から 0.35L 以上の長さにわたる船の前部に対しては

$$p = 1.7k_1 \sqrt{A} v_s \alpha u_2 \cdot 10^{-2}$$

$$[p = 1.7k_1 \sqrt{A} v_s \alpha u_2]$$

ここで $k_1 = 1.22 - 0.011L$, 但し 0.5 以上のこと。

A 及び v_s については 26.7.1.2 を参照のこと。

α = 船首垂線から 0.2L の断面において、夏季満載吃水線の前部への切線と船の中心線とのなす角度

u_2 = 表 26.7.2.1.2 に規定される係数

表 26.7.2.1.2

β	8 以下	10	15	20	30 以上
u_2	1.0	0.88	0.72	0.61	0.46

β = 船首垂線から 0.2L の断面内の夏季満載吃水線の高さにおい

て、肋骨への切線と垂直線とのなす角(度)

— 船首垂線から 0.35L 後方の断面及び船尾垂線から 0.2L 前方の断面との間の船の長さの中央部に対しては

$$p = 0.3L + 13$$

$$[p = (0.3L + 13) \cdot 10]$$

— 船尾垂線から 0.2L 以上前方までの船尾部に対しては p は船首部の水の荷重の 75% に等しくとるものとする。

いかなる場合も、船首部及び船尾部に対する条件的水荷重強度は船の長さの中央部分に対するもの未満としてはならない。

3. 特設肋骨を用いない船側肋骨構造が用いられる場合は、機関室の中に設けられる特設肋骨 (14.4.2 を参照のこと) の寸法は 26.7.3.1.4 により規定された値以上でなければならない。

4. 中間肋骨の端部の固着については 26.2.2.2 を参照のこと。

26.7.2.2 船側縦通桁

1. 船首尾隔壁間の全長にわたりて、船首尾倉内の船側縦通桁の連続部となる荷重分布用船側縦通桁を設けなければならない。船側縦通桁の心距並びに船側縦通桁と内底との間隔又は船側縦通桁と甲板(台甲板)との間隔は 1.4m 以下でなければならない。

船側縦通桁のうち 1 条はその全長にわたり、夏季満載吃水線より約 300mm 下方に配置されなければならない。

2. 船側縦通桁の寸法及び構造の詳細については26.2.2.3.2を参照のこと。

26.7.3 特設肋骨を用いる船側肋骨構造

26.7.3.1 肋骨

1. 特設肋骨を用いる肋骨構造が使われる場合は、船首尾隔壁間の船の長さのどの部分でも、主肋骨と同一の断面を持つ中間肋骨が設けられなければならない。

2. 特設肋骨の間隔は主肋骨の心距の4倍以下でなければならない。

3. 主肋骨の断面係数は26.7.2.1.2により定められる条件的水荷重強度 p を用いて算式(26.2.3.1.4)により得られる値以上でなければならない。

4. 特設肋骨の断面係数は26.7.2.1により定められる条件的水荷重強度 p 及び26.2.3.1.7による係数 e を用いて算式(26.2.3.1.5)により得られる値以上でなければならない。

5. 特設肋骨の寸法は2.5.7.1, 26.2.3.1.8及び26.2.3.1.9の規定によらなければならない。

26.7.3.2 船側縦通桁

1. 船側縦通桁は船首尾隔壁間の船の長さにわたり設けられなければならない。船側縦通桁の心距並びに船側縦通桁と甲板との間隔又は船側縦通桁と内底との間隔は2.5m以下でなければならない。

2. 26.7.3.2.1に規定された間隔が2.0mを超える場合は、26.3.4.3に規定された構造の中間水平部材が、船側縦通桁と船側縦通桁の間並びに船側縦通桁と甲板との間又は船側縦通桁と内底との間に設けられなければならない。

3. 船側縦通桁のウエブの幅及び面材の断面積は特設肋骨のものと同一でなければならない。

26.7.4 船首尾倉内の船側肋骨構造

船首尾倉内の船側肋骨構造は26.7.2.1.2において $u_2 = 1$ として定められた条件的水荷重強度の適當値 p を用いて26.2.4の規定に適合しなければならない。

26.7.5 甲板

アイスベルトの区域内に位置する甲板及び台甲板は26.7.2.1.2において定められた条件的水荷重強度の適當値を用いて、26.2.5の規定に適合しなければならない。

26.7.6 横隔壁

横隔壁は垂直防撓材の2心距の幅、但し1.2m以上、に対して水平防撓材により補強されなければならない。水平防撓材の心距は垂直防撓材の心距又は700mmのうち小さいもの以下でなければならない。

26.7.7 船首材及び船尾材

26.7.7.1 船首材は26.2.8.1, 26.2.8.3及び26.2.8.4の規定に適合しなければならない。

船首材の断面積は14.2.1.1の規定による値より50%大きくなければならない。

26.7.7.2 船尾材は26.2.8.5の規定に適合しなければならない。14.2.2.1による船尾材の断面積は30%増加されなければならない。

26.8 A1級の曳船における耐氷補強

26.8.1 外板

26.8.1.1 1条の外板のアイスベルトが船の全長にわたり設けられなければならない。アイスベルトの上縁は夏季満載吃水線の上方に0.5m拡張しなければならず、下縁は最小吃水（燃料及び貯蔵品を全く積載しない）に相当する吃水線より0.8m下方になければならない。

船首垂線から0.1L以内ではアイスベルトは船の竜骨線まで下方に拡張しなければならない。

26.8.1.2 上記の上下の限界内における外板の厚さは下記の様に定められた条件的水荷重強度 p (tf/m²[MPa])を用いて算式(26.3.1.2-2)により得られた厚さ以上でなければならない。

— 船首垂線から0.35L以上の長さにわたる船の前部に対しては

$$p = 1.10 \sqrt{d} v_s \alpha u_1 \cdot 10^{-2}$$

$$[p = 0.11 \sqrt{d} v_s \alpha u_1 \cdot 10^{-2}]$$

ここで d, v_s, α 及び u_1 については 26.7.1.2 を参照のこと。

— 船首垂線から 0.35L の断面より後方で、船尾垂線から 0.2L の断面の前方の船の長さの中間部に対しては

$$p = 1.15 L - 13$$

$$[p = (1.15 L - 13) \cdot 10^{-2}]$$

— 船尾垂線から 0.2L 以上前方までの長さにわたる船の後部に対しては、p は前部に対する水荷重の 75% に等しくとられなければならない。

いかなる場合も、前部及び後部に対する条件的水荷重強度は船の長さの中央部分に対する値以上とされなければならない。

26.8.2 船側肋骨構造

26.8.2.1 肋骨

1. 船首隔壁及び船尾隔壁の間の全長にわたり中間肋骨が設けられなければならない。これらの肋骨の寸法は主肋骨のものと同一でなければならない。

2. 主肋骨の断面係数は 2.5.2 及び 2.11.3 に従って定められなければならない。但しそれは下記の様に定められた条件的水荷重条件 p (t_f/m [MN/m]) を用いて、算式 (2.6.3.2.2) により得られた値以上でなければならない。

— 船首垂線から 0.35L 以上の長さにわたる船の前部に対しては

$$p = 1.1 k_1 \sqrt{d} v_s \alpha u_2 \cdot 10^{-2}$$

$$[p = 1.1 k_1 \sqrt{d} v_s \alpha u_2]$$

ここで、 k_1, d, v_s, α 及び u_2 については 26.7.2.1.2 を参照のこと。

— 船首垂線から 0.35L の断面より後方で、船尾垂線から 0.2L 前方の船の長さの中間部分に対しては

$$p = 0.3 L + 6$$

$$[p = (0.3 L + 6) \cdot 10^{-2}]$$

— 船尾垂線から 0.2L 以上前方までの長さにわたる船の後部に対しては、p は前部に対する水荷重の 75% に等しくとられなければならない。

いかなる場合も、前部及び後部に対する条件的水荷重強度は船の長さの中央部分に対する値以上にされなければならない。

3. 機関室内に設けられる特設肋骨 (14.4.2 参照のこと) の寸法は、26.8.2.1.2 において定められた条件的水荷重 p を用いて、26.7.3.1.4 により規定された値以上でなければならない。

4. 肋骨の端部の取付けについては 26.3.3 を参照のこと。

26.8.2.2 船側縦通桁

船側縦通桁の配置、寸法及び構造の詳細については 26.7.2.2 を参照のこと。

26.8.3 船首尾倉内の船側肋骨構造

船首尾倉内の肋骨構造は、26.8.2.1.2 において $u_2 = 1$ とし定められた条件的水荷重を用いて、26.2.4 の規定に適合しなければならない。

26.8.4 船首材及び船尾材

26.8.4.1 船首材は 26.3.5.1, 26.3.5.3, 26.3.5.4, 26.3.5.5, 26.3.5.6, 26.3.5.7 の規定に適合しなければならない。

船首材の断面積は14.2.1.1により規定された値より30%大きくなければならない。組立船首材の場合は、棒(長材)に接続する外板の厚さはアイスペルトの前端部分の厚さより30%大きくなければならない。

26.8.4.2 船尾材は鍛鋼、圧延鋼又は鋳鋼で作られなければならない。別個の铸造又は鍛造部で構造され、溶接により結合された船尾材は容認される。

船尾材の断面積は14.2.2.1により規定された値より20%大きくなければならない。

26.9 A3級の曳船における耐氷補強

26.9.1 外 板

26.9.1.1 船の全長にわたり外板のアイスペルトが設けられなければならない。アイスペルトの上縁は夏季満載吃水線より0.3m上方に拡張しなければならず、下縁は最小吃水(燃料及び貯蔵品を全く積載しない)に相当する吃水線より0.6m下方になければならない。

船首垂線より0.1Lの範囲内では、アイスペルトは船の竜骨線まで拡張しなければならない。

26.9.1.2 上記の上下方向の限界内では、外板の厚さ(mm)は次の算式により定められた値以上でなければならぬ。

$$s = 184a\sqrt{\frac{P}{\sigma_y}} + 4$$

$$\left[s = 584a\sqrt{\frac{P}{\sigma_y}} + 4 \right]$$

ここで a = 問題にされている区域内の肋骨心距(即ち主肋骨と主肋骨の間の距離又は、もし中間肋骨が設けられているときは、主肋骨と中間肋骨の間の距離)(m)

P = 下記の様に定められた条件的水荷重強度(t_f/m^2 [MPa])

— 船首垂線から0.35L以上の長さにわたる船の前部に対しては

$$P = 0.7\sqrt{A}v_s \alpha u_i \cdot 10^{-2}$$

$$\left[P = 0.07\sqrt{A}v_s \alpha u_i \cdot 10^{-2} \right]$$

ここで A 、 v_s 、 α 及び u_i については26.7.1.2を参照のこと。

— 船首垂線から0.35Lの断面より後方の船の長さの部分に対しては

$$P = 0.311L - 4.2$$

$$\left[P = (0.311L - 4.2) \cdot 10^{-2} \right]$$

いかなる場合も、前部に対する条件的水荷重強度は船の長さの中央部分に対する値以上としなければならない。

26.9.2 船側肋骨構造

26.9.2.1 肋 骨

1. 主肋骨及び中間肋骨(もし設けられていれば)の断面係数(cm^3)は2.5.2及び2.11.3に従って定められなければならない。但し、それは次の算式により定められた値以上でなければならない。

$$W = ka l \frac{P}{\sigma_y} \cdot 10^3$$

(26.9.2.1.1)

$$\left[W = 10ka l \frac{P}{\sigma_y} \right]$$

ここで a = 問題にされている区域内の肋骨心距(即ち、主肋骨と主肋骨の間隔又は、もし中間肋骨が設けられていれば、主肋骨と中間肋骨の間隔)(m)

l = 内底板又は肋板の上端から甲板までの船側弦に沿って測った肋骨のスパン(m)

k = 次の係数

一層甲板船に対しては 16

$p =$ 下記の様に定められた条件的水荷重強度 ($t f / m$ [KN/m])

— 船首垂線から $0.35L$ 以上の長さにわたる船の前部に対しては

$$p = 0.7 k_1 \sqrt{A} v_s \alpha u_2 \cdot 10^{-2}$$

$$[p = 0.7 k_1 \sqrt{A} v_s \alpha u_2]$$

ここで k_1 , A , v_s , α 及び u_2 については 26.7.2.1.2 を参照のこと。

— 船首垂線から $0.35L$ の断面より後方の船の長さの部分に対しては

$$p = 0.0945L + 4.5$$

$$[p = (0.0945L + 4.5) \cdot 10]$$

いかなる場合も、前部に対する条件的水荷重強度は船の長さの中央部分に対する値以上としなければならない。

2. 船首尾倉内の主肋骨の断面係数は 26.9.2.11において $u_2 = 1$ として定められた条件的水荷重を用いて 26.2.4 から得られた値以上としなければならない。

3. 肋骨の端部の延長及び固着については 26.3.3 を参照のこと。

26.9.2.2 船側縦通桁

1. 船首垂線から $0.35L$ の範囲の前部に、荷重分布用船側縦通桁が設けられなければならない。

船側縦通桁の心距並びに縦通桁と内底との間の距離又は縦通桁と甲板（台甲板）との間の距離は $1.4m$ 以下でなければならない。

2. 2.11.2 により規定された船首倉内の船側縦通桁のうちの 1 条は夏季満載吃水線より約 300 mm 下方に配置され船の全長にわたり伸びなければならない。

3. 船側縦通桁の寸法及び構造の詳細については 26.2.2.3.2 を参照のこと。

26.9.3 船首材及び船尾材

26.9.3.1 船首材の断面積は 14.2.1.1 により規定された値より 20% 大きくなければならない。組立船首材の場合は、棒（長材）に接続する外板の厚さはアイスベルトの前端の厚さより 30% 大きくなければならない。

26.9.3.2 船尾材は鍛鋼、圧延鋼又は鋳鋼で作られなければならない。別個の鋳造又は鍛造部分を溶接して作った船尾材は容認される。

船尾材の断面積は 14.2.2.1 により規定された値より 10% 大きくなければならない。

第 2 章 1970 年迄に日本で実施された 耐水船舶船級規則調査の内容

(a) Polar vessel または ice class boat と呼ばれる商船の船級規則の調査

(1) ソ連の規則、特にソ連船級協会(レギストル USSR)と NKとの関連

(a) 耐水に関するソ連船級協会の要求

氷海航行をするために耐水強化を施すソ連の船が外国の造船所で建造されており、それらの船は各国の船級協会の耐水船級規則に適合するように建造されている。これらの船が引渡された後色々な氷状の下で運航し得るために、注文主や船舶運航者は諸外国船級協会の船体の強度に対する要求規則を知悉していることが必要である。

別表は耐水強化が施されていない通常船に対する耐水強化船の船体強化の程度を示す。

別図は各國船級協会及びソ連船級協会の資料に基く氷海航行船の肋骨の実際の強度を示す。

氷海航行船の強度に関して各國船級協会の規則が要求している事項や、強化工事のカーブ等を比較対象分析してみると結論として次のことがいえる。

各国船級協会規則に示された氷海航行輸送船の強度に対する基本的補足的諸要求の総合表

船級協会名	規定した年	耐水クラス	外板					フレーム					
			耐氷帯の巾(m)		通常船の中央部の外板厚さに対する外板厚さの増大率及び強化区域の長さ			肋					
			LWLより上	空荷W.L.より下	船首(船首材から)	中央部	船尾	船の縦方向における強化区域					
			LWLより上	空荷W.L.より下	船首(船首材から)	中央部	船尾	主肋骨					
船首尾													
UL(ARKT) 補足的強化は各ケースに応じて許可を受けること。													
RUSSR	1956	UL	0.5	B WLより下 1.0	0.15 L間60 但し25mm以下	15	船尾材から 0.15 L間20	0.15 L間130	0.25 L間から50				
		L	0.4	全上 0.9	0.15 L間40 但し25mm以下	-	-	(0.2~0.25)L間 中央部の主肋骨は基本規定による。 但し25.5mm以下 12.5mm以上					
		1	0.76	0.61	2.5 B間50 但し25.5mm以下 12.5mm以上	25	25 但し25.5mm以下 12.5mm以上	-	-				
LR	1958	2	0.76	0.61	B間 50 但し25.5mm以下 12.5mm以上	15	15 但し25.5mm以下 12.5mm以上	-	-				
		3	0.76	0.61	B間 50	-	-	-	-				
AB	1959	A I (耐水)	0.915	0.915	0.6 L間, 但し L=76m の船 は15mm以上 L = 152 m の船は 25.5 mm 以下		-	-	-				
NV	1958	I A I JB	0.5	0.5	(6 + 0.11L) mm 以下で B間 25mm 以下		-	-	-				
FBN	1958	1 A	0.5	0.5	1.5 B間 50 但し12mm以上 25mm以下	25	25	-	-				
		1 B	0.5	0.5	B間 25 但し10mm以上 25mm以下	15	15	-	-				
		1 C	0.5	0.5	全上	-	-	-	-				
BV	1959	<ICe>		0.61	L = 60~120 mにおいて 0.2 L間50 但し25mm以下	-	-	-	-				
		I, II, III級は夫々フィンランドの海事協会規定の 1A, 1B, 1C と一致する。											
GL	1956	E +	0.6	0.6	0.15 L間 50 但し25mm以下	-	-	-	-				
		E	0.6	0.6	全上	-	-	-	-				
NK	1956	耐水	0.915	0.915	0.2 L間(5.1 + 0.13L) mm 但し15mm以上 25mm以下	-	-	-	-				
PR	1957		LA, LB, Lは夫々フィンランドの海事協会規定の 1A, 1B, 1C と一致する。										
RI	1956		補足的強化は特別許可を受けること。										

- (注意) 1. 船首尾船の縦通材はレギストル・USSRの規定以外は基本規定によってきめる。
 2. 氷帶外板の厚さより船の強化されていない部分の外板への移行は漸次でなければならぬ。
 3. 主機関の出力係数の項は1962年の表になかったが別の資料に基いて追加した。

ミ ン グ				船首尾材	舵	軸		推進器	主機関の出力係数
骨			船側縦通材	船首材 船尾材	舵頭材	クランク軸 推力軸 中間軸 の直徑 増大率 %	船尾軸 の直徑 増大率 %	材料の 強度と dB Kg/mm	SHP-C.L.B の C
と肋骨抵抗率の増加率%	舷の高さに対して 中間肋骨の高さ	縦通材取付区域 (船首材からの距離) 及び縦通材間隔 m	断面積の 増 大 率 %						
船尾艤									

130	全長に亘り所要区域の主肋骨の50	夏期LWLの甲板から肋板上端まで	桿型フレーム式で 間隔は1.8 - 2.0 m以内がよい。	50	25	25	8	14	強化
	(0.20 - 0.25) L 間主肋骨の70	全 上	間隔は 1.8 - 2.0 m 以内	25	-	10	-	5	-
	全長に亘り主肋骨と全じ	LWL 上 0.76 m か ら軽喫水線下 0.915 m まで	中間肋骨が主肋骨 の75%のとき長さ 1.5 B間 1.85m以上	25	25	25	8	15	44
	2.5 B間又はLWL 上最大横断面まで 主肋骨に全じ	全 上	全 上	25	25	12.5	4	8	44
	1.5 B間規定表によ る。	»	»	10	7.5	7.5	-	5	44
	0.6 L間船首艤内 主肋骨の75	LWL 上の甲板か ら肋板まで	-	-	-	10	-	単推進器5 双 ツ 10	-
	1.5 B間船首隔壁 から船首部で ($L^2/160 + 10$ cm) 船尾部で ($L^2/100 + 10$ cm) 但し主肋骨の75% 以下	LWL 上 0.5 m か ら軽喫水線下 1.5 mまで	-	-	-	25	-	5	45
	全長に亘り主肋骨と全じ	冬期L WL 上 0.5 mから二重底縁板 又は肋板まで	-	25	25	11	8	15	50 (1.40)
	船首材から 2 B間 主肋骨と全じ	全 上	-	15	10	6	4	8	- 1.30 (1.05)
	全 上	»	中間肋骨が主肋骨 の75%のとき 2 B間	-	-	4	-	5	- 1.00 (0.80)
	(0.20 - 0.25) L 間規定表による	LWL 上の甲板か ら肋板まで	中間肋骨が主肋骨 の75%のとき 2 B間	-	-	10	-	5	-

0.075 L間 船首艤内 主肋骨の75	LWL 上 0.9 m か ら軽喫水線下 0.9 mまで	最大巾の点まで 間隔は 2 m 以内	溶接鋼板製船首 尾材の厚さは水 面に接する外板 より薄くないと。	10	-	-	-	45	
Bの間 船首艤内 主肋骨の75	全 上	0.15 L間 間隔は 2 m 以内	-	-	-	-	-	-	
0.2 L間 船首艤内 主肋骨の75	補強部上の甲板か ら肋板まで	0.2 L間	-	-	10	-	単推進器5 双 ツ 10	-	

① 北極海その他冬期水結する海域に於ける貨物輸送量の増大及び貨物船の貨物積載量と速力の増加は、氷海航行貨物船の強度増加に対する要求が絶えず増大していることを示している。

② 各国の船級協会の中で英國のロイドが氷海航行船の補強について最も高い要求を出している。

③ 肋骨、外板及び耐水強化区域の長さ高さについては、ソ連船級規則のウーエル・クラス船に対する要求はすべての他の船級協会の規則による最高の耐水クラス船に対する要求よりも高い。

④ 船首部肋骨に関するソ連船級規則のエル級に対する要求はロイドの耐水船級Ⅲに対する要求と同等であるが、船首端部の外板板厚に対するソ連船級規則の要求は、ロイドのそれより薄いから、エル級の耐水強度はロイドの規則のⅢ級船よりも劣る。

⑤ 船体の氷帶部の外板板厚の増大に関するロイドⅠ、Ⅱ級船に対する要求は、動力装置の大小を考慮に入れているが、これは氷海航行速力が氷海航行時の貨物積載量の大小に影響を与える点から観て論拠のあることであるから、ソ連船級規則が氷海航行船に対する新しい規則を設ける場合には考慮にいれるべきであろう。

⑥ 氷海を航行する船の外板と肋骨の強度を決める場合、各國の船級協会は氷海航行中の積荷量、船体の形状、氷中に於ける速力、氷の厚さ及び強度等を規定する基本的要素について考慮を払っていない。このことが耐水補強に関する要求を不十分なものにしている。ソ連船級規則の新規則を定める場合には、上記諸要素の作用を実地に試して、氷海航行時の各部耐水構造の寸法を決定する方法を検討すべきである。

(b) 氷中航行船の強度について

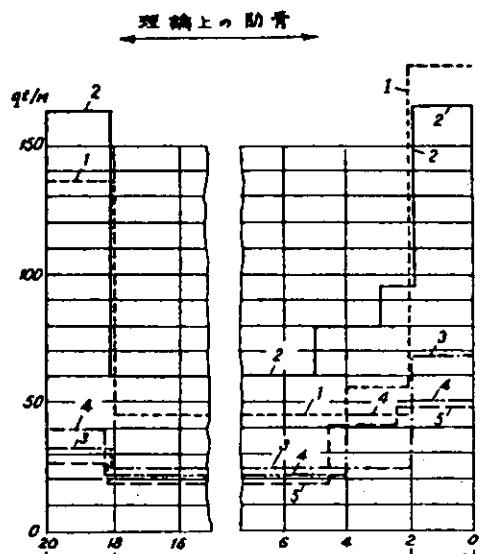
① 碎氷船のクラス分け

北極洋碎氷船、即ち1級碎氷船は、2万馬力以上の動力装置をもつ碎氷船で、航行用運河の開設、船舶の誘導、氷の破碎、曳船、北極海での全航海に亘る厚い氷の壁や氷塊などの突破を目的とする。この碎氷船は冬期氷の多い場合に凍結寸前の北極海以外の海（バルト海、白海、オホーツク海）でも利用される。このクラスに属するものとして原子力碎氷船「レーニン」（44,000馬力）や、「モスクワ」型碎氷船（22,000馬力）がある。

中級碎氷船、即ち第2碎氷船は9,000～20,000馬力の碎氷船を指し、運河開設、船舶の誘導、氷の破碎、曳船、夏秋期に北極海で、冬期に凍結寸前の北極海以外の海で氷の壁や氷塊の突破に用いられる。この碎氷船は北極洋碎氷船と共同で航路の氷状の困難な海域で船舶の誘導をする。このクラスの船として碎氷船「シベリー」「クラシン」を挙げることができる。

港用碎氷船、即ち第3級碎氷船には、各種港湾、夏秋期に於ける北極海の停泊地、冬期に凍結寸前の北極海以外の海での運行作業、1、2級の碎氷船と共同で船舶の誘導作業に従事する碎氷船が属する。この級の碎氷船の動力装置の出力は非常に広範囲に亘るが、通常5,000～6,000馬力をこえない程度である。このクラスの船舶には碎氷船「イリヤ・モロメツ」（3,700馬力）と「レダコーⅠ」（5,400馬力）が属する。

② 氷海航行輸送船のクラス分け



主線同長 150 M. 幅 20.5M. 深 12.0M.

吃水 8.4 M. 載貨重量 10,000t

各船級協会の最高の耐水クラスに

おける規定による構造の船の強度

1. LR (1958) クラス 1
2. R.D.S.S.R. クラス UL
3. G.L. (1956) クラス E+
4. N.V. (1958) クラス IAIJ's
5. N.K. (1958) 耐水強度

ウー・エル北極用クラスの用途及び目的は、北極海、南極海で航海期の全期に亘り砕氷船の誘導による組織的な航海及び厚さ0.5mまでの一面の氷厚や結合度の高い氷山群の中での単独航海である。このクラスの船舶は船体の外側、少くともその船首を砕氷型とすべきである。

ウー・エル北極海クラスの船の強度は、その船が氷の圧縮に耐えることを可能にし、「レナ」「アムグエマ」型の強度と同等でなければならない。

ウー・エルクラスの船は北極海、凍結寸前の北極海以外の海での航海期の全期に亘る砕氷船の誘導による航海及び破碎された氷中の単独航行をその目的としている。ウー・エルクラスはその数では氷中航海を目的とした輸送船中最大のグループである。近代船舶に対する氷海航行の諸要求の高度化（この要求の原因は新しい強力な砕氷船の導入、北極や凍結寸前の北極海以外の海での航海期間の延長である）を考慮するとウー・エルクラスの船舶の強度はソ連船級規則（1956年発行）ウー・エルクラスのすでに建造された船舶の強度をいくらか上回らなければならない。氷に対する船の質を向上させるには、ウー・エルクラスの船舶に半砕氷船構造の船首をとりつけることが望ましい。

エルクラスの船舶の使用目的は、凍結寸前の北極海以外の諸海、夏期に於ける氷結度が中位及び軽微な年では北極海で砕氷船の誘導のもとに航行するのである。エルクラスの船舶は氷による圧縮には耐えられない。これらの船舶の船体の強度はソ連船級（1965年発行）エルクラスの要求に基いて建造された船舶の強度には相応する。

(3) 船舶の強度と定格氷中荷重との比較

船舶の強度と氷中を航行する場合の実際的条件との対応を評価する場合、氷中荷重を規定する基本的パラメータの大きさ、即ち氷と衝突する前の船舶速力、氷の強度と厚さを選択しなければならない。これらのパラメータは船体の氷に対する強さが、その船が支障なく航行することを保障するものでなければならない。

船首部の氷中荷重を規定するには、一定の定格速力をもった船舶の氷原との衝突を、その氷原の屈曲を考慮せず検討すべきである。

一方中央部の荷重は氷原の屈曲を考慮に入れた上で一定の厚さの氷中に於ける船体の圧縮条件から規定されねばならない。そしてこの後理論的荷重図を作り、その曲線部分を直線化することによって定格氷中荷重を決めることができる。定格氷中荷重として採用される船の速力は氷塊との衝突に於いて（破壊とまでいかず衝突部にはほんの部分的破壊が生ずる程度の）最大限度に許容される速力である。この仮定では船舶の舷と氷原の端の間には衝突を緩和するのに役立つ、形の小さな氷塊はこの場合存在しないとしており、また特に比較的薄い氷の中を航行する際、氷中荷重の大きさを軽減する氷原の屈曲も考慮外である。当然のことながらこのような基本的な状態にあっては、船体を損傷することなく船舶が氷中を航行し得る実際の速航速力は定格速力の選択条件より良好となる。

砕氷船用の定格速力、氷厚を決定する際考慮されたのはその船の用途と出力である。経験からして第1クラスの強力な砕氷船の氷との定格衝突速力は12ノットまで可能である。中級砕氷船（第2クラス）、港湾砕氷船（第3クラス）の定格衝突速力は夫々8ノット、6ノットである。輸送船の定格速力は船舶の耐氷船級に応じて決まり、強力な砕氷船に後続して運河を航行する際の運動が考慮される。この際氷中航行に於いて評判の良かった船舶の氷中航行の経験を考慮に入れてある。上述のこととに適応して氷中航行船用に採用されたのが氷との条件つき定格衝突速力である。氷の強度の特性については北極用の資料が用いられた。

輸送船や曳船の衝突時に生ずる破壊状態は衝突の場合 $\sigma_c = 400 \text{ T/m}^2$ 、圧縮の場合 $-\sigma_c = 200 \text{ T/m}^2$ 、屈曲の場合は 100 T/m^2 であった。砕氷船に於いては、この強度の特性は、短期航海を考慮して25%増加した。

耐氷船級エルの輸送船の場合は圧縮など無い快適な氷中航行を行なうことが必要である。

(4) 耐氷帶外板の寸法と厚さ

普通氷の荷重の分布は船の舷に沿った比較的小ない部分（主として実際の喫水線の部分）に作用し局部的なもの

である。氷の荷重の加わる範囲は船が氷に締めつけられた時に著しく増大する。直接氷の影響を受けるために総ての水中航行船や砕氷船には強度の高い耐氷帯が取付けられている。耐氷帯部分での外板の強化は外板の厚さを増すことと、肋骨と肋骨との間隔をせばめることによって確保される。

外板の耐氷帶には屢々 $\sigma_T = 45 \sim 50 \text{ kg/mm}^2$ までと、それ以上の引張強度の高い鋼鉄が利用される。これによって氷に対する補強の重量を少なくすることができる。

耐氷帶の長さ

耐氷帶の長さは船の運用や船型如何によって定められ、夫々の船級協会の規則に定められている。この際載貨状態やバラスト状態で航行する船の喫水の変化、船の傾斜と喫水差の角度、船体を氷が圧縮する力、その圧縮の際に舷附近にみられる氷の堆積を考慮に入れなければならない。

浮遊している氷はその体積の大部分が水中にある。即ち船の喫水線より実質的には下にある。その上舷の傾斜の結果著しい量の氷塊が船体で押し沈められる。このことについては船体の水中部分にみられる数多くの氷との衝突の痕跡で証明される。船体の水中部分を氷が取り巻くのは船首部から中央部にかけて、また喫水線から下にかけての可成りの距離に亘って起る。従って実際の喫水線より下の耐氷帶の巾は喫水線より上の巾よりかなり大きくならなければならない。

次の図は異なる船級協会の規定に従って作った海上輸送船耐氷帶の配置図である。氷に対して補強されていない船の中央部に於ける外板の厚さに比較した耐氷帶の厚さの増加率がパーセンテージで示されている。

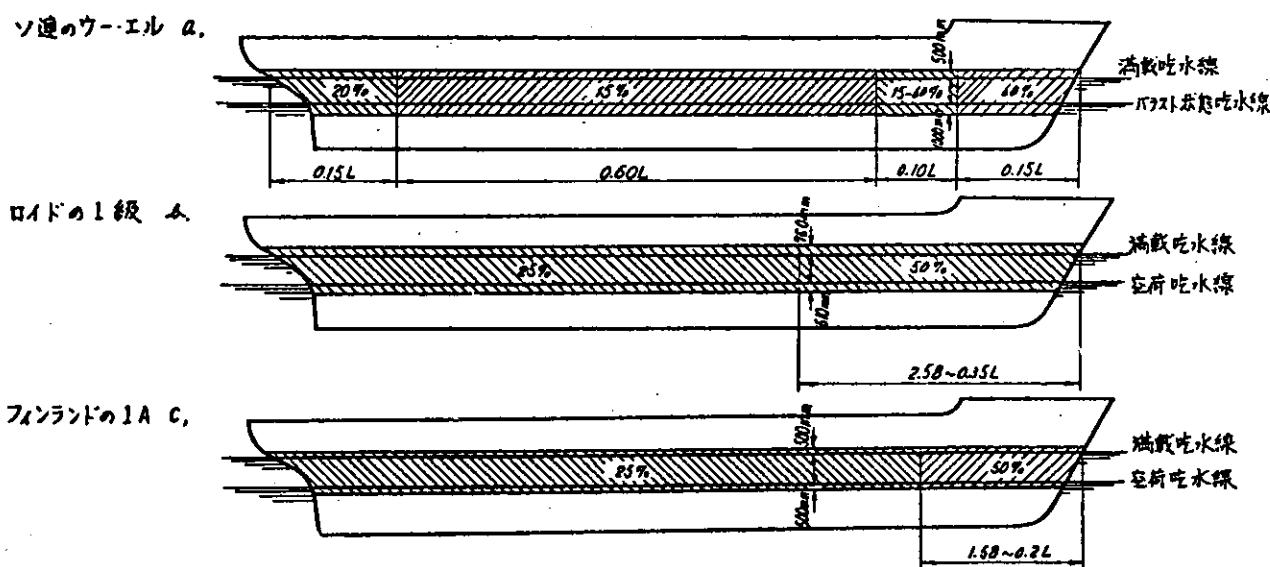


図1 船級協会の規定による耐氷帶

以下に述べることはソ連船の建造計画と過去の経験に基いて作られた勧告であり、水中航行船と砕氷船の耐氷帶の寸法に関するものである。

「勧告案」

I 及び II 級の砕氷船にとっては、中央部の耐氷帶の下縁端は最大排水量に一致する喫水線の下少くとも 3,500 mm 以上は広がっていなければならない。このように下に向って深く帯を張ることは、I 及び II 級の砕氷船が活動を予定する氷海の氷の厚さに対応するためである。また同時にこの帶の深さは水深が浅いため砕氷船が最少限の喫水で航行せねばならぬ時のことも考えて決めたものである。耐氷帶の上縁端は砕氷船の最大喫水に一致する喫水線から少くとも、800 mm 以上はなければならない。これらの寸法を決定するに際して、砕氷船の起り得る傾斜と海面に現れる大きな氷塊との接触が考慮された。

第3級の砕氷船にとっては、耐氷帶の巾は、海面の部分で約500mm、水中下の巾は最大排水量に一致する喫水線から水中1,000mm見込まねばならない。

どの級の砕氷船でも船首部の氷による損傷は、耐氷帶の下の部分で多く発生することを考慮して、船首部耐氷帶を船首垂直線から船尾に向かって0.2Lの長さの範囲で竜骨まで延長することを提案する。船首部分から中央に移るに従って減ってゆく耐氷帶の厚さの減り具合は徐々でなければならない。耐氷帶附近に接する上下の外板の厚さのへり具合も船の全長に亘ってゆるやかでなければならない。

ウー・エル・アルクトとウー・エル・クラスの輸送船では、耐氷帶は中央部で夏期満載喫水線より650mm高く、バラスト積載の喫水線よりも1,200mm下に延びていなければならぬ。船体の水中部分と氷塊との衝突の可能性も考慮してウー・エル・アルクト級の船では耐氷帶は船首の垂直線から船尾に向かって0.2Lの距離だけ竜骨まで延長されねばならない。

(5) ソ連及びその他の国々の砕氷船耐氷型輸送船の研究沿革

北洋航路の征服とソ連邦内の凍結寸前の諸海（バルト海、オホーツク海、白海）に於ける輸送量の増大に鑑み、1930年代において氷海航行用船舶と砕氷船の急激な建造が、また水中航行の耐氷性能の組織的研究が開始された。

1933年～34年にA.K.オスモロフスキイ指導の下にフィンランド湾に於いて輸送船が蒙った氷による損傷の分析にもとづく研究が完成した。これら損傷を起す氷の力の強度の数値を査定する試みが行なわれた。氷の荷重の値を決定するために染の弾性・塑性的屈曲の簡単な理論が利用された。しかしながらこの作業に於いて外部の力は氷の物理的・機械的性質と関連していないため、この研究で得た成果を他の凍結寸前の海（オホーツク海や白海）の研究のために應用できなかった。またこのような方法は十分に強度を有する砕氷船の氷の負荷の決定のために利用することも不可能であった。

第二次大戦迄は砕氷型汽船サドコ号の船体の結合部の変形の調査によって氷の荷重の性質と値を実験的に決める試みがなされた。1936年砕氷船エルマーク号の学術探検の時には、船体の様々な箇所に於ける歪みの遠隔同期記録を行うことを可能にさせた接触たわみ器を用いた。この年にまた砕氷船クラシン号と砕氷型汽船サドコ号の耐氷性の研究が行われた。この実験の結果、氷の荷重の力学的、局部的性格を認め、様々な船にとってその大きさをおよそ決定することに成功した。^{脚注}

上述の実験を行うのにアーヴィング・カーリー、オスモロフスキイ、エフ・ヴェー・ヤコフスキイ、ヴェ・ヴェ・ダヴィドフ、テー・オー・タウビン、エル・エム・ノギドその他が参加した。

ユー・アーヴィング・シマンスキイの1938年に公刊された労作「船の耐氷性の条件的指標」は、それらの開発の実験を考慮に入れ、船の耐氷性の比較値のより完全な方法を決めた初めての科学的業績であった。この労作は長い間設計者にとって唯一の指針であった。

しかし、砕氷船や水中航海用の船の合理的な設計のためには氷の荷重の比較値（条件値）ばかりではなく、その本当の値も知らなくてはならない。この問題に、アーヴィング・マスロフの労作はあてられていて、それはまず第一に氷の耐久性を船体にかかる氷の荷重の大きさを決定するファクターの一つとみなした。

ヴェ・ヴェ・ダヴィドフは偏心的打撃に対する理論的構造を一般的に決めてから始めて、舷の弾力性と氷の圧縮歪みの弾性を計算して船の氷に対する打撃の過程を研究した。だがヴェ・ヴェ・ダヴィドフは氷の端が押つぶされることや、船の傾斜した舷によって、それが屈曲すること、付加水量の影響というような最も重要なファクターを考慮に入れなかった。

走って来て、氷を打撃で粉砕する砕氷船の運動の力学の研究には、エヌ・アーヴィング・サポートキンの労作がある。ice coverの崩壊過程と砕氷船の船体と氷との相互作用の性格の、重要な実験的及び理論的研究は40年代初期にヴェ・アーヴィング・ネガノフ、エル・エム・ノギド、アーヴィング・フィシエルによって行われた。少し後になってユー・アーヴィング・シマンスキイとエル・エム・ノギドは水中の船の運動の模型理論の基礎を仕上げた。

1946年に公刊されたイー・ヴエ・ヴィノグラードフの専攻論文では、氷中の砕氷船の作業の分析が行われ、船の基本的諸要素が、船の耐久性に与える影響が考慮されている。その他にも氷上航海の輸送船や砕氷船の船体の設計と構造に関する興味深い事実・資料が集められ概説されている。

1954～57年にユー・イー・ボスクレセンスキーとアー・ヤー・スホルコフは、ユー・アーヴィング・シマンスキの指導下で、「条件的指数」方法を発展させ、これを正確なものとした。特に以前に考察された梁線の屈曲のかわりに弾力のある土台の上にある平板のための決定が用いられた。この際に引用された運動エネルギーの決定は、付加水量を考慮に入れて2つの物体（船と氷塊）の偏心的打撃についての空間的課題を考察したユー・エヌ・ボボフの労作の諸成果を土台に行った。残留歪みによる実際的な氷の荷重の大きさの値の測定のためにユー・イー・ボスクレセンスキーが可塑帶における船体構造の動きを研究した。氷上航海の外板の弾力－可塑帶に於ける耐久性はエヌ・エフ・エルショフによって研究された。

輸送船の氷の圧縮を考察してエヌ・エフ・エルショフはice coverの崩壊は接線応力から起ると考えた。この際に舷側に垂直の方向の割目が氷中に形成され、その後氷帯が碎けるのである。

氷の荷重の理論的決定は同様にエム・カーラルシスによって行われた。彼は船の氷塊への偏心的打撃の過程を考察し、氷の圧縮の分析に際してはice coverの流れる力を考慮している。

1959年、氷と接触したときの船体に作用する打撃の荷重を決定する研究にあてられたエル・エム・ノギドの労作が公刊された。著者は氷の端のしわや氷の屈曲を考慮して動力学方法によって、この課題を解決した。最終的算定公式に修正係数を導入して、氷塊の配置と氷の物理的－機械的性質の厳密な選択ができないとの決定の不確定性を算定したのである。

エム・カーラルシスとエル・エム・ノギドの上述の著書の欠点は氷の厚さにおいてその端が押しつぶされるというかぎりに採り入れられた図式であり、これは自然状態では起らないのである。

氷の条件における船体の耐久性の実験的研究において新しい段階と見られるのは数地点に設置された送信の指示を同期的に記録するのを可能にした電気抵抗歪测定器の使用である。このような実験は、ディーゼル電気モーター船「レナ」号（1956年）、「バイカル」号（1957年）、「ドネブロゴス」号（1958年）、「ベンジナ」号（1963年）、モーター船「ボブルイスクレス」号（1964年）、「イワンモクヴィン」号（1965年）、新型砕氷船数隻（1965～66年）に於いて行われた。これ等の実験の結果、力学的氷の荷重の付加の大きさと性質について貴重な資料が得られた。水力工学施設に対する氷の作用の研究にあてられたエヌ・エム・シチャボワの著書、ペー・ヴェ・ズイルフの著書、カエ・エヌ・ユルジヤヴィンの著書、イエ・ベエブチャギンの著書はすべて衆目を集めた。また氷の物理的・機械的性質とice coverの耐久性についての研究に秀れた成果を示しているエス・エス・ゴルシュヴィッチとペー・アーヴィング・グズネソフの労作にも広く関心が寄せられている。

ソ連以外の国では輸送船や砕氷船の耐水性の問題についての科学的研究書は比較的稀である。有名な外国の著作としては「ウインド」型の砕氷船の船首の端の外側面の選択を考察したシンプソンの論文が挙げられる。ヤンソンの著書の中では氷の物理的・機械的性質の研究の成果が示されており、氷を割る時に砕氷船に作用する力、ice coverの崩壊の性質が述べられている。この書の中ではまた砕氷船の一般的及び局部的耐久性の問題が考察された。

1962年に現れた砕氷船による氷の粉碎過程の研究にあてられたシラノの労作は、氷の耐久性についての実験的資料とアメリカの砕氷船の開発実験に基いて得られた経験的系数を使用した点で興味深い。

(b) NK規則耐氷補強案とUSSR耐氷補強規則の比較

NKはソ連船級協会と業務提携を行なっているが、1967年にソ連船級協会の耐氷規則をはじめLR、ABの耐氷規則を参考として、耐氷規則改正案の作製と検討を終り、近く運輸省の承認があり次第正式に規則として採択される予定である。ここでは各国耐氷規則について調査を行なった関係上、NKとUSSRの両規則の比較を行なってみる。

- (1) NKの改正案ではA*, A, B, Cの4クラスの耐水を考えているが、これはLR, BV, GL, NV, FBN等の考え方を探っており、USSRがウー・エル・アルクト、ウー・エル、エルの3クラスの耐水を考えているのと異っている。
- (2) 規則の内容から見ると、USSRのウー・エルはNKのAに、またUSSRのエルはNKのBに該当する。
- (3) 耐水船の船体の長さ方向の補強の範囲についてNKは船体部では船首より満載喫水線最大幅までの距離の1.1倍または0.2Lの中の大なる方をとっているが、USSRではFPより0.05L後方までとしている。他の船級協会の行き方から考えて、NKの行き方がUSSRのそれより合理的であると考えられる。
- (4) 耐水外板の板厚の算定については、NKは舷側外板に氷塊が接触する場合、外板に垂直に加わる力Pを氷塊の質量と氷塊と舷側との相対速度の積に比例するものとし、USSRの考え方を取り入れて、速力の修正や舷側外板の傾斜による修正を行なって板厚を定めている点は、他のLR, BV, GL, NV, FBNの行き方に比較して合理的である。
- (5) 艤内肋骨については、USSRは特設肋骨と舷側縦通材との組合せ方式を探っているのにならって、NKもこの行き方を探っている。これは他の船級協会の規則に較べて合理的である。
- (6) 構造材料については、USSR規則には規則があるが、NKも使用材料の低温における亀裂特性を考慮して材料の規格を定めている。他の船級協会の規則には、材料の規格が定められていないので、この点は注目すべきことである。

(c) フィンランド耐水船級の新諸規定(1966年)

1966年1月1日附でフィンランドのBureau of Navigationの耐水船級に関する規定の第3次改正が発効した。氷海航行のための補強に関する各國船級協会規定の比較表によって明らかなように、フィンランド耐水船級の諸規定はその内容がLR(1966年), BV(1967年)の耐水規則と全く同じであるといってよく、各國船級協会の耐水規定の中で一つの基準となっていると考えられる。別記の1956年より1959年にわたる各國船級協会の耐水規定総合表と同じく別記の1966年より1967年にわたる比較表を比較すれば、各國船級規則の耐水規定の最近の改正の最大の特色が、最高の耐水船級であるスーパーの船級の新設であることが認められる。

次にフィンランドの新規定(1966年)の4耐水船級1Aスーパー、1A, 1B, 1Cの要点を一覧表にして示す。

フィンランド耐水規定(1966年)

	1 A スーパー	1 A	1 B	1 C
外 板	船首材から後方へ向って船首材と冬季満載喫水線上最大幅員到達点との距離L)より10%長い距離の間垂直にはバラスト状態の水線下600mmから冬季満載喫水線上750mmまでにわたって中央部の規則の厚さの180%, この点から船首に向って冬季満載喫水線の直線部の後端まで140%この点より後方125%とする。 補強外板の厚さ14mmより小ではいけないし、32mmをこえる必要はない。 前部垂線からキールの直線部分が了る点の後方5肋骨心距までの範囲は水帶の下端とキールまたは船首材間の外板は中央	全 左 バラスト状態水線下500mmから冬季満載喫水線上500mmまで中央部規則厚さの150%以上そこから後方にかけて船の中央部の規則の厚さの125%でなければならない。 補強された外板は12mmはなければならない。25mmをこえる必要はない。	500 mm 500 mm 150 % 115 % 10 mm 25 mm	500 mm 500 mm 125 %

	1 A スーパー	1 A	1 B	1 C	
外板	部厚さの 180 %とする。 機関出力が垂線間長 L m 最大幅 B m に 2.5 を乗じた積より大きい場合 500 馬力 または上述の積が超過する部分につき 1 mm 厚くする。				
肋	中央部肋骨心距は規則肋骨心距をこえて はならず、また 800 mm 以上ではいけない。 前部垂線から 0.25 L 間は 610 mm 以上では いけない。 (船首尾輪肋骨) 中央部肋骨と同じか通常の船首尾輪肋骨 の 2 倍か何れか大きい方とする。 (中間肋骨) 船の全長に亘って主肋骨間に取付ける。 下端は肋板の上縁の下までまたは二重底 の場合は縁板から 250 mm までとする。 上端は氷带上の甲板まで達する。 中甲板が冬季満載喫水線下にある甲板間 では中間肋骨は冬季満載喫水線上最小 1,200 mm の高さにある船側縦通材で了つ てよい。この縦通材は肋骨と同じ深さで 中間肋骨、主肋骨、外板に固着されるこ と。 中間肋骨は主肋骨と同じ強度とする。 中甲板では主肋骨、中間肋骨の下端は曲 線のあるブレケットをとりつける。 外板が規則の 180 % の厚さを持たねばな らない所では肋骨と中間肋骨は連続両面 溶接で外板に固定されていなければなら ない。 肋骨の最小厚さはこれに接する補強外板 の厚さの $\frac{1}{2}$ 以下ではいけない。	中央部主肋骨と 同じ。 全 左 全 左 上端は冬季満載 喫水線上 620 mm とする。	全 左 全 左 全 左	中央部主肋骨と 同じ。 船首材から冬季 満載喫水線が最 大幅に達する場 所の後方 4 肋骨 心距まで設ける 全 左	中央部主肋骨と 同じ。 船首材から冬季 満載喫水線が最 大幅に達する場 所まで設ける。 全 左
骨		全 左	全 左	75 %	
中甲板	中甲板の梁上側板の厚さは中央部規則の 厚さの 120 % とする。	—	—	—	
縦通材	船首艤内の縦通材間隔は 1.3 m をこえな い。1 本の縦通材は冬季満載喫水線の少 し下に取付ける。 船首隔壁の後部では船の全長に亘り冬季	全 右 甲板間または縦	船首隔壁の前で は船級協会によ って要求される 通り 1 本の縦通 材を冬季満載喫 水線の幾分下に 設ける。	一層甲板船では 肋骨を支持する 目的のために満 載喫水線の 200 ～ 300 mm 下に設 ける。この縦通 材は船首材から 冬季満載喫水線	

	1 A ス ー バ ー	1 A	1 B	1 C
縦通材	<p>満載喫水線下約300mmの所に1本の縦通材を船の全長にわたって取付ける(甲板がここに続いておれば必要ない)。上述の縦通材または甲板のどの側にも1.3mの間隔で船の全長にわたる縦通材がとりつけられねばならない。</p> <p>縦通材の強度は主肋骨と同強度である。主肋骨と中間肋骨はこの縦通材に固着されること。</p>	<p>通材間の肋骨の固着されていらない長さが1.3m以上の場合には舷側に肋骨と同じ大きさの縦の固着を取り付ける。</p>		<p>が最大幅に達する点より4肋骨心距後方まで延す。</p> <p>もし中間肋骨が縦通材の延びる長について主肋骨と同強度ならば船首隔壁の後方では縦通材は省略してよい。</p>
船首材	<p>形状は碎氷型とし、船首材と満載喫水線間の角度は約22~35°でなければならない。高さは冬季満載喫水線上750mmまで、材質は鋳鋼または鍛鋼、横断面は規則の130%、縦と横の強度の関係は規則通り。冬季満載喫水線上750mmより上は湾曲部鋼板で中央部板厚の180%とするが、25mm以上の必要はない。</p> <p>この厚さは上甲板で普通の板状船首材と同じとする。</p> <p>外板と船首材の固着は平滑とする。</p> <p>満載喫水線下と冬季満載喫水線上750mmの高さまで船首材は中心線桁板により補強され、1肋骨心距以内に配置される桁板で横方向に支持される。</p>	<p>船首材の横断面は規則面積の125%でなければならぬ。</p> <p>620mm 165%</p>	<p>115%</p> <p>620mm 165%</p>	
船尾材・舵骨材・船尾踵板・舵頭材・舵軸	<p>横断面積が規則の130%になり縦と横の強度の関係が規則通りになるよう補強する。</p> <p>舵頭材とピントルと舵軸の直径は規則の130%とする。</p> <p>壺金、舵頭材接手および残りの部分は舵頭材の直径に合わせて作られる。</p> <p>複板舵の側板と桁板は規則の150%とする。</p> <p>密接構造の複板舵の垂直桁と水平桁は直接側板へ密接固着をしてはならない。</p> <p>側板へ密接固着された平鋼板へ密接固着されるのである。</p>	<p>115%</p> <p>舵頭材、壺金、ピントル、舵の他の各部は規則の150%とする。</p>	<p>110%</p> <p>全 左 125%</p> <p>全 左 115%</p>	—

	1 A ス - パ -	1 A	1 B	1 C
船尾 尾鍾 材板 ・舵頭 骨材 材・ ・舵 軸	舵頭材は水圧に対し効果的に保護されること。 操舵機械の力量と操舵装置の各部は補強された舵頭材と同じ応力に耐えるよう補強のこと。	全 左		
プロ ペ ラ 軸、 ク ラン ク 軸、 推 力 軸、 中 間 軸	プロペラ軸は規則の直径の120%とする。 クランク軸、推力軸、中間軸は規則直径の112%とする。標準型のモータに対してはクランク軸の直径の増加を要しない。 歯車が推進機関とプロペラ軸の間に設けられるならば本歯車の歯と軸はルールモーメントの150%の回転モーメントに耐えること。 タービンにより運転される船はタービンとプロペラ軸との間、滑り接手を設けること。 ディゼル船では滑り接手の使用がすすめられる。	115% 108% 125% — —	108% 104% — — —	105% — — — —
プロ ペ ラ	プロペラは鋳鋼又は同強度の材料製とし固定翼の型とする。 翼の幅は1.5 d の半径で2.5 d (d は補強プロペラ軸の直径) とする。 1.5 d の半径における翼厚 T は D (プロペラ直径) $\leq 14d$ のとき $T = \frac{0.65 d}{\sqrt[4]{i}}$ D $> 14d$ のとき $T = \frac{0.65 d}{\sqrt[4]{i}} \sqrt{\frac{D}{14d}}$ i は翼の数 翼端厚さ t は $\frac{D}{2}$ の所で D $> 3,300$ mm のとき $t = 0.0065 D$ D $\leq 3,300$ mm のとき $t = 0.003D + 12$ 引張強度 48 kg/mm^2 伸び 22%	全 左 全 左 全 左 $T = \frac{0.6 d}{\sqrt[4]{i}}$ 全 左 $T = \frac{0.6 d}{\sqrt[4]{i}} \sqrt{\frac{D}{14d}}$ 全 左 $t = 0.006 D$ 全 左 $t = 0.003 D + 10$ 48 kg/mm^2 22%	全 左 全 左 全 左 — 全 左 全 左 — 全 左 全 左 — 全 左 全 左 — 全 左 全 左 —	全 左 全 左 全 左 — — — — — — — — — — — — — — —

	1 A ス 一 パ ー	1 A	1 B	1 C
推進機関の馬力	馬力 $N = 2.1L \cdot B$ L : 垂線間長 B : 幅 船首部と船首材が構造上氷海航行に特に適している場合は上式の係数は小さくてもよいが 1.8 以下では不可。	$N = 1.75L \cdot B$	$N = 1.3L \cdot B$	$N = L \cdot B$ —

第3章 各国氷海航行船の船級規則の比較検討

表

- (a) 氷海航行のための補強に関する各國船級協会規則の比較表
- (b) ソ連船級協会耐水構造規則
- (c) 各國船級協会耐水構造規則の中、冬期北バルト海航行船舶に対する規定の比較
- (d) 各國船級協会耐水構造規則の比較
- (e) は文献要約

(a) 氷海航行のための補強に関する各國船級協会規則の比較表

船級協会名	規定した年	耐水クラス	外 板 肋 骨						
			耐水帶の上 下範囲(m)		中央部外板の規定厚に対する補強部外板の板厚増厚率(%)と外板補強区域			助骨	
			LWLより上	空W Lより下	船首部F.P.から	中央部	船尾部A.P.から	主 肋 骨	
R. USSR	1967	UL (ARKT)						船の縱方向における補強範囲と助骨截	
		UL	0.65	1.0	1.1ℓ間 Cc = 6.95(L - 15)	1.1.2式	1.1.2式	EPより 0.25Lまで 1.2.6式	1.2.3式
		L	0.4	0.9	0.15ℓ間 40 中間肋骨あるとき 50 中間肋骨ないとき	-	-	EPより 0.2 - 0.25Lまで 20	-
LR	1966	* 1	0.76	0.61	1.1ℓ間 80	1.1ℓより 0.25Lまで 40	0.25Lまで 25	中央部助骨と全 じか普通の首尾 助骨の2倍の中 大きい方	中央部助骨と全 じか普通の首尾 助骨の2倍の中 大きい方
		1	0.76	0.61	1.1ℓ間 50	1.1ℓより 25	APまで 25	全 上	全 上
		2	0.76	0.61	1.1ℓ間 50	全 15	上 15	全 上	全 上
		3	0.76	0.61	ℓ間 25	0	0	-	-
FBN	1966	1 A super	0.75	0.6	竜骨直線部終点 より 5 FS 後ま で 80	40	25	中央部助骨と全 じか普通の首尾 助骨の2倍の中 大きい方	船首艤に全じ
		1 A	0.5	0.5	1.1ℓ間 50	25	25	中央部助骨と 全じ	中央部助骨と 全じ
		1 B	0.5	0.5	ℓ間 50	15	15	中央部助骨と 全じ	中央部助骨と 全じ
		1 C	0.5	0.5	ℓ間 25	0	0	中央部助骨と 全じ	中央部助骨と 全じ
NK(案)	1967	A*	0.5	1.0	1.1ℓ間 0.88√VSL + 3.5	0.68√VSL + 3.5	0.25L又はm の中大きい方 0.60√VSL + 3.5	3.3 S ℓ² L	5.5 S ℓ² L + 20
		A	0.5	1.0	1.1ℓ間 0.72√VSL + 3.5	0.60√VSL + 3.5	全 上 0.60√VSL + 3.5	2.2 S ℓ² L	3.7 S ℓ² L + 20
		B	0.5	1.0	0.72√VSL + 3.5	0.40√VSL + 3.5	全 上 0.40√VSL + 3.5	3.7 S ℓ² L + 20	2.2 S ℓ² L
		C	0.5	1.0	0.60√VSL + 3.5	一般規定厚	一般規定厚	1.6 S ℓ² L	2.6 S ℓ² L + 20

註 1. ℓ は FP から LWL が最大巾に達する点までの距離をいう。
 2. m は AP から LWL が最大巾に達する点までの距離をいう。

と 綾 通 材		船 首 尾 材		舵 柄			プロペラ	主機関の出力係数	
骨		船側綾通材	船首材 船尾板	舵頭材 並 ビントル 直 径 の 増 大 率 (%)	クランク軸 推力軸 中間軸 の直 径 増 大 率 (%)	プロペラ軸 の直 径 増 大 率 (%)	材 料 の 強 度	SHP=C.L.B の C	
面抵抗率の増大率(%)	中間肋骨取付上下範囲	綾通材取付区域(船首材からの距離)及び綾通材の間隔	断面積の増大率(%)						
全長規則の主肋骨に全じ	内底線下ならびに二重底の線より250mmの点より水帶上の最も近い甲板まで	才 1.4m	192式	舵柱 40 船尾材 25	速力12ノット 25 速力22ノット 0	10	18	炭素鋼 45 2.20	
首尾船内 100 船首隔壁後部 70	肋板頂部より夏季LWL、上甲板または水帶上線より低くない船側綾通材まで	才 1.8m	25	-	10	-	5		
全長隣接する主又は甲板間肋骨に全じ	上甲板又はLWL上760mmの所にある第2甲板から肋板又はタンクトップまで	全長3条 才 1.3m	30	30	30	12	20	44 2.1	
全長隣接する主又は甲板間肋骨に全じ	軽喫水下610mmよりLWL上760mmまで	全長1条 才 1.85m 1.1ℓ間	25	25	25	8	15	44 1.79	
FP から 1.1 ℓ間 全 上	全 上	1.1 ℓ間 才 1.85m	15	15	12.5	4	8	44 1.31	
FP から 1.1 ℓ間 船首隔壁の前首冠船肋骨の50、その後首尾船肋骨の75	—	1.1 ℓ間 才 1.85m	10	7.5	7.5	-	5	44 0.98	
全長主肋骨に全じ	肋板上端または二重底線より250mmの点から水帶上の甲板まで	全長3条 才 1.3m 主肋骨と全強度	30	30	30	12	20	48 < 2.10 才 1.80	
全長主肋骨に全じ	肋板上端または二重底線より250mmの点から冬季LWL上620mmまで	船首隔壁の前 才 1.3m	25	15	25	8	15	48 < 1.75 才 1.40	
FP から最大巾の4FS後まで主肋骨に全じ。	全 上	船首隔壁の前冬季LWL下に設ける	15	10	15	4	8	48 < 1.30 才 1.05	
FP から最大巾の4FS後まで主肋骨の75	全 上	$\ell + 4FS$ 冬季LWL下200 - 300mmに設ける	-	-	-	-	5	48 1.0	
船首0.25L間 船尾0.15L間 主肋骨に全じ	肋板頂部よりLWL上500mm以上の位置にある甲板まで	特設肋骨間で 才 2m間隔	-	30	30	12	20		2.10
全 上	全 上	全 上	-	25	25	8	15		1.75
全 上	全 上	全 上	-	15	15	4	8		1.30
全 上	全 上	全 上	-	8	8	-	5		1.0

船級協会名	規定した年	耐水クラス	外 板				肋 骨 と		
			耐水帶の上下範囲(m)		中央部外板の規定厚に対する補強部外板の板厚増厚率(%)と外板補強区域		肋		
			LWLより上	空荷Lより下	船首部EPから	中央部	船尾部A.P.から	主 肋 骨	船首艤 船艤 船尾艤
B V	1967	I - S	0.76	0.6	1.1 ℓ間 80	40	25m間	船側縦通材を考えぬとき、首尾艤筋骨の2倍の中大きい方	— 船首艤に全じ
		I	0.5	0.5	1.1 ℓ間 50	25	25	11表による値に船側縦通材1本のとき0.5を、2本のとき0.4を乗ずる	— 船首艤に全じ
		II	0.5	0.5	ℓ間 50	15	15	全 上	— 全 上
		III	0.5	0.5	ℓ間 25	0	0	全 上	— 全 上
N V	1967	I s A	0.75	0.60	1.1 (L - ℓ) $t = 9 + 0.13 L_{mm}$	0.8 t	0.7 t	普通の首尾艤筋骨の2倍 $\leq 0.5 L_{dcf}$	— 船首艤に全じ
		I s A	0.5	0.5	1.5 B $t \leq 7 + 0.11 L_{mm}$	0.85 t	0.85 t	中央部主肋骨に全じ $minz = 0.4 L_{dcf}$	— 船首艤に全じ
		I s B	0.5	0.5	$t \leq 6 + 0.11 L_{mm}$	0.8 t	0.8 t	全 上	— 全 上
		I s C	0.5	0.5	全 上	—	—	$\leq 0.25 L_{dcf}$	— 船首艤に全じ
A B	1967	A	0.5	0.5	1.1 ℓ間 50	25	25	中央部肋骨に全じ	—
		B	0.5	0.5	50	15	15	全 上	— 全 上
		C	0.5	0.5	25	0	0	全 上	— 全 上
G L		E ₄							
		E ₃							
		E ₂							
		E ₁							

縦通材			船首尾材		舵輪		プロペラ	注機関の出力係数
骨		船側縦通材	船首材	船尾材	舵頭材並金 ピントル直徑の 増大率(%)	クラーク軸 推力軸中間軸 の直徑 増大率(%)	材 料 の 強 度	SHP=C.L.B の C
面抵抗率の増大率(%)	中間肋骨取付 付上下範囲	縦通材取付区域 (船首材からの 距離)及び縦通 材の間隔	断面積の 増大率(%)					
全長 主肋骨と全じ	耐水帶の直上甲板より 肋板頂部又は縁板 から250mmまで	冬季L WL直下のもの は全長 1.3m 3条	30	30	70	12	20	1.89
全長 主肋骨と全じ	冬季L WL上620mm より肋板頂部又は縁 板から250mmまで	全 上	25	15	50	8	15	1.58
ℓ より4FS後より 前主肋骨と全じ	全 上	0	15	10	25	4	8	1.17
ℓ の前 主肋骨の75	全 上	0	0	0	船首材のみ 15	-	5	0.90
船の全長 普通の首尾艤骨の 2倍 \leq 0.5Lds cm	冬季L WL上1,200 mm以上の最初の甲板 から縁板又は肋板上 部まで	船首隔壁前 船首隔壁後 2.5m	Z $\frac{1}{4}$ 0.065 L^2 cm	50	Sec 15Bの 式によるも のの120% 舵圧力	12	20	2.1 耐水船首 (1.8)
船の全長 主肋骨と全じ $minz = 0.4Lds cm$	冬季L WL上620mm から二重底頂部又は 单底肋板頂部まで	船首艤内 2m 船尾艤内 2.5m	Z $\frac{1}{4}$ 0.06 L^2 cm	25	全上 85% "	8	15	1.75 耐水船首 (1.4)
FPから ℓ 又は2B の中大きい方の間 Is Aの項と全じ	全 上	—	隣接外 板より 15%厚	15	全上 40% "	4	8	1.3 耐水船首 (1.05)
船首隔壁の前 $Z = L/160 + 10cm$ 船首隔壁の後 $Z = L/100 + 20cm$	—	一層甲板船では船首 材から2Bまで冬季 L WL下0.2~0.3 mに設く	t = 6 + 0.11 L mm	7.5	全上 25% "	-	5	1.0 耐水船首 (0.8)
船の全長 主肋骨に全じ	冬季L WL上620mm 上の点より縁板上75 mm又は肋板頂部まで	船首艤内 冬季L WL下 約250mm	25	15	36	8	15	46
FPより最大巾の 4FS後まで 主肋骨に全じ	全 上	全 上	15	10	18	4	8	46
FPより ℓ 間 主肋骨の75%	全 上	全 上	-	-	船首材のみ 12	-	5	46
						12	20	48
						8	15	48
						4	8	48
						-	5	48

(b) ソ連船級協会 耐氷構造規則

Y 4	A 1	A 2	A 3
<ul style="list-style-type: none"> 外板 (26.2.1) <p>アイスベルトは船の全長に設く。 その上縁は、夏季LWL上 0.65 m その下縁は、BWL下 1.0 m 但し F.P. から竜骨平坦部が了る点より $0.05L$ 后方断面まではアイスベルトは竜骨線まで延す。バラスト状態のとき船底が吃水線下 1 m 未満である船体のすべての部分はアイスベルトと同じ厚さとし船底肋骨は船級協会の認める方法で補強すること。</p> <p>上記の上下限界内外板厚さ</p> $S = 112.5a\sqrt{\frac{P}{\sigma_y}}$ <p>但し $S \geq 21.8\text{ mm}$</p> $S = 92a\sqrt{\frac{P}{\sigma_y}} + 4$ <p>但し $S < 21.8\text{ mm}$</p> <p>ここに $a = \text{主肋骨心距} m$ $P = \text{条件的水荷重強度} t_f / m^2$</p> <p>F.P. から $1.1 b$ 以内の船体前部に対し</p> $p = 0.144L \left(1 + \frac{2L}{1000}\right) a^{\frac{1}{6}} u_1$ <p>ここに $\alpha = F.P. \text{から } 0.1 L \text{ 断面において夏季LWLの切線と船体中心線面との成す角度}$</p> $u_1 = 26.2.1.2 \text{ 表に与えられる係数}$ <p>F.P. から $1.1 b$ の断面より后方の船体の部分に対し</p> $p = L - 15 t_f / m^2$ <p>但し $\geq 75 t_f / m^2$</p> <ul style="list-style-type: none"> 特設肋骨を用いない船側肋骨構造 (26.2.2) 肋骨 (26.2.2.1) <p>心距: 船首隔壁より后方 F.P. から $1.1 b$ 以上の位置の断面までの船の長さの部分に適用 $\leq 700\text{ mm}$ のこと。 上記断面から后方船尾隔壁までの主肋骨心距は $\leq 800\text{ mm}$ のこと。</p> <p>船内主肋骨の断面係数は 2.5.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> 外板 (26.3.1) <p>アイスベルトは船の全長に設く。 その上縁は夏季LWL上 0.5 m その下縁は BWL 下 0.5 m</p> <p>上記の上下限界内外板厚さ F.P. から冬季LWL の p が最大になる最も近い断面迄の船の中央部分に対して 2.10.2(一般船舶) の外板厚 ($s = 310a\sqrt{\frac{P}{\sigma_y}}$) の 50% 増 それより后方 15% 増</p> <p>F.P. から $1.1 b$ 以内の船体前部に対し</p> $p = 0.0865L \left(1 + \frac{2L}{1000}\right) a^{\frac{1}{6}} u_1$ <p>F.P. から $1.1 b$ の断面より后方の船体の部分に対し</p> $p = L - 35$ <p>但し $\geq 45 t_f / m^2$</p> <p>外板のアイスベルト S は $12\text{ mm} < S < 25\text{ mm}$</p> <ul style="list-style-type: none"> 肋骨 (26.3.2.1) <p>主肋骨と全一寸法の中間肋骨を船の全長に設ける。</p> <p>船内主肋骨の断面係数は 2.5.</p>	<ul style="list-style-type: none"> 外板 (26.4.1) <p>アイスベルトは 1 条船の全長に設く。 その上縁は冬季LWL上 0.5 m その下縁は BWL 下 0.5 m</p> <p>上記の上下限界内外板厚さ F.P. から冬季LWL の p が最大になる最も近い断面迄の船の中央部分に対して 2.10.2(一般船舶) の外板厚 ($s = 310a\sqrt{\frac{P}{\sigma_y}}$) の 50% 増 それより后方 15% 増</p> <p>F.P. から $1.1 b$ の断面より后方の船体の部分に対し</p> $p = L - 35$ <p>但し $\geq 45 t_f / m^2$</p> <ul style="list-style-type: none"> 肋骨 (26.4.2.1) <p>主肋骨の断面係数と固着は 2.5.2, 2.5.3, 2.5.5, 2.5.7, 2.11.3 及び 2.11.5 の規定に適合すべし。 船首部の船の長さ $b + 4a$ の範囲には主肋骨と全一寸法の中間肋骨が設けられねばならぬ。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> 外板 (26.5.1) <p>アイスベルトは船首材から冬季LWL B_{max} まで設ける。 その上縁は冬季LWL上 0.5 m その下縁は BWL 下 0.5 m</p> <p>船底がバラスト状態 WL の下 0.5 m 未満にある船では船底外板の厚さはアイスベルトの厚さに等しくする。また船底肋骨は適当に補強されなければならぬ。</p> <p>アイスベルトの厚さは 2.10.2 の規定による船の中央部船側外板の厚さより 25% 大きいこと。この外板の厚さは 2 mm 以上のこと、アイスベルトの厚さは 25 mm 以下とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> 肋骨 (26.5.2.1) <p>主肋骨の断面係数と固着は 2.5.2, 2.5.3, 2.5.5 から 2.5.7 まで 2.11.3, 2.11.5 の規定による。中間肋骨が 26.5.1 に指示された外板のアイスベルトの延長の範囲の船の長さに亘り取付けらるべし。 船首隔壁后方に設けられる中間肋骨の断面係数は 主肋骨の</p>

A4	Yオ曳船	A1曳船	A3曳船
<p>◦外板 (26.6.1) アイスベルトは 全左 その上縁は 全左 その下縁は)</p> <p>アイスベルトの厚さは 2.102 の規定による船の中央部船側 外板の厚さより25%大きいこ と。 このアイスベルトの厚さは25 mm以下とす。</p> <p>(26.7.1.2) 上記の上下限界内の外板の厚 さは下記により定められた p を用い算式 (26.2.1. 2 - 1) および (26.2.1.2 - 2)によ る値以上とする。 E.P.から 0.35L 以上の長さの 範囲の船の前部 $p = 1.9\sqrt{A} Vs \alpha u_1 \cdot 10^{-2}$ <p style="margin-left: 40px;">ここに A = 夏季LWLに相当 する船の排水量 Vs = 静水上の船の速力 (kt) α = E.P.から 0.1L の 断面において夏季 LWL の前部への 切線と船の中心線 とのなす角度) u_1 = 表 26.7.1.2 に規定 される係数 E.P.より 0.35L の断面より后 方。 A.P.より 0.2L 断面の前方 $p = 2.4L - 33$ <p style="margin-left: 40px;">A.P.の前方 0.2L 以上は前部 の p の 75% とする。 いかなる場合も前后的 p は 中央部より小さくては不可 ◦特設肋骨を用いない船側肋骨 構造 (26.7.2) ◦肋骨 (26.7.2.1) 船首尾隔壁間に亘り主肋骨と 全一寸法の中間肋骨が設けら れなければならない。 主肋骨の断面係数は p を下記 のようにとり算式 (26.2.2. 1.3) によりえられた値以上 たること。</p> </p></p>	<p>◦外板 (26.7.1) アイスベルトは船の全長に設 ける。 その上縁は夏季LWL上 0.5m その下縁は最小吃水 (燃料及 び貯蔵品なし) より 0.8m 下 方 F.P. から 0.1L までの範囲 では船の竜骨線まで下方に伸 す。</p> <p>(26.8.1.2) 上記の上下限界内における外 板の厚さは下記のように定め られた p を用い算式 (26.3.1. 2 - 2) による値以上とする。 E.P.から 0.35L 以上の長さに 亘る船の前部に対し $p = 110\sqrt{A} Vs \alpha u_1 \cdot 10^{-2}$ <p style="margin-left: 40px;">ここに A = $Vs = \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{全 左}$ $\alpha = \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{全 左}$ $u_1 = \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{全 左}$ </p> <p>E.P.から 0.35L の断面より后 方。 A.P.より 0.2L の断面より前 方の船の中央部に対し $p = 1.15L - B$ <p style="margin-left: 40px;">A.P.より 0.2L 以上の船の后 部に対しては前部の水圧の 75 % とする。 いかなる場合にも前后的 p は 中央部より小さくては不可 ◦肋骨 (26.8.2.1) 中間肋骨は船首尾隔壁間の全 長に亘り取付ける。 主肋骨の Z は 2.5.2 と 2.11.3 によるが 26.3.2.2 の式よりえ られるものより小では不可。</p> </p></p>	<p>◦外板 (26.9.1) アイスベルトは 全左 その上縁は夏季LWL上 0.3m その下縁は最小吃水 (燃料及 び貯蔵品なし) より 0.6m 下 方</p> <p>全 左</p> <p>(26.9.1.2) 上記の上下限界内では外板の 厚さは次の式以上のこと。 $S = 184a\sqrt{\frac{P}{\sigma_y}} + 4$ <p style="margin-left: 40px;">E.P.から 0.35L 以上の船の前 部</p> $p = 0.7\sqrt{A} Vs \alpha u_1 \cdot 10^{-2}$ <p style="margin-left: 40px;">ここに A = $Vs = \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{全 左}$ $\alpha = \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{全 左}$ $u_1 = \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{全 左}$ </p> <p>E.P.から 0.35L の断面より后 方の船の長さに対し $p = 0.31L - 4.2$ <p style="margin-left: 40px;">いかなるときも前部に対する p は中央部に対するものより 小さくては不可。</p> <p>◦肋骨 (26.9.2.1) 主肋骨及び中間肋骨 (もし設 けられているときは) の断面 係数は 2.5.2 及び 2.11.3 に従 って定められなければならな い。 但し $W = K a l \frac{P}{\sigma_y} \cdot 10^3$ により定められる値以上であ ること。</p> </p></p>	

Y A	A 1	A 2	A 3
<p>$W = 0.5 ka l \frac{P}{\sigma_y} \cdot 10^3$</p> <p>a = 主肋骨の心距</p> <p>l = 内底板から甲板迄の船側弦に沿って測った主肋骨スパン</p> <p>k = 一層甲板船 16 多 " 13.5</p> <p>p = 条件的水荷重強度 下記</p> <p>F.P.より 1.1 b 以内の船の前部 $p = 0.12 L \left(1 + \frac{2L}{1000}\right) \alpha^{4/5} u_2$ α = F.P.から 0.2 L の位置の断面において夏季 LWL の切線と船体中心線との成す角(度) $u_2 = 26.2.2.1$ 表から与えられる値。</p> <p>F.P.より 1.1 b の断面より后方船尾隔壁までの船の長さの部分に対して $p = 0.455 L \text{tf/m}$ ただし $\geq 50 \text{tf/m}$</p> <p>いかなる場合も F.P.から 1.1 b までの範囲に対する p は船の長さの残りの部分に対するものより小さくては不可。</p> <p>○甲板間主肋骨断面係数 これは主肋骨のスパン l を甲板間高さに等しいとし 26.2.2.1.3 で求めた値より小さくないこと。</p> <p>上方甲板間 $k = 14 \left(1 + 0.86 \frac{l_1}{l}\right)$</p> <p>下方甲板間 $k = 13 \left(1 + 0.92 \frac{l_1}{l}\right)$</p> <p>$\frac{l_1}{l}$ は肋骨全体のスパンに対するアイスペルトで掩われた部分のスパンの比 $\leq \frac{1}{2}$ $\frac{l_1}{l} < \frac{1}{3}$ のときは甲板間の断面係数は 2.5.5 による値と同じとしてよい。</p> <p>船首隔壁の后方 F.P. から 1.1 b の断面までの甲板間主肋骨 船内主肋骨の断面係数は 2.5.2, 2.5.5.2.11.3 より小さく</p>	<p>2.及び 2.11.3 より定められること。但し次の算式により定められる値以上のこと。</p> <p>$W = 0.5 ka l \frac{P}{\sigma_y} \cdot 10^3$</p> <p>a = 主肋骨心距</p> <p>l = 内底板から甲板迄の船側弦に沿って測った主肋骨スパン</p> <p>k = 一層甲板船 16 多 " 13.5</p> <p>p = 下記により定められる条件的水荷重強度。</p> <p>F.P. から 1.1 b 以内の船の前部 $p = 0.055 L \left(1 + \frac{2L}{1000}\right) \alpha^{4/5} u_2$ $\alpha = \} \text{全 左}$ $u_2 =$</p> <p>F.P. より 1.1 b の断面から后方船尾隔壁までの船の長さの部分に対して $p = 0.3 L$ ただし $\geq 27 \text{tf/m}$</p> <p>いかなる場合にも F.P. から 1.1 b までの範囲に対する p は船の長さの残りの部分に対するものより小さくては不可。</p> <p>○甲板間肋骨 2.5.5 による。</p>		75%以上であること。

A 4	Y A 变船	A 1 变船	A 3 变船
	<p>F.P.から 0.35 L 以上の長さに亘る船の前部</p> $p = 1.7 k_1 \sqrt{d} Vs \alpha u_2 \cdot 10^{-2}$ <p>ここに $k_1 = 1.22 - 0.011L$ 但し ≥ 0.5</p> <p>d 及 Vs 前と全じ $\alpha = F.P.$ から $0.2 L$ 断面において夏季 LWL の前部への切線と船の中心線とのなす角度 $u_2 =$ 表26.7.2.1.2 に規定される係数</p> <p>F.P.から $0.35 L$ 后方の断面及び A.P.から $0.2 L$ 前方断面との間の中央部</p> $p = 0.3 L + 13$ <p>A.P.から $0.2 L$ W.L. 上前方までの船尾部</p> <p>$p =$ 船首部の 75%</p> <p>いかなる場合も船首尾部の p は中央部に対する値以上のこと。</p>	<p>F.P.から $0.35 L$ より小くない長さに亘る船の前部に対し</p> $p = 1.1 k_1 \sqrt{d} Vs \alpha u_2 \cdot 10^{-2}$ <p>F.P.から $0.35 L$ の断面より后方の船の中央部および A.P. より $0.2 L$ の断面の前方</p> $p = 0.3 L + 6$ <p>A.P.から $0.2 L$ より少くない長さに亘る船の后部では前部の p の 75% とする。</p> <p>いかなる場合も前后部に対する p は中央部に対する値以上のこと。</p>	<p>F.P.から $0.35 L$ 以上の長さに亘る船の前部に対し</p> $p = 0.7 k_1 \sqrt{d} Vs \alpha u_2 \cdot 10^{-2}$ <p>F.P.から $0.35 L$ の断面より后方の船の长さの部分に対しては</p> $p = 0.0945 L + 4.5$ <p>いかなる場合も前部に対する p は船の长さの中央部分に対する値以上とする。</p>

Y A	A 1	A 2	A 3
<p>では不可。</p> <p>主肋骨ならびに中間肋骨のウエブの厚さは h を肋骨のウエブの厚さ (mm) としたとき $0.015 h + 5$ より小さくないこと。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 肋骨端固着は 2.5.3 と 2.5.6 の規定に準ずる。 <p>船内中間肋骨の下端は内底より下縁板から $250 mm$ をこえぬ点まで達すること。上方はアイスベルトの上方の甲板まで伸びる。</p> <p>アイスベルト上線が甲板間にあるときはこの縁より $600 mm$ 伸し船側縦通桁に達せしむ。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 船側縦通桁 (26.2.2.3) <p>船首尾隔壁の間の荷重分布用縦通桁は船首尾艤内の船側縦通桁に連続させ間隔は $1.4 m$ 以下であること。</p> <p>1 条は全長に亘り夏季 L WL より $300 mm$ 下方に他は BWL より $100 mm$ 下方に設けること。船側縦通桁のウエブの厚さ並に面材の断面積は肋骨のものと同一のこと。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 特設肋骨を用いる肋骨構造 (26.2.3) ○ 肋骨 (26.2.3.1) <ol style="list-style-type: none"> 1. 船首尾隔壁間では主肋骨と同一断面の中間肋骨を設ける。 2. E.P. から $1.1 b$ の断面より後方の主肋骨の心距は 26.2.2.1 による。 3. 特設肋骨の間隔は主肋骨の心距の 4 倍以下であること。 4. 主肋骨の断面係数は $W = 0.5 k_0 a l \frac{P}{\sigma_y} 10^3$ ここに a = 肋骨心距 l = 内底から甲板までの主肋骨のスパン P = 26.2.2.1.3 により定められる条件的水荷重強度。 k_0 = 26.2.3.4 表に与えられる係数 5. 特設肋骨の断面係数 $W = 1.5 k_1 a_1 l \frac{P}{\sigma_y} \cdot 10^3$ a_1 = 特設肋骨の心距 l = 内底板から甲板までの特設肋骨の 	<p>○ 船側縦通材 (26.3.4)</p> <p>船首尾艤内の船側縦通桁の寸法および配置に対する規定は 2.11.2 の中に含まれる船首艤と船尾艤の間には荷重を分布する船側縦通桁が船首艤内の船側縦通桁の延長を形成するように設けられねばならぬ。船首艤内の船側縦通桁の 1 条は夏季 L WL より $300 mm$ 下方に配置のこと。</p> <p>船側縦通桁と船側縦通桁の間又は船側縦通桁と甲板又は内底との間の肋骨の支持されていない長さが $1.4 m$ をこえるときは E.P. から $1.1 b$ 后方までの区間では肋骨のウエブの厚さと同一の厚さの曲線を持つ分離した肘板から成る水平断切材が設けられなければならない。これらの肘板は一線上に配置され、外板並びに主及び中間肋骨のウエブに固着されねばならない。</p> <p>船艤主肋骨の断面係数は 2.5.2 及 2.11.3 により定める。但し次の式の値以上たること。</p> $W = 0.5 k a l \frac{P}{\sigma_y} 10^3$ <p style="text-align: center;">a = 主肋骨の肋骨心距 k = 一層甲板船 16 多層 " 13.5</p>	<p>○ 船側縦通桁 (26.4.3)</p> <p>2.11.2 に規定される船艤内の船側縦通桁のうちの 1 条は冬季 L WL の下方 $200 mm$ 及 $300 mm$ の間に配置すること。</p> <p>この船側縦通桁の延長として船首隔壁から后方 $b + 4 a$ の距離の断面迄達する荷重分布用の船側縦通桁が設けられること。</p>	<p>○ 船側縦通桁 (26.5.3)</p> <p>寸法及び配置は 26.4.3 に規定されている。</p> <p>E.P. から $0.15 L$ の断面と同じく $b + 4 a$ の断面との間にに対して要求される荷重分布用縦通桁は船首隔壁から与えられた断面までの範囲の中間肋骨の寸法が主肋骨の寸法と同一である限り設けることを要しない。この縦通桁は第 2 甲板が吃水線に近接して配置されている限り省略してよい。</p> <p>(26.5.2.2)</p> <p>中間肋骨が 26.5.1.1 に指示された外板のアイスベルトの延長の範囲の船の長さに亘って設けられること。</p> <p>船首隔壁の后方に設けられる中間肋骨の断面係数はその範囲内の主肋骨のそれの 75% 以上のこと。</p> <p>(26.5.2.3)</p> <p>船首艤内の中間肋骨は主肋骨と全く寸法をもたねばならぬ</p> <p>(26.5.2.4)</p> <p>船首尾艤内の主肋骨の断面係</p>

<i>A 4</i>	<i>Y A 傾船</i>	<i>A 1 傾船</i>	<i>A 3 傾船</i>
<ul style="list-style-type: none"> ◦ 船側縦通桁 (26.6.3) <p>26.6.1.1 に述べた区域内に船首艤内の船側縦通桁の延長として船側縦通桁が設けられなければならぬ。若し可能なら上方および下方の船側縦通桁はアイスベルトの縁がそれらの上に来る様に設けられなければならない。</p> <p>中間肋骨の端は船側縦通桁に密接すること。</p> ◦ 船側縦通桁 (26.7.2.2) <p>船首尾隔壁間の全長にわたって船首尾艤内の船側縦通桁の連続部となる荷重分布用船側縦通桁を設ける。</p> <p>船側縦通桁の心距並に船側縦通桁と内底との間隔又は船側縦通桁と甲板（台甲板）との間隔は 1.4 m 以下のこと。</p> <p>船側縦通桁のうち 1 条はその全長に亘り夏季 LWL より約 300 mm 下方に配設されねばならない。</p> ◦ 特設肋骨を用いる船側肋骨構造 (26.7.3) <p>◦ 肋骨 (26.7.3.1) <p>船首尾隔壁間の船の長さのどの部分でも主肋骨と同一断面の中間肋骨を設ける。</p> <p>特設肋骨の間隔は主肋骨の心距の 4 倍以下であること。</p> <p>主肋骨の断面係数は 26.7.2.1 により定められる p を用いて算式 (26.2.3.1.4) により得られる値以上でなければならない。</p> </p> 	<p>助骨端固着は 26.3.3 を参照</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 船側縦通桁 (26.8.2.2) <p>配置、寸法および構造</p> <p>詳細は 26.7.2.2 参照のこと。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 機関室内に設けられる特設肋骨 (14.4.2 参照) の寸法は、26.8.2.1.2 で定めた p を用い 26.7.3.1.4 による規定値以上のこと。

Y A	A 1	A 2	A 3
<p>スパン $p = 26.2.2.1.3$により 定められる条件的 水荷重強度。</p> <p>$k_1 = 26.2.3.1.5$表に与 えられる係数</p> <p>7. 船側縦通桁の巾が特設肋骨 に等しいとき又その断面係数 が26.2.3.2.1に定められる 断面係数をこえるときは次の eを用いて修正すること。</p> $e = \frac{3.52}{\frac{w_1^3}{w} \sqrt{\frac{w_1}{w}} n} \left(\frac{a_1}{l} \right)^3$ <p>w_1 = 容認された船側縦 通桁の断面係数</p> <p>w = 係数 e が算式(26. 2.3.1.6-3)に より定められるも のと仮定して26. 2.3.1.5の規定に より定められた特 設肋骨の断面係数</p> <p>8. 特設肋骨の断面積は次の算 式の値以上のこと。 $S = 0.830 a_1 \frac{p}{\sigma_y} 10^3$</p> <p>船側縦通桁 (26.2.3.2) 断面係数は次の値以上のこと $w_1 = 0.67 \frac{a_1}{l} w$ ここに $w = 26.2.3.1.5$により 定められる特設肋 骨の断面係数 a_1と l の値も 26.2.3. 1.5による。 船側縦通桁のウエブの厚さは 特設肋骨のウエブの厚さと等 しくする。 特設肋骨と交叉する部分の船 側縦通桁の巾は特設肋骨のウ エブの深さに等しくする。 船側縦通桁は特設肋骨の面材 に溶接された面材を備える。 船側縦通桁の心距並に船側縦 通桁と甲板との間又は船側縦 通桁と内底との間の距離は、 2.5 m以下とする。 ◦船首尾艤内船側肋骨(26.2.4) 主肋骨と同一寸法の中間肋骨 が設けられねばならぬ。 主肋骨の心距は 600 mm以下肋 骨の断面係数は</p>			<p>数は 2.5.4 により規定された 値より20%以上増さなければ ならない。 (26.5.2.5) 中間肋骨の延長範囲および固 着に対する規定は26.3.3に含 まれる。</p> <p>船側縦通桁 (26.5.3) その寸法と配置は 26.4.3 に 規定される。F.P.から 0.15 Lの断面と同じく $b + 4a$ の 断面との間に要求される荷重 分布用縦通桁は船首隔壁から 与えられた断面までの範囲の 中間肋骨の寸法が主肋骨と同 一寸法である限り設けなくて よい。 この縦通桁は第2甲板か吃水 線に近く配置されるときは省 略してよい。</p> <p>(26.4.2.3)</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦船首尾艤内の主肋骨の断面係数は 2.5.4 に規定されるものより20%増しとする。 <p>(26.5.2.3)</p> <p>(26.5.2.4)</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦船首尾艤内の主肋骨の断面係数は 2.5.4 による規定値の20

A 4	Y A 船	A 1 船	A 3 船
	ればならぬ。		
船側縦通桁 (26.6.3) 26.6.1.1に述べた区域内に船首艤内に船側縦通桁の延長として船側縦通桁が設けられなければならぬ。もし可能なら上方および下方の船側縦通桁はアイスベルトの縁がそれらの上に来るよう設けられなければならない。中間肋骨の端を船側縦通桁に密接するよう勧告する。	特設肋骨の断面係数は26.7.2.1により定められる p 及び26.3.1.7による係数 e を用いて算式(26.2.3.1.5)により得られる値以上であること。 船側縦通桁 (26.7.3.2) 船首尾隔壁間の船の長さに亘り設ける船側縦通材の心距並びに船側縦通桁と甲板との間隔または内底との間隔は 2.5 m 以下であること。 26.7.3.2.1 に規定された間隔が 2.0 m をこえる場合は 26.3.4.3 に規定された構造の中間水平部材が船側縦通桁と船側縦通桁の間並びに船側縦通桁と甲板又は船側縦通桁と内底との間に設けられること。	船側縦通桁 (26.8.2.2) 配置寸法、構造の詳細は26.7.2.2を参照のこと。	
	(26.7.4) 船首艤内に船側肋骨構造 26.7.2.1において $u_2 = 1$ として定められた p を用いて26.2.4の規定に適合すること。	(26.8.3) 船首艤内船側肋骨構造 26.8.2.1.2において $u_2 = 1$ として定められた p を用いて26.2.4の規定に適合すること。	(26.9.2.1.2) 船首艤の主肋骨の断面係数は 26.9.2.1.1において $u_2 = 1$ として定められた p を用いて26.2.4からえられた値以上とする。

A1	A2	A3
<p>Y A</p> <p>$W = \frac{6.25}{m+1} a l \frac{p}{\sigma_y} 10^3$</p> <p>a = 主肋骨の心距 l = 肋骨上縁からアイスベルトの上方最も近くの甲板又は台甲板までの肋骨スパン m = 肋骨のスパンをいくつかの部分に区分する船側縦通桁又は台甲板の数。 p = 算式 (26.2.2.1.3) により定められる条件的水荷重強度。 但し $u_2 = 1$ とする。</p> <p>肋骨の端部の固着 (26.2.4.2) 船内中間肋骨の下端は可能な限り竜骨線に近く設ければならぬ。 肋骨の上端はアイスベルトより上方にある。</p> <p>船側縦通桁 (26.2.4.3) 船側縦通桁の心距は 1.4 m 以下でなければならぬ。船側縦通桁のうち 1 条は夏季 LWL の 300 mm 下方に設けること。 船側縦通桁の巾と厚さは次による。 厚さ $s = 7 + 0.05L$ 巾 $b = 400 + 5L$ 船側縦通桁は 1 本おきに主肋骨に取付けられた梁の上に載ること、これらの梁の断面積と最小慣性能率は 2.11.2.5 の規定より 50% 大のこと。 船側縦通桁の自由縁にはその厚さの 10 倍以上の巾の面材を取付けなければならぬ。</p> <p>・甲板 (26.2.5) ・アイスベルトの範囲内に位置する甲板および台甲板は横肋骨構造たるべし。 甲板下縦桁の厚さ (mm) $S = 1.13a\sqrt{p+50}$ a = 梁の心距 p = 26.2.2.1.3 の規定により定められた条件的水荷重強度。 ・甲板下縦桁の巾は $2.5a$ 未満としない。</p>		免増しとする。

A4	Y A曳船	A1曳船	A3曳船
	<p>(26.8.2.2) 船側縦通桁の配置、寸法および構造の詳細については26.7.2.2を参照のこと。</p> <p>◦甲板 (26.7.5) アイスペルトの区域内に位置する甲板及び台甲板は26.7.2.1.2において定められたpを用い26.2.5の規定に適合すること。</p>		<p>船側縦通桁 (26.9.2.2) E.P.から0.35Lの範囲の前部に荷重分布用船側縦通桁を設けること。 船側縦通桁の心距並に縦通桁と内底との間の距離又は縦通桁と甲板(台甲板)との間の距離は1.4m以下でなければならぬ。 2.11.2により規定された船首艤内の船側縦通桁のうち1条は夏季LWLより約300mm下方に配置され船の全長に亘らねばならぬ。</p>

Y A	A 1	A 2	A 3
<ul style="list-style-type: none"> アイスベルトの範囲内の外板と大きな開口の線との間の甲板又は台甲板の片舷断面積(cm²)は <p>F Pから1.1 bの長さの範囲の船首部</p> $S = 0.580 l \frac{P}{\sigma_y} 10^3$ <p>F Pから1.1 bの断面より後方の船の部分</p> $S = 0.830 l \frac{P}{\sigma_y} 10^3$ <p>l = 開口の長さ</p> <p>P = それぞれの船の区間にに対して26.2.2.1.3の規定により定められた条件的水荷重強度の値</p> <ul style="list-style-type: none"> アイスベルトの範囲内の甲板及び台甲板の梁の断面係数は $W = W_0 + 0.42 \frac{pa l^2}{\sqrt{W_0}}$ <p>a = 梁の心距</p> <p>l = 船側より船口の縁材 甲板下縦桁又は縦通隔壁までの梁のスパン。</p> <p>$W_0 = 2.6.1$ の規定により定められた梁の断面係数。</p> <p>pについては26.2.2.1.3を参照。</p> <ul style="list-style-type: none"> 船底 (26.2.6) すべての場合に各主肋骨に実体肋板が取付けられ船首隔壁からF Pより0.2 Lの断面までの間横肋骨構造が採用されねばならぬ。 上記の長さの範囲の船底外板は2.10.7の規定により中間防撓材を用いて補強されなければならない。 隔壁 (26.2.7) 船首より1.4 m以上の巾の部分の横隔壁には水平防撓材を設けなければならない。 船首尾隔壁にはその全巾に対し水平防撓材を設けなければならない。その心距は船首横隔壁については700 mm以下船首尾隔壁については600 mm以下でなければならない。 アイスベルトの範囲内では 			

<i>A4</i>	<i>Y A 収船</i>	<i>A1 収船</i>	<i>A3 収船</i>
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 横隔壁（26.7.6） <ul style="list-style-type: none"> • 横隔壁は垂直防撓材の2心距の巾、但し1.2m以上に對して水平防撓材により補強のこと。 • 水平防撓材の心距は垂直防撓材の心距又は700mmのうち小さいもの以下でなければならぬ。 		

Y A	A 1	A 2	A 3
<p>横隔壁の船側から 1.2 m までの巾の部の厚さは 9 mm 以上でなければならぬ。</p> <ul style="list-style-type: none"> 船首材及び船尾材 (26.2.8) (船首材) <ul style="list-style-type: none"> 実体の鋸鋼、圧延鋼または鋳鋼製船首材が夏季LWL 上 0.75m の高さまで設けられていなければならない。 船首材の断面積は $S = S_0 + f \cdot \frac{A}{100}$ $A = \text{夏季LWLにおける船の排水量 } t$ $S_0 \text{ 及び } f = \text{表 26.2.8.2 に与えられる値}$ 2.2.2 の規定による船首材の縦横比が守られなければならない。 夏季LWL の上方 0.75m まで取付けられる船首材の部分は成形した鋼板でつくられる。その厚さは外板のアイスペルトの厚さに等しくなければならないが 25mm をこえることを要しない。 夏季LWL の上方 0.75m の高さまで船首材は竜骨板迄伸びる中心線ウエブ並びに 0.7 m 以下の間隔に配置されたウエブにより補強されなければならない。 各ウエブの長さは 600 mm 以上でなければならない。ウエブは最も近い肋骨まで伸ばされそれに固着されなければならない。 (船尾材) <ul style="list-style-type: none"> 船尾材は鋸鋼、圧延鋼又は鋳鋼製のこと。 2.2.3 及び 2.2.4 の規定による推進器柱及び舵柱の断面積並にソールピースの断面係数は次のように増加されねばならぬ。推進器柱 25 %、舵柱及びソールピース 40 %。 2.2.5.1 の規定による半釣下げ舵用のラダーホーンの寸法の決定は 2.2.2 に述べた Y A 級の船に対する計画速力以上の速力を用いて行わねばならぬ。 船尾の形状はプロペラ及び 	<ul style="list-style-type: none"> 船首材及び船尾材 <ul style="list-style-type: none"> 鋸鋼、圧延鋼又は鋳鋼製の実体船首材が夏季LWL 上 0.65 m まで設けられねばならない。 	<ul style="list-style-type: none"> 船首材及船尾材 (26.4.4) <ul style="list-style-type: none"> 鋸鋼、圧延鋼、又は鋳鋼で作られた船首材の断面積は 2.2.2 により規定されたものより 15% 大きくなければならぬ。縦横比は不变。 冬季LWL より上方 0.65 m の高さまでの成形鋼板製の船首材の厚さはアイスペルトの厚さより少く共 10% 大きくあるべし、但し 25 mm をこえる要はない。 船首材は 600 mm 以下的心距に設けられた水平のウエブにより防撃された中心線ウエブにより補強されなければならない。 	<ul style="list-style-type: none"> 船首材及船尾材 (26.5.4) <ul style="list-style-type: none"> 鋸鋼、圧延鋼又は鋳鋼製の船首材の断面積は 2.2.2 の規定より 7% 大きくなければならぬ。 縦横比は不变に保たれること。

A4	Y A曳船	A1 曳船	A3 曳船
<ul style="list-style-type: none"> ◦ 船首材及び船尾材（26.6.4） <ul style="list-style-type: none"> • 26.5.4.2 を参照のこと。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 船首材及び船尾材（26.7.7） <ul style="list-style-type: none"> • 船首材は 26.2.8.1 , 26.2.8.3 および 26.2.8.4 の規定に適合すべし。 • 船首材の断面積は 14.2.1.1 の規定による値より 50% 大のこと。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 船首材は 14.2.1.1 により規定された値より 30% 大。 • 組立船首材の場合は棒（長材）に接続する外板厚さはアイスペルトの前端部分の厚さより 30% 増とすること。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 船首材及び船尾材（26.9.3） <ul style="list-style-type: none"> • 船首材の断面積は 14.2.2.1 の規定値より 20% 大いこと。 • 組立船首材の場合は棒（長材）に接続する外板の厚さはアイスペルト前端の厚さの 30% 大とする。
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 船尾材は 26.2.8.5 の規定に適合のこと。 • 14.2.2.1 による船尾材の断面積は 30% 増とすること。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 船尾材は鍛鋼、圧延鋼または鉄鋼であること。 • 別箇の铸造又は锻造部で構造され溶接により結合された船尾材は容認される。 • 断面積は 14.2.2.1 の規定値の 20% 増とする。 	<p>(26.9.3.2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 船尾材は鍛鋼、圧延鋼又は鉄鋼でつくられること。 • 別箇の铸造又は锻造部分を溶接して作った船尾材は容認される。 • 断面積は 14.2.2.1 の規定値の 10% 大であること。

<i>A</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>
舵を保護する様なもので船尾材は舵より后方 100 mm 以内にアイスナイフを備えること。	<p>の船に対する設計速力以上に対するソールピースの断面係数を確保するに必要なもの及び 2.2.3.7 によるソールピースの最小寸法の 15 % 増のうち大きい方とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・船尾材が半釣下げ舵のためラダー ホーンをもつときは 2.2.5.1 によるラダー ホーンの寸法の決定は第Ⅲ部設備配置及び舾装品の 2.2.2 に述べられた A1 船級の耐水補強船に対する設計速力による。 		

A4	Y A曳船	A1曳船	A3曳船

(c) 各国船級協会耐氷構造規則の中冬季北バルト海航行船舶に対する規定の比較

耐氷帶の仮

LR (76)	AB (77)	BV
(前部) 1 A super $p = 0.63 + 0.072k$ max 1.62 N/mm 1 A $= 0.57 + 0.063k$ " 1.47 " 1 B $= 0.51 + 0.054k$ " 1.32 " 1 C $= 0.45 + 0.045k$ " 1.18 "	(前部) 1 AA $p = 6.4 + 0.73k$, max $p = 16.5$ " 1 A $= 5.8 + 0.64k$, " $= 15.0$ " 1 B $= 5.2 + 0.55k$, " $= 13.5$ " 1 C $= 4.6 + 0.46k$, " $= 12.0$ "	(前部) 1 A super $p = 6.3 +$ 1 A $= 5.7 +$ 1 B $= 5.1 +$ 1 C $= 4.5 +$
(中央部) 1 A super $p = 0.56 + 0.021k$ max 0.84 N/mm 1 A $= 0.45 + 0.014k$ " 0.68 " 1 B $= 0.34 + 0.007k$ " 0.45 " 1 C $= 0.235 \text{ N/mm}$	(中央部) 1 AA $p = 5.7 + 0.21k$, max $p = 8.6$ " 1 A $= 4.6 + 0.14k$, " $= 6.9$ " 1 B $= 3.5 + 0.07k$, " $= 4.6$ " 1 C $= 2.4$ "	(中央部) 1 A super $p = 5.6 +$ 1 A $= 4.5 +$ 1 B $= 3.4 +$ 1 C $= 2.35$
(船尾部) 1 A super $p = 0.45 + 0.013k$ max 0.62 N/mm 1 A $= 0.34 + 0.009k$ " 0.45 " 1 B $= 0.23 + 0.005k$ " 0.28 " 1 C $= 0.118 \text{ N/mm}$	(後部) 1 AA $p = 4.6 + 0.13k$, max $p = 6.3$ " 1 A $= 3.5 + 0.09k$, " $= 4.6$ " 1 B $= 2.4 + 0.05k$, " $= 2.9$ " 1 C $= 1.2$ "	(後部) 1 A super $p = 4.5 +$ 1 A $= 3.4 +$ 1 B $= 2.5 +$ 1 C $= 1.18$
$k = \frac{\sqrt{VH}}{858}$ $V =$ 夏季満載吃水線のときの排水量 $H = SHP$ であって KW で表わす。	$k = \sqrt{(ASHP)} / 1000$ メートル単位	$k = \frac{\sqrt{VF}}{858}$
縦 肋 骨 断面係数 $I/y = \frac{p_2 l^2 s}{13,000 f_y} \text{ cm}$ $p_2 = 0.64 p$ 前部 $= 0.70 p$ 中央部と後部 p, l, s, f_y は 2462 による 中間肋骨の端末固着は主肋骨と全一とする。 上端は氷帶の上縁上、下端は氷帶の下縁下において取付ける補強範囲は横肋骨と全じ。	縦 肋 骨 断面係数 $S M = 769 p_2 l^2 s / Y \text{ cm}$ $p_2 = 0.64 p$ 前部 $= 0.70 p$ 中央部と後部 p, l, s, Y は 29.29 による。 全 左	縦中間及正肋骨の断面 $W = \frac{k}{Re} P E / l^2$ $k = 4923.1$ $= 5384.6$
外 板 ○横肋骨のときの外板厚 $t = \frac{2s}{3} \sqrt{\frac{p_2}{f_y}} + 2 \text{ mm}$	外 板 ○横肋骨のときの外板厚 $t = \left(\frac{s}{15} \right) \left(\sqrt{\frac{p_2}{Y}} \right) + 2 \text{ mm}$	外 $e = 209 E \sqrt{\frac{h}{Re}} + 2$

定 水 压 P

(77')	N V (76')	N K (77')
0.72 k ≤ 16.2 0.63 k ≤ 14.7 0.54 k ≤ 13.2 0.45 k ≤ 11.8	(前 部) 1 A* p = 0.63 + 0.85 k, max 1.62 N/mm 1 A = 0.57 + 0.75 k, " 1.47 " 1 B = 0.51 + 0.64 k, " 1.32 " 1 C = 0.45 + 0.54 k, " 1.18 "	(耐水帶前部) 上限値 1 A super p = 6.4 + 0.73 k 16.5 % 1 A = 5.8 + 0.64 k 15.0 " 1 B = 5.2 + 0.55 k 13.5 " 1 C = 4.6 + 0.46 k 12.0 "
0.206 k ≤ 8.4 0.137 k ≤ 6.8 0.069 k ≤ 4.5	(中央部) 1 A* p = 0.56 + 0.24 k, max 0.84 N/mm 1 A = 0.45 + 0.16 k, " 0.68 " 1 B = 0.34 + 0.08 k, " 0.45 " 1 C = 0.24 N/mm	(耐水帶中央部) 上限値 1 A super p = 5.7 + 0.21 k 8.6 % 1 A = 4.6 + 0.14 k 6.9 " 1 B = 3.5 + 0.07 k 4.6 " 1 C = 2.4
0.127 k ≤ 6.2 0.088 k ≤ 4.5 0.049 k ≤ 2.85	(船尾部) 1 A* p = 0.45 + 0.15 k, max 0.62 N/mm 1 A = 0.34 + 0.10 k, " 0.45 " 1 B = 0.24 + 0.06 k, " 0.28 " 1 C = 0.12 N/mm	(耐水帶后部) 上限値 1 A super p = 4.6 + 0.13 k 6.3 % 1 A = 3.5 + 0.09 k 4.6 " 1 B = 2.4 + 0.05 k 2.9 " 1 C = 1.2
	$k = \sqrt{A_f P_s} \cdot 10^{-4}$ A_f = 平均夏季吃水時の清水中の排水量 (外板を含む) t P_s = 推進機関の最大連続出力 (KW)	$k = \frac{\sqrt{W' SHP}}{1,000}$
係数 前部 中央部后部	断面係数 $Z = \frac{0.77 p_2 l^2 s}{\sigma_y} \cdot 10^6 \text{ cm}^3$ $p_2 = 0.64 p \text{ N/mm}$ 前部 $= 0.70 p \text{ " 中央部, 后部}$ 中間縦肋骨の端末固着は主肋骨と全一とする。 中間肋骨は水帶の上線の上および下線の下に取付けれる。補強範囲は横肋骨と全じ。	主縦肋骨及び中間縦肋骨 $Z = \frac{769 p_2 s l^2}{\sigma_y} \text{ cm}^3$ $p_2 = 0.64 p \text{ 前部耐水帶}$ $= 0.70 p \text{ 中央部及后部}$ 耐水帶 全 左
板	外 板 ○横肋骨のとき $t = 670 s \sqrt{\frac{p_3}{\sigma_y}} + 2 \text{ mm}$	外 板 (1) 横肋骨式構造の場合 $t = 66.7 s \sqrt{\frac{p_3}{\sigma_y}} + 2 \text{ mm}$

LR (76')	AB (77')	B V
$p_3 = 1.2 p \left(1.1 - \frac{s}{3000}\right), \leq 16.5\%$ p, s, f_y は 2462 による。 ○ 縦肋骨のときの外板厚 $t = \frac{2s}{3} \sqrt{\frac{p_4}{f_y}} + 2 \text{ mm}$	$p_3 = 1.2 p \left(1.1 - \frac{s}{3000}\right), \leq 16.5\%$ p, Y は 29.29 による。 ○ 縦肋骨のときの外板厚 $t = \left(\frac{s}{15}\right) \left(\sqrt{\frac{p_4}{Y}}\right) + 2 \text{ mm}$	横肋骨 $h = 1.22 p$ 縦肋骨 $h = 1.43 p$ $h = 1.43 p$ $h = 1.22 p$
$\text{ここに } p_4 = 1.4 p$ 前部 $= 1.2 p$ 中央部と后部 $= 16.5\%$	$\text{ここに } p_4 = 1.4 p$ 前部 $= 1.2 p$ 中央部后部 $\leq 16.5\%$	
(水帶の上下範囲)	(水帶の上下範囲)	
1 A super LWL 上 0.75m BWL 下 0.60m	LWL 上 750 mm 1 A 600 mm 1 B, 1 C 500 mm	BWL 下 600 mm 500 mm
1 A LWL 上 0.60m BWL 下 0.50m		
1 B 1 C } LWL 上 0.50m BWL 下 0.50m		

(77')	N V (76')	N K (77')
$(1.1 - \frac{E}{3})$	$p_3 = 1.2 p \left(1.1 - \frac{S}{3} \right) N/mm$ $\geq 162 N/mm$	$p_3 = 1.2 p \left(1.1 - \frac{1}{3} s \right)$ $\leq 16.5 N/mm$
前部	○縦肋骨のとき	(2) 縦肋骨式構造の場合
前部 ≤ 16.5		
中央部と後部 ≤ 16.5	$t = 670 s \sqrt{\frac{p_4}{\sigma_y}} + 2 mm$ $p_4 = 1.4 p N/mm$ 前部 $= 1.2 p " 中央部, 後部\geq 1.62 "$	$t = 66.7 s \sqrt{\frac{p_4}{\sigma_y}} + 2 mm$ $p_4 = 1.4 p$ 前部耐水帶 $= 1.2 p$ 中央部及後部耐水帶 $\leq 16.5 N/mm$
	(水帶の上下範囲)	
	LWL 上 BWL 下	
1 C E 1 A*	0.75m	0.60m
1 A	0.60m	0.50
1 B, 1 C	0.60m	0.50

(d) 各国船級協会耐水構造規則の比較

船級協会名	規定した年	耐水クラス	外 板				肋 骨			
			耐水帯の上下範囲		中央部外板の規定厚に対する補強部外板の板厚増厚率(%)と外板補強区域				肋	
			LWLより上	BWLより下	船首部FPより	中央部	船尾部APより	船の縦方向における補強範囲と断面係		
LR	1976	1*	0.75m	0.61m	1.1 / 間80	1.1 /より後方025Lまで40	25	中央部肋骨と全じか普通の首尾艤助骨の2倍の中大きい方	-	中央部肋骨と全じか普通の首尾艤助骨の2倍の中大きい方
		1	0.75	0.61	1.1 / 間50	1.1 /よりAPまで25	25	全 上	-	全 上
		2	0.75	0.61	1.1 / 間50	15	15	全 上	-	全 上
		3	0.75	0.61	/ 間25	0	0	-	-	-
		1A super								
		1A								
		1B								
		1C								
AB	1977	AA	0.750 m	0.600 m	1.1 / 80	40	25	中央部肋骨と同一の強度か船首尾艤助骨要求値の2倍のうち大きい方		
		A	0.508	0.508	1.1 / 50	25	25			船首艤に全じ
		B	0.508	0.508	/ 50	15	15			
		C	0.508	0.508	/ 25	0	0			
		1AA								
		1A								
		1B								
		1C								
BV		glace 1 super	0.75 m	0.60 m	1.1 dv 1.8 eo	1.40 eo	s a 1.25 eo			
		glace 1	0.50	0.50	1.5 eo	1.20 eo	1.20 eo			

と 縦 通 材		船 尾 骨 材		舵	推 進 軸		プロペラ	主機関の出力係数	
骨		船側縦通材	船首材	船尾材	舵頭材 並 ビント ル直 径の 増 大 率 %	推力軸 中間軸 の直 径 増 大 率 %	プロペ ラ軸の 直 径 増 大 率 %	材料の 強度 伸 %	SHP=C L B のC 単位m
数の増大率(%)		縦通材取付区域 (船首材からの距離) 及び縦通材の間隔		断面積の 増 大 率 %		舵頭材 並 ビント ル直 径の 増 大 率 %	推力軸 中間軸 の直 径 増 大 率 %	プロペ ラ軸の 直 径 増 大 率 %	材料の 強度 伸 %
中間肋骨取付前后 範用 強度		中間肋骨 取付上下範囲		全長 3 条 $\geq 1.3\text{ m}$					
船の全長 隣接する主又は甲 板間肋骨と同じ	上甲板又はLWL上 750mm 以上の所にあ る第2甲板から肋板 又はタングトップまで	中実 バーステム 板製	30 80	30	30	12	20	44	2.2
船の全長 全 上	総吃水下915mmより LWL上750mmまで	全長 1 条 $\geq 2.0\text{ m}$ 1.1 / 間	板製	25 65	25	25	8	15	44
F P から 1.1 / 間	全 上	1.1 / 間 $\geq 2.0\text{ m}$	板製	15 65	15	12.5	4	8	44
船首隔壁の前では 首尾艤の肋骨の50 %その後方では隣 接ルール肋骨の80 %	全 上	1.1 / 間 $\geq 2.0\text{ m}$	板製	10 15	7.5	7.5	-	5	44
船の全長 主肋骨と同じ			板製のとき 外板より 80	第4章の 要求の 30	第5章の 要求の 30	12	20	≥ 46 ≥ 19	2.10
			" 65	" 15	85	8	15	≥ 46 ≥ 19	1.75
			" 65	" 10	40	4	8	≥ 46 ≥ 19	1.30
			-	舵頭材 のみ 25	-	-	5	≥ 46 ≥ 19	1.00
全 長 主肋骨に全じ				30	30				
全 長 主肋骨に全じ				15	25				

船級協会名	規定した年	耐水クラス	外 板					肋 骨		
			耐水帯の上下範囲		中央部外板の規定厚に対する補強外板の板厚増厚率(%)と外板補強区域			肋		
			LWLより上	BWLより下	船首部FPより	中央部	船尾部APより	船の縦方向における補強範囲と断面係		
			船首部	船艤	船尾部	主 肋 骨	船首部	船艤	船尾部	
BV	1976	glace 2	0.50	0.50	sv 1.5e	1.15 e	sv 1.15 e			
		glace 3	0.50	0.50	1.25	25<e<10 —	—			
		1 A super								
		1 A								
		1 B								
		1 C								
NV	1976	1 A*	0.75	0.60				規則本文による。		
		1 A	0.60	0.50				規則本文による。		
		1 B	0.50	0.50				規則本文による。		
		1 C	0.50	0.50				規則本文による。		
		ICE BREAKER						規則本文による。		
		ARCTIC ICE BREAKER						規則本文による。		
NK	1977	AA	0.5m	1.0m	1.1 / 間 0.88 √VSL + 3.5	0.68 √VSL + 3.5	0.25 L は m の中大きい方 0.60 √VSL + 3.5	3.3 s l² L		3.3 s l² L
		A	0.5	1.0	1.1 / 間 0.72 √VSL + 3.5	0.60 √VSL + 3.5	全 上 0.60 √VSL + 3.5	2.2 s l² L		2.2 s l² L
		B	0.5	1.0	0.72 √VSL + 3.5	0.40 √VSL + 3.5	全 上 0.40 √VSL + 3.5	1.5 s l² L		1.5 s l² L
		C	0.5	1.0	0.60 √VSL + 3.5	一般規則厚	一般規則厚	0.75 s l² L		0.75 s l² L
		1 A super								
		1 A								
		1 B								
		1 C								

1. / は FPからLWLが最大巾に達する点迄の距離をいう。
2. mは APからLWLが最大巾に達する点までの距離をいう。

上 縦 通 材			船 尾 骨 材		舵	推 進 軸		プロペラ	主機関の出力係数
骨		船側縦通材	船首材	船尾材	舵頭材 金 ピント ル直徑 の増大 率 (%)	推力軸 中間軸 の直徑 増大率 (%)	プロペ ラ軸の 直 径 増 大 率 (%)	材料の 強 度 強 伸 (%)	SHP = C.L.B のC 単位m
数の増大率(%)	中間肋骨	縦通材取付区域 (船首材からの距離) 及び縦通材の間隔	断面積の 増 大 率 (%)						
中間肋骨取付前後 “強度”	中間肋骨 取付上下範囲	縦通材取付区域 (船首材からの距離) 及び縦通材の間隔	断面積の 増 大 率 (%)		舵頭材 金 ピント ル直徑 の増大 率 (%)	推力軸 中間軸 の直徑 増大率 (%)	プロペ ラ軸の 直 径 増 大 率 (%)	材料の 強 度 強 伸 (%)	SHP = C.L.B のC 単位m
船首から 0.25L間 船尾から 0.15L間 主肋骨に全じ	肋板頂部から上甲板 まで。その他の部分 では L WL上 500mm から最低吃水線下 1 mまで。	3.6 mをこえぬよう 特設肋骨を設ける。 その間に 2 m以内の 間隔で船側縦通桁を 設く	鋼板製のとき 2部規定を値より65 %増		シュー ピース 断面積 30	30	12	20	- 2.1
全 上	全 上		“		25	25	8	15	- 1.75
全 上	全 上		“		15	15	4	8	- 1.3
全 上	全 上		“		8	8	-	5	- 1.0
			規則本文による						規則 本文 による。

(e) 船舶の耐氷補強（文献の要約）

Isklassbestämmelserna 1971

Grunér Pehr S. <Navigator> (Suomi) 1971 No.5 30-31

スウェーデン国立海運委員会は、それまで有効であった規則と大幅に異なる新規則「1971年 耐氷補強規則」を発効させた。氷海中を運航する船舶は6クラスに分けられ、うち2クラスは砕氷船、4クラスが耐氷船用である。二つの用途をもつ船舶、例えば遮浪甲板船、は二つのクラスを受けることができるようになっている。すなわち開放遮浪甲板では1Aクラス、閉鎖遮浪甲板では1Cクラスというように二クラスを保有できる。多くの在来船は1973年以降、冬期運航の激化、特に砕氷船の誘導による冬期運航の激化との関係で、若干低いアイスク拉斯を得ることになる。船主は、凡ゆる場合の氷の損傷について海運委員会に直ちに報告する義務を負う。

この規則には、大形開口ハッチを装備する船舶の甲板補強規則が初めて含まれる。

舵板規則は、ソ連船級の経験や氷中における実際航行速度を考慮して要求が弱められている。

スクリューと推進軸の設計規則は、バルト海での実地試験データによって入手されたスクリュー荷重のための経験式を基礎としている。

中間軸の補強規則(1A Superクラスを除く)は提起されていない。

新規則はスウェーデン、フィンランド及び英の各言語が並記されたテキストで出版された。このテキストには重量t数1100～50,000t、出力1,300～16,800hpの船舶のための新旧規則によって作成された総合比較表が掲載されている。

(終)

第2部 氷海商船設計・建造に関する技術文献調査

I まえがき

氷海商船の設計、建造上の技術的問題点の解明に資するため第160研究部会では、昭和50年度には次の調査を行った。

(1) 氷海用船舶に関する技術調査

米国 ARCTIC INCORPORATED 社に委託して世界における砕氷船及び氷海航行商船に関する技術の現状を調査した。

(2) 宗谷・ふじの実績調査

前の南極観測船「宗谷」の改造、修理工事と使用の実績及び現在の南極観測船「ふじ」の建造計画と運航実績について調査した。

昭和51年度には、氷海船舶に関する次の技術文献を調査した。

- (1) ソ連文献「レグコール（砕氷船）」V.I.Kashtelyan 他著
- (2) ソ連文献「船舶の運動に対する氷の抵抗」V.I.Kashtelyan 他著 第2章～第6章
- (3) ソ連北極南極研究所紀要第309号「船舶の氷海耐航性」抜粋
- (4) ソ連北極南極研究所紀要第317号「船舶の着氷の研究」抜粋

本年度は、以上の調査内容を総合的に検討した結果、さらに氷海商船設計・建造上の技術点問題点の解明のために必要と考えられる次の技術文献の調査を行うことにした。

- (1) ソ連北極南極研究所紀要第331巻「氷の構造と物理的・機械的特性」抜粋
- (2) ソ連北極南極研究所紀要第326巻「雪氷の物理的調査法」抜粋
- (3) ソ連文献「氷海航行の経験」M.B.Gotsky 著

以下にその結果を報告する。

II 北極・南極研究所紀要第331卷「氷の構造と物理的・機械的特性」(1976年)抜粋

§ 1 氷の機械的特性の最大確率値の選定

I.G.Petrov

氷の機械的特性、即ち強度特性はその破壊に対する抵抗力を決めるもので、これは氷盤の載荷力の計算また氷の障害の防除に当って用いられる。近年、氷の機械的特性の究明に対する関心が著しく高まってきており、さまざまな研究機関*がこれに取組んでいる。

ところで、氷の機械的特性の値については、さまざまな研究者によって公表されたデータを比較すれば、それらの間に非常に大きな差異がみられることが判かる。これは氷の特定の存在条件また融解点に近い温度での氷の特定の挙動条件によつてもたらされるものである。更に、氷の検討に際しては氷は決して均質な材料ではないことも銘記しておかなければならぬ。氷の種類は極めて多様であることが知られており、その特性は氷の生成条件、温度、塩分、各種不純物、構造などによって左右される。

氷の機械的特性を求める方法は大きな役割を果す。一時的抵抗は載荷速度（変形速度）、圧縮変形時の供試体の寸法、プレスのベッドの質などに著しく左右される。また氷がおかれている媒体（氷または空気）がその強度に影響を及ぼす。このような諸因子の多様性が氷の強度値に大きなばらつきをもたらしており、このことは氷一般についてばかりでなく、具体的条件（或る一定の温度、媒体、その他の条件）のもとに存在する具体的な氷（或る一定の構造、塩分をもち、あれこれの不純物を含む氷）についても云える。このような諸条件が氷の機械的特性の把握に際して必ずしも常に考慮されていない。

氷の試験はその結果が満足すべき比較対照性をもつためには標準的な試験でなければならない。

氷の強度限界の計算値に関する問題はそれぞれの供試体について求められたあれこれの試験値の現実的であるかどうかの問題ではなく、個々の供試体について得られ、それから上掲の諸要因に対する補正を施された強度に基づいて氷盤全体の強度を計算する際の初期値（基準値）となるような強度値の選定を目指す複雑な問題である。

氷の強度はさまざまな種類の変形に際してその弾性定数および一時的抵抗によって特徴付けられる。弾性定数（ヤング率、ボアソン比、剛性率）は圧縮、引張り、曲げおよび剪断による変形に際しても氷中の弾性振動の伝播速度を測定することによって求めることができる。

さまざまな変形時における一時的抵抗は実験的に求められる。更に、氷の作用を受ける構造物および氷から作られた構造物の強度の計算に際し、氷と氷また氷と他の材料との凍着力に関するデータ、並びに氷の摩擦係数や粘性係数に関するデータを使用することができる。

本研究の課題は以上で述べたような氷の特性についてさまざまな研究者によって公表されている知見を体系的に整理し、最も確からしい特性値を選び出すことにある。

(1) 氷中の弾性波の伝播速度

氷の弾性特性を特徴付ける係数が弾性波の伝播速度に基づいて算定されることと関連して、その測定方法、変化範囲を検討し、またその最大確率値を確定してみる。

励起される振動の性質に応じて弾性波の測定方法はインパルス法（衝撃法）と連続振動法に分けられる。前者の方法では氷中の弾性波の伝播速度 v は或る一定の距離 s に対する弾性振動の伝播時間 t に基づいて計算される。即ち式 $v = \frac{s}{t}$ で算定される。弾性波の伝播速度を測定するインパルス法は2つのグループ、即ち超音波インパルス法

*) 一北極・南極研究所 B.E.Vedeneev 記念全ソ水力工学研究所、モスクワ国立大学、レニングラード国立大学、ノボシビルスク鉄道輸送研究所、その他

と震動インパルス法 (Seismic impulse method) に分けられる^{1,21)}。

单一振動周期をはるかに上回る時間に亘って媒体に連続振動を与える方法は共振法である。この方法の本質はさまざまな周波数で供試体の振動を励起し、供試体の機械的振動の基本共振数に対応する周波数を求めることがある。共振法はその他の動的方法よりも早期に氷の弾性特性の測定に適用されている。

V.V. Bogorodsky¹¹ は超音波インパルス法を用いてラドガ湖の単結晶氷中における縦波と横波の伝播速度を測定した。その結果を第1表に示す。彼の著書<淡水氷の物理>³⁾には T. Proktor が行なった試験に基づいて温度範囲 -3 ～ 210 °C における単結晶氷中の音波の伝播速度の測定データが示されている。

第1表 超音波法で測定した氷中の弾性波の伝播速度

この場合、縦波の速度は -30 °C での $3.8 \cdot 10^3 \sim 4.1 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ から -210 °C での $3.9 \cdot 10^3 \sim 4.4 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ まで変化する。

V.N. Smirnov²⁰⁾ はさまざまな地点で求めた海水および湖氷の弾性特性（弾性波の伝播速度を含む）の値を示している（第2表）。

弾性波の種類	伝播方向	音速 (m/sec)		
		$t = 0^\circ\text{C}$	$t = -10^\circ\text{C}$	$t = -15^\circ\text{C}$
縦波	軸に垂直	3300	3660	3850
縦波	軸に平行	3800	4210	4320
剪断波	軸に平行	1770	1850	1980
剪断波（凍結面に成極された剪断波）	軸に垂直	1390	1730	1910
縦波	軸に対し 45° の角度	3520	3910	4060

第2表 震動法によって求めた氷の弾性特性

V.V. Lavrov⁹⁾ は V.V. Bogorodsky が超音波を用いて一冬氷および大氷塊中の音波伝播速度を測定したデータを引用している。一冬氷では縦波の伝播速度は $2.1 \cdot 10^3 \sim 3.46 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ 、横波の伝播速度は $1.07 \cdot 10^3 \sim 1.77 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ である。試験はさまざまな

な温度（-3.8 °C から -13.0 °C まで）とさまざまな密度（ 0.897 g/cm^3 から 0.913 g/cm^3 まで）の供試体で行なわれた。しかし伝播速度と温度および密度との関係は明らかにならなかった。大氷塊では縦波の速度は $2.70 \cdot 10^3 \sim 3.78 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ 、横波の速度は $1.36 \cdot 10^3 \sim 1.92 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ であった。この場合にも伝播速度と温度および密度との関係が明らかにされなかった。横波の速度 $1.07 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ は疑わしいほどに小さい。

1957 年に A.N. Listov¹⁰⁾ は震動法によって -1 ～ -4 °C の温度範囲において縦波の速度を $2.9 \cdot 10^3 \sim 2.1 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ 、横波の速度を $1.64 \cdot 10^3 \sim 1.16 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ であると求めている。

V.N. Smirnov²¹⁾ は漂流観測ステーション SP-20において震動法により縦波と横波の伝播速度を得ているが、これらの値を彼が計算で求めた係数値と併せて第3表に示す。この同じ論文で V.N. Smirnov は 1957 年に E.M. Lin'kov がシュミット岬の厚さ 2 ～ 3 m の氷盤で、また K. Khankins が 1958 ～ 59 年に米国の漂流観測ステーション<アルファ>号で、それぞれ震動法によって求めた弾性波の伝播速度を引用している。

融氷期における弾性波の伝播速度は若干低くなっている。V.V. Bogorovsky²⁾ は超音波法を用いてネバ河の氷のサンプルでの測定結果に基づいて氷の温度に対する音波の伝播速度の関係を示している。温度範囲 0 ～ -25 °C において弾性波の速度は線形に変化する。即ち縦波では $3.2 \cdot 10^3 \sim 3.8 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ から $4.0 \cdot 10^3 \sim 4.2 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ まで、横波では $1.6 \cdot 10^3 \sim 1.8 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ から $2.0 \cdot 10^3 \sim 2.2 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$ までの間は直線的に変化する。

さまざまな研究者によって求められた水中の弾性波の伝播速度の全ての値を水の温度との関係で示せば第1図の通りである。これらの値の分析から、温度が低下するにつれて水中における弾性波の通過速度は増大すると結論することができる。これは温度の低下に伴ない氷の弾性特性が益々強く現われ、他方、塑性特性が弱くなることによる。

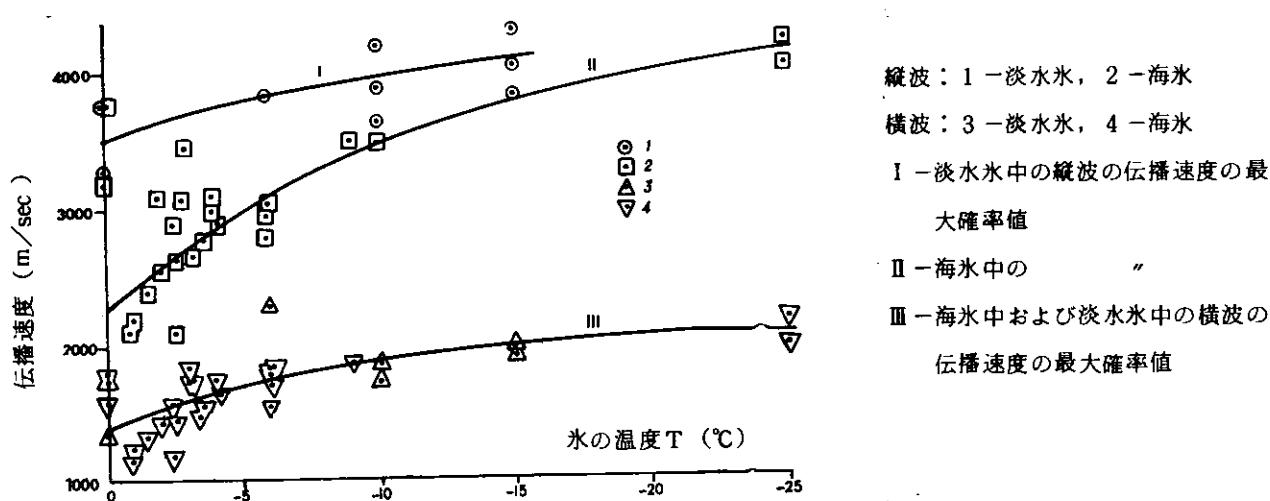
第1図から、弾性波伝播速度にみられる最も大きな差異は波の形、即ち縦波と横波にあることが判かる。海水中および淡水水中の縦波の伝播速度は横波の伝播速度よりも著しく大きく、また海水中と淡水水中の縦波の伝播速度はかなりばらついているが、横波の伝播速度は互に近似している。

海水中と淡水水中の縦波の伝播速度の差異は高い温度のときに特に顕著に現われている。これは水中に垂直方向の割れ目が生成することにより弾性波の伝播方向における氷盤の完整性が崩れること、密度が低くなること、および融解温度に近い温度のときに縦波の伝播方向に液相の量が増大することによると説明される。融解温度での縦波の伝播速度の低下を促進する要因は氷の塑性特性の強化である。

海水中と淡水水中の横波の伝播速度が互に近似していることはこの方向における氷盤の完整性の著しい崩壊がないことによると説明される。海水中と淡水水中とで弾性波の低下状況が同じであることは高温側において氷の塑性特性が強まることによってのみもたらされる。

第3表 震動法によって求めた水中の弾性波伝播速度および氷の弾性特性

水の温度 (°C)	弾性波の伝播速度 (m/sec)		ヤング率 (kg/cm ²)	ポアソン比
	縦 波	横 波		
V. N. Smirnov のデータ				
-2.0	3100	-	-	-
-3.0	3100	1760	78000	0.36
-3.0	3500	1780	87000	0.48
-3.0	3500	1870	92000	0.44
-4.0	3000	-	-	-
-6.0	3140	1760	79000	0.37
	3140	1820	81000	0.32
	3160	1720	77000	0.40
	3140	1850	84000	0.30
-9.0	3460	1850	86000	0.43
-10.0	3500	1850	92000	0.44
E. M. Lin'kov のデータ				
-0.9	2100	1160	-	0.39
-1.0	2200	1230	-	0.93
-1.5	2400	1340	-	0.38
-2.0	2560	1420	-	0.38
-2.6	2620	1470	-	0.37
-3.3	2670	1500	-	0.37
-3.6	2800	1580	-	0.36
-4.2	2900	1640	-	0.36
K. Khankins のデータ				
-	2500	1419	-	0.35
-	3050	1694	-	0.38
-	3070	1825	-	0.29
-	3080	1856	-	0.29



第1図 水中における弾性波の伝播速度

以上に示したデータに基づいて、
海水中と淡水水中の横波および縦
波の伝播速度を第4表に示す。こ
こに示した温度範囲に分布してい
る値についても大きなばらつきが
認められる。このことは水中の彈
性波伝播速度を求める際に水の温
度ばかりでなく、水の構造、水中
の塩分、液相の量（伝播速度はこ
れらにも左右される）も考慮する
必要があることを意味している。

第4表 水中の弾性波の伝播速度

弾性波 のタイプ	水	水の温度(℃)		
		0~-5	-5~-10	-10~-15
縦波	淡水水	3300~3800 3550~3800	3600~4200 3800~3950	3600~4300 3950~4100
	海水	2100~3500 2250~3000	2800~3500 3000~3500	— 3500~3800
横波	淡水水 および 海水	1150~1850 1200~1700	1550~2300 1700~1900	1750~1950 1900~1950

(注) 分子の数字は極値を示し、分母の数字は最大確率値を示す。

(2) ポアソン比

ポアソン比は横方向の相対歪み ϵ' と縦方向の相対歪み ϵ の比を特徴付けるものである。即ち

$$\epsilon' = \mu \cdot \epsilon$$

水の弾性特性の一つであるポアソン比は弾性振動の伝播速度に依って計算される。震動法¹⁷⁾によって求める場合
にはポアソン比は次式で算出される。

$$\mu = 1 - 2 \left(\frac{v_s}{v_p} \right)$$

ただし、 v_s — 横波の伝播速度

v_p — 縦波の伝播速度（平板中の）

弾性振動を共振法³¹⁾で求める場合には次式で計算する。

$$\mu = 0.5 \left(\frac{f_{\text{long}}}{f_{\text{trans}}} \right)^2 - 1 \cdots \cdots \text{円形断面の供試体について}$$

$$\mu = \frac{0.5}{k} \left(\frac{f_{\text{long}}}{f_{\text{trans}}} \right)^2 - 1 \cdots \cdots \text{直角な断面の供試体について}$$

ただし、 f — 供試体の振動の共振周波数

$$k = \frac{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}}{4 \frac{a}{b} + 0.21 \left(\frac{a}{b} \right)^6 + 2.52 \left(\frac{a}{b} \right)^2}$$

a — 供試体の幅

b — 曲げ方向の厚さ

V. V. Bogorodsky¹⁷⁾ は温度範囲 0~31°C についてさまざまな研究者によって求められたポアソン比の値（淡水
水の場合に 0.342~0.372）を紹介し、温度との明瞭な関係が認められないことに注目している。

V. V. Lavrov⁹⁾ は V. V. Bogorodsky によって得られた海水のポアソン比を一冬水では 0.325~0.323、大氷塊では
0.325~0.338 と紹介している。

V. N. Smirnov²¹⁾ は海水について自分が得た μ 値 0.48~0.30 を E. M. Linkov の計算値（0.36~0.39）および、
K. Khankins の計算値（0.29~0.38）と比較している。

A. N. Listov¹⁰⁾ は海水についてポアソン比を 0.39~0.36 と求めており、その際、温度が 0.9°C から -4.2°C ま
で低下するに応じてポアソン比が低下することを明らかにした。

M. I. Serikov¹⁷⁾ は共振法により温度範囲 0~31.0°C に対する淡水水の μ 値を 0.414~0.327（平均 0.360）と
得、また気温 -5.0°C における厚さ 168 cm の南極氷の μ 値は 0.046~0.303 である¹⁹⁾ ことを発見している。

K. F. Voitkovsky⁵⁾ は B. P. Veinberg, B. D. Kartashkin および B. A. Saval'ev によって求められた淡水氷のポアソン比 0.25~0.47 (最大確率値 0.34~0.36) を紹介している。

以上のように、ポアソン比と温度との関係はあまり自立したものではない。多分、これはポアソン比が縦と横の変形量の比を表わすものであり、その各変形量は温度との関係において同一に変化し、両者の比が一定に保たれることにあると説明される。第 5 表にポアソン比の最大確率値を示す。

(3) 弾性率 (ヤング率)

弾性率は引張りまたは圧縮時の弾性変形に対する氷の反抗力を表わす。ビームによって得られた延びは引張力 P およびビームの長さ ℓ に比例し、横断面の面積 F および弾性率 E に反比例する。このことを式で表わせば下記のようになる。

$$\Delta \ell = \frac{P\ell}{EF}$$

この式から判かるように、他の変量が変わらないもとで E 値が大きくなるほど $\Delta \ell$ 値が小さくなる。

2 本の支持物上に設置された供試体について基本共振周波数に基づく共振法によって求めた弾性率は下記の式に従って算定される。

(曲げ振動)

$$E = 1.639 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\ell}{d} \right)^3 \frac{Pf_{bend}}{d} \quad \cdots \cdots \text{円形断面に対し}$$

ただし、 d 一供試体の直径

$$E = 0.965 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\ell}{b} \right)^3 \frac{Pf_{bend}}{a} \quad \cdots \cdots \text{直角断面に対し}$$

ここで、 $D = f \left(\frac{b}{\ell} \right) = 1.125$

(縦振動)

$$E = 5.17 \cdot 10^{-6} \frac{\ell Pf^2_{long}}{ab} \quad \cdots \cdots \text{円形断面に対し}$$

$$E = 4.08 \cdot 10^{-6} \frac{\ell Pf^2_{long}}{ab} \quad \cdots \cdots \text{直角断面に対し}$$

震動法によって求める場合、弾性率は次式から算定される。

$$E = \rho v^2 p (1 - \mu^2)$$

淡水氷を対象にして共振法によってさまざまな研究者によって得られた弾性率の値は V. V. Bogorodsky, 他の報告³⁾ に示されている。

温度範囲 0~10°Cにおいて曲げ振動に対して $E = 88 \cdot 10^3 \sim 100 \cdot 10^3$, また縦振動に対し $E = 91.8 \cdot 10^3 \sim 98.2 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ である。

また、温度範囲 -10~-30°Cにおいては曲げ振動に対し $E = 100 \cdot 10^3 \sim 101.5 \cdot 10^3$, 縦振動に対し $E = 98.2 \cdot 10^3 \sim 111.0 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ である。

M. I. Serikov^{17, 19)} によって求められた海水の弾性率、また V. V. Lavrov の論文⁹⁾ に引用されているソ連の学者 V. V. Bogorodsky, E. M. Lin'kov 及びアメリカの研究者 A. オリバー, V. クレリー, R. コッターによる海水の弾性率の値を第 6 表に示す。同表には A. N. Listov が得たヤング率の値も併せて載せておく。

V. N. Smirnov²⁰⁾ によって求められた弾性率は第 3 表に示してある。K. F. Voitkovsky⁵⁾ も動的方法によるデータに基づく氷の弾性率の値を挙げている。これらは中谷のデータを除き V. V. Lavrov⁹⁾ によって示されている。中谷は -9 °Cにおいて氷河水の弾性率を氷の密度が 0.70 g/cm^3 から 0.914 g/cm^3 まで変化するとき $40 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ から

第 5 表 ポアソン比の平均値

水	密度 (g/cm^3)	ポアソン比
淡水氷	0.87~0.92	0.42~0.34
海水	0.90~0.91	0.40~0.30

第7表 静的方法によって求められた
淡水水の弾性率 ($E \cdot 10^{-3}$)

載荷条件	$0 \sim -10^{\circ}\text{C}$	$-10 \sim -20^{\circ}\text{C}$
圧縮	(3~37) ~ (48~84)	
引張り	17~(49~83)	21~78
曲げ	12~(88~104) ~(73~89)	(31~59)

$90 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ であるとしている。

弾性率は動的方法のほかに静的方法によっても求められる。後者の本質は供試氷片の圧縮、引張りまたは曲げ試験において荷重をかけた後に生じた変形量の測定にある。

圧縮および引張りに際してはヤング率は破壊時の相対延び量に依って得られ、次式で計算される。

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

ただし、 σ —一時的抵抗； ϵ —

供試体の相対延び

2点支持のビームの曲げではヤング率は加えられた荷重 P と挠み量 f に依って求められ、次式で計算される。

$$E = \frac{P \ell^3}{4 b h^3 f}$$

K. F. Voitkovsky はその労作⁵⁾で静的方法による淡水水のヤング率の決定に関する網羅的なデータを示している。これらのデータは温度と載荷条件を統合したもので、例えば第7表に示すようなものである。

B. P. Vainberg は 1940 年に、弾性率の測定結果を一般化して、その最大確率値は $(70 \sim 80) \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ であるとした。その後、B. D. Kartashkin (1947 年) は $-5 \sim -16^{\circ}\text{C}$ の温度領域における圧縮、引張りおよび曲げでの弾性率は平均して $40 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ であると確定した。V. P. Berdennikov (1948 年) はモノリティックな水の弾性率は $90 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ であると判明した。

上記で挙げたようなさまざまな既往の判定結果を分析すれば、氷の弾性特性を特徴付け、弾性変形によって求められる弾性率は或る程度不定な値であると結論できる。即ち、氷の変形に際しその弾性部分を判別することは非常に困難であるためによる。同時にまた、弾性変形に際してのみヤング率の測定信頼度が高い。弾性体の変形と異なり、氷の変形量は載荷時間に左右される。正確には、変形量と荷重との関係を特徴付ける氷の弾性率もまたこの時間に依存する。従って、氷の弾性率の測定は最も短かい載荷時間で行なうべきであり、また最も適した測定方法は動的方法であると考えられる。K. F. Voitkovsky は最も確からしい弾性率値は $E = 90000 \text{ kg/cm}^2$ であると看做し、この値を動的荷重作用時の弾性変形量の計算に用いるよう勧告している。

荷重を持続的に作用させるとには、荷重を加えた最初の数秒間に発生する反向歪み量 (reversible deformation) を弾性変形量として採ることが時には妥当である。これは氷の弾性特性をより完全に反映する値である。圧

第6表 一連の研究者のデータによる海水の弾性率 (kg/cm^2)

出 典	氷の温度 (°C)	弾性率 $E \cdot 10^{-3}$		
		振 動 法		震 動 法
		縦	横	
共 振 法				
M. I. Serikov ¹⁷⁾	-3~-8	88~114.6	84~99.7	
M. I. Serikov ¹⁹⁾	-51	48.5~76.4	52.8~74.6	
V. V. Bogorodsky		27.7~76.5 46.3~91.2 (大氷塊)		
震 動 法				
E. M. Lin'kov ¹²⁾	-1			36.0
	-2			48.0
	-3			56.5
	-4			62.5
	-4.5			66.0 60.0~80.0
	オリバー・クレリ ー、コッター	-1 -2 -3		37.5 49.0 56.0
A. N. Listov	-4			62.5
	-4.5			67.0

縮、引張り、または曲げに際して静的方法によって求められたこのような変形量を計算するために、水の弾性率を40000 kg/cm²と探ることができる。その際、この値と荷重条件および他の諸因子との上述の関係を考慮しておかなければならぬ。水が純粋な弾性体ではないことと関連して、V.V. Lavrovは静的方法によって求めた弾性率を変形率(modulus of deformation)と呼ぶように提案している。これは実際に遭遇する具体的な変形速度に対応するものであるから、極めて重要な値である。

上記で検討した諸値に関しては弾性率と温度との或る一定の関係を明らかにすることはできない。しかし、海水温度の上昇は弾性率の低下をもたらすという若干の見解は同意できる。特に、B.A.Savel'ev¹⁶⁾はこの傾向を氷における液相の増加によって説明している。多分、そのために、T.田畠が静的方法によって求めた海水の弾

性率の値はそのように広い範囲に亘っており、-0~-10°Cの温度のもとで280 kg/cm²から82000 kg/cm²まで変化しているものと理解される。第8表に淡水水および海水のヤング率の実験値並びに最大確率値を示す。これらは相互比較のためと実用上の便宜をよくするためのものである。

(4) 剛性率

剛性率は氷の剪断変形に対する抵抗力を特徴付けるものである。剪断時に応力(接線応力)は相対変形(相対剪断)量に比例する。即ち

$$\tau = G \gamma$$

ただし、 τ —接線応力； γ —相対剪断量； G —剛性率

剛性率 G ⁷⁾は材料の弾性特性を決める独立値ではなく、 E および μ に依存するものである。即ち、

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

この G 値を求める静的方法として最も適用され得るものは円筒状またはブリズム状の供試体を燃れ試験する方法である。この場合には純粋な剪断のための条件が確立される。

K.F.Voithovsky⁵⁾は静的方法によって求めた淡水水の剛性率の値を温度0~-10°Cにおいて $8 \cdot 10^3 \sim 34 \cdot 10^3$ ；温度-10~-20°Cにおいて $(10 \sim 21) \cdot 10^3 \sim 34 \cdot 10^3$ と示している。

震動法によって求められた剛性率は E および μ を用いた一般的な式によって算定される。燃れ振動による共振法で求めた剛性率は次式から計算される。

第8表 水のヤング率(kg/cm²)

試験方法	載荷条件	水の温度(°C)	ヤング率
<淡水水>			
静的方法	圧縮	-3~-5	3000~84000
	引張り	0~-8	17000~50000
	曲げ	0~-21	6000~117000
	氷盤の曲げ	-3~-8	29600~44000
	片持ビームの曲げ	—	24000~45000
共振法	曲げ振動	0~-10	88000~101500
	縦振動	0~-10	91800~98000
	縦振動	-10~-40	97000~111000
震動法	—	-5~-10	70000~125000
最大確率値	—	—	85000~90000
<海水>			
共振法	—	0~-5	41600~93100
		-5~-10	46500~194000
		-13	27700
震動法	—	0~-5	36000~92000
最大確率値	—	—	65000~70000
静的方法	—	-0~-50	280~82000
		-5~-10	610~1250

$$G = 5.17 \cdot 10^{-6} \frac{\ell P f^2 \text{trans}}{d^2} \dots\dots$$

円形断面に対し

$$G = 4.08 \cdot 10^{-6} \frac{\ell P f^2 \text{trans}}{ab} \dots\dots$$

直角断面に対し

$$\text{ただし, } k = \frac{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}}{4 \left(\frac{a}{b} \right) + 0.21 \left(\frac{a}{b} \right)^6 + 2.52 \left(\frac{a}{b} \right)^2}$$

第9表 水の剛性率 (kg/cm^2)

水の温度 ($^{\circ}\text{C}$)	淡水水	海水
0 ~ -5	24000 ~ 36260	15700 ~ 30200
-5 ~ -15	35300 ~ 49000	10400 ~ 34300
-31	36000 ~ 37700	

動的方法によって求めた剛性率は第9表に示されている。M. I. Serikov¹⁷はネバ河の水に対する剛性率を示しているが、これに依れば、温度-3.0~-8.0 $^{\circ}\text{C}$ において $G = 31260 \sim 40400 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (横振動), 温度0~-10 $^{\circ}\text{C}$ において $G = 34240 \sim 36760 \text{ kg}/\text{cm}^2$, また温度-10~-30 $^{\circ}\text{C}$ において $G = 36000 \sim 37770 \text{ kg}/\text{cm}^2$ である。

M. I. Serikov はまた南極の海水について温度-5 $^{\circ}\text{C}$ のとき $G = 23210 \sim 27030 \text{ kg}/\text{cm}^2$ であると判定している。V. V. Lavrov⁹¹は海水の剛性率について V. V. Bogorodsky のデータを引用しているが、それに依れば温度範囲-3.8~-13 $^{\circ}\text{C}$ において $G = 10400 \sim 34300 \text{ kg}/\text{cm}^2$ である。K. F. Voitkovsky⁵¹は動的荷重作用時における弾性変形の計算に $G = (30 \sim 34) \cdot 10^3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ を提案し、持続的荷重作用時の初期変形に対し $G = 15 \cdot 10^3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ を提示している。

淡水水および海水について存在する既往の諸データに基づいてまとめた剛性率の値を第9表に示す。

同表から判かるように、温度が低くなるにつれて剛性率は完全に或る一定の増加を呈する。しかし、さまざまな方法によって氷に加えられる荷重の作用を計算する際に K. F. Voitkovsky が動的および静的剛性率について与えている勧告を覚えておかなければならぬ。

(5) 氷の圧縮強度

物体が破壊されるときの応力を一時的抵抗または限界強度と呼ぶ。⁷¹ いずれの装置の設計に際しても破壊時の応力よりも著しく小さい応力を許容応力と看做しており、このことによっていわゆる強度の余裕（安全率）を設計に取り入れている。

圧縮に対する一時的抵抗 (σ_{COM}) は、一般に、4~5 cmのリブをもつ立方体形の供試体をプレスで圧縮することによって求められる。この一時的抵抗の計算式を下記に示す。

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

ただし、P=破壊荷重；F=供試体の横断面積

K. F. Voitkovsky⁵¹は1899年以降に多くの研究者によって得られた淡水水の圧縮に対する一時的抵抗の値を紹介している。これらの値を下記に同一温度領域毎にまとめて示す。

$$t \quad (\text{ }^{\circ}\text{C}) \dots\dots\dots\dots 0 \sim -5, \quad -5 \sim -10, \quad -10 \sim -15, \quad -15 \sim -25, \quad -25 \sim -35$$

$$\sigma_{\text{COM}} \quad (\text{kg}/\text{cm}^2) \dots\dots 10 \sim 56, \quad 34 \sim 83, \quad 12 \sim 52, \quad - , \quad 28 \sim 76$$

V. V. Lavrov⁹¹は温度-30 $^{\circ}\text{C}$ における淡水水の強度値を11~85 kg/cm^2 と示している。また彼は F. F. Vitman より N. P. Shandrikov による試験結果も示しているが、それに依ると温度が0 $^{\circ}\text{C}$ から-60 $^{\circ}\text{C}$ まで変化するとき氷の強度は15 kg/cm^2 から 55 kg/cm^2 まで増大している。この場合の試験はケロシン中に置かれた供試体で行なっている。

I. P. Butyagin⁴¹は408片の淡水水供試体を用いて圧縮に対する一時的抵抗値として最小2.0 kg/cm^2 , 最大38.2 kg/cm^2 , 平均12.3 kg/cm^2 を得ている。この場合の試験は供試体を温度約0 $^{\circ}\text{C}$ で水中に沈めて行なっている。

淡水水の圧縮に対する一時的抵抗に関する全ての情報を第2図にまとめて示す。同図中の曲線は淡水水の圧縮強度の最大確率値を表わす。この曲線は氷の圧縮に対する一時的抵抗値として最も頻繁に遭遇する値を特徴付けるも

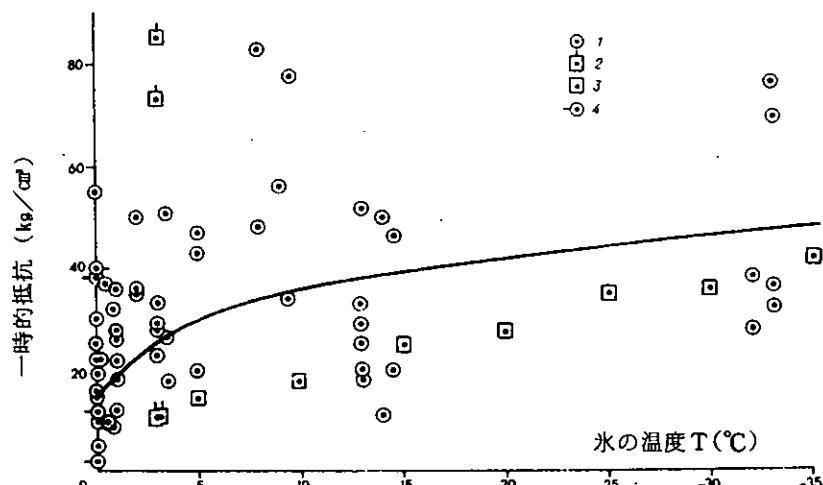
のである。更にまた、この曲線は材料としての氷ばかりでなく、構造物としての氷盤全体についても確率的な強度を表わしている。

均質な材料から構成される構造物の強度を求める際にはその材料の一時的抵抗値のうちの極値が採られる。氷盤の強度の決定に当っては次の考え方から出発して一時的抵抗値のうちから最大確率値が選び出される。即ち、氷盤中の強度の大きい氷の個々の核は高い強度特性をもつ单結晶から形成される（ここでは、高い強度をもち、单結晶または同一タイプの若干大形な結晶から成り立つ供試体を想定すべきである）。このような氷の核の寸法はそれが含まれる氷盤または大形氷塊のそれよりも著しく小さい。従って、氷盤や個々の氷塊は相互に作用し合うか、または何んらかの建造物に作用するとき、硬い氷が含まれている場所ではなく、このような氷の核よりも一時的抵抗が小さい部分で破壊される。これが最も頻繁に供試体で認められる一時的抵抗である。

I.G. Petrov¹³⁾ は漂流観測ステーション SP-2において海水の強度測定を多年に亘り実施した。その結果を第10表に示す。

第10表のデータに基づいて第3図が作られる。これから海水の圧縮に対する一時的抵抗の最大確率値が求まる。なお、同図には上記のデータのはかに I.S. Peschansky¹²⁾ および M.I. Serikov¹⁹⁾ に依る一時的抵抗値もプロットされている。

以上で検討した諸強度値に基づいて第11表が作られる。同表には淡水氷と海水について圧縮時の一時的抵抗値の最大確率値が



1 - K.F. Voitkovsky⁶⁾による値

2 - V.V. Lavrov⁸⁾による値

3 - F.F. Vitman および N.P. Shandrikov による値

4 - I.P. Butyagin による値

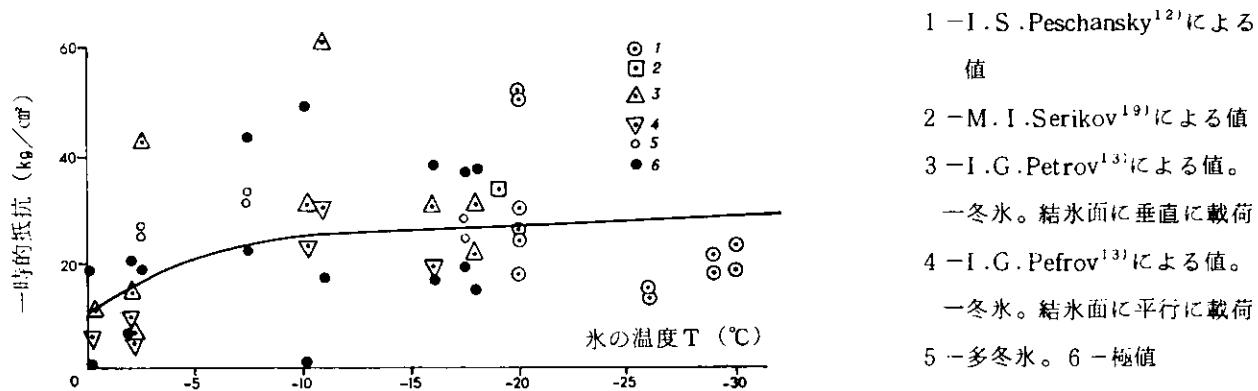
第2図 淡水氷の圧縮時の一時的抵抗

第10表 海水の圧縮強度

圧縮強度 (σ_{com})	試験時の空気温度 (°C)			
	0~-5	-5~-10	-10~-15	-15~-20
一冬氷				
平均 値	11.0	—	45.5	31.0
	7.0	—	26.9	21.0
極 値	2.3~20.3	—	11.9~80.2	21.5~38.2
	0.5~13.4	—	1.54~6.5	15.3~30.8
圧縮強度 (σ_{com})	試験時の空気温度 (°C)			
	0~-5	-5~-10	-10~-15	-19.4~-30.0 (*)
多冬氷				
平均 値	25.0	31.0	—	28.5
	27.0	33.5	—	24.5
極 値	19.0~36.5	24.5~37.7	—	24.1~36.2
	18.4~42.9	22.4~42.8	—	19.4~30.0

(注) 各横欄の第1行の数値は結氷面に垂直に荷重をかけた場合の一時的抵抗の値を、また第2行の数値は結氷面に平行に荷重をかけた場合の一時的抵抗値を示す。

(*) 原文ではマイナス記号が付けられていない。(訳注)



第3図 海水の圧縮時の一時的抵抗

示されている。また圧縮時の最大確率極値も示されている。(稀な極端な値は棄てて)。

第2図と第3図にはさまざまな温度における水の圧縮強度を特徴付ける点がプロットされ、またこれらの点に基づいて曲線が作図されている。これらの図から判かるように、氷の圧縮に対する一時的抵抗値には大きなばらつきが認められる。これは氷の状態および載荷条件に左右されるものである。

以下では氷の強度に影響を与える諸条

第11表 氷の圧縮強度 (kg/cm²)

件について若干詳しく検討してみる。

1) 変形速度 氷は純粋な弾性材料ではなく、それに載荷したとき塑性変形が生じ、また非常に急激な載荷の場合には脆性材料のように破壊されるものであるから、当然のことながら、さまざまな研究者によってさまざまな載荷速度を用いて求められている一時的抵抗値の大きさは互に相当食い違ったものとなる。荷重増加速度との関係における氷の一時的抵抗値の変化を K.F.Voitkovsky⁵¹ は N.A.Tsifovich のデータに依って説明している。

それによれば、載荷速度の増大に伴なう限界強度の低減状況は下記のように示される。

荷重増加速度 ($\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)	20	36	50
圧縮時の限界強度 (kg/cm^2)	60	37	24

V.V.Lavrov⁹¹ は S.S.Vyalov と V.A.chernigov のデータを挙げているが、これに依れば低い載荷速度のときには逆の関係が現われ、載荷速度範囲 $0.0167 \sim 2.6 \text{ kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ においてはその増大は一時的抵抗の増大を招くとされている。このような特有な観測結果は変形速度が低下したとき強度が若干増大し、その後に低減することを裏付けている。

カナダの研究者 A.U.ゴールドおよび A.S.クラウツは、S.S.Vyalov および V.A.chernigov と同様に、変形速度の増大に伴ない強度が増大することを示している(第12表参照)。

次掲の表から判かるように載荷速度の違いによるデータのはらつきは氷の構造の違いによるばらつきよりも大

きい。

氷の強度に及ぼす載荷速度の影響についての括弧的な知見は本論文集に記載のA. N.

Tolstovの論文²載荷速度との関係における氷の強度について>に見出せる。それに依れば、載荷速度が $72\sim88 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ から $2\sim4 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ まで低下するとき地中氷層の氷の強度はほぼ 16 kg/cm^2 から 122 kg/cm^2 までに増大し、その後に低減している。また、小氷丘の氷では 9 kg/cm^2 から 30 kg/cm^2 まで、また氷河氷では 5 kg/cm^2 から 18 kg/cm^2 まで、それぞれ増大し、しかし後に若干低減している。即ちこれら3種類の異なる氷の試験全てにおいて載荷速度が毎分 80 kg/cm^2 から $3\sim4 \text{ kg/cm}^2$ までの範囲において低下するとき供試氷片の一時的抵抗の増大が起きる。 $3\sim4 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ の載荷速度で試験した氷に最も大きな強度が認められている。

載荷速度の変化に対応した一時的圧縮抵抗の変化の様子を第13表に示す。

同表から判かるように、変形速度の絶対値が大きい領域においてはその増大は氷の一時的抵抗値の低減をもたらし、また変形速度の絶対値が小さい領域ではその増大は氷の一時的抵抗値の低減をもたらしている。

載荷速度と一時的抵抗値との間に認められるこのような関係は次のように説明される。即ち、変形速度が非常に小さい値($0.00002 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)から非常に大きい値($1644 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)まで増大する場合、氷は、逐次、塑性変形領域、弾性変形領域で挙動し、その後更に変形速度が増大した場合には脆性材として挙動する。

氷に特有な最大強度は、A.U.ゴールドとA.S.クラウツが指摘しているように、塑性状態から脆性状態に遷移する際に現われる。しかし、この遷移は、彼等が指摘しているように、 $0.01 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ よりも大きい載荷速度のもとで生じ、その値は $3\sim4 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ の範囲にある。変形速度の絶対値が大きい領域でのその増大は氷の強度低下をもたらすが、これは多分、載荷速度が増大するときの荷重が動的荷重の性質を帯び、変形の種類が変わり、圧縮変形から衝撃変形に移り、より低い一時的抵抗値がこれに特有な値となることによるためである。

2) 氷の構造 現在、氷の強度に果すその構造の役割を解明すべく多くの研究が進められている。第10表から明らかなように、結氷面に垂直に荷重をかけた場合の一時的抵抗は平行に荷重した場合のそれとは等しくない。この差異は氷の構造に依存する氷の特性の異方性によって惹き起されるものである。*

3) 氷の温度 氷の温度は氷の状態、構造、巨視的構造、液相の存在を決め、これらが氷の強度に影響を与える。温度の影響が特に顕著に現われるのは季節の移り目においてである。冬期には氷の上部層の方が大きい強度を有し、春期には中央層の強度の方が大きく、短かい夏期には温度に従って氷の下部層の強度が僅かに優位を占めるようになる。氷の強度に及ぼす温度の影響については以上で挙げた全てのデータ表を追跡することができる。

4) 氷中の塩分 氷中における塩類またはその他の不純物の存在は液相の生成および結晶間結合の弱化を促す。これが氷の強度低下をもたらすが、このことは第11表において同一温度のもとでの淡水氷と海水の一時的強度の比較から良く判かる。

第12表 さまざまな変形速度での各種の氷の圧縮時の
一時的抵抗(A.U.ゴールドとA.S.クラウツに
依る)
(単位: kg/cm^2)

氷のタイプ	変形速度 ($\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)		
	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
S ₁	30.0	102.0	133.0
S ₂	10.0	28.0	65.0
S ₄	13.0	35.0	85.0
T ₁	11.0	40.0	60.0
上記4者の平均値	16.0	51.0	88.0

(注1) - S₁, S₂, S₄, T₁はミッセルおよびロムスナーの分類による。

(注2) - 1968/69年冬のセント・ローレンス河の氷

* - N.V.Cherpanov²²⁾およびI.G.Petrov¹⁴⁾の論文では氷の強度に及ぼす氷の構造の影響に関する問題が最新の研究成果を加味して検討されている(しかし残念ながらこれは曲げ変形の場合のみに限定されている)。

第13表 変形速度 ($\text{kg}/\text{cm}^2/\text{min}$) との関係における一時的圧縮抵抗 (kg/cm^2) の変化

報告者	変形速度							
	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$	0.0167	0.2	1.0	2.0	2.3	2.6
S. S. Vyalov, V. A. Chernigov }	—	—	9.5	13.0	—	—	—	15.5
N. A. Tsitovich	—	—	—	—	—	—	—	—
A. N. Tolstov	—	—	—	—	—	—	—	9.5
地氷層の氷	—	—	—	—	—	—	—	—
小氷丘の氷	—	—	—	—	—	—	—	26
氷河氷	—	—	—	—	—	—	—	—
V. V. Lavrov	—	—	—	—	—	—	19.1	—
A. U. ゴールド A. S. クラウツ }	16	51	—	—	83	—	—	—
K. N. Korzhavin	—	—	—	—	—	9.2	—	—
報告者	変形速度							
	3.0	4.0	10.0	20.0	36.0	40.0	80.0	1644
S. S. Vyalov V. A. Chernigov }	—	—	—	—	—	—	—	—
N. A. Tsitovich	—	—	—	60.0	37.0	24.0	—	—
A. N. Tolstov;	—	—	—	—	—	—	—	—
地氷層の氷	122	—	45.0	32.0	24.0	23.5	15.0	—
小氷丘の氷	—	30	27.0	20.0	15.0	14.0	9.0	—
氷河氷	—	—	18.0	9.0	6.0	6.0	—	—
V. V. Lavrov	—	—	—	—	—	—	28.8	27.4
A. U. ゴールド A. S. クラウツ }	—	—	—	—	—	—	—	—
K. N. Korzhavin	—	—	—	3.6	—	—	—	—

5) 氷を取囲む媒体 氷を取囲む界面活性物質は氷の強度を著しく変える。この現象を特徴付ける第一のパラメータについては本論文集に掲載の筆者の第2の論文*で触れている。氷の強度に及ぼす外因媒体の影響については本論文集中で R. T. Kozlovskaya 他 ** によっても取扱われている。

(6) 氷の限界引張り強度

氷が純粋な形で引張りに対して挙動するような構造物に遭遇することとは稀れであるので氷の引張りに対する一時的抵抗に関する研究はあまり深く行なわれていない。更に、この種の変形試験の実施また特に供試体の作成は著しく煩雑である。

K. F. Voitkovsky⁵⁾は1837年以降にさまざまな研究者によって行なわれてきた淡水氷の引張り試験の結果を下記のようにまとめて示している。

温度 (°C)	0 ~ -10	-10 ~ -20	-20 ~ -35
一時的抵抗 (kg/cm^2)	10 ~ 12	12 ~ 19	14 ~ 18

*—"外因水の吸着による氷の強度低下" (原書P. 50 ~ 56)

**—"氷の表面エネルギーと物理的・機械的特性" (原書P. 57 ~ 70)

この少數のデータにV.

V. V. Lavrov⁹⁾が温度 -2°C での淡水氷の試験で得た結果を追加することができる。それに依れば、成長面に垂直な引張りに対する氷の一時的抵抗は 8.6 kg/cm^2 であり、また成長面に平行な引張りに対する氷の一時的抵抗は 12.1 kg/cm^2 であることが明らかにされている。

海水の引張りに対する一時的抵抗の大きさはN.N. Zavov⁶⁾によって示されている。そのデータによれば、温度領域 $-1 \sim -10^{\circ}\text{C}$ において 5.6 kg/cm^2 から $11.1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ までの値となっている。

氷の一時的引張り抵抗は引張り試験機で氷が破壊されるときに測定され、次式で算定される。

$$\sigma_{\text{cal}} = \frac{P}{F}$$

ただし、P—破壊荷重

F—供試体の横断面積

引張時の氷の一時的抵抗について入手されているデータを第14表に示す。

これらの既往データに基づいて第4図を作成できる。同図に描かれた曲線は淡水氷の引張りに対する一時的抵抗値のうちの量大確率値を表わすものである。

(7) 氷の曲げ強度

曲げは氷の強度試験において最も普遍的な種類の変形である。曲げが最も一般的である理由は氷盤に対し最も一般的なタイプの荷重（海水の波動、圧縮、水位変動、輸送、その他）が作用するとき氷の破壊が曲げ変形の結果として生じるからである。

氷の曲げに対する強度は若干の方法、即ち2本の支持物間に自由配置されたビームの破壊、片持ちビームの破壊、また環状支持物上に自由配置され、中心に載荷された円形氷板の破壊によって測定される。

2点支持ビームの破壊により求められる氷の曲げ強度は次式で算定される。

$$\sigma_{\text{bend}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P\ell}{bh^2}$$

ただし、P—破壊荷重： ℓ —支点間の距離：b—ビームの幅：h—ビームの高さ

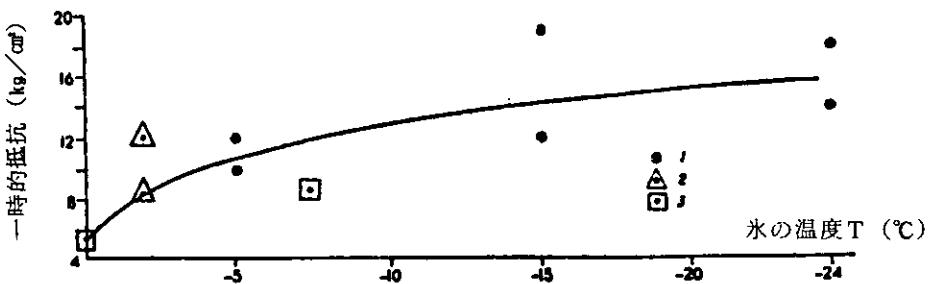
片持ちビームの破壊により求められる氷の曲げ強度は次式で算定される。

$$\sigma_{\text{bend}} = \frac{6P\ell}{bh^2}$$

第14表 氷の引張り強度 (kg/cm^2)

	淡 水 氷	海 水
温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	0 ~ -10	-20 (*)
一時的抵抗	9 ~ 12	14 ~ 18
	0 ~ -10	6 ~ 11

(*)—原文ではマイナス記号が付けられていない（訳注）



第4図 淡水氷の引張り時の一時的抵抗

1—V.F. Voitkovsky⁵⁾による値、2—V.V. Lavrov⁹⁾による値

3—I. G. Petrov による試験値

第80頁

ただし、 ℓ -ビームの固定点から載荷点までの距離

最近広く採用されている曲げ試験法はコアから切り取った円形氷板を用いる方法である。一定の厚さをもち、自由配置され、中心に作用力を受けた円形氷板に生じる応力は次式によって算定される。

$$\sigma_{\max} = \frac{3P_{\max}}{2\pi m h^2} \left[m + (m+1) \ell n \frac{r}{r_0} - (m-1) \frac{r_0}{4r^2} \right]$$

ただし、 $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{bend}}$; P_{\max} = 破壊荷重, m = ポアソン比の逆数 (~ 3), h = 氷板の厚さ

r = 氷板の実効半径 (支持プラケットの内側半径), r_0 = 荷重 (プランジャー) の分布半径

支持プラケットの内径 15.5 cm ($r = 7.75$ cm), 圧迫用シリンダの直径 1 cm ($r_0 = 0.5$ cm) の条件で、氷核 (ice core) より作られた氷板を試験する場合の曲げ強度は次式で与えられる。

$$\sigma_{\text{bend}} = 2.23 \frac{P}{h^2}$$

ただし、 P = 破壊荷重 (kg) : h = 氷板の厚さ

氷板で求めた一時的曲げ抵抗の値は 2 点支持ビームで求めた値よりも大きい。多数の試験結果から移行係数 (transition coeff.) は 0.65, 即ち $\sigma_{\text{bend}} = 0.65 \sigma_{\text{plate}}$ であると判明している。氷の曲げ強度の測定に平板法を N.V. Cherepanov が発明したコアーボーリング機と併せて採用すればこの種の曲げ試験が非常にやり易くなり、野外試験に便利である。

K.F. Voitkovsky は 1897 ~ 1953 年の間に得られた淡水氷の曲げに対する一時的抵抗の詳細な測定結果の一覧を示している⁵⁾。ビームの一時的曲げ抵抗と温度との関係は次の通りとなっている。

温度 (°C) 0 ~ -5, -5 ~ -10, -10 ~ -20, -20 ~ -30

2 点支持ビーム 1.4 ~ 31, 3 ~ 45, 13 ~ 45, 5.7 ~ 24.0

V.V. Lavrov⁹⁾ は淡水の湖水、実験室水および構造的に模擬した氷について自分の得た試験データを提示している。温度領域 0.5 ~ 5.5 °Cにおいてその一時的曲げ抵抗は 19.0 ~ 24.7 kg/cm² の間にあり、平均値は 22.5 kg/cm² であった。この同じ論文で彼は淡水氷の曲げ強度と温度との関係を導き出している。

淡水氷のビームの一時的曲げ抵抗と温度との関係は下記のように示されている。

温度 (°C) 0 -10 -20 -30 -40

一時的抵抗 (kg/cm²) 11 20 22.5 24.0 25.0

更にまた上記の論文⁹⁾で V.V. Lavrov は片持ちビームを曲げた場合の淡水氷の限界強度値を指示している。(第 15 表)。

また、第 5 図にはさまざまな温度における最大確率値を求めるために淡水氷の一時的曲げ抵抗の全ての値がプロットされている。同図には各温度に対する強度の各値と平均値が与えられている。

海水のビームを曲げた場合の一時的抵抗については I.G. Petrov¹³⁾ によって多くの値が得られており、それを第 16 表に示す。供試体は長時間に亘り空気中に放置されたので、その温度は気温と同じであった。

M.I. Serikov¹⁸⁾ には海水から作ったビームおよび氷盤から挽き取った片持ちビームの曲げに対する一時的抵抗値が示されている。後者の供試体の一時的曲げ抵抗は -5 °Cまでの気温のもとで 5.6 ~ 6.6 kg/cm² であった。第 5 図は試験時の気温 (こ

第 15 表 淡水氷から作った片持ちビームの曲げに対する
一時的抵抗

試験条件	温度 (°C)	
	0 ~ -5	-5 ~ -10
湖沼条件または河川条件, 片持ビームの厚さ 30 ~ 70 cm	1.4 ~ 8.3	7.2
実験室条件, 片持ビームの厚さ 3 ~ 6 cm	10.3 ~ 11.9	10.6 ~ 13.7

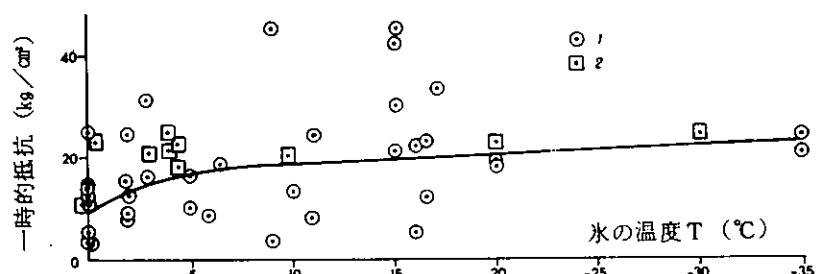
れは氷の温度と等しい)に

おける一時的抵抗の平均値と極値を示す。

海水の曲げ(ビームに換算した平板を使用)に対する一時的抵抗値が I.G.Petrov の論文¹⁴⁾で求められている。その結果は第17表に示す通りである。

V.V.Lavrov は 1965 年から 1968 年にかけて得られた氷の強度に関するデータを一般化して、温度 $\sim 7^{\circ}\text{C}$ における海水の曲げに対する一時的抵抗の平均値を冬氷で 5.7 kg/cm^2 、秋・冬氷で 6.7 kg/cm^2 、秋氷で 8.3 kg/cm^2 、大氷塊で 13.0 kg/cm^2 であると判定している。

N.V.Cherepanov の報告²²⁾には海水の強度値として氷の構造について微分した値が示されている。これはこの種の強度分布を求める初めての試みであり、今後の研究の進展が期待される。N.V.Cherepanov による海水の曲げ強度の変化の全範囲は 0°C での $0 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ から -30°C での $15 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ までに亘っている。



1—K.F.Voitkovsky⁵⁾による値

2—V.V.Lavrov⁹⁾による値

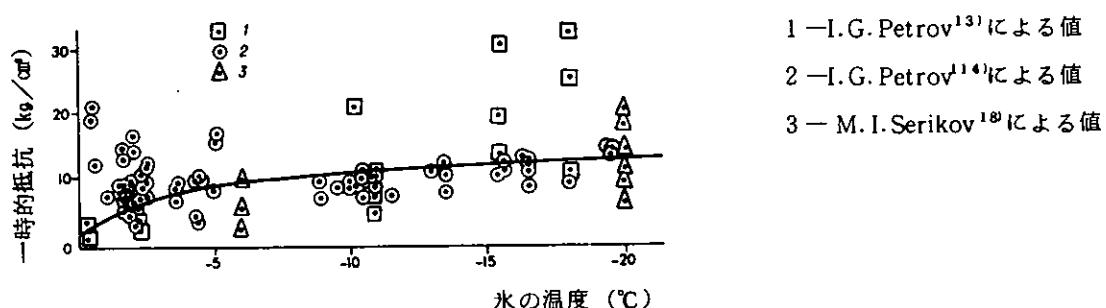
第5図 淡水氷の曲げに対する一時的抵抗

第16表 海水ビームの曲げに対する一時的抵抗

一時的 抵抗値	空気の温度 (°C)			
	0 ~ -5	-5 ~ -10	-10 ~ -15	-15 ~ -20
<一冬氷>				
平均値	3.3	—	8.0	22.2
極 値	1.2 ~ 1.6	—	2.2 ~ 20.2	11.1 ~ 31.8
<多年氷>				
平均値	9.9	11.1	—	10.2
極 値	6.0 ~ 17.1	9.1 ~ 13.4	—	8.0 ~ 12.7

第17表 海水の曲げに対する一時的抵抗

	水の温度 (°C)				
	0 ~ -5	-5 ~ -10	-10 ~ -15	-5 ~ -10	-15 ~ -20
曲げ強度： 平均値	10.6	10.0	10.8	5.7	13.0
極 値	3.1 ~ 20.7	6.8 ~ 16.3	7.0 ~ 14.4	2.4 ~ 10.0	6.4 ~ 20.2
測定方法	2点支持ビームに換算した平板法				



第6図 海水の曲げに対する一時的抵抗

海水の曲げに際しての一時的抵抗に関する上述の全てのデータを第6図にまとめて示す。

淡水水および海水の曲げ強度の極値は第18表に示す通りである。また同表には第5図および第6図で示されたさまざまな温度での最大確率値も示す。

第18表からは各種曲げ試験法の結果が比較できる。即ち、片持ちビーム法と2点支持ビーム法とは得られた一時的抵抗値に基本的な相違は認められない。

平板法で求めた強度値は若干高目の値を示している。しかし、第5図と第6図を検討すれば、これら全ての試験法について得

られた値のばらつきは同様に大きいことが明らかである。氷の曲げに対する一時的抵抗値のうちから最大確率値を求める際には各種の曲げ試験法で得られた全てのデータを統合することができる。しかし、強度値のばらつきを避けるためには氷の構造、載荷速度、水中の塩分などを考慮して一時的抵抗の値を更にもっと精密に求める必要がある。

入手データのばらつきの分析から、氷の曲げに対する一時的抵抗値のばらつきは圧縮強度値のばらつきよりも小さいことが指摘できる。

(8) 氷の剪断強度

氷の剪断に対する強度はその他の変形に対する強度よりも低い。この剪断強度は氷の温度、構造、塩分に左右される。既に明らかのように、剪断強度に影響を及ぼす因子は法線圧力の大きさ、試験手段、供試体の大きさ、載荷速度などである。しかしこれらの問題に関する研究はまだ不充分である。氷の剪断強度は次式で計算される。

$$\sigma_{sp} = \frac{P}{F}$$

ただし、P—破壊荷重

第18表 氷の曲げ強度 (kg/cm²)

試験法	温度 (°C)			
	0~-5	-5~-10	-10~-20	-20~-30
< 淡水 >				
2点支持ビーム法	1.5~31	3~45	13~45	6~24
平板法	3~35	13~39	22~45	33~55
片持ビーム法	1.5~12	7~14	—	—
(最大確率値)	10~16	16~19	19~21	21~22
試験法	温度 (°C)			
	0~-5	-5~-10	-10~-20	
< 海水 >				
2点支持ビーム法	1.2~17.0	2.4~17.0	2.0~31.8	
平板法	3~20	4~6	7~14	
片持ビーム法	5.6~6.6	—	—	
(最大確率値)	2~9	9~11.5	11.5~13	

第19表 淡水氷の剪断に対する一時的抵抗 (kg/cm²)

一時的抵抗	温 度 (°C)				
	0~-5	-5~-10	-10~-15	-15~-20	-20~-30
平均 値	6.3	32.5	9.5	—	12
極 値	1.6~8.3	27~38	9~10	—	5~35

第20表 海水の剪断に対する一時的抵抗 (kg/cm²)

一時的抵抗	温 度 (°C)			
	0~-5	-5~-10	-10~-15	-15~-20
< 一冬氷 >				
平均 値	—	—	5.4	7.6
極 値	—	—	1.1~15.6	4.9~12.7
< 多冬氷 >				
平均 値	2.7	1.8	—	10.3
極 値	2.3~3.1	1.0~2.6	—	8.0~12.7

F一剪断面積

K.F. Voitkovsky⁵⁾は1922年から1957年にかけてさまざまな研究者によって得られた淡水氷の剪断強度に関するデータを示している(第19表)。

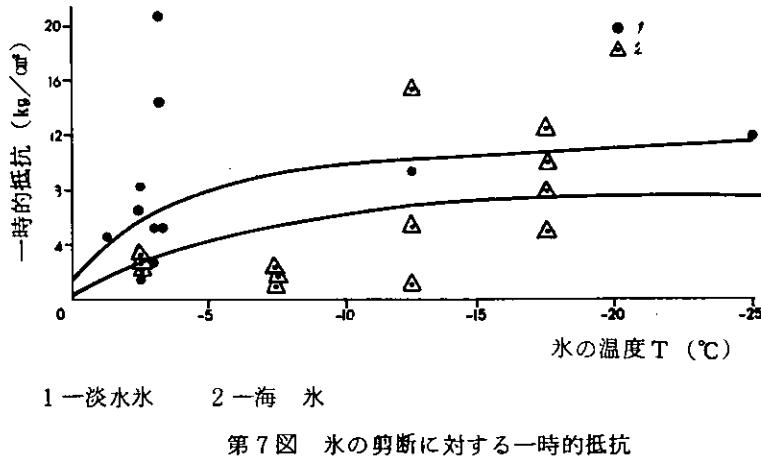
V.V. Lavrov⁹⁾は構造的に模擬した淡水氷の平板の剪断時における一時的抵抗値を示しているが、それに依れば温度-3~-3.5°Cにおいて平均14.5kg/cm²(5.3~20.8kg/cm²)とされている。同じ著書⁹⁾で彼はプリズム形氷片の試験での剪断強度の値として温度領域0~-3.3°Cのとき3.4~8.0kg/cm²(平均4.8kg/cm²)を示している。V.V. Lavrovは温度が低くなるにつれて剪断に対する一時的抵抗が低下するとの推論を示しているが、これは疑問であると思われる。

淡水氷の剪断強度に関する上掲の値に追付するデータとしてI.E.KozitskyとE.A.Bibinによる値が挙げられる。これはV.V.Bogorodsky³⁾によって紹介されており、温度領域0~-6°Cにおける氷の剪断強度は2.76~5.2kg/cm²とされている。海水についてはI.G.Petrov¹³⁾が求めた剪断強度値を第20表に示す。

上述の諸データから第7図が作成される。このグラフから明らかなように、温度が低くなるにつれて海水の剪断強度は大きくなる。

淡水氷および海水の剪断に対する一時的抵抗値の諸データに基づいて第21表が作成される。

上表で淡水氷について温度-5~-15°Cに対して与えられている27~38kg/cm²という値は高すぎる値であり、これは、多分、剪断変形が歪んだ状態のときに得られた値であろう。



第7図 氷の剪断に対する一時的抵抗

第21表 氷の剪断強度 (kg/cm²)

	温 度 °C					
	0~-5	-5~-15	-15~-30	0~-5	-5~-15	-15~-30
	淡 水 水			海 水		
試 験 値	1.6~20.8	27~38	9~10	2.3~3.1	1.0~15.6	4.1~12.7
最大頻度値	3~6	8~12	9~13	2~3	1~9	6~12

(9) 各種材料と氷との凍着強度

氷とさまざまな材料との凍着強度について筆者等は氷の機械的特性の1つとして検討する。この凍着強度は各種材料に凍着した供試氷片の剥離力によって求められ、また次式で計算される。

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

ただし、P=供試体を剥離する力：F=剥離面積

AANII(北極・南極研究所)の氷研究室では氷学の重要な分野である物体表面の結氷(氷の付着)問題を各種構造物、特に船体の着氷問題と関連して研究している。ここでは、各種材料と氷の凍着過程で形成される両者の結合力に対する機械的試験結果のみを示す。

凍着力は材料の温度および凍着面の清純度に左右される。時には凍着強度が凍着する氷の強度を上回り、凍着面でなく別の断面で破壊が起きことがある。他の全ての破壊試験の場合と同様に、凍着強度を求める試験においても荷重を加える速度は大きな意味をもつ。また表面に各種のコーティング（マスチック材、ポリマー材、エポキシ系、ポリウレタン系の被覆）を施せば凍着強度が著しく変わる。今迄得られているデータでは凍着過程を明確に解明するのに不充分である。また、海水の凍着については実験データが全く無い。

K.F. Voitkovsky⁵⁾は N.A. Tsitovich と V.K. Al'tberg がコンクリートおよび木材と氷との凍着性について求めたデータを紹介している。また、V.V. Lavrov⁹⁾は P.P. Kobeko と F.I. Morei が得た結果を紹介し、I.Ya. Kamenetsky, 他⁸⁾は凍着力の低減を促進する多種の材料について報告している。更に、Kamenetsky 等はワニスを塗布しない木材と氷の凍着と温度との間の興味ある関係を提示している。それに依れば氷の凍着強度は温度が-15°Cまで低下するときに増大し、温度が更に-25°Cまで低下するときには付着力が低減するとされている。この温度-15°Cでの凍着強度曲線の屈折は各種材料に対する氷の凍着を得られている。このような曲線の進み具合は、多分、氷体の温度変化によって説明できる。

同じく上記の論文⁸⁾では塩分の増加は被覆面への氷の付着を減少させるが、温度の低下について付着力が増大することを指摘している。温度-25°Cでは塩分を含む氷の付着力は淡水氷の付着力の1/1.3~1/1.5になる。これらのデータを第22表に示す。同表から、材料と氷との付着力は材料によってさまざまであることが判かる。

第22表 淡水氷と各種材料との凍着強度
(kg/cm²)

材 料	温 温 (°C)								
	0	-0.5	-1.0	-2.0	-3.0	-5.0	-10.0	-15.0	-20.0
コンクリート	8~11	-	13~16	-	-	-	-	-	-
鉄	0.14	0.81	2.95	-	20	-	-	-	-
銅	-	-	-	-	21	-	-	-	-
ガラス	-	-	-	-	19	-	-	-	-
ポリスチロール	-	-	-	-	2.2	-	-	-	-
木 材	0	-	-	-	-	4.5	7.0	7.9	7.2
ポリエチレン	-	-	-	-	-	-	1.3	-	-
テフロン	-	-	-	-	-	-	0.6	-	-

(10) 氷に対する各種材料の摩擦係数

摩擦係数もまた氷の機械的特性の1つに含まれる。この特性の重要性は地上における輸送手段の運動の分析に際し、その適用領域が広いことによっても極めて大きい。またこの特性は船舶の運動の解析でも考慮されている。即ちエンジンのエネルギーの大部分は氷に対する船体の摩擦の克服に費やされている。

摩擦係数は曳引力の大きさと供試体および付加的荷重の重量の比として求められる。ここで、供試体を或る場所から移動させ、それを運動させるに必要な力を計算上で用いる場合に得られる静摩擦係数 K_{st} を区別する。動摩擦係数 K_{dyn} は供試体に一様な直線運動を与える力を計算で用いる場合に得られるものである。この摩擦係数は摩擦面の大きさに依存せず、無次元量である。これは次式で計算される。

$$K = \frac{P}{N}$$

ただし、P—摩擦面に平行な方向をもつ力

N—供試体の重量と付加的力のうちで摩擦面に垂直な方向をもつ成分

一般的な条件のもとでは氷の融解は0°Cを僅か上回った温度で生ずる。氷に接触して固体が滑るとき、摩擦熱の発生および圧力上昇による融解温度の若干の低下によって氷の融解が起きる。従って、固体が氷上を滑るときには氷の表面は下記の3通りの状態におかれることになる。即ち第1に、水が生成しない場合には乾燥摩擦が起きる(一般に-100°C以下の温度のもとで氷は滑りの性質が無くなる)。第2に、摩擦時に融解した少量の氷によって薄い水の層が形成される場合には限界水潤滑(limit water lubrication)を伴なう摩擦が生じる。第3に、上記の水層の厚さが相当大きくなつた場合には完全なまたは流体力学的な潤滑が起きる。

A.Ya.Rivlin¹⁵⁾が指摘しているように、摩擦係数と温度との一定の関係を確立することにまだ成功していない。

摩擦係数は非常に多く求められており、そのうちで V.V.Lavrov の著書⁹⁾に最も完全にデータが集約されている。既往のデータを整理して示せば第23表のようになる。

(11) 粘性

粘性係数によって求められる粘性は物体中の素粒子が相互に移動する場合に現われ、分子間の凝集力に依存する内部摩擦を特徴付けるものである。

粘性係数はボアズ単位で測定される。即ち

$$1 \text{ ボアズ} = 1 \frac{\text{dyn} \cdot \text{sec}}{\text{cm}^2} = \frac{0.00102 \text{ G (力)} \cdot \text{sec}}{\text{cm}^2}$$

粘性係数はさまざまな研究者によって求められているが、その値は著しくさまざまであり、 10^{11} から 10^{15} ボアズまでの開きがみられる。粘性係数の値にこのように大きな差異が生じる主な原因是、K.F.Voitkovsky が指摘しているように、氷に適用した場合の粘性係数は或る一定の物理定数ではなく、仮定的な性質を有するものであり、応力の大きさやその作用時間(氷の構造、結晶の配向、温度のほかに)との関係において広い範囲に亘って変化することにある。

V.V.Lavrov⁹⁾は粘性係数を沢山求めている。彼は人工的に作成したさまざまな構造の試験氷片を用いた曲げ試験において粘性係数を求めている。そ

第23表 各種材料と氷との摩擦係数 K

運動面	淡水氷		海水	
	温度 (°C)	K	温度 (°C)	K
<動摩擦>				
スチール	-145	0.4	-128	0.31
木材	-145	0.49	-	-
スチール	0	0.03	0	0.03
木材	-14.0	0.046	-	-
氷と材料	+2.0	0.08~0.15	-	-
<静摩擦>				
錆びたスチール	-	-	0	0.15~0.20
滑らかなスチール	-	-	0	0.03~0.04
氷と木材	+2.0	0.48~0.31	-	-

第24表 曲げに対する法線応力が $\sigma = 11 \sim 12 \text{ kg/cm}^2$ の場合の粘性(ボアズ単位)

氷の種類と力の方向	水の温度 (°C)		
	-3	-13	-23
氷一单結晶 力-光軸に平行	$2.6 \cdot 10^{14}$	$4.1 \cdot 10^{14}$	$6.9 \cdot 10^{14}$
氷一单結晶 力-光軸に対し 45°	$8.1 \cdot 10^{13}$	-	-
氷一大形ブロック (大きさ 3 ~ 4 cm)	$1.15 \cdot 10^{13}$	$2.42 \cdot 10^{14}$	-
モデル氷 (結晶の平均直径 4 ~ 5 mm)	$1.36 \cdot 10^{13}$	$3.77 \cdot 10^{13}$	$6.97 \cdot 10^{13}$
海水 (1 ~ 20%)	$3.1 \cdot 10^{10*}$	$26.7 \cdot 10^{10*}$	-

* - 温度 -1 ~ -20°Cにおける値

の場合、粘性係数の計算は次式に従つていい。

$$\eta = \frac{P l^3}{12 b h^3 v}$$

この式は下記から得ることができる。

$$f = \frac{P l^3}{48 E I}$$

即ちこの場合、マックスウェルの理論に従い、撓み量 f を塑性変形の恒定速度 v と、 $\frac{E}{3}$ を粘性 η とそれぞれ置換する。

海水の粘性値は海洋学データ表から採られる。この資料に基づいて第24表を作成した。

更に、海水の粘性については Yu. L. Nazintsev が漂流観測ステーション SP-4 によって求めている¹¹⁾。その結果を第25表に示す。

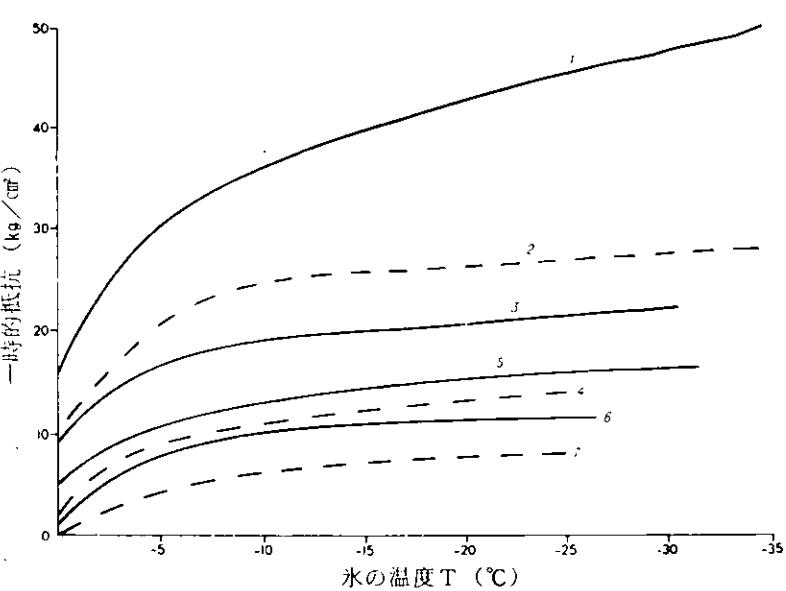
第2～7図に示されたデータに基づいて水の機械的特性の最大確率値を求めて、第26表に示す数表を作成した。

第26表に示されたデータをもっと見やすくし利用し易くするために、実際の計算では、これらに基づいて第8図に示すグラフが作図される。このグラフから明らかなように、全ての種類の変形（圧縮、引張り、曲げ、剪断）に際して海水および淡水水の強度は温度の低下につれて増大している。また全ての種類の変形において淡水水の強度（実線）は海水のそれ（破線）に対し平均して1.5倍の値になっている。しかし第26表から判かるように、淡水水と海水の強度の比は温度が下るにつれて小さくなつて行く。このことは温度が低くなるにつれて海水と淡水水との機械的特性の差異が狭くなつて行くことを示している。

第25表 海水の粘性

（単位：ポアズ）

水の種類	温 度 (°C)					塩 分 (%)	試験時 応 力 (kg/cm ²)
	0～-5	-5～-10	-10～-15	-15～-20	-20～-30		
ロード氷片の燃りによる							
板状軟水、水池より—		$3.20 \cdot 10^{13}$	$5.45 \cdot 10^{13}$	$12.92 \cdot 10^{13}$	$35.40 \cdot 10^{13}$	6.3	0-1.8
一冬水、棒状水—		$3.40 \cdot 10^{13}$	$4.10 \cdot 10^{13}$	$4.10 \cdot 10^{13}$	—	1.0	0-1.8
顆粒状・棒状水—	$1.10 \cdot 10^{13}$	$3.80 \cdot 10^{13}$	$5.80 \cdot 10^{13}$	$12.75 \cdot 10^{13}$	—	1.0	0-3.6
顆粒状水—	$1.72 \cdot 10^{13}$	$8.43 \cdot 10^{13}$	$14.56 \cdot 10^{13}$	$15.79 \cdot 10^{13}$	—	0.2-0.4	0-1.8-5.6
柱状水—	—	$0.9 \cdot 10^{12}$	—	—	—	2.8	0-3.6
二冬水、柱状水—	$1.45 \cdot 10^{13}$	$11.42 \cdot 10^{13}$	—	—	—	1.5	0-3.6
ビーム氷片の曲げによる							
板状軟水、水地より—	—	$5.57 \cdot 10^{13}$	$8.90 \cdot 10^{13}$	$14.8 \cdot 10^{13}$	—	6.3	0-3.3
一冬水、棒状水—	$12.4 \cdot 10^{13}$	$46.7 \cdot 10^{13}$	$97.0 \cdot 10^{13}$	$20.10 \cdot 10^{14}$	$60.5 \cdot 10^{14}$	1.0	0-3.3
顆粒状、棒状水—	—	$41.0 \cdot 10^{13}$	—	—	—	1.0	0-2.1
顆粒状水—	$52.8 \cdot 10^{13}$	$91.15 \cdot 10^{13}$	$14.70 \cdot 10^{14}$	$31.21 \cdot 10^{13}$	$13.70 \cdot 10^{15}$	0.2-0.4	0-2.1-2.3
柱状水—	—	$1.42 \cdot 10^{13}$	$3.10 \cdot 10^{13}$	$17.36 \cdot 10^{13}$	$11.0 \cdot 10^{13}$	2.8	0-2.6



第8図 水の各種変形に際しての一時的抵抗の最大確率値
1—淡水氷の圧縮, 2—海水の圧縮, 3—淡水氷の曲げ
4—海水の曲げ, 5—淡水氷の引張り, 6—淡水氷の剪断
7—海水の剪断

第26表 海水の機械的特性の最大確率値

第2～7図に示されたデータに基づいて

水の機械的特性の最大確率値を求めて、第26表に示す数表を作成した。

第26表に示されたデータをもっと見やすくし利用し易くするために、実際の計算では、これらに基づいて第8図に示すグラフが作図される。このグラフから明らかなように、全ての種類の変形（圧縮、引張り、曲げ、剪断）に際して海水および淡水水の強度は温度の低下につれて増大している。また全ての種類の変形において淡水水の強度（実線）は海水のそれ（破線）に対し平均して1.5倍の値になっている。しかし第26表から判かるように、淡水水と海水の強度の比は温度が下るにつれて小さくなつて行く。このことは温度が低くなるにつれて海水と淡水水との機械的特性の差異が狭くなつて行くことを示している。

第25表 海水の粘性

（単位：ポアズ）

水の種類	温 度 (°C)					塩 分 (%)	試験時 応 力 (kg/cm ²)
	0～-5	-5～-10	-10～-15	-15～-20	-20～-30		
ロード氷片の燃りによる							
板状軟水、水池より—		$3.20 \cdot 10^{13}$	$5.45 \cdot 10^{13}$	$12.92 \cdot 10^{13}$	$35.40 \cdot 10^{13}$	6.3	0-1.8
一冬水、棒状水—		$3.40 \cdot 10^{13}$	$4.10 \cdot 10^{13}$	$4.10 \cdot 10^{13}$	—	1.0	0-1.8
顆粒状・棒状水—	$1.10 \cdot 10^{13}$	$3.80 \cdot 10^{13}$	$5.80 \cdot 10^{13}$	$12.75 \cdot 10^{13}$	—	1.0	0-3.6
顆粒状水—	$1.72 \cdot 10^{13}$	$8.43 \cdot 10^{13}$	$14.56 \cdot 10^{13}$	$15.79 \cdot 10^{13}$	—	0.2-0.4	0-1.8-5.6
柱状水—	—	$0.9 \cdot 10^{12}$	—	—	—	2.8	0-3.6
二冬水、柱状水—	$1.45 \cdot 10^{13}$	$11.42 \cdot 10^{13}$	—	—	—	1.5	0-3.6
ビーム氷片の曲げによる							
板状軟水、水地より—	—	$5.57 \cdot 10^{13}$	$8.90 \cdot 10^{13}$	$14.8 \cdot 10^{13}$	—	6.3	0-3.3
一冬水、棒状水—	$12.4 \cdot 10^{13}$	$46.7 \cdot 10^{13}$	$97.0 \cdot 10^{13}$	$20.10 \cdot 10^{14}$	$60.5 \cdot 10^{14}$	1.0	0-3.3
顆粒状、棒状水—	—	$41.0 \cdot 10^{13}$	—	—	—	1.0	0-2.1
顆粒状水—	$52.8 \cdot 10^{13}$	$91.15 \cdot 10^{13}$	$14.70 \cdot 10^{14}$	$31.21 \cdot 10^{13}$	$13.70 \cdot 10^{15}$	0.2-0.4	0-2.1-2.3
柱状水—	—	$1.42 \cdot 10^{13}$	$3.10 \cdot 10^{13}$	$17.36 \cdot 10^{13}$	$11.0 \cdot 10^{13}$	2.8	0-2.6

第26表 各種の変形に際しての水の一時的抵抗の最大確率値
(kg/cm²)

変形の種類	温 度 (°C)											
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35
淡 水 水												
圧縮	16	19	22.5	26	28.0	30.0	36.0	40.0	42	45	47	48
曲げ	9	11.5	13.0	15.0	16.0	16.5	19	20	21	22	22.5	—
引張り	5.0	7.0	8.5	9.3	10.1	10.8	13.0	14.6	15.7	16.2	—	—
剪断	1.0	3.8	5.5	6.7	7.6	8.3	9.9	10.5	10.6	10.8	—	—
海 水												
圧縮	10.0	13.0	10	17	19	21	25	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5
曲げ	2.0	4.0	6.5	7.5	8.5	9.0	11.0	12.0	13.5	14.0	—	—
剪断	0.2	1.3	2.3	3.1	3.7	4.2	6.2	7.3	7.6	7.7	—	—
淡 水 水 と 海 水 の 強 度 の 比												
圧縮	2.3	1.7	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8
曲げ	4.5	2.9	2.0	2.0	2.0	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	—	—
剪断	5.0	2.9	2.4	2.2	2.1	2.0	1.6	1.4	1.4	1.4	—	—

第27表 各種の変形に際しての水の強度間の比の値
(剪断強度を1とした場合)

変形の種類	温 度 (°C)										
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-10	-15	-20	-25	確率値
淡 水 水											
圧縮	16	5.0	4.1	3.9	3.6	3.6	3.6	3.8	4.0	4.2	4
曲げ	9	3.0	2.5	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	2.0	2.0	2
引張り	5	1.8	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5
剪断	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
海 水											
圧縮	50	10.0	6.5	5.5	5.1	5.0	4.0	3.4	3.4	3.4	4
曲げ	10	3.1	2.8	2.4	2.3	2.1	1.8	1.7	1.8	1.8	2
剪断	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ここで、各種変形時の水の一時的抵抗値を比較することは興味がある。そのために、第2表において剪断時の最も低い強度を単位に採り、それと他の種類の強度を比較すれば、さまざまな種類の変形に対する水の強度の相互関係を知ることができる。このようにして得た結果を第27表に示す。

同表から、淡水水および海水の剪断、曲げ、圧縮に際して認められる強度の増大状況について結論を下すことができる。淡水水と海水について剪断、曲げ、圧縮の間の強度の比は温度が下るにつれて小さくなる傾向を示している。淡水水についても、また海水についてもこの比は1:2:4となる。

水の機械的特性に関する研究の程度を特徴付けるならば、全てのグラフにおいてまだプロットされた点に相当大きなばらつきが存在することを指摘しなければならない。このことは水の機械的特性が温度ばかりでなく、本稿で触れたその他の多くの条件にも左右されるものであることを裏付けている。従って、水の機械的諸特性を何んらかの諸要因との関係について判断を下すためには、同一の条件のもとで同一の水を用いて、唯一つのパラメータを変えてやる方法で更にもっと綿密な試験を実施すべきである。これらの知見は水の強度を求めるに際しさまざまな要因(載荷速度、不純物、構造、その他)に対する補正を明らかにすることを可能にし、またそのことによって、各種変形に対す

る氷の一時的抵抗値の精密な把握が可能となる。これはまた筆者等の今後の研究課題である。

氷の個別的特性を特徴付けるならば、氷中の波動伝播速度の測定は充分な信頼度を有すると認められる。ポアソン比、剛性率およびヤング率の値が得られている。

淡水氷について圧縮に対する一時的抵抗値（第2図参照）は幾回となく求められているが、それらの最大確率値を選定することは容易でない。ここで筆者等が提示した最大確率値曲線は決して全ての測定データをカバーしているものではない。 -15°C の温度までは測定値は充分に得られていると思われるが、これらのばらつきは非常に大きい。例えば温度 -3°C について V.V. Lavrov は $\sigma = 86 \text{ kg/cm}^2$ また $\sigma = 11 \text{ kg/cm}^2$ という値を与えており、筆者等は最大確率値として 26 kg/cm^2 を採っている。また、 -15°C 以下の温度領域については明らかにデータが不足している。

海水の圧縮に対する一時的抵抗の測定では得られた値のばらつきもまた大きい。更には、 -20°C 以下の温度領域での一時的抵抗値に関する知見が非常に少ない。淡水氷の引張り強度のデータも不足しているが、 -25°C までの温度に対する強度の最大確率値を導き出すことは可能である。海水の引張りに対する一時的抵抗特性についてもデータが非常に僅かであり、その最大確率値を確定することは可能とは思われない。

他方、曲げに対する一時的抵抗についてはデータが最も多く、この種の変形に対する強度の最大確率値は最も信頼性が高い。ただし、得られた値のばらつきはやはり相当大きく、また実験値は2倍以上も最大確率値とくいちがっている。

氷の剪断に対する一時的抵抗に関するデータも少ない。測定値のばらつきは、特に淡水氷について、非常に大きい。この種の変形に対しては最大確率値曲線の精密化が必要である。

各種材料に対する淡水氷の凍着性に関するデータは全く不充分であり、海水の凍着性についてはデータが全く無い状況である。

摩擦係数に関する知見は極めて予備的なものであり、この重要な特性に関するデータを著しく補充することが要求される。

粘性係数に関するデータは、今のところ、実際の必要性による計算に用いるには充分であるが、氷の塑性流動に関する特別な計算を行なうには更に補足的な測定値を求める必要がある。

氷の諸強度特性について以上で試みた体系的把握から全ての種類の変形に対してデータの補充並びに精密化が必要であることが判明した。

引用文獻

- 1) Bogorodsky V.V. : 氷の結晶の弾性率。〈音響工学誌〉 Vol. № 2. P 78 - 81 (1964年)
- 2) Bogorodsky V.V. : 氷河研究の物理的方法。Gidrometeoizdat 出版。211 PP (1968年)
- 3) Bogorodsky V.V., Gusev A.V., Khokhlov G.P. : 淡水氷の物理。Gidrometeoizdat 出版。226 PP (1971年)
- 4) Butyagin I.P. : 自然条件下での実験研究に基づく氷盤の強度。〈水理工学に関する連合会議論文集〉 №10 P. 71 ~ 79. Energiya 出版。(1964年)
- 5) Voitkovsky K.F. : 氷の機械的諸特性。科学アカデミー出版局。100 PP (1960年)
- 6) Zubov N.N. : 海洋学データ表。Gidrometeoizdat 出版。405 PP (1942年)
- 7) Ivanov N.I. : 材料の抵抗。Gostekhiteopetizdat 出版。646 PP (1942年)
- 8) Kamenetsky I.Ya., Shvaishtein Z.I., Sergeeva A.A. : 船体着氷防止手段として用いられた甲板被覆材に対する氷の付着。〈船体着氷条件の理論的・実験的研究〉 P. 134 ~ 145 Gidrometeoizdat 出版。(1971年)
- 9) Lavrov V.V. : 氷の変形と強度。Gidrometeoizdat 出版。(1969年)
- 10) Listov A.N. : <1957年における地殻法における氷盤の研究>課題に関する報告。AANII * フォンド 36PP (1957年)

* - AANII = 北極・南極研究所

- 11) Nazintsev Yu. L. : 海水の塑性特性に対する若干の観測結果。< AANII * 紀要 > Vol. 256 P 47 ~ 59 (1961 年)
- 12) Peschansky I.S. : 氷学と氷技術。Gidrometeoizdat 出版。 460 PP (1967 年)
- 13) Detrov I.G. : 氷盤の物理的、機械的特性と厚さ。< 1950 /' 51 年における漂流ステーションによる観測研究資料 > Vol. 2. P. 103 ~ 166 Morskoi Transport 出版。 (1955 年)
- 14) Petrov I.G. : 南極の氷盤の構造による地域区分。< AANII * 紀要 > Vol. 300. P. 39 ~ 56 (1971 年)
- 15) Rivrin A.Ya. : 氷の摩擦の実験研究。< AANII * 紀要 > Vol. 309 . P. 186 ~ 199 (1973 年)
- 16) Savel'ev B.A. : 海水および淡水氷の氷盤の構造、組成並びに特性。モスクワ大学出版局 540 PP (1963 年)
- 17) Serikov M.I. : 共振法による氷の弾性率の測定。< 北極と南極の諸問題 > № 6 P. 81 ~ 87 (1959 年)
- 18) Serikov M.I. : 南極の海水の曲げ強度。< SAE** 情報ブレッティン > № 36. P. 30 ~ 36 (1962 年)
- 19) Serikov M.I. : 南極の海水の強度特性。< SAE** 紀要 > Vol. 48. P. 190 ~ 193 (1967 年)
- 20) Smirnov V.N. : 動的試験法および静的試験法による非破壊氷盤の弾性特性の測定。< AANII * 紀要 > Vol. 300 P. 56 ~ 61 (1971 年)
- 21) Smirnov V.N. : < 氷盤の振動と応力状態の研究 > 課題に関する報告。AANII * フォンド。107 PP (1972 年)
- 22) Cherepanov N.V. : 海水の結晶構造に関する主な研究結果。< 北極と南極の諸問題 > № 41 P. 43 ~ 51 (1973 年)

§ 2 着氷時に構造物に生成する氷の特性に及ぼす自由表面エネルギーの影響

V. V. Panov. A. V. Panyushkin

Z. I. Shvaishtein

氷盤の強度特性の研究を含めて、天然氷およびモデル氷の物理的・機械的諸特性の研究、氷の構造、その他に関する研究は長年に亘り、氷研究所のスタッフによって実験室内研究および北極、南極調査の両面で成功裏に進められてきた。これらの研究と密接に関連して、さまざまな表面における氷の不均質的な生成と成長の過程並びに接触層およびブロック内の氷の特性に関する研究がレニングラード工科大学表面現象物理研究室と共同で実施された。これらの研究は船舶およびその他の着氷防止方法・手段の開発にとって特に重要である。

ここで想起すべきことは、表面エネルギーと看做されるものは物体の分離過程において単位表面の形成に必要な仕事量であり、これは常に正の値をもつことである。

不均質な氷生成の場合、特に接触層において、氷の特性に大きな影響を及ぼすものは下層物体（氷が付着する相手）の特性、特にその表面エネルギーである。

下層物体と接触状態にある氷の表面を内部表面と呼ぶことにする。氷の外部表面に液状または気体状の界面活性物質が作用した場合には Rebinder 効果によって氷の力学的性質が著しく変わる。この Rebinder 効果の本質は固体の表面と界面活性物質との相互作用の結果として周囲の媒体との境界における表面エネルギーの低減が起ることになる。降伏限界および硬化係数 (strengthening coeff.) の低下のほかに、ブロックの脆化も起きるが、これは結晶表面への転位 (dislocation) の出現が容易になること（表面での転位出現点の変位 (shift)）によるか、或いは界面活性物質の分子の吸着によってポテンシャル障壁が低下した結果として表面下の転位源の発生が容易になることによるかのいずれかによって説明される。

上記の効果が現われるためには表面エネルギーの比較的僅かな (数十 erg/cm²) 低下で充分である。

表面エネルギーを増大させれば、氷の著しい強度増加が達成できる。筆者等の理論的評価によれば、Rebinder効果によって氷の強度は増大側にも低減側にも 2 ~ 3 倍 (1/2 ~ 1/3) に変わり得る。

* -AANII = 北極・南極研究所

** -SAE = ソ連南極学術調査団

残念ながら、水に関して Rebinder 効果の解明に成功した研究はまだ見当らない。また、天然水の表面エネルギーの値に関するデータが存在せず、モデル水の表面特性に関する研究も極く僅かに行なわれているにすぎない。

氷の破壊が Griffiths の基準に従って起きるとすれば、Rebinder 効果について次式が成り立つ。

$$(\sigma_{F,CP})^2 = (\sigma_{F,0})^2 - \frac{A}{E} (r_0 - r_{CP})$$

ただし、 $\sigma_{F,CP}$ —変成表面（modified surface）をもつ氷の破壊応力

$\sigma_{F,0}$ —真空中で成長した表面をもつ氷の破壊応力

A—一定の数値計数、E—ヤング率、

r_0 —真空中における氷の自由表面エネルギー

r_{CP} —変成表面の場合の自由表面エネルギー

Griffiths の基準は次式で示される。

$$\sigma = \left(\frac{2E\tau}{\pi\ell} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ただし、 ℓ —最も長く且つ望ましい方向をもつ亀裂の長さ

既に指摘したように、氷を含み固体の強度はその表面エネルギーに依存する。蒸留水から作られた淡水氷の表面エネルギーを温度との関係で示せば第1図の通りである。

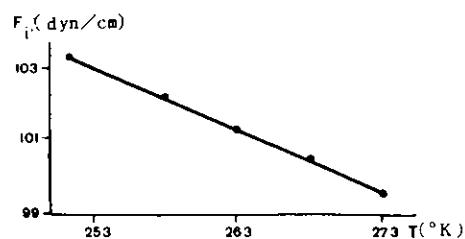
筆者等の実験から明らかかなように、氷に界面活性剤を添加すれば水および氷の表面エネルギーが数分の1に低減する。

氷の強度を著しく低下させる極めて有効な界面活性剤は有機アルコール、脂肪酸、アミン、スルホン酸であり、更にもっと有効なものはこれらの過堿化物である。例えば、4%濃度のブチルアルコールを作用させると、水および氷の自由表面エネルギーは $\frac{1}{2}$ に減少するが、過堿化アウリン酸および過堿化酪酸、またそれらの有機類似物は更にもっと効果的である。

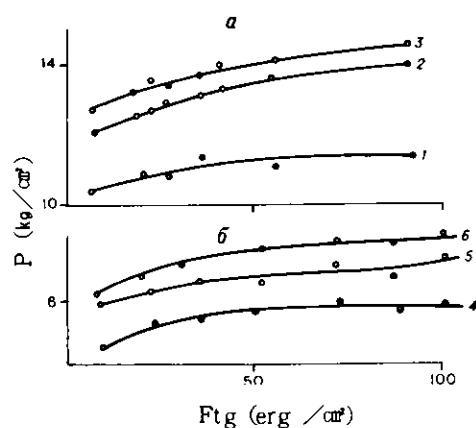
微細分散粒子による氷の強度増加は極めて有望である。氷の強度増加過程は、また、位相間自由エネルギーの大きさに対するこれら粒子の作用とも関係している。この研究の実質的な価値（氷の強度特性に及ぼす表面エネルギー値の変化の影響）は水域の表面には、必ずして界面活性物質より構成される表面膜が実質上常に存在し、他方、水域に放出される化学工場廃液には不活性物質が含まれていることによって認められる。

更に、ここで検討した効果は主要河川および水理施設区域における氷の強度の人為的調整にも利用できる。蒸留水および海水から成長したモデル氷の強度と結氷した下層物体の自由表面エネルギーとの関係を -7°C , -12°C , -17°C の各温度の場合について第2図(a), (b) に示す。

実際には表面エネルギーの影響は氷の表面においてもまたブロック内においても生じる多数のプロセスに現われている。この種のものとしては位相転移、空孔の発生とその大きさ、ブロック内の亀裂の形成と発達、また特に、各種下層物体に対する氷の付着力の大きさが挙げられる。



第1図 淡水氷の自由表面エネルギーと温度との関係

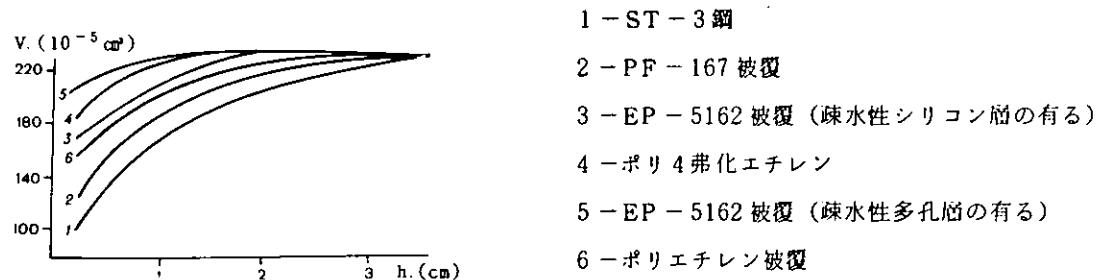


(a) 蒸留水から下記の温度のもとで成長した氷
曲線 1 : -7°C
" 2 : -12°C
" 3 : -17°C

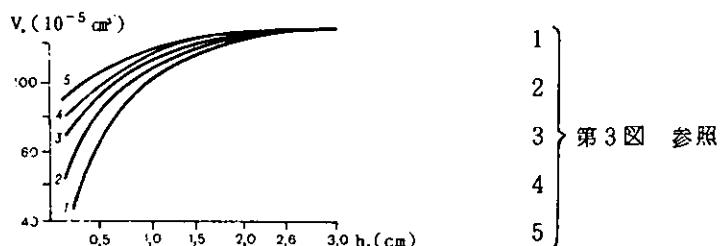
(b) 海水から下記の温度のもとで成長した氷
曲線 4 : -7°C
" 5 : -12°C
" 6 : -17°C

第2図 氷の破壊強度と結氷した下層物体の自由表面エネルギーの大きさとの関係

淡水水および塩水水の結晶の平均体積と下層物体の材質との関係を第3図と第4図に示す。



第3図 蒸留水から成長した氷の場合の境界面からの距離における平均的な結晶の体積の変化



第4図 海水から成長した氷の場合の境界面からの距離における平均的な結晶の体積の変化

上記で挙げた諸現象と自由表面エネルギーとの関係は下記の式で示される。

$$\Delta F_{\text{crit}}^g = \frac{16\pi r_{1b}^3 f(\theta)}{3(\Delta F_v + E)^2}$$

および $f(\theta) = \frac{1}{4}(2 + \cos \theta)(1 + \cos \theta)^2$

Kolmogorovの方程式に基づく液相から固相への転換速度は次の等式から明らかになる。

$$\eta(t) = \frac{V_t}{V_0} = 1 - \exp \left[- \int_0^t P(\xi) V(t-\xi) d\xi \right]$$

ただし、 V_0 - 初期体積； V_t - 生成した体積； $P(\xi)$ - 新相の生成速度； $V(t-\xi)$ - 新相の成長中心の体積
空位形成エネルギーは下記のように示される。

$$E_n \sim 4\pi r_0^2 r - \frac{12\pi r_0 r^2}{G} + \frac{6\pi r_0 r^2}{G}$$

ただし、 r_0 - 一個々の空位の半径； G - 剛性率

空隙内の気体の圧力は次式で与えられる。

$$P = \frac{2r}{r}$$

このような気泡の生成エネルギーは同じ半径の空孔の表面エネルギーおよび圧力 P のもとで体積 v まで気体を圧縮するのに費やされた仕事量から構成され、次式で与えられる。

$$E_n = \frac{20\pi r^2 r}{3}$$

半径 r の気泡に加えられた運動力は温度勾配 dT/dx のために次式で与えられる。

$$R_T = \left(\frac{4\pi r_0^3 Q}{3\Omega T} \right) \frac{dT}{dx}$$

ただし、 Ω —分子容； Q —表面拡散時の輸送熱量

応力勾配 dP/dx によって条件付けられる運動力は空孔（気泡）がより高い応力の領域に移転するときに変形のエネルギーが減少することによって生じる。即ち

$$R_p = \frac{\pi r_0^3 P (12r - 5r_0 P) dP}{8G (3r - r_0 P) dx}$$

ただし、 P —気泡付近の局部的な流体静力学的応力、膨潤による体積の変化は下記の等式で表わされる。

$$\beta = \frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T v_0 d}{C r}\right)^{\frac{3}{2}}$$

ただし、 v_0 —ノーマルな条件のもとでの氷中の気体の体積； d —気泡間の距離

ここで検討の対象を低エネルギーの表面に対する氷の付着力に及ぼす表面エネルギーの影響に限定してみる。付着特に理論面で、最も複雑で且つ最も光明が遅れている単相系の物理現象である。

付着の量的特性である付着力は多数のパラメータの複雑な関係であり、これらパラメータのうちで特に重要な意味をもつものは分子相互作用の力、相互作用する物質の初期位相状態、付着性接触を形成する材料の構造、過冷却などである。

表面現象の物理化学によれば付着現象について一連の理論的説明、即ち分子論的、熱力学的、力学的、拡散論的および電気的な説明が与えられる。筆者等の見解では最も合理的な解説を与える理論は互に密接に関連し合っている熱力学的理論と分子論である。その他の理論は付着の性質を説明するよりもむしろ付着によって条件付けられた現象を取扱うものである。残念ながら、付着力とそれを特徴付ける諸パラメータとの間に信頼するに足る定量的な関係を確立できるものは現存の諸理論中に1つも見当らない。付着力と諸パラメータとの定量的な関係を与える主要な情報源は実験データである。下層物体に対する氷の付着力に及ぼすこれらパラメータの影響については分子論および熱力学理論で充分に検討されているので、研究の方向付けと研究作業量の観点からは実験作業が極めて容易になる。

ここで、低エネルギーの表面に対する氷の付着力を氷および下層物体の自由エネルギーを介して計算する方法について検討してみる。

自由表面エネルギーの値が低い表面は、他の諸条件が等しいとき、水の分子とエネルギー的に弱い結合を形成する。このことはこのような表面による水の吸収を悪くし、また液相および固相での表面への水の付着を低減させる。分子間力の作用の観点から蒸気相、液相および固相中の水の分子と高エネルギー表面および低エネルギー表面との相互作用のメカニズムを検討する試みがなされているが、現存する知見が不完全であるために信頼できる定量的な結果を与えるに到っていない。

一般に次のことが確認されている。即ち、自由表面エネルギーの値が低い表面については分子間相互作用のポテンシャル値に基本的に寄与するものは分散成分であり、静電成分は重要な役割を果さない。従って、対応状態の原則に従って各相の相互作用を求めるためには、FaulerおよびMelvin-Huge が提案したように、自由エネルギーの一部（相互付着作用に相当する部分）を下記の関係から得ることができる。

$$F_1 + F_2 - F_{12} = n \sqrt{F_1 F_2} = F_{AD}$$

ただし、 F_{12} —表面1と表面2との分離境界上の比自由表面エネルギー（specific free surface energy）

F_1 —相1の比自由表面エネルギー

F_2 —相2の比自由表面エネルギー

n —比例係数（接触状態にある相1と相2に対する分子間相互作用の形によって決められる係数。比自由エネルギーの値が低い表面については $n=2$ ）

以上のようにすれば、付着力は下記のように求まる。

$$A_T^* = \frac{\partial F_{AD}}{\partial R} = \frac{\Delta F_{AD}}{\Delta R}$$

ただし、 ΔR —ファン・デル・ワールスの分子間相互作用

水の分子と疎水性表面との分散性相互作用の場合には、T.Ch.Melrose が得た結果と一致する計算が示すように、 $\Delta R \approx 4.5 \text{ \AA}$ である。

筆者等は表面エネルギーの大きさに関するデータを用いて、疎水性表面に対する淡水氷の付着力を計算した。上掲の式によって求めた氷の付着力の値には下層物体の表面におけるポリマー分子鎖のセグメントと水のポリマー分子のセグメントとの間の結合の生成に関する確率論的性質が考慮されていない。

付着性結合を生成させるポリマー鎖のセグメント数と水および疎水性ポリマーの分子のセグメントの総数との比を特徴付ける因子を考慮すれば、付着を計算するのに次式が得られる。

$$A = k A_T^*$$

ただし、 $k = \beta_1, \beta_2 = 10^{-3} \sim 10^{-4}$

この場合、ポリマー鎖および水の分子のセグメント数は表面 1 cm² 当り $10^{12} \sim 10^{13}$ であることを想起すべきである。従って、約 25% の分子が付着性結合の形成に参与していない。

単位付着性接触面積当りの剥離力 A_{exp} の大きさを下記の式から求めた値と比較すれば、更にもっと正確な k 値を得ることができる。

$$| A_T^* | = \frac{n\sqrt{F_1 F_2}}{\Delta R}$$

明らかに、比較される両者の値は同一の、即ち標準的な、温度を有する。筆者等はこの標準温度として -5°C を採った。このようにして実験的に測定された k 値を下記の関係から決めることができる。

$$k_{exp} = \frac{A_{exp}^{CT}}{| A_T^* |^{CT}}$$

下層物体の疎水性表面を形成するポリマーと氷の自由表面エネルギーの値に基づいて求めた付着力の計算結果を第 1 表に示す。

第 1 表 一連の疎水性表面の表面エネルギー及びこれら表面への淡水氷の付着力
($t = -5^\circ\text{C}$ の場合)

下層体の表面の化学組成	F (erg / cm ²)	F _{AD} (erg / cm ²)	A _T [*] ^{CT}	A _{exp} ^{CT}
氷	100			
(-CF ₃) _n	6	49	$1.09 \cdot 10^3$	0.10
(-CF ₂ H) _n	15	77.4	$1.75 \cdot 10^3$	0.14
(-CF ₃ 及び-CF ₂ -) _n	17	32.6	$1.82 \cdot 10^3$	0.16
(-CF ₂ -) _n	18	85	$1.89 \cdot 10^3$	0.20
(-CH ₃) _n	20~24	89.2~98	$(1.98 \sim 2.17) \cdot 10^3$	0.18~0.22
(-CH ₂ -及び-CH ₃) _n	26	102	$2.27 \cdot 10^3$	0.36
(-CH ₂ -) _n	31	112	$2.5 \cdot 10^3$	0.70
下層体の表面の化学組成	k_{theor}	k_{exp}	(*)	b (erg / cm ²)
氷				$17 \cdot 10^{-4}$

(*)—空白になっている。

下層体の表面の化学組成	k_{theor}	k_{exp}	(*)	b (erg / cm ²)
(-CF ₃) _n	10 ⁻⁴	0.92 · 10 ⁻⁴	115	
(-CF ₂ H) _n	10 ⁻⁴	0.80 · 10 ⁻⁴	97	
(-CF ₃ 及び -CF ₂ -)	10 ⁻⁴	0.88 · 10 ⁻⁴	110	40 · 10 ⁻⁴
(-CF ₂ -) _n	10 ⁻⁴	1.02 · 10 ⁻⁴	108	20 · 10 ⁻⁴
(-CH ₃) _n	10 ⁻⁴	(0.92~1.01) · 10 ⁻⁴	102	22 · 10 ⁻⁴
(-CH ₂ -及びCH ₃) _n	5 × 10 ⁻⁴	1.58 · 10 ⁻⁴	92	10 · 10 ⁻⁴
(-CH ₂ -) _n	5 × 10 ⁻⁴	2.80 · 10 ⁻⁴	90	10 · 10 ⁻⁴

(*)—空白になっている（訳注）

高い値の比自由表面エネルギーをもつ表面については分子間相互作用のポテンシャルの電気的成分を無視してはならない。従って、各相の相互作用を特徴付ける方程式は更にもっと複雑な形となろう。A_T, A_{exp}, k_{exp}のそれぞれ理論値と実験値の関係を更に正確に把握するためには、今後更に実験データの蓄積が必要とされる。

§ 3 氷を取囲む水の吸着による氷の強度低下

I.G. Petrov

氷の強度は、他の任意の固体の強度と同様に、その2つまたは若干数の部分への破壊に対する反抗力によって決められる。氷の破壊はそれがいかなる種類の破壊であれ、複雑な過程である。氷の破壊過程は温度、載荷速度、構造および応力状態の性質に左右される。¹¹ 氷の強度に及ぼす因子が多数であるために、氷の強度値はさまざまなものとなる。しかしこれら各因子の役割を知れば、一定の条件のもとで、その因子の影響を排除するか、或いは、しかるべき補正を施してその影響を加味することができる。本稿では氷の強度に及ぼす氷を取囲む水の影響について評価を試みる。

氷の強度の理論値は非常に高く評価されている。³¹ 例えは、全ての原子間結合が同時に破壊されるときの固体の破壊強度 (σ_p) は $\sigma_p = 0.1 E$ である (Eはヤング率)。破壊強度の実験値は理論値よりも数桁低く、高強度材料 (氷はこれに該当しない) についてのみ両者が近似する。

このことは全て、氷の強度値が標準的な定量化を必要とする仮定的な値にならざるを得なくしている。固体の強度問題の解決には2つの道、即ち力学的方法と運動学的方法が立てられてきた。力学的概念に依れば破壊は内部および外部応力場におかれている固体の安定度 (対抗力) が失なわれた結果であると看做さる。各材料には或る一定の応力に達したときに安定度を失ない破壊されるというそれぞれ限界応力が存在する。この限界応力よりも低い応力のもとでは物体は安定した状態にあり、荷重下において幾らでも長時間に亘り非破壊状態に保たれる。この限界応力が強度の判定基準に採用されている。

運動論的概念においては破壊の進展過程に基本的関心が集中される。物体の破壊は微視的破壊の徐々な進展と蓄積の最終段階であると看做される。この場合、荷重下での耐久性に関する概念、即ち物体への載荷時から破壊時までに経過する時間 τ に関する概念が導入される。氷が弾性変形領域で挙動するとき、即ち荷重を急激にかけて氷の完全な破壊に至らしめるとき、主要な意味をもつのは氷を破壊から耐えさせる限界応力である。氷の急激な破壊を惹き起すのではなく、その緩やかな流动 (flow) をもたらす荷重が作用する場合には決定的な意味をもつのは氷の破壊時間 τ である。

ここで、力学論の見地から強度問題を扱い、第一の問題、即ち限界応力値の決定問題、また更にもっと具体的な場合、この限界応力に及ぼす氷を取囲む水の影響に限定して検討してみる。力学的概念に従えば、載荷時の固体には微視的な亀裂が発生する。この亀裂が発達して物体の弾性エネルギーを低下させる。その際、均質な弾性媒体中で臨界値よりも短かい長さをもつ亀裂は不安定な状態にあり、自発的に閉じるが、限界応力よりも大きいか、またはそれに等しい応力によって惹き起された微視的亀裂は無制限に成長し、物体は安定度を失ない、破壊される。

亀裂面の成長に伴ない位相分離面が成長する。即ち位相体積 (phase volume) から境界層中の分子の移行量が増大する。この移行は分離境界において補償されなかった分子間力に抗して働く仕事を随伴するものである。

可逆等温プロセスにおいて単位面積の位相分離面を作り出すのに費やされる仕事量が比自由表面エネルギー σ （表面張力）を決める。全体の比表面エネルギー u は下記のギブスヘルムホルツの方程式によって決められる。

$$u = \sigma - T \frac{\partial \sigma}{\partial T}$$

ただし、 $T \frac{\partial \sigma}{\partial T}$ 一温度 T のとき可逆等温過程において単位面積の分離面を形成する潜熱

もし物体が界面活性物質、即ち位相分離面で吸着される能力をもち、それに対応してその面の表面張力を下げる物質、の中に存在するならば、固体は更に表面エネルギーの付加的部分を失ない、空気中におけるよりも小さい応力のもとで破壊される。

1927 年に P. A. Rebinder¹⁾ が示した強度低下の吸着効果はこの点に帰結される。外囲媒体中から固体に界面活性物質が吸着された結果としてこの固体の変形および破壊に対する抵抗力は低下する。ここで、外部吸着効果と内部吸着効果を区別してみる。外部吸着効果は変形される固体の外部表面における界面活性物質の吸着によって惹き起され、その降伏限界を低下させる。内部吸着効果は内部の微視的亀裂への界面活性物質原子の浸透と結び付いており、その作用は更にもっと著しいが、氷を取囲む水の分子はその氷の中に浸透しない。

外部吸着効果の機構は界面活性物質の吸着によって外囲媒体との境界における表面張力が低下するために被変形体の表面への転位の出現が容易になることに帰結される。塑性流動の容易化は結晶面への転位の出現点の変位時に転位によって克服されるポテンシャル障壁が低下した結果であると看做すべきである。¹⁾ このポテンシャル障壁の存在は滑り線の発生と発達に際し新しい単位格子の生成を随伴する原子間結合の再配向と分離の過程に関連している。吸着に際して界面活性物質の自由表面エネルギーの低下に対してこれらの過程で費やされる仕事量が減少する。

表面エネルギーは位相分離面の大きさに比例するので、界面活性が最も大きい物質である高分散度物質、分散系において特に増大する。

以上のように、界面活性媒体中での固体の変化と破壊の過程においては媒体の物理・化学的可逆現象による塑性流動の容易化と強度の低下の効果を随伴する表面現象が特に明瞭に現われる。これは固体の比自由表面エネルギーの低下、即ち変形および破壊過程に際して固体の新しい表面の形成に（発生時に）費やされる仕事量の低減にある。これらの現象の顕著な特徴は媒体と或る一定の応力状態とが一緒に作用するときにのみこの種の現象が認められる点にある。媒体の影響は新しく生成した表面での分子間力の部分的補償に帰せられ、この影響が吸着单層 (adsorptional monolayer) の形成によってばかりでなく液相層の形成によっても生じ、これによって力学的特性変化の更に大きな効果がもたらされるにせよ、この影響は吸着影響と呼ばれる。

変形および破壊の過程に及ぼす力学的因子と物理・化学的因子の共同の影響は物理・化学的力学により研究される。これは固体の強度に関する物理・化学的理論の基礎を提供するものである。その場合、下記の 2 つの技術的課題が検討される。

- 1) 機械的処理過程の容易化と改善
- 2) 現実の使用条件下において高い強度と耐久性をもつ材料の獲得

機械的処理過程の容易化問題は材料処理時に強度を低下させる各種因子の活用、特に前述の吸着効果、に基づいて解決される。しかし、媒体の影響があるという条件のもとでは実際の物体の強度計算は、構造に依存する強度値が熱力学的特性でなくまたそれが理論的に計算できないために困難である。原則としてこの強度値は原子間の相互作用の特性に基づいて、位相の或る一定の化学組成のもとで、計算することができ、固体の強度に及ぼす外囲媒体の影響に関する一般的問題は実験的に解決される。

実験に依れば、純粋なワセリン油中においてスズの単結晶の降伏限界に対応する応力はワスリン油中の 2% オレイン酸溶液におけるこの単結晶の降伏限界の 2 倍である。吹着効果を用いた強度の低下は有機の酸やアルコールといった典

型的な界面活性剤によって生じる。

電解質溶液中の水におけるイオン結晶の強度低下について、また溶液中に典型的な界面活性剤を添加した場合については多数の研究報告で述べられている。岩塩の方解石の劈開に関する破碎時のイオン結晶において初めて吸着による強度低下の効果が研究され、確立された。同様な現象はシリカガラスおよびガラス繊維においても認められている。¹⁾

水中ではガラスの＜切断＞、即ちダイヤモンドによって切傷を付けた後の破断が容易になる。水の影響のもとでガラスの持続強度の著しい低下も認められる。水および水中に溶解している吸着物質－＜硬度低下剤＞－の作用による岩石の強度低下策は硬い岩盤の穿掘に際し穿掘速度を高め且つボーリング機器を保護するために適用されている。

これら全ての前提条件に基づき筆者等は水中における氷の破壊に際しての氷の強度の低下の度合を求める試験を設定した。この問題は氷工学において重要な意味をもっている。即ち氷の強度は一般に空气中で乾いた供試片について求められ、その結果を水中に存在する氷の強度の計算に適用しているからである。

水中で氷の強度を定量評価する試験は AANII (北極・南極研究所) の Ladozhskaya 研究ステーションで 1974 年 3 月 22 日に実施され、空气中および水中でねじプレスを用いて氷板の曲げ強度を求めた。この試験は湖水上のパラック施設内でパラック内気温 +1.0 °C、プレスに対する水温 +0.5 °C で行なわれた。強度測定に用いた氷板は互に隣接する層から、1 つのコアから挽切って作った。コア全体から厚さ 2~3 cm の平板を幾つか挽切って作り、これらを (1 つおきに) まず空气中で、次に水中で試験した。

このようにして試験には同一の温度のもとで同一の構造をもつ氷が用いられた。また載荷速度も同じにして試験を行なった。即ち強度の差異が外因媒体－空気と水－の作用によるものになるようにした。試験結果は第 1 表に示す通りであった。

第 1 表 空気 (+1 °C) 中および水 (+0.4 °C) 中における氷の曲げ強度 (単位 kg/cm²)

供 試 氷片 No	空気中の 強 度	水中的 強 度	備 考
1	2	3	4
1	15.7		上層。氷は冠雪し、粒状であった。供試片は 3 つの部分に破壊された。
2		16.3	氷は冠雪し、土壤中の砂粒を含んでいた。供試片は 3 つの部分に破壊された。
3	20.2		氷は粒状層から透明層への遷移層のものであった。供試片は 4 つの部分に破壊された。
4		20.8	氷は透明で、多数の微小気泡を含んでいた。
5	22.8		氷は透明であった。供試片は 4 つの部分に破壊された。
6		25.5	氷は透明で、まれに微小気泡を含んでいた。供試片は 3 つの部分に破壊された。
7	22.5		氷は透明ではほとんど不純物を含まなかった。供試片は 4 つの部分に破壊された。
8		18.0	氷は透明であった。
9	25.4		氷は透明であった。供試片は 4 つの部分に破壊された。
10		24.6	氷は透明であった。供試片は 4 つの部分に破壊された。
11	34.0		氷は透明であった。供試片は 5 つの部分に破壊された。
12		21.8	
13	32.8		氷は透明であった。供試片は 5 つの部分に破壊された。
14		23.8	

供試 氷片№	空気中の 強度	水中の 強度	備 考
15	30.2		氷は透明であった。個々の気泡が出現した。供試片は4つの部分に破壊された。
16		18.0	供試片にかろうじて認められる放射状クラックが存在。
17	18.6		氷は透明であった。気泡の寸法は2, 10, 30 mmとさまざまであった。供試片は良く破壊されず、多分、プランジャーの下から抜け落ちたものと思われる。
18		20.8	供試片は4つの部分に破壊された。

最初の3対の供試氷片では空気中の強度に比べて水中の強度の低下が示されなかった。これはこれらの氷板が下部表面から水で潤滑されなかったことによるものと説明できる。有底円筒の形をした環形支柱にぴったりとはめ込まれた氷板が円筒内への水の浸入をさえぎっていた。この状態が確認された場合に円筒の側壁に孔を開けると、そこを通して水が円筒内に自由に流入して供試氷片の下部表面に吸着される。水に浸漬された氷はこの時点から両側を水で洗われることになった。

空気中と水中の供試氷片の強度の平均値（最初の3対の供試氷片を除き）をとれば、水中の強度は氷への水の吸着作用のために空気中の強度よりも20%低いと概算できる。

氷を取り囲む水が氷の強度に与える影響はこのようなものである。勿論、これは最初の試験であり、今後更に、さまざまな質の氷についてさまざまな温度のもとで氷の強度に及ぼす外因水の影響の程度をもっと正確に把握するための試験を続ける必要があるが、上記の最初の試験でも充分に確信できる結果が得られている。

ここで得られた20%という強度低下は平均値である。多分、供試氷片に欠陥が有るときには氷と水との接触面が増加するので媒体（水）の吸着による影響は増大する。例えば、A. Westwoodは亜鉛の大形単結晶についてダイヤモンドの先端で表面に傷を付けたときに強度の低下を観察している。また、V. N. Rozhanskyは亜鉛の糸状結晶(threaden crystal)の強度に及ぼす水銀の影響が結晶の直径の減少について弱まることを確認している。温度の変化は外因水の作用を受けた氷の強度の変化にさまざまに影響する。

発達中の亀裂の先端における前駆破壊領域中の媒体の原子の侵入速度は温度の上昇につれて増大する。温度が高くなるほど、氷と水との境界における相間引張りが低くなり、そのため強度の低下分が増加する。

また、温度の上昇に伴ない、固体の体積中の媒体原子の拡散性<再吸収>も加速されるが、これは媒体の作用を弱める。温度の上昇につれて溶液または蒸気中の活性成分の吸着量が減少する。この場合に媒体の作用は弱まる。同様に、変形速度の低下は温度の上昇側に作用する。その逆に、載荷速度を著しく増大させたときには亀裂が著しく枝分れして発達し始め、新しく形成された広い面積の表面によって水が盛んに吸収され、基本亀裂の伝播が差抑えられる。これらの諸現象は今後の研究対象となるものである。現時点において氷の強度低下に及ぼす水の影響は全く明瞭である。

引用文獻

- 1) Rebinder P. A., Shchukin E. D.: 固体の変化および破壊過程における表面現象。<物理学業績>
vol. 108, № 1, P 3 ~ 42 (1972年)
- 2) 物理百科事典。vol. 1, P 24 ~ 25, Sov. Entsiklopediya 出版。(1960年)
- 3) 物理百科事典。vol. 4, P 235 ~ 239, Sov. Entsiklopediya 出版。(1960年)

§ 4 氷の表面エネルギーと物理的・機械的特性

R. T. Kozlovskaya, A. P. kolosov, V. V. Panov,

移相時の自由表面エネルギーおよび熱力学的過飽和との関係における氷と下層物体（氷が付着する相手）との付着性接触（adhesive contact）の強さの研究と関連する諸問題は文献で幾回となく検討されている（文献14, 15, 16参照）。そこで示されていることは、他の諸条件が等しいとき下層物体の比自由表面エネルギーの値が低減するに伴ない付着性接触の強度が低下することである。

この現象を筆者等は複合式着氷防止装置の1つとしての着氷防止手段の開発に適用することを提案している。¹²⁾また、自由表面エネルギーの大きさと破壊応力、自由表面エネルギーの大きさと新しい相の結晶核の生成確率、自由表面エネルギーの大きさと空位形成エネルギーとの各関係を確定するそれぞれの相互関係も検討されている。¹²⁾

これら全ては材料、特に氷、の物理的・機械的特性の研究に果す自由表面エネルギーの重大な役割を裏付けている。固体の強度增加および脆性破壊の問題はその固体の表面エネルギー特性の変化と関連している。^{5, 9, 19-21, 24)}

文献では氷の表面特性の変化による強度の増加と低下については実質上検討されていない。付着性接触の強度に及ぼす下層物体の自由表面エネルギーの影響はこの現象の特異な問題である。

本稿では氷の物理的・機械的特性に及ぼす自由表面エネルギーの影響に関する筆者等の実験研究並びに理論研究の結果を述べる。

V.V. Lavrovはその論文⁸⁾で同一構造の氷の強度に差異がみられる原因は明らかでないことを指摘している。彼の見解に依れば、これは通常の手段では監視できない結晶化過程を含めて一連の諸因子が氷に作用した結果であることが充分に有り得るとされる。

このような因子に該当するものは、筆者等の見解では、貯水池の表面膜による Rebinder 効果に天然氷（またはしばしば実験室の氷も）の強度低下であり、また水中で浮遊状態にある微細な砂および泥の粒子による氷の自然な分散性強度増加（dispersive strengthening）である。更に、着氷した表面に形成された氷を排除する際にブロックの破壊にも、また下層物体からの氷片の剥離にもエネルギーが費やされる。従って、付着性接触の強度に対してばかりでなく氷のブロックの強度に対しても下層物体の自由表面エネルギーの影響に関する研究は実際的な価値をもっている。

筆者等は比自由表面エネルギーの値がさまざまある表面に飛沫流から生成したモデル氷を用いて物理的・機械的特性を実験研究した。明らかに、それ以外に氷の強度特性に影響を及ぼすものは移相過程における熱力学的過飽和であり、またこの過飽和は空気および氷の温度、流束の分散度および水分、着氷物体の幾何学的および熱物理的特性、並びに＜液＞相の組成、氷厚および試験条件に依存する。

筆者等は上掲の諸因子をバックグラウンドにして下層物体の比自由表面エネルギーの影響を求めることが課題とした。

飛沫着氷時に生成した氷の弾性特性および強度特性に関する一連の研究報告^{4, 22, 23)}では検討すべき諸パラメータに及ぼす表面特性の影響については検討されていない。

(1) 実験方法

実験用の氷は水道水またはさまざまな塩分のモデル溶液から作った。飛沫流は文献10に示した実験装置を用いて作り出した。

この飛沫流の基本的パラメータは次の通りである。

風速—全ての試験で 15 m/sec, 流れの平均水分 $\bar{\omega}_{cp} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$

流れ内の液滴の分散度—平均半径 $\bar{r} = 150 \mu$, 最大半径 $r_{max} = 350 \mu$ をもつ正規対数分布で表わす。

水の温度—全ての試験で +2 °C, 空気の温度—(10 ± 2) °C

飛沫吹付け周期—2つの飛沫吹付けの間の休止時間に対する飛沫吹付時間の比で表わし、試験を通じて自動的に一定に維持した。即ち

$$\tau = \frac{t_{\sigma}}{t_n} = 0.2; 0.335; 0.5; 0.75; 1.0$$

所与の厚さの氷に成長させた後に、それを飛沫を含まない空気の流れによって30分間に亘り＜乾燥＞させた。氷は寸法 500 × 250 mm の供試片で成長させたが、これらは同一の幾何学的および熱物理的特性をもち、比自由表面エネルギーの大きさだけが相異なるものである。

温度 20°C での若干の材料について比自由表面エネルギーの平均値を示せば下記の通りである。

ステンレス鋼	2000	erg / cm ²	銅	1650	erg / cm ²
アルミニウム	900	"	スズ	700	"
エポキシ強化プラスチック	100	"	ポリエチレン	28	"
塗料	70	"	ポリエチルハイドロシロキサン(交差結合)	30	"
ポリ四弗化エチレン	19	"	過弗化パラフィン	9	"

供試面の試験準備は既発表の報告^{14, 15, 16, 19)}で示した方法に従って実施した。表面の粗度は全ての試験を通じてほぼ 3 μ であった。供試氷片の調整を終了した後に現場用の付着力計を用いて下層物体に対する氷の付着を測定した。これについては文献 (11, 13) で述べてある。

付着試験の結果から得られた氷のコアは、その後、強度特性、密度、塩分の測定、また塩類の層間分布の研究に用いた。

氷の密度は分析用分銅を用いた浮秤法によって測定した。その作業液としてはヘプタン C₇H₁₆ (品名 ChDA) を使用した。ヘプタンの密度と温度との関係を下記に示す。

<i>t</i> (°C)	g / cm ³	<i>t</i> (°C)	g / cm ³
0	0.705	-30	0.7335
-10	0.709	-50	0.7415
-20	0.7175		

塩分の測定は示差塩分計を用いて導電率測定法によって行なった。測定結果は NMR (核磁気共鳴) 式スペクトロメータで監視した。

結晶の寸法は偏光計で層状スライスによって求めた。平均結晶の寸法はステューデント分布を用いて統計的に算出した。

基本的な強度特性として筆者等が選択したものは点圧縮法によって得られた単位面積当たりの破壊力の値である。試験用の測定装置は筆者等が開発したものを使用した。

この測定装置には供試体を固定するためのホールダーが設けられ、これはテフロン製ケーシングと 2 枚の球付き真製ベースから構成され、これらの間で供試体の変形を行なう。固定用のゴム環をもつ上部ベースはホールダにねじ結合によって固着されている。その上側部分にねじ孔が設けられ、それによってプレス上に供試体とホールダー全体が固定され、センタリングが施される。下部のベースはホールダでテフロン製リングによって固定され、上部ベースに対してセンタリングを施される。ランニング・フィットによりこのベースはプレスによる載荷時に容易に移動できるようになっている。 $d = 16\text{mm}$ の 2 ケの固定球の間に所与の厚さ (50mm 以下) の $d = 70\text{mm}$ の円筒状供試体が配置される。

この試験装置全体としては上述の点圧縮試験用の下部ベースのほかに、剪断試験用および曲げ試験用のベースも含まれている。

供試体の破壊試験はスクリュー型油圧ポンプ付きのプレスで行なった。

今回設定された課題に対応して開発された試験装置は以前に使用したものと較べて下記のような長所をもっている。

- 1) 点試験に際してはじめ供試体を調整 (載荷される表面の処理^{27, 17, 18, 28)}) する必要が無くなる。これは強度に及ぼす表面のエネルギーの影響を調べる際に許容されない。
- 2) 試験には任意の形状の供試体が使用できる。
- 3) スクリュー型油圧ポンプによってより均等な載荷が可能になり、載荷速度を広い範囲に亘り変化させることができ

き、また容易に手動（野外条件下）から電動（定置条件下）に切替えることができる。

破壊力の判定は静電式センサーを用いて自動的に、または標準圧力計により肉眼で行なう。破壊力の測定誤差は土1%以下である。

被測定値は下記の V. Weibull の関数による強度値の統合群の近似を用いて10点以上の測定値の平均値として順序統計論の方法によって求めた。

$$F(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma_{p,i}}{\sigma_{p,0}}\right)^n}$$

文献（3, 6）で与えられている勧告に従って、分散 (S^2_{σ})、平均2乗偏差 (S_{σ}) および変分係数（Variation coeff.）(W_{σ})の評価を行なった。研究の過程で7000点以上の強度測定が実施された。各試験はそれぞれ4つの段階から構成された。その第1段階は供試体と水の凍結準備、所与のパラメータへの装置の調整、可制御着氷パラメータのもとでの氷の凍着、および出来上った氷の＜乾燥＞とした。

第2段階は下層物体に対する氷の付着力の測定とした。その際、基準表面からの氷の剥離力の大きさをチェックした。これは試験の準備と実施の途上で考慮されなかった諸要因による誤差を回避する目的のもので、基準表面としてエポキシ強化ガラス面を採用した。

第3段階では第2段階で得られた氷のコアを強度試験した（今回の場合には破壊方法によって。また超音波法の適用も可能）。この場合にも基準物体についてチェックを行なった。

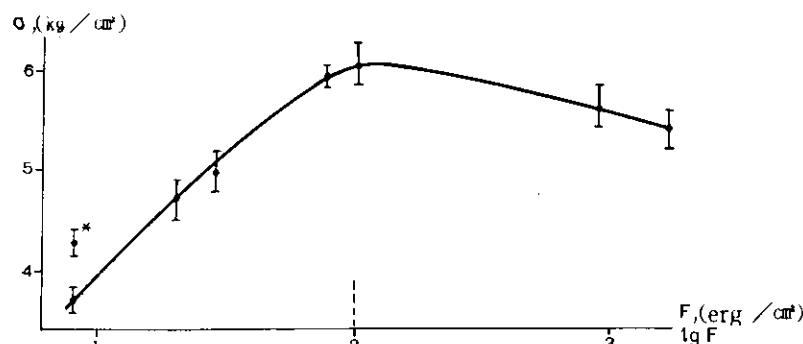
第4段階では上記の3段階全てを経過した氷について密度、塩分および構造特性を求めた。これらは今回設定された課題との関係では必ずしも全ての供試氷片について行なうことが必須条件ではなかった。

（2）実験結果とその吟味

研究の過程では氷の強度に及ぼす下層物体の比自由表面エネルギーの影響が検討され、この影響がまだ現われている氷層の最大厚さが求められた。これらの結果は第1図と第2図に示す通りである。

氷厚が大きくなるにつれて下層物体の影響が低減し、氷厚約50mmのときにこの影響は实际上無くなる。

さまざまな下層物体上に成長



第1図 下層物体の自由表面エネルギー (erg/cm²) と淡水氷の強度 (kg/cm²) との関係

した氷の強度特性には氷厚15mmまでにおいて極めて本質的な差異が現われているので、強度に及ぼす比自由表面エネルギーの影響についての検討は氷厚9mmを対象にして行なった。

第1図から云えるように、比自由表面エネルギーの値が温度-10°Cにおいて100 erg/cm²に近い、即ちこの温度のときの淡水氷の比自由表面エネルギーの値に近くなっている表面において最も強度の大きい氷が得られる。淡水氷の比自由表面エネルギーと温度との関係を下記に示す。これら得られた結果は文献25のデータと充分に一致している。

t (°C)	(dyn/cm)
273	99.7
268	100.7
263	101.4
258	102.3
253	103.1

この関係は次式によって良く表わされる。

$$\tau_t = \tau_0 (1 - b \Delta t)$$

ただし、 τ_t —温度 t °C のときの表面エネルギー
 τ_s —温度 -5 °C のときの水の表面エネルギー
 b —温度係数 ($17 \cdot 10^{-4}$)

水—氷の分離境界における比自由表面エネルギーは温度との関係において $15 \sim 32$ dyn/cm の範囲で変化し、温度 -40 °C のとき平均値 17 dyn/cm をもつ。

第1図に示したデータに基づいて次のように結論できる。即ち、下層物体の比自由表面エネルギーの 100 dyn/cm 値から増大または減少側への偏りは氷の強度の低下をもたらす。氷の強度の変化は次式に従う。

$$\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma = k \Delta \tau^h$$

この場合、 $\tau < 100$ erg/cm² に対応する h_1 、および h_1 は $\tau > 100$ erg/cm² に対応する h_2 、および h_2 よりもそれぞれ大きい。

明らかに、氷の表面エネルギーが下層物体の表面エネルギーよりも高い場合の氷のブロックに生じる応力は下層物体の自由エネルギーが氷の自由エネルギーよりも高い場合のそれよりも大きい。

第1図と第2図には測定装置の誤差が示されているが、試験の誤差は $1.5 \sim 7$ 倍である。

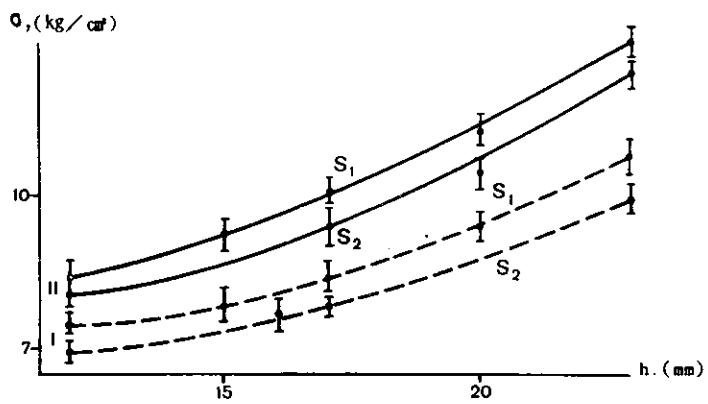
第3図はテフロンとエポキシ系強化プラスチックについて結晶の大きさと下層物体からのスライス（薄片）の距離との関係を示す。明らかに、比自由表面エネルギー値が小さい下層物体については高エネルギーの下層物体の場合よりも結晶の寸法が大きいことが特徴的である。

固相多結晶体の理論から明らかなように、結晶の寸法が大きくなれば強度が低下する。

以上のように、第1図と第3図に示したデータは充分に一致している。更に、距離 $3 \sim 7$ mmにおいて結晶の寸法に最も大きな差異が認められる。ただし、このような差異は僅かな程度にせよ深さ 30 mmまで存続している。

その後の試験では検討の対象としてはポリ四弗化エチレンおよびエポキシ系強化プラスチックをベースとした表面層をもつ下層物体のみを探った。その理由はこれらの下層物体上に成長した氷の強度特性にみられる差異が大きい（第1図参照）ことによる。更に、エポキシ系強化プラスチックの比自由表面エネルギー値は防食塗装材に特徴的であり、またポリ四弗化エチレンのそれは着氷防止用被覆に特徴的である。

第4～6図に氷の強度および密度とモデル溶液の塩分および飛沫吹付け周期との関係を示す。これら全ての検討された場合についてエポキシ系強化プラスチックに成長した氷の強度はポリ四弗化エチレンに成長した氷の強度よりも



条件：

気温 -10 °C

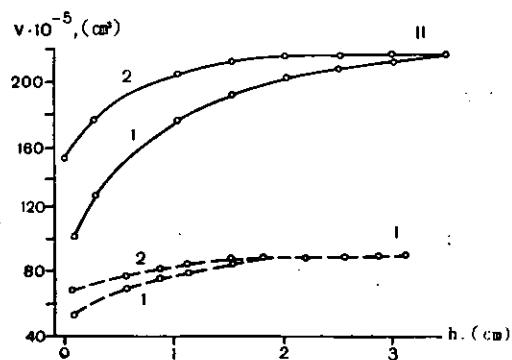
水の塩分 $S_1 = 0\%$

$S_2 = 5\%$

I—テフロン系ポリマー

II—エポキシ系ポリマー

第2図 氷の強度（点圧縮）と水厚(h)との関係



1—エポキシ系強化プラスチック

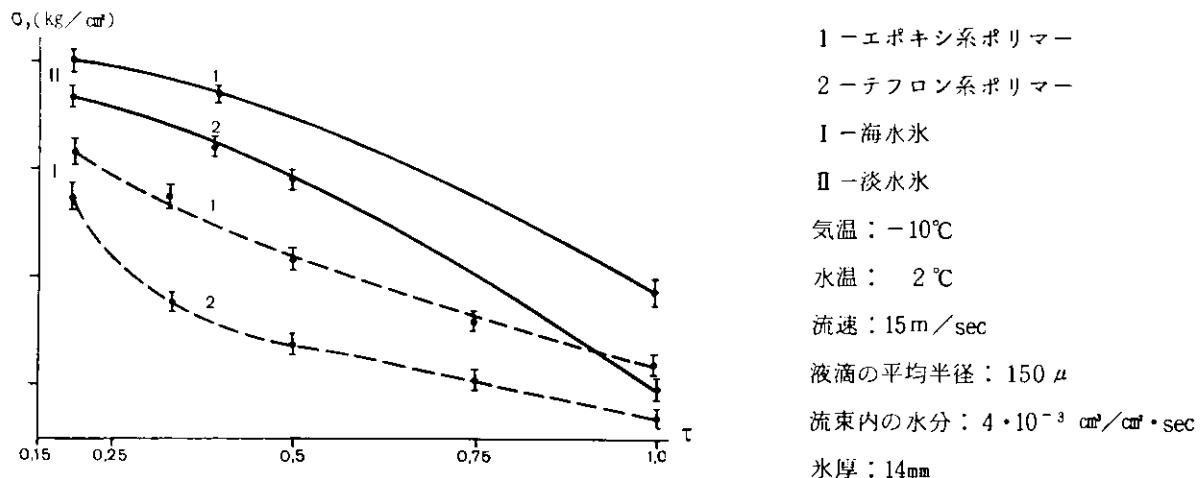
2—ポリ四弗化エチレン

I—海水から作った氷

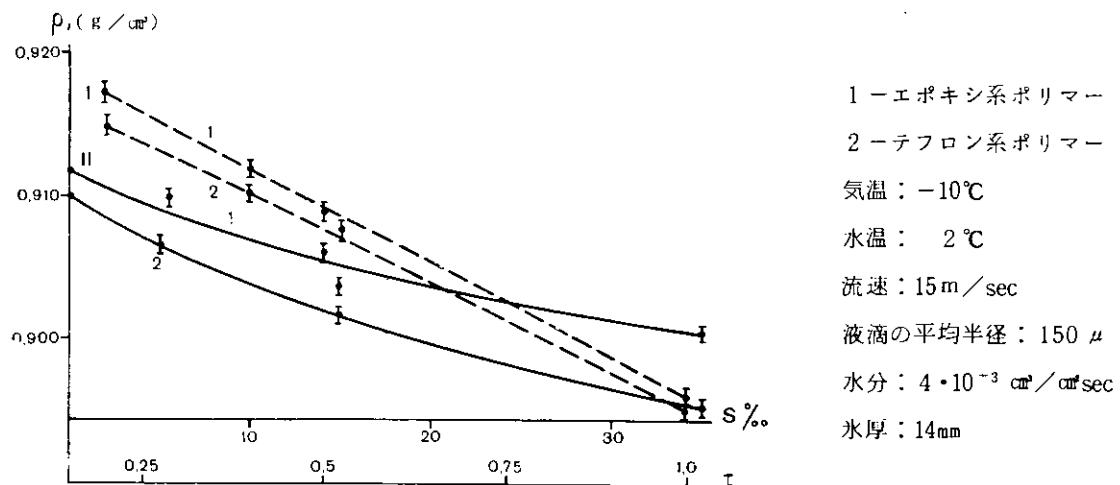
II—淡水から作った氷

(温度 -10 °C)

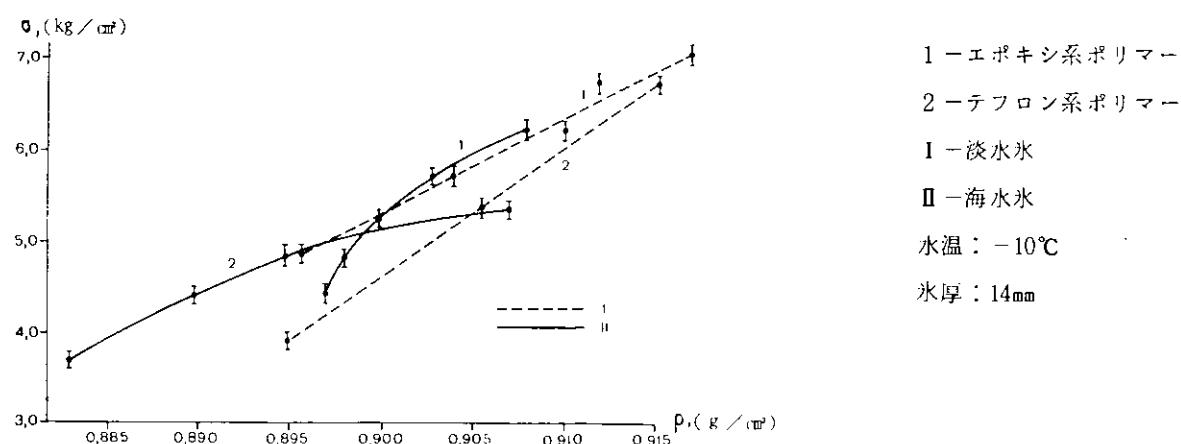
第3図 氷の平均結晶の寸法と下層物体からの距離



第4図 水の強度(σ)と飛沫吹付け周期(τ)との関係



第5図 海水の飛沫吹付け周期 τ (I) および $\tau = 5/15$ のときのモデル溶
液の塩分 S(II) と水の強度(P)との関係



第6図 水の強度と密度との関係

高かった。

他の諸パラメータが一定のときモデル溶液の塩分が増すにつれて氷の強度は徐々に低下する。これは他の研究者達^{2, 7, 17, 28)}によって得られた結果と対応している。

氷の厚さ方向での塩分の分布およびその平均値は第7図に示す通りである。

ポリ四弗化エチレンおよびエポキシ強化ガラスで成長した氷については強度の変化および厚さ方向の塩分の分布の状況は実験誤差範囲内では同じである。

飛沫吹付け周期の増大に伴ない（これは被着水面に対する多量の水の流入および飛沫流束が存在しないときの空気の吹付け時間の減少に対応する），氷の強度は低下する。これは更に脆い氷が生成することによってもたらされる。密度測定の結果からこの結論が確認されている。

さまざまな下層物体で成長した氷の厚さ方向に対する音の伝播速度は同一であり、文献（1, 26, 27, 28）のデータに従って塩分の変化に応じて変化する。

ヤング率およびボアソン比は次式に従って計算した。

$$E = \frac{v^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}, \quad E = (A + b \sigma_m) \cdot 10^6$$

ただし、 A と b —経験的な定数（それぞれ4.2と 10^{-3} ）

さまざまな下層物体に凍着した氷に対するボアソン比はそれぞれ異なっており、ポリ四弗化エチレンおよびエポキシ強化プラスチックの表面にできた氷については0.28および0.32であり、塩分35%の溶液から成長した氷については0.26および0.31であった。

氷の密度は次式に従って計算した。

$$\rho_t = \frac{m_1}{m_1 - m_2} (\rho_{hept} - \rho_{air}) + \rho_{air}$$

ただし、 m_1 —空气中における氷の質量、 m_2 —ヘプタン中における氷の質量、

ρ_{hept} —温度 t °Cにおけるヘプタンの密度、 ρ_{air} —温度 t °Cにおける空気の密度

実際上全ての試験でエポキシ強化ガラスに凍着した氷の方がテフロンに凍着した氷よりもヤング率は僅かながら高く、また塩水氷よりも淡水氷の方がヤング率が高かった。

ヤング率と強度との間には下記の相関が存在した。

$$E = c\rho - d \quad (\text{kg/cm}^2)$$

上記で c と d はそれぞれ経験的な定数であり、温度-10°Cでエポキシ強化プラスチックに成長した塩水氷についてはそれぞれ $c = 28.6 \cdot 10^4$ および $d = 1.7 \cdot 10^4$ である。

淡水氷の場合には定数 c は上記の値のほぼ1.3~1.4倍であり、また d は僅か（~20%）相違していた。

筆者等は氷の強度と供試体の厚さ、氷の強度と成形温度（forming temp.）、氷の強度と塩分とのそれぞれの定性的

関係の評価を行なった。これらの関係の性質はエポキシ強化プラスチックに凍着した氷についても、またポリ四弗化エチレンに凍着した氷についても、文献（1, 2, 8, 17, 26, 27）で他の研究者達が得ている結果と対応していた。

試験では供試体に破壊力をかける載荷速度（これは予備的なデータに基づいて選定されたが） $10\sim20 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ であった。

着氷時のさまざまな表面に対する氷の付着および強度に関する試験データに基づいて A.V.Panyushkin と R.T.Kozlovskaya は氷の機械的破壊の効果を評価するために下記の形をもつ基準 R を提案している。

$$R = L \left(\frac{F_{ad}^e}{F_{ad}} \right)^m \cdot N \left(\frac{\sigma^e}{\sigma} \right)^p$$

ただし、 F_{ad}^e と F_{ad} — それぞれ標準（正式）被覆および着氷防止被覆について付着性接触の破壊に費やされる力。
 σ^e と σ — それぞれ標準被覆および着氷防止被覆において成長した氷の強度特性。

m , L , N , P — 付着項および強度項の破壊に費やされるエネルギーへの寄与を考慮したそれぞれ重み乗数，
(weight multipliers)

明らかに、係数 L および m の大きさは粗度、空間中の配向、被着水面の幾何学的寸法とプロフィルに依存する。

パラメータ N および p の大きさは、まず第一に、凍着氷の厚さ、破壊力の特性、氷のエイジングに依存する。

文献（12）で得られている結果を考慮すれば、上記の式を下記のように書き表すことができる。

$$R = L \left(\frac{n_e \sqrt{F^e}}{n \sqrt{F}} \right)^m \cdot N \left(1 - \frac{\sqrt{AE(F_i - F_{cp})}}{\sigma_i \sqrt{\ell}} \right)^p$$

ただし、 n_e と n — 接着物と基質との分子間の付着性結合の形成確率を考慮した係数。

A — それぞれ標準被覆および保護被覆に対する一定乗数。

F^e と F — それぞれ標準被覆および保護被覆の比自由表面エネルギー。

E — ヤング率

p — 最も大きい微視的亀裂の寸法。

F_i と σ_i — それぞれ氷の比自由表面エネルギーと強度。

F_{cp} — 氷一下層物体の分離境界の比自由表面エネルギー。

効果基準 R と各種パラメータとの関係が複雑であるにせよ、現時点において次の結論を下すことができる。即ち、比自由エネルギーの大きくない表面から氷を除去するのに費やされるエネルギーの大きさは比自由エネルギーの高い表面から除去する場合に較べて、付着にかかる成分と強度にかかる成分が低減するために、著しく小さくなる。

下記に示す基準値 R のデータは A.V.Panyushkin が付着性接触の形成温度、水中の塩分および成長した氷層の厚さとの関係において着氷防止用ポリマー被覆について行なったさまざまな実物試験に基づいて得られたものである。

淡水氷の厚さ

	R_{exp}
($t = -12^\circ\text{C}$)	
12mm	2.7
27mm	2.4
45	2.2

海水氷の厚さ

	R_{exp}
($t = -11^\circ\text{C}$)	
14mm	2.3
37	1.9
53	1.6

厚さ 25mm の淡水氷に対する付着性接触の形成温度 R_{exp}

-12°C	2.42	-15	2.41
-------	------	-----	------

-21°C	2.4	-25°C	2.35
厚さ25mmの海水氷に対する付着性接触の形成温度 R_{exp}			
-11°C	2.2	-16.5°C	2.1
-22	2.0	-26.3	1.9

以上のように、氷の強度特性は下層物体の比自由表面エネルギーの大きさに左右される。下層物体の影響は氷厚30~50mmに至るまで及んでいる。

氷の機械的破壊の基準値の変化から、自由表面エネルギーが低いという特徴をもつ表面から氷を除去するために費やされるエネルギーは自由表面エネルギーが高いまたは中程度であるという特徴をもつ表面から除去する場合に比べて $\frac{1}{1.5} \sim \frac{1}{2.5}$ であることが判かる。

引　用　文　献

- 1) Bogorodsky V.V., et al : 淡水氷の物理。Gitrometeoizdat 出版。227 PP (1971年)
- 2) Butyagin I.P. : 氷および氷盤の強度。Nauka 出版。154 PP (1966年)
- 3) 順序統計理論入門。Statistika 出版。414 PP (1970年)
- 4) Voitkovsky K.F., Golubev V.N. : 氷の機械的強度と構造との関係。“氷と水理構造物に及ぼすその作用, VNI - IG 出版。P.3~8 (1972年)”掲載論文。
- 5) Goryunov Yu.V., et al : Rebinder 効果。Nauka 出版。284 PP (1966年)
- 6) Gumbel E : 極値の統計学。Mir 出版。450 PP (1965年)
- 7) Korzhavin K.N. : 建造物に及ぼす氷の作用。科学アカデミー出版局。203 PP (1962年)
- 8) Lavrov V.V. : 氷の変形と強度。Gidrometeoizdat 出版。206 PP (1969年)
- 9) Likhtman V.I., et al : 金属の物理・化学的力学。科学アカデミー出版局。352 PP (1962年)
- 10) Mishin V.A., et al : 飛沫流の実験研究。AANII* 紀要。vol. 317, P. 45 ~ 61 (1975年)
- 11) Panov V.V., et al : 実験室および自然条件における氷の実験研究。<雪氷研究の物理的方法>シンポジウム提出報告。AANII* コピー。P. 17~18 (1973年)
- 12) Panov, V.V. et al : 着氷時の構造物に生成する氷の特性に及ぼす自由表面エネルギーの影響。AANII* 紀要。vol. 331, P. 42 ~ 49 (1976年) (本論文集)
- 13) Panyushkin A.V., et al : 被保護面への氷の付着量を低減させる被覆の現場試験。AANII* 紀要。vol. 298 P. 83 ~ 90 (1972年)
- 14) Panyushkin A.V., et al : 実験室用付着力計による構造材および保護被覆に対する氷の付着力の測定方法。AANII* 紀要。vol. 298, P. 59 ~ 70 (1972年)
- 15) Panyushkin A.V., et al : 構造材に対する氷の付着に関する実験研究。AANII* 紀要。vol. 298, P. 71 ~ 77 (1972年)
- 16) Panyushkin A.V., et al : 構造材および被覆材に対する氷の付着力に及ぼす水中の塩分と温度の影響。AANII* 紀要。vol. 317, P. 75 ~ 80 (1975年)
- 17) Peschansky I.S : 氷学と氷工学。Morskoi Transport 出版。345 PP (1969年)
- 18) Peiton Kh. R. : 氷の若干の機械的特性。“雪と氷。Mir 出版。P. 81 ~ 87 (1966年)”掲載論文
- 19) 固体金属相の表面エネルギー。Atomizdat 出版。170 PP (1966年)
- 20) Portnoi K.I., Babich B.N. : 分散・強化材料。Metallurgiya 出版。200 PP (1974年)

* AANII = 北極・南極研究所

- 21) 媒体の作用に対する機械的特性の感受性。Mir 出版。232 PP (1969 年)
- 22) Smirnov V. I. : 船体着氷時の結氷の強度限界の計算値。“船体着氷条件の理論的・実験的研究。Gidrometeoizdat 出版。P. 154 ~ 159 (1971 年) ”掲載論文。
- 23) Fronov A. D. : 海氷の弾性特性および誘電特性に及ぼすその相構成および構造の影響。“氷河研究資料。<クロニクル、討論>編。No19 (1972 年) : 科学アカデミー地理学研究所リコピー” P. 203 ~ 209 “掲載論文

- 24) Cox A. K. J. Tron and Stel Inst., 1967, vol. 205, N 2, p. 203.
- 25) Ketcham W. M., Hobbs P. V. Philosop. Magazine, 1969, vol. 19, N 162, pp. 1161 ~ 1173.
- 26) Physics of Ice. Proceedings of the International Symposium on Physics of Ice. Sept. 9 ~ 14, 1968. New York, Plenum Press, 1969. Part II, p. 247.
- 27) Physics of Snow and Ice. August 14 ~ 19, 1966, Sapporo, Japan, vol. 1, Part I, p. 382.
- 28) Weeks W., Assur A. The Mechanical Properties of Sea Ice. CRREL, Hanover, 1967, p. 77.

§ 5 載荷速度との関係における氷の強度について

A. N. Tolstov

第 1 表 圧縮に対する氷の一時的抵抗

試料 No	試料の温度 (°C)	試料の面積 (cm ²)	試料の体積重量 (g/cm ³)	載荷速度 (kg/cm ² ·min)	破壊荷重 (kg)	圧縮に対する 一時的抵抗 (kg/cm ²)
1	2	3	4	5	6	7
小丘から採取した氷						
1	-7.5	23.2	0.85	4.3	700	30.2
2	-8.7	19.0	0.89	10.5	350	18.4
3	-8.6	30.7	0.80	49.01	650	21.2
4	-8.7	18.4	0.85		250	13.6
5	-4.9	33.7	0.86	1.48	820	24.3
6	-4.8	32.5	0.88	12.3	480	14.5
7	-4.9	32.2	0.91	46.8	820	25.4
8	-5.0	28.6	0.85	52.5	420	14.7
9	-4.8	31.9	0.84	瞬間	300	9.4
10	-2.2	25.7	0.87	5.8	550	21.4
11	-2.1	29.1	0.89	8.7	620	21.4
12	-2.1	27.9	0.84	18.0	450	16.2
13	-2.5	28.6	0.86	35.0	400	14.0
14	-2.4	24.0	0.91	∞	400	16.6
15	-1.0	34.2	0.96	8.8	600	17.6
16	-1.0	33.4	0.80	8.9	350	10.5
17	-0.5	37.0	0.87	2.7	450	12.2
18	-0.3	61.7	0.82	4.87	1750	28.4
19	-0.2	38.1	0.85	10.5	1000	26.9
20	-0.1	31.9	0.88	40.8	350	10.9
21	-0.1	28.3	0.88	∞	250	8.9
22	-	70.1	0.97	5.07	2200	31.8
23	-	58.2	0.97	47.4	950	18.1

* AANII = 北極・南極研究所

試料 No	試料の温度 (°C)	試料の面積 (cm ²)	試料の体積重量 (g/cm ³)	載荷速度 (kg/cm ² ・min)	破壊荷重 (kg)	圧縮に対する 一時的抵抗 (kg/cm ²)
1	2	3	4	5	6	7
穿孔 E - 24 から採取した水						
1	-7.0	23.3	0.84	8.60	900	38.6
2	-7.0	22.2	0.95	9.03	950	42.8
3	-7.0	18.51	0.87	10.08	300	16.2
4	-7.0	15.7	0.89	27.9	400	37.2
5	-5.3	22.9	0.96	10.08	1050	45.8
6	-3.7	22.9	0.94	4.36	600	26.2
7	-3.0	16.1	0.89	12.40	600	37.3
8	-3.0	26.8	0.88	7.48	1050	39.2
9	-3.0	20.2	0.88	9.91	750	37.05
10	-3.0	21.7	0.83	9.23	650	29.9

(備考) 試料No.15~20には室温を示し、試料No.21には試料温度 - 1.0 °Cを示す。

第1表 (続)

試料 No	試料の温度 (°C)	試料の面積 (cm ²)	試料の体積重量 (g/cm ³)	載荷速度 (kg/cm ² ・min)	破壊荷重 (kg)	圧縮に対する 一時的抵抗 (kg/cm ²)
1	2	3	4	5	6	7
地中氷層から採取した水						
1	<u>-8.6</u> <u>-7.8</u>	26.7	0.88	5.6	1100	41.3
2	<u>-8.5</u> <u>-7.6</u>	24.4	0.87	12.3	1100	45.2
3	<u>-7.0</u> <u>-5.4</u>	28.4	0.85	44.2	600	21.6
4	<u>-7.0</u> <u>-5.6</u>	15.2	0.87	瞬間	250	16.6
5	<u>-5.5</u> <u>-4.9</u>	29.4	0.92	3.34	3600	122.3
6	<u>-5.4</u> <u>-4.8</u>	30.03	0.92	5.0	1500	50.01
7	<u>-5.2</u> <u>-4.7</u>	25.6	0.93	11.8	1150	45.1
8	<u>-5.4</u> <u>-4.3</u>	31.6	0.89	47.6	900	28.4
9	<u>-5.5</u> <u>-4.3</u>	26.5	0.89	瞬間	850	32.05
10	0	25.0	0.99	6.0	1650	66.01
11	0	33.6	0.97	23.8	900	26.7
12	0	21.4	0.97	74.9	650	31.4
氷河から採取した水						
1	-2.5		0.988	88.0	1000	8.8
2	-2.5		1.07	45.0	200	4.5
3	-2.5		1.08	17.9	500	7.4
4	-2.5		0.898	10.0	950	19.4
穿孔 E - 18 から採取した水						
1	-2.5		0.986	37.8	300	18.9

試料 No	試料の温度 (°C)	試料の面積 (cm ²)	試料の体積重量 (g/cm ³)	載荷速度 (kg/cm ² ・min)	破壊荷重 (kg)	圧縮に対する 一時的抵抗 (kg/cm ²)
1	2	3	4	5	6	7
2	-2.5		1.02	39.8	400	31.8
3	-2.5		0.932	10.8	300	21.7

(備考) 分母には試料の温度を示し、分子には室温を示す。ただし、試料No 10~12には室温を示す。

圧倒的大部分の土壤が永久凍結状態にあるノリリスク地方では地下水を土壤の一種と看做することができる。

ノリリスク、ドゥジンカ、ヴァレクの各地域およびドゥジンカーノリリスク-ヴァレク間鉄道沿線では極めて微小な中間層や水晶体から厚さ数メートル、面積数千平方メートルに及ぶ大氷塊に至るまでのさまざまな氷が多くの場所に認められる。

文献に発表されている氷の特性に関するデータは主として淡水の氷盤に関するものが多いが、河川や湖沼の氷は極めて多種多様である。例えば、これらの氷の弾性率は多数の観測結果に依れば 4300 kg/cm² から 92700 kg/cm² に及んでいる。河水のポアソン比は Pinegin の研究では 0.2 ~ 0.78 とされている。氷の圧縮に対する一時的抵抗は 12 kg/cm² から、127 kg/cm² まで、引張りに対する一時的抵抗は 5.4 kg/cm² から 19.5 kg/cm² まで、また剪断に対する一時的抵抗は 5 kg/cm² から 13 kg/cm² まで、それぞれ変化幅がみられる。更に、氷とコンクリート表面との結合力は氷の温度に応じて 8 ~ 16 kg/cm² となっている。このように、得られた物性値が著しく多様であるのは氷の試験方法、特に載荷速度のいかんに依る処が大きい。

上記の点に関連して下記の氷片を供試体にして若干の力学的特性を調べた。

- 1) ノリリスク-ヴァレク間鉄道路線での小氷丘から採取した試料氷片。
- 2) 深さ 8 ~ 12 m の穿孔 E - 24 から採取した試料氷片（氷はダスト状・粘泥状の土壤で汚れている）。
- 3) 深さ 0.3 ~ 1.0 m の地中氷層から採取した試料氷片（氷は清浄で、土壤などの不純物を含んでいない）。
- 4) マールイ・ウーゴリヌイ川の源に存在する氷河のフィルン氷から採取した試料氷片。
- 5) 深さ 13 ~ 14 m の穿孔 E - 18 から採取した試料氷片（氷は透明で、殆んど気泡が含まれていないが、土壤中間層を含んでいる）。

これらの氷片による試験は 1973 年の 3 月から 5 月にかけて Noril'skstroi の凍土ステーションに付属設置された面積 3.5 m² の低温室内で、また夏期には水平坑道（温度は年間を通じて約 -2 °C）内で実施された。

供試体の寸法はそれぞれ下記の通りであった。

圧縮試験用 4.41 × 4.17 × 5.08 cm ~ 7.6 × 9.5 × 9.55 cm

剪断試験用 8 × 4.6 × 13.3 cm ~ 8.3 × 8.5 × 13.8 cm

圧入試験用 4.9 × 5.0 × 11.05 cm ~ 6.95 × 6.45 × 11.1 cm

圧縮試験、圧入試験および剪断（截断、切断）試験は <Tonindustriya> 型 10 t 油圧プレスで行った。氷に対する載荷速度の役割を明らかにするため荷重を加える速度は毎分 2.77 kg/cm² から 88.88 kg/cm² までの広い範囲に亘り変化させた。

以上による試験結果を第 1 表、第 2 表および第 3 表に示す。

第 1 表と第 2 表の比較から、圧入に対する一時的抵抗は圧縮に対するそれよりも大きいことが判かる。

氷の剪断に対する抵抗の試験は深さ 1 m の地中氷層から採取した供試体のみを用いて温度 -3.0 °C のもとでさまざまな載荷速度を与えて行なった。剪断モーメントは M.L. Sheikov が 1936 年に行なった試験の場合と同様に、プレスの水銀圧力計の目盛から直接求めた。これによる試験データを第 3 表に示す。

文献データに依れば河水の剪断に対する一時的抵抗の大きさはさまざまな値を示しているが、一般に、筆者等の得た値よりも低くなっている。

第2表 圧入に対する氷の一時的抵抗

試料 No	試料の温度 (°C)	圧入の種類	試料の面積 (cm ²)	体積重量 (g/cm ³)	載荷速度 (kg/cm ² ·min)	破壊荷重 (kg)	一時的抵抗 (kg/cm ²)
地中氷層より採取した氷							
1	-1.3	B	16	0.95	25.0	1300	81.25
2	-1.3	A	9	0.97	22.22	500	55.55
小丘より採取した氷							
1	-1.3	B	15.6	0.90	25.64	400	26.64
2	-1.3	A	14.4	0.94	13.88	800	52.08

(備考) A—鉄製ボルトの角頭(寸法3×3×1.5 cm) B—鉄板(寸法13×2×1 cm)

第3表 地中氷層から採取した氷の剪断(切断)に対する一時的抵抗

試料 No	試料の温度 (°C)	体積重量 (g/cm ³)	剪断面積 (cm ²)	剪断力 (kg)	載荷速度 (kg/cm ² ·min)	剪断応力 (kg/cm ²)	備考
1	-3.0	0.913	10.6	150	2.3	14.1	きれいな切 断形状
2	-3.0	0.878	20.0	220	10.8	11.0	偶力の作用 を受けて剪 断面に垂直 にクラック が発生
3	-3.0	0.917	9.18	120	10.9	13.0	きれいな切 断形状
4	-3.0	0.903	20.48	200	瞬間	9.7	

小氷丘、地中氷層およびフィルン氷から採取した氷の弾性係数を求めた。

小氷丘から採取して温度-1.5 °Cで試験した或る1つの氷片ではヤング率に相当する弾性係数が $0.5 \cdot 10^5 \sim 2.0 \cdot 10^5$ kg/cm²であり、別の1つの氷片では温度-5.5 °Cでの試験において弾性率 $0.7 \cdot 10^5 \sim 1 \cdot 3 \cdot 10^5$ kg/cm²を示した。

フィルン氷の弾性率は温度-1.2 °Cで試験した場合に $0.4 \cdot 10^5 \sim 0.5 \cdot 10^5$ kg/cm²であり、温度-3.6 °Cでは $0.2 \cdot 10^5 \sim 0.6 \cdot 10^5$ kg/cm²の範囲にあった。

一定荷重を持続して加えた場合の氷の変形については深さ8~12mの穿孔E-24から採取した氷片を用いて求めた。この試験結果から、温度約-7.0 °Cのとき荷重5 kg/cm²を加えても長時間載荷された氷の変形量は増大しないことが判明した。

以上のように、筆者等が試験した一連の氷の弾性特性は充分に高い値を示した。氷の圧縮、圧入および剪断に対するそれぞれ抵抗値については應々にして高くなかった。その理由は試料採取時、また供試体処理時に氷に亀裂が発生することに存ると筆者等は看做した。成功裏に採取処理できた氷片の圧縮に対する抵抗値は亀裂の入った氷片のそれよりも常に大きかった。

供試体の表面を加熱器で処理して滑らかにした場合、または供試体を取囲む空気の温度が0 °Cまで上昇した場合にも氷の圧縮に対する抵抗が増大する。このように、試験氷片の作成には細心の注意を払う必要がある。氷の強度は荷重を徐々に加える場合にも大きくなる。

載荷速度(急激なまたは緩やかな荷重のかけ方)の影響についてのデータは文献に極めて少ない。ここに報告した試験で得られたデータはこの空白を充分に埋めるものである。第1表から明らかのように、載荷速度が増大するとき一時的抵抗は全ての種類の供試氷片で低下している。

なお、雪の強度に関しては、ここでは、体積重量 $0.7 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$ まで徐々に稠密化された雪は $50 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$ までの圧縮荷重に耐えることのみを指摘しておく。氷の強度は稠密化された雪の強度よりも大きくなるはずである。

§ 6 天然水域の氷の分類

N. V. Cherepanov

周知のように、さまざまな水文気象条件のもとで形成された氷は構造がさまざまであるばかりでなく、全ての物理的特性面でも著しく相違している。氷盤は一定の状態にとどまっておらず、その結晶構造は断えず複雑な変成作用による変態をとげている。このような変態過程においては氷の構造ばかりでなく、その特性全体も変わる。

現在、天然水域の氷盤の物理的研究のためにさまざまな氷の分類が用いられているが、それらはいずれも氷の構造の特質および氷の生成条件をあまり良く反映していない。例えば、北極海の氷と南極海の氷は一般にその年令的な微候によって区分され、多年氷、一年氷、秋氷、冬氷、また場合によっては流水、定着氷などに区分されている。

淡水域の氷は一般に河川氷と湖沼氷に分けられ、またその生成条件から水質氷 (watery ice)、スポンジ氷または雪質氷 (smowy ice) に分けられる。外国の研究者はしばしば＜黒氷＞、＜白氷＞といった定義も使っている。

＜黒氷＞は氷の凍結に際して生成した氷であり、氷盤内で暗い、ほとんど黒い色を呈し、比較的少量の不純物を含んでいる。

＜白氷＞は多量の空気中の不純物を含む雪またはスポンジ氷が凍結して生成した氷であり、微細な結晶構造を持ち、氷盤内で白色を呈する。

最近、氷の構造上の特質—結晶の大きさ、形状、光学的配向など—に依る分類が広く使われるようになった。^{4, 5)} 結晶の形態論的特性、主として結晶の発達程度（晶癖）に基づき全ての天然氷は結晶構造の面でプリズム状構造、纖維状構造および等軸（粒子状）構造 (isometric (granular) structure) に分けられる。これらの各タイプの構造は結晶面 (crystall facet) の発達の性質（表面の複雑さ）の面では規則的粒子状（半自形—hypidiomorphic）構造と不規則的粒子状（多形—allotriomorphic）構造に分けられ、また結晶の大きさの点では小粒子状構造、中粒子状構造、大粒子状構造に分類される。

以上のような分類の短所はそれが単に氷の構造上の特質、主として発生論的な根拠付けの無い形態論的特徴を反映しているにすぎない点にある。このような分類の仕方では、さまざまな水文気象条件のもとで生成した氷でありながら、外見的に類似した結晶構造を持っている理由で、数種類の氷が1つのタイプに属すことになる。例えば浸造氷 (infiltrational ice) と雪泥の凍結に際して生成する氷とがそれに該当する。

また発生論的な海水の分類も短所を逸れられない。この分類に依れば氷は単にその生成条件によってのみ区分される（凝結氷 (congelational ice)、凝結—水中氷 (congelational - inner watery ice)、浸造氷、等々）¹⁾。このような分類では氷の構造上の特質が考慮されない。この特質の差異は凝結性の氷生成と凝結—水中性の氷生成とで特に大きい。

1969年に発表されたカナダの研究陣による淡水氷の発生論的分類⁶⁾は興味有るものである。この分類では淡水域の氷は下記のように3つの基本的なグループに分けられ、7つの基本的なタイプに区分されている。

一次氷（氷生成初期）

P₁ — C軸の垂直配向をもつ結晶。結晶の寸法は大および特大^{*}。形状は複雑。

P₂ — C軸はランダムな配向、また若干優勢な垂直配向をもつ結晶。結晶の大きさは中～特大。形状は平坦形または針状。

P₃ — 雪から生成した一次氷層。C軸はランダムな配向。結晶の大きさは小および中。形状は等軸形 (isometric form) または平坦形。

P₄ — 霜から生成した一次氷層。C軸はランダムな配向。結晶の大きさは小～中。形状は等軸形。

*' — 結晶粒の大きさ（直径）は(1)小 = 1 mm以下、(2)中 = 1 ~ 5 mm、(3)大 = 5 ~ 20 mm、(4)特大 = 20 mm以上。

二次氷（一次氷層から発達した氷）

S₁ 一柱状構造の氷。C軸は垂直配向。結晶の寸法は氷厚と共に増大するが、一般に小か特大。粒子の形状は不規則。

S₂ 一柱状構造の氷。C軸は水平配置の傾向をもつ。結晶の寸法は小～大。深さにつれて S₁ 氷よりも急速に大きくなる。

三次氷

T₁ 一雪質氷。C軸はランダムな配向。粒子は等軸粒子。結晶の大きさは小～中。

上記のようなタイプ分けは主として淡水域の氷の構造上の特質を反映しているが、筆者等の見解では一連の重大な欠点をもっている。

まず氷を一次氷、二次氷と区分することは作為的であり、例えば一次氷の P₁型、P₂型はその構造上の特質からみて二次氷の S₁型、S₂型と相違していない。また厚さ 100 cm またはそれ以上に発達した小水板とスポンジ氷が秋期に凍着したモザイク氷は一次氷、二次氷のいずれのカテゴリに該当するか不明である。

更にこの分類では、特に河川氷に特徴的であるが、動的な氷生成条件のもとで生成したさまざまなタイプの氷についてそれぞれの位置付けが与えられていない。

北極海域および南極海域の海水、また淡水域および淡水混入海域で生成した氷の構造に関する広範な観測資料に基づいて筆者等は新しい分類の確立を試みた。その最初の試みは 1971 年に行なわれた⁵⁾。

多数の氷構造断面および氷生成条件を分析した結果、全ての天然の形状のうちから最も基本的で普遍的なものを抽出することができた。このような分類の仕方は氷の生成、結晶の成長、構造の不均質性の分析と結び付いており、またこの不均質性をもたらす原因の解明と関連している。

この分類に際しては氷の生成条件（発生論的徵候）と共に結晶構造上の特質（構造論的徵候）も考慮した。

分類のための基本的な発生論的および構造論的徵候は下記の通りであった。

1) 水域の塩分組成：

一淡水域、淡水混入塩水域、塩水域に区分

2) 氷結前の期間および水成長期間における水域の水文気象条件：

一温度勾配の大きさと方向、一冬期の垂直循環、一水域の動力学：風および対流による混合、潮流、ドリフト

一氷盤下における水中氷の生成と拡がり、一大気中からの降下物

3) 氷の結晶の成長の特質：

一幾何的増殖 (geometric breeding) 法則の出現、一結晶の形成に及ぼす結晶基盤の影響、一磁場の影響

4) 結晶の形態論的特徴：

一結晶成長の形（晶癖）、一結晶の大きさ、一結晶面の完璧度、一結晶の配向、一含有不純物の特性

5) 氷盤の存続期間の長さおよびそれと関連した変成論的変態：

一熱的変成；選択的輻射融解、繰返し凍結、浸造、フィルン化などによる構造の変化

一応力状態にある結晶のポリゴニゼーション (polygonization) およびカタクラーズ (katakraz) 現象の結果による結晶の完全性の崩壊の種類がさまざまであることに関連した動力学的変成。

氷生成条件および水中の塩分に応じて天然水域の氷は下記の 4 つの基本的なグループに分けられる。

第 1 群 — 淡水域または強度の淡水混入水域 ($S < 2\%$) *¹ において生成する氷。インデックス A で表示される。

第 2 群 — 淡水混入塩水域 ($S = 2 \sim 24.7\%$) において生成する氷。インデックス B で表示される。

第 3 群 — 海水域 ($S > 24.7\%$) *² の氷。インデックス C で表示される。

*¹) ここで 2% の塩分は仮りに採った値である。このような水中塩分のとき氷中の浸入塩分は明らかにさまざまな値になる。

*²) 2 ~ 24.7% の範囲の塩分をもつ淡水混入塩水域で生成する氷の構造について充分な量のデータが存在しないため、この塩分範囲については、できることなら、今後もっと正確に決めるべきであろう。

第4群——長時間存在して熱的および動力学的变化を受けた氷盤の変成論的変態の結果として形成される水。インデックスDで表示される。

上記の各グループの水はその生成条件と構造上の特性に応じて更に個々のタイプ(型)に区分される。それは補助インデックス(数字)を用いて表示される。例えば淡水性の氷のグループ(A)および海水のグループ(C)はそれぞれ9つのタイプに分けられ、各タイプの氷はそれぞれA1,A2,A3,…と表示される。第1～第3群の氷は一次氷層形成の初期段階から結晶集合体の配向が揃った成長(orientated growth)にいたるまで構造タイプが多種多様であるが、これは多くの点で凝結性の氷生成(congelational ice-forming)の条件によってもたらされたものである。表面に生成し、自由条件下で成長する一次結晶は骨格状結晶(skeleton crystal)かまたは密着結晶(consolidated crystal)になる。骨格状結晶の成長のためには結晶化の熱を急速に奪い去る必要があるためにこの型の結晶は表面冷却された氷層でのみ発達する。

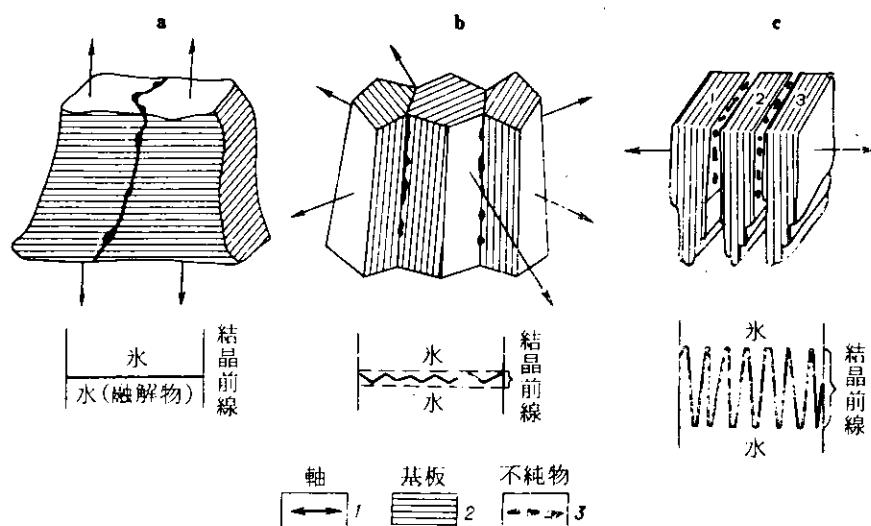
一次氷層の結晶の主な役割は氷盤中におけるその後の成長に対し配向付けの影響(orientating influence)を与える点にある。

静的な氷生成条件のもとでは各種のタイプの氷の形成を律する基本的な要因は接氷氷層の熱的状態であることで確認されている⁴⁾。その場合、さまざまな配向をもった結晶の集合体が一緒に成長するときの幾何的増殖の過程が一次氷層の結晶構造に与える大きな影響は無くならない。

水(氷の融解物と看做した)と氷を分離している表面における温度勾配の大きさとその方向に応じて、結晶成長の基本的タイプを3つに分けることができる。即ち、大きな温度勾配の場合、小さな温度勾配の場合、および氷と水との間に温度差がない場合である。(第1表、第1図)

第1表 氷の結晶成長の基本的諸タイプの特性

結晶成長のタイプ	温度勾配	結晶の成長速度	結晶前線	氷-水界面
第1タイプ	大	小	平坦	滑らか
第2タイプ	小	中	狭い範囲	ざらざら
第3タイプ	無しまたは負	大	広い範囲	格子状の層



第1図 氷の結晶成長の3つのタイプ

第1型（第1図a）。温度勾配が大きい（ $1 \sim 4 \text{ grad} \cdot \text{m}^{-1}$ ）。結晶前線（crystallization front）は水の凍結温度に対応する等長面（isometric surface）となる。このような条件においては結晶の配向とは無関係に平坦で滑らかな水-氷境界面が形成される。その場合、結晶が圧迫し合って成長し、またその成長に際して幾何学的増殖があるためにC軸の方向を探る結晶が圧倒的に発達する。氷盤の成長に際し一次氷層の結晶の混沌とした配向状態の再構築は僅かな領域で起きる。

例えば一次氷層の結晶の平均直径が $2 \sim 3 \text{ mm}$ で温度勾配が $1.5^\circ/\text{m}$ のとき全面的な再配向は $10 \sim 15 \text{ mm}$ の水平面で起きる。接氷層内の温度勾配が $0.4^\circ/\text{m}$ のとき無秩序な結晶配向から秩序立った配向への結晶構造の再構築は $25 \sim 40 \text{ mm}$ の水平面で終了している。

第2型（第1図b）。温度差が数十分の何度、数百分の何度かであるような僅かな温度勾配のもとでは、尖鋭な配向性のある諸結晶の成長速度に差があるとき結晶前線は狭細な結晶領域を形成させる。この場合、氷の下側の表面にはさまざまな配向の結晶の成長速度が不均等であるために形成された僅かなテラスによって独特な粗らさが現われる。更にその後の結晶成長、形状および配向は一方では温度勾配の大きさによって、他方では一次氷層の結晶の配向賦与影響（orientating influence）によって決められる。これらの要因は個々の結晶の成長の選択性にさまざまな程度に影響し、極性配向（polar orientation）または帯状配向（belt orientation）をもつ結晶の優先的な発達を決める。通常このような条件のもとでは結晶は先端のとがったピラミッド、プリズム、ポール、針などの形で形成される。

結晶のC軸の配向は圧倒的に無秩序であり、水平軸に対し斜めまたは接近している。一次氷層内に粒径 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ の大きさの配向が混沌とした結晶が存在し、また接氷層の温度勾配が一定（ $0.01^\circ/\text{m}$ ）のとき、水平面 20 mm においては70%以上の結晶が帯状のC軸配向を採り、また水平面 50 mm では全ての結晶が水平配向となる。

第3型（第1図C）。この場合

接氷層には温造勾配が無いか、
または水が若干過冷却されている。
そのため結晶化の熱を奪い去る
速度が最も大きくなり、そのこと
によって基板の方向での骨格状結
晶の成長が刺激される。このよう
な結晶が融解側^{*}へ成長すること
に対する障害は無い。これらの結
晶は比較的大きい接氷層内で成
長し、氷の下側の表面に広い結晶
化領域を形成する（第2図）。接
氷層内にこのような条件が作り
出されるのは垂直方向の混合が充
分に発達している海水域のみにお
いてであり、この混合によって凍

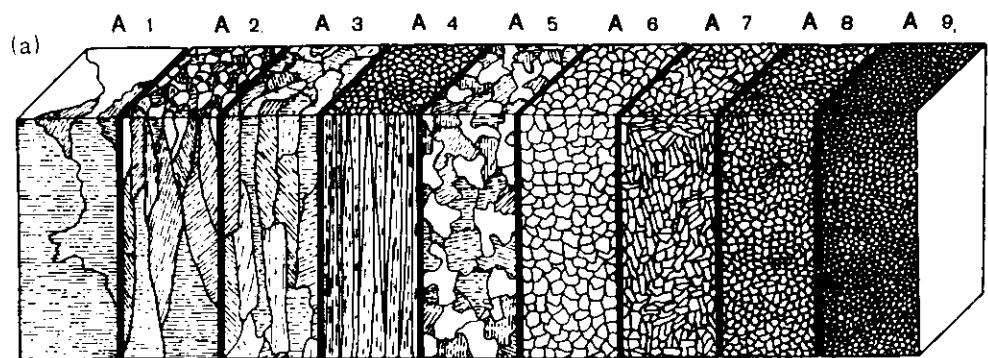
結温度に近い温度をもつ接氷層の安定した均質状態が確保されるからである。海水では下側の表面における格子状の層の存在が結晶化領域の大きさを裏付けている。

以上で述べた氷の結晶成長の3つのタイプは水中氷、スponジ氷、また雪の粒子の形で結晶核（crystallization centre）を氷の下に運び込むことに関連する動的諸現象によっては配向の明瞭な結晶の成長が崩されないという安定した

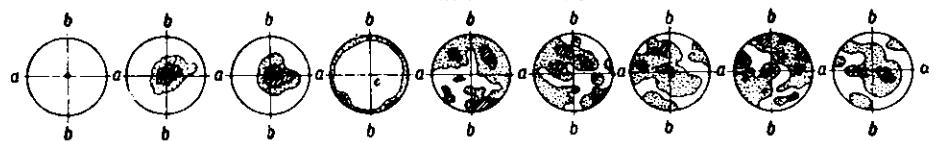


第2図 氷の下側表面における結晶の骨格状成長

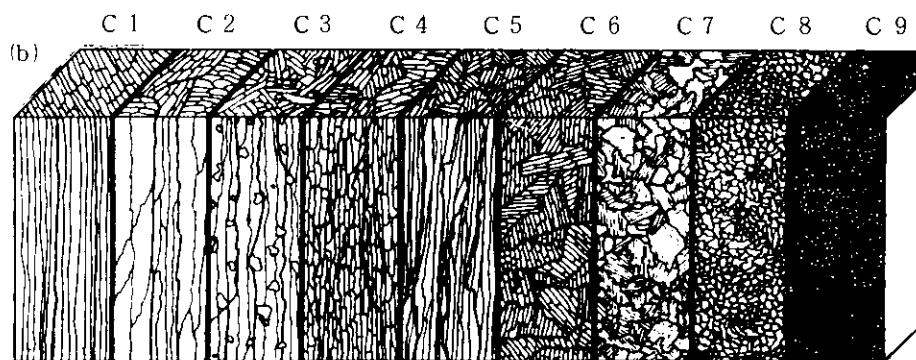
*¹ 水側の意味と思われる（訳注）。



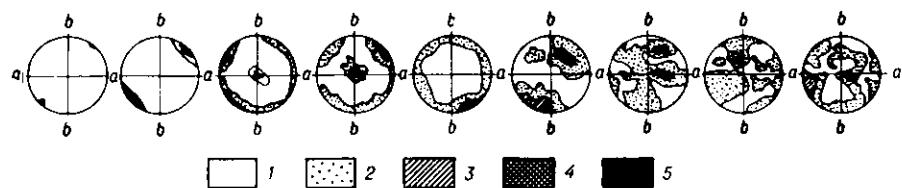
結晶の配向



氷のタイプ



結晶の配向



□ 1 ■ 2 ▨ 3 ▨ 4 ■ 5

結晶の光軸の出口密度：1 - 0.0~2.0 % ; 2 - 2.0~5.0 % ;

3 - 5.0~20.0 %; 4 - 20.0~50.0 %; 5 - 50%以上

第3図 (a) 淡水氷および (b) 海水の主要なタイプ

結晶化条件のみにとって特徴的なタイプである。

各種のタイプの氷の形成に及ぼす動的原因の影響は極めて複雑であり、多種多様である。それは下記の点に現われている。

- 1) 接氷水層の安定した温度成層の崩壊。
- 2) 配向性のある結晶成長を崩す結晶核を氷盤の下へ運び込む。
- 3) 自由結晶の状態に対する力学的作用。
- 4) スポンジ氷および雪泥の形での懸濁相の氷の再分配と輸送。
- 5) 結晶の成長に大きな影響を及ぼす氷盤の応力状態。

天然水域ではこれら全ての要因の影響のもとに極めて多様なタイプの氷が形成されるが、その基本的な特質は面および稜の表面 (faces of facets and ribs) が複雑な形をしている等軸結晶の優先的な発達にある。このような条件のもとで形成された氷は、通常、極小粒子状または中粒子状の構造をもち、結晶の表面およびその光学的配向の無秩序性の点で他と異なっている。

天然水域の氷の分類に際しては大気中からの固体降下物の役割も考慮しなければならない。雪は降雪時に水面に直接落下するか、或いは氷盤の表面に相当な時間滞在した後に、さまざまな経路でさまざまなタイプの氷に変わる。これらの氷はその結晶構造も物理的特性も互に相違している。

天然水域の氷のタイプ分けに当り、主として下記のような氷の状態様株が基準とされた。

- 1) 安定した結晶成長条件のもとで形成される氷で、結晶が最大の大きさに達し、厳密に秩序立ったC軸配向を採る場合。このようなタイプの氷は最も小さい数字のインデックスで表示される。
 - 2) 水域の動的挙動 (dynamicity) の増大に伴ない、このような条件のもとで形成される氷の結晶成長の安定性が部分的に崩される。このようなタイプの氷は1)よりも大きい数字のインデックスで表わされる。
 - 3) 厚い水層内に水中氷の結晶の多量発生を伴なう動的な氷生成条件のもとでは小粒子構造および配向消失構造 (disorientated structure) の氷が形成される。このようなタイプの氷は最も大きい数字のインデックスで表示される。
- 以上のように、筆者等の分類構成の特徴は各グループ内の氷のタイプを数字インデックスに依り位置付ける点にあり、この数字が大きくなることは水域の動的挙動の増大、水域の熱的状態の乱れ、水中氷の役割の増大と対応している。

第3図(a), (b)に淡水氷および海

第2表 氷中の不純物の量の透視評価に用いた基準

氷の一般的な分類様式、水平断面および垂直断面における各タイプの氷の構造様式、各タイプによる光学的配向の立体図、また単結晶の表面積(P)の計算および単位体積内の結晶群の総表面積 (ΣP) の計算に際し結晶の表面の弯曲係数を求めるために使われた幾何学的結晶模型を示す。また付録1に各種タイプの氷の主な物理的特性と簡単な記述を示した。

各タイプの氷の記述に当ってはその組織—氷中の不純物の存在

No	不純物の一般的特徴	判定階級
1	不純物が存在しないか、または $d > 1 \text{ mm}^*$ の不純物を含む。単独の不純物。含有数は $d \text{ mm}$ 当り 1 ~ 10ヶ以下	0
2	稀れに $d \text{ mm}$ 当り 10ヶ以上の不純物を含む。氷の全体的な透明度に変化をもたらさない。氷板を通して小さい活字を自由に読み取れる。	1
3	僅かな量の不純物を含む。大形の大文字のみを自由に識別できる。	2
4	中程度の量の不純物を含む。1 cmまでの大文字のシルエットを透視できる。	3
5	多量の不純物を含む。大文字のシルエットを透視できず、大形物体の輪郭のみを識別できる。	4
6	非常に多量の不純物を含む。氷は全く不透明。	5

* $d < 1 \text{ mm}$ の誤りかとも思われる（訳注）。

とその分布一に大いに注目した。この目的に対し第2表に挙げるスケール（判定基準）を用いた。氷の透明度の判定は厚さ10cmの水板に60Wの電球を用いて対向一側面照明する方法で行なった。

＜淡水域の氷＞

淡水氷の様相図は第3図（a）に示した通りである。

A 1型の氷 この型の氷の形成条件は、主として、氷生成期に接氷水層の温度成層が安定して保持され、温度勾配の方向が結晶前線から水層深部に向かっている場合である。

このような氷の形成は相当大きい水層が僅かに過冷却される場合にも可能であり、これにより大形の骨格状結晶の盛んな成長が刺激され、その後これらの結晶が積極的な配向賦与基質（orientating basis）として登場する。

この種が氷が広く一般に見られる場所はあまり大きくない湖、潟、あまり大きくない非調整用貯水池であり、そこでは氷生成開始時までに下側のより稠密な水層に充分に大量の熱が蓄えられている。

この氷の組織はモノリス組織（monolithic structure）である。氷は透明で、氷塊としては暗い色を呈する。空気の混入は無いか、または極く少量（0～1級）である。不純物の形は円筒状であり、その直径は0.5～1mmから5～10mmまでである。結晶は複雑な湾曲状表面をもつ大形ブロックの形をしている。温度勾配が増大するにつれて結晶の表面の形状は著しく複雑化し、結晶の大きさは表面での数cmから深部における1mまたそれ以上に至るまで変化する。

結晶の主軸（C軸）は常に垂直方向を採っている。この氷の物理的特性としては異方性が激しく現われている。

A 2型の氷 この型の氷は淡水域または強度の淡水混入水域において、氷生成期に接氷水層中に僅かな温度勾配（0.2～0.5°/m）が保たれ、一次水層が配向性の無い小粒子状構造をもっているときに形成される。

この型の構造の発達においては結晶成長時の幾何的増殖法則の影響が最も明瞭に現われる。不都合な配向をした結晶の最も効果的な“楔抜き”（wedging-out）帯が良く表わされている。このような氷は最も広く一般に見かけるもので、通常、あまり大きくないオープンな湖、貯水池、大河川などで一般に著しい保有熱の喪失を伴なう長時間に亘る風による氷の混合が氷生成に先行して起きる場合に生成している。

この氷は組織面では透明であり、配向性を有する成長をする混入物（0～1級）は円筒状の空隙であり、直径1～10mmの球状気泡が含まれる。空隙の長さは10～20cmに達する。結晶は尖鋭なピラミッド状の形をし、個々の結晶の個別的な“楔抜き”が特徴的である。結晶の伸び率は5～10までの範囲にある。結晶の表面の形状はA 1型氷の結晶と較べてあまり複雑でない。配向は圧倒的に垂直配向であるかもしくはそれに非常に近い。物理的特性面ではこの型の氷は異方性を呈する。

A 3型の氷 この型の氷は接氷水層の温度条件が律動的に崩れるときに生成する。結晶成長の性質は接氷水層が凍結温度まで冷却されている場合に交互に大きくなったり小さくなったりする温度勾配によって決まる。このような条件のもとでは新しい結晶の発達を刺激する結晶核が氷盤の下にエピソード的に拡がることが起り得る。

結晶の発達に特徴的なことはその個別的な萌芽と“楔抜き”である。この型の氷は調整された河川、貯水池、大きい湖で不凍水面区域が長時間保持されている場合に形成される。

氷は透明である。不純物は1～2級の量であり、断面1～2mmの小円筒形状と1～5mmの球面形状の混合形である。不純物の配置にはしばしば成層性がみられる。

結晶は垂直方向に発達し、その形状は大部分が柱状であり、時には等軸形に近いものがある。伸び率は1～5である。結晶の大きさは氷盤の上部の諸水平断面で1～3cm、下部の諸水平断面で5～10cmである。配向は無秩序であり、時には部分的に秩序立った配向も見られる。

A 4型の氷 この型の氷は接氷水層が一様な温度状態にあり且つその水面に多量の結晶核（水中氷の要素、雪質粒子（snowy grain）、氷霧の水晶など）が存在するときに生成する。このタイプの氷は氷生成時点までに全保有熱量を失なっている全ての淡水域において形成される。特に沢山見られる場所は北極海域に流れ込む河川の河口地域であり、そこでは冷えた海表面を拡散して急速に凍結温度まで冷却される。この型の氷は夏期の海水融解の後に多量の融解水が蓄積

されている場合に表面の淡水混入海水層が凍結するときに形成される。

この型の氷の組織は纖維状 (fibrous structure) であり、混入物は大部分が直径 0.2 ~ 2 mm の小さな管状空隙の形を有する。また規則的な橢円状の形をした微細な球面状の混入物も分布しており、これらは結晶間の境界に沿って垂直連鎖 (vertical chains) の形で配置されているものが圧倒的に多い。

結晶の形は先端の尖った針形、樹葉形、錐形、纖維状などである。結晶の伸び率は 10 ~ 15 から 30 以上までである。結晶の表面の形状は一様でなく、通常、上部の諸水平断面では半自形に近く、下方に向って次第に多形性が発達して行く。結晶の横断面の法則的なまた充分に一定な増大が良く現われている点が特徴的である。このタイプの氷は一般にモデル氷 (modelled ice) と呼ばれる³。カナダの研究陣による分類⁵に従えばインデックス [2 ~ 5] で表示される。

A 5 型の氷 この型の氷の形成は接水水層の温度成層が断えず崩れる条件のもとで、且つ結晶核となる水中氷要素が結晶前線に規則的には運び込まれないときに起きる。この結晶化中心の量は配向性の (プリズム状または柱状の) 結晶成長の部分的崩壊のみにとって充分な量である。結晶の発達では等軸性が特徴的である。このような条件が作り出される場所は複雑な水文気象状態にある大きな湖、水量調整された河川、貯水池などである。

氷の組織は、一般に、成層性が明瞭に現われており、混入不純物は直径 1 ~ 5 mm の球状で、稀れに円筒形の不純物も見当る。その量は 2 ~ 3 級である。結晶構造は大形結晶の構造であり、結晶は等軸から或いは僅かに垂直方向に発達している。伸び率は 1.5 ~ 2.0 である。結晶の大きさは直径 20 ~ 40 mm である。物理的性質の面ではこの型の氷は等方性を呈する。

A 6 型の氷 この型の氷は水域で接水水層が凍結温度まで確実に冷却されて行くとき、または配向性の有る結晶成長を乱す二次的な顕微的微細結晶の (結晶前線での) 発生プロトクリスタリゼーション (protocrystallization) 一を促ながす著しい過冷却があるときに生成する。このような氷生成が最も頻繁に起きる場所は流れの急な河川において長時間に亘って氷結しない区域が保存されている場所である。

通常、この型の氷は淡いミルク色を呈する。混入物 (3 ~ 4 級) は 1 ~ 6 mm の大きさの球形状の気泡の形をしたもののが圧倒的に多く、それらの分布は不均等であり、しばしば成層性が認められる。配向は無秩序の場合が最も頻繁に見られる。結晶は橢円状の等軸形で、その大きさは 5 ~ 15 mm である。氷の物理的性質の面では等方性を示している。

A 7 型の氷 この型の氷は水の深い河川区域において深層水中で発達する水中氷の結晶から形成される。

この型の氷が生成するための必要条件はオープンな水域 (解水面) の存在である。結晶形は複雑で、しばしばプレート状の形をとり、基板における発達が特徴的である。この基板における結晶の伸び率は 3 ~ 5 までである。氷の内部に含まれた混入空気の分布は一様でない。これらが “巣” の形をして集中している点が特徴的である。気泡の形状は圧倒的に球状および複雑な樹枝状形であり、その大きさは 0.5 ~ 5.0 mm、量は 2 ~ 3 級である。この型の氷は物理的性質については等方性を示す。

A 8 型の氷 この型の氷は秋の氷結期に表層水が風によって盛んに混合する場合にスponジ氷と雪泥の稠密な堆積物の凍着によって形成される。冬期にこの型の氷は急流河川においてオープンな水面 (解水面) が長時間残留している場所に形成される。この場所には多量の雪が運び込まれる。解水面の下側には多量の雪泥が堆積し、時として河川の流れを全面的に止める。

氷の組織は小泡状組織であり、多量の混入物が存在するために氷の色はミルク色または淡いミルク色である。混入物の形状は大部分が球状であり、その大きさは 0.5 ~ 3 mm である。これらは主として結晶間の境界面に分布している。

構造は微細結晶構造であり、結晶の大きさは 3 ~ 7 mm である。形状は圧倒的に等軸形であり、結晶板も見当る。結晶の面と稜の表面の形状は多種多様であり、複雑な形 (多形) から比較的規則立った形 (半自形) までさまざまである。この型の氷は物理的性質については等方である。

A 9 型の氷 この型の氷は水に浸漬された雪の凍結に際し、また強度に冷却された雪の表面に流れ出た淡水の激しい凍結に際して生成し、池氷やさまざまな種類の浸水氷の生成時に出現する。多量の混合物が存在するためこの型の氷は

淡いミルク色を呈す。

組織は気泡状組織（bubbly structure）であり、1～2mmから10～15mmまたそれ以上の大きさまでのさまざまな寸法と形状の混入物が多量に（4～5級）存在する。

構造は微細結晶構造であり、大きさ1～3mmの等軸結晶である。この型の氷の構造は汲水量が不足しているときにアグロメレーション構造（これは結晶の非稠密セメントーションを特徴付ける）に近い。この型の氷は物理的性質の面では等方性を呈する。

塩分2～24.7%の水域では、そこに生成する氷盤の結晶構造は淡水氷のそれとも、また海水のそれとも異なる。このような水域で生成する氷の結晶構造の基本的な特徴は結晶の形が極めて多種多様であることにみられる。この型の氷に特徴的なことは等軸形並びに配向がはっきりとした形をもつ比較的大きくない結晶が発達することであり、後者の結晶形に特徴的なことは結晶が主軸の方向にばかりでなく基板においても発達することである。このことによってプリズム状構造および纖維状構造をもった氷の形成がもたらされる。

淡水混入水域で生成する氷の結晶構造については極く僅かしか研究が進んでいないため、ここでこれらについて一般的な典型化を下すことはまだできない。

淡水域におけると同様に、水の温度成層が保持されている安定した結晶成長条件のもとでは接氷水層内にプリズム状（柱状）の結晶が発達する。このような構造のタイプは淡水域の凍結の安定度に相応してそれぞれインデックスB1, B2, B3によって表示される。水域の動的挙動の増大に伴ない、また溶解された塩類の水中濃度が増大するとき（この場合、配向のはっきりした結晶成長が新しい結晶の発生ープロトクリスタリゼーションによって崩される），B5型，B6型，B7型の氷が形成される。更に、浸造氷生成条件のもとで、その飽和段階がさまざまとき、また水域の表面に落下した雪が凍結するとき、B8型，B9型の氷が形成される。

＜海水域の氷＞

海水域の氷をその生成条件、結晶の形態論的特性および物理的性質に応じて筆者等は下記の9つの基本タイプに分類している。（第4図参照）。

C1型の氷 この型の氷の生成条件は配向性の安定した結晶成長、接氷水層の安定した一様の熱的状態および充分に発達した垂直方向の対流の存在である。この種の氷は主として定着氷で、流入河川水の拡散領域の外において見かける。

この型の氷は纖維状組織を有し、規則的な垂直連鎖状に位置を占める微細な（0.1～0.5mm）混入塩類および空気が多量に（3～5級）存在するため不透明な淡灰色を呈している。氷中にブラインが移動したとき二次混入物が稠密な網目状に発達する。これらの混入物は河床状、狭細溝状、また毛細空隙状の形をしている。二次混入物の直径は1～10mmまたそれ以上である。

結晶は纖維状の形をしている。その大きさは纖維の扁平方向で0.7～2.1mm、幅方向で2～15mm、垂直方向で数メートルである。非常に接近した配向（消光角1～3°）をもった数十または数百に及ぶ結晶（纖維）が獨得な集積体、即ち直径20～50mmまたそれ以上の大きさの結晶集合体を形成している。顕微試片において均質な干渉色によってその輪郭が求められるこのような結晶集合体が一般に海水の大きさと考えられている。結晶＜纖維＞群の配向は水平であり、光軸（C軸）は常に水平に位置しているが、単体の結晶では纖維の扁平方向と一致している。

この型の氷はC軸の方位配置（azimuthal position）において明瞭な空間秩序が表わされている。このような秩序の発生原因については文献(3)で検討されている。

C2型の氷 この型の氷は一様な熱的状態におかれた接氷水層において配向性の結晶成長の安定性が若干崩されるときに形成される。この崩壊は主として接氷水層内の運動および若干の超方位性変位（transazimuthal displacement）（氷盤の回転）、また接氷水層の温度および塩分の急激な変化によってもたらされる。この型の氷は最も広く一般に見かけるもので、主として北極の流水のうちの巨大氷盤また南極の定着氷の一部がその代表的なものである。

この型の氷はC1型氷と同様に纖維状組織をもつが、B1型氷との相違点は一次の塩類および空気混入物の配置系が

更に若干複雑な多枝状になっていること、また二次混入物の網目も多枝状に入りこんでいることがある。これらの混入物の大きさは1~15mmで、その量は3~4級である。

この型の氷もB1型氷と同様に纖維状構造をもっているが、その纖維の結晶の大きさはB1型よりも若干大きい（纖維の扁平方向で0.5~25mm、幅方向ではやや小さく7~12mm）。また結晶集合体の寸法はB1型よりも著しく小さい。纖維の発達における特徴は個別的な“楔抜き”であり、時には前線の“楔抜き”もみられる。この纖維の垂直方向の長さは一般に200~300mmである。C軸の配向は帯状配向であり、空間秩序性はあまり明瞭に表わされていないか或いは全く存在しない。

C3型の氷 この型の氷は安定した結晶成長が崩され、結晶前線に水中氷の要素が盛んに運び込まれる条件のもとで形成される。その構造は北極の流水（活発に移動する領域に存在する）および定着氷（動きの無い氷湖の領域）に特徴的である。この型の氷は南極で広く一般に見かけられる。

氷の組織は纖維状組織であり、淡い灰色を呈している。C1型氷との主な相違点は0.2~0.4mmの大きさの微細な球形状の気泡が含まれ、それが直径3~8mmにも達する獨得な巣の形をなして集積（3~4級）していることがある。二次混入物はC2型氷と同様に複雑な多枝状の形をしている。

この型の氷には2種類の結晶が特徴的であり、その1つはC2型氷におけると同様に纖維状結晶であり、他の1つは3~10mmの大きさの断面をもつ等軸結晶（斑晶）である。後者は無秩序に配列されているかまたは個々の水平断面において集積体を形成している。

結晶（纖維）間に配置されている結晶（斑晶）は氷の断面積の10~25%を占めている。纖維状結晶におけるC軸の配向は帯状配向であり、“斑晶”においては垂直またはそれに近い。物性に関してこの型の氷は異方性を示す。

C4型の氷 この型の氷の生成条件は氷が成長する場合及び25%以上の量を占める水中氷要素によって配向性をもつ結晶成長が崩される場合である。この型の氷は流水および定着氷における定置状況域に特徴的である。

この型の氷は多量の塩類および空気を混入している（3~4級）。これらの混入物は球形をしており、氷の全厚さ方向に均等に分布している。混入物の大きさは2.0~3.0mmである。二次混入物は直径5~10mmの河床の形をした非常に複雑な多枝状の形を有する。

C3型氷の場合と同様に、2種類の型の結晶が発達しており、その1つの等軸結晶は氷の断面積の50%以上を占め、他の1つの纖維状結晶は獨得な結晶骨格を形成し、特徴的な配向をもっている。等軸結晶の配向は無秩序配向（chaotic orientation）から秩序立った垂直配向まで存在し、纖維状結晶の配向は水平配向である。物性面ではこの型の氷は等方性を示す。

C5型の氷 この型の氷は冬期において水域（オープンな氷池、氷湖）の表面に多量の結晶核が存在するもとで海水が急激に凍結するときに生成する。

氷の色は暗い灰色で、くすんだ色調をもっている。組織は纖維状組織である。混入されている塩類および空気は圧倒的に微細な球状泡（直径0.2~0.5mm）および狭細な毛細空隙の形をしている。

この型の氷の塩分は高いが、ブラインが流出したとき白っぽくなる。この氷の構造は細い纖維状の構造であり、その結晶（纖維）はC1型氷およびC2型氷よりも著しく小さい。断面の大きさは扁平方向で0.2~0.8mm、基板方向で2~5mmであり、纖維の長さは100~120mmまたそれ以上に達する。この型の氷にも結晶集合構造が特徴的である。この集合体の大きさは5~10mmで、稀れにはもっと大きいものみられる。結晶（纖維）の配向は水平配向であり、空間秩序性への傾向を有する。

C6型の氷 この型の氷は水文気象状態が激しく変わる、即ち潮流の速度と方向に大幅な変化があり、水温、塩分が激しく変動する海水域が凍結するときに出現する。この型の氷が生成する場所は辺境海域、海峡および河口付近の海域である。

この型の氷の主な特徴は組織と結晶構造が共に層状構成になっている点にある。形と大きさがそれぞれさまざまな空

氷および塩類を多量に含んでいる。球状混入物の大きさは0.1～3.0mmで、樹枝状および円筒状混入物の大きさは0.3～0.5mmである。氷の構造は一般に粒径のさまざまな粒子状構造であり、結晶の形は極めて多様であり、また等軸結晶(3～6mm)と柱状結晶(長さ40～50mmに達する)の交代が特徴的である。物性についてはこの型の氷は等方性を示す。

C 7型の氷 通常、この型の氷は浅い海水域で風による激しい混合が起き、それに伴ない水中氷および底氷(botttom ice)が盛んに生成し、これが氷盤の下に拡がり、巨大なスポンジ氷の堆積を形成するときに形成される。このスポンジ氷が凍結してこの型の氷となる。この氷は明るいミルク色または明るい黄色を呈している。それは球形状(0.2～0.5mm)および樹枝状(10～15mm)の空気および塩類を多量に(4～5級)含んでいるためである。これらの混入物の分布は不均等分布であり、しばしば明瞭に成層性が現われている。構造は小粒子状および中粒子状の不均等粒子構造であり、結晶の形は大部分が不規則形で、湾曲率が大きい。配向は無秩序配向である。結晶の大きさは3～10mmである。この型の氷は等方性を示す。

C 8型の氷 この型の氷は海水中で雪の粒子と水中氷の小粒子とが凍着するときに形成される(過飽和)。この型の氷は海水域のいたるところで見かけ、特に南極では広く一般に見られ、全海水量の30～40%に当る。

組織は小泡状組織である。微細な球状泡と塩類スリット(1～2mm)が圧倒的に発達し、またもっと小さい混入物(0.05～0.1mm)も多い。これらの混入物の量は5級に相当する。氷の色はくすんだ色調のミルク色がかった白色である。

構造は小粒子状構造で、結晶の大きさは1～4mmで形は等軸形で、しばしば半自形性が現われている。結晶の配向は無秩序配向である。物性に関してはこの型の氷は等方性を最も明瞭に示している。

C 9型の氷 この型の氷は雪の重力を受けて氷の表面に出現する海水が徐々に浸透する過程で生成する(不飽和)。この型の氷は南極の殆んど全ての場所で見かけられ、海水量の30%までを占める。北極でこの型の氷が生成するのは主として氷丘域において多量の積雪に伴ない一般に浸透性の氷生成が起きる場合である。

この型の氷は気泡状、またしばしば層状の組織を有する。混入物の大きさは小空腔(0.1～0.5mm)から大空腔(10～20mm)までである。形は複雑な樹枝状形である。混入物の量は5級に相当する。氷の色は白色である。結晶の配向は無秩序であり、物性に関しては等方性を示す。

<二次氷>

二次氷に相当する氷は長時間存在し、その間に熱的および動力学的変成過程によって変態された全ての氷である。この種の氷はその結晶構造および生成条件が最も複雑な氷である。この種の氷は、さしあたり、下記の4つの基本的なタイプに分けることができる。

D 1型の氷 この型の氷は長時間存在している氷盤において主として集合性結晶化(collecting crystallization)が起きるときに形成する。この結晶化は互に接する結晶間の境界の転位に現われる。このような変化の強さは接触面の曲率、相互の結晶配向また氷の温度によって決まる。このような構造は多年氷の深層内において活動水平平面の境界の下に発達する。この型の氷は纖維状構造が弱く現われており、ブラインが移動した結果形成された二次混入物が圧倒的に多い。これらの混入物の分布(2～3級相当)は不均等であり、成層分布があり得る。混入物の大きさは0.2～10mmまたそれ以上である。

結晶の形は複雑であり、残存構造(relict structure)を保持しつつ、等軸性を呈している。結晶の大きさは一様でなく、一次構造と密接に関係している。この一次構造の変態が等軸性をもたらすばかりでなく、結晶の寸法の増大また混入物の量の減少ももたらす。結晶の配向はさまざまである。その一次配向を保ちながら、一部の結晶は水平方向から偏る傾向を呈している。

この型の氷はその物性面では異方性を呈しているが、古い氷になるにつれて異方性が失なわれ等方性に近づく。

D 2型の氷 この型の氷はC 2型およびC 3型の纖維状構造の氷が変態した結果として出現するもので、その変態は結晶間中間層の選択性輻射融解と再凍結、その激しい淡水化と融水充満の過程で起きる。このような中間層は北極の2

年生の流水および南極の定着氷に専ら発達する。

この型の氷の組織は気泡状組織であり、色は明るい色もあれば暗い色もある。また、透明であり、混入物の量は1～2級に相当する。混入物はその生因からみて二次混入物であり、床および溝が空気によって置換されたときに生じる。結晶内部に微細な球状気泡と0.1～0.2mmの塩類含入スリットが含まれている。

氷の構造は繊維状構造であり、結晶（繊維）は更に複雑な湾曲した表面をもち、繊維が切断されているため、その垂直方向の長さが短くなっている。

結晶の配向は帯状配向であり、生成する結晶は斜方配向をもつ。このような氷の強度はあまり大きくない。物性に関してはこの氷は異方性を示す。

D 3型の氷 この型の氷は結晶間中間層の輻射融解と再凍結および凝結性再結晶化の作用を受けて粒子状構造の氷が変態した結果として形成される。

この型の氷は多年氷の上側の活動水平面で一般に見かけられ、時には厚さ80cmにも及ぶ層を形成している。もっぱら北極で見かけられる。

氷の組織は大気泡状組織であり、さまざまな大きさと形状の混入物を含む。複雑な多枝状気泡が支配的に多く、これらの多くは1～2mmの断面をもつ結晶の境界に沿って分布し、直径0.2～3.0mmの球状泡または主として層の下側境界に形成される20～30mmまたそれ以上に及ぶ大形空隙も多い。氷の構造は粒径がさまざまな粒子状構造であり、結晶は複雑な等軸形を呈し、表面の湾曲率が大きい。結晶の寸法は3～5mmから15～30mmまでである。この型の氷はその物性面について等方性を示す。

D 4型の氷 この種の氷は春～夏期に氷盤上の積雪が変成作用を受けるとき没造性氷生成と集合性復水性再結晶化 (collecting regelational recrystallization) が組み合ってたもとで形成される。このタイプの氷はもっぱら北極の多年氷に見かける。このような氷の層は一般に3～5cmの厚さであるが、多量の雪が堆積する氷丘水域では20～50cmに達する。

氷の組織は気泡状組織であり、直径1～5mmの球形状の混入物または断面0.5～0.1mmの複雑な多枝状形の混入物が支配的である。これらは結晶の界面に分布し、氷の粒子状構造を良く表わしている。混入物の量は2～4級に相当する。この型の氷は物性面で等方性を示す。

以上で述べてきた氷の分類は天然氷の極めて複雑な形成過程に関する現時点での知識水準をある程度反映したものにすぎない。従ってこれはこの種の試みの予備的なものと看做すのが妥当である。しかし、氷の構造、特に、淡水混入海水域で形成された氷、或いは長時間存在し複雑な変成作用による変態をとげた氷の構造に関する知見が今後蓄積されて行くにつれて、この分類が著しく充実したものになることは疑問の余地がない。

引用文 献

- 1) Buinitsky V. kh: 南極の海水の構造、基本的特性および強度。<ソ連南極探検隊情報ブレッティン> № 65, P. 90～104 (1967年)
- 2) Veinberg B. P.: 氷。524PP. Gostekhteoretizdat 出版。(1940年)
- 3) Lavrov V. V. : 氷の変形と強度。205PP. Gidrometeoizdat 出版。(1969年)
- 4) Cherepanov N. V.: 氷の結晶構造の形成に果す水域の熱的状態の役割。<北極と南極の諸問題> № 29, P. 55～63 (1968年)
- 5) Cherepanov N. V.: 北極の氷の結晶構造の体系把握。<北極と南極の諸問題> № 40. P 78 ～ 83 (1972年)
- 6) Michel B. & Ramsier R. O. : Classification of river and lake ice based on its genesis, structure and texture. Depart. de Ge'nie civil, Univ. Laval. Que'bec, Rept. 5～15, (1969年)

<付録1> 各種のタイプの氷の特性

氷の タイプ	塩 分 (%)	水中の不純 物の量 5段階評価 方 式	氷の密度 (g/cm³)	C軸の支配 的な配向	結晶の平均寸法 (mm)			結晶の 弯曲率 K
					a	b	c	
A1	—	0	0.915-0.917	垂直	250.0	250.0	500*	1.70
A2	—	1	0.910-0.917	混合	120.0	120.0	220.0	1.55
A3	—	2	0.900-0.915	無秩序	95.0	95.0	95.0	1.50
A4	—	2	0.905-0.917	水平	35.0	35.0	500.0	1.20
A5	—	3	0.880-0.900	無秩序	32.0	32.0	45.0	1.60
A6	—	4	0.830-0.900	“	8.0	8.0	8.0	1.45
A7	—	4	0.820-0.850	“	3.0	3.0	5.0	1.10
A8	—	5	0.810-0.850	“	2.5	2.5	2.5	1.15
A9			0.790-0.820	“	1.5	1.5	1.5	1.30
C1	1.5-4.0	3	0.910-0.930	水平	0.7	4.0	h(水)	1.10
C2	1.5-4.0	3	0.910-0.930	“	0.6	4.0	100.0	1.15
C3	1.6-3.5	3**	0.950-0.930	“	0.7	4.0	50.0	1.25
	1.6-3.5		0.950-0.930	垂直	5.0	5.0	5.0	1.10
C4	1.6-3.0	4	0.900-0.920	混合	0.6	3.0	20.0	1.12
			“	“	4.0	4.0	4.0	1.30
C5	4.0-15.0	3	0.900-0.935	帶状	0.4	3.0	20.0	1.10
C6	2.0-5.5	3	0.890-0.900	無秩序	10.0	10.0	15.0	1.40
C7	2.0-6.0	4	0.880-0.900	“	7.0	7.0	10.0	1.35
C8	2.0-7.0	5	0.850-0.900	“	3.0	3.0	4.0	1.25
C9	2.0-14.0	5	0.830-0.900	“	1.2	1.2	1.2	1.15
D1	1.4	3	0.910-0.915	残存	10.0	10.0	14.0	1.80
D2	0.5	2	0.890-0.905	残存(帶状)	1.5	10.0	200.0	1.30
D3	0.1	2	0.870-0.900	無秩序	12.0	12.0	12.0	1.90
D4	0.0	3	0.760-0.820	“	3.0	3.0	3.0	1.25

* 水厚50cmの場合, ** 2つのタイプの結晶 (I - 繊維状構造, II - 等軸結晶)

1個の結晶 の体積 V (mm³)	1dm³の氷 中の結晶の 表面積 Σ (cm²)	1dm³の氷 中の結晶間 の接触面積 (cm²)	物理的特性の均質性	$\sigma_{\text{bend, av.}}$ (ディスク板) (kg/cm²)		$\sigma_{\text{bend, max}}$ (kg/cm²)	$\sigma_{\text{bend, min}}$ (kg/cm²)
				0°C	-5°C		
$31.2 \cdot 10^5$	—	—	異方	29.0	35.0	42.0	65.0
$15.5 \cdot 10^4$	—	—	“	15.0	23.0	31.0	60.0
$2 \cdot 10^4$	—	—	等方	7.0	15.0	22.0	45.0
$3.6 \cdot 10^3$	—	—	異方	2.0	13.0	22.0	33.0
$6.3 \cdot 10^2$	—	—	等方	10.0	14.0	20.0	29.0
500	$0.5 \cdot 10^3$	$0.3 \cdot 10^3$	“	6.0	8.0	12.0	22.0
49	$2.0 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^4$	“	1.7	9.0	10.0	17.0
15	$3.0 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^4$	“	2.0	7.0	12.0	19.0
3	$3.5 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^4$	厚さと面について異方	2.3	9.5	14.7	16.0
2800	$3.7 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^4$	厚さについて異方	1.5	8.5	14.0	16.3
250	$3.9 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^4$	“	2.0	8.0	13.2	14.0
140							11.0

1 個の結晶 の 体 積 V (mm ³)	1 dm ³ の水 中の結晶の 表 面 積 Σ (cm ²)	1 dm ³ の水 中の結晶間 の接触面積 (cm ²)	物理的特性の均質性	$\sigma_{\text{bend, av.}}$ (ディスク板) (kg/cm ²)		$\sigma_{\text{bend, max}}$ (kg/cm ²)	$\sigma_{\text{bend, min}}$ (kg/cm ²)
				0 °C	- 5 °C	-10°C	-10°C
120	$2.5 \cdot 10^4$						
40		$1.4 \cdot 10^4$	厚さについて異方	1.7	6.1	10.5	12.1
60	$2.9 \cdot 10^4$		異方	0.3	6.5	11.0	14.5
10	$6.3 \cdot 10^4$	$3.2 \cdot 10^4$	等方	1.0	4.5	9.0	15.4
1500	$0.5 \cdot 10^3$	$0.3 \cdot 10^4$	"	0.5	4.2	8.3	9.8
500	$0.8 \cdot 10^3$	$0.4 \cdot 10^4$	"	0.1	2.0	6.0	10.0
35	$1.7 \cdot 10^4$	$0.8 \cdot 10^4$	"	0.1	1.8	5.9	7.1
1	$4.9 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^4$	"	—	15.5	—	6.0
1400	0.54	$0.27 \cdot 10^3$	異方性が弱く現われている	—	22	30	35.0
3000	$2.0 \cdot 10^4$	$0.96 \cdot 10^4$	異方	—	—	—	20.0
1500	$0.4 \cdot 10^3$	$0.25 \cdot 10^3$	等方	—	16	—	—
10	$2.2 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^4$	"	—	9.5	—	24.0
							2.0

§ 7 海水の強度別分類

V. V. Lavrov

周知のように、海水の強度には極めて広い変化範囲がみられ、結氷開始時における小数点以下の kg/cm^2 値から多冬水での $20 \text{ kg}/\text{cm}^2$ またそれ以上の値にまで及んでいる。また海水が生成する空間も広大であり、そこには互に物理的・地理的特性の異なるさまざまな海域が含まれる。

以上のことに関連して北極海域の氷の空間的並びに時間的にみた変化の程度に関する問題が提起されている。現在、海水の強度に関する知見を総括し、この極めて重要な特性の分類の根底に客観的原則を与える必要がある。

氷の特性は、機械的特性も含めて、それが生成及び成長する際の水文気象条件に左右される。この条件のうちで最も重要な要因は水中の塩分、水温、気温および氷上の積雪の厚さである。

以下では氷の強度に及ぼすこれら諸要因の影響について簡単に検討してみる。

水中の塩分 海水から生成した氷の塩分は他の諸条件が等しいとき若干の長さの時間に亘り氷の塩分に比例している。ブラインを含む塩核 (salty cell) が氷体の内部に形成されるため、氷の機械的強度が低下するが、これはもっと複雑な法則に従う変化である（第1図）。第1図に示した曲線が依拠するデータは実験室の条件下においてモデル氷を用いて得られたものである。^{*} この状況、また結氷開始時（この場合の塩分は大きい）における海水の強度の観測から上記の法則性を天然の北極氷にも適合させることが許される。

ここで指摘された法則性の基本的特徴は、第1図から明らかのように水中の塩分 $100/00$ まではほぼ対応する初めの曲線区域においては氷の強度は急激に低下するが、それ以降の低下は僅かになることにみられる。水中の塩分が $20 \sim 30/00$ の場合には強度低下は実質上認められない。このような重要な事情があるために、海域によって水中の塩分に著しい差があるにせよ、生成した板状軟氷はいずれの海域のものでもその機械的特性がほとんど同じである。さまざまな海域における結氷時の海水の表面層中の塩分の実際の分布はラプチエフ海東部および東シベリヤ海西部における $26/00$ からベーリング海西部における $34/00$ にいたるまでの変化幅を示している。北極海域、即ち北緯 75° 以北の海域では海水中の塩分の変化は冬期には少なくて、 $30.5 \sim 33.5/00$ の範囲にある。

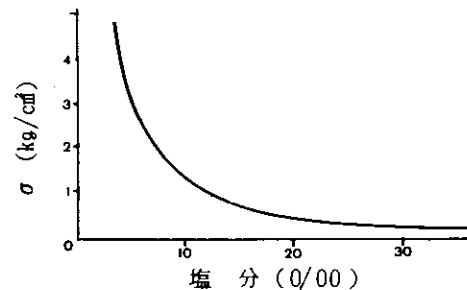
以上のように、冬期の北極海域における海水の塩分の変化は板状軟氷の強度に顕著な差異をもたらすほどには大きくない。

水の温度 全ての極地海域において結氷開始時の氷の下の水温は $-1.5 \sim -1.9^\circ\text{C}$ の範囲にあり、ただ河口においてのみ -0.5°C まで上昇している。水温の 0.5°C 低下は、筆者等の実験データに依ると、氷の曲げ強度の約 $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 低下（成長速度の増大により）をもたらす。

以上のように、河口の場合を除いて、海水温度の相違によってもたらされる北極海域の氷の強度の差異はあまり大きくなく、板状軟氷の場合、平均強度のはば 15% に当る。一冬氷よりも古い氷の場合には水温の相違は实际上意味をもたない。

更に、野外条件下における氷の機械的特性の測定精度は一般に 10% を超えず、得られる個々の値のはらつきははるかに大きいことを指摘しておく。

空気の温度 気温は成長する氷の厚さを律する重要な特性である。北極の大部分の地点において冬期（10月から翌年



第1図 氷の曲げ強度と水中の塩分との関係

(V. I. Kashtelyan, I. I. Poznyak, A. Ya. Rivrinによる)

*—これと同様な曲線（ただし、水中の塩分 $0 \sim 5/00$ の場合のみ）を筆者等も以前に実験室条件のもとで得ている。

4月にかけての)の月平均の気温は -20° , -24° である。ただし、西部(希望岬、チハイ入江)では -16° , -17° まで高くなり、また高緯度海域では -26°C にまで低くなっている。

一般には、西部海域を除いて、気温の地域差は成長する氷の厚さに著しい差異をもたらすほどには大きくない。一方西部海地では海水中の塩分が他の北極海域に較べて若干高くなっている。そのため、成長速度のちがいによってもたらされる氷の強度の差異は若干狭められる。成長時の気温の相違による氷の強度の差異が特に顕著に現われるのは氷が生成する初期段階、即ち氷がまだ薄い状態の場合においてである。氷が厚さを増し、ブラインが移動するにつれて強度の差異は少なくなる。結氷過程の終りには新しい(一年性の)氷の強度は氷中の全体的な塩分によって決められる。この塩分の海域による相違はあまり大きくない。

積雪の厚さ 氷上の積雪は熱の流れを緩慢化し、氷の成長速度を低下させる。

北極の大部分の海域について積雪層の分布は一様でない。カラ海の北部海域では冬期の積雪層の厚さが30cmを超えないが、オビ湾の南部またはエニセイ湾では60cmにも達する。

北極の中央部分、ラプチエフ海、東シベリヤ海の西部における積雪の厚さはハタンガ湾北部での20~25cmからその他の沿岸海域での30~35cmまでの間にばらついている。これらの海域の北部では積雪層の厚さは20~30cmである。

ソ連北極圏の東部では積雪の厚さは大きく、東シベリヤ海東部およびチュコート海北部において平均35~40cm、チュコート海沿岸およびペーリング海峡沿岸において約50cmとなっている。

北極圏内の氷上の積雪は西部で46cm、東部で39cmにそれぞれ達している。以上で挙げた諸データから、北極における氷上冠雪層の厚さは最も変わり易い気候特性であることが判かる。しかし、この状況も、前述の諸特性と同様に、そこに形成された氷盤に必ずしも非常に強い影響を及ぼすものではない。

筆者等のデータに依れば、7月前半におけるエニセイ湾の氷の曲げ強度は 8 kg/cm^2 のオーダーにあり($4 \times 4 \times 36\text{ cm}$ のビームによる曲げ破壊で)、またラプチエフ海のハリトン海岸の氷の曲げ強度は 54 kg/cm^2 である。この場合、氷の強度値にみられる基本的差異はこれら海域の海水の塩分のちがいによってもたらされたものである。

以上のように、北極における氷の生成および成長に関与する人文気象条件のちがいは、河口域を除き、さまざまな海域の氷の強度値に対し重大な影響を及ぼすほどには大きくない。

氷の機械的諸特性の測定に関する方法論的諸問題が検討される以前には、データのばらつきが極めて大きいためにそれらの比較対照が困難であった。また、それ故に、海水の強度に依る分類に着手することができなかった。

1965年以降、海水の機械的強度は単一の方法で求められるようになった(第1表)。同表に示すデータはマイナスの海水温度(-5°C , -7°C)のもとで $4 \times 4 \times 36\text{ cm}$ の大きさのビーム状氷片を用いて得られた値である。

第1表 北極のさまざまな海域における海水の曲げ強度の年度による変化
(単位: kg/cm^2)

地點	北緯	76 ~ 77°	78 ~ 79°	79 ~ 80°	80 ~ 81°
	東経	70 ~ 90°	70 ~ 90°	70 ~ 90°	70 ~ 90°
1965年	4.7 (冬)	5.6 (冬)	4.3 (冬)	4.3 (冬)	
1966年	7.2 (秋)	6.1 (冬)	6.1 (冬)	6.7 (秋~冬)	
1967年	4.4 (冬)	6.2 (冬)	5.2 (冬)	7.8 (秋)	
1968年	8.0 (秋)	—	—	6.0 (冬)	

地點	北緯	83 ~ 84°	72 ~ 73°	73 ~ 74°	60 ~ 70°	67 ~ 68°
	東経	90 ~ 100°	160 ~ 170°	160 ~ 170°	170 ~ 180°	180 ~ 190°
1965年	12.8(大氷塊)	5.4 (冬)	6.1 (冬)	10.0 (冬)	4.8 (冬)	
1966年	—	9.1 (秋)	—	—	6.3 (冬)	
1967年	13.1(大氷塊)	—	5.8 (冬)	—	6.3 (冬)	
1968年	6.5 (冬)	6.8 (冬)	—	7.7 (秋)	6.6 (冬)	

(備考) 以上の全てに対する平均値は冬氷: $\sigma = 5.7\text{ kg/cm}^2$, 秋~冬氷: $\sigma = 6.7\text{ kg/cm}^2$,
秋氷: $\sigma = 8.3\text{ kg/cm}^2$, 大氷塊: $\sigma = 13\text{ kg/cm}^2$ 以上。

上表から判かるように、或る一定の年令の氷の強度は空間的にも時間的にも充分に安定した特性を示している。近年得られた同様なデータ全体に基づいて北極の海水を強度別に分類することができる（第2表）。同表から判かるように、海水の強度別分類の基準となるものはその年令である。

第2表 気温-5, -7°Cにおける海水の曲げ強度の分類

氷の年令	水 厚 (mm)	強度 σ_{bend} (kg/cm ²)
1 ~ 1.5カ月	50 ~ 60	5 ~ 6
2 ~ 3カ月	70 ~ 120	7 ~ 8
5 ~ 6カ月	150 ~ 180	10 ~ 11
2 年	200 ~ 250	12 ~ 13
多 年	> 250	13 ~ 15 またはそれ以上

§10 氷盤の変形と応力

M. I. Serikov

周知のように、材料の強度は外力に対するその限界抵抗を特徴付けるものである。氷盤の強度に関するデータは氷盤上に荷重が安全に存在し得る時間律する最大の変形（歪み）の計算に際して必要となる。従って、氷盤の変形状態と応力状態との結び付きが常に存在するから、氷の強度特性の研究は変形特性と併せて行なうべきである。

氷の変形の研究に当り筆者等は水域の氷盤は充分にゆるやかな勾配をもつドーム型の球殻の範疇に属すとの見地に立つ。このような殻（bowl 形の氷の撓み面）の曲面は基本的には円の面積 πR^2 を有する。撓み面を律する円の面積は氷厚に依存する。撓み面の面積は互に氷厚の比として関係付けられることが確認されている。即ち、

$$\frac{\pi R_1^2}{\pi R_2^2} = \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

半径 ρ の円弧についての氷の撓み面の曲率中心は殻の正の曲率に相当する。円弧の長さはその円弧で固まれる中心角 φ (ラジアンで表わされる) に半径 ρ を乗じた積に等しい。

変形に際し、円弧が更にもっと急峻になれば、殻面の曲率は増大する。従って、円弧に関しては曲率を問題にすべきではなく、屈曲の結果としての曲率の変化を問題にすべきである。

氷盤の撓み面の半径と荷重との関係 氷盤の撓み面の半径と繰返し変化する荷重の大きさとの関係を求めるために下記の方法を探る。

まず、荷重 P_1 および P_2 のもとにある氷盤の変形を想定する。この場合、氷盤内では応力 σ_1 および σ_2 、またそれらにそれぞれ対応する相対伸びを ϵ_1 および ϵ_2 が働く。文献(6)からの式に基づけば $\epsilon = \varphi^2 / 6$ である。ここから次式が導き出される。

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{\varphi_1^2}{\varphi_2^2} \quad (2)$$

ここで、力 P_2 がその最初の値から n 倍の値に増大したと仮定すれば、 $P_2 = n P_1$ となる。そうすれば、周知のフックの法則に従い下記が得られる。

$$\epsilon_2 = n \epsilon_1 \text{ および } f_2 = n f_1$$

ただし、 f — 氷盤の撓み量

中心角 φ と荷重の n 倍増との関係を求める問題は次のアプローチによって解くことができる。

即ち、等式(2)の左辺と右辺をそれぞれ同一の値 n で割ると次式が得られる。

$$\frac{\epsilon_1}{n \epsilon_2} = \frac{\varphi_1^2}{n \varphi_2^2}$$

ここから、 $\epsilon_2 = n \epsilon_1$ であることを考慮すれば、最終的に下記が求まる。

$$\varphi_2^2 = n \varphi_1^2 \text{ または } \varphi_2 = \varphi_1 \sqrt{n}$$

更に、文献(6)からの式に従えば下記のようになる。

$$\varphi = \frac{R}{\rho} \quad (3)$$

および $\varphi^2 = \frac{2f}{\rho}$ (4)

その場合、下記が求まる。

$$R^2 = \frac{2fR}{\varphi} \text{ または } R = \frac{2f}{\varphi}$$

従って、半径の比を次のように表わすことができる。

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{f_1 \varphi_2}{f_2 \varphi_1}$$

ここで、 $f_2 = n f_1$ であるから、次のようになる。

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\varphi_2}{n \varphi_1}$$

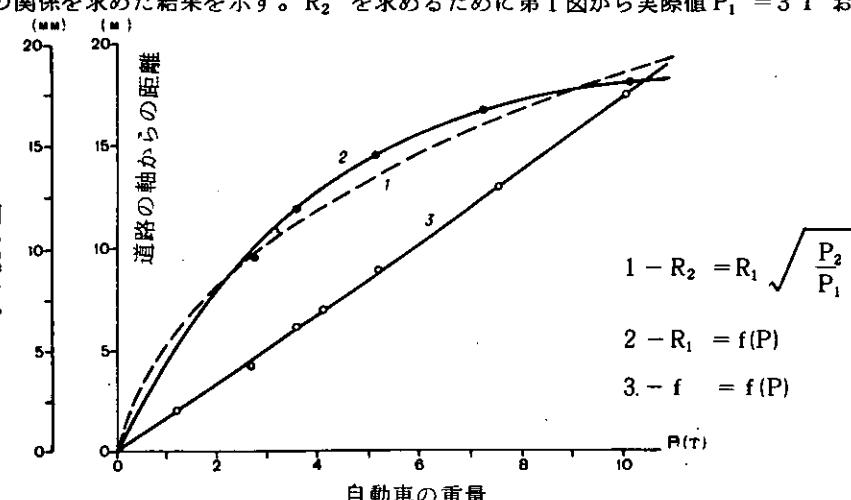
また、 $\varphi_2 = \varphi_1 \sqrt{n}$ であるから、下記が得られる。

$$R_2 = R_1 \sqrt{n} \quad (5)$$

以上で確立された関係式から多重荷重のもとにおける氷盤の撓み面の半径の変化を求める (P_1 と P_2 を知ることにより) ことができる。この式による計算結果は、以前に氷の浮力に基づいて導き出された関係式 $R = \sqrt{\frac{P}{\alpha}}$ (α は比例係数)⁵ によって得られた結果と一致する。このように全く相異なる原理に立脚して行なわれた計算の結果が一致することはそれらを導き出すに当って採られた仮定の正しさを裏付けるものである。

第1図に N. D. Shishov のデータに基づいて氷盤の撓み量および撓み面の半径の変化と荷重との関係を示す。この研究はアルハンゲリスク地方において北ドビナ川を貨物が渡る際に海洋測候所が実施したものである。同図で破線は式(5)に依って撓み面の半径の変化と荷重との関係を求めた結果を示す。 R_2 を求めるために第1図から実際値 $P_1 = 3 T$ および $R_1 = 10 m$ が採られている。

第1図から、 R_2 の計算値は実際値と一致することが判かる。試験からは、10T以上の荷重のもとでは所与の厚さの氷に対しては撓み面の半径は実質的には一定に保たれることが明らかになった。計算値 R_2 と試験値 R_1 との間にみられる開きは次のように説明される。即ち氷盤自体の重量が現われていないならば、撓み面の半径に漸近的に無限大に向うが各点における氷の重量の働きは当該



第1図 氷の撓み量 f および撓み面の半径 R と荷重の大きさとの関係
(N. D. Shishov による)

点における撓み量に比例する荷重を作り出し、その結果、氷の撓みの円弧 (deflection arc) は益々ゆるやかになり、また氷による支持の結果、変化せずに保たれるようになる。

半無限平板の縁部および中央に荷重を載せた場合の氷盤の撓み面の半径 氷盤内の法線応力を探すためにフックの法

則を用い、氷盤の屈曲に際しその下側の水平面には単純引張りが、上側の水平面には圧縮がそれぞれ現われることに注目する。即ち

$$\sigma = E\epsilon = \frac{Eh}{2\rho} \quad (6)$$

ただし、E - 材料の弾性率

中央載荷時における外部荷重 P_1 および半無限平板の縁端部に載荷した場合の P_2 を均衡させる内力の大きさをそれぞれ式

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{h_1^2} \quad \text{および} \quad \sigma_2 = \frac{P_2}{0.5 \cdot h_2^2} \quad (7)$$

で決められる応力 σ で表わせば、次式が得られる。

$$P_1 = \frac{Eh_1^3}{2\rho_1} \quad \text{および} \quad 2P_2 = \frac{Eh_2^3}{2\rho_2} \quad (8)$$

上記の2つの等式(8)を解けば、同一の応力のもとで

$$P_2 = 0.5 P_1$$

であるから、 $h_1 = h_2$ および $\sigma_1 = \sigma_2$ のとき $\rho_1 = \rho_2$ となることが判る。

2つの異なる変形系について σ_{const} が採られるから、相対変形は同じになる。即ち $\epsilon_1 = \epsilon_2$ 。もしそうであるならば両角が等しいこと即ち $\varphi_1 = \varphi_2$ が保たれる。従って、式(3)に基づいて下記が得られる。

$$\frac{R_1}{\rho_1} = \frac{R_2}{\rho_2}$$

または最終的には

$$R_1 = R_2$$

即ち、氷盤の応力状態が同一のとき半無限平板に対する撓み面の半径は氷盤の中央に載荷した場合の撓み面の半径に等しい。

この結論は実際面で裏付けられる。例えば1946年にレニングラード近郊の湖で物理・技術研究所が行なった試験³⁾では厚さ40cmの氷盤に中央載荷したときに弾性変形の作用半径は25cmであった。他方、塑性変形は実際上半径 $R_1 = 5\text{ m}$ に限定された。

I. P. Butyagin の論文¹⁾に掲げられているデータに依れば、ノボシビルスク湖においてこの氷厚(40cm)の場合に氷盤の縁部に載荷したとき破壊帶の幅は $R_2 = 1.15\text{ m}$ と示されている。

一見して両者の試験データには著しい差異が存在するが、レニングラード近郊の湖とノボシビルスク湖との氷盤の性質を考慮するならば、この差異を説明することができる。そのためには式(1)において氷盤を破壊する力⁵⁾の大きさに及ぼす水文気象因子の影響を示す指標を用いて、この式の条件が成り立つ、即ち下記のようになるようにする必要がある。^{*}

$$R_2^2 = R_1^2 - \frac{\sigma'_{BP} 2 P_2 h_1}{\sigma''_{BP} P_1 h_2} \quad (9)$$

ノボシビルスク湖における氷盤の破壊試験から得られたデータ¹⁾を第1表に示す。

R_2 の値を求めるのに物理・技術研究所の実験データが用いられている。それによれば無限氷板の厚さは $h_1 = 40\text{ cm}$ 、氷盤の一時的抵抗は $\sigma_1 = 20\text{ kg/cm}^2$ 、荷重の作用半径の大きさを決めたときの荷重は $P_1 = 6000\text{ kg}$ 、塑性変形時の荷重の作用半径は $R_1 = 500\text{ cm}$ となっている。

*¹⁾ - 式(9)において式(7)で決められる内力 P を介して応力 σ を表わすならば、等式(1)が成立することが容易に認められる。

第1表 氷縁における集中荷重が最大値のときの氷盤の破壊面の半径

試験年月日	氷 厚 h_2 (cm)	荷 重 P_2 (kg)	式(7)による 一時的抵抗 (kg/cm ²)	破壊面の半径		
				実 際 値	計 算 値	
					Zilev の式	式(9)
1957年12月20日	44	7204	7.4	13.8	8.10	13.4
1958年12月9日	32	5877	11.5	12.0	6.85	10.3
1958年12月17日	40	8469	10.6	11.4	7.54	11.5

上表から判かるように、式(9)で計算した R_2 の値は実際値とほとんど同じになる。

以上のように、荷重 P_1 との関係において中央で曲げたときの撓み面の半径 R_1 および一時的抵抗 σ'_{BP} 、 σ''_{BP} を知れば氷縁に荷重 P_2 を加えたときの氷盤の曲げについての撓み面の半径 R_2 の大きさが容易に求められる。更に、式(9)を用いれば撓み面の中心から（または氷縁から）最小応力が分布している円の境界まで、氷の破壊開始点までの距離を求めることができる。

撓みの大きさに及ぼす氷盤のセクター角の影響 荷重および応力と氷の撓み量との関係を確定する以前に、撓みの大きさに及ぼす氷盤のセクター角 (φ°) の影響について検討してみる。

式(4)において式(3)で求められる角の値を置換すると、撓み量について下記の等式が得られる。

$$f = \frac{R_2}{2\rho} \quad (10)$$

氷盤の2つの異なった曲げ系 ($\varphi = 360^\circ$ と $\varphi = 180^\circ$) について撓みの大きさを比較すれば、^{*)} $h_1 = h_2$ および $\sigma_1 = \sigma_2$ のときに下記が得られる。

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{R_1^2 / 2\rho_2}{R_2^2 / 2\rho_1}$$

その結果として更にもう1つの重要な情況が確定される。即ち

$$f_1 = f_2$$

即ちこれは前述において $\rho_1 = \rho_2$ および $R_1 = R_2$ であることが証明されているからである。

以上のように、同一の氷厚と同一の応力のもとでは半無限平板の撓み量は無限平板のそれに等しい。従って、無限氷盤と半無限氷盤とで撓み量の最大値は同一のオーダの大きさになる。

この命題の正しさを確認すべき図解として第2図に V. I. Kashtelyam ²⁾ によって得られた実験データを示す。同図には中心角 ($\varphi = 360^\circ$) から $\varphi = 60^\circ$ までのさまざまなセクター角をもつ平板の破壊ダイヤグラムが示されている。そこから判かるように、 $60 \sim 360^\circ$ のセクター角において模擬氷の破壊は同一の撓み量のもとで起きている。このように、同一の応力のもとで、例えば破壊時に、氷盤によって許容される撓み量は、セクター角の大きさに関係なく、一定値を保つという結論の正しさが実験研究から裏付けられる。^{*)}

荷重および応力に対する撓み量の関係 式(8)において中立層の曲率半径 ρ を消去すれば、式(10)に従って下記が得られる。

^{*)} $-2\rho = E\frac{h}{\sigma}$ であるのでこの種の比較は可能である。

²⁾ 一展開角 $\varphi = 30^\circ$ をもつ平板の破壊における撓みは計器で確定される最大撓みを超えるので、このような平板を破壊に到らせることは可能とは思われない。 $\varphi = 30^\circ$ よりも大きい展開角をもつ平板に較べて $\varphi = 30^\circ$ の平板の撓みが増大することは応力分布によって説明できる。明らかに、このような平板における応力の分布は試験氷片の曲げ、例えば<キイ>法 (key method) による曲げに際しての応力分布に近似している。

$$f_1 = \frac{P_1 R_i^2}{E h_1^3} \quad (\text{中心屈曲の場合})$$

$$f_2 = \frac{2 P_2 R_2^2}{E h_2^3} \quad (\text{半無限平板の屈曲の場合})$$

上記の2つの式は式(7)に従い内力を応力と置換することによって下記のように別な形を与えられる。

$$f_1 = \frac{\sigma_1 R_i^2}{E h_1} ; \quad f_2 = \frac{\sigma_2 R_2^2}{E h_2} \quad (11)$$

以上のように得られた関係式は撓み量 f と応力の大きさ σ との関係が線形関係にあることを示している。式(11)の連立解を求めれば下記が得られる。

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\sigma_1 R_i^2 h_2}{\sigma_2 R_2^2 h_1}$$

外力 P による撓み量の影響について求めるには撓み面の半径 R_1 および R_2 を式(5)からの値と置換する。即ち

$$\frac{P_1}{2 P_2} = \frac{R_i^2 h_1}{R_2^2 h_2}$$

ここから、最終的には次式が得られる。

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\sigma_1 P_1}{\sigma_2 2 P_2}$$

ただし、 σ_1, σ_2 — それぞれ氷の強度特性

さまざまなセクター角の氷盤について個々に応力と撓み量との関係式(11)を解き、且つ式(1)を加味すれば、下記のように計算にもっとも便利な式が得られる。

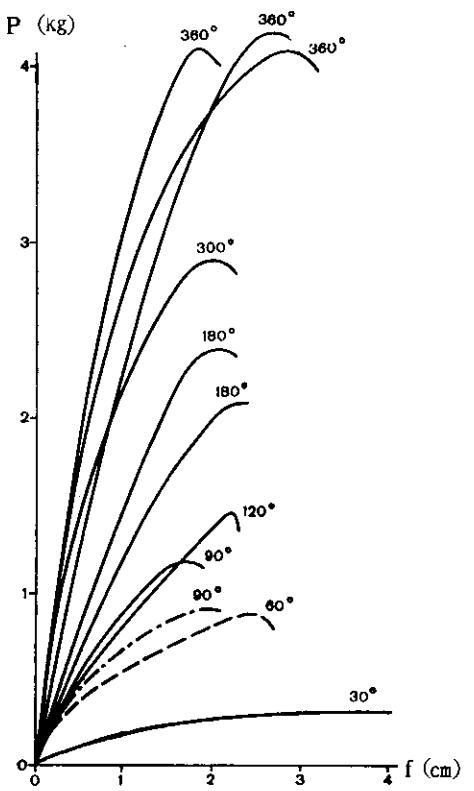
$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (12)$$

この計算式(12)の信頼性については氷盤の撓みに関する実地試験の結果から確認されている。例えば第2表に氷盤上を個々の車両が通過するときの氷の撓み量に関するデータを示す。これは S. F. Nekrasov のデータ⁴⁾に基づくものである。なお、同表には式(12)によって得た計算値が実測値との比較のために挙げられている。

第2表 単独車両の重量と氷の撓み量との関係

試験 No	車両の重 量 (T)	氷 厚 (cm)	式(7)による応 力	路軸より 2 m の距離での撓み量 (mm)	
				実 测 値	式(12)による計 算 値
1	8.71	48	3.34	11.7	—
2	11.80	48	5.12	17.0	17.9
3	13.06	48	5.60	18.3	19.8
4	13.96	48	6.00	19.0	21.2
5	16.90	48	7.30	21.6	25.8
6	17.70	48	7.60	24.0	26.9
7	20.10	48	8.70	26.9	30.8
8	20.98	48	9.10	32.0	32.2
9	22.90	48	9.50	33.2	33.6

(注) f_2 の計算では $\sigma_1 = 3.3 \text{ kg/cm}^2$, $f_1 = 11.7 \text{ mm}$ の値を採った (試験 No 1)



第2図 さまざまなセクター角を持つ氷の平板の破壊のダイヤグラム

第2表から氷の撓み量の実測値は計算値に近いことが判かる。同表に挙げられた事例から氷盤の撓み量の大きさは応力に対し線形関係にあることが確認される。この確認は氷盤内の応力の計算問題を解いた総括的結果（式7）である。またそれにより氷盤の変形状態と応力状態との関係が確立される。

応力との関係における撓み量の計算問題の解の特徴の1つは氷の弾性変形が塑性変形よりも支配的である場合および塑性変形量が弾性変形量を大幅に上回る場合には上記で得られた関係式④が成り立つことにある。しかし、荷重の作用時間は変形の度合、また従って氷盤の強度に大きな影響を与えることが知られている。従って、撓み量の計算に当っては荷重の作用時間を同一にしなければならない。

変形と応力との関係の研究でもう1つの重要な特徴は得られた関係式が変形量およびその経時的变化に関して氷盤の載荷力を求める問題の解に近づくことにある。

引　用　文　獻

- 1) Butyagin I. P. : 氷および氷盤の強度. ノボシビルスク. <Nauka> 出版, シベリヤ支部, 153pp (1966年)
- 2) Kashtelyan V. I. : 模型試験法による船舶の運動に対する密接氷の抵抗の研究. 学位論文. 北極・南極研究所 20pp (1962年)
- 3) Kobeko P. P., Shishkin N. I., Marei F. I., Ivanova N. S.: 氷の破碎と載荷力. <技術物理誌> vol, №3. P. 273 ~ 276 (1946年).
- 4) Nekrasov M. I. : 車両による荷重下にある氷盤路の挙動. <国立水力工学研究所記録> vol. 15 (1936年)
- 5) Serikov M. I. : 氷の載荷力および氷盤破壊力の決定. <北極と南極の諸問題> №46 (1975年)
- 6) Timoshenko S. P., Voinovsky-Kriger S. : 平板と殻体. (英文版よりの露訳), <Nauka> 出版, 635 pp. (1966年)

§ 11 氷盤の変形と応力の実地研究に関する若干の問題点

V.N. Smirnov

連続媒体の力学に関する諸研究報告では強度は媒体の不均質部分 (heterogeneities) における局在過剰応力 (localized excessive stress) によって決まることが指摘されている。これと関連してスケール効果、即ち供試体の寸法の減少に伴なう供試体中の<弱い場所>の存在確率の低減効果、が構造体としての氷盤の強度問題に対するアプローチのための基礎として役立つ。氷の構造と組織に結び付いた微細不均質部分 (microheterogeneities) のほかに、氷盤内には微細亀裂およびその他の連続性を破壊する要因によってもたらされた不均質部分も存在する。従って、供試氷片の機械的特性の測定結果は自然の状態にある氷盤の機械的特性を必ずしも正しく反映していない。

氷盤の強度を測定する視点からみて有効な不均質性はその諸要素の物質的組成の差異にあるよりも、むしろそれらの諸要素の付近における応力集中にある。従って、実際上の視点から重要な氷盤特性、例えば載荷力および構造物に作用する圧力、の計算は自然 (in situ) において氷盤を、しかも氷厚と作用荷重が著しく大きい面またはプロフィルで、試験した結果に基づいて行なわなければならない。現時点までのところ、氷盤中の応力を精密に求める方法が存在しないため、間接的な方法が盛んに採られている。この種の研究方法は土質工学、鉱山工学および地震工学において豊富な経験が積まれている。

氷盤の応力状態の基礎となるものは弾性論および塑性論といった連続媒体の力学分野である。氷の応力状態に対する計器による実地観測の結果は専ら弾性論の手法によって処理され、解析的に表現される。その際、弾性変形と塑性変形の判別基準を決める必要がある。これは、結局、両者のいずれかの理論の適用性を決めることになる。

弾性論の基本概念は応力と変形 (歪み) にある。応力は内力の強さ (内圧) を決める。変形は内部応力の作用下における媒体中の弾性転位 (elastic displacement) である。応力の9成分の総体

$$\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}$$

$$\tau_{yx}, \sigma_y, \tau_{yz}$$

$$\tau_{zx}, \tau_{zy}, \sigma_z$$

は媒体の所与の点における完全な応力状態を特徴付ける。応力 σ は法線応力であり、直角座標の軸に平行に作用する。応力 τ は接線応力であり、3つの互に垂直な面の境界面(facet plane)に沿って作用する。力の均衡条件から $\tau_{yx} = \tau_{xy}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ となる。即ち媒体の応力状態を完全に把握するためには6つの応力成分を知れば充分である。或る点における応力間の関係は応力状態のタイプ(線応力(linear stress), 面応力(Plane stress), 体積応力(volumetric stress))によって決まり、これらの関係はそれぞれ該当する研究報告で示されている。

線形に変形される等方体の体積圧縮については法線応力 σ_x , σ_y , σ_z とそれに対応する相対変形 ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z との下記の関係が採られる。

$$\epsilon_x E = \sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z)$$

$$\epsilon_y E = \sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z)$$

$$\epsilon_z E = \sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)$$

ただし、E—ヤング率; μ —ポアソン比

弾性等方媒体の任意の圧縮または引張りの場合における変形を求めるためには上記の特性で足りる。応力源に対し等確率な方向の場合には多成分ピックアップを用いて変形の楕円体を計器測定する必要がある。唯1つの応力 σ_x のみが作用する場合には材料は考えられ得る析出した平行六面体の脇の側からの何らかの阻害も受けなく、その場合、変形は単純に $\sigma_x = \epsilon_x E$ である応力(水盤の面応力の例)と関連している。

変形が小さく、作用時間が短かい領域では<応力—変形>関係の弾性部分は塑性部分よりも著しく大きく、またもし弾性変形の後に結合の破壊が到来する(フックの模型)ならば、<水の破壊に要求される力は弾性限界を僅かに超える力である>^④と看做すことが適當である。水の破碎に際してこの弾性限界は水中の応力の評価ともなる。この問題については更にもう1つのS.S. Golushkevichによる下記の見解^⑤を加えておく。即ち<理論の根本的な単純さ並びにその結論の大部分が試験データと満足すべき一致をみているという事情はこの理論を水盤の応力状態の解析の貴重な補助手段としている。実験研究の主な目的はこの理論の根拠付けられた適用範囲の確定並びにこの理論がもたらす結果とその意味の解明にある>。

水盤中の応力の研究方法の開発に際しては水中における垂直および水平の弾性転位の動的範囲を知る必要がある。媒体中の2つの転位する点の間の相対変形の計器測定はこのような場合に 10^{-8} の位の感度をもつシステムによって保障されなければならない。このような計測システムとなるものは石英式歪み・地震計と歪み計(deformograph), 測地用距離測定レーダ(range-only radar)とレーザー装置^{1, 2, 6}である。海水の研究ではこの段階における最も有望なシステムは歪み計の方位システム(azimuthal systems)である。これは測定精度が高く、広い動的範囲において連続記録が可能性であり、極地条件下において信頼性があり、また海上での多点調査に際し比較的低廉である。

ここで、熱的および動的変形を記録する方法によって水盤内の応力を実験的に研究する可能性を示している事例について検討してみる。

野外実験では地震計タイプの計器、即ち短周期型受震器、遠隔型傾斜計および歪み計が用いられてきた。監視・增幅ユニットによってオシログラフおよび可視記録付き計器に現われる全てのプロセスが記録されてきた。そこに採用される装置は実質上全ての振幅および周期範囲に亘る波動過程および弾性—塑性変形について水の変形と振動を記録することができた。

弾性率と歪み率 系統的な短時間性の荷重による水の機械的特性試験において弾性—塑性変形が生じる。この弾性変形と塑性変形の区別はヤング率と歪み率を個別に求めることを可能にする。自然状態にある水盤のヤング率と歪み率を動的(地震)方法と短時間静荷重方法によって比較してみる。両者の場合とも変形(歪み)が短時間性のもので且つそ

の値が小さいと看做することにする。実験は同一の水盤区域で実施し、水中における弾性縦波および横波の伝播速度を求め、また垂直方向の短時間性荷重を受けた撓みを測定した。

この撓み量の測定は傾斜計⁶⁾を用いて行った。無限平板の中心屈曲の場合に対する式を用いれば水盤の歪み率の大きさを求めることができる。初期状態となるものは圧力Pと撓みw₀との間の線形関係⁵⁾、即ち P = k w₀ である（ただし k は弾性基礎の係数 (coeff of elastic foundation)）。中心屈曲の場合に対し次式が与えられる。

$$w_0 = \frac{P}{8\sqrt{k D}}$$

$$\text{ただし, } D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

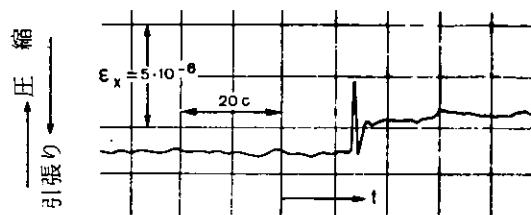
(h - 水厚 : μ - ポアソン比)

計器の感度が高く且つ撓み面のパラメータの測定精度が大きいために僅かな荷重を用いることができた（僅かな変形を起すには水上を人間が急速に移動するだけで充分である）。

実験結果は第1表に示す通りであった。同表から判かるように歪み率 E_D はヤング率 E よりも若干小さい。このことは弾性-塑性変形の理論と完全に一致している。

この種の実験は、更に今後、弾性率と歪み率の判別基準を決めるのに役立つ。これは水工学分野の実際上の非常に重要な課題である。

自然除荷方法 現在、自然状態にある水盤の強度を求める目的のもとに AANII (北極・南極研究所) の水研究室では<自然除荷>法の開発が進められている。この方法は



第1図 水平面における水盤の破壊歪みの典型的な記録

第1表 短時間荷重により地震法で試験した場合の水盤の特性

観測地点	h (m)	T (°C)	P (kg)	w ₀ (mm)	E _D (10 ³ kg/cm ²)	E (10 ³ kg/cm ²)
ラドガ湖 の水盤	0.3	-8	80	0.23	75	93
	0.5	-10	100	0.13	84	95

(備考) h - 水厚 ; T - 水の温度 ; P - 荷重の重量 ; w₀ - 荷重下での撓み量
E_D - 歪み率 ; E - ヤング率

水中に熱的および動的な亀裂が生成するときの変形と応力の諸パラメータを求めることがある。

水平面における水盤の変形の記録を第1図に示す。水盤の振動および相対変形の昼夜連続記録において水中に形成される破壊亀裂に特徴的な変形が測定されている。振動と変形に対する同時観測から、弾性変形の蓄積によってもたらされ破碎のケースを最も大きい信頼性をもって選定するための根拠が得られる。インパルスの形状は石英式歪み計の感度軸 (Sensibility axis) に関して変形速度と破壊面の配向の性質を反映している。

水中の応力を求めた結果を第2表に示す。ここでは唯1つの変形成分のみが連続記録されたので σ_x の量的評価はおよその目安的な性質を帶びている。更に、水層中の圧縮圧力および引張圧力の大きさは垂直方向の温度分布にも、また水盤全体の動的変形にも依存することが知られている。従って、方法論上の問題が沢山生じるが、それらの解決は今後の研究目標となる。

波による変形と応力 水盤の応力状態に及ぼす水の波動の影響に関する研究は移動荷重の作用に対する水盤の反応の計算といった問題を解く上で大きな関心を呼ぶものである。

荷重の運動速度が自由屈折-重力波の速度と一致したとき水盤内に最大の応力が発生する。この場合の荷重の速度は臨界速度と呼ばれる。荷重がこの臨界速度よりも小さいか或いは大きい速度で運動するとき水中の応力は低減する。即ち水盤の載荷力が増大する^{3, 8)}。

第2表 水盤内の応力 σ_x を求めた結果

観測場所、年月	h (m)	ϵ_x (10^{-6})	E (10^3kg/cm^2)	Z_0 (mm)	T (sec)	σ_x (kg/cm^2)	水盤の変形の種類
ラドガ湖、 1972年3月	0.80	6.0	82			0.49	破壊
	0.80	3.5	82			0.29	"
	0.80	3.8	82			0.31	"
	0.80	2.9	82	0.32	6	0.25	波による湾曲 (トラクタによる)
漂流ステーション SP-20、 1971年2月	4.5		90	1.7	20	0.05	波による湾曲

(備考) ϵ_x —相対変形; E —弾性率; Z_0 —波の振幅; T—波の周期

水盤が重力波によって湾曲するときに現われる応力は厚さ h の直角ビームの横断面に対して曲げモーメント M_x が作用するときに生じる応力 σ_x を表わす式によって求めることができる(7,8)。ここで M_x を屈折-重力波の諸要素(第2図)によって表わせば、下記が得られる。

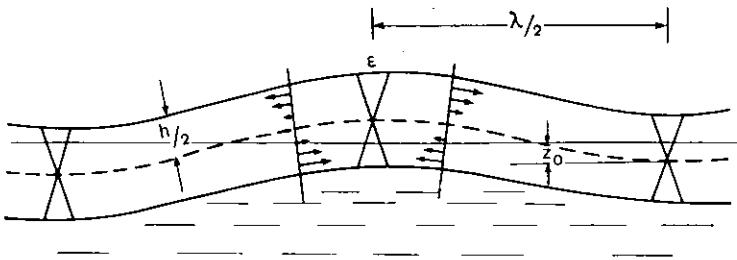
$$\sigma_x = \frac{6M_x}{h^2} = \frac{E h k^2 z_0}{2(1-\mu^2)} = \frac{E h \pi \varphi_0}{\lambda(1-\mu^2)},$$

ただし、 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ —波数; Z_0 —波の振幅; φ_0 —水盤の傾斜角; λ —波長

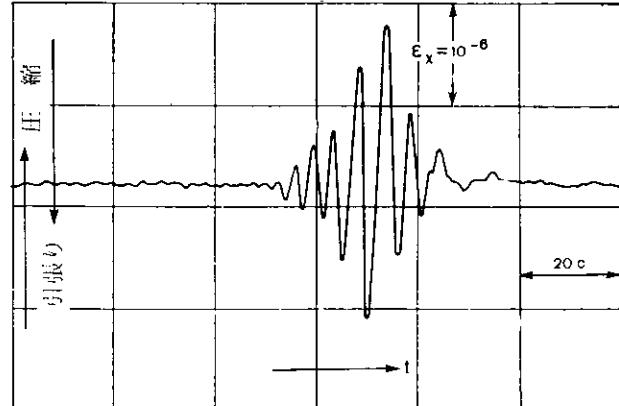
荷重が運動する場合の水中の応力に関する実験研究は既述の計測ユニットを用いて実施された。運動する荷重によって発生した屈折-重力波が伝播するときの水平面での水盤の圧縮および引張りによる変形について第3図に典型的な記録を示す。また波のパラメータと水中に生じる応力を求めた結果は上掲の第2表に示されている。波によって生じる最大の応力は $\sigma_x=0.25 \text{ kg/cm}^2$ であった。

漂流ステーションSP-20での水盤の振動の観測で破碎発生モーメントを確定することに成功した。これは20secの周期をもって急峻なピークのある屈折-重力波を伴なっていた。波によって生じ発達する応力は僅かな値(第2表参照)であるが、破碎機構として働くには充分な値である。温度勾配または水の漂流速度の変り易さによってもたらされる弾性変形の蓄積は水盤に或る一定の応力状態を形成させていた。波による応力の追加は全応力が限界値を超えるという結果をもたらした。この視点から波による応力は海水の破碎の前兆の1つであると看做すことができ、また、今後、水盤の破碎モーメントの予測に際しこの応力を利用することができる。

最後に、弾性変形が塑性変形よりも遙かに小さい場合の水盤の圧縮と引張りについて検討してみる。この場合、水中の応力を求めるのにフックの法則を適用できないことは明らかである。ラドガ湖の水盤の圧縮および引張りによる変形



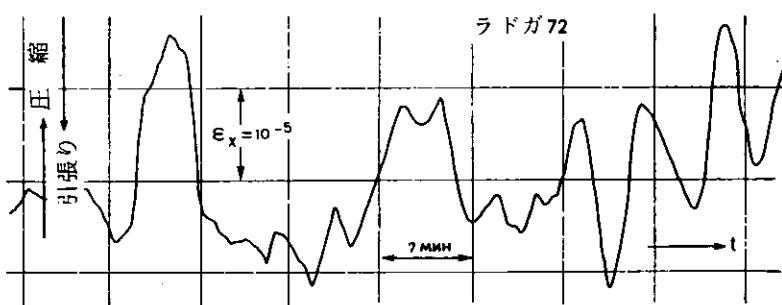
第2図 水盤が波によって屈曲する場合の応力の状態図



第3図 水面上を運動する荷重によって生じた屈折・重力波における水盤の圧縮および引張りによる水平変形

この視点から波による応力は海水の破碎の前兆の1つであると看做すことができ、また、今後、水盤の破碎モーメントの予測に際しこの応力を利用することができる。

の記録を第4図に示す。変形速度が小さい ($\epsilon \sim 10^{-7}/\text{sec}$) ことと連続作用時間が長いことにより氷は粘一塑性体として挙動するという結果になった。周期的作用の性質がいかなるものであるかは明らかでない。ただ、5~7minの周期をもつ周期的変形は湖面の波の運動によってもたらされたものであると推定することはできる。



第4図 ラドガ湖の氷盤の水平変形

< 結 言 >

氷盤のヤング率と歪み率との判別基準は動的方法と静的方法を同時に適用することによって求めることができる。地震計、歪計、傾斜計また水中の内圧ピックアップから構成される計測ユニットを使用すれば、自然の状態にある氷の強度問題に対して<自然除荷>法によりアプローチする可能性が得られる。水が波動するときの氷盤内の応力について評価した。そこから、波による応力は氷盤の破碎に対する予測因子の1つと看做されることが判明した。

本テーマに関して得られた結果は水中の変形と応力の研究および海洋の表面における氷盤の動力学的研究の可能性を解説するにすぎない予備的な知見であると看做されるべきである。

引 用 文 献

- 1) Berdenikov V. P., Deryugin A. G., Khaminov N. A.; 氷盤の応力状態の指標としての微小振動. <国立水力工学研究所紀要> No 148, p. 15~22 (1967年)
- 2) Bogorodsky V. V., Gavrilo V. P.: 氷盤の応力状態の物理的研究方法. <北極・南極研究所紀要> vol. 316, (1974年)
- 3) Golukovich S. S.: 氷盤の屈曲理論の若干の問題について. Voenizaat 出版, 231 pp, (1947年)
- 4) Paunder E: 氷の物理. Mir 出版, 187 pp (1967年)
- 5) Peschansky I. S.: 氷学と氷工学. Gidrometeoizdat 出版, 461 pp (1967年)
- 6) Smirnov V. N.: 動力学的方法および静力学的方法による氷盤の弾性特性の測定. <北極・南極研究所紀要> vol. 300, p. 56~60 (1971年)
- 7) Timoshenko S. P., Voinovsky-Kriger S. V. 平版と殻体. Nauka 出版, 636 pp (1966年)
- 8) Kheisin D. E.: 氷盤の動力学. Gidrometeoizdat 出版, 215 pp (1967年)

§ 12 氷盤中のエピソード的応力が結晶構造に及ぼす影響

N. V. Cherepanov

本稿では氷盤の結晶構造の特質と氷盤の成長過程にみられるエピソード的応力との質的関係を求めるための実験研究の結果を分析する。

この実験作業はラドガ湖の氷盤で北極・南極研究所の水実験研究室のスタッフによって実施された。ここでは1971~1973年の冬期に氷に凍着させた特殊な管内における氷の結晶の孤立した成長および共合成長の機構を調べる試験をシリーズ的に行なった。

水域の熱的状態は氷の結晶の成長の特質を律する基本的要因である³⁾ことから出発して、結晶の寸法と形状が熱的原

因のはかになお多くのその他の原因にも依存することを明らかにした。この種の原因の1つは氷盤の成長期に不可避的に生じるエピソード的応力である。この応力の発生並びに氷の物理的性質に及ぼすその大きな影響については多くの研究者が指摘している^{1, 2)}。恐らく氷の結晶構成も例外でないと思われる。

氷中に発生する応力の原因がいかなるもの（熱的か動力学的か）であるかに関係なく、その応力は下記のようにさまざまな経路によって実際に生じている。

- 1) さまざまな規模と形状の亀裂の生成と結び付いた氷盤の連続性の破壊による。
- 2) 氷盤の起伏の表面形状の転位的破壊に連なる塑性現象による。褶曲およびさまざまな凹凸の生成による。
- 3) 応力状態におかれた結晶の内部変形による。これはこのような結晶のポリゴニゼーション^{*1)} またはカタクラーズ^{*2)} を介して現われる。後者の場合は自然条件下の氷の成長機構において特に重要な研究対象である。

今回の研究で行なわれた多数の構造断面の観察から氷盤の構造はその上表面から下表面にいたるまで極めて不均質であると結論を下すことができる。これに対する説明は一方では最も有利な配向の幾何学的淘汰に立脚した結晶成長の法則性の視点からも不可能であり、他方では氷の温度、接氷水層の化学組成または気体組成の変動と結び付いた接氷水層の状態の変化の視点からも不可能である。

氷の構造の不均質性がとりわけ現われる場合は結晶組織上有利な配向をもつ多数の結晶の個々の水平面に激しい“楔抜き”（wedging-out）がある場合または新しい結晶が並行一纖維状成長（parallel-fibrous growth）を明瞭に表わして生成する場合である。新しい結晶は主として結晶と結晶が接合している接点に生成することが特徴的である。結晶の発達中の稜および面の表面（Surfaces of ribs and facets）の形状の激しい変化、また結晶の表面の凹凸の規模の増大がしばしば観察される。A 4型^{*}の氷には構造の不均質性が最も明瞭に現われる。安定した氷生成条件のもとではこの氷の結晶構造が一定であることは稀であるという特徴をもっており、この結晶構造については充分に研究されている。従ってこのような氷を今回の分析の実施に際して選定した。このタイプの氷の結晶の成長の主な特質は次の点にみられる。

- 1) 結晶面の発達に平行性がある。
- 2) 結晶内でC軸の配向が明瞭な帯状をなしていること。
- 3) 結晶断面が下方へ向けて法則的に増大していること。

従って、A 4型の氷の成長時の結晶化条件における安定性からの比較的僅かなずれさえも結晶の外形の崩壊と関連している。この場合、それが大きいほど、この崩壊が激しく現われる。

実験の要点は次の通りである。天然の氷盤に穿掘して設置した2.0×2.5 mの寸法の2本の供試氷体（レーン—lane）に同時にA 4型の氷を成長させた。その際、No. 2 レーンには氷盤内に生じるいかなる程度の応力でも全てそれを排除する保護装置が装備された。No. 1 レーンでの氷の成長は氷盤の成長過程に生じた自然のエピソード的な応力のもとで進行した。レーンの装備は氷が厚さ20～25 cmに達した後に行なった。この保護装置としては厚さ100 mmの有孔発泡プラスチックのシートを使用した。この発泡プラスチックシートを硬い木製フレームを用いてレーンの全周囲に固定させた。

目の細かい網を用いてオープンレーンの表面に均等に散布された細かい雪質粒子から成る刺激物によって氷の結晶の初期成長を起させた。氷の成長と同時に氷と空気の温度、水位の変動、風速と風向の観測を行なった。5～10日に1回

*1) — ポリゴニゼーション（polygonization）：過剰応力状態の結晶が直線状の境界および接近した結晶配向をもつ一連の微細部分に崩壊すること。

*2) — カタクラーズ（kataklaz）：結晶が脆性破壊によって細かく分裂すること。この破壊は結晶の破片が破壊面に沿ってまたは強い圧縮の場所で運動することに関連している。カタクラーズに際して発生する構造の特徴はさまざまな粒子から構成され、結晶の形状が複雑であり、無秩序な配向をもつ点にある。

*3) — N. V. Cherepanov の分類に依る。

の割合で成長中の氷の厚さを測定した。

両方のレーンにおいて氷は45～50cmの厚さまでに成長したが、No.2 レーンでは発泡プラスチック製保護層よりも常に小さかった。試験シリーズの全てにおいて応力から保護されたレーンと保護されないレーンとで成長した氷の外部の差異が特徴的であった。無保護レーンでは引張り力が作用した結果、氷の表面に常に稠密な網目状の表面亀裂（迷走距離で8～15mの亀裂）が出現していた。またこれら亀裂の伝播深さは一般に10～15cmにとどまっていた。

氷盤を圧縮したとき亀裂の性状は激しく変わった。即ち亀裂はいたるところに発生するのではなく、個々の領域即ち、多分、応力集中力所に限定して規模、形状また方位がさまざまな非常に複雑な網目状の亀裂が生じる。このような亀裂は束（たば）状に配置され、また氷盤の厚さ全てに拡がっていることが最も頻繁に認められた（第1図）。

このような氷ではポリエチレン管に凍着した供試氷（第2図）がしばしば氷盤の表面上に20～30mmまでの高さに押し出された。その逆に、外部応力から保護されているレーンではいかなる表層また深層亀裂の発生も、またいかなるその他の破壊も1度も起きていないかった。全てこのことは前者の場合には氷盤中にエピソード的に発生する応力のもとで氷が成長し、後者においてはこのような応力が排除されるかまたは最小限の大きさに押しとどめられるかすることを立証するものである。

これら両者のレーン内で、それぞれ成長した氷の結晶構造については更に一層著しい相違が明らかになった。

氷の構造の研究に供するため穿孔して採取したコアに1～10cmの間隔で水平切断面のシリーズを作った。各切断面から氷構造の接写を撮り、これによって全ての基本的な形態学的測定を行なうことができた。第1表にこれらの特性のうちの若干を示す。ここで最も興味を引くものはさまざまな水平断面に対する結晶の直径の平均長さ(\bar{d})および単位面積当たりの結晶間の境界の総亘長(ΣL)である。

第1表 A 4型氷の各水平断面での結晶の特性

水平断面の位置(cm)	No.1 レーン(保護なし)		No.2 レーン(保護有り)		差(%)
	\bar{d} (cm)	ΣL (dm/dm ²)	\bar{d} (cm)	ΣL (dm/dm ²)	
表面	0.19	81.9	0.17	87.9	10
2	0.27	57.0	0.19	82.8	30
5	0.31	49.5	0.23	66.9	25
10	0.48	32.0	0.33	47.6	18
15	—	—	0.40	39.0	—
20	0.64	24.5	0.44	35.3	28
30	0.94	16.5	0.63	24.7	38
40	1.11	14.0	0.93	16.9	17
50	1.79	8.8	1.19	13.2	—



第1図 氷の内部における束状亀裂

この表から、応力に対し保護されているレーンと保護されていないレーンとでそれぞれ生成した結晶の大きさに著しい差異があることが良く判かる。

例外なく全ての水平断面において有保護レーンの結晶の平均直径は無保護レーンのそれよりも10～38%短くなっていた。無保護レーンにおいて成長した結晶に特徴的なことは水平断面についての平均直径の分布が一様でないことであ

る（第3図、曲線1）。曲線1の屈折が大きいことは結晶の大きさの増減を示す。結晶間の境界の長さ（ ΣL ）については更に激しい変化が水平断面毎に認められる。第3図の曲線2は有保護レーン中の結晶の成長を示す。この場合には、逆に、結晶の大きさには水平断面によるそれはど激しい変動は実質上認められず、結晶の成長につれて平均直径 \bar{D} がほぼ規則的に増大して行く。

上記の2つの曲線の特徴から次のように一連の興味有る結論を導き出すことができる。即ち、結晶の大きさが規則的に増大する一般的傾向があるもとで、曲線1は、垂直軸の側へ偏る場合、単位面積当たりの結晶総数の増加に伴なう結晶断面の一般的減小に対応している。その逆に、水平軸側への曲線1の偏りは結晶断面の増大を裏付けている。成長している結晶は錐体の形をとる。前者の場合に結晶は半自性（hypidiomorphism）の結晶なる傾向を有し、より規則的な表面形状をとる。後者の場合には結晶の形は著しく複雑になり、結晶面の表面の湾曲率が著しく大きくなる。

このような両者のレーンでそれぞれ生成した水の組織学的諸特質にも注目する必要がある。無保護レーン中の水中には不純物の分布に明瞭な成層性が現われており、その性質は曲線1の屈折と明らかに一致している。各屈折に対応して水の組織が変わっている。この様相は不純物の分布密度、形状および大きさの変化にも現われている。半自形の形状の結晶が発達するとき水中には気泡の分布に小さな成層構成が発達し、気泡の配置における前面性（frontality）が明瞭に表わされている。その逆に水中に複雑な表面形状をもつ錐形結晶が発達する期間には不純物の分布は無秩序になり、主として球面形の気泡が支配的になる。

水の成長期間に対応する天候条件と水の構造上の特質との関係については風、水温、水位変動といった水文気象要素を月日順に並べた第3図のグラフから良く判かる。これらの要素は互に複雑に影響し合って、試験期間中に観察された水盤中のエピソード的応力の主要な発生原因となっていた。例えば、1973年1月29日から2月14日にかけて激しい水位変動および日間差20°Cに及ぶ気温の激変が観測されているが、これは30~39cmの水平断面において5つの明瞭な組織層の出現をもたらした。この期間に対応する曲線1は充分に急激な屈折をみせている。これは無保護レーンにおいて観察された結晶の大きさの比較的僅かな増大を特徴付けている。逆に、有保護レーンではこのような応力は検知されなかった。第3図から判かるように、この期間に対応する風速と風向はかなり激しく変動していた。この期間の初めにおける卓越的な風は日平均速度~10 m/sec の南東の押し出し風であった。これが気温の激しい低下および水位の変化と組合さって水盤中に大きな応力（引張り）の発生をもたらした。

水平断面9.5 cmにおける組織層の形成をもたらしたときの上記と同様な条件は1月13~14日に観測されているが、これはそれほど明瞭な形に現われていない。このような分析はその他の期間に対しても行なわれた。第4図はさまざまな水平面での水の断面を統計的に処理して得た曲線を示すが、ここから水の構造上の特質、即ち m_i （標準線分と結晶境界との交差回数）と x_i （切断面上の標準線分が任意の位置をとるときの頻度）の関係が特徴付けられる。

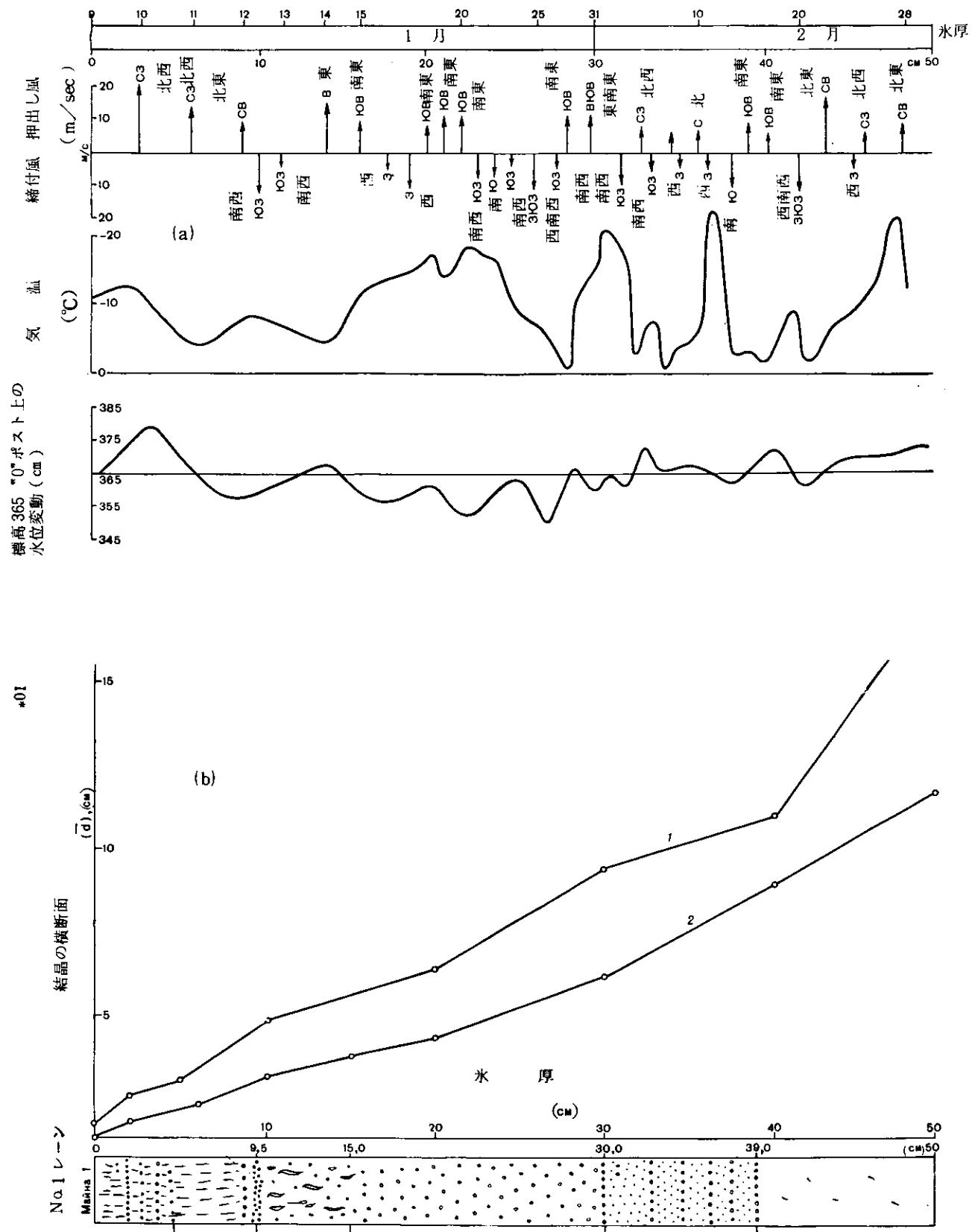
これらの典型的な統計的分布曲線は表面および5 cm, 20 cm, 40 cmの各水平断面における結晶構造のパラメータの実測値の充分な精度を特徴付けている。無保護レーン（曲線2）の水の表層の構造は有保護レーン（曲線1）で生成した水と較べて結晶の大きさの均質性が比較的大きい点が特徴的である。

結晶の大きさの分布がこのようになる原因はレーンへの“種播き”に用いられた雪質粒子の寸法の不均質性に存する。しかし、既に水が5 cmの厚さに成長したときには結晶の粒度分布には実質上差異が無くなる。ただし、結晶の寸法は有保護レーンよりも無保護レーンにおけるものの方が著しく大きい。これは、恐らく、有保護レーンでの結晶の成長が配向性がはっきりと現われた成長であった結果によるものと思われる。

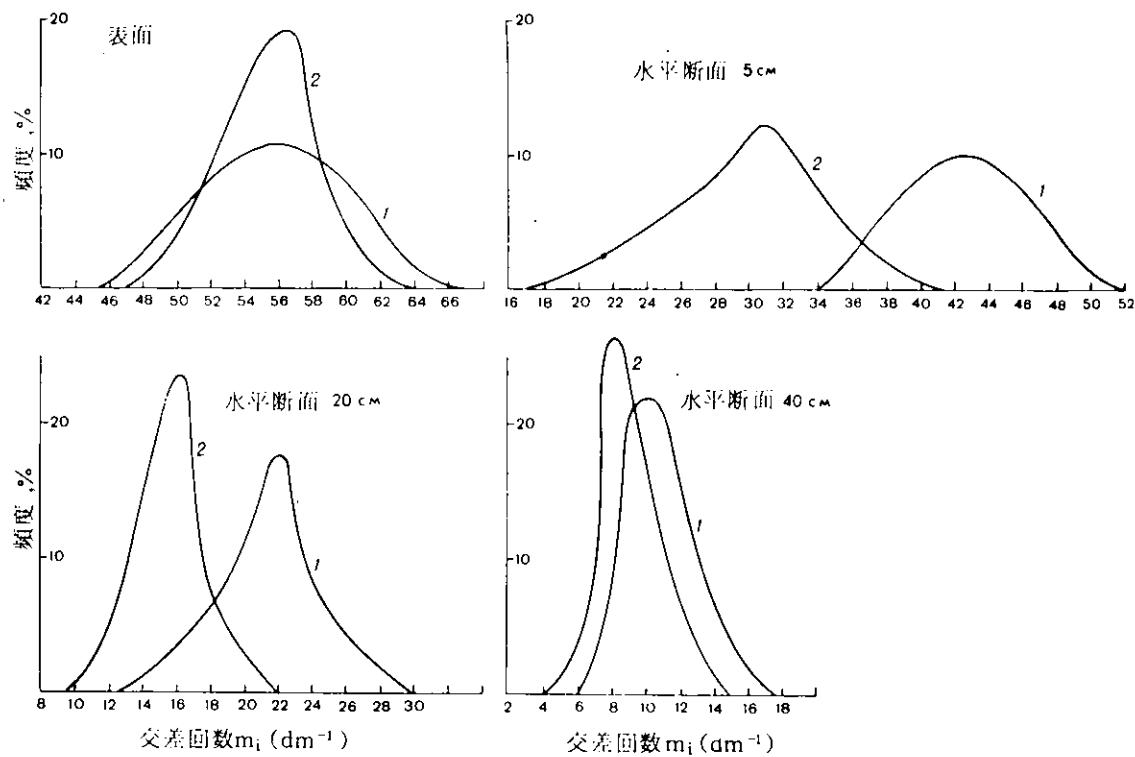
水が更に成長すれば、曲線の性質は一層激しく変わり、保護されたレーンでの結晶成長の安定さと保護されないレ-



第2図 水盤の変形に際しての円筒形
試料水体の押し出し



第3図 1973年における(a)水文気象要素および(b)水の構造と組織の分析結果の共掲グラフ



第4図 試料氷体の各水平断面における水の構造についての統計処理の結果（曲線1—有保護レーン・曲線2—無保護レーン）

ンでの結晶成長の不安定さを立証することになる。しかしここで得られた関係はまだ定性的なものにすぎない。このような関係は必ずしも常に明瞭に現われていないが、もはや現時点においては重要な結論を下すことができると思われる。

氷盤中にその成長期に発生するエピソード的な応力はその発生上の性質(動力学的応力か熱応力か)に関係なく結晶構造の特質に大きな影響を及ぼす。この点でより明瞭な関係が明らかになったものは今のところ3A4型の氷である。その他のタイプの氷についてのこのような関係の解明および定量的特質を求める可能性の評価は有保護レーンと無保護レーンにおいて同時に応力を測定できるセンサーの水中設置を伴なう研究の実施にかかっている。

引用文献

- 1) Hobbs A., Kutkliff L., Kingery D.: 氷盤の長時間歪みに及ぼすクリープおよび温度勾配の影響。雪と氷（英語版よりの露訳版）p. 274～284 Mir 出版（1966年）
- 2) Kingery D.: 海水中の亀裂と浮遊氷盤利用に及ぼすその影響。雪と氷（英語版よりの露訳版）p. 285～298. Mir 出版（1966年）
- 3) Cherepanov N. V. : 氷の結晶構造の形成における水域の熱的状態の役割。〈北極と南極の諸問題〉No.29. p. 137～140 (1968年)

§13 春期のラプチエフ海の一年氷の構造

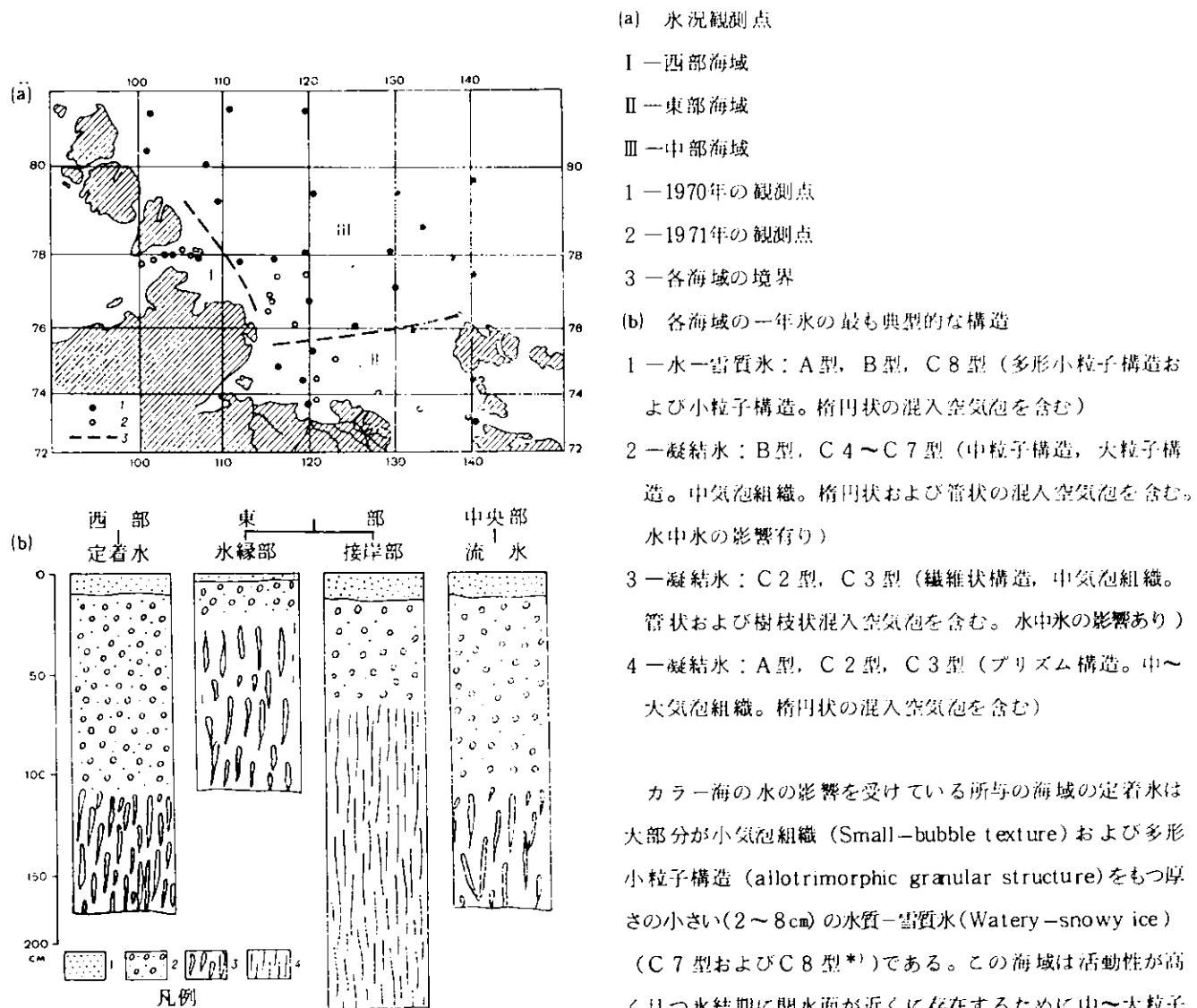
V. I. Fedotov

本稿では1970年および1971年春期（4～5月）のラプチエフ海における一年氷の構造上の特徴、並びにその $701 \times 10^3 \text{ km}^2$ の海域における水文気象条件および気象条件を考慮した氷の結晶構造による海域区分について諸沿岸観測ステーションおよび探検隊〈Sever-22〉、〈Sever-23〉による水況調査観測資料に基づいて報告する（第1図(a)）。

ラプチエフ海の物理的・地理的特徴は浅い大陸棚が発達していること（面積で 53.6 % の海域は深さが 50 m 以下であ

る⁶⁾ 隣接の北極海との相互作用があること、低気圧による水の循環が起きていること、流入する河川水による海水の塩分稀釈化現象がみられること（特に東部海域において）、定着水および流水が存在することなどであるが、これらの特徴により水盤の構造の研究に際してこの海域を3つの部分、即ち西部、東部²⁾ および中央部に区分することができる。各海域の水盤の組織上および構造上の特徴の解析結果から明らかになった一年水の典型的な構造を第1図(b)に示す。

最も長い完全凍結期間は沿岸海域で、最も短い完全凍結期間は潮流と風が強く且つ深度の大きい海域でそれ認められた。ラプチエフ海の諸観測点におけるこの完全凍結期間の長さの差異は90日間であった。同一の海域に対し<Sever-22>と<Sever-23>⁴⁾ により観測された定着水の厚さを比較すれば、両者の差は水縁帶で50cm、沿岸帶で10~20cmであることが認められる。



第1図 ラプチエフ海の一年水の構造

カラ一海の水の影響を受けている所の海域の定着水は大部分が小気泡組織 (Small-bubble texture) および多形小粒子構造 (allotrimorphic granular structure) をもつ厚さの小さい (2~8cm) の水質一雪質水 (Watery-snowy ice) (C 7型およびC 8型^{*)}) である。この海域は活動性が高く且つ水結期に開水面が近くに存在するために中~大粒子構造 (Medium-large granular structure) および中気泡組織 (Mediumbubble texture) をもち楕円状および管状の混入空気泡を含む厚い凝結一水中水 (Congelational-innerwatery ice) (C 2型およびC 3型) の層が定着水の内部に出現している。もっと静穏な水成長条件のもとで生成される纖維状のタイプの構造は水盤の下層に出現している。1968年に行なった観測⁵⁾ から明らかなように西部海域の水盤では上層に粒子構造が、ポール状一纖維状組織 (Pole-fibre texture) が作られている。

^{*)} - ここで、また以下の記述で、水の構造のタイプは N. V. Cherepanov⁷⁾ の分類に従う。

南部また特に東部海域では流入する淡水の影響を受けて（秋～冬期だけでも約180 km³ の淡水が流入する³⁾），一年性の定着氷は垂直走向の管状および樹枝状の混入空気泡を含む中気泡組織の凝結氷（Congelational ice）から構成されている。この海域における多形粒子構造の水質一雪質氷（B 8型およびC 8型）の層の厚さは数cm以下であり、ノボシビルスク諸島より東方に向けて増大し、15cmにまで達する。個々の区域において氷層の交代と鉱物粒子の形での混入物が認められる。

東部海域の定着氷の辺端部の上層については粒子状構造の氷（C 4型およびC 7型）の存在が特徴的である。これは沿岸海域に較べて表層氷の塩分が高いこと、接岸氷湖から水中氷が流れ込むこと、波動があること、また接岸氷湖に雪泥が存在することによる。纖維状組織の氷（C 2型およびC 3型）は氷の成長条件がもっと安定している定着氷の下層においてのみ観測される。河口付近の海域また淡水化の著しい（塩分を含む）海域ではA型およびB型のプリズム構造（prismatic structure）の氷が支配的である。

水域の大部分を占める流水はその80%が一年性のものである。二年氷および多年氷の量は一定でなく、全流水の5～10%以下が普通である。ラプチエフ海の中央部および南西部では一年性および二年性の流水は組織の成層性が明瞭に現われている。その表層は専ら雪質一水質氷（snowy watery ice）から構成され、他形小粒子構造、中粒子構造（mediumgranular structure）（C 4～C 8型）、中気泡組織をもち、楕円状の混入空気泡が層全体に亘り混沌と分布している。一連の場合に氷層の交代が認められる。その下に位置する基層は、一般に、均質な凝結氷から構成されているが、そこには垂直走向の管状および樹枝状混入物（断面の直径3mmまで）が含まれている。春期（4～5月）における一年性の流水の下層は植物性プランクトンの影響を受けて濁り度が高く、褐色がかった着色をしていた。

水中氷（innerwatery ice）の影響、移動による結晶成長の安定性の崩壊、漂流方向と漂流速度の変化は、特に氷盤の上層内において、小粒子構造、中粒子構造および大粒子構造をもち、結晶の光学的配向が空間的に無秩序になっている氷（C 4～C 8型）の形成を促進していた。C 2型の纖維状組織の氷は一年性の流水の下層において認められた。

これらの水況調査・観測データの解析から、雪泥や積雪層は一年性の定着氷および流水の構造にあまり顕著な影響を及ぼさないとの結論を下すことができる。また降雪量が僅かであるため、多形小粒子構造（C 8型、C 9型）の水質一雪質氷の層厚は小さく、また秋に生成した一年氷の冠雪度も僅かである（積雪の厚さは20～30cm以下）。

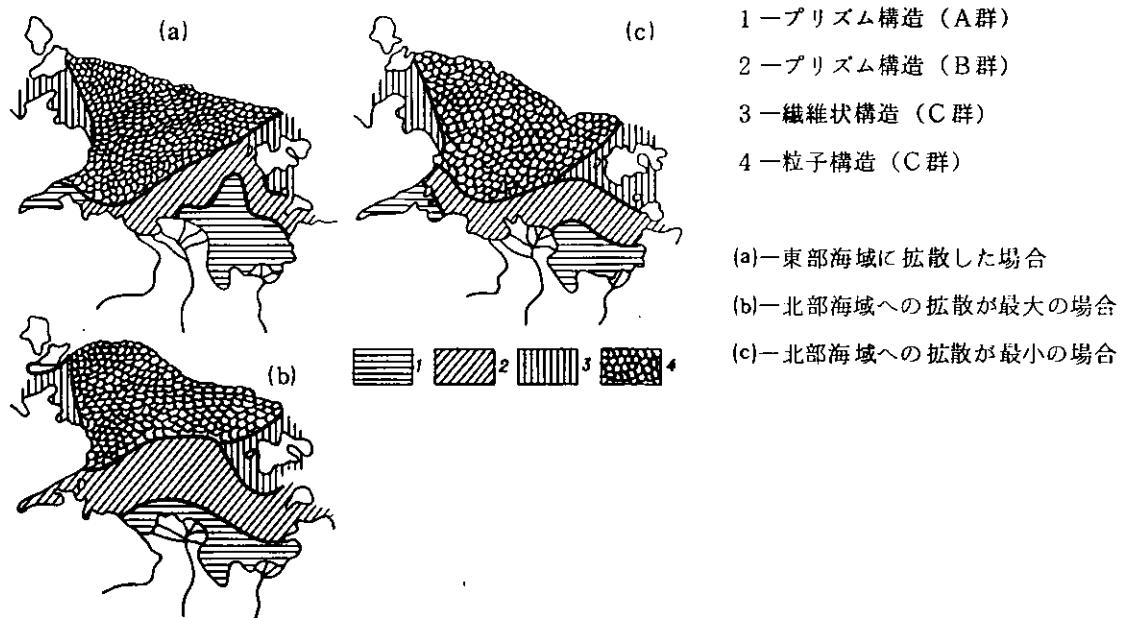
一年性の定着氷および流水の構造で支配的なものは垂直走行の管状および樹枝状の混入ガス泡を含む凝結氷および凝結一水中氷である。定着氷の水縁付近および流水域の活動性が高いため、また淡水と海水が部分的に混合するために、一年性の氷盤のはほとんど全厚さに亘り水中氷の影響が指摘される。これが、塩分の多い海域では粒子構造の形成を、またもっと安定した条件のもとではC型の纖維状の結晶構造の形成をもたらす。A型およびB型のプリズム構造の発達は海域中の河川水の拡散の性質に依存する。

V. S. Antonov¹⁾によって提起された河川水の拡散のタイプ、N. V. Cherepanov²⁾によって行なわれた結晶構造による海域区分、並びに<Sever-22>と<Sever-23>による筆者等の観測結果に従って、ラプチエフ海の氷盤において淡水、塩性水および塩水にそれぞれ対応するA群、B群およびC群の支配的な結晶構造の拡がり状況を作図すれば第2図のようになる。

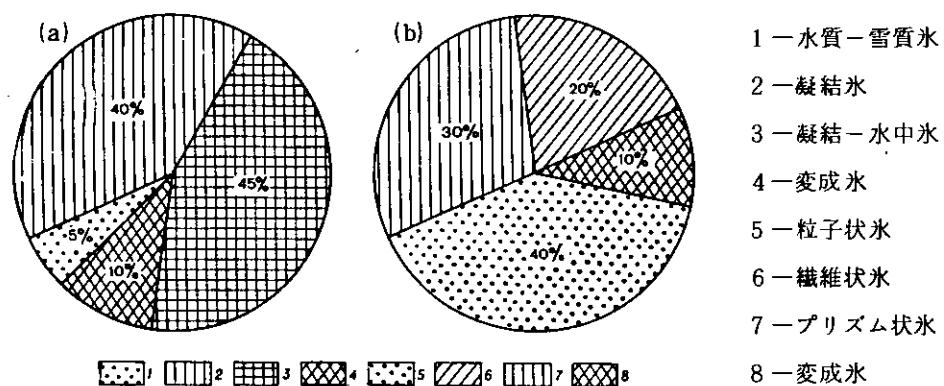
ラプチエフ海の氷盤はその結晶構造の形成条件に従って凝結氷域に該当するものであり、この氷盤に特徴的な氷は秋晩秋および冬に生成する一年氷である。一年氷の構造にみられる複雑な変化は動力学的原因、即ち破碎、成層化および氷丘化に関連している。重力破碎、大変動現象および復水によって表わされる動力学的変成作用は熱的変成作用³⁾との相互作用のもとに進行し、今後の究明を要する結晶構造の形成をもたらす。

夏期の変成作用の後に発達した二次的なthermometricな構造をもつ一年性および多年性の氷は変成氷（metamorphic ice）領域を形成するが、この氷域は北極海域に接した位置に形成される。ラプチエフ海の氷盤におけるさまざまな起源の氷の構成比およびさまざまな構造の氷の構成比を第3図(a)および(b)に示す。

ラプチエフ海の氷盤の結晶構造の更に進んだ分類および各種の氷のタイプによる海域区分を行なうには氷の生成条件



第2図 ラプチエフ海への河川水の拡散状況との関係における水の支配的な結晶構造の分布図



第3図 ラプチエフ海の水盤における

- (a) さまざまな起源の水の構成比
- (b) さまざまな結晶構造の水の構成比

との関連における組織上および構造上の特性を更にもっと深く研究する必要がある。水盤の構造の研究はラプチエフ海における春期の定着氷および流水の強度に対する更に一層正確な評価を促進でき、また促進せねばならない。それと関連してラプチエフ海の一年氷にとって下記の特徴点が挙げられる。

- (1) 水中の塩分の大きさに依存してA群、B群、C群の構造の水が存在する。
- (2) 水盤では粒子状構造、プリズム構造および纖維状構造が支配的である。
- (3) 結晶構造の形成に水中氷が影響を与える。
- (4) 水の組織上および構造上の特性の形成に対して雪泥および積雪層は僅かに影響を与えるにすぎない。

引　用　文　献

- 1) Antonov V. S.: 北極海域における河川水の拡散. <北極・南極研究所紀要> Vol. 208, p. 25~49 (1957年)
- 2) Antonov V. S. : ラプチエフ海の沿岸帶および河口の凍結に及ぼす流れ込み河川水の影響. <北極・南極研究

- 3) Antonov V. S. : 北極水域の水盤に及ぼす流れ込み河川水の影響。<北極・南極研究所紀要>Vol. 268, p. 6 ~ 56 (1965年)
- 4) テーマ<就航期以前のラプチエフ海の水盤の物理的・機械的特性の海域別特徴>に関する報告書。<北極・南極研究所フォンド> 170pp (1973年)
- 5) Petrov I. G. : 北極海域の水盤の構造による海域区分の経験。<北極・南極研究所紀要>Vol. 300 p. 39 ~ 55 (1971年)
- 6) Gerasimov I. P. (編). ソ連の北極. 525pp. (1970年). Nauka 出版。
- 7) Cherepanov N. V. : 北極の水の結晶構造の体系的把握。<北極と南極の諸問題>No.40. p. 78 ~ 83 (1972年)
- 8) Cherepanov N. V. : 海水の結晶構造に関する主要研究結果。<北極と南極の諸問題>No.41, p. 43 ~ 54 (1973年)

§ 14 北極水域における海水の塩分組成と海氷中の塩分に及ぼすその影響

E. V. Belishev

北極水域の水の塩分組成に関する最初の知見は F. Nansen⁵⁾ によって <Frama> 漂流のデータから得られた。この探検隊によって 1895 年 12 月、大西洋寄りの海盆（北緯 85° 29'，東経 58° 44'）において 8 種の試料が採取され、そこに含まれた塩化物、硫酸塩および 2 種類のアルカリ土類元素 (Ca, Mg) イオンが定量された。

これらの各イオンの濃度に基づいて塩素係数 (chlorine coeff.) が求められた。また、塩類全体に対する各イオンの含有率が算出された。その際、前者としては比重測定の結果に基づいて算出された供試水の塩分が採られた。初期データの精度が不充分であったにも拘わらず、そこで得られた結果は北極水域と世界の海洋とで水の塩分組成の大部分の成分について大きな差異を示さなかった。

1948 ~ 1950 年の冬期に北極水域のさまざまな深層から採取された 20 種の試料水に対する塩分組成の定量結果が 1960 年に公表された。³⁾ そこでは全てのデータはいかなるタイプの水かには関係無く塩分の大きさに応じて 3 つのグループに分けられていた。その結果、これらの水は相対塩分組成については海洋水と大いに類似しているとの結論が下された。しかし、その比較検討に際しては、北極水と海洋水とで塩類成分の相対含有量が相異なる成分数に対するパーセントで表示されていたことに考慮が払われなかった。従って、そこで得られた結果は概略的なものである。

北極水域の水について筆者等が保有している 29 種の完全な分析データは供試水がいかなるタイプ（北極の表層水、大西洋の表層水または海底水）に属すかに応じてグループ分けされている。それぞれのイオンの含有率は水 1 kg 当りの g 数および塩類総量に対する % で表わされている。北極水域における試料水の採取地点を第 1 表に示す。

第 1 表 試料採取地点の位置

海 域	座 標		海 域	座 標	
	北 緯	東 経		北 緯	東 経
太 西 洋 寄 り	80° 03'	9° 55'	中 央	86° 39'	156° 45'
"	82° 44'	43° 28'	太 平 洋 寄 り	80° 11'	175° 46'
"	83° 09'	53° 31'	"	80° 20'	177° 19'
"	85° 29'	58° 44'	"	87° 02'	189° 16'
"	89° 55'	135° 00'	"	88° 22'	192° 03'
中 央	87° 07'	147° 53'	"	78° 51'	190° 43'

これらの北極水域の水の分析ではハロゲンイオンを総体として定量し、それらの総量を等価な塩素量で表わしたので、海洋水中の Br' および F' の含有量 (Laimen および Fleming の総括報告による) も同じルールに従って換算した。また

北極水域の水では硼酸とSrイオンの含有量を定量しなかったので、これらの成分は海洋水に関するデータから削除され、残りの7種のイオンの含有率がそれらの総重量に対して換算されている（第2表）。

第2表 海洋水の主な塩分組成

(クヌーセンによる塩分35‰, 塩素量19374‰)

成 分	含 有 量	
	g/kg	%
Cl' + Br'	19.3826	55.25
SO ₄ '	2.7007	7.70
HCO ₃ '	0.1427	0.41
Na	10.7638	30.68
Mg	1.2970	3.70
Co	0.4080	1.16
K	0.3875	1.10
イオノン	35.0823	100

<備考> 臭素の含有量を等価な塩素量に置換する条件のもとで、北極水域で測定されたイオノンに関して海洋水の塩分組成を換算した後

イオノン組成の主要成分は、炭酸塩を除き、重量法で求めた。海水の試料は重量によって取った。HCO₃'イオノン1949年および1959年に採取した試料水に対し、逆滴定法によって、また1955年の試料水に対し指示薬を混入した塩酸の直接滴定法によって、それぞれ求めたアルカリ度に基づいて算出した。

Cl'イオノンとBr'イオノンの和は酸性媒体中で10%の硝酸銀溶液により10gの海水を沈殿させて求めた。硫酸イオノンは5%の塩化バリウム浴液によって硫酸バリウムの形で沈殿した。

Caイオノンの定量は亜硫酸カルシウムの重複沈殿とそれに続く強熱処理によるCaO生成によった。Mgイオノンの沈殿は溶液中からCaイオノンを除去した後に2置換の磷酸アンモニウムによって行ない、ピロ磷酸マグネシウムの形で秤量した。Naイオノンは亜鉛ウラニル法により海水1ml中から三重の酢酸ウラニル亜鉛ナトリウムの形で求めた。

Kイオノンは硝酸コバルト試薬によってNaと一緒に沈殿させ、そこから六塩化白金酸カリウムを分離し、それを金属白金にまで還元する方法によって求めた。

海水の生成と融解の過程は海水から水への、またその逆への塩類の移行を随伴し、海水の塩分組成と北極水域の水の塩分組成の双方に大きな影響を及ぼす。

海水の凍結過程についてV.E.RingerとK.E.Gitterman²⁾は実験室条件下での研究を行なっている。そこでは海水中からの主要塩類の固相中の移行の順序と移行温度が確定され、海水の凍結に際して塩類の氷晶(cryohydrate)が生成する共晶温度は純粋な塩の場合と若干相違することが示された（第3表）。

第3表 海水の凍結時の固相の組成と温度

固 相	系の 温 度 (°C)	固 相	系の 温 度 (°C)
水	-1.8	NaCl · 2H ₂ O	-22.6
CaCO ₃	-1.9	KCl	-34.2
NaSO ₄ · 10H ₂ O	-7.6, -8.2	MgCl ₂ · 12H ₂ O	-36.0
CaSO ₄	-15.0	CaCl ₂	-55.0

自然条件下における海水の凍結に著しい影響を及ぼすものは鉛直方向の循環である。対流変位のために海水の氷結温度は一般に、-1.9°C以下には下らず、そのため水中に含まれる塩類のいずれも(炭酸カルシウムを除き)水生成の初期

には固体の形で分離することがなく、従って水中に移らない。

以上のように、海面温度が -1.9°C に達し、更にそれ以下になる場合ですらも、水下の水中では炭酸カルシウムのみの連続的減少が起き得る。その他の塩類の含有量は二次的なプロセスの結果として変化する。そのプロセスは結氷によって機械的に捕捉された海水部分 (CaCO_3 が若干増大している部分) の移動 (migration) と位相転移 (phase displacement) によってもたらされるものである。

水の温度との関係において、水から流れ出るブラインの各種塩類成分は薄くなったり濃くなったりし、またそれに応じて水下水の塩分組成も変化する。

Yu L. Nazintsev の研究が明らかにしているように、北極水域の氷盤の最低温度は平均して -17°C を下回わらない。従って、第3表に挙げたデータから、このような温度のもとでは水中に含まれるブラインの位相転移は表面水層中の全ての主要な混入塩成分 (硫酸カルシウムと炭酸カルシウムを除き) の増加を促進するとの結論が下される。上記のカルシウムの硫酸塩と炭酸塩はその逆に年間の大部分を通して水中に蓄積され、融氷開始時に到り初めて、海水中に移行する。

これらの混入成分の水中蓄積はソルネチナヤ湾で採取した一年性の北極氷の33ヶのサンプルについて行なった研究から全く明白になった。⁴⁾これらデータの解析から、水と較べて全ての試料氷片は重炭酸塩の含有量が多く、そのうちの85%は硫酸塩の含有量が多く、76%はCaの含有量が多いことが判明した。

これと若干異なる結果がMgイオンについて得られている。試料氷片の55%は氷中のMgイオンの濃度が水下水中的平均含有量よりも高いことを示し、残りの45%の試料氷片ではMg濃度が低くなっていた(第4表)。

第4表 水が生成した海水の平均塩分組成に対する北極氷の塩分の主要成分の相対含有量の偏差 (%)

偏 差 の 符 号	成 分						
	Na [*]	Mg ^{**}	Ca ^{**}	K [*]	Cl ['] + Br [']	SO ₄ [']	HCO ₃ [']
プラス	36	55	76	12	18	85	100
マイナス	64	45	12	88	82	15	—

<備 考> 観測はA. A. Musina が実施した。

氷中の塩類の絶対量はその氷のはば全存在期間を通じて水下水中のそれよりも著しく少なく、従って、水下水層中の塩類の増減は相対的なものである。例えば上記の試料から次のことが明らかになっている。即ち氷下水1kg中のCa^{**}イオンおよびHCO₃[']イオンの平均含有量がそれぞれ0.387 gおよび0.135 gの場合、6～7月の融氷期に得られた氷中のこれらの含有量はそれぞれ、せいぜい0.016～0.051 gおよび0.007～0.038 gの範囲にある。即ちこれらの値は氷結の元になった氷に含まれる量の数十分の一に相当する。

水湖および氷池の存在する海域において表層水の温度が最も低いときに急速に凍結するという条件のもとでの塩分の多い新生氷の生成は海水中の塩類成分の相互関係の変化に対し最も大きい影響を及ぼす。海水の塩分組成に対する多年水の影響は、この種の氷に含まれる塩分が少ないために、多分それはほど著しくない。これは氷の年令によるためであると共に、氷下水の氷結温度に近い比較的高い温度のもとでもっぱら氷の下側表面にできる氷の成長速度が低いためにもよる。

氷の融解は海水の塩分組成にも影響を及ぼす。しかし、氷の融解過程が盛んになる頃には氷中に残留している塩分の総量は僅かであるために、融氷期に氷下水の塩分組成の大規模な変化が期待できない。ただ、炭酸の塩類の量に限って、多分、もっと顕著な変化が生じ得る。

陸地からの河川水の流入の影響を受けて海水中に生じる変化を明らかにするため、シベリヤの主な河川の水の塩分組成およびカラ海とラプチエフ海の水の平均相的塩分組成について検討してみる。後者の海水は河川水の影響を最も受けるものとして取り上げる。

北極海域の全ての主要河川は重炭酸塩クラス¹⁾に属している。その塩分組成において陽イオンのうちでCaイオンが支配的であり（第5表），これは河川が流れる地域の岩石や土壤に含まれる塩類によって律せられる。北極海域の沿岸の河川では鉱化作用が最も少ないことが特徴である。これはこれらの河川は全て可溶性の塩類に欠しいツンドラ地帯を流れるためである。地下水が河川水に流入することを困難にしている永久凍土も鉱化作用が低くなることに大きな役割を果している。オビ河やエニセイ河の鉱化作用が低いことはこれらの流下水中に含まれる塩類の量に関するO. A. Alekinのデータが良く説明している。それに依れば年間を通してそれぞれせいぜい 0.077 g/l および 0.054 g/l の値となっている。

第5表 シベリヤの河川水の年間流れ込みにおける主要なイオンの相対含有量 (O. A. Alekinによる)

河川名	%構成					
	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Na ⁺ + K ⁺	Mg ⁺⁺
オビ	45.6	10.6	7.0	22.4	8.4	6.0
エニセイ	40.7	15.1	7.0	20.6	12.1	4.5
レナ	33.3	10.1	20.2	18.3	12.9	5.2

北極海に向けて流れ込む河川のうちでレナ河は特別な位置を占めている。この河の水質は塩化物クラスに近くそこでは重炭酸イオンよりも塩素イオンの方が支配的である。

河川水の流入は北極海域の水の塩類成分の構成比に一定の痕跡をとどめている。

第6表に示す実測データから明らかなように、世界の海洋と較べてカラ海およびラプチエフ海の海水では硫酸塩の欠乏が一貫して認められ、比較（偏差）値でそれぞれ平均 -0.09 % および -0.06 % であり、また Ca の含有量については平均して +0.04 % と多くなっている。硫酸塩の含有率が低い原因是、一方ではこれらの河川の水の鉱化作用が極めて低いことがあり、また他方では水が生成するときに硫酸塩が水に凍着することにある。河川水の作用と関連して海水中の Ca の含有率が高くなっている。これは流れ込む河川水中の Ca の量が相対的に多いためである。

第6表 北極海域の海水の平均相対塩分組成 (%) および世界の海洋水の塩分組成に対するその偏差 (%)

海 域	平均塩分 (%)	成 分						
		Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	K ⁺	Cl ⁻ + Br ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
(含有量 %)								
カラ海	34.52	30.67	3.68	1.20	1.13	55.30	7.61	0.42
ラプチエフ海	34.64	30.67	3.69	1.20	1.08	55.28	7.64	0.41
世界の海洋	35.00	30.68	3.70	1.16	1.10	55.25	7.70	0.41
(偏 差 %)								
カラ海	-0.48	-0.01	-0.02	+0.04	+0.03	+0.05	-0.09	+0.01
ラプチエフ海	-0.36	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	+0.03	-0.06	0.00

流入河川水の大きな役割にも拘わらず、これらの海水中の過剰 Ca 量は世界の海洋の水と較べれば比較的少ない。同様な状況は水中への Ca の絶えざる蓄積とその北極水域への搬出によっても、またこれらの海の沿岸および北部海域における Ca の海底への移行と沈積によっても起き得る。

炭酸カルシウムの沈殿の可能性の証拠の 1 つはこれらの場所における炭酸カルシウムの含有量が多くなっていることである。

研究に依れば、カラ海およびラプチエフ海では塩化物の濃度も比較的僅かながら高くなっている。これは陸地からの流れ込みの影響を受けて水下水中の塩化物の相対濃度が低下することと較べて氷結時の水下水の冬期の塩水化の影響が

大きいためである。

北極水域の海水は世界の海洋水と較べて硫酸塩とMgが著しく少なく、Caが多い。硫酸イオンとMgイオンの相対濃度の低さは共に平均-0.02%である。Caイオンの過剰分は北極の海面水中で最小(+0.01%)であり、大西洋で+0.03%，海底水で+0.02%にそれぞれ達している。

以上のように、北極水域の水は陸地からの河川水の流入および氷結過程と関連したイオンの含有量の点で海洋と顕著な相違をみせている。これらの過程はまず第一に北極海の海面水の相対組成を変えるにも拘わらず、北極の海面水の大西洋海域の水層への流れ込み（北極水域における乱流交換および対流交換に伴なう）また海底水層への流れ込み（グリーンランド海およびFrancia海峡でのそれらの発生に伴なう）は北極の海面水の特性をこれら海域の全深さに亘って波及させることの促進となる。北極の海面水中のその他の塩類成分のうちで含有量が目立って多いものは重炭酸イオンの+0.03%であり、また大西洋に起源する水中では塩化物、NaおよびCaである（第7表）。

第7表 海洋水の塩分組成に対する北極水域の各タイプの水の相対塩分組成の偏差

組成	北極の表層水			大西洋の水			海底の水		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
Na	+ 0.01	+ 0.08	- 0.06	0.00	+ 0.05	- 0.05	+ 0.02	+ 0.05	- 0.01
Mg	- 0.01	+ 0.02	- 0.03	- 0.02	- 0.01	- 0.03	- 0.02	+ 0.04	- 0.04
Ca	+ 0.01	+ 0.04	- 0.04	+ 0.03	+ 0.05	0.00	+ 0.02	+ 0.04	0.00
K	0.00	+ 0.08	- 0.10	+ 0.02	+ 0.03	- 0.05	+ 0.01	+ 0.06	- 0.03
Cl + Br	- 0.01	+ 0.01	- 0.06	- 0.03	- 0.01	- 0.08	0.00	+ 0.03	- 0.02
SO ₄	- 0.02	+ 0.01	- 0.05	- 0.02	+ 0.04	- 0.17	- 0.02	+ 0.01	- 0.11
HCO ₃	+ 0.03	+ 0.05	+ 0.01	0.00	+ 0.01	0.00	0.00	+ 0.01	0.00

北極水域の主なタイプの水におけるその他の塩類成分の相対濃度の平均値は海洋水におけるそれと相違しないか、またはそれよりも平均して0.01%以下ではあるが高くなっている。それと共に、第7表から判かるように、若干の場合には海洋水中で観測された値に対する個々のイオンの相対濃度の偏差値は示されている平均値よりも著しく高くなっている。例えば北極の表層水中で主要な塩類成分のうちCaの含有量に最も大きな偏差が認められる。この場合、このような偏差の性質もまた水の生成と融解に大部分が関連している。海洋水に対するK含有量の低減分(-0.10%)は融水時に塩分の減少した水が表面にはっきりと検知される夏期に北極海域の太平洋寄りの水域で採取した表層水の試料で得られた。その逆に、表層水が過冷却され、その凍結温度よりも0.03°C低い温度となる極点付近の海域で氷結が盛んな時期においてはそこの表層水中のCa含有量は海洋水中のそれよりも0.08%多くなる。

同様な結果はNaイオンについても認められ、上記の試料水中のCaの相対含有量も海洋水中のそれよりも0.06%低い。またその逆に、ナンセン海盆の南部海域では融水時に表層水中のNaイオンが濃くなってしまい、海洋水中のそれに対する最大過剰値は+0.08%であった。

北極海域の表層水中のCaの相対含有量の極大極小偏差は±0.04%であった。世界の海洋水と較べたこのような増大分は北極海域の大西洋寄りの場所において融水が活発な時期に採取した試料水の分析から判明した。それと並んで、この同じ時期に太平洋寄りの海域からの表層水にはCaが比較的少ないことが判明した。また硫酸塩についても0.05%低くなっていた。

ここで次のように推定できる。即ち、以上のような差異はさまざまな年令の水の融解に関連しているか、或いはまた、太平洋の海水と較べてカルシウム塩と硫酸塩の濃度が高い西部海盆の表層水中における大西洋起源の水の混入が多いことに関連している。

第7表から明らかなように、温暖な大西洋の水層の主要塩類成分の相対量の世界の海洋のそれに対する偏差値は多く

の場合に±0.05%を超えていない。しかしK、塩化物および硫酸塩の含有量についてはもっと大きな差異が現われていた。チュコト海の隆起海底斜面上の水層から採取した大西洋の水のサンプルではKイオンの含有量の超過分は0.08%であった。この海域の海底の起伏状態は大西洋水層の運動に際し水力学的バックウォータの生起を促進し、これが大西洋水と冬期生成の大西洋水との交換過程の増強を惹き起す。そのため、大西洋水はここでは、多分、Kイオンの濃度が高くなっている。この成分は水結過程の発達時に水下水層に入り込む成分である。

また、北極海域の大西洋寄りの水域の大西洋起源の水中における硫酸イオンの濃度が大西洋水中のそれよりも著しく低い(-0.11~-0.17%)場合も注目される。これは、明らかに、硫酸イオンに乏しい北極水との交換過程によっても、また北極水域において大西洋水の温度と塩分が低下するときに一部の硫酸塩が固相中に移行することによっても、惹き起される。

引用文献

- 1) Alekin O. A. : ソ連領域における海中へのイオンの放出量と水の平均組成. <国立水理学研究所報告>No.33 p.43~63 (1951年)
- 2) Gitterman K. E. : 海水の熱的分析. <科学アカデミー塩類実験所報告>vol.15, Part I, p.5~32 (1937年)
- 3) Musina A. A. : 北極水域の流体化学的特性. <北極・南極研究所紀要>vol.218, p.5~64 (1960年)
- 4) Musina A. A. : B. ピリキッキ海峡の水の塩分組成. <北極・南極研究所紀要>vol.218, p.159~199 (1960年)

§ 16 北極と南極の定着氷の比較

V. I. Fedotov

地球の2つの極地の海水の構造および特性の特徴は両者の比較から最も明瞭になる。まず、北極と南極の氷盤の形成にみられる類似点と相違点を律する3つの物理的地理的特性について検討する。

南極の夏期に単位表面当たりに降りそそぐ太陽エネルギーの量は同じ緯度の北極の表面に到来する太陽熱の量を著しく上回っている。それは、南半球の夏の真中(12月22日)では地球は近日点にあり、北半球の夏の真中(そのとき地球は遠日点にある)におけるよりも太陽に700万km近い位置にあるためである。

北極と較べて南極の空気の湿度が低く、また大気の透明度が高いことも少なからず重要な役割を果している。両者の地域における地理的な極に対する陸地の分布の相違も影響を及ぼす要因となっている。この相違のために南極の冬期の天候に冷えた大陸が影響を及ぼし、他方北極海域の天候には暖かい海洋が影響を及ぼすようになる。大気循環の特性のために北極ではより発達した低気圧の活動が雲や霧の発達を促進し、またそれによって太陽輻射熱の到着量を、特にソ連圏北極西部海域において、著しく減少させる。北極の諸沿岸地域における年平均の総輻射量が72~74Kcal/cm²⁹⁾であるとすれば、南極大陸の沿岸においては無氷面上で85~90Kcal/cm²、氷河上で100~110Kcal/cm²³⁾となっている。しかしそれにも拘わらず、南極では載雪面のアルベド値が著しく大きく、また放射が有効であるため、南極圏の南方では輻射バランスはほとんど一年中に亘ってマイナスになっている。他方、北極海域の沿岸では5月から9月にかけてプラスであり、また北極圏の緯度上では南極大陸の沿岸よりもほぼ2倍に大きい⁶⁾。夏期に北極で輻射バランスがプラスになる理由はまず第一に、融解する海水のアルベドの減少、開水域の存在、陸地に雪が存在しないことなどにある。

冬期の南極の沿岸における気温は同じ緯度のヨーロッパ北部の沿岸ステーションにおける気温とあまり相違しないが、大部分の北極海域の沿岸における気温よりも著しく高い。北極の夏期(6, 7, 8月)の月平均の気温は沿岸では常にマイナスである。

沿岸地域の風の状態には鋭い差異が認められる。即ち北極では南極でみられるような定着氷の形成と発達に影響を与える、雪嵐を増長させる一定方向の吹下し風が存在しない。

定着氷の拡がりに著しい影響を及ぼすものに沿岸の浅瀬および沿岸の形状がある。南極海域と異なり北極海域では深

さ20～50mの海底が海岸から相当長い距離に亘って拡がっている。例えば、カラ海ではこのような大陸棚は全面の40%に達し、ラプチエフ海では53.6%，東シベリヤ海では72.4%，チュコト海では56.2%をそれぞれ占めている。⁹⁾

このように浅瀬が遠くまで拡がっていることに海岸線の著しい凹凸、島の存在（P. A. Gordienko の概算によればソ連北極における海岸線の凹凸率^{*}は平均3.1である）また淡水の流れ込み²⁾が加わって、広い定着水域の発達が促進され、その水線は大部分が20～30mの等深線の位置と一致している。このことは定着水域の幅がチュコト海での20～30kmから東シベリヤ海での300kmまでに亘っていることの説明となる。南極大陸の東部の海岸線の凹凸率が低いこと（筆者等の計算では1.5となっている）¹¹⁾および海岸が深いことが原因となって南極における定着水域の幅は平均して45～65kmとなり、南極大陸を全面的に環状に囲むようになっていない。

南極における定着氷の拡がりに対し大陸棚または氷山を生み出す氷河が大きな影響を与えるとするならば、北極においてはその逆に氷河や氷山の影響は極めて僅かであり、その代りに淡水の流入、また坐氷丘および氷島の影響が大きい。シベリヤの川から北極水域に流れ込む水量は平均して2377km³/年¹¹⁾であり、6月から9月にかけて平均 1.0625×10^{12} Kcalの熱量⁹⁾を持込む。これは一方では定着氷の融解時期を早め、他方では淡水領域での定着氷の深さを若干増大させる。多くの場合に、南極の定着氷は北極の場合よりも低い緯度帯に形成される。ここから、定着氷が発達するための条件は南極よりも北極の方が有利であると認められる。

両極での定着氷の形成、成長、崩壊にみられる差異は輻射、熱、風の状態の特質、海岸線の形状と大陸棚の深さの相違、その他幾つかの要因によってもたらされる。

南極大陸の沿岸における一定方向の強い吹下し風および海岸から若干の距離での氷山の集積は沿岸水湖の保存および氷山の前における若い密接氷塊（これは海岸側へ発達する）の形成にとって有利な条件を作り出す。他方、北極海域では一定の押出し風が無いことが定着氷の形成のfrontalな性質を決め、また海岸から海に向って定着氷が徐々に拡っていくようにしている。

北極の定着氷の破開は、P. A. Gordienko が指摘しているように、一般に、4級に近い破壊度のときに起きる。その場合の氷厚は65～120cmである。南極の定着氷の破開時期はまず第一に動的要因によって決まる。北極の沿岸水域では解氷と完全凍結との間の期間は2～3ヶ月であるが、南極ではこのような期間は実際上存在せず、ほとんど全年を通じて沿岸水域の水面では定着氷の破開と閉水面の出現の後に新しい初期段階の氷（水晶、雪泥）が生成している。

秋に生成した一年性の北極氷の厚さは冬の終りまでにバレンツ海では70～100cm、カラ海では150～200cm、ラプチエフ海では200cm以上にそれぞれ達する場合がある。⁹⁾

同じく秋に生成した南極の一年氷の厚さは150～180cmになり、また極めて稀れには200cmに達することもある。輻射と熱の状態にみられる相違により多年性の定着氷の拡がりは北極では（若干の深いフィヨードルおよび群島の海峡において）僅かであるが、南極では非常に大きく、南極大陸の東部海岸だけで約17000km²¹¹⁾の面積を占める。

両極地の定着氷の地形学的特徴を検討すれば、北極の定着氷には載雪度が小さく（2～3級）起伏度が大きい（2～4級）一年氷（厚さ260～300cm）および多年氷（厚さ3m以上）の点在が指摘される。南極の氷に特徴的なことは氷冷による均質性、僅かな起伏度、大きい載雪度と亀裂度、定着氷に凍着した氷山および氷山片の存在、また張出した氷河での定着氷の表面の變化などである。

両極地では雪風の堆積状態および積雪の厚さにも大きな差異が認められる。南極では平坦な定着氷の上の積雪層の厚さはしばしば1mを超えるが、北極ではせいぜい20～30cmにすぎない。従って、南極の条件下では雪は定着氷の厚さの増大と定着氷の構造形成に大きな影響を与える。北極の雪の平均体積重量は0.32～0.34g/cm³であるが、南極の雪のそれは0.40g/cm³である。

流水と較べて定着氷は低い緯度帯に位置し、また河川水の流れ込みが著しいために北極海域ではまず最初に定着氷が

*1) 一海岸線の凹凸率とは海岸線の長さと等大線分の円弧の長さの比を意味する。

破壊され、その後に流水が破壊される。他方、南極ではその逆にまず流水帶が狹細化し、その後に動的諸要因の作用を受けて定着氷が破壊される。北極では定着氷上の雪が融け、深いパドルおよび底なしパドルが発達するが、南極ではアルベド値が大きいこと、湿度が低いこと、また夜間における放射が効果的に行なわれることのために表面からの融雪は僅かであり、また一般にパドルは薄い氷に覆われている。

定着氷の形成上の特質、雪泥、水中氷および積雪の影響は北極と南極で定着氷の構造に大きな相違をもたらす。北極の氷の特徴はその構造の均質性が高く（ただし上部の0～40cmの層を除いて）且つ結晶の光学的配向が比較的きちんとしていることがある。顆粒状（granular）、プリズム状および纖維状（fibrous）の構造が支配的であり、組織的な成層は僅かに現われるにすぎない¹²⁾。

南極の条件下では水中氷、雪泥および積雪が定着氷の成層を惹き起し、顆粒状および纖維状構造の発達をうながす。南極の定着氷の構造は北極水域の流水の構造と或る程度類似している。

春～夏期の到来および氷の深部での温床効果（hot bed effect）の増進に伴ない北極と南極の定着氷の構造の差異が大きくなる。南極の氷盤の内部融解と秋期の充分な冷却によって定着氷に夏一秋の層構成が形成される^{5), 10)}。輻射状態と熱状態の特徴、また氷の深部における珪藻類の発達のために氷盤の内部崩壊過程が北極では中央緯度帯に弱く現われているが、南極大陸の海岸ではそれが特に明瞭に出現し、氷のあらゆる特性また強度に大きく影響している。

水理学的並びに水学的研究から明らかなように、北極の一年性の定着氷の塩分は冬期において南極のそれ（平均塩分4.8%）^{4), 11)}よりも一般に若干低い。平均して、定着氷の縁では3.0～4.5%，淡水の流入の影響が強い場所では2.5～3.0%，また河口付近では0.0～0.8%となっている。

北極の定着氷の密度は平均して0.88～0.92 g/cm³である。これに近い密度をもつ南極の氷は寒冷期における一年性の定着氷である。寒冷期における北極と南極の氷の塑性特性および弾性特性は互に著しい相違はみられない（ただし北極の河口付近の区域を除いて）。例えば、北極氷寒冷期における限界曲げ強度の平均値は1.05 kg/cm²であり、南極氷のそれは1.18 kg/cm²である。

冬期の北極と南極とで氷の弾性特性は下記のように示される。

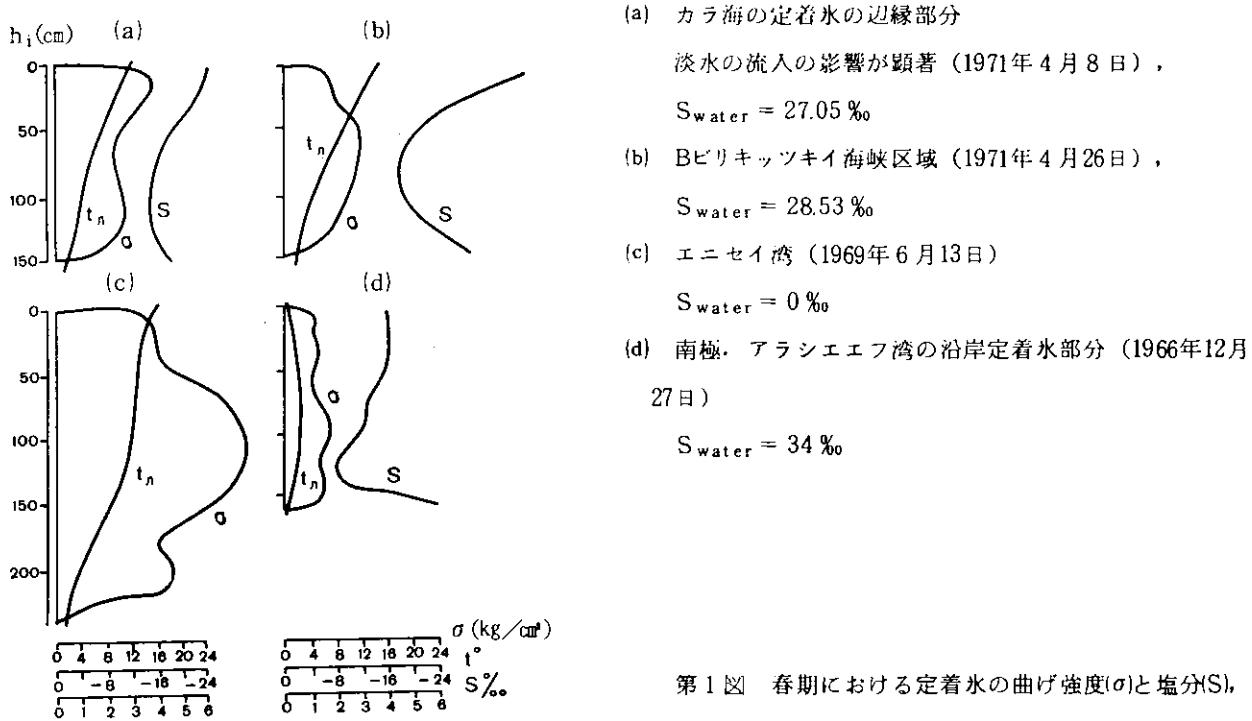
特 性	北 極 氷	南 極 氷
弾性率（ヤング率）	66.000 kg/cm ²	61.000 kg/cm ²
剛 性 率	24.000 "	25.000 "
ポ ア ソ ン 比	0.360 "	0.180 "

このような強度値の差異は既に述べたように南極における温暖期の到来とそれによる定着氷の分層によってもたらされたものである。第1図に示す氷盤の強度分布曲線は春期に南極の定着氷の強度が著しく低くなることを表わしている。南極の定着氷は輻射による深部の崩壊と夏一秋成層の発達によってその強度は北極の氷のそれの約1/2になる。例えば8月における北極の氷の曲げ試験で得られた平均強度は4～7 kg/cm²に達していたが、南極の定着氷の主要中心部分を構成する分解性の氷層（destructive ice-layer）については1月末～2月初めにおいて3.5 kg/cm²以下であった（第2図）。

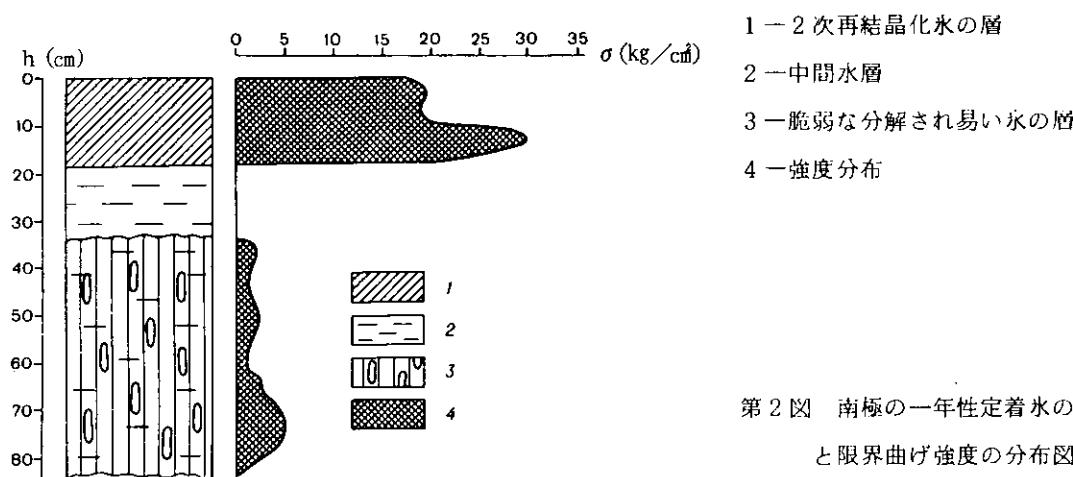
南極の定着氷の内部における中間氷層または脆弱な氷層の存在は両極の氷の構造と強度の差異を拡大するばかりでなく、氷の載荷力の計算も複雑にする。中間液層をもつ多重層系として表わされる氷盤の載荷力を求めるには南極において特別な実施研究を行なう必要がある。

氷盤の載荷力の計算にI. S. Peschanskyによって導入された結晶性係数（強固な結晶間結合をもつ強固な氷層の厚さと氷盤全体の厚さの比）は北極氷では1.08～0.90であるのに対し南極氷では0.87～0.15またそれ以下である。⁸⁾

以上のように北極と南極の定着氷について簡単な比較対照を試みたが、そこから次のように云える。即ち、両者の極地の物理的・地理的特性は定着氷の生成と破壊の過程、定着氷の拡がり方、地形、氷の構造、また温暖期における氷盤の物理的・機械的特性と載荷力に著しい相違をもたらす。



第1図 春期における定着氷の曲げ強度(σ)と塩分(S), 温度 (t_i) との関係



第2図 南極の一年性定着氷の夏期～秋期の成層と限界曲げ強度の分布図 (1966年2月10日
アラシエフ湾, $t_{CP} = -3.1^{\circ}\text{C}$)

引用文献

- 1) Antonov V. S. Morozov V. Ya.: 北極海域における陸地からの総流入量. <北極・南極研究所紀要>vol 208, p. 13~24 (1957年)
- 2) Antonov V. S. : 北極水域の氷盤に及ぼす河川水流入の影響. <北極・南極研究所紀要>vol 268, p. 6 ~56 (1965年)
- 3) 南極地図. vol 2, Gidrometeoizdat 出版. (1969年)
- 4) Buinitsky V. Kh. : 南極の海水の構造, 基本特性および強度. <ソ連南極調査團情報ブレッティン>No 65, p. 90 ~104 (1967年)
- 5) Gordienko P. A., Fedotov V. I., Shil'nikov V. I. : 東部南極大陸の沿岸水域の氷盤. <ソ連南極調査團紀要>vol 11, 117 pp (1960年)
- 6) Korotkevich E. S. : 北極と南極の自然の若干の類似点と相違点. <北方の諸問題>No 7, p. 139 ~ 210 (1963年)

- 7) Markov K.K., Bardin V.I., Lebedev V.I.: 南極大陸の地理. Mis' 出版. 438 pp. (1968年)
- 8) Peschansky I.S.: 北極と南極の海水. <北極と南極の諸問題> No. 4, p. 111 ~ 129 (1958年)
- 9) ソ連圏北極. I.P. Gerasimov (編), Nauka 出版. 525 pp. (1970年)
- 10) Fedotov V.I.: 南極の定着氷の輻射による破壊. <北極・南極研究所紀要> vol 300, p. 128 ~ 136 (1971年)
- 11) Fedotov V.I.: 東部南極大陸の定着氷. <北極・南極研究所フォンド> 165 pp (1972年)
- 12) Cherepanov N.V.: 北極の氷の結晶構造の体系付け. <北極と南極の諸問題> No. 40, p. 78 ~ 83 (1972年)

§ 17 平坦な切削氷面中の粒子の平均寸法の決定方法

N. V. Cherepanov

本稿では氷の平坦な切削面における結晶構造の基本的な取扱い方法について検討する。これは結晶の形態学上の重要な特性を確定するのに役立つ方法である。ここでは方法論上の基礎を金属組織学から借用し、これを氷の構造の研究に適用して検討してみる。

顕微薄片中の粒子の平均数量の計数は、通常、S.A. Saltikov の方法¹⁾に従って行なわれる。この方法はこの目的に對して最も便利な方法である。顕微薄片（写真紙）の単位面積当たりの粒子数を求めるには或る所定の面積における粒子数を算える必要がある。しかしこれは困難な課題である。その理由は切削面中の粒子は幾何学的に規則的なパターン（正方形または長方形）によって切削した場合でも不規則な形をしており、完全な粒子のはかにパターンの内部にはそれらの一部分も含まれるからである。写真紙上で任意に引かれた直線と交わる粒子数が著しく多いならば、確率論に従って、その直線の両側に位置する粒子の総面積は統計的に同一であると推定することができる。その場合、直線と交差する粒子の数が多いほど、粒子の全面積の半分に対する交差粒子の総面積が大きい。

顕微薄片中の等長構造の氷の粒子の数量を算える例を第1図に示す。同図に示した四角形（正方形）の面積は64cm²であり、氷は水平面で実物大の大きさに切削されている。この正方形の中に完全に含まれる粒子(2)には1から28までの番号が付けられ、正方形の各辺と交差し、その直線の内側と外側に2分される粒子（w）には斜体文字で1から23まで番号が付けられている。正方形の辺による粒子の截り方はグラフから良く判かるように不規則的である。多分、このように正方形の周囲の直線と交差する粒子の数が多い場合にはその直線の内側と外側の粒子でそれぞれの総面積は相等しくなる方向に向う。

このような計数方法については更に若干細部に亘って検討する必要がある。例えば粒子No. 5（斜体文字）は正方形の辺と2度に亘って交わっているが、計数時には1回分に算えなければならない。同じことが複雑な形状の粒子について言える。例えば正方形の辺と幾度も交差している粒子No. 12（斜体文字）の場合がそうである。

また、第3の粒子グループとしての正方形の各頂点に位置する粒子（u）が存在する。通常、これらの粒子の1/4は切り落される。粒子の総数（x）は以上の3グループの全ての粒子の数を次式によって合計して求められる。

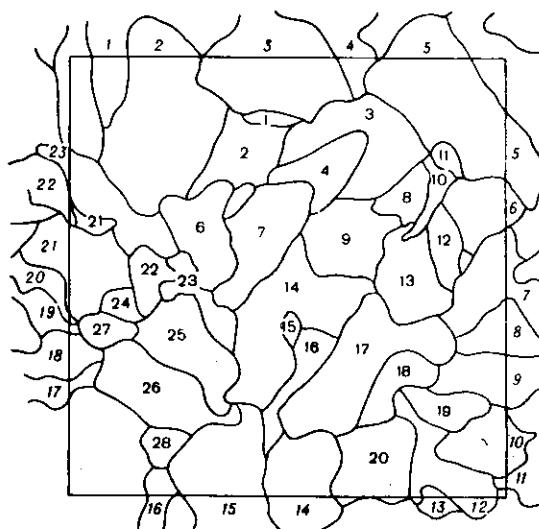
$$x = z + 0.5w \times 0.25u \quad (1)$$

ただし、x—標準正方形内の粒子の整理総数

z— “ 内に完全に含まれる粒子の数

w— “ の辺と交差する粒子の数

u— “ の頂点に位置する粒子の数



第1図 式(1)による結晶計数方式の図解

第1表 各種構造の顕微薄片中の粒子数を計数するための正方形の標準寸法

パターン No	S (cm ²)	結晶の寸法 (mm)
1	1	0.1 — 0.2
2	4	0.2 — 0.4
3	9	0.4 — 0.6
4	16	0.6 — 0.8
5	25	0.8 — 1.0
6	36	1.0 — 1.2
7	49	1.2 — 1.5
8	64	1.5 — 1.8
9	81	1.8 — 2.2

第1図の例では面積64cm²の標準正方形に含まれる粒子の総数は次のようになる。

$$x = 28 + 0.5 \times 23 + 0.25 \times 4 = 40.5$$

また粒子1個当りの平均面積は次のようになる。

$$\bar{v} = 64 / 40.5 = 1.605 \text{ cm}^2$$

粒子の計数にさまざまな拡大率の顕微写真を用いる場合にはその倍率を常に考慮しておかなければならない。

平坦な顕微薄片内の粒子の寸法に応じて第1表に示す標準正方形を使用する必要がある。

原理的には正方形以外の標準パターン（円または長方形）を用いることもできる。経験から明らかのように、氷の構造の写真撮影または接写に接しては透明で充分な強度をもつフィルムまたは薄い有機ガラスの板に正方形の图形を描いたパターンを用いれば最も便利である。

等長構造の氷に対してはS. A. Saltikov の提案による別の方法が推奨される。この方法は結点、即ち顕微薄片内の粒子と粒子の境界の接合カ所、の数を算える方法であり、その根拠は下記の2つの基本的命題に立脚している。

- (1) 各結点 (M_1, M_2, \dots) に集まる粒子の数は常に3ヶであり、このことは粒子の成長機構によってもたらされるもので、全ての単相等長構造に対して成立することである。
- (2) 溝曲した境界をもつ各粒子は粒子間の結点を直線で結ぶ（例えば第2図において粒子⑤, ⑥, ⑩におけるように）ならば、若干の近似をもって突起状多角形であると看做すことができる。

上記のような多角形の突起性もまた粒子の成長機構からもたらされるものであるが、特に粒子の成長がさまざまな力学的破壊のことで起きるときには例外に遭遇する。そのためこの方法を適用した場合には誤差が生じる。

これを簡単に立証する方法としてS. A. Saltikov¹¹⁾は結点数により粒子数を求める単純な関係式を下記のように与えている。

$$M = 2n \quad (2)$$

ただし、M—粒子数； n—所定の面積内の結点数、

上式を用いれば、標準面積の内部に存在する結点数を充分に計算できる。第2図に示した例では結点数は44であり、これは上式に従い粒子数22に相当する。この方法を検証するため、第1の方法に依って計数すれば次のようになる。

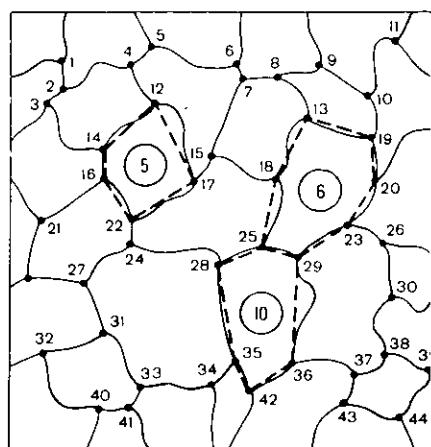
正方形の辺と交差する粒子の数………w = 12

正方形の内側に完全に含まれる粒子の数………z = 17

正方形の4隅に位置する粒子の数………u = 4

結局、この面積内の粒子の総数は $x = 21.5$ となり、この数値は上式による結果 ($M = 22$) と非常に近似している。

特に微細粒子構造の場合の結点の計数は困難であり、脱漏を起しやす



第2図 結点数による結晶計数方式の図解

い。従って計数には結晶の直径 2—4 ケ分にはば相当する大きさの格子をもつ特別なメッシュを用いるべきである。結晶の境界上に存在する粒子については常に別々に計数してから全体の数に合計するようにしなければならない。

等長微細粒子構造の場合、結晶の平均直径や結晶間の境界線の総亘長（これは水の構造の最も重要な特性の 1 つである）といった特性は金属組織学で適用されているランダム割線法によって得ることができる。この方法は金属組織の分析を目的に開発されたものであるが、水の構造の写真分析にも筆者等によって成功裡に適用された。

この方法の理論的根拠付けと計数のための式は S.A. Saltikov¹⁾ によって与えられている。

粒子間の境界線の総亘長 P の計算は次式に依って行なわれる。

$$P = - \frac{\pi}{2} m = 1.571 m$$

ただし、 m —標準線分と交わる粒子の境界の数

この本法のポイントは次の点にある。即ち、明瞭に現われた結晶輪郭または一定の拡大倍率の写真のある切断面において結晶間境界線と標準線分との交差数をシリーズ的に計数する。このような計数方法の例を標準直分（直線）を 1 本引いた場合について第 3 図に示す。この例では直線 A-B は結晶間境界線と 11 の点で交差している。直線 A-B の位置を変えれば交差点数も異なったものになる。計数回数が充分に大きいときには直線 A-B をさまざまな方向に引くことによって得られる一連の数値からこれらの典型的な統計的分布曲線を求めることができる。計数結果を第 2 表に示す。同表の計数結果は線分 A-B の位置を 97 通りにした場合の結果である。

同表から明らかなように交差点数 m の平均値は次のようになる。

$$m = 1308/97 = 13.5 \text{ dm}^{-1}$$

結晶の直径の平均的な大きさは 0.74 cm である。この場合、結晶間の境界線の総亘長は式(3)で求められ、下記のようになる。

$$L = 1.571 \times 13.5 = 20.2 \text{ dm/d m}^2$$

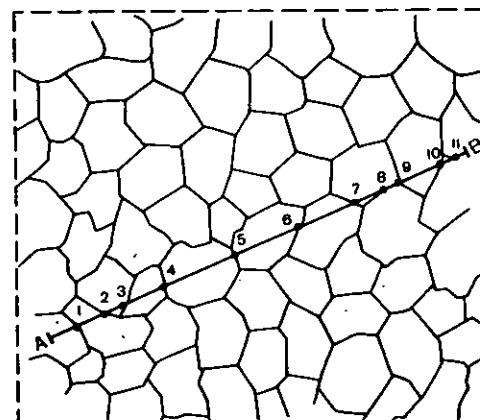
この方法の便利さは、顕微鏡を使用する場合に直接適用できる点にある。このために標準線分を接眼レンズに取替えることができ、そこに定規の形で接眼マイクロメータを取付ける。その場合、拡大倍率が予じめ設定される。マイクロメータのねじによってプレパラートドライバーを移動させて粒子間境界に標準線分が交差する数を算えることができる。その場合、顕微鏡卓を規則的に任意の角度だけ旋回させる。

以上の経験から判かるように、この計数方法では直線分の任意の位置を 90~110 通り採ることが必要になる。

特に複雑な寸法と形状の結晶の場合には 150~250 通りの位置で線分を引く必要がある。

引用文献

- 1) S.A.Saltikov : 立体金属組織学, p 374, Metallurgiya 出版 (1970年)



第 3 図 結晶の境界と標準線分との交差点数の計数

第 2 表 粒子の境界と標準線分との交差回数 m_i

交差点数 m_i	ケース数 x_i	積 $m_i \times x_i$
8	—	—
9	1	9
10	3	30
11	7	77
12	14	168
13	28	364
14	18	252
15	14	210
16	7	112

17	5	68
18	1	18
計	97	1308

§ 18 標準水平観察面の海水温度の計算について

S. S. Chikovsky

北極海域の氷盤の研究課題の1つは水のさまざまな物理的一機械的諸特性の相互の関係を確定することにある。実際面からみて最も重要な特性は温度および塩分に対し或る一定の関係で依存する水の強度特性である。これら諸量の間に得られている関係^{1) 2) 4)}から計器測定を行なうことなく水の温度および塩分に基づいて氷盤の強度を求めることができる。

技術の実際面においては水の温度の計算は、一般に、水の温度と空気の温度との間に存在する関係式で行なわれている。この関係式は下記の形で示される。

$$\bar{t}_i = a + b \bar{t}_{air}$$

ただし, \bar{t}_i — 水の日平均温度

\bar{t}_{air} — 過去2~30日間の平均気温

a, b — それぞれパラメータ

この計算上の水の平均温度に基づいて氷盤の強度の平均値が決められる。海水の厚さ方向における温度分布問題に関するI. S. Peschanskyの研究²⁾に依れば、春~夏期においてはこの温度分布は中央層に負の最大値をもつ凸起曲線の形を呈している。正にこの季節には氷盤の中央層が最も大きい強度を有することになる。しかし、水の平均温度は氷盤の温度状態の全般的な平均化された相様図を提供するにすぎず、春~夏期に特徴的な水厚方向の温度分布の特性をあいまいに表わすことになる。それ故に、水の温度をはじめ設定された標準水平面において求めることが重要な実際的意味をもってくる。

理論的には水中の温度分布は水の熱伝導に関する微分方程式を解くことによって得られる。しかしそこで得られる最終式は非常に複雑であり、実際面での利用に不便である。この事情からこの問題の近似解を探すことが必要となっている。

冬期に、水の厚さ方向の温度分布が線形である場合には、水の上側表面と下側表面の温度値を知れば、任意の水平面での水の温度をグラフで求めることができる。

春~夏期に、経験的な比較対照方法を用いて、或る一定の水面における水の温度と空気の温度とを直接結び付ける試みは所望の結果をもたらさなかった。その場合、所定の標準水平面における水の温度と平均温度との関係の確立が目論みられた。この目的のためにラプチエフ海を対象とした水の平均温度の計算式に含まれるデータが用いられた。グラフ作成の結果からさまざまな結合方程式が得られた（第1表、第2表）が、それに依れば、水の平均温度を知ることによって、水厚150cm以上、積雪高さ10~60cmの条件下で0, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175cmの各水平面における温度を求めることができる。

そこで得られている各方程式の検証はカラ海と東シベリヤ海の沿岸での観測データ（これらは表に挙げた式に含まれていない）に基づいて行なわれた。水の温度の計算値と実測値の比較対照は全部で約300点について行なわれた。精度の基準として水の温度の実際値の10%を採るならば方程式No.1およびNo.2（第1表参照）の保証度は80%，また方程式No.3, No.4, No.6, No.8はそれぞれ90%に達する。方程式No.3~6について最小2乗法で計算された検証用相関係数（0.98~0.99）から、さまざまな水平面での水の温度と氷盤の平均温度との間に密接な結び付きが存在することが確認される。

第1表 標準水平観測面での海水温度を計算するための結合方程式

方程式No	結合方程式	相関係数	方程式の導き出しに用いた事例数
1	$t_0 = 2.0 \bar{t}_i + 3.05$	—	349
2	$t_{10} = 1.94 \bar{t}_i + 2.55$	—	349
3	$t_{25} = 1.74 \bar{t}_i + 1.82$	0.99	360
4	$t_{50} = 1.46 \bar{t}_i + 0.84$	0.99	421
5	$t_{75} = 1.24 \bar{t}_i + 0.28$	0.99	420
6	$t_{100} = \bar{t}_i - 0.28$	0.98	473
7	$t_{125} = 0.70 \bar{t}_i - 0.60$	—	553
8	$t_{150} = -0.46 \bar{t}_i - 0.94$	—	553
9	$t_{175} = 0.35 \bar{t}_i - 1.10$	—	453

(備考) ここで採用されている各量の値は次の通り: 水厚 150~235 cm, 冠雪高さ 10~60 cm,

 \bar{t}_i - 水の平均温度, t_{25} - 水平面 25 cm での水の平均温度

第2表 水の厚さおよび積雪の高さの差異に対する補正

水度 の 半 年 温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	水 平 面															
	0		10		25		50		75		100		125		150	
	水	雪	水	雪	水	雪	水	雪	水	雪	水	雪	水	雪	水	雪
-6.0	-0.3	-0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.1	+0.1	-0.1	+0.2	-0.1	+0.3	-0.1	+0.3	+0.3	+0.3	
-5.0	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	+0.2	-0.1	+0.2	-0.1	+0.3	+0.1	+0.3	+0.2	+0.3	
-4.0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.1	+0.2	-0.1	+0.3	+0.2	+0.2	
-3.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-	-0.1	-	-0.1	-	+0.2	-	+0.1	-	+0.1	
-2.0	+0.2	0.0	-0.1	-0.2	0.0	-0.3	-0.2	-	-0.3	-	-0.3	-	-0.1	-0.1	-0.1	
-1.0	+0.2	-	-0.1	-0.1	0.1	-0.2	-0.1	-	-0.2	-	-0.2	-	-0.1	-	-0.1	
0.0	+0.3	-	-0.1	-	-	-	-0.1	-	-0.1	-	-0.1	-	-0.1	-	-0.1	

(注1) 一実際値と所与の式による値との間の水厚の差異に対する補正是厚さ各10cm毎に施し、差の符号と逆の符号を付けた。

(注2) 一実際値と所与の式による値との間の積雪の高さの差異に対する補正是高さ各10cm毎に施し、差の符号と逆の符号を付けた。

引 用 文 献

- 1) Lavrov V. V. : 水の変形と強度. Gidrometeoizdat 出版. 206 pp (1969年)
- 2) Peschansky I. S. : 水学と水工学. Gidrometeoizdat 出版. 461 pp (1967年)
- 3) Chikovsky S. S. : 春一夏期における海水の平均温度の計算について. <北極・南極研究所紀要>vol 256, p28~33 (1961年)
- 4) Chikovsky S. S. : 海水の温度がその強度に及ぼす影響について. <北極と南極の諸問題>No 8, p 93~96 (1961年)

§ 19 複雑な荷重条件下におけるさまざまな塩分の人工試験氷片の圧縮強度の測定

N. V. Fokeev

さまざまな荷重条件下における氷のクリープ現象、長時間強度、氷の機械的特性に及ぼす載荷速度の影響についての研究、また氷の強度特性に関する知識が氷科学と氷工学にかかわる多くの技術的課題の解決にとって必要とされる。

近年、単純な単軸荷重一圧縮または引張りを加えられた氷の強度、クリープおよび耐久力に関する問題の研究論文が公表されている^{3, 7, 8)}。しかし複雑な荷重条件下における氷の強度特性に関する研究結果については文献が不足している。

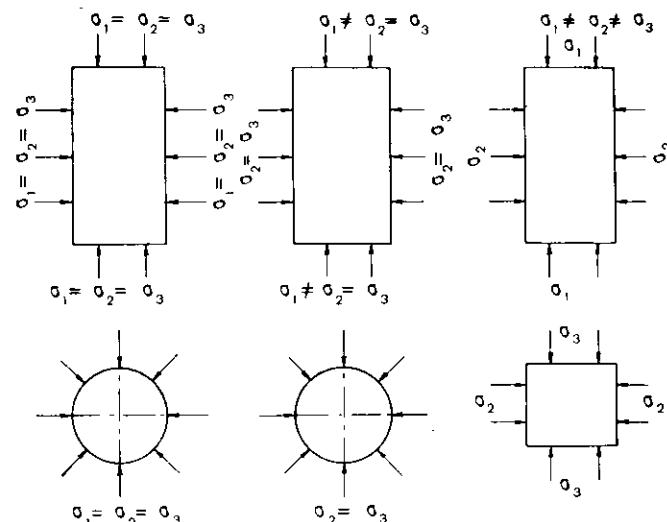
周知のように、圧縮の3軸応力状態には3つの基本タイプ即ち $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ および $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ が存在する（第1図）。岩石およびその他の各種材料の物理的・機械的特性の研究にかかわる大部分の試験は $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$ のクラスにおける不均等体積圧縮の条件で実施されている（T. Karman の手法に従って）。

T. Karman⁴⁾ は $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ の条件のもとで特有な構造の試験装置（第2図）を使って大理石および砂岩の供試体を研究した。供試岩石は直径40mm、高さ 110 mm のもので、銅製のケース内にはんだ付けされ、高圧室内に配置される。手動式ポンプにより高圧室内に圧力を作り出し、この圧力が供試体の側面を包囲し、応力 $\sigma_2 = \sigma_3$ を惹き起す。作動液としてはグリセリンが使用される。応力 σ_1 の増加に伴ない供試体は破壊されるか或いはその応力が或る一定の大きさに達するかする。

その後、上述の試験装置は改良され、載荷順序、作動液などが変更されたが、T. Karman の作動原理はそのまま変わっていない。

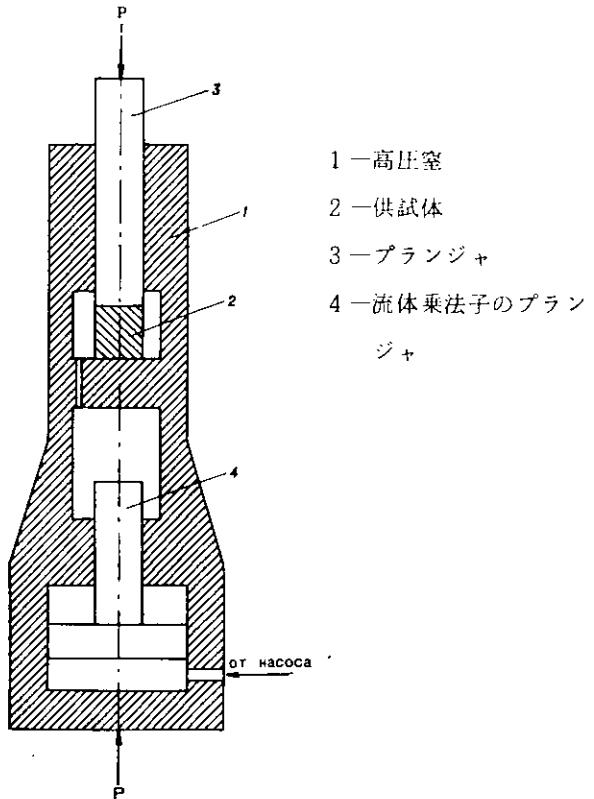
この改良例の1つはVNIMI（全ソ鉱山地球力学・鉱山測量研究所）の動力学的強度・高圧力実験室で開発された比例載荷装置であり、これはさまざまな形の応力状態（単軸圧縮と引張り、平面圧縮一引張り、平面圧縮一圧縮、平面引張り一引張り、側圧下での引張りと圧縮）および圧力（ 12×10^3 atm および 30×10^3 atm）のもとで岩石の試験研究を行なえるものである¹⁾。

ここで軸圧縮と側面圧縮の場合についてこの試験装置の動作を検討してみる。第3図から判かるように、直径30mm、長さ60mm以下の

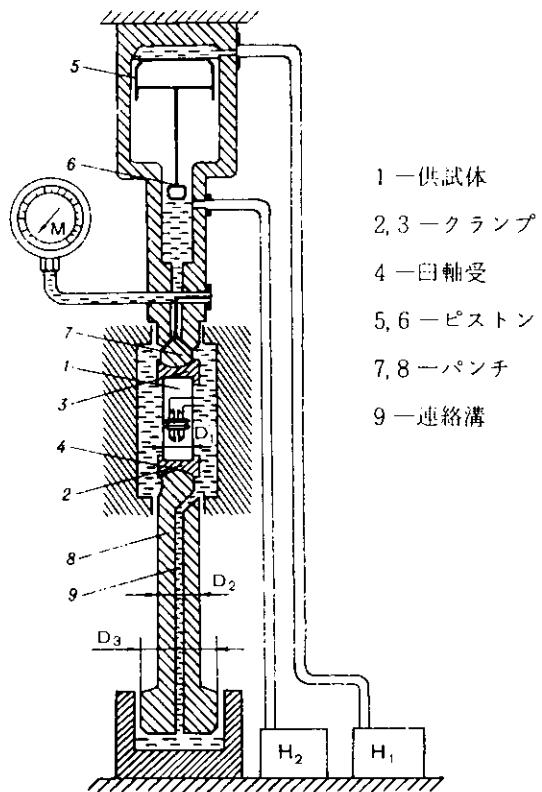


第1図 全面圧縮の条件

円筒形の供試体は上下のパンチの間に配置され、その後に高圧室内に入れられる。ポンプ H₂ によって液体をピストン 6 の下の作動容積、供試体の入った作動室の容積および下部シリンダの空所 D₃（これは溝によって作動室と通じている）にそれぞれ充満させる。この系が充填された後にポンプ H₂ を遮断し、ポンプ H₁ を投入する。後者のポンプはピストン 5 の下に圧力を作り出す。ピストン 5 の移動はピストン 6 の下に圧力を作り出し、またそれぞれ作動室および下部シリンダ D₃において圧力を作り出す。そこで供試体には応力 $\sigma_2 = \sigma_3$ が生じ、軸応力 σ_1 をもつ載荷状態が作り出される。



第2図 全面圧力下で材料を圧縮試験するための
T.Karman の装置



第3図 不均等体積圧縮条件下で材料を試験するた
めの装置の図解

側面応力と軸応力との関係は次式で決められる。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = C = \frac{F}{F_2 - F_1}; \quad (1)$$

$$F = \frac{\pi D^2}{4}; \quad F_1 = \frac{\pi (D_2^2 - D_1^2)}{4}; \quad F_2 = \frac{\pi D_3^2}{4}.$$

応力状態の種類を変えるには量Cを変えれば充分である。この変更は下部シリンドラ D_3 の直徑を変えることにより実現される。

A. A. Skochinsky 記念鉱山工学研究所の物理的・機械的特性実験研究室では $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ クラスの不均等体積状態における岩石の特性を研究するための試験装置を開発した⁵¹。この最も複雑な載荷系は3つの軸方向に荷重を作り出すためのそれぞれ互に独立した3つの系を必要とする。この装置では供試体に加えられる圧力は弾性タンクを介して液体によって伝達される。供試体は立方形でその寸法は $50 \times 50 \times 50$ mmである。3つの軸方向の圧力はプレス板とプレス板との間の相異なるプレスに設置された3台の一行程式ポンプによって作り出される。圧力の変化と載荷速度はプログラム機構によって自動制御されるプレスの仕事量に依存する。変形量の測定はベース22m、抵抗 182Ω の抵抗型歪み計によって行なわれる。歪み計を接着した後に供試体に接着材を8~10層に亘りコーティングし、それから充分に乾燥処理する。3軸方向の最大圧力は2500 atmである。

固体供試体に複雑な荷重を加える上述の装置は実験室条件下で使用するにはかなり複雑で大形な装置である。この装置での試験氷片の試験は困難な課題である。これらは大形の冷凍室内に配置するか、或いは供試体が収容される作動室を冷却するための特別な冷凍ジャケットを開発するか、いずれかが必要である。供試体自体は作動液と接触しないよう

に絶縁されなければならない。これら全てのことは相当に複雑な補助装置の開発を必要としている。

従って、プラスの融点をもつ金属、岩石、その他の材料の供試体を取扱う上で充分に推奨された上記のような試験装置は水の試験に用いるためには著しい構造上の変更無しには使用できない。

各種方式の試験装置に対する分析から V.H.I.M.I のシャフト用スタビロメータ²⁾に優位性が認められた。これは石炭および弱い岩石の体積強度を測定するためのものである。

さまざまな液体を用いて $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ タイプの応力状態を作り出す能力の有る大部分の試験装置に対するこのスタビロメータの構造上の基本的な相違点は載荷機構にあり、これはポアソン比 0.5 をもつ弾性環状シールの形に作られている。真空ゴム (Vacuum rubber) 製のシールリングは密閉容積内に存在し、載荷時に圧力を均等に全ての側に伝達し、実質上は液体と同様に働く。

冷凍室内における装置の配置上の便宜、重量の低減、また試験実施に費やす時間の短縮のために、この試験装置は解体され、高圧試験室のみが利用された。この試験ユニットには 2 台の手動ポンプが含まれる。即ち供試体に滑らかな軸荷重を加えるためのスクリューポンプと側面圧力を作り出すためのプランジャーポンプである。

第 4 図に試験装置とポンプの外観を示す。ポンプはスチール製パイプによって高圧室に接続され、パイプには圧力計が取付けられている。装置全体は 2.5 m² の面積に配置されている。

供試体の試験に際しては（第 5 図）、準備した供試体 8 がケース 5 内に収容された弾性シールリング 7 の内部にセットされる。シールリングを含むケースの上に案内面に沿ってシリンドラ 1 が設置される。プランジャ 3 の球状ビボットはその自重によって供試体の端部の面と接触している。

組立てられた形ではこの装置は締付け装置 2 のプレート上に設置されている。締付けボルトのねじ部分を通すための 3 ケの孔をもつ上側のプレートはシリンドラ 1 の上に置かれ、ナット締めされている。ポンプから伸びている油パイプの先端はシリンドラの開口に詰め込まれ、締付けられる。

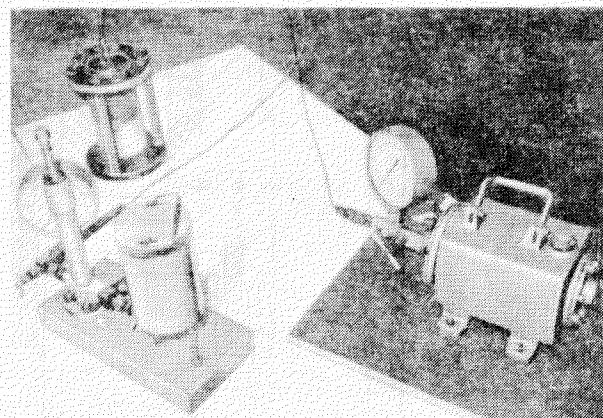
手動ポンプによってリング状プランジャ 4 の作動室内における圧力が所定の値に達せられる。その際、プランジャ 4 は供試体の側面を包囲している弾性シールリング 7 に対し金属リング 6 を介して力を伝達する。この弾性シールリングは密閉空間内に存在し、載荷時に均等に圧力を全ての側に（供試体も含み）伝達する。側面圧力の大きさは予じめ設定され、単軸圧縮時に求められる応力 σ_{com} に対し若干% の大きさである。

第 2 のポンプを用いてプランジャ 3 に対する室内に圧力を作り出す。このプランジャは供試体に対し軸方向の力を伝え、供試体は破壊に到達させられる。供試体の破壊モーメントは標準圧力計の目盛りの指示値に従って確定される。

実際の実験では塩分のさまざまな 500 本以上の氷片を試験した。これら全ての供試氷片は直径 48 mm、長さ 74 mm の円筒の形にして用いた。ポンプおよび試験装置全体のシーリングは 0 ~ 23 °C の温度領域において何らのトラブルも起さずに作動した。

スタビロメータの主要な技術的特性

供試体の直径	50 mm
" 高さ	75 "
供試体に対する最大軸荷重	1000 kg/cm ²
" 最大側面荷重	500 "
流体系内の作動液の圧力	1500 "



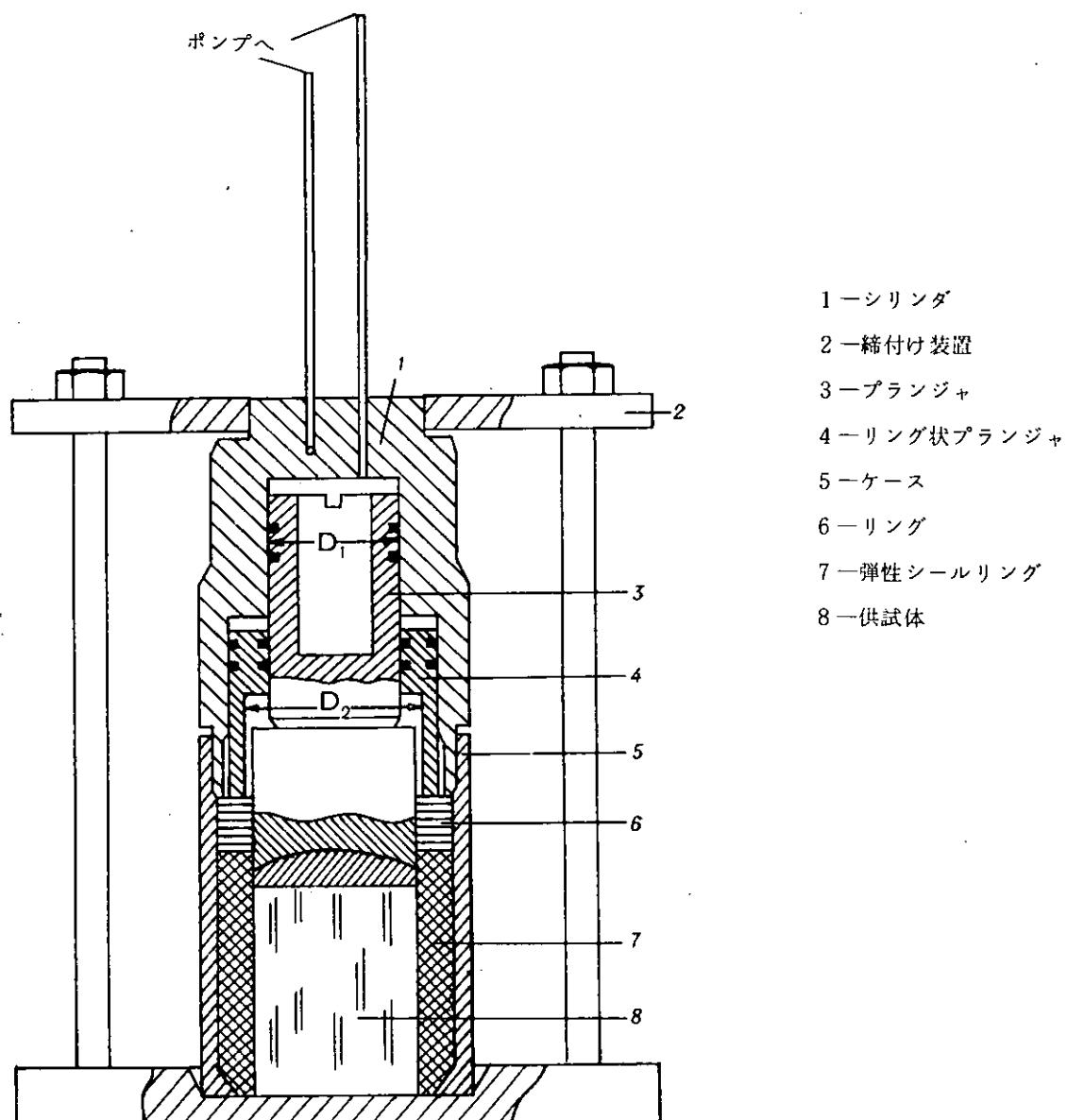
第 4 図 試験装置と付属ポンプ

以上のように、この試験装置を用いれば、全面圧縮条件または下記のタイプの不均等体積応力状態におかれた供試水片についてシリーズテストを実施できる。

$$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 \quad (2)$$

ここで主要な法線応力は次式で求められる。

$$\sigma_1 = \frac{P_1 S'_1}{S_1} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3)$$



第5図 試験装置の図解

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{P_2 \cdot S_2'}{S_2} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (4)$$

ただし、 P_1 と P_2 一それぞれ供試体の破壊時の圧力 (kg/cm^2)

S_1 一供試体の断面積 (cm^2)

S_2 一供試体の側面積 (cm^2)

S_1^1 一ピストン D_1 の断面積 (cm^2) (第5図参照)

S_2^1 一ピストン D_2 の断面積 (cm^2) (第5図参照)

単軸圧縮時の限界強度 σ_{com} を知り、またこの σ_{com} に対する或る一定のパーセント値を与えられれば、この試験装置に対する所要側圧を次式から計算することができる。

$$P_2 = \frac{S_2 \cdot \sigma_2}{S_2^1} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (5)$$

固体の機械的特性に関する研究から試験装置に対し外力と変形との間の関係が提示される。

固体に外力が作用するときその固体中の弾性変形、またその後に塑性変形の克服は破壊に終わる。この破壊はその固体に限界強度を超える応力が発生したときに起きる。限界強度の大きさは応力状態のタイプ（線応力状態か体積応力状態か）やその他の諸要因によって左右される。

水盤の信頼性、変形および破壊に関連した実際上の課題を解決するためには水盤の機械的特性に関する信頼のおけるデータを入手することが必要となる。

しばしば、このようなデータの値は破壊されなかった水盤の機械的特性と状態の計算と解析に際しいかなる理論を適用するかによって決まる。

上述の課題の見地からみれば、実験室内試験で求められる供試水片の機械的特性はそこで生じる諸プロセスの性質と物理的意味を理解するには役立つものの、実際の水盤の特性を必ずしも常に正確に反映しているとは限らない。複雑な全面圧縮の条件下における機械的特性の研究はそれが自然の状態に近づいたものである故に大きな実際面上の意義をもっている。

既に明らかかなように^{6, 11)}、連続均質媒体は被変形体の力学の物理模型とされている。このような媒体の破壊過程は物体を幾つかの部分に分解する過程として描かれ、その分解は切断面での分離によっても、また或る部分が他の部分に対し転位し完全な分離に到ることによっても実現される。

ここでまた結合力の克服、従ってまた剥離および剪断に対する強度についても考慮する必要がある。剥離は法線応力の作用下で起き、剪断は接線応力の作用下で生じる。

被変形体の力学領域の1つにいわゆる工学的強度理論があるが、その構築には連続媒体模型が用いられる。

現在、下記の4つの主な強度理論が存在する。

- 1) 最大法線応力の強度理論 (17世紀にガリレイによって提唱された)
- 2) 最大線形変形 (延び) の強度理論 (1682年にE. マリオットによって提案された)
- 3) 最大接線応力の強度理論 (1773年、C. A. クーロンによって提唱された)
- 4) 全ポテンシャルエネルギー (形態変化) の強度理論 (1885年、ベルトラによって開発された)

これらの理論に関する詳細な説明はG. N. Kuznetsov⁶⁾ およびM. M. Filipenko - Borodich¹¹⁾ の労作で示されている。

第3の理論の変形の1つはD. モールの強度論であり、これは現代の理論の1つに挙げられる。この理論の根底に置かれている命題は「主要な中間的な応力は材料の強度に対し非常に僅かな影響を与えるにすぎず、材料強度は基本的には主要な法線応力の最大値 σ_1 および最小値 σ_3 によって決められる」とされている。

実験データに基づいて、さまざまな応力状態について材料の限界状態に対応する決定円周 (determining circle) を作図すれば、この円周はモールの円形ダイヤグラムに沿って位置付けられ、これらを包絡し、限界包絡線と呼ばれる滑

らかな曲線を描くことができる。従って、D. モールの理論に従えば、強度は決定円周の半径（第6図）

$$D_1 A = D_1 C = \frac{DC - DB}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_{max} \quad (6)$$

によって決められる最大接線応力に依存すると共に、材料の応力状態のタイプにも依存する。後者はモールの円形応力ダイヤグラムにおける決定円周の位置によるか、或いは許容最大および最小主応力の大きさ（これは次式で与えられる決定円周の中心の位置を決める）によって特徴付けられる。

$$DD_1 = \frac{DC - DB}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (7)$$

限界包絡曲線は材料試験の結果に基づいて作図されるから、この理論は検証試験の結果によって充分に裏付けられる。

モールの強度理論はさまざまな応力状態における材料特性の詳細な研究に立脚したものであるので、個別的な特性を考慮している。しかしモールの包絡円座標の短所は一方では各種の氷に対して成立するような、また他方では数学的な関係では単純な式で表わされるような普遍的解析的表現の限界曲を得ることができない点にある。

文献では複雑な荷重条件の下での氷の圧縮に関する研究データが非常に少ない。V. V. Lavrov⁷⁾による試験は非常に少数のものであり、またそこで得られた個数の数値も限界強度に及ぼす供試体寸法の影響を明らかにすることができない。また試験の設定方法論も明らかでない。

カナダの学者R. フレーダーキングの論文¹²⁾には2軸変形を加える能力をもつプレスを用いた氷の試験結果が述べられている。彼は2軸圧縮時の破壊応力は単軸圧縮時のそれのほぼ2倍であることを確認している。

筆者等はさまざまな塩分の試験片氷をさまざまな温度のもとで試験した。

供試氷片は或る一定の側面圧力のもとでシリーズ毎にテストした。第1のシリーズでは単軸圧縮に対する限界強度(σ_{com})の20%の側圧を加え、第2のシリーズでは σ_{com} の40%の側圧を与え、以下同様にして側圧を増大させて行き、最大の側圧は σ_{com} の4倍とした。軸方向の荷重は供試氷片が破壊されるまで持続して加えた。

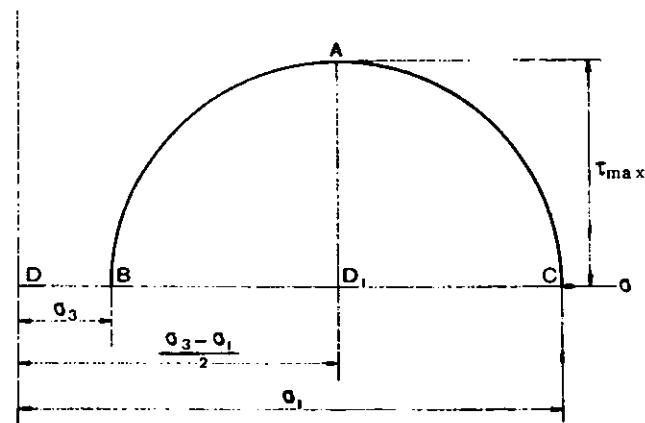
試験データを式(3)および(4)を用いて処理した結果に基づいてモールの包絡曲線の形のグラフを作成した。

下記に示すように単軸圧縮に対する限界強度 σ (kg/cm²)、塩分S(%)および温度t(°C)がそれぞれ或る一定の値であるときの限界強度状態の曲線をモールの包絡円の形で第7図(a), (b), (c)に示す。

各グラフの包絡曲線はほぼ同じ塩分に対するものであるが試験温度はさまざまである。これらのグラフから判かるように塩分が等しいとき温度が低くなれば氷の強度が増大する。温度と塩分が一定で、側圧が増加するときにも氷の強度は著しく増大する。

固体としての氷のこのような挙動は各種材料に対して行なわれている研究の結果^{1, 10)}と一致している。

下記のようにさまざまな塩分S(%)と単軸圧縮限界強度 σ_{com} (kg/cm²)およびほぼ同一の温度t(°C)におけるモ



第6図 モールの円形ダイヤグラムの応力決定円周の作成図

第7図	曲 線	σ (kg/cm ²)	S (%)	t (°C)
(a)	1	33.6	0	- 2.0
	2	35.04	0	-11.0
(b)	1	20.3	4.39	- 3.0
	2	29.3	4.39	-10.0
(c)	1	7.5	34.9	- 5.0
	2	8.7	32.9	-10.5
	3	12.7	35.3	-23.0

ルの包絡円を第8図に示す。

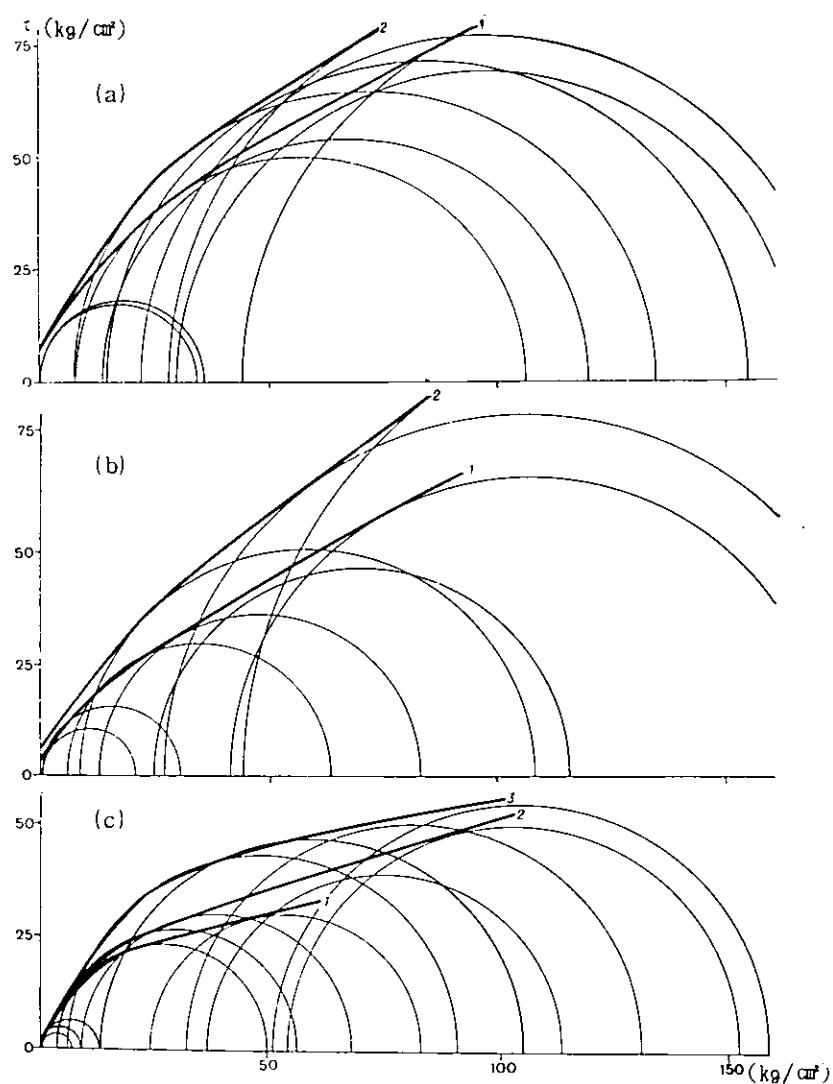
これらのグラフから水の強度は塩分の低下につれて増大することが判かる。強度の増加が最も顕著に現われているものは塩分8.7%以下に対応する包絡曲線である。塩分の低下に伴なう水の強度のこのような増大傾向はV.V.Lavrovの論文⁷⁾でも認められる。各種材料の機械的特性の研究^{9), 10)}では、しばしばこれらの強度は破断面に対する法線方向の応力と一緒に増大する供試体内の接線応力の大きさによって決められることが確認されている。圧力の増加に伴ない接線方向の破壊応力はそれぞれ所与の材料にとって或る一定の値に指向する。 $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ の形の不均等全面圧縮の場合には最大接線応力は下記のようになる。

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (8)$$

上掲のグラフから判かるように、モールの包絡円は普通の形を有しており、座標原点の付近では内部摩擦角が変動している曲線区間が存在し、座標原点から遠ざかるにつれて包絡円は次第にゆるやかになる。

しかし、大理石、石灰岩、或る種の砂岩といった材料¹¹⁾では包絡円が水平位置と完全に交叉し、その際、内部摩擦角が零に近づくとき、モールの理論は最大接線応力の強度論（既述の第3の理論）に移行するが、これと相違して、さまざまな塩分の水に対する包絡円は上記のように明瞭に現われた指向性を有していない。

さまざまな塩分の水の包絡円の傾斜角はあたかも左右に分割される様相を呈し、塩分の低い水の包絡円は傾斜角の増大、塑性特性の喪失、第3の強度理論からの退去の傾向を有するのに対し、塩分の高い水の包絡



(a)一淡水水, (b)一塩分4.39%の水, (c)一塩分34.9%の水

第7図 モールの包絡円の形で示された限界強度曲線

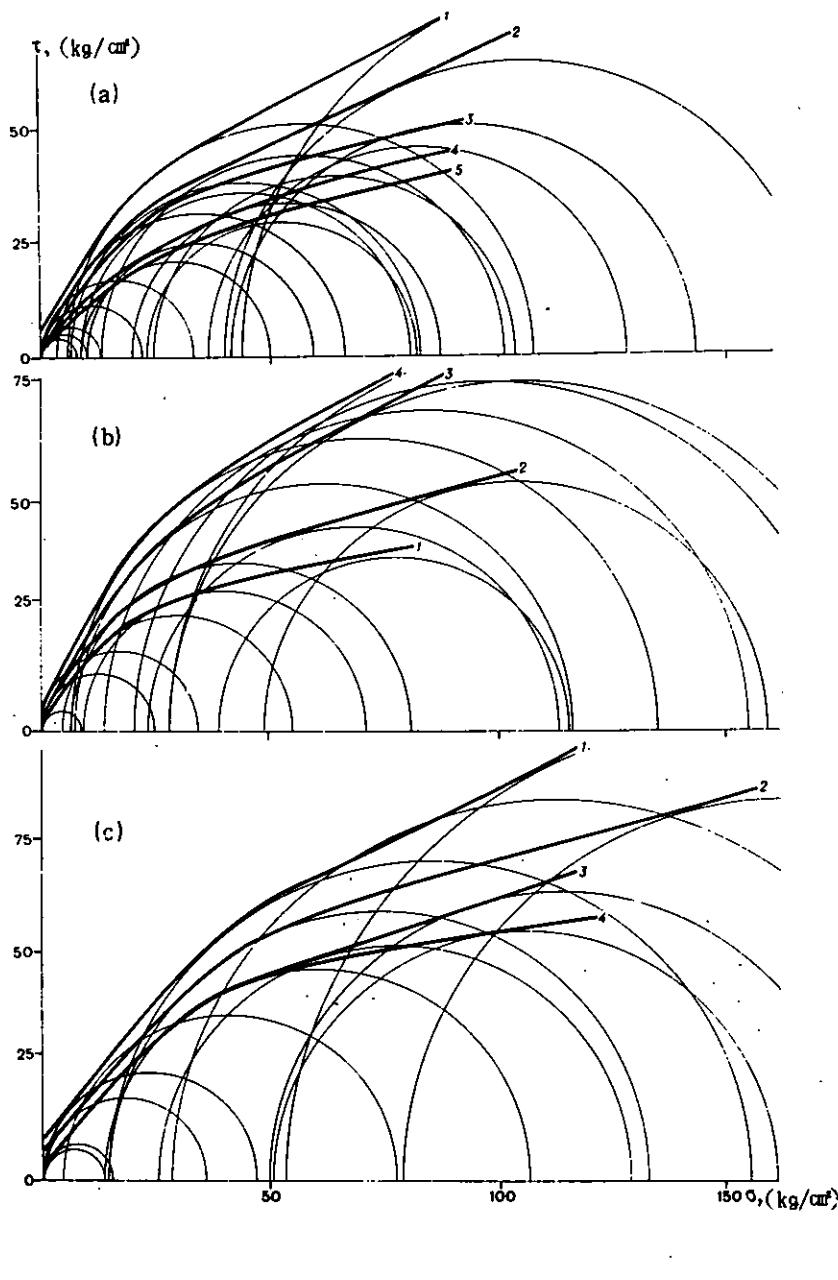
第8図	曲 線	σ (kg/cm ²)	S (%)	t (°C)
(a)	1	33.6	0	-2.0
	2	21.8	8.7	-3.0
	3	12.9	17.4	-3.5
	4	9.5	22.6	-4.5
	5	7.5	34.9	-5.0
(b)	1	8.7	32.9	-10.5
	2	24.6	19.7	-11.5
	3	24.4	8.7	-8.0
	4	35.0	0	-10.5
(c)	1	48.0	8.3	-23
	2	35.5	17.8	-18
	3	15.2	25.9	-18
	4	12.7	35.3	-23

円では或る一定の接線応力値への指向が顕著に現われている。

このような水の挙動は他の一連の諸材料との相違点であり、またこれが水に特有な特性である。

引 用 文 献

- 1) 岩石の機械的特性図集、全ソ鉱山地球力学・鉱山測量研究所出版、p 3~5; p 20~70 (1968年)
- 2) Bich A. Ya., Bazhenov A. I. : 採掘場周辺の岩石の機械的特性を測定するための装置。<全ソ鉱山測量研究所報告> vol. 66, p 41~43 (1966年)
- 3) Voitkovsky K.F., Golubev V. N. : 水の機械的特性と構造との関係。<水とその水理構造物に及ぼす作用>シンポジウム提出論文集、p 3~8 (1972年)
- 4) Karman T. : 全面圧縮試験<技術における新しいアイデア>論文集No 1 (強度理論) p 30~35 (1915年)
- 5) Koifman M. L., Ilitskaya E. I., Karpov V. I. : 体積応力状態における岩石の強度。p 10~18. Nauka 出版 (1964年)
- 7) Lavrov V. V. : 水の変形と強度。p 93~94. Gidrometeoizdat 出版 (1969年)
- 8) Ramseier R. O., Dikens D. F. : 多結晶淡水水の引張り、圧縮、曲げ強度に関する新しい実地および実験室内試験方法。<水とその水理構造物に及ぼす作用>シンポジウム提出論文集、p 164~168 (1972年)
- 9) Ruppeneit K. V. : 岩石の機械的特性。p 10~28. Ugleizdat 出版 (1956年)
- 10) Stavrogin A. N. : 岩石の変形と強度。<全ソ鉱山測量研究所報告>vol 170, p 68~69 (1968年)
- 11) Filonenko-Borodich N. I. : 力学的強度理論。p 14~30. モスクワ大学出版局 (1968年)
- 12) Frederking R. : 柱状一顆粒状水の圧縮試験における面変形に関する予備的データ。<水とその水理構造物に及ぼす作用>シンポジウム提出論文集。p 26~30 (1972年) .



(a) -2 ~ -5 °C (b) -8 ~ -11.5 °C (c) -18 ~ -23 °C
第8図 各温度領域におけるさまざまな塩分の水の限界強度状態の曲線

§ 20 高圧衝撃噴射水による氷の破壊

Z. I. Shvaishtein

筆者等は以前に高圧連続噴射水による氷の切断に関する実験研究の結果を報告した²⁾。この研究の主な目的は静止水域内に開水面を切り開くための新しいタイプの船である切氷船¹⁾（ice -cutter ship）の作業にこの高圧連続噴射水システムを実用化できるかどうかを明らかにすることにあった。

高圧噴射水による氷の切断は普通の碎氷船およびその他の船舶が比較的薄い（氷厚 0.5 ~ 0.6 m）水域を通過できるようとするうえで、またさまざまな氷技術上の課題を解決するうえで極めて有望な方法である。しかし、更にもっと厚い氷、特に氷丘氷の場合には連続噴射水による切断の速度と効果は著しく低減し、それに要するエネルギー消費量が非常に増大する。従って、苛酷な条件の水域で、特に圧縮時や膠着時に、碎氷船や船舶の通過条件を緩和するためには、また水利施設や湾港施設を氷の圧力から保護するうえで、インパルス式の高圧ジェット水によって氷を破壊した方が適切である。

現在、水噴射装置（ハイドロモニター）はさまざまな産業分野で成功裡に実用化されている。その使用実績（採石場、採炭現場、等々における）から鉱物の採掘、その他の目的に対するこの方法の技術的・経済的メリットが大きいことが明らかになっている。衝撃噴射流による氷の破壊に関しては、筆者等が実施した試験研究が最初の試みであり、ソ連でもまた諸外国でもこの種の研究は今迄他に実施された例をみない。

本稿では、実験室内および実地（オビ湾のノボシビルスク）で行なった高圧衝撃噴射水による氷の破壊試験の若干の結果を報告する。この研究は科学アカデミー正会員 L. A. Lavrentiev および B. V. Voitsekhovsky の総指揮のもとに北極・南極研究所水実験研究室、レニングラード鉄道輸送技術研究所流体力学科および科学アカデミー水力学研究所が共同して実施した^{*}。

この方式による衝撃水の流出に関する概念および基本理論並びにこの水力システムの基本回路構成については科学アカデミーシベリヤ支部水力学研究所の資料に従って紹介する。

上記水力学研究所およびその他研究機関による研究から次のことが確認された。即ち、この水力システムのパラメータ、とりわけ出力、を保持したもとで噴射水の動圧の増大が衝撃式水力装置内で達成され、そこでは瞬間出力の増大は比較的緩やかなエネルギー蓄積と非常に急激なエネルギー放出によるか、または水力システムに特別な機器を接続する方法によるかして実現される。このような機器を用いれば液体に瞬間に付加的なエネルギーが伝達され、それによって噴流の速度が急激に上昇する。

衝撃において大きな流速を得る最も簡単な方法は出口ノズルの大きな断面を閉塞する方法で、その原理は次のようになっている。

半径 R_0 の大きな出口断面をもつノズルに或る速度 u_0 の流体が流れるとする。時刻 t_0 において出口断面の一部が瞬間に閉塞されるとき、出口半径 r_0 は下記の状態に保たれる。

$$\frac{r_0^2}{R_0^2} \ll 1$$

出口ノズルの閉塞後に発生する水撃は流体の制動を惹き起し、この減速領域内の圧力を急激に上昇させ、小さな断面を通過する流速を増大させる。

上述の原理を採用した水噴射装置は 70 ~ 100 atm 程度の比較的大きくない動圧が得られる。このような噴射水装置は岩石、石炭の採掘、その他に実用化されている。

*) 一この研究成果に基づき発明・発見国家委員会によって B. V. Voitsekhovsky, V. P. Nikolaev, I. S. Peschansky, N. T. Rebnitsky, V. S. Fokeev, Z. I. Shvaishtein, G. Ya. Shaikhet は〈船舶通航のための氷の破壊方法〉という件名の特許権 U D C № 629, 124 · 791. 2, クラス 65a, MPK V 63 V を与えられた。

ソ連科学アカデミー高圧物理研究所で開発した装置は噴出直径 $1 \sim 1.2 \text{ mm}$ において 1000 atm またそれ以上の動圧を達成できるものである。このような高い圧力のもとでは花崗岩のような硬い岩石についてもやは破壊ではなく切断が起きる。

各材料にはそれ以下の圧力では破壊が起きなくなる最小限の動圧がそれぞれ存在する。動圧の増大につれて材料の破壊が大きくなり、強度特性を無視することのできる累積理論から決められる値に近づいて行く。

この場合、岩石中に噴射流によって穿たれる孔の長さ L は次式で求められる。

$$L = l \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}$$

ただし、 l = 噴射流の長さ

ρ_1 = 噴射流の密度（水の場合 1 g/cm^3 ）

ρ_2 = 岩石の密度

上記の式が成り立つ場合に $0.5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^6 \text{ atm}$ といった非常に大きい圧力を産業設備を用いることはこのような噴射水流を得るために極めて大きなエネルギーが消費されるので不適当である。従って噴射流の利用効果の観点からみて最適な圧力が存在し、その大きさは材料の限界強度と同程度のものである。

衝撃噴射流を得る極めて便利な方法はいわゆる慣性法である。その要点は次の通りである。即ち、或る一定量の液体（シリンダ）が何んらかの手段によって或る速度 u_0 まで增速され、絞り可能な円錐形ノズルに送り込まれると、放出される噴射流の速度は下記の連続性の条件から決められる。

$$V = u_0 \frac{D_2}{d^2}$$

ただし、 D = ノズルの入口断面の直径（シリンダの直径）

d = ノズルの出口断面の直径

u_0 = ノズル入口前の液体の最前面の速度

衝撃噴射水流を発生させる装置の基本的な特徴は装置に連続的に供給されるエネルギーを蓄積するシステムである。数種類の型式のこのような装置がソ連科学アカデミー・ペリヤ支部水力学研究所で開発され試験された。

このような方式に従って極めて効果的なタイプの高圧水力装置—衝撃式水噴射装置—が製造された。そこでは高圧の噴射水流は重いピストンを駆動して放出される。この衝撃式噴射装置ではエネルギーの貯蔵機能を果すものは圧縮空気である。ピストンを使って或る量の空気を圧縮すれば次第にエネルギーが蓄積され、供給側の水力システムにおける水の圧力に近い圧力に達する。

或る時点において、水が存在する側のピストンから圧力を放出すれば、圧縮空気の働きを受けてピストンは駆動を開始し、圧縮された気体に蓄積されたエネルギーはピストンの運動エネルギーに転化する。そこでこのエネルギーは次のようにして噴射流に伝達される。即ち、シャフトと円錐形ノズルを満している水の若干量をピストンによってノズルから絞り出す。

この衝撃式水噴射装置は高い動圧の液体を作り出すためのものであり、主として高圧噴射水流を作り出すのに利用される。その用途は石炭採掘、露天掘りでの冲積岩の破断、鋳造物からの高強度の鋳型砂類の除去等である。

衝撃式噴射装置は取扱いが安全で、構造が簡単で、作業中の信頼性が高く、且つ小形である。

現在、ソ連科学アカデミー・ペリヤ支部水力学研究所によって若干種類の型式のこの装置が開発され、試験されている。

筆者等は各種構造様式の水噴射装置のうちの1つについてオビ海で水の破壊試験を実施した。この水噴射装置はシリンダとそこに組込まれたピストンから構成される。シリンダの空所はピストンから一方の側に圧縮気体（空気）が充填され、低圧室として働き、この室の側へピストンを強制移動させてエネルギーを蓄積する。

他方の側の空所は水を充填され、高圧室の役を果す。この室の高い圧力はそこに存在する液体について圧縮気体が膨張するときの昇圧過程で運動エネルギーを得たピストンによって作り出される。水噴射装置には気体圧縮用の受容器が配備されている。これらは低圧室の底部付近に配置され、シリンダの側壁に設けられた孔を介して低圧室と連なっている。

高圧室は液体を放出するための孔を1ヶ（それ以上も可能）有する。シリンダの側壁では高圧室側からスリーブを通して加圧下で液体が送り込まれる。この液体はピストンを低圧室側に移動させ、また高圧室を満すためのものである。

噴射流の形成とその射程距離の増大は出口の孔に接続されたはめ込み式ノズルを用いて実現される。出口孔の周期的な開閉にはそれぞれ給水管および受容器と連結されたジャッキが用いられる。一方のジャッキは流体圧式であり、他方のジャッキは空気圧式のものである。水噴射装置への給水には構造様式に応じて20～100 atm の圧力の水力ポンプが使用される。発射頻度はポンプの容量に依存する。個々の単独射撃も可能である。衝撃の長さは $2 \sim 3 \cdot 10^{-3}$ sec である。

< 水噴射装置の技術的特性 >

寸法：長さ 2550 mm, 幅 600 mm, 高さ 700 mm

ローラ車輪付きシャーシ装備。軌道幅：545 mm

最大高速発射回数：20 回/min

発射1回当たりの最大エネルギー： 20×10^3 kg-m

ノズル直径30 mmで空気中に発射するときの水噴射装置のヘッドにおける最大圧力：5000 atm

1回の発射によって放出される液体の量：2 ℥

発射1回当たりの液体使用量：3.6.5 ℥

（使用した水はポンプに戻すことができる）

受容器による充填の最大圧力：50 atm

（充填用の気体としては空気か窒素だけが許容される）

充填圧力下での空気流量（発射1回当たり）：0.5 ℥

受容器の総容積：100 ℥

シリンダ内の高圧空所の容積：3.9.6 ℥

水噴射装置へ供給するための液体の所要最大圧力：85 atm

給水ポンプの最大容量：20 ℥/sec

水噴射装置の重量：1300 kg

ソ連科学アカデミー・ベリヤ支部の水力学研究所で試作された初期の衝撃式水噴射装置は岩石の破碎を用途としたものであった。

これらの試験から炭層、カリウム塩鉱床の開発等におけるその使用効果と適用性が確認された。衝撃式水噴射装置による氷の破壊に関する最初の実験室内試験は1964年に実施された。その場合、 $60 \times 60 \times 70$ cmの氷塊を衝撃式水噴射装置のノズルから $4 \sim 5$ mの距離にある特別な試験台に設置した。このような大きさの氷塊はノズル出口の噴射水流圧力が ~ 3000 kg/cm²（ノズルの直徑は ~ 10 mm）のとき1回の射撃で細片に破碎された。1回の射撃に要した水量は $1 \sim 1.5$ ℥であった。

その後、オビ海のノボシビルクスで1964年と1965年に実地試験が行なわれた。これらの試験の実施に当っては、衝撃噴射流による氷の破壊特性を実地条件のもとで明らかにし、エネルギー消費率、1回の射撃で破壊される氷の量、その他の諸特性を求めるために留意した。冬期の減水の後に海岸の砂質地面に厚さ $0.8 \sim 0.85$ mの氷が存在していた。試験実施時の空気温度は $-2 \sim +4$ °Cであった。氷の破壊は衝撃式水噴射装置で行なわれた。

< 衝撃式水噴射装置の技術的特性 >

寸法：長さ 2000 mm, 幅 600 mm, 高さ 600 mm

放出される噴射水の最大動圧：8000 kg/cm²

受容器による充填の最大圧力：60kg/cm²

1回の射撃で放出される水量：1 ℥

1回の射撃に要する水量：32 ℥

ノズルの直径：11.1 mm

放出される噴射水流の直径：11.2 mm

最大高速射撃回数：30 回/min

重量：1000 kg

水噴射装置は物上げ能力 6 T, ブームの長さ 10 m

のトラッククレーンのフックに吊下げられた。水噴

射装置への給水は 75 HP のピストンポンプから行な

われた。このポンプの能力は作動圧力 90 kg/cm² のとき 4 ℥ / sec である。受容器にはタンクから空気を充填した。衝撃式水噴射装置の全景を第 1 図に、水盤破壊試験時の諸設備の配置状況を第 2 図にそれぞれ示す。また 6 回の射撃の後に破壊された水の状態を第 3 図に示す。

100 回の射撃（そのうち 30 回は試験）を実施した結果、水塊に長さ 6.5 m, 幅 2.6 m, 深さ 0.8 m の通路が開かれた。射撃 1 回につき平均 0.193 m³ の氷が破壊できた。平均の高速射撃回数が 30 回/min のとき 1 時間に $30 \times 60 \times 0.193 = 347 \text{ m}^3$ の氷が破壊された。

圧力 25 atm で空気を水噴射装置の受容器に充填したとき 1 m³ 当りの水の破壊に要するエネルギーは下記の通りである。

$$E = \frac{Q \cdot P}{\eta \cdot n_{shot}} = \frac{32 \times 40}{0.7 \times 0.193} = 9500 \ell \times \text{atm/m}^3 = 0.26 \text{ KWh/m}^3$$

また圧力 40 atm で空気を容器に充填するときは次のようになる。

$$E = \frac{Q \cdot P}{\eta \cdot n_{shot}} = \frac{32 \times 60}{0.7 \times 0.193} = 14200 \ell \times \text{atm/m}^3 = 0.39 \text{ KWh/m}^3$$

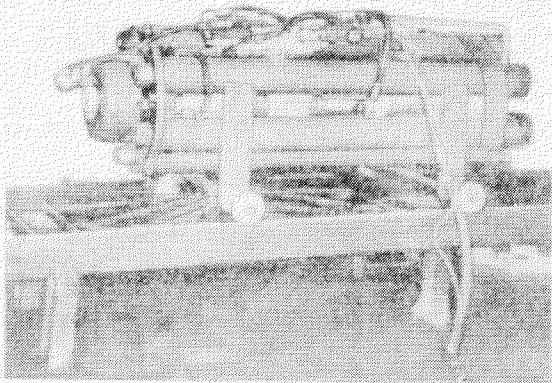
ただし、Q—射撃 1 回当たりに要する水量

P—ポンプ出口の水の圧力

n_{shot}—1 回の射撃で破壊される水の量

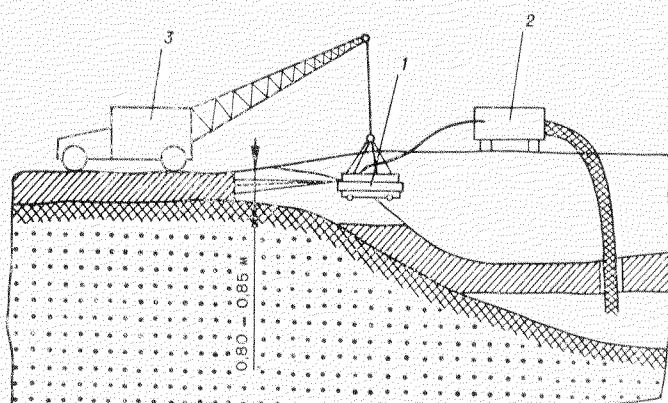
η—装置の効率を考慮した係数

±30° の範囲内での入射角の変更は水の破壊結果に本質的には影響を及ぼさない。ノズルから標的までの距離の変更による影響は次のように現われる。即ち、距

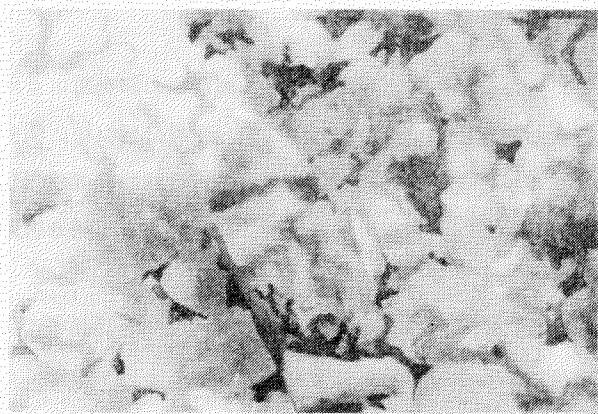


第 1 図 衝撃式水噴射装置の全景

1—水噴射装置 2—ポンプ 3—トラッククレーン



第 2 図 衝撃式水噴射装置による水盤破壊試験における各設備の配置図



第 3 図 6 回の射撃の後に破壊された水の様相

離 0.5 ~ 1.5 m では氷はかなり細かい片 (3 ~ 5 dm³) に破碎されるが、距離 2 ~ 4 m ではもっと大きい氷片 (10 ~ 15 dm³) に破碎される。

北極の水域における船舶の通航条件を緩和するために、また非北極海域および河川における冬期の船舶航行の計画に際して、流水または定着氷を破壊または弱体化するために上述の衝撃噴射水方式を適用する可能性に大いな関心が寄せられている。この目的で1965年に筆者等はノボシビルスク水力発電所区域のダムの浮氷について破壊試験を行なった。

この試験の目的は浮遊している氷塊の破壊特性、亀裂の発生状況、水噴射装置の能力、所要エネルギー消費量などを明らかにすることにあった。氷の破壊は噴射水流の直径が ~30mm となる前述よりも強力な水噴射装置を使用して行なった。水噴射装置はノボシビルスク水力発電所のダム上に門形クレーンで垂直に吊下げた。試験実施時の気温は -2 ~ +2 °C で、氷盤の厚さは 0.5 ~ 0.8 m であった。

この試験は予備試験的な性質のものであったが、第1表に示すデータから判かるように、氷盤の厚さが増すと1回の射撃で破壊される氷の体積が大きくなる。これは、多分、薄い氷を破壊するときには厚い氷の場合と較べて噴射水の出力の使用効率が低いためである。

第1表 水噴射装置による氷の破壊試験結果

試験 No.	氷塊の 面積 (m ²)	平均 氷厚 (m)	氷塊の 体積 (m ³)	氷塊を破 壊する射 撃回数	1回の射撃で 破壊された氷 の面積 (m ²)	1回の射撃で 破壊された氷 の体積 (m ³)
1	70	0.5	35	7	5	10
2	50	0.8	40	6	6.6	8.3
3	35	0.6	21	4	5.3	8.9

第4図は衝撃式水噴射装置で破壊した氷盤の面積と体積を氷厚との関係で示す。例えば氷厚 1 m のとき点 0 は破壊面積 7 m² および破壊体積 7 m³ に対応する。

恐らく、供試水噴射装置に対するその他の諸条件が同じ場合、この点が最適作動状態に該当することになる。射撃 1 回当たりの水噴射装置の平均作業能力 (q_{av}) は 5.6 m³ および 9.1 m³ となる。高速射撃回数 30/min *), 氷厚 0.5 ~ 0.8 m のとき単位時間当たりの作業能力は下記となる。

$$\text{体積については } \frac{6.0 \times 6.0 \times 5.6}{3} = 6720 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{面積については } \frac{6.0 \times 6.0 \times 9.1}{3} = 10920 \text{ m}^2/\text{h}$$

ここで比較のために1964年に実施した試験の結果を示せば、海岸の氷を衝撃式水噴射装置 IV-5 によって破壊した際のその能力は 347 m³/h であり、この値は浮遊状態にある氷盤を破壊する能力の $\frac{1}{20}$ である。更に、IV-9 型機の出力は IV-5 型機の出力よりも著しく大きい。

< 結 言 >

- 1) 本稿で示した衝撃式高圧噴射装置は苛酷な条件の水域における碎氷船および船舶の航行条件の緩和、水力施設および湾港施設の氷圧による被害の防止を目的とした氷の破壊または個々の水域の弱体化に成功裡に適用できる。
- 2) 実施した諸試験が予備試験的な性質のものであったにも拘わらず、試験結果からこの衝撃式水噴射装置による氷の

*) この数値は原文の印刷不鮮明により確かでない。

破壊に要するエネルギーは僅かであり、固い地面の上の氷に対して $0.2 \sim 0.3 \text{ KWh/m}^2$ 、また浮遊状態にある氷に対しては $0.01 \sim 0.015 \text{ KWh/m}^2$ であることが判明した。

- 3) 噴射水の動圧、はめ込みノズルの直徑、ノズルから氷の表面までの距離などのそれぞれ最適値を求めるためにさまざまな厚さ ($0.5 \sim 3 \text{ m}$) と強度の淡水水および海水について破壊試験を今後も続ける必要がある。
- 4) 氷の破壊を専用とする衝撃式水噴射装置の構造様式を開発すべきである。
- 5) 北極および非北極不凍海域において実際の条件のもとで碎氷船またはその他の船舶から衝撃式水噴射装置を用いて氷の破壊試験を行なう必要がある。

引 用 文 献

- 1) Peschansky I. S., Shvaistein Z. I. : 切氷船とその作業原理 (固定水域内に開水面通路を開設するための新型船) . <北極・南極研究所Rotapr.> 1966年
- 2) Shvaistein Z. I. : 高圧連続噴射水による氷の切断. <北極・南極研究所紀要> vol. 300, p. 168 ~ 177 (1971年)

Ⅲ 北極・南極研究所紀要第326巻「雪氷の物理学的調査法」(1975年)抜粋

§12 実験室試験および実地試験で孤立支柱構造に与える氷圧

S. A. Vershin, E. M. Kopaigorodsky

V. V. Panov, Z. I. Shvaishtein

近年、北極の沿岸地域、ソ連および諸外国（アメリカ、カナダ、日本）の凍結海域およびその他の水域において水理施設およびその他の土木構造物の建設が多くなったことと関連して、この種の建造物に対する氷の作用に関する研究問題、また氷の破壊作用に対する保護方法、手段の開発問題が大いに注目されるようになった。

水理構造物およびその他施設の設計に関連して特に关心をもたれる事項は孤立している支柱によって支えられる建造物に対する氷荷重の計算問題である。

海中の孤立支柱に加わる氷荷重は主としてその支柱の大きさと形状また氷の厚さと強度、並びに氷盤の運動速度に依存する。予備的に実施した実験室内試験の結果に依れば、普通の（模擬されない）氷の場合に氷と建造物との相互作用の様相がゆがんだものとなり、得られたデータは建造物の設計および建設に基礎データとして役立たないことが判明した。従って試験水槽で実験用水盤を作る際には可能な限り実際の氷に似た構造の氷が得られるようにすると共にその強度がそこで採用した縮尺率に対応するようにしなければならない。

実験室の試験で主な関心事項となったものは試験方法の開発、運動する氷盤と孤立支柱模型との相互作用の実験研究およびこの相互作用に関する各種要因の解明である。

実地試験は実験室内試験の仕方に準拠して実施され、この種の試験は初めて行なわれたにも拘わらず、そこで得られた結果は試験方法の改良にとって貴重なものであったばかりでなく、模型試験によるデータの実際面への換算を充分な精度のもとに行なうことのできるものでもあった。

実際条件のもとでは、孤立支柱の形をした海中構造物は固定されており、運動する氷盤の作用を蒙る。これと類似した様相を氷海試験水槽で再現することは事実上不可能である。従って、試験を行なうためには次のような方法が採られる。即ち、試験水槽台の上に固定された2本の案内溝をワインチによって移動するトロリーにしっかりと固定された模型支柱が凍着した静止氷盤中を運び回される。模型支柱とトロリーを結合しているスチールパイプが測定用片持ばりの役割をする。この測定用片持ばりは試験実施前に較正され、模型支柱の運動に対する氷盤の抵抗は片持ばりの曲げ変形によって求めた。この曲げ変形は抵抗型歪計を用いてオシログラムに記録された。

氷盤の破壊状態は写真および映画に記録された。この実験装置は厚さ20～100mmの氷盤中にd = 17.5mm, 80mm, 220mmおよび425mmの模型支柱を動かす能力をもっていた。氷中の塩分は1%から4.5%まで変え、縮尺率(1/20)は実物と模型との幾何学的相似条件並びに実際の氷と実験氷の構造および破壊抵抗の統計論的相似条件に基づいて採られた。

試験槽内の氷の作成は北極・南極研究所の氷実験研究室で開発した方法に依って多量の微細な雪または水滴を水面に撒布して行なった。試験槽内の冷却された水面に落下したこれらの粒子が結晶核の役割を果す。この方法によれば所定の構造と強度（低い強度）をもつ氷を作ることができる。

実地試験を行なったサハリンのオハ市地域の氷盤は比較的静穏な凍結条件をもつ浅い湾で生成したものである。その組織を調べた結果、氷盤は厚さ110～125cmで、均質であり、さまざまな氷結条件（気温の変化およびそれに伴なう結晶成長の緩急）に対応した成層構成が弱く表われていることが判明した。

水質一雪質氷(watery-snowy ice)の表面から深さ23cmの水平断面までの上部層は極めて不均等な粒子状構造(granular structure)であり、垂直方向と水平方向の結晶の形は同じである。空気孔は不規則な形状をしており、その直径は2～4mmである。

下部の凝結層(congelational layer) (水平断面で23～123cm) は平行一繊維状構造(parallel-fibrous structure)

をもち、結晶は大きさがさまざままで、垂直方向に発達し、不均等に分布している。

長さ10mmまでの糸状および円筒形状の空気孔が氷の厚さ全体に亘り垂直方向に分布している。氷が平行一纖維状構造であることは比較的クローズドな水域において氷生成条件が安定していたことを裏付けている。

試料氷片の強度特性の測定は北極・南極研究所の標準試験法に従って行なわれた。実験室氷についての測定結果を平均化した若干のデータを第1表に、また同じく実際の氷に対するデータを第2表にそれぞれ示す。これらの測定は1972年に行なわれた。

試験結果の解析から、氷とさまざまな直徑の支柱とが相互作用するときそこに加わる力（最初の載荷サイクルの）とその後の各サイクルの最大の力との比に著しい差異があることが判明した。力の測定値は断えず録紙に記録されたが、このことはこのプロセスがサイクリックな性質のものであることを示している。荷重が最大値に増大したとき氷盤が破壊され、荷重が激減する。それから更に模型支柱を氷盤中で移動させれば、同様な状況が繰返し現われる。直徑の大きい支柱に最初のサイクルで加えた最大荷重は後続の各サイクルの荷重の3～4倍のものであった。直徑の小さい支柱に対しては全てのサイクルではほぼ同一の荷重を加えた。

この試験結果から、氷の破壊は氷盤の剪断が起きる若干の表面で発生することが判明した。このような破壊が特にはっきりと認められた支柱は下記の条件のとき直徑のあまり大きくないものである。

$$d/h \approx 1 \sim 3 \quad (d = \text{支柱の直徑}, h = \text{氷厚})$$

第1表 実験室氷の強度特性

試験月/日	室内気温(°C)	平均氷厚(cm)	氷中の塩分(%)	曲げに対する一時的抵抗の平均値(kg/cm²)	圧縮に対する一時的抵抗の平均値(kg/cm²)
2/7	-13	5.2	1.54	0.75	6.5
2/9	-15	4.0	2.38	0.5	2.1
2/14	-10	5.1	2.09	1.8	4.7
2/18	-14	7.0	2.11	1.1	5.7
2/29	-10	3.6	1.48	1.9	3.2
6/12	-13	7.7	0.86	1.9	6.2
6/14	-12.5	6.3	0.83	1.7	9.6
6/16	-8.5	5.7	0.78	2.0	4.4

ここで氷盤の破壊された部分の体積を取囲む表面 Q_1 と Q_2 を取出してみる。この体積を実地条件下で試験される試料片の側面の大きさと同等な側面をそれぞれ有する立方体の連合体として表わす。表面 Q_1 および Q_2 の側から各面積に対して作用する限界的な力は $\bar{\sigma}_1 (\Delta h)^2$ に等しい。構造物に対する氷の合成水平圧力は次式で求められる。

$$P = \sum_{i=1}^n \bar{\sigma}_i (\Delta h)^2 n_{ix} = \sum_{i=1}^n \bar{A}_i \quad (1)$$

ただし、 n_{ix} 一方向余弦

一般に氷は個々の要素（結晶）から構成される異方性の材料であるので、試験結果の評価にはシミュレーションの統計理論が採用された。氷の個々の結晶の配向と結合はランダムな性質をもっており、そのため氷を統計的に不均質な材料と看做すことができる。従って、上式で P を確率値 A_i の和と看做すことができる。 A_i 値の統計的な特性については破壊面積 $(\Delta h)^2$ をもつ試料氷片の単軸圧縮試験の結果に基づいて近似的に評価することができる。シミュレーションに際して構造物の線形寸法（模型支柱の直徑）および氷の厚さは $1/\alpha$ に縮小された。

構造模型に加わる氷の合成圧力は次式から求められる。

第2表 オハ市地域の氷盤の強度特性

月/日	氷盤の厚さ(cm)	気温(°C)	水の表面からの試験水層の位置(cm)	一時的抵抗の平均値(kg/cm²)		備考
				曲げに対し	圧縮に対し	
3/28	122	-5.4	3～18	7.6		水質-雪質氷
			30～61	7.9		凝結氷
			75～118	4.3		同上
4/2	111	-9.9	2～26	12.5		水質-雪質氷
			38～80	9.7		凝結氷
			90～105	5.4		同上
4/5	111	+1	5～18	11.9		水質-雪質氷
			30～80	8.8		凝結氷
			90～105	4.7		同上
4/3	98	-4	20～70	9.2		水質-雪質氷
			80～93	4.2		凝結氷
4/3	100	-4	0～40		11.4	水質-雪質氷
			40～80		15.2	凝結氷
			80～100		10.3	同上

$$\bar{P}^M = \sum_{i=1}^n \sigma_i^M (\Delta h)^2 n_{ix} \quad (2)$$

式(1)に導入された諸量を考慮すれば、次式が得られる。

$$\bar{P}^M = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{A}_i}{\alpha^2 \beta_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{A}^M}{\alpha^2 M \beta_i}, \quad (3)$$

ただし、 $\beta_i = \sigma_i / \sigma_i^M$ 一尺度係数 (scale coefficient)。インデックスMは模型のパラメータを表わす。

実氷と模擬氷との統計的相似を成り立たせるためには実氷の試料片と構造的に模擬された氷の試料片とで基本的な統計的特性が一致する必要がある。試料氷片の強度が正規分布法則に従っているとき、この必要条件は実氷と模擬氷とで変分係数 (variation coeff) $\chi = \frac{MA}{\sqrt{DA}}$ が一致すること、即ち $\chi = \chi^M$ となることに帰せられる。(MおよびDはそれぞれ確率値Aの数学的期待値および分散を表わす)。

構造物に加わる荷重の平均値MPは次式で表わされる。

$$MP = MP^M \alpha^2 M \beta \quad (4)$$

実氷の試料片の寸法は模擬氷のそれと α 倍の差異があるはずである。模擬氷の構造の幾何学的パラメータは $1/\alpha$ に縮小されているはずである。この条件は下記の等式が守られるとき満足されることが試験から明らかになっている。

$$\frac{\delta^M}{h^M} = \frac{\delta}{h} = \text{idem} \quad (5)$$

ただし、 δ —氷の結晶軸の寸法

結晶の寸法を小さくすることは0.8 mmまでのフラクションの寸法の微細な霜を試験槽内の冷却された氷の表面に散布することによって実現され、必要な厚さの氷を成長させた。

今回の試験では塩分を含んだ模擬氷における結晶の平均的な軸長 (transversal dimension) δ^M と氷盤の厚さ h^M の比は下記のように得られた。

$$\frac{\delta^M}{h^M} = 0.06 \sim 0.08$$

この比の値は実水の δ/h 比に近い。模擬水の立方体の強度の変分係数は $0.25 \sim 0.35$ の範囲にあった。実水の立方体の強度の変分係数もほぼ同様な範囲にあった。模型支柱による氷盤の破断速度は全ての試験を通じて $6 \sim 8 \text{ mm/sec}$ であった。

実験室内試験と並行して実地条件において氷厚 1100 mm において直徑 350 mm の支柱に加わる氷の圧力を求める実験を行なった。限界圧力を求めるため模型を氷盤中で 1350 mm だけ動かした。氷盤を破断したときの最大の力は氷の立方体の単軸圧縮に対する強度が下記の値のとき 271 T であった。

$$\sigma_{\text{obr}}^{\text{com}} = 10 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$$

実地試験を行なうため可動型および静止型のトラスの形をした装置を作成した。静止トラスは氷の反動圧力および氷盤が破断されるときの荷重の離心から生じる力を受け止める。可動トラストには供試模型が固定され、その押し込みは特別な流体力学系によって実施された。

ここで、縮尺率 $1/20$ による氷盤と構造物の相互作用のシミュレーション結果に基づいて氷厚 $h = 1100 \text{ mm}$ のとき直徑 350 mm の支柱の円筒形要素に加わる氷荷重について実地測定と計算を比較対照してみる。シミュレーションでは次の値が得られている。 $P = 96.7 \text{ kg}$ ；氷の立方体の単軸圧縮に対する平均強度 $\sigma^M = 1.60 \text{ kg/cm}^2$ 。

実地試験の実施時に氷の立方体の強度の平均値は $\sigma = 12.7 \text{ kg/cm}^2$ であった。縮尺率 β の平均値は次式から求めた。

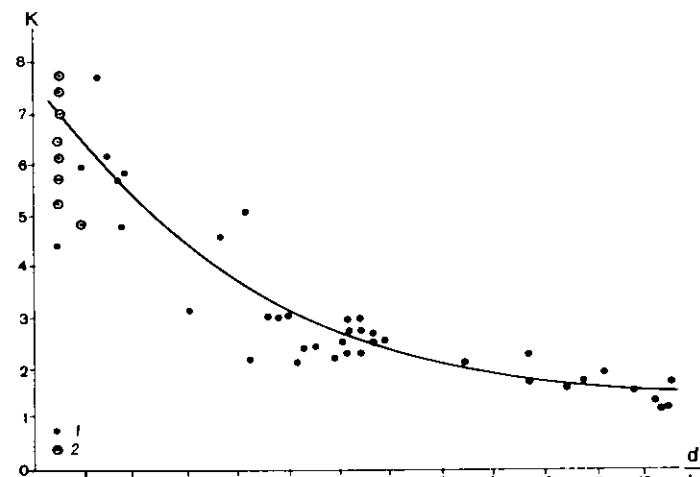
$$M_\beta = \frac{12.7}{1.6} = 7.9$$

式(4)に従い直徑 350 mm の支柱の円筒状要素に加わる荷重を模型試験の結果を考慮して求めれば次のようになる。

$$MP = 96.7 \times 20^2 \times 7.9 = 295 \text{ T}$$

この計算値の実測値に対する偏差は 9 % 以下であった。

この種の構造物の設計に当り限界荷重の大きさは一般に建設予定地点における氷の立方体の試験データに基づいて決められるが、その際、立方体の強度値には建造物周辺の氷盤の空間的応力状態における仕事量を考慮した或る係数 K が乗せられる。若干の文献ではこの係数は $<\! \text{圧潰}\! >$ を考慮するものとして導入されており、その値は構造物の幾何学的パラメータに応じて $1.0 \sim 2.5$ の範囲にある。筆者等の研究（第1図）に依れば K の値は $1.5 \sim 7.0$ と、かなり広い範囲にある。



1—実験室での測定値 2—実地試験の値

第1図 支柱の直徑 d と氷厚 h の比に対する支柱の仕事量にかかる係数 K の関係

結論

- 1) 海中構造物の構成要素によって氷盤を破断するときの氷盤の強度に関する研究は、実験室条件下において構造的に模擬した氷を用いて、実際の氷に対する模擬氷の統計的相似条件を成立させて実施することができる。
- 2) 円筒状支柱に対する氷の作用に関する実験室内研究から、 d/h 比に対して氷と支柱の接触に関する平均限界応力が大きく依存することが明らかになった。このことは設計される海中構造物の合理的なパラメータを選定する上で

極めて重要な事項である。

§ 27 実験室条件および実地条件下での氷の付着に関する実験研究

V. V. Panov, A. V. Panyushkin
Yu. D. Sinochkin, Z. I. Shvaishstein

氷の物理的・機械的諸特性のうちで自由表面エネルギーは重要な役割を果すものである。氷の生成が不均質に行なわれる場合に氷の付着特性に大きな影響を及ぼすものは下層物体（付着の対象となる物体）の特質、特にその自由表面エネルギーである。

近年、自由表面エネルギーの値が小さいという特徴をもつ表面に対する氷の付着に関する研究が特に関心を呼ぶようになった。これは漁船の着氷防止手段の開発研究と関係している面が多分にある。

本稿では自由エネルギーの値が小さい表面に対する氷の付着に限定して述べる。ただし、ここで提案する計測機器および試験方法は高エネルギーの表面に対する氷の付着問題の研究にも適用された。

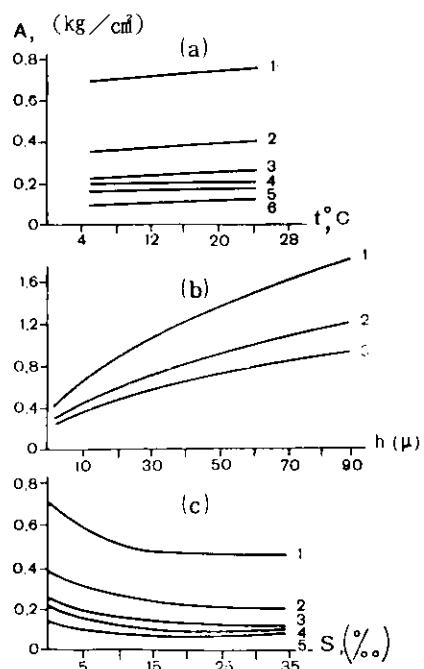
一般に、付着力は下層物体からの接着物の剥離力によるか或いは下層物体に対する接着物の剪断力（単位接触面積当たりの）によって特徴付けられる。この剥離力または剪断力を作り出すには、現在知られている諸破壊試験機（電動式、電磁式、空気圧式等）のうちからいずれかを用いることができる。各種駆動方式の作動特性を解析した結果、構造材および被覆材と氷との結合力の測定を用途とする付着計にとって最も適した駆動方式は油圧式であることが判明した。

油圧式の駆動はその他の現在採用されている駆動方式と比較して次のような長所を有する。(1)コンパクトであり軽量である；(2)装置がシンプルである；(3)精度が高い；(4)得られた結果の再現性が良い；(5)自律性が高い；(6)載荷速度を広い範囲に亘って変えることが可能であり、且つその慣性が小さい。

この試験装置には剥離力または剪断力を作り出し、記録する機構のほかに、付着性接触（adhesive contact）を形成せしめる装置、供試体および容器のセットを含む装置が設けられている。

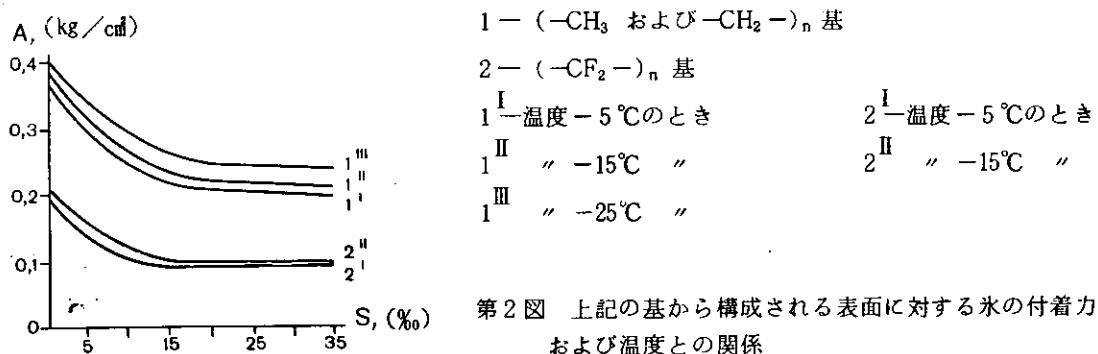
この試験装置は付着性接触の破壊力の測定を剪断方法によっても、また剥離方法によっても実施することができる。筆者等が用いた実験装置は冷却されない実験室内での使用を前提とするものであり、半導体式マイクロフリーザを備えていた。付着性接触の形成は装置自体において直接行なわれた。

引張り力の測定は氷と下層物体との付着性接触の破壊力範囲 $0.1 \sim 2.5 \text{ kg/cm}^2$ において標準マノメータを用いて行な



- (a) 下記の基から構成される表面に対する付着性接触の形成温度
1 - $(-\text{CH}_2-)_n$ 基; 2 - $(\text{CH}_3$ および $-\text{CH}_2-)_n$ 基; 3 - $(\text{CH}_3)_n$ 基; 4 - $(-\text{CF}_2-)_n$ 基; 5 - $(\text{CF}_3$ および $-\text{CF}_2-$)_n 基; 6 - $(\text{CF}_3)_n$ 基
(b) 温度 -15°C における一連のポリマー材の表面粗度
1 - $(-\text{CH}_3$ および $-\text{CH}_2-)_n$ 基; 2 - $(-\text{CH}_3)_n$ 基; 3 - $(-\text{CF}_2-)_n$ 基
(c) 温度 -15°C および $h \approx 15 \mu$ における一連のポリマー材に対するモデル溶液の塩分
1 - $(-\text{CH}_2-)_n$ 基; 2 - $(-\text{CH}_3$ および $-\text{CH}_2-)_n$ 基; 3 - $(-\text{CF}_2-)_n$ 基; 4 - $(-\text{CF}_3$ および $-\text{CF}_2-)_n$ 基; 5 - $(-\text{CF}_3)_n$ 基

第1図 淡水氷の付着力と上記の各因子との関係



第2図 上記の基から構成される表面に対する氷の付着力と塩分および温度との関係

われた。その場合、付着性接触の単位面積当りの引張り力の測定誤差は低エネルギー表面に対して±0.005 kg/cm² であり、これはこのような表面に対して確認されている最低値に対し少なくとも $1/20$ に相当する。

載荷速度は30kg/cm²/sec まで調整可能である。剥離力の測定は電気式マノメータと自動記録装置により自動的にも、或いは可視的にも行なうことができる。

筆者等が得た一連の実験結果を第1図と第2図に示す。

予備研究の結果、剥離力の大きさに最も大きい影響を与える因子は(a)自由表面エネルギーの値、(b)表面の凹凸状態、(c)付着性接触を律する熱力学的パラメータ、特に過次却と凍着温度、(d)氷の元となる水の組成、(e)氷の凍着一除去サイクルの回数であることが明らかになった。

上記の諸因子が付着力に及ぼす影響について求めた試験結果は第1図、第2図および第1表に示す通りである。第1図と第1表から判かるように、他の諸条件が等しいとき、比自由表面エネルギーの値が小さいほど、付着性接触の破壊に必要な力は小さくなり、また濡れの接触角の真の値は大きくなる。

筆者等の研究が行なわれるまでは、他の諸研究報告から明らかであるが、付着力に対する下層物体の熱物理的特性と

第1表 一連の疎水性表面の自由表面エネルギー及び温度-5°Cにおけるこれらの表面に対する淡水氷の付着力

下層物体の表面の構造	F erg/cm ²	E _{ad} erg/cm ²	A _s st (kg/cm ²)	A _s st (kg/cm ²)	K _{theor}	K _{exp}	θ°	b (erg grad/cm)
水	100	-	-	-	-	-	-	$17 \cdot 10^{-4}$
$(-\text{CF}_3)_n$	6	49	$1.09 \cdot 10^3$	0.10	10^{-4}	$0.92 \cdot 10^{-4}$	115	-
$(-\text{CF}_2\text{H})_n$	15	77.4	$1.75 \cdot 10^3$	0.14	10^{-4}	$0.80 \cdot 10^{-4}$	97	-
$(-\text{CF}_3, -\text{CF}_2-)_n$	17	82.6	$1.82 \cdot 10^3$	0.16	10^{-4}	$0.88 \cdot 10^{-4}$	110	$40 \cdot 10^{-4}$
$(-\text{CF}_2-)_n$	18	85	$1.89 \cdot 10^3$	0.20	10^{-4}	$1.02 \cdot 10^{-4}$	108	$20 \cdot 10^{-4}$
$(-\text{CH}_3)_n$	20 ~ 24	89.2 ~ 98	$(1.98 \sim 2.17) \cdot 10^3$	0.18 ~ 0.22	10^{-4}	$(0.92 \sim 1.01) \cdot 10^{-4}$	102	$22 \cdot 10^{-4}$
$(-\text{CH}_3, -\text{CH}_2-)_n$	26	102	$2.27 \cdot 10^3$	0.36	$5 \cdot 10^{-4}$	$1.58 \cdot 10^{-4}$	92	$10 \cdot 10^{-4}$
$(-\text{CH}_2-)_n$	31	112	$2.5 \cdot 10^3$	0.70	$5 \cdot 10^{-4}$	9.0	-	$10 \cdot 10^{-4}$

表面特性の影響を分けて研究する必要性に注意が払われていなかった。筆者等によって明らかにされたことは一般に近似した値の熱伝導率 $a = \lambda/cp$ を有するポリマー材については下層物体の熱物理的特性の影響は大したことがないが、金属材料についてはポリマー材の場合よりも影響が著しいことである。ポリマー材については下層物体の熱物理的影響は自由表面エネルギーの変化による影響よりも著しく弱い。

下層物体の自由表面エネルギーの大きさおよび付着性接触の形成温度による影響については以下で検討し、諸関係式により充分に説明する。付着力の計算値と実験値は試験の誤差範囲内で一致している。

第1図(b)に示したグラフから明らかなように、付着性接触の破壊に必要な力の大きさに表面粗度が著しい影響を及ぼ

す。一方では、この粗度の増大は実際の接触面積の増大および氷と下層物体との結合力の増大をもたらすが、他方では疎水性の表面については毛管圧力を表わす下記の式に従い、 $d < d_{critical}$ のスリットに水が流入しなくなり、従ってまた氷と下層物体との接触面積が $d < d_{critical}$ のスリットに空気腔 (air cavities) が形成されるために小さくなる。更に表面の凹凸状態は結晶母粒の生成および結晶化の過程に影響を及ぼす。

$$P = \frac{\gamma \cos \theta}{d}$$

ただし、 P —毛管圧力； d —空隙の直径またはスリットの幅； γ —疎水性材料 ($\theta > 90^\circ$) における水の表面張力

着氷防止手段の開発に当っては相当多数回にわたる氷の凍着一除去サイクルの期間において付着性接触を破壊するために必要な力が一定に保たれるか或いはその変化が僅かになるようにする必要がある。氷の結合力の変化は氷の凍着一除去サイクルの回数に依存しないことが明らかにされている。過剰化材料およびハイドロシロクサン系のポリエチレンは20~30サイクルの期間に亘り安定しているが、有機珪素系エナメルは既に2~3サイクルで表面特性の劣化が認められた。

試験から明らかなように、スケール効果が現われる供試体は水との接触面積が 3.5 cm^2 以下のものだけであり、もっと大きい供試体に対してはそれはど大きな影響が現われない。

試験データから、 0.6 kg/cm^2 以上の載荷速度の範囲においては剥離力の増加速度は結合力の測定値に実質的には影響を及ぼさないことが裏付けられた。

自由表面エネルギーが低い値の表面は他の諸条件が等しいとき水の分子と弱いエネルギー結合を形成し、そのためこのような表面による水の吸収が悪くなり、水の付着力は液相においても固相においても小さくなる。

自由表面エネルギーの値が低い、表面については分子間相互作用のポテンシャルの大きさに主に寄与するものは分散成分であり、静電的な成分は大きな役割を果さないことが定性的に確認された。従って、それぞれ対応する状態の原則に従う相間の相互作用については、Fowler と Melvin - Hodge が提案しているように、一部の自由エネルギー（相互付着作用に相当する）を下記の関係から求めることができる。

$$F_{1,2} - F_1 - F_2 = n \sqrt{F_1 F_2} = F_{ad} \quad (1)$$

ただし、 $F_{1,2}$ —表面1と表面2の境界上の比自由表面エネルギー

F_1 —相1の比自由表面エネルギー F_2 —相2の比自由表面エネルギー

n —接触状態にある相1と相2について分子間相互作用の形によって決められる比例係数（比自由エネルギーの値が小さい表面については $n \approx 2$ ）

この場合、付着力を次のように求めることができる。

$$A^* = -\frac{\partial F_{ad}}{\partial R} = -\frac{\Delta F_{ad}}{\Delta R} \quad (2)$$

ただし、 R —分子間のバンデルバール相互作用の半径。

疎水性の表面と水の分子が分散的相互作用をする場合、T. K. Melrose が得た結果と一致している計算値が示しているように、 $\Delta R \approx 4.5 \text{ \AA}$ である。

自由表面エネルギーの大きさについてのデータを用いて筆者等は疎水性表面に対する淡水氷の付着力を計算した。

式(1)で求められた氷の付着力の大きさは下層物体におけるポリマーの鎖状分子のセグメントと水の分子のセグメントとの結合の形成の確率的な性質を考慮していない。

付着性結合を形成しているポリマー鎖状分子のセグメントの数と水および疎水性ポリマーの分子のセグメント数の和との比を特徴付ける諸因子を考慮すれば、付着力を計算するための式が下記のように得られる。

$$A = KA^* \quad (3)$$

ただし、 $K = \beta_1 \beta_2 = 10^{-3} \sim 10^{-4}$ (ここで検討される相互作用に対して)

更にもっと精密な K 値は付着性接触の単位面積当たりの剥離力 A_{exp} と次式に基づいて得られた値とを比較することによって得られる。

$$\left| A_{\frac{1}{t}}^* \right| = \frac{n \sqrt{F_1 F_2}}{\Delta R} \quad (4)$$

この式は式(1)と式(2)から得られたものである。

ここで比較される両者の値は同一の温度値、即ち標準温度に対応したものでなければならない。この標準温度として -5°C が採られた。その場合、実験で測定した K 値は次式から求められる。

$$K_{exp} = \frac{A_{exp}^{st}}{\left| A_{\frac{1}{t}}^* \right|^{st}} \quad (5)$$

下層物体の疎水性表面を形成するポリマーと氷の自由表面エネルギーの値に基づく付着力の計算結果は第1表に示した通りである。

氷の付着に及ぼす付着性接触の形成温度の影響を評価するために、自由表面エネルギーの大きさと温度との関係を用いる。筆者等が一連のポリマー材と氷について実験的に得た温度と濡れの臨界表面張力との関係は V. Zisman のデータと良く一致しているが、これは下記の方程式で表わされる。

$$\gamma_{kt} = \gamma_k^{st} (1 - b \Delta t) \quad (6)$$

ただし、 γ_{kt} — 温度 t におけるポリマーの表面の濡れの臨界表面張力

γ_k^{st} — 標準温度 $t^{st} = -5^{\circ}\text{C}$ におけるポリマーの表面の濡れの臨界表面張力

明らかに、疎水性の表面について下記のようになる。

$$F(t) = F^{st} (1 - b \Delta t) \quad (7)$$

ただし、 $F(t)$ — 温度 t における比自由表面エネルギーの値

F^{st} — 温度 -5°C (t^{st}) における比自由表面エネルギーの値

b — 比自由表面エネルギーの温度係数

$$\Delta t = t^{st} - 1$$

以上の関係式が成り立つ場合、付着力と温度との関係を次式の形で表わすことができる。

$$A_t = k \left| A_{\frac{1}{t}}^* \right|^{st} (1 - b_{1,2} \Delta t)$$

濡れの臨界表面張力と温度との関係に関する実験データから算出された b 値は第1表に示す通りである。

筆者等の研究結果から明らかなように、G. M. Bartenev, A. A. Akopyan, V. A. Zisman による自由エネルギーの低い表面に対するデータ、濡れの臨界表面張力の方法は最も根拠の有るものであり、そこで得られた臨界表面張力値は他の方法によって得られている自由表面エネルギーと $10 \sim 20\%$ 以下の差があるにすぎない。

均質な下層体と淡水氷について前者から後者を剥離させる力の温度的な関係についての実験データ（第2図参照）を式(8)から求めた計算値と比較対照することによって下記の関係を指摘できる。

$$b_{1,2} = c \sqrt{b_1 b_2} \quad (9)$$

ただし、 $b_{1,2}$ — 淡水氷の付着力の温度係数

c — 所与のポリマー材に特徴的な一定乗数

このようにすれば式(8)は下記の形に表わされる。

$$A_t = k \frac{h \sqrt{F_1 F_2}}{\Delta R} (1 - c \sqrt{b_1 b_2} \Delta t) \quad (10)$$

ただし、 F_1 と F_2 — それぞれ下層物体および氷の自由表面エネルギーの大きさ

b_1 と b_2 — それぞれ下層物体および氷の自由表面エネルギーの温度係数

k 一付着物と下層物体の付着性結合の形成確率を律する因子

A_t 一温度 t における付着力の大きさ

付着性接触の形成に用いられる水中の不純物、特に塩分 (S) の影響は下記によって表わされる。

$$A_t(S) = \begin{cases} (A_{t_{\min}} - A_{t_{\min}}) \exp \left(1 - \frac{S_1}{\Delta S} \right) + A_{t_{\min}} & (S < S_1 \text{ のとき}) \\ A_{t_{\min}} (1 - g \Delta S) & (S \geq S_1 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (11)$$
$$\Delta S = S_1 - S_2$$

ただし、 $A_{t_{\min}}$ 一所与の温度における所与の下層物体に対する淡水氷の付着力（式(3)または式(10)から求められる）

$A_{t_{\min}}$ 塩分 S_1 (この値からはじまって所与の温度において塩分は付着力の大きさに実際上影響を及ぼさなくなる) に対応する塩分を含んだ氷の付着力

g 一所与の下層物体材料に対する定数（若干のポリマー材については $g = 0$ ）

上式で S_1 値および $A_{t_{\min}}$ 値は 2 つの相異なる不純物濃度に対して所与の温度のときに測定された 2 つの付着力実験値から求めることができる。

以上に掲げた諸関係式は半経験式的なものであるが、氷の付着力とそれに関与する一連のパラメータとの関係を解明するための実験時間を著しく短縮することができ、また、付着力と下層物体および氷の自由表面エネルギーとの関係を決めることができる。

比自由表面エネルギーの値が高い表面に対しては分子間相互作用のポテンシャルの電気的成分を無視してはならない。従って、式(1)は更にもっと複雑な形となり、式(3)～(11)はこの場合互に近似した性質を帯びるようになる。これらの式を更に精密な式にするには今後更に実験データの蓄積が必要とされる。

結 言

- 1) 付着現象の研究および付着性接触の破壊に必要な力の測定に用いる試験装置類について提示した。
- 2) 付着性接触の破壊に必要な力の大きさに及ぼす諸要因の影響に関する実験データを示した。
- 3) 付着力の計算および付着力の大きさに及ぼす温度と塩分の影響の考慮に用いる半経験的な諸関係式を提示した。

§ 32 天然雪と加工雪の強度特性の測定法

G. Abel'

緒 言

雪の強度特性はそのデータを必要とする目的および存在する試験装置のいかんに応じてさまざまな方法でさまざまな装置によって求めることができる。しかし、地面を覆っている雪面上の移動の可能性を評価する際に適用される測定方法は航空機の滑走路用の緻密な雪層の耐荷力の評価に対しては適当でない。全く同様に、静荷重に対する雪の基礎の耐久力の評価に必要なデータは処女雪面上でのあれこれの輸送手段の可動性の程を評価する際には適用できない。

実際の計算では、場合によっては、極めて任意に選定された強度係数の値を使用した方が便利なこともある。このような係数はさまざまな性質の荷重の作用を蒙る構造材としての雪の当該特性にとって、しばしば、より妥当である場合がみられる。

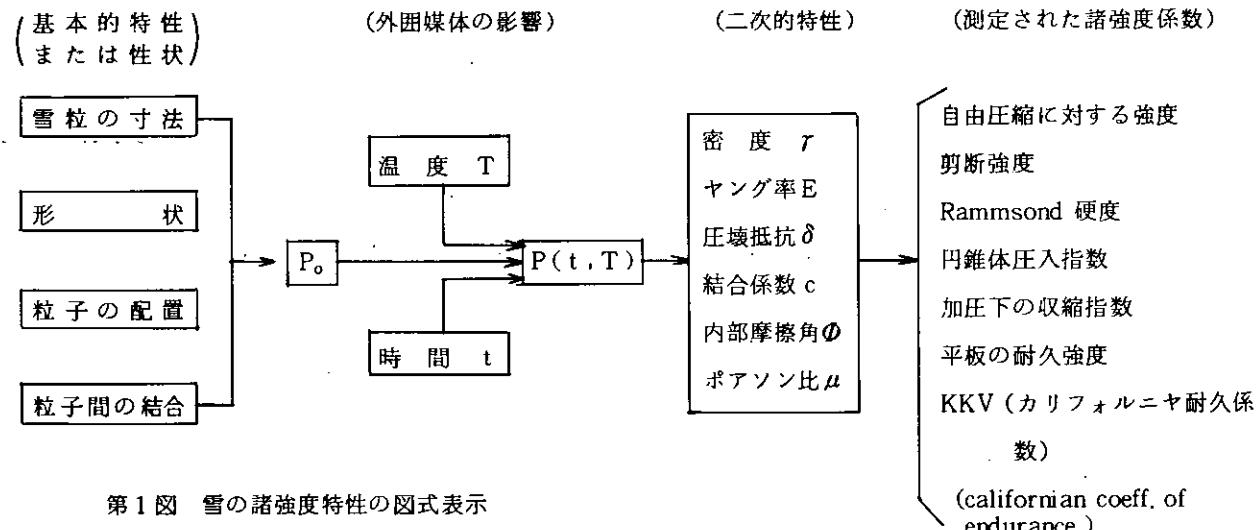
雪 の 特 性

雪の粒子の寸法と形状、その相互の配置と結合（これらが雪の密度を決める）—これら全ては雪塊の構造を支配する基本的性状である。雪の構造は外因媒体のさまざまな因子の影響を受けて著しく変化する。とりわけ、温度と時間が主要な因子であり、これらは雪の特性を変成的・非可逆的に変える。

任意の所与の時点における構造材としての雪の機械的特性はその基本的な構造特性にもまた周囲の媒体の作用にも依存し、これを二次的特性と呼ぶことができる。これに該当するものとしてはヤング率 (E)、ポアソン比 (μ)、結合

係数 (c)、モールの包絡線から得られる見掛けの内部摩擦角 (ϕ)、限界圧縮強度、限界引張強度などが挙げられる。あれこれの目的（道路、滑走路、建造物基礎）に対する雪の適性を決める際に、また輸送手段に及ぼす雪の有害作用の影響を調べる際に、雪のあれこれの強度特性を表わし且つ容易に測定可能な別の（上記以外の）係数が用いられる場合もある。

以上で挙げた雪の諸強度特性を第1図に図式化して示す。



第1図 雪の諸強度特性の図式表示

測定方法

天然また加工した雪盤における許容荷重または輸送手段の運動に対する耐荷力を求めるための最も信頼できる方法は実際の載荷条件をシミュレーションする方法である。

雪上に展開された滑走路に対する車輪荷重試験には航空機の車輪によって作り出されるさまざまな荷重よりも少なくとも2倍大きい荷重を与えることのできる輸送手段が必要とされる。この種の輸送手段はそれ自体が特別に組立てられた試験装置であり、充分に大きい重量をもち、油圧制御式の試験用車輪を備え、この車輪に加える荷重を容易に変化させることができる。このような試験装置の採用が正当化され且つ経済的にも有利となる場合は雪上滑走路が激しい荷重の作用を受ける場合か或いは重量の大きい航空機が使用される場合だけである。

雪上に設けられた道路または軽量の航空機用の臨時滑走路では予想される車輪荷重が前述の場合よりも著しく小さいので、このような場合には標準的な車輪付き輸送手段を使用することができる。運動する車輪を用いた荷重試験のメリットはその他の種類の試験では見過される可能性のある雪層中の弱い力所を明らかにできる点にある。

場合によっては、南極の内陸地域における各種施設のさまざまな基礎部材に用いられる材料としての雪を評価するためには実物に荷重をかけてフルスケールの試験を行なうことが望ましいこともある。

しかし通常の条件のもとでは、雪の強度特性を評価するのに必要な信頼性のあるデータを得るには、実物試験のはかに、別の方針も適用することができる。

最も広く一般に実用化されている試験方法は下記の3グループに分けられる。

- (1) 耐荷力試験、表面荷重（雪の表面に垂直荷重を加える）
- (2) 強度試験、供試体の強度を試験（雪中からコア・サンプルを採取し、それを強度試験にかける）
- (3) 硬度試験、雪錐法（雪中に雪錐または探針を通す）

一般に、耐荷力または載荷力について最も信頼度の高い係数を与える測定法は雪の表面に対する荷重の作用をシミュレートする方法である。これに該当するものは平板の耐久試験およびカリホルニヤ耐久係数（KKV）を求める試験である。しかしこれらの方式の試験の実施には長時間を必要とし、また実地条件のもとでは必ずしも常に正確に実施できることは限らない。

自由圧縮、剪断、その他に対する標準的な強度試験からは極めて本質的なデータを得ることができ、それに基づいて雪面の載荷力または耐荷力を求めることができる。その場合、これらの試験は実地条件においてポータブル試験装置を用いて行なうことができる。しかし、供試体の準備に多くの時間と注意深さが必要とされている。更に、雪上に道路および滑走路が設けられている場合には供試体の採取は被覆雪面の質を悪くする。

各種の雪錐または円錐形硬度計（針入計）を用いる試験から硬度指数の算定が可能となる。この種の試験は最も便利であり、また所要時間が最も少ない。これにより雪層または被覆雪の硬度について垂直方向のプロフィルが得られる。しかし、そこで得られる硬度指数の数値は実現の物理的意味を持ったものではなく、それは単に雪の“相対的硬度”の指数を示すにすぎず、それをもっと本質的なまたはもっと便利な強度特性と、或いは実際の耐荷力（載荷力）と経験的に結び付けなければならない。

従って、試験を実施する容易性の度合は実際値への接近性の度合に対して逆比例の関係にある。平板の耐久試験は、車輪荷重（道路または滑走路）による実際の試験を除き、他の任意の試験法と較べて荷重の付加を最も近似的にシミュレートする方法であるが、その実施に要する時間が最も長い。雪層または被覆雪の中に比較的細い雪錐を圧入して行なう試験はその実施の観点からみれば最も容易であるが、荷重を加える観点からみれば最も特徴的な方法でない（第2図）。

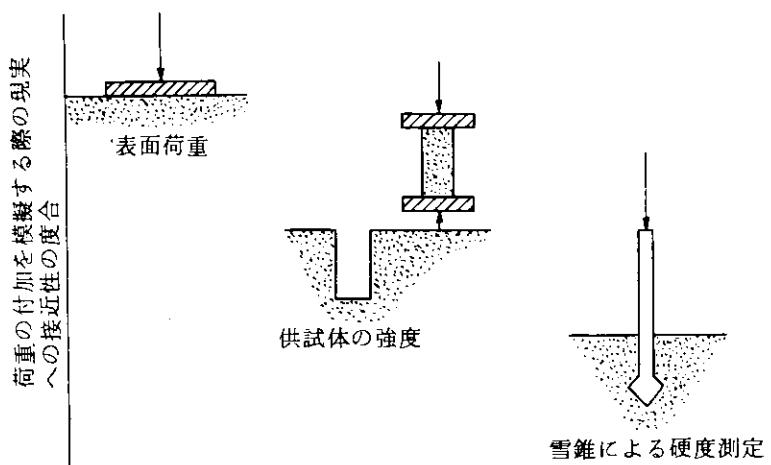
以下では、被覆雪の耐荷力の評価に用いられてきた、または用いることができる各種の強度試験法について検討する。或る一定荷重の作用下におかれた平板の耐久試験は時間との関係における平板の沈下量の測定に帰せられ、別の場合には一定の雪錐通過速度または応力増大速度を調べることができる。これらの試験の目的は構造材としての雪の機械的特性と性状の研究、特に一定に設定された荷重の作用下におかれた雪のクリープ特性の研究、均等に分布した荷重或いはいわゆる応力の“バルブ”（bulb）の作用下における応力分布および歪みの研究、また雪および雪崩の沈下現象の性質と機構の研究にある^{3), 12), 13)}。

重量の大きい航空機が雪上に着地したときに生じる車輪荷重の作用をシミュレートするには平板の耐久性試験においてそれに相当する大きさの荷重を必要とする。この場合、実地雪上試験ではD-8型トラクターまたはこれと重量および接触面積が等価なその他の輸送手段が使用された。上述の各種試験の実施に当ってこの種の設備の使用が可能である場合においてすら、被覆雪の強度特性の評価にこのような設備を使用することはその運転中に被覆氷に損傷を与える恐れがあるために望ましくない。

カリホルニヤ耐久係数を求める試験

さまざまな地面を対象にして実施されるKKVテストは面積19.35 cm²の丸いピストンを用いた一定速度の貫入試験である。KKVの値は貫入速度0.13 cm/minをもって深さ0.25 cmにこのピストンが到達するに必要な比荷重の10%から成る。このKKVテストの実施には重い装置或いは荷台を必要とし、被覆面の耐荷力（載荷力）を簡便に且つ迅速に評価することには適さない。しかし、さまざまな地面の耐荷力を求めるのにこの方法が広く適用されていることと関連して、KKVの値は土木技術者には、所与の被覆面の強度について正確なデータを与える役割を果している。しかしこの試験法では載荷面積が相対的に小さいために脆い雪を対象にする場合には適用できないことが判明している。

自由無拘束圧縮による強度試験は手動操作式のポータブル装置を用いて現場で実施することができる。この試験のた



第2図 各種の測定方法における荷重のシミュレーションに際しての実際値への接近性の度合と試験の実施し易さの度合との関係

めに一般に直径 7.6 cm のスプーン型コアドリルを用いて採用される照合用サンプルの準備に相当多くの時間を費やす。それはサンプルの端部が平坦に保たれ且つコアの縦軸に垂直になるように特に注意を払う必要があるためである。得られた試験データから雪の圧壊に対する抵抗の正確な値を得ることができる。

拘束された剪断に対する強度のテストは手動式針入針にとっては硬すぎる被覆雪に適用するために N C E L のスタッフによって開発された。⁸⁾ この試験ではサンプルの準備にそれほど細心の注意を払わなくてすむため、所要試験時間は上記の自由無拘束圧縮による試験の場合よりも短かい。この試験法では雪のコア（柱）の中心を通過する垂直方向の剪断力に対するコア（柱）の強度が測定されるが、この方法は南極において車輪荷重の作用下にある雪上路および滑走路の耐荷力の評価に広く用いられた^{9), 10)}。

三次元（体積）圧縮試験は自由無拘束圧縮または剪断強度の試験よりも表面荷重の付加をシミュレートする程度が大きく、この方法はしばしば土質力学、また或る程度は雪の力学で c 値および ϕ 値を得るために採用される。しかしこの試験法は現場条件のもとで適用するには不便であり、多大の時間を要する。

Rammansond 法による雪の硬度は Rammansond 式円錐形硬度計を用いて求められる¹¹⁾。この硬度指数の大きさから、所定の高さから落下する一定の重量のハンマーを用いて所定の寸法の金属円錐体を垂直に打込んだ場合に雪層が示す抵抗が求められる。必要とする任意の圧入深度において硬度の読み取りを行なうことができる。この試験法は雪上滑走路の強度特性を評価する際に最も頻繁に採用されている方法である^{2), 4)}。この試験は比較的簡単であり、またその実施に要する時間は他の大部分の試験法よりも少ないので、雪上滑走路または道路被覆の表面についてより多量のデータを得ることができ、従ってまたより完全な研究を行なうことができる。

流体圧式雪錐を用いる試験方法は N C E L によって被覆雪の硬度を迅速に求めるための方法として開発された⁸⁾。この装置は鈍角な先端をもつ直径 2.2 cm の棒の形をしたもので、小型雪上車（トラクタ）の流体圧系から作動させられる特殊な打込み用ピストンを用いて被覆雪中に迅速に圧入される。その圧入に対する抵抗が機械的にダイヤグラム上に記録され、そこに垂直方向の硬度のプロファイルが図示される。この種の試験法は簡単であり、所要時間も少ないので、短時間で多量の試験を行なうことが可能である。

米国の Waterways Experiment Stations で開発された W E S 式円錐を用いる試験は軟弱地盤および天然雪層上の移動（交通）の可能性を確かめる観点からこれらの特性を評価するために採用されている¹³⁾。この装置は手動操作によって雪中に圧入されるので、大部分の加工された、また緻密化された被覆雪を対象とした研究では一般にその実施が困難であると判明している。

U S A T A C O M の陸上移動手段実験研究所で開発された bevameter は輸送手段の移動に関連する雪および地面の特性を求めるために用いられる⁶⁾。この装置は 2 つの個別のパーツから構成され、雪の強度特性を垂直方向（圧入抵抗）と水平方向（剪断強度）の両面から調べることができる。しかしこの装置は輸送手段の移動の可能性が或る一定の問題となっている軟弱地盤または雪路を対象に予定されたものであり、硬い被覆雪への適用には適していない。これと全く同じことが剪断（切断）羽根車の使用による大部分の装置並びにさまざまなモデルチェンジした bevameter、手動式雪錐、硬度計について云える。

密度の測定は比較的容易であり、この密度は被覆雪の緻密度、即ち潜在的強度を求める際にラフな指標として若干の近似をもって用いることができる。しかし強度と異なり、長く放置されて固まった雪の密度は温度や時間に依存して変化することがない。従って、その場合温度および時間の影響を考慮しなければ、密度はそれ自体では信頼のおける強度指標として使えない。

あれこれの硬度指標を得るためにその他の多くのタイプの手動式硬度計および雪錐が用いられている。しかしそれらのうちの大部分、例えば Proktor 針⁵⁾、カナダの硬度計、落下型円錐、円錐型硬度測定器または球型硬度計⁷⁾は雪の表面硬度の測定に適しているだけであり、被覆雪全体の強度または載荷力について信頼に足る測定値を与えることができない。

各種測定方法の比較

以上で挙げた各種の測定方法を雪面への荷重付加のシミュレーション時の実際値への接近度（第1表）および試験または測定時の取扱いの難易度（第2図）に応じて区分すれば、あれこれの試験または測定法を相対的な＜使用の望ましさ＞について或る程度分類することができる。これを第3表に示す。これは筆者の個人的経験およびその他のさまざまな専門家の意見に基づく定性的な評価であり、別の研究者はこれと若干異なる順位を付けることは大いに有り得る。

第1表および第2表の分類に従い各試験法に与えられた順位Noをそれぞれ組合せれば、各試験法の＜使用の望ましさ＞の順位が得られる。その結果を第2表に示す。

これらの3つの表から得られた評価はグラフで第3図のように示される。ここでは第2表による順位Noが横軸に示さ

第1表 荷重付加のシミュレーションにおける実際値への接近

現実性の度合の低下順（No.）	試験のタイプまたは測定方法
1	平板の耐久性
2	カリホルニヤ耐久係数
3	bevameter
4	三次元圧縮
5	拘束付き剪断
6	自由（無拘束）圧縮
7	流体圧式雪錐
8	Rammsond 針入計
9	円錐
10	密度と温度の測定

第2表 試験実施の難易度

困難度の低下順（No.）	試験のタイプまたは測定法
1	円錐
2	針入計
3	bevameter
4	流体圧式雪錐
5	密度と温度の測定
6	拘束付き剪断
7	自由（無拘束）圧縮
8	カリホルニヤ耐久係数
9	平板の耐久性
10	三次元（体積）圧縮

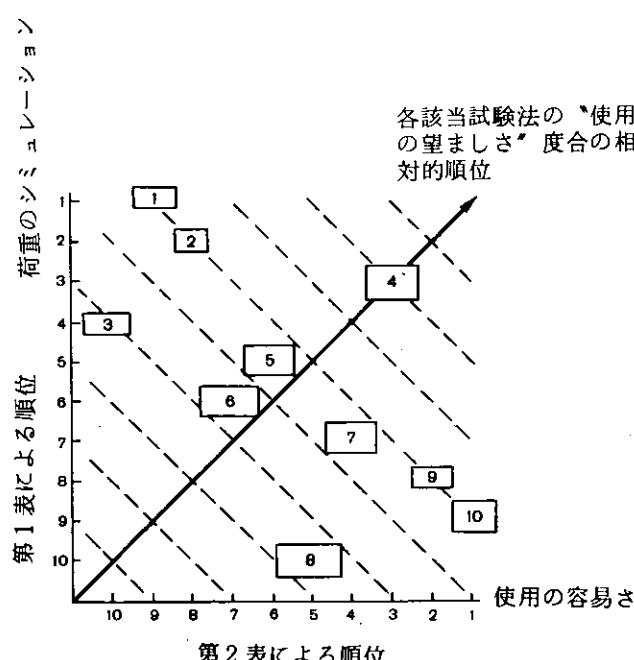
第3表 それぞれの試験法の＜使用の望ましさ＞の度合に関する相対的順位

第1表と第2表の番号の和	合成順位No（“望ましさ”の低下順）	試験法
3 + 3 = 6	1	bevameter
1 + 9 = 10		平板の耐久性
2 + 8 = 10		カリホルニヤ耐久係数
8 + 2 = 10	2 ~ 5	Rammsond 針入計
9 + 1 = 10		円錐
5 + 6 = 11	6 ~ 7	拘束付き剪断
7 + 4 = 11		流体圧式雪錐
6 + 7 = 13	8	自由圧縮
4 + 10 = 14	9	三次元（体積）圧縮
10 + 5 = 15		密度と温度の測定

れ、第1表による順位は縦軸に示され、座標原点から45°の角度で引かれた直線はそれぞれ該当する試験法の＜使用の望ましさ＞の合成順位を特徴付けている（第3表参照）。

現場での使用に適した各種の機械的な試験法または測定法について以上で示した評価から雪の強度特性の値に最も信頼できる方法はbevameter法であることが判かる。この装置の許容荷重および許容圧力の限界がそれもっと高くなれば、その使用の意義は更に大きくなり、高強度の被覆雪の研究に用いることができるようになる。

平板の耐久試験、KKVテスト、Rammsond針入計またWES型円錐による試験などがその特性がほぼ同じであり、それらの長所が互に似ているという事情は予想されなかったことではなく、このことはこれらの方の適用対象となる場所が広汎であることを示している。しかし、KKV試験は脆い雪に対しては不適当であり、またその逆に緻密な雪に対してはWES法が採用できない。以上で挙げた諸



1—平板, 2—KKV指
数, 3—三次元(体積)
圧縮, 4—bevameter,
5—拘束付き剪断, 6—
自由無拘束圧縮, 7—流
体圧式雪錐, 8—密度と
温度, 9—Rammsond式
硬度計, 10—円錐

第3図 各種試験測定法
の比較

試験法のうちで最も適用性が低い方法は三次元(体積)圧縮試験と密度および温度の測定である。

引　用　文　献

1. Abele G. A correlation of unconfined compressive strength and ram hardness of processed snow. USACRREL Technical Report 85, 1963.
2. Abele G. An experimental snow runway pavement in Antarctica. USACRREL Technical Report 211, 1968.
3. Abele G. Deformation of snow under rigid plates at a constant rate of penetration. USACRREL Research Report 273, 1970.
4. Abele G., Ramseier R. O. and Wuori A. F. Design criteria for snow runways. USACRREL Technical Report 212, (1968).
5. Ager B. H. The compacted snow road, II. Climatic considerations. Technical Translation 816, National Research Council of Canada, Ottawa, 1959.
6. Bekker M. G. Introduction to Terrain-Vehicle Systems, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1969.
7. Krugelski I. J. The Physico-mechanical properties of snow and their application in the construction of airfields and roads, Academy of Sciences. Moscow, 1949.
8. Moser E. H. and Stehle N. S. Compacted snow characteristics-test devices and procedures, in "Science in Alaska, 1963", Proceedings of the 14th Alaskan Science Conference, Anchorage, Alaska, 27-30 Aug 1963, edited by G. Dahlgren, College, Alaska, Alaska Division, American Association for the Advancement of Science, 1964, p. 145-158.
9. Moser E. N. and Sherwood G. E. Compacted snow runways in Antarctica, Deep Freeze 65 trials, NCEL Technical Report R-480, 1966.
10. Moser E. H. and Sherwood G. E. The load-carrying capacity of depth-processed snow on deep snowfields, in "Physics of snow and ice", Proceedings of the International Conference on Low Temperature Science, Sapporo, 1966, vol. 1, pt. 2. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 1968, p. 993-1005.
11. Rula A. A. et al. Trafficability of snow; Greenland studies 1954, USA Waterways Experiment Station, Technical Memorandum 3-414, 1954, Report № 2.
12. Wuori A. F. Plate bearing tests on compacted snow surfaces, Master's Thesis, Michigan Technological University, Houghton, Michigan, 1957.
13. Wuori A. F. Supporting capacity of processed snow runways. USA CRREL Technical Report 82, 1962.
14. Wuori A. F. Snow stabilization for roads and runways. USA CRREL Technical Report 83, 1963.

§ 33 氷盤の主要パラメータの空間分布の統計的評価

A. Ya. Buzuev

氷の厚さをボーリングせずに測定する装置の開発は氷の研究におけるラジオ物理的方法の適用の最も重要な局面の一つである。この方面的研究の成否は、筆者等の見解では、計測技術の現状や将来の発展性に左右されるばかりでなく、さまざまな存在段階にあるさまざまな年令の氷の厚さの空間分布に固有な客観的特質の考慮もそれに劣らず重要な意味

をもっている。

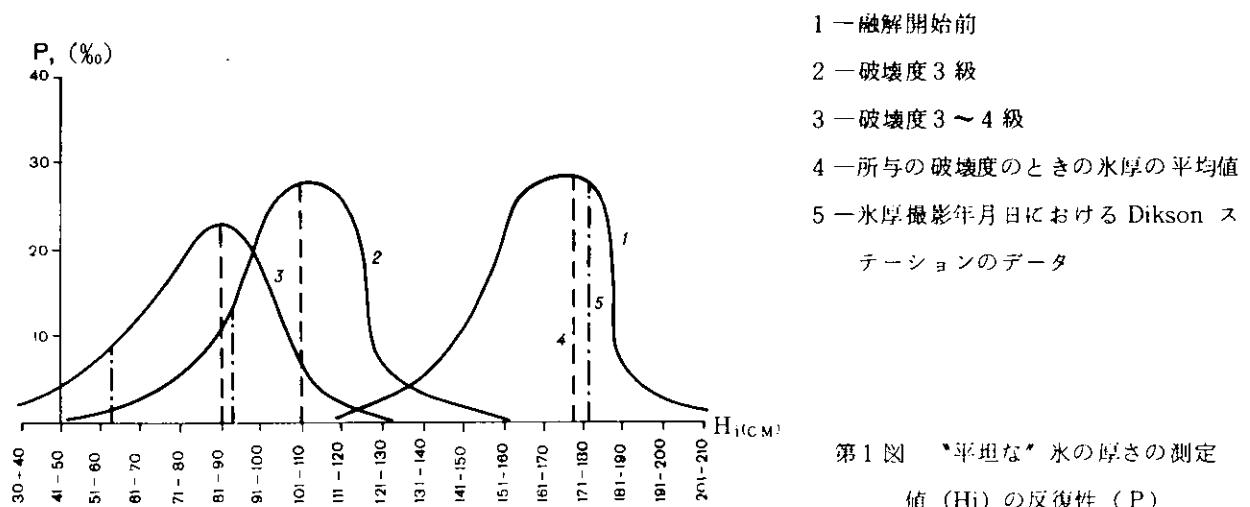
実際には、測定対象の特質を知るだけで、装置の分解能を求めることができ、また氷厚の実際の分布と測定結果の対応度を求めることができる。

本稿では主として定着氷の若干のパラメータに関する観測データの統計的処理の結果を吟味する。現在までのところ広大な水域での系統立った測定は実施されていない。その主な理由はこのような測定作業が多大の労力を要することにあった。従って、以下では特別なプログラムに従って他の種類の観測と併せて実施した測定で得たデータの処理結果を検討する。この測定はもっぱら5～10m間隔で（また500m間隔の場合もある）で行なった。

氷盤の状態を決定する諸パラメータの形成と空間分布は水文気象的因子とハイドログラフィック因子の総合したものによって律せられる。それぞれの個々のケースにおいて研究者はこれら全ての因子の作用による総合的な効果を観測する。従って、測定によって得られる値の処理と解析に当っては統計的方法が用いられ、氷盤の基本的パラメータはその場合確率的な値と看做される。

静穏な氷成長条件をもつ水域内における定着氷の分布特性を説明するため、文献(4)に挙げられているデータを利用する。さまざまな氷盤存在水域で実施された測定の結果から氷厚の分布に一般的な法則性が存在することが確認された。

(第1図)



第1図 “平坦な” 氷の厚さの測定
値 (H_i) の反復性 (P)

大部分の場合、分布はシャルリエの関数^{3, 6, 7)}を満足裡に反映している。この関数を求めるための基礎データとなるものは観測値の一連の母集団から求められる算術平均、分散、非対称および過剰(excess)である。

シャルリエの積分関数は下記の関係によって表わされる。

$$F(x) \approx F_0(t) - \frac{S}{6} \varphi_2(t) + \frac{E}{24} \varphi_3(t)$$

ただし、 $F_0(t)$ —正規分布の積分関数

S—非対称係数

E—過剰係数

$\varphi_2, \varphi_3 = F_0(t)$ の二次導関数および三次導関数

$$t = \frac{x - x_0}{\sigma} \quad \text{標準スケールでの確率値}$$

σ —平均2乗偏差

x_0 —算術平均

x —確率値

$F_0, \varphi_2, \varphi_3$ の関数値は表にまとめられているので、統計的母集団の4つのモーメントが既知であれば、計算は困難

でない。

北極海域および漂流観測ステーション、また南極の定着氷で得られた観測データを処理した結果に基づいてさまざまな年齢の氷の厚さの分布を表わす経験式（関数）が得られている^{1~3, 6, 7)}。経験的な分布と理論上の分をA.N. Kolmogorov の基準に従って比較対照したところ、両者は満足すべき一致をみた。このように、4つの分布モーメントが判明しているならば、任意の海域について氷厚分布の確率密度を算出することができる。

既に述べたように広大な水域での氷厚の系統的な測定は実施されなかった。従って、平均値、分散、非対称及び過剰を評価する間接的な手法を探索する必要がある。

基本的な論拠として第1のモーメント、即ち氷厚の平均値の利用が正当化されている。この値は計算に基づいて求めることもできるし、また検討対象とする領域内に存在する極地ステーションでの観測データから求めることもできる。

第2、第3、第4のモーメントに関しては、これらを近似的に評価するためにこれらのモーメントと平均氷厚との関係を利用することができます。このように、任意の手段、特にラジオ物理的手段による氷厚測定結果とボーリングによる“絶対的”な測定値との比較対照に当っては比較的安定な条件をもつ水域内においてすら氷厚はかなり大幅に変化していることを考慮する必要がある。分布パラメータの近似的評価において最も大きなばらつきがみられるのは氷厚が100 cm以下である場合である。

絶対的な測定値の最少量を決めるのに下記の関係を用いる。

$$n = \frac{t^2 \sigma_0^2}{\Delta^2}$$

ただし、n —サンプリング量

t —所与の確率値に基づき文献(8)の表から決定されたパラメータ

Δt —平均値の決定における所与の誤差

σ_0 —全母集団の分散

残念ながら、分布法則の知識は個々の間欠的な測定値の相互関係についての問題を解決できない。

さまざまな年令の氷について行なわれたあまり多數でない特別な測定（これらの測定のポイントは或る決まった間隔で氷にボーリングすることにある）に基づいて、さまざまな年令の氷の厚さの分布に関する構造関数および正規相関関数は次式によって近似化される。

$$K(\rho) = \exp(-a(\rho))$$

ただし、 ρ —測定点間の距離

相関関数と構造関数の知識によって経路の長さおよびそこで測定点の数との関係において平均氷厚の評価における平均誤差の大きさを評価することができる。従って、測定データの一般化と統計的処理は、筆者等の見解では、融解にいたる前のさまざまな年令の氷の空間分布の特質について重要な知見を与えるものである。

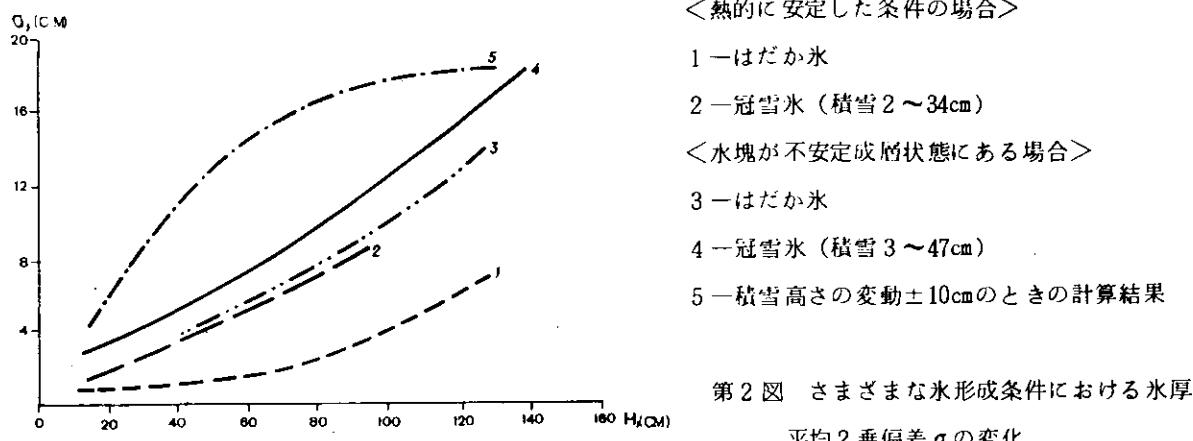
氷厚分布の一般的法則性は解氷期にも保持される。しかし充分に正確なデータに欠けているため、さまざまな破壊度における氷厚分布の特徴を更に詳細に記述することができない。ただここで指摘できることは、解氷開始時点までの特に氷厚分布の特徴によってもたらされる不均等な解氷過程のために氷盤の密接度の崩壊が起きることである。

従って、氷厚分布の特徴のほかに、氷と氷隙（底なしパドル）がそれぞれ占める面積の比も考慮する必要がある。解氷開始時点までに対して定式化された氷厚分布の法則性は破壊過程の性質に著しく大きい影響を与える。

氷厚分布の特徴を律する諸原因に対する詳細な検討は本稿の枠を超えたテーマであるので、ここではこれについては深く立入らない。ただ次のことを指摘するにとどめる。即ち、氷盤の形成過程を律するさまざまな因子のうちで氷厚の空間分布の特徴に大きな影響を及ぼすものは(a)氷の成長が起きる場所における水塊の保有熱量と成層状態、(b)積雪層の分布の特徴、(c)氷盤内の力学的プロセスの強さと性質である。

氷厚の変動性に及ぼすこれら諸要因の影響を説明するため第2図に新氷の冬期成長に至るさまざまな成長条件における

る平均氷厚からの偏差値の分布を示す。



<熱的に安定した条件の場合>

1—はだか氷

2—冠雪氷（積雪2～34cm）

<水塊が不安定成層状態にある場合>

3—はだか氷

4—冠雪氷（積雪3～47cm）

5—積雪高さの変動±10cmのときの計算結果

第2図 さまざまな氷形成条件における氷厚の
平均2乗偏差σの変化

表面層の熱的に安定した状態および水塊の安定した成層状態が保持される場合には、氷厚の変動性は積雪の有無および積雪の高さの分布特性（曲線1および2）によって決まる。

氷の成長期に水塊が或る保有熱量を有しているとき（曲線3）また氷の表面に積雪が有る場合（曲線4）には氷厚分布の不均等性がもっと明瞭に現われる。上述の諸要因と並んで氷の移動も影響因子となっている場所では平均値に対する個々の測定値のばらつきの大きさが最大に達している³⁾。

以上のように、相当広い水域において氷厚の測定を行なう場合にはその測定結果は所与の水域における氷盤形成の特質によって決まることを考慮しなければならず、またこの特質を比較測定の実施に際し必ず考慮しなければならない。

今迄述べたことの総括を兼ねて以下のことを指摘しておく。まず第1に、氷厚の測定は積雪の高さおよびその分布の特徴の評価と必然的に関係をもつ。解氷過程の開始時点までに一年氷について得られた特殊撮影の雪写真のデータを処理した結果から、大抵の場合に雪の高さの分布はシャルリエの関数^{3, 7)}によって満足裡に表わされることが明らかになった。個々の測定値間の相互関係は4～8m以下の距離で認められる。

2年氷および多年氷の積雪はもっと複雑に分布している。この場合における雪の分布は氷の堆積物と凍結したパドルから成るモザイク状を呈している上部表面の起伏状態の特徴によって決まる。雪が吹寄せるとき、それがパドルの場所に形成された氷中の窪みに充満して表面を平らにする。このような氷の上の積雪の高さの分布は、本質的には、2つの分布の合成である。

第2に、氷厚の測定に際して氷丘状の氷形成を考慮する必要がある。（氷丘氷を形成する氷の高さ、反復性、厚さの分布）。

測定データの一般化の結果から氷丘の高さと氷厚の間にある或る一定の相互関係が確立され、また氷丘の高さの測定データの統計的処理に基づいて次のことが確認された。即ち定着氷の場合、氷の表面の平均高さの上に出ている氷丘の高さの分布は下記のようにMaxwellの分布⁵⁾によって満足裡に表わされる。

$$\varphi(H_T) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{H_T^2}{\alpha^3} \exp\left(-\frac{H_T^2}{2\alpha^2}\right).$$

ただし、 H_T —氷丘の高さの単一値 (single value)

α —分布パラメータ

以上のように、測定データの統計的処理に基づいて氷厚、氷丘の高さおよび積雪層の高さの空間分布について若干の理解が得られた。ここで指摘しておきたいことはこれらの測定は全て船舶の水中航行、氷盤域における貨物輸送に関連する諸問題の解決に必要なスケールで実施された点である。その他の問題の解決に当て別のスケールで測定を行なうことは当然のことである。以上で述べた結果は、筆者等の見解では、測定方法の基本的問題の解決および得られたデータの利用に際して有用である。

引 用 文 献

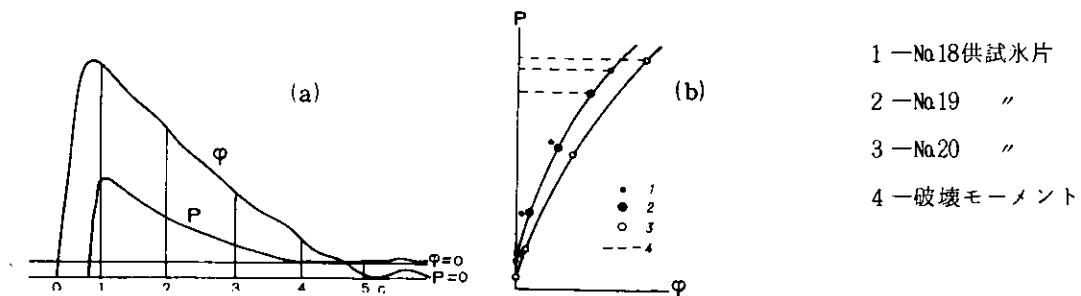
- 1) Buzuev A. Ya.: 氷厚の空間的変化を求めるための構造関数の適用. <北極・南極研究所紀要> Vol. 277, p. 132 ~137 (1966年)
- 2) Buzuev A. Ya.: 多年氷の厚さの分布についての若干の統計的法則性. <北極・南極研究所紀要> Vol. 284, p. 76~83 (1968年)
- 3) Buzuev A. Ya., Dubovtsev V. F.: 北極における氷盤の若干のパラメータの統計的特性. <北極・南極研究所紀要> Vol. 302, p. 166 ~ 179 (1971年)
- 4) Zubov N. N.: 北極の氷. Glavsevmorputi 出版. 359 pp (1945年)
- 5) Klimovich V. M.: 定着氷上の氷丘の特性. <Meteorology and Hydrology> № 5, p. 80~87 (1972年)
- 6) Romanov A. A.: ミールヌイ観測所地域における定着氷の厚さの分布の特徴. <ソ連南極探検隊情報誌> № 37, p. 22~25 (1969年)
- 7) Romanov A. A., Ulitin V. N.: 南極の定着氷および積雪高さの空間的変化について. <ソ連南極探検隊情報誌> № 76, p. 37~41 (1970年)
- 8) Shor Ya. B.: 質および信頼性の分析と監視のための統計的方法. <ソビエト・ラジオ>出版. 551 pp (1962年)

§ 36 氷盤の物理的・機械的特性の実地研究

A. Ya. Riblin

1950年から1971年にかけて北極・南極研究所の船舶耐水性能実験研究室はソ連のさまざまな海域および水域における氷盤の若干の物理的・機械的特性について実地研究を系統的に実施した。特に氷盤の曲げおよび外部摩擦に対する強度については完全に調べた。これらの氷特性は船舶の氷中耐航性に関する実際的な計算、氷盤の載荷力の評価などに際して最大の関心事項となるものである。実施した実験の結果の解析から実際面に適用可能な一連の興味有る結論を得ることができた。

氷盤の強度に対する研究は氷盤内でその全氷厚を挽き切り取った幾つかの供試氷片を浮遊状態において破壊する試験に依って行なった。供試氷片は片持ちはりまたは両端で自由に支持された単純はりの形にして用いた。これらの破壊は機械的な力を供試氷片の上から下へ、または下から上へ加えることによって起こさせた。その際の印加力の増加時間は0.5 ~ 5 sec の範囲にあった。試験の過程で気温、水温および氷温の測定を行ない、氷の構造および供試氷片の破壊の性質について実視観察を行なった。破壊力は動力計 (dynamometer) を用いて確認した。また若干の試験では供試氷片に加えた力と歪み量とを同期記録し、このために特別な電子機器、即ち歪測定式動力計および角変位ピックアップを使用した。このような記録方式によって厚さ68cmの淡水氷の供試片について得られた破壊ダイヤグラムを第1図に示す。破壊モーメントにおけるビーム氷の撓み量は比較的小さい (0.5 mm) ことが判明した。



(a) 力 P と供試氷片断面の回転角 ϕ の一次記録 (b) 供試氷片の破壊過程における力 P と歪み ϕ との関係

第1図 供試氷片の破壊ダイヤグラム

ここで得られた破壊ダイヤグラムの解析から、氷については歪みと力との関係は非線形性を呈すると結論付けることができた。このことは、厳密に云えば、強度および歪み係数の限界を求めるための既知の弾性論の式はこの場合に適用できないことを裏付けている。しかし、現時点においてはしかるべき非線形形式が存在しないので、実際には弾性論による普通の装置を用いざるを得ない。若干の研究者は破壊ダイヤグラムにおける $P = f(\varphi)$ 曲線の個々の区間を直線化してこれに対処している。これは必ずしも全面的に正しいわけではない。全ての得られている実験点を考慮するべき線形回帰方程式によってこの $P = f(\varphi)$ の関係を表わすならば、もっと信頼できる結果が得られる。この場合、氷盤の静的弾性率を次式から計算することができる。

$$E = \frac{Pl^2}{2I_v} \left[2\left(\frac{Z}{l}\right) - \left(\frac{Z}{l}\right)^2 \right] \quad (1)$$

ただし、I — 供試氷片の断面の慣性モーメント

Z — ビーム氷の根元断面から弾性線の回転角測定点までの距離

v — 弹性線の回転角

式(1)によって算出された E の値は筆者等のデータに依れば淡水氷の場合、 $(11 \sim 20) \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 程度の大きさである。限界曲げ強度は次式に従って算定することにする。

$$\text{片持ばりに対しては } \sigma_{bend} = \frac{bPl}{bh^2} \quad (2)$$

$$\text{単純ばりに対しては } \sigma_{bend} = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (3)$$

ただし、l, b, h — 供試氷片の断面のそれぞれ長さ、幅、高さ

1950年から1971年にかけて得られた実験結果を電子計算機で統計的に処理した結果から、さまざまな水域（海水域および淡水域）、季節（秋、冬、春）、温度、その他条件に対応する σ_{bend} の統計的期待値は 3.77 kg/cm^2 （ただし分散 2.37）であることが判明した。最も高い強度をもつ氷は淡水性の冬氷であり（統計的期待値は $d_{bend} = 4.81 \text{ kg/cm}^2$ 、ただし分散 1.76），最も低い強度の氷は海洋の塩水性の氷である（統計的期待値は 2.5 kg/cm^2 、分散 0.61）。

天然の氷盤の σ_{bend} の実験値の確率の分布密度は正規分布と充分に良く近似している。氷盤の限界強度の平均値の大きさは塩分および温度と相関関係があり、実質的には供試氷片の種類（片持ばりで単純ばりか）、荷重が加えられる方向（下向きか、上向きか）、水域の地理的位置、等々の要因には依存しない。

与えられた或いは予測される外的諸条件に対応する σ_{bend} 値は筆者等によって得られた下記の式による計算から求められる。

$$\sigma_{bend} = \sigma_{bend}^{lim} \left(1 - \frac{S_i}{S_i^e} \right) \quad (4)$$

ただし、 S_i^e — 氷の塩分の極値（平均して 15%）

S_i — 氷盤の塩分の平均値（%）

σ_{bend}^{lim} — 淡水性の氷盤の限界曲げ強度（その大きさは温度に依存する）

この値はダイヤグラム（第2図）またはその他の任意の手法によって算定することができる。 S_i 値は下記の経験式を用いて求めることができる。

$$S_i = S_w (1 - b) \exp(-a\sqrt{h}) + b S_w \quad (5)$$

ただし、 S_w — 氷結の元となる水の表面層の塩分（%）

b — 一定の経験係数（平均して 0.13）

h — 氷厚（cm）

a — 氷の成長速度を考慮した経験係数（この値は 0.35 ~ 0.60 の範囲にある）

氷の成長速度が $V_i \approx 4.0 \text{ cm/day}$ と大きいときには $a = 0.35$ であり、 $V_i = 0.5 \text{ cm/day}$ と小さいときには $a = 0.60$ である。上記の両値の間の中間的な V_i 値に対しては直線的な外挿が適用できるが、 V_i 値が与えられていない場合には平均して $a = 0.50$ と探ることができる。

式(4)と式(5)は簡単な式であり且つ豊富な自然のデータによって裏付けられたものであるので実用に便利である。

外部摩擦を調べるための実験は淡水と海水の氷盤で実施した。その実験方法はクーロンーアモントンの法則の適用に基づくもので、これは氷の外部摩擦機構の現代的な解明に全面的に答える法則である。自然条件のもとでの試験での供試表面としては天然氷盤上の射撃場（ポリゴン）が用いられた。このよ

うなポリゴンは表面粗度、破壊度、冠雪状態などにそれぞれ特徴のあるさまざまな区域に設けられていた。供試体は円筒形をした天然氷または鋼鉄を用いた。供試体の基礎の直径は 70cm であった。摩擦面に充分に大きい圧力が作り出されるように、供試体に所定の重量の重りを載せた（供試体の最大総重量は 920 kg に達した。これは比圧力 230 g/cm^2 に相当する）。氷盤の供試表面上での供試体の曳引はトラクタまたは雪上車によって行なった。そのけん引力の測定は歪測定式動力計（strain-gauge dynamometer）によって行ない、その指示値がオシログラフのテープに記録された。このテープには曳引速度も同時に記録されたが、これを求めるために特別なピックアップを供試体に設置した。動摩擦係数 f_{dyn} は供試体の運動が一様であった（即ち速度 $V = \text{const}$ であった）区域における動力計の指示値 S_{dyn} を平均化する方法によって求めた。即ち

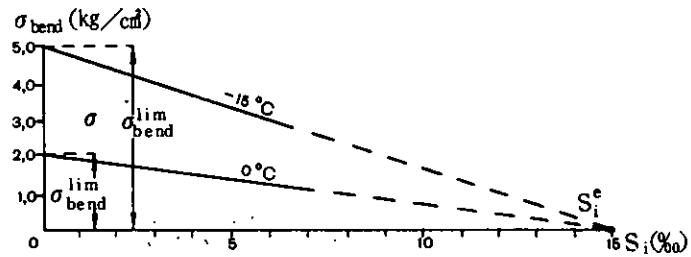
$$f_{dyn} = \frac{S_{dyn}}{P_o + P_w} \quad (6)$$

ただし、 P_o 一供試体の重量； P_w 一重りの重量

静摩擦係数は次式に従い供試体が場所を変える瞬時における曳引力 S_{st} の大きさによって求めた。即ち

$$f_{st} = \frac{S_{st}}{P_o + P_w}$$

実験結果から、氷の摩擦係数の大きさに最も著しい影響を与える要因は温度およびそれに関連した氷表面と供試体との凍着（第1表）、また冠雪状態（第2表）であることが確認された。他方、摩擦面における比圧力、滑り速度（試験では $0.2 \sim 5.0 \text{ m/sec}$ の範囲にあった）。氷中の塩分、氷表面の粗度 *1、氷表面の破壊度（破壊層の存在）、氷表面を覆う水の存在などの諸要因は摩擦係数に大きな影響を及ぼさない。これらの諸要因の働きを受けて最も著しく変化するものは静摩擦係数であり、この値は 0.15 から 0.92 までの比較的広い範囲に亘って変化することが確認された。氷の動摩擦係数はもっと安定した値を示している。そのため、 f_{dyn} の平均統計値（平均して $0.08 \sim 0.1$ ）を近似計算に用いることができる。特別に行なわれた実験に依れば、供試体の鋼鉄表面を加熱するか或いは供試体に振動を与える方法を探れば氷の静摩擦係数を著しく低下させる ($1/1.5 \sim 1/2$ に) ことができる事が判明した。なお、加熱と振動は動摩擦係数の値を実質上変化させない。



第2図 氷の塩分と強度との関係
(点線は外挿部分を示す)

*1) ここで問題となる表面粗度は供試体の寸法よりもはるかに小さい次元のものである。

第1表 氷の表面への鋼製供試体の凍着が静摩擦係数に及ぼす影響

氷の表面の状態	温 度 (°C)	凍着時間 (min)	f_{st}
粒状表面をもつ海水氷	- 2	20以上	0.4
	- 2	10	0.33
	- 2	5	0.30
	- 2	0.2~0.5	0.25
滑らかな表面をもつ海水氷	- 2.8	2以上	0.53
	- 2.8	1~2	0.43
	- 2.8	0.1~0.5	0.39
粒状表面をもつ淡水氷	- 5	10	0.78
	- 5	5	0.54
	- 5	1~2	0.44
	- 5	0.1~0.5	0.29

第2表 摩擦係数に及ぼす新冠雪の影響

氷の表面の状態	温 度 (°C)	f_{st}	f_{dyn}
粗面, 冠雪なし	0	0.16	0.07
高さ 0.5 cm の新冠雪	0	0.17	0.08
" 2 cm "	- 3	0.27	0.14
" 15 cm "	0	0.92	0.26

IV 氷海航海の経験 M. B. Gotsky (1961年) 抜粋

第1章 概論

第3節 氷海に関する基礎知識

§13 氷状図の作成と読み方

氷状図（または単に氷図とも云う）は船長に氷の状態に関する情報を提供するもので、主として航空機による氷状偵察のデータから作成される。

氷状図の基礎になるものは偵察機に搭乗した水文専門家と操縦士による特別な氷状観察である。その観察結果は白地図（またはそのコピー）に所定の記号によって記入され、必要な説明書きが添えられる。

一般に氷状図には次の項目が記載される。

1. 偵察機の飛行コース。飛行方向を矢印で示し、観測で求めた地点と座標をコースに記入。
2. 所与の氷状図の縮尺に合せた視界距離
3. 所定の記号類によって表示される氷状
4. 地上（海上）の風力と風向
5. 偵察飛行で遭遇した全ての船舶の船名とその位置および遭遇時刻

航海用の（即ち操船用の）航空偵察図にはさまざまな密接度の水域が等密接度曲線（等階級線）で表示され、偵察で確認した密接度はそれぞれ該当する色で示される。

さまざまな密接度の水域における支配的な氷の形状と種類は符号（カラーマーク）で表示され、該学する氷令色で表わされる。

このような彩色表示は氷生成期に作成する氷状図にも適用されるが、この場合、ニラスの生成が始まっている開水面は灰色で表示される。

その他の特性（圧縮度、破壊度、他）はそれぞれ該当水域を境界線で囲む方法で表示され、そこに所定の記号また必要な場合には説明書きが付けられる。

氷状図に密接度、その他の特性の境界を点線で示したものはそれが近似的に確定したものであることを意味する。

氷状図に採用されている主な氷状表示記号を一括して添付の表に掲示する。

これらの表示方法で氷状図に記入できないデータは図中または余白部分に適当に書き込む。

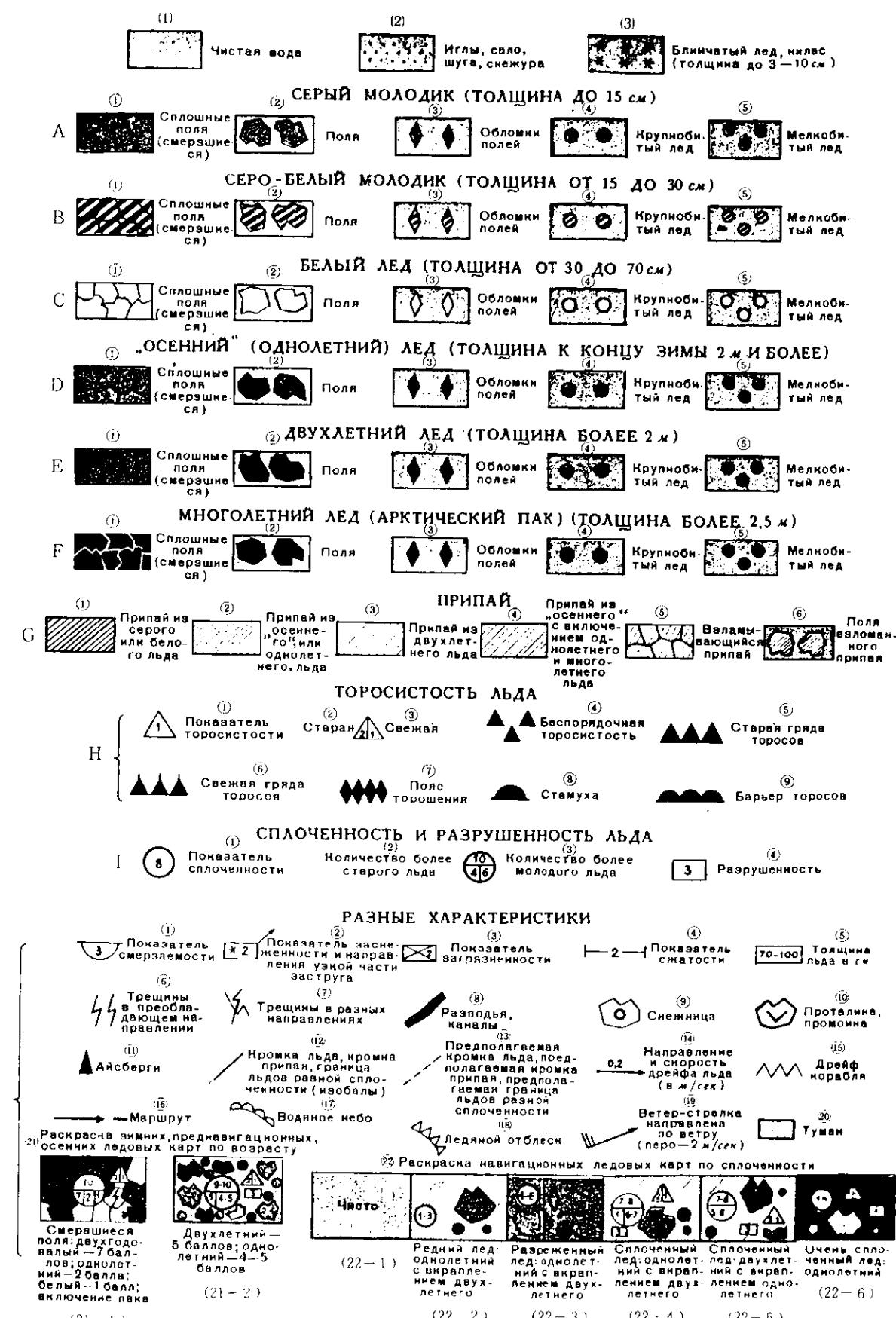
更に、氷状図には標記の形で氷状偵察機の機種と機体番号、飛行年月日、時刻（モスクワ時間）、発進一帰着地点、機長、操縦士、水文専門家の氏名（各自が署名）、飛行高度、各航路での視程などが記入される。

氷状図は偵察の目的と性質に応じて一般に70万分の1から20万分の1（また場合によっては10万分の1）までの縮尺で作成される。作戦行動（オペレーション）的な性質の航海用偵察では水中操船を目的とし、また一般に比較的狭い水域ルートを対象とするので、スケールの大きい（1/20万またはそれ以下の縮尺率の）氷状図が用いられる。

氷状図を作成した後にそのコピーを取り、場合によってはそこに赤い点線で船舶に対する勧告コースを指示し、また船長に対する指示を付書する。この指示は氷海航行指揮官船長が偵察機に搭乗して行なうのが最も一般的である。添付の図のように全体が採色表示された氷状図が報告筒に入れられて偵察機から船上に投下される。

氷状図とそれに添付された進路勧告を受け取った船長はそれを航海図に主要な氷状データと一緒に書き移す。その他のもっと詳細な氷状情報については常に航海長デスク上に置かれることになっているコピー氷状図から得られるようになっている。

＜添付表＞北極海域の氷状図に使用される各種カラー表示記号



<添付表>の説明

(1) 開水面, (2) 針状晶氷, 薄膜状晶氷, 雪泥, スポンジ氷 (3) はす葉氷, ニラス (厚さ3~10cmまで)

A. 薄い板状軟氷 (厚さ15cmまで)

①密接*(凍結)氷盤, ②氷盤**, ③中氷盤, ④小氷盤, ⑤板氷

B. 厚い板状軟氷 (厚さ15~30cm)

①密接*(凍結)氷盤, ②氷盤**, ③中氷盤, ④小氷盤, ⑤板氷

C. 薄い一年氷 (厚さ30~70cm)

①密接*(凍結)氷盤, ②氷盤**, ③中氷盤, ④小氷盤, ⑤板氷

D. "秋氷"(一年氷) (厚さは冬期の終りに2mまたそれ以上)

①密接*(凍結)氷盤, ②氷盤**, ③中氷盤, ④小氷盤, ⑤板氷

E. 二年氷 (厚さ2m以上)

①密接*(凍結)氷盤, ②氷盤**, ③中氷盤, ④小氷盤, ⑤板氷

F. 多年氷 (多冬極氷) (厚さ2.5m以上)

①密接*(凍結)氷盤, ②氷盤**, ③中氷盤, ④小氷盤, ⑤板氷

G. 定着氷

①板状軟氷または薄い一年氷から成る定着氷, ②"秋氷"または一年氷から成る定着氷, ③二年氷から成る定着氷

④"秋氷"に一年氷と多年氷を含む定着氷, ⑤破壊進行中の定着氷, ⑥破壊された定着氷

H. 氷丘の状態

①氷丘度(起伏度), ②旧氷丘の氷丘度, ③新氷丘の氷丘度, ④無秩序な氷丘群, ⑤旧氷丘脈, ⑥新氷丘脈, ⑦氷丘帶, ⑧坐氷丘, ⑨氷丘堤

I. 氷の密接度および破壊度

①密接度, ②旧氷の量(割合), ③新氷の量(割合), ④破壊度

J: その他の諸特性

①凍結度, ②冠雪度およびスカブラの向き, ③汚損度, ④圧縮度, ⑤氷厚(cm単位), ⑥卓越方向の割れ目, ⑦さまざまな方向の割れ目, ⑧氷池, 水路, ⑨バドル, ⑩底なしバドル, 氷隙, ⑪氷山, ⑫水縁, 定着氷の縁, 密接度の異なる氷域の境界(等階級線), ⑯推定氷縁, 推定定着氷縁, 密接度の異なる氷域の推定境界, ⑭氷塊の漂流速度(m/sec単位), ⑮船の漂流, ⑯進路(航路), ⑰水空, ⑱水映, ⑲風向と風速(羽根矢1本につき2m/sec), ⑳霧, ㉑冬期の、航海前の、秋期の氷状図(氷令に依る彩色表示)

(21-1) 凍結氷域: 二年氷7級, 一年氷2級, 薄い一年氷1級, 大氷塊を含む。

(21-2) 二年氷5級, 一年氷4~5級

㉒氷域の密接度に依る航海用氷況図の彩色表示

(22-1) 開放水面

(22-2) 分離氷域: 一年氷(二年氷が混在)

(22-3) 疎氷域: 一年氷(二年氷が混在)

(22-4) 密氷域: 一年氷(二年氷が混在)

(22-5) 密氷域: 二年氷(一年氷が混在)

(22-6) 最密氷域: 一年氷

* — 密接度9~10級(訳注),

** — 巨大~大氷盤に相当する(訳注)

<添付図> 氷状図の一例

氷状航空偵察 №6

1958年7月6日

偵察機：Li-2, N-04145
登進：ベヴェク, 00-15；帰着：ベヴェク, 9-00

飛行高度：50～100m
路程：7～10 mile

機長：Petrov

操縦士：Shcheglov
水文事門家：Ivanov



ベヴェクへのコースで最も困難な区間はシェラグスキイ岬の氷域であり、その氷の密接度は7級に達していますが、氷の破壊度は大きく、碎氷船の通過は全く可能です。この氷域を通過する誘導が困難な場合には船団を小船隊に分けて誘導されたし。シェラウロフ島水域でオメガ号が船間に加わります。状況が困難になつた場合には本機を呼出されました。

指揮官船長 B.K.Konev.

7月6日 08.00 (モスクワ時間)

第2章 氷海における海洋型船舶の自力航行

第4節 氷との遭遇が確実な海域での航行の特徴：氷塊への突入

§14 一般的注意事項

各船長の目的は氷との遭遇が確実な海域に入るまでに予定の進路における氷状に関する完全な情報を入手することにある。

自力航行に必要なこの種の情報を船長は、通常、下記から入手する。

1. 該当海域における氷中運行を指導する担当者または担当機関
2. 該当海域における船舶の航行を保障する碎氷船舶長または氷中航行指揮官船長（水先案内人）
3. 該当海域を管轄する気象通報局

第一の場合には沿岸のステーション、海上の船舶また、これが主体であるが、偵察用航空機による氷状観察に基づいて作成された航行海域の氷状図が船長に手渡される。この氷状図には至近未来に予想される氷状変化についての補足的な情報も付けられなければならない。

第二の場合には氷状が氷状総括報告の形で各船舶に無線で伝えられ、この情報は各船長自身によって氷状図に記入される。

氷状情報には下記の項目が含まれなければならない。

1. 氷縁の位置と状態
2. 進路方向の全域における氷状の一般的特徴。
3. 今後数日間に予想される氷状変化
4. 現在の氷状または予想される氷状に基づき自力航行船に対して勧告されるコース

この最後の勧告コースでは前述の担当者または担当機関によって既に確認された、またもっと重要である。今後予想される全ての氷状変化に関する情報が船長に系統的に与えられなければならない。

氷状について予備的に情報を入手した船長は航行の過程において可能なあらゆる手段をつくしてこの情報を正確に確認しなければならない。それと共に船長は自からが観察した氷状を氷中運行指導担当者および他の船舶の船長に知らせる義務がある。

この目的のために各船舶において全ての水文気象の系統的な観測を実施する必要があり、またそのために必要とされる複雑でない観測計器類を使用できるようにしておく必要がある。これに劣らず重要なことは至近未来の氷状変化を律する局所的徵候または前兆を知ることである。これは極めて水文気象の観測に基づいて経験的に把握されるものである。

船が氷との遭遇の確実視される海域に入ると直ちに船長は近似的にしか位置が判かっていない氷縁をタイミングを逸せずに発見することに注意を払わなければならない。このことは霧、降雪また暗いとき、即ち視界が制限されたもとで航行する場合に特に重要である。このような条件のもとでは、計算上、氷との遭遇の可能性がある海域に存在する船は減速進行しなければならない。船速の低減度合は視界条件、その船の慣性の大きさ、また電波標定器の有無、操船上の技術的データによって決められる。

視界が限られている場合には特に細心の注意を払って風上の氷縁に接近する必要がある。この氷縁は一般に開水面との境界がはっきりと現われている（第41図）。

風下の氷縁では様相が異なり、氷縁は不明瞭であり、風下に遠くまで引延ばされている。このような氷縁に近づいた船が最初に遭遇するものは小さい氷片であり、これらは重い氷との遭遇の可能性を予告するものである。他方、風上の氷縁に接近するときには重い氷との遭遇は全く突発的に起きる。従って船長は風上の氷縁の位置をできるだけ早期に明らかにするように努めなければならない。

周囲の状況を詳細に観察すれば船からの視界内に氷が現われるよりもはるか以前に氷縁の接近を知ることができる。

この面で船長に大いに役立つものは氷縁のいわゆる接近徵候である。

§ 15 氷塊接近の主な徵候

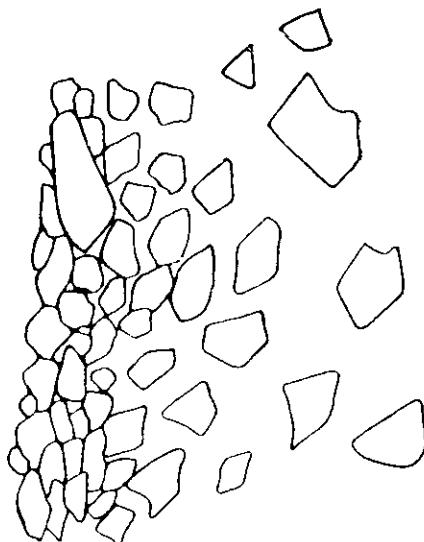
開水面の側から観察する場合

(1) いわゆる氷空（第43図）^{（*）}は

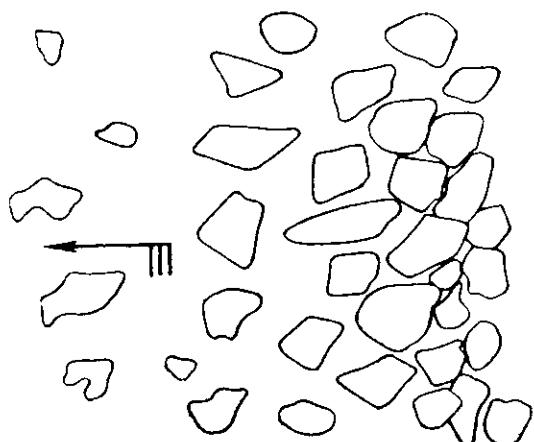
氷が存在している水平線上の低い雲の下面に氷を反射して現われる白っぽい輝きまたはもっと明るい反射である。この氷映は初めはあまりはっきりと識別できない狭い帯状または斑点の形で水平線上に現われ、船が氷縁に近づくにつれて次第にはっきりと見えるようになり、水平方向にも高さ方向にも拡がる。この現象は特にどんよりとした天気で雲が低い場合に特徴的である。この現象を発見することによって船長は該当方向に多量の氷が存在することを予知して警戒する。

晴天で明るい日には水平線上に雲が存在しないので、氷映を観察することができない。しかしこのような条件のときには水平線の＜氷の部分＞が独特的な色調を帯び、他の水平線部分と区別することができる。晴天の空は通常は青空色を呈しているが、氷が存在する水平線部分ではこれが極めて独特な白味がかった色調を呈し、あたかも透明さを失なって濁った様相を呈している。これは相対湿度が大きいこと、従ってまた氷の上方に存在する空気の透明度が小さいことによってもたらされる現象である。この現象が特に顕著に現われるのは氷の側から風が吹いているときであり、その場合風上の水平線は銀色がかった色調を帯びることすらある。

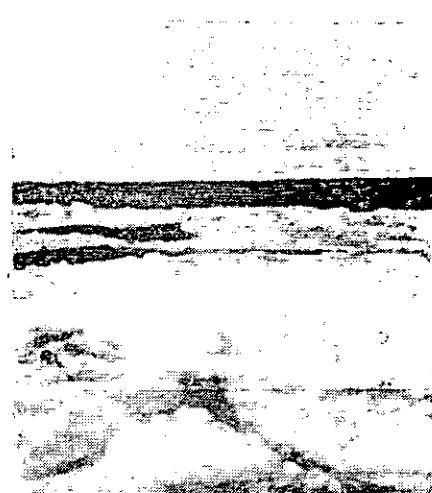
(2) 反射現象 晴朗な天気のもとで航行するときに航海者が氷縁を予知するのに大きな助けとなるものは高緯度海域において特に強く現われる反射である。



第41図 風上の氷縁の状態の図式的表示



第42図 風下の氷縁の状態の図式的表示



第43図 氷空（氷映）と水空

（*）氷空（ice sky）と氷映（ice blink）が同義語として用いられている（訳注）

さまざまな遠隔物体の像を持ち上げることによってこの反射は視程の2~3倍の遠い場所にある水平面上の空の下側部分に氷の像を映し出すことができる。この場合、氷の像は明るく輝やく帶（＜壁＞）の形で現われ、また密接水域でない場合には氷池が黒い垂直な縞となって現われる。このような現象が特に鮮明に出現するのは晴天の日に氷の側から風が吹いて来る場合である。

(3) 氷に対する風の方向と天気の状態との関係。氷の側から冷たい風が吹いているときには一般に空は天心も水平線上も明るい。換言すれば、晴天のときの冷たい風はその風上の水平線部分に多量の氷が存在することの特徴である。

これは冷たい風がそれよりも暖かい開水面の上を通過することによって相対湿度を低下させ、全体的に明るさをもたらすためであると説明される。

晴朗な天気の日に暖かい海風が吹くときに風下の本平線上には上端が引裂かれた鉛一黒色の雨雲の形をした濃い霧の発生が観察される。換言すれば、晴天で暖かい海風が吹いている場合に風下方向の水平線上に現われる霧はその海域に多量の氷が存在することの徵候である。

これは海上を運ばれた暖かい湿った空気が氷の上を通過して冷却され、その相対湿度を増して、氷上に垂れ下る霧の発生をもたらすことによって説明される。

四方八方から立ちこめて次第に空いっぱいに拡がる霧は船の前方に個々の小氷帯が存在し、更にその前方の風上に相当広い開水面が存在することの徵候である。

(4) 氷に対する風の方向と海の状態との関係 疾風が持続して吹く場合に海岸から遠い海域でうねりが減小したりまたは存在しないことは風上に氷縁が接近していることの最も確かな徵候である。

開水面の側から疾風が吹き、うねりが起きる場合に風下から逆の反射波、もっと正確には三角波、が生じることは重い氷が極く近くに接近していることの徵候を示す。これはしばしば捕捉困難な徵候でもある。

(5) 海水面の温度の低下 冬期に中緯度海域を航行するときに海水温度が、特にキングストン弁の深度において、凍結点まで低下することは氷の接近を裏付ける徵候である。

夏期に高緯度海域を航行する場合の水温低下は氷縁が長時間静止していた場合か、或いは風や潮流の作用を受けて観察者の捕捉範囲外に去ってしまった場合に限って氷の接近徵候となる。氷縁が観察者に接近する場合には海水温度の低下は大抵の場合に認められない。

以上のことから次のように判断される。即ち、中緯度海域で水中航行する場合に氷との遭遇が確実な領域における海水温度の系統的な測定はタイミングの良い氷縁発見のための信頼できる手段であるが、高緯度海域においてはこれは決して常に（いずれにせよ夏期には）信頼できる手段であるとは限らない。

(6) 気温の低下 一般的には、特に高緯度海域において水中航行しているときの気温の低下は氷の接近についての信頼に足る徵候であるとは認められない。大規模な集積氷群の側から風が吹く場合にのみ急激な温度低下が検知される。しかし既に指摘したように、空の一般的な状態と関係した冷たい風は温度の低下とはかわりなく氷縁接近についての信頼に足る徵候と認められる。このように、この唯一の場合にも、即ち氷の側から風が吹く場合に、検知される気温低下は氷の接近についての補足的な徵候の役割を果すにすぎない。

(7) 相当広い開水域にわたる小板氷の出現は、原則として、氷縁の接近を示唆するもので、これは最も頻繁に実証されている。

(8) 多数の海獣の出現 せいうち、あざらしなどの海獣また氷縁付近で餌を探す若干種類の海鳥類（うみばと、うみがらす、かもめなど）の大量出現もまた大量の集積氷群が10~15-mileの範囲内に存在することを予告する充分に信頼できる徵候となる。

この場合、これらの海獣や海鳥は餌となるプランクトンが豊富に存在する海域の融解しつつある氷縁の付近に最も頻繁に発見されることに留意しておくべきである。また氷縁には餌探しに白熊も出現する。氷縁に熊が居ることは重い氷盤の接近徵候として認められる。

(9) 霧中航行時に氷状態のもとでうねりが有る場合 この場合に氷縁が極く近くに接近していることの徴候となりうるもののはうねりに乗った氷塊が互に擦れ合って発する独特なノイズである。また、あまり遠くない距離において氷盤があたかも霧を通して透けて見えるように暗い開水面をバックにして明るい斑点となって現われる。濃い霧の中で観察者の視野に入ってくる氷塊はその形態が霧によって非常に拡大されまた歪められたものであるが、氷塊の周囲の霧を照明する独特なく光輪によって取囲まれた状態に見える。

氷の側から観察する場合

(1) いわゆる水空（第43図）は氷映と同様に、低い雲のバックグランドに広い開水面の反射を映し出したもので、暗い色の（黒色に至るまでの）斑点や帶の形で観察される。雲に反射したこのような斑点は、場合によつては、水の反射でなく、汚れた水（それがその海域に存在しておれば）の反射であることがある。

雲への氷池の反射は氷の反射が明るい斑点の形でなされる中で暗い帶の形になって現われる。

通常、氷縁に10～15 mile またそれよりも近くまで接近したとき開水面上の空は水平線方向でもまた高さ方向でも広い空間に亘って暗い青色（ほとんど黒色）に見える。他方、晴天の日には水面上の空は正常な色を帯びているが、水上の空の白味がかかった色調と較べれば、水上部分の空の色はもっと青色が強くなっている。

(2) 晴天の日にみられる反射は水平線上に氷縁像を持ち上げ、氷縁に対する視程を著しく増大させる。

しかし、氷の側から観察する場合の氷縁の姿は氷の側から観察した場合のように連続した氷＜壁＞とはならない。この場合、氷縁の姿は暗い光明で分割された明るい鋸歯状の峯列——暗い水面をバックにした氷舌——の形に表わされる。

(3) 水域中におけるうねりの出現は氷縁接近についての最も信頼できる徴候である。若干の場合においては、特徴的に破碎された後に再び凍結した氷盤の形をして止まったうねりの跡によって氷縁の接近が予告される。

(4) 疎水域において益々増加する海獣と海鳥の出現は開水面の接近を知る信頼すべき徴候である。

近年に到り氷海可航型船舶に氷縁の早期発見の新しい可能性が賦与された。それはこの種の船舶に広く採用されている電波標定装置であり、これによつて船長は氷縁並びに個々の集積氷群を早期に発見できるばかりでなく、これらの位置を確認することもできるようになった。

このことは、勿論、以上で述べた氷縁接近の諸徴候がその実用上の意味を失なつたり、或いはこれらをもはや無視することができるということを決して意味しない。実際に電波探知システムは予期しない氷との遭遇を回避するのに船長に大いに役立つが、その適用効果が最も完璧に現われるのは電波探知システムの採用に際し既に明らかにされている諸々の氷縁接近徴候が考慮に入れられている場合である。

§ 16 電波探知方式による氷像確認可能距離

電波探知方式によって氷を発見できる距離はこの装置の技術的性能と観測時の気象条件また氷自体の特性に直接依存する。

氷から反射されるエコー信号の強さは氷の形状、大きさおよび表面の状態に左右される。探知対象となる氷の規模が大きいほど、氷の表面が平坦でないほど、また前壁の傾斜が急峻なほど、レーダーのスクリーンに早期に且つ鮮明にその氷像が映し出される。

現在の電波探知器（レーダー）は密接水域の氷縁を2～3 mile の距離で確実に且つ明瞭に検出できる性能をもついている。その場合、氷山発見の確率はその氷山の前壁傾斜の勾配が小さくなるにつれて低下する。従つて実際のケースとして高さ20～25 m、前壁傾斜角約60°の氷山がスクリーン上に板氷をバックにして印影扇形としてはっきりと現われながらも氷山としては探知されなかつた場合がある。

低い氷山および氷山片の探知可能距離は著しく短かいが、稀れには3～5 mile 以上の場合もある。実際に、肉眼で発見された小さい氷山がレーダーのスクリーンには映らない場合が静穏な海上で起きたことがある。これは船舶が霧中を

航行する場合に重大な危険要素である。視界の悪化、海上の波と風の強まりはレーダのスクリーンに頼る氷山の識別を益々困難にする。

大氷塊より成る氷群の探知は 3 mile までの距離ではいかなる条件のもとでも可能であり、氷丘状の定着氷は 4 mile まで、坐氷丘と氷岩は 3 mile まで、個々の氷塊は 1 ~ 2 mile までの距離でそれぞれ検知可能である。

ここで特に指摘しておくべきことは平坦で大きな氷盤は静穏な天気の場合においてもレーダのスクリーンに像を結ばないことがある。レーダのスクリーンに反射信号となって出現するものは起伏の有る氷から反射されたものだけであり、その信号の強さと鮮明度は起伏度の増大に伴ない増大する。平坦な氷については大抵の場合、その氷縁のみからの反射信号が現われる。その場合、海が波立っているならば、このような氷の氷縁の輪郭も検出される。

大抵の場合、さまざまに形成される軟氷もスクリーンで判別できないが、場合によっては個々の種類（はす葉氷）を 0.5 ~ 1.0 mile までの距離で確認することもある。

海が静穏でない場合には電波探知距離は全ての種類の氷について著しく低下する。若干の種類の氷（個々の氷塊、小さい氷山片など）は波浪による干渉のために一般に検知できない。従って、海が荒れて視界が悪いときにはレーダの使用は氷との遭遇が確実視される海域を航行する場合に採られる通常の諸警戒措置を無用にするものでは無い。

その他の起り得る干渉（大気水象による干渉を含む）については、これらが電波標定方式による氷の探知距離に与える影響は前記の干渉よりも程度が低い。

以上のように、氷況からみて危険な海域を航行する場合にタイミング良く氷を発見するためには海面に対して系統的にレーダ監視を実施することが全く必要である。このような監視は少なくとも氷山と遭遇しない場所ではできる限り大きい映像スケールで、即ちレーダ<ネプチューン>では 1.5 mile スケールと 5 mile スケールで系統的に両者を交番させて行なうべきである。このような監視の頻度と継続時間は船速と視界限度によって決められる。

霧中を速度 10 ~ 12 kt で進行する船は電波監視を絶えず実施しなければならない。このような条件のもとでは船に氷の出現が予告されるのは 10 ~ 12 min 前となる。この時間は所与の船速のもとで氷との衝突を避けるのに充分な時間である。

§17 氷中の突入

船が氷中に突入する前に船長はマストからの視界の範囲内で氷の状態を綿密に調べなければならない。これを行なった後にはじめて船長は、既に入手している事前の氷状情報並びに天候および氷状の予測データも考慮して、氷中の突入の決定を下すことができる。その場合、氷中航行の実際経験から確立された下記の<鉄>則に常に留意しなければならない。

- 非碎氷船が氷中に入ることができる場合は氷を迂回することが不可能な場合か或いはもっと有利な航行条件の到来を待機することができない場合に限る。

氷海可航型でない船舶については開水面の航行は距離に関係無く常に氷中航行よりも<短かい>ことを考慮すべきである。水域を数時間かかるて通過することは可能であるが、また氷中に数日間ビセッタされたり、船体を著しく破損することも有り得る。

以上のように、氷中の突入について全面的に根拠付けられた決定を下すためには船長は下記の事項について固く確信しなければならない。

1. 目的地点に到達するためにはこの氷域を突破しなければならず、それを迂回して開水面を通ることができない。
2. 航空偵察データまたはその他の予備的情報から判断してこの氷域は突破可能である。
3. 今後の天候と氷状について入手している予測データから判断してこの氷域の氷状が至命的に悪化する恐れは無い。

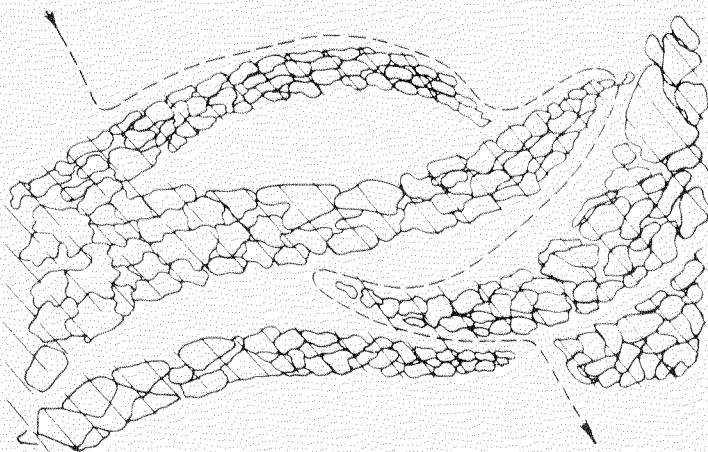
以上のような場合においても船長は船自体と貨物の安全を最大限にはかるために氷を迂回するためにあらゆる可能性を追求する義務を負う。

船が置かれている状況を把握し、水中突入の決定を下した後に下記のような一連の準備措置を実施する必要がある。

1. 測程儀を取り外し、舷側の外に出ている全てのプラットホーム類、タラップなどを収容する。
2. 操舵機構、機械室テレグラフ、また機械室と操舵室との全ての通信手段を点検する。
3. 全ての排水設備の作動準備を行なう。
4. 主機制御室に水中への突入を予告する。
5. 氷による破損が生じた場合にできるだけ迅速に破損か所を閉塞するための応急資材を準備する。
6. しかるべき船尾トリムを作り出し、ヒーリングを整える。
7. 暗くなる以前にサーチライトおよび照明灯を配備する。

氷への突入は下記の一連の注意事項を完全に守って実施されなければならない。

(1) はじめ選定された最も突破し易い氷縁だけを通過すること(第44図)。その場合、危険な<抜け口>を探しに船が氷縁に沿って偵察に出かけなければならなくなる可能性も無くはない。突入の対象となる氷縁を選定すると同時に突入後の進行にとって最も容易なコースを氷域内に選択しなければならない。このためには氷縁付近に発見される氷池や緩氷縁を利用する。



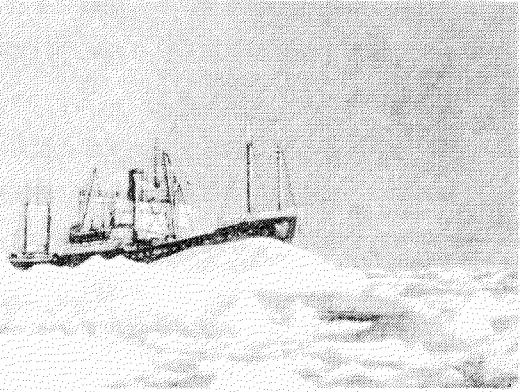
第44図 非碎氷型船にとって通行可能な風上の氷縁の図式的配置状況

(2) 突入点の氷縁の向きに対して可能な限り直角に突入すること。この条件は開水面の側からうねりが有るとき、または氷の漂流が強いとき、即ち氷縁の氷が著しく運動する状態にされている場合に特に重要な意味を持ってくる。この場合は、氷域の密接度が大きい場合と同様に、氷縁に対して鋭角で船体が突入すれば氷による損傷を受けるリスクを伴なう。

(3) はじめ船の運動の慣性を消滅させて、可能な限り低速で航行すること。しかし機関停止(スクリューを回転しない)状態で氷に突入してはならない。これは船の操縦性を悪化させ、またスクリュー翼の破損の原因ともなる恐れがある。

(4) できるだけ舵を直進方位に向けること。このことはバラスト状態或いは吃水が深くない状態の船にとって特に重要である。舵を大きい角度で切替える(急な旋回を行なう)ことが許されるのは船が氷域中に完全に入ってしまった場合に限り、またうねりが有るときには船がその影響範囲から脱出してしまった場合に限る。

普通の海洋型船舶にとって風上の大氷群の氷縁への突入(第45図)または開水面の側から疾風と大形のうねりが到来するとき重い氷帯の横断は特に煩雑で危険であり、また概して不可能な場合も稀ではない。風上の氷縁の特徴はまず第一に氷域の密接度が著しく大きいことにあり、更には、所与の天候および海面の条件のもとで急峻な<氷の>うねりの生成が極めて確実であることがある。氷縁の密接度が大きい場合にはうねりが存在しなくとも氷への突入が阻げられる。正に、氷縁(風上の)に直接接して存在する氷群は最も重い氷塊から構成されている。このような氷塊がうねりに乗った船体に衝突すれば船体に孔があく恐れがあり、また船尾の下に衝突すれば船およ



第45図 重い氷から成る密氷縁

びスクリューの羽根の喪失または破損を招く恐れがある。

上述のことと並んで、風上の氷縁は決して常に直線状になっているとは限らない。それは曲がりくねった輪郭を有することもあり、突出した角、湾曲部、入江状の引込んだ部分などがある。従って、かなり波立っているときに風上の氷縁の密接水域に突入する必要がある場合、船長は予備的に氷縁に沿って船を進行させて、より有利な突入条件を探し出さなければならない。波の打上げが他よりも小さく、また氷自体が他よりも弱く且つ小さくなっている深い湾曲部または突出部を発見すれば、特に危険を冒さなくとも氷中に突入することができる。

風下の氷縁への突入は容易である。即ち、風下の氷縁が板氷の個々の氷舌となって風の方向に散開し、一定の方向をもたないので、いずれの船でもそこに入ることが困難でなくなる。

他方、この氷域の中へ深く入って行くにつれて次第に氷の密接度が増し、船が通過できなくなる場合もあることを忘れてはならない。従って、所与の氷域の突破の可否について充分に信頼できる情報を入手していない場合には船が重い氷と遭遇する可能性のあるリスクを冒さないために氷中への突入を止めるべきである。

上記の場合とは逆に、風上の氷縁に突入した場合には、そのままの方向で進行するにつれて氷況が有利になってくる。

氷縁への突入時に側面から吹き付ける疾風は船にとって危険であり、船体が氷に乗り上げる恐れがあり、特に船がバースト状態にある場合にはこの危険性が増す。このような場合には風が弱まるか、或いは風向が変わるまで氷中への突入を差控えるべきである。しかしそれよりももっと突入に有利な氷縁部分を探し出した方が良い。

満潮 — 干潮による海面水位の変動が著しい海域を航行する場合には上潮の波の影響を受けて氷の圧迫と分散が起り得ることを考慮しなければならず、またそれを利用できるようにならなければならぬ。実際にはこの現象は上潮の位相にも、また上潮の波先の変位方向に対する沿岸の方向にも複雑に依存する関係にある。沿岸水域におけるこの関係は極く近似的に次のように表わされる。即ち、上潮のときには氷の圧縮(密集)が、引潮のときには氷の分散がそれぞれ起きる。

下記の条件のときには氷中への突入を差控えるべきである。

1. 氷縁内の氷の運動が著しい場合。このような現象が氷縁の全長に亘って見られることは稀であるので、このような現象が起きている場所を迂回して比較的静穏な状態にある氷縁部分を探し出すことができる。
2. 近くの海岸および浅瀬の側に向って漂流する氷が著しく多い場合。この場合には流氷の運動が弱まるか或いは漂流方向が船にとって有利な方向に変わるまで待機すべきである。

近くの海岸または浅瀬の側へ向って漂流している氷盤を横切る形で突破することは許されない。これが例外的に認められる場合は船の進行方向の集積氷群の規模(長さ)があまり大きくない場合、或いは氷がかなり分散しているので船の通過時間内に突破できなくなるほどに密集する恐れが無い場合に限られる。

集積氷群の風下部分が海岸または沿岸の浅瀬に押し流される時に流氷の活発な密集が始まることを常に考慮しておかなければならない。従って、氷の圧縮を警戒する際に所与の時点において氷の大部分が海岸にどれだけ接近しているかについて留意する必要がある。これについては下記の場合に船長は航空偵察のデータ、沿岸ステーションによる氷状報告と通報から知ることができる。

- (1) 暗い時刻、霧、降雪、ブリザードなど視界が制約されている場合。このような条件のもとで氷中に船を入れる船長は有利なコースを選定する可能性をはじめ制限されることになる。このことは船を不利なまた危険ですらある氷状の中に陥り込ませることに連なる。しかし接近してみれば、氷状は航行にとって全く有利であり、ただ正常な視界が確保されない故に船長が確認できないにすぎない場合がある。従って、このような場合には視界が良くなるまで待ち、それから初めて氷中に突入すべきである。
- (2) 今後の天候が悪いと予測される場合。このような場合に船を氷中に突入させれば、船長は船を非常に危険な状態に陥らせる、難波の可能性すら出てくる。このような場合の対策は唯1つであり、それは開水面にとどまり、不利な天候が去るまで待機していることである。

(3) 活発な氷結および降雪の時期、特に降雪が持続的な屈を伴なう場合。このような条件のもとでは新生氷と雪が古い氷（残留氷）、また分散氷と急速に結合するので、このような氷域に入った船は“越冬”に陥り入るか、または氷と一緒に危険な漂流をつづることになる。

第5節 氷海航行の特徴

§18 方位決定の基本原則

氷海航行の成功の基本的条件は氷域内でその船にとって最も有利なコースを選定できる船長の手腕、換言すれば氷域内の方位決定能力にかかっている。

普通の海洋航行では船長は船の針路をどのようにとるかを独自に且つ予じめ決定する。

氷海を航行する場合には船長は氷域内で最も有利な方向を選定するものの、予じめ予定または決定したコースからはずれること、また時には著しく逸脱することを余儀なくされる場合がある。しかしその時でも船長は全体として必要とされる船の走航方向をできる限り維持するように氷域内の進路の選定に努めなければならない。

複雑な氷の条件のもとで操船し、氷域内で最も抵抗が少ない進路を選定し、有利な情況を迅速且つ完全に活用し、顕在化したまたは予想される危険を回避するといった船長の技量——これらはすべて自力氷海航行の成否を左右する条件である。

氷域内で迅速に且つ誤まりなく進路を決定するこのような技量は船長の個人的資質に依存する処が大きい。

他方、多年に亘る氷海航行の経験から、現在までに、一連の抱括的は、もはや＜理論的＞にすらなっている氷海運航原則が確立されていることを考慮しないわけにいかない。各氷海航行船長はこれらの原則を学びとて、それを自己の個人的経験と結合させて実際の航行に活用するようしなければならない。

これは極めてさまざまな天候条件、海面状態および氷状に対する氷中航行技法を船長がすみやかに且つ完全にマスターするのに役立つものである。

氷域内における方位決定のため的一般的命題の検討に当り、記述の便宜上、これを以下のように若干のグループに分けて取扱うこととする。

氷の状態に対する観測

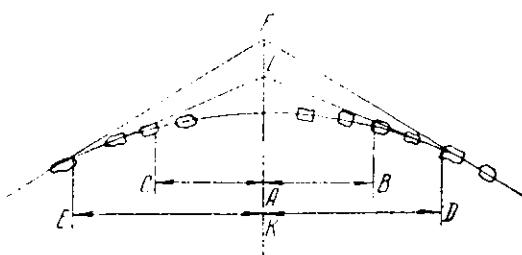
(1) 観測の質と観測位置の選定との関係

船の運動にとって最も有利な方位を選定する目的で氷の分布状況や全般的な状態に対する観測を、通常、船のマストに特設された見張り用のプラットホーム、ボックス、ケージ等から行なう。

観測者の目の位置が高くなれば次の利点が生じる。

1. 可視水平線距離の増大
2. 船から遠く離れた氷域の密接度の判定精度の向上
3. 反射が有る場合、観測対象物の像の歪みの減少

氷域の密接度の判定精度に及ぼす氷況観測者の位置の高さの影響を図式的に示せば第46図の通りである。観測者から水平線に向って発せられる視線上に氷が発見される。氷の水面上の部分は或る場合にはその背後に存在するそれよりも薄い氷や氷を視線から隠し、また他の場合には近くに存在する氷が遠くに存在する他の氷をバックにして投影され、両者が合体してあたかも密接度10級の全密接氷帶のように水平線上に見えることがある。氷の水面上に出た部



第46図 氷況観測時の視程と観測位置の高さおよび氷の性質との関係

分が高いほど、それによって隠される背後の空間が大きくなる。

船上から水を眺めわたす距離には限界がある。ここではそれを氷水平線距離と呼ぶことにする。観測者の位置が低いほど（第46図、点L），従ってまた視線と氷の表面とで成す角度が小さいほど、〈氷水平線〉は短くなる（ABおよびAC）。他方、観測位置が高くなるにつれて（点F）、〈氷水平線〉は長くなる（KDおよびKE）。

水域の密接度の判定精度は観測者が視線を下す角度に左右される。従って、水域の密接度に対する最善の評価方法は航空偵察による方法であり、この場合、観測者は氷に覆われた広い面積を大きな視角で眺めることができる。

可視水平線距離が5～6 mileで、周囲の氷の密接度が5～6級のとき、船橋から正しく密接度を判定できるのはせいぜい10～12 kbt^(*)までの範囲である。それよりも遠くに見える（もっと正確に云えば見掛けの）密接度は益々過大に評価され、船から3～4 mileの距離にある氷は全密接水域で突破不可能のように見える。しかしその背後にもっと分散した疎水域や更には大きな氷池を見発することもある。

氷群中に氷丘が混在しているときには水平線上の水域の密接度の表現は特に歪んで現われる。

船のマストから観測する場合、可視水平線距離は1.5～2倍になり、それに対応して水域の密接度の判定精度が高くなる。

(2) 水平線上の水域の密度の実際的な判定法

船から遠く隔たるにつれて氷の密接度が見掛け上大きくなるため、マストから観察する場合ですら前方の水域の実際の密接度の判定が著しく困難になる。

船の前方（或いは横方向）の水域の密接度をより正確に評価するための実際的な方策が存在するが、これは船の前方の水域の見掛けの密接度とこれと同じ距離で船の後方に存在する水域の密接度と比較する方法である。例えば前方に距離1.5～2.0 mileの点に見える水域の密接度を正確に知ろうとする場合にこの水域の見掛けの密接度を6～7級に探るとする。これに対し、同じく1.5～2.0 mile後方に存在する水域の密接度を判定する。後者の密接度は既に8～9級と判定されたものであるが、船がこの水域を通過したときに実際の密接度はせいぜい4～5級であったことを記憶している。従って、現在前方に存在する水域の実際の密接度はこれよりも更に低いはずであり、約3級、いずれにせよ4級以下、と評価するのが妥当である。

このような密接度判定方法の精度は比較の対象となる両水域の性質の差異に左右され、またもっと大きくは両者の明るさの差に左右される。しかし、水域の性質に激しい変化が起きるのは主として互に性質の異なる集積氷群の境界を船が横切る場合だけである。このような場合には単純に上記の比較方法による密接度の判定に頼るべきでない。他方、氷域の明るさの差はかなり著しく、短かい距離の場合においてすら氷域の比較が不可能になるほどである。

従って、観測誤差に対する第一の原因を無視できるとしても、第二の原因を無視してはならず、比較される両者の氷域の明るさが比較的同程度である場合にのみ上述の比較法の適用が可能となる。

(3) 水平線上の水域の密接度の観測に関する一般的注意

既に述べたように、氷域は、それが疎水域であっても、はるか遠くに位置している場合には密接な氷域に見える。

しかし経験を積んだ船長であればこのような見掛けの密接度と実際の密接度を見分ける能力を持っている。経験を積まない観察眼にはほとんど認められないような若干の徵候（あれこれの等級の密接度にそれぞれ特有な徵候）から実用目的にとって充分な精度をもって全般的な密接度を相当な距離にある氷群についても判定することができる。

経験を積み且つ注意深い観測者であれば、氷群全体から突出している特徴的な氷塊または個々の角や突起の背後の密接水域には特有でない何んらかの空所、光の筋、〈展望〉の存在または徵候を認めるか或いは時として文字通り單に〈感じる〉ことができる。更にまた、見掛け上密集している氷域の色、もっと正しく云えば色調、ですらも経験を積んだ観察者には密接水域のそれとは若干別のものに見える。密接水域は、原則として、その全体的な色調が均質であ

(*) kbt = kabelt = cable's length (訳注)

るという特徴をもっており、遠く離れた距離から観察する場合には純白に近い色調を呈するものである。疎水域はその特徴的な＜ざらざら＞した外見のほか、なお、灰色に近い異種の色調を呈している。このような色調は氷域内に暗い斑点となって水面が存在することによってもたらされるものである。また同程度の明るさの場合に密接度の高い氷域は密接度の低い氷域よりも白く見える。

最も重い多年氷、特に亘氷盤の形をした多年氷の特徴は雪色または明白色（時として空色がかった色調を帯びた）をしていることであり、周囲のもっと弱い氷群（それが密接氷域であっても）の中ではっきりと識別される。

幾回となく夏期の融解を経てきた重たい多年性の氷盤の表面は比較的滑らかである、即ち急峻に突起した氷丘が存在しない点に特徴がある。

一般的な結論を下せば次のようになる。即ち、色の白さと構造の均質性が優っている氷ほど重たく、突破困難であり、従ってこのような氷との遭遇は避けるべきである。

太陽が照っている明るい日に船長が氷を識別するのに役立つものは反射である。この反射が1つ発生しただけでも大抵の場合に氷域内に開水面が存在することを裏付けている。更に、反射が強ければ氷水平線の距離が著しく増大し、航海者が水平線上の氷の密接度を解明するのに有益となる。

どんより曇った天候のときには水平線上の氷域の密接度については水空および氷空の現れ方の強さに依って判断することができる。例えば、氷空が弱く現れた場合には水平線上に弱くて低い密接度の氷が存在することを示唆している。氷空の現れ方が鮮明なほど、その方向に予期される開水面は接近しており且つ広い面積を有する。

氷域内の開水面がかなり広い面積をもっていることについては氷域上に発生して立ちこめる霧に依って判断することができる。

遠方に見掛け上密接氷域のように見える氷群内の氷の配置変更を判定するには次のような方法が適用される。停止している船の上から観察者が氷群のうちからいすれかの特徴的な標的氷を選び出し、その動きを注意深く追求する。この標的氷が隣接する氷塊に対する位置を変えたことが判明したとき氷の配置変更が起きていると判定することができる。それを完全に確信するには対象とする氷群内で別の標的氷を設定して観測を繰り返すことができる。

氷の顕著な再配置が認められれば、その氷域の密接度は見掛けの値であると論理的に結論することができる。

(4) 船の近くの氷域の密接度の判定における通常的な誤差

このような誤差に言及する理由は経験を積んだ船長といえども船の付近に存在する氷域の密接度の判定に際ししばしばそれを過大評価し、実際値との誤差を招くこともあるためである。このような誤差を招く原因是主として次のように説明される。即ち、暗い水面をバックにして明るい斑点として映じる氷はそれと同じ大きさの氷塊間の暗い水面よりも常に大きく見えるものである。氷域の密接度の評価に誤差が生じる時期は特に冬期と秋期である。明るさが少ないときには氷は益々暗く、殆んど黒く見え、他方新冠雪のある氷は益々白く見える。

このように全くの眼の錯覚による判定の狂いを無くすためには船の近傍に有る氷群に対して一見して得られた見掛けの密接度から1～2級下げた値を採用すればよい。その場合、見掛けの密接度が5級までのときには1級下げ、6～8級のときには2級下げるよう勧告することができる。

このような補正は大抵の観察者が特に密接度が6～7級に達する場合にそれを若干過大評価するという純粋に心理的な特質をも考慮に入れたものである。

(5) 天候状態と空の状態がさまざまな場合における氷況観測の特徴

氷域内での方位決定にとって最も有利な日はどんより曇った日で且つ水平線が明瞭で空が低い雲で覆われている場合である。

その理由は次のように説明される。

1. 散乱光が氷をあらゆる方向から均等に照明するので、氷の性質と密接度をより正確に判定し、比較することができる。

2. 水によって反射される太陽光線が観察者の眼を痛めず、色眼鏡をかけずに観察を行なうことができるので観察の質的向上が可能となる。

3. このような条件のもとでは雲幕のために日中ばかりでなく夜間においても氷空および氷空現象を利用することが可能となる。夜間には氷空が特に鮮明に現われる。暗い曇った夜にはそれに対応する透明度の空気のもとで氷空の視程は8~10mileに達する。

4. 水平線が明瞭であるので視界のとどく限りまたいかなる歪みもなく氷状を観察することが可能になる。

太陽が輝いている明るい天気の場合の氷域内における方位決定は下記の原因によって上記の場合よりも著しく困難である。

1. 氷の表面から反射される明るい太陽光線はサングラスを掛けた場合でも観察者の眼を強く刺激し、眼を疲れさせる。これは特に春期において顕著であり、春には、融け始めたばかりの雪の白色が非常に強烈であり、また太陽の放射線も極めて激しい。周知のように雪の表面はそこに降り注ぐ太陽光線の60~90%を反射する。従って、フィルター眼鏡無しには短時間でも氷況観察してはならない。他方、フィルター眼鏡の使用は視界を悪くし、時には遠方の観察を全く不可能にする場合もある。

2. 煉氷域においては不均等な明るさが生じるため観察が困難になる。太陽が当っている明るい水面部分とあまり明るくない或いは暗い氷表面部分および水面部分が交互に入り混じって、無秩序な組合せの光、輝きおよび影を形成している。

3. 太陽が船首方向の水平線に近い低い位置に存在するときの氷状観察は特に困難である。この場合、太陽とその反射光線が合流して、観察者の視力を奪う1本の<太陽路>を形成する。

以上のこととは全て氷域の密接度の正確な判定の妨げとなり、観察の緊張度を高め、観察者の視力を奪い、疲れさせ、一般に氷域内における方位決定を困難にするものである。

太陽の出ている明るい天候のときにみられる強い反射は氷の映像を寄妙な形に歪め、寸法を誇大化するので、このことを氷の性質および水平線上における密接度の判定に際して考慮に入れなければならない。

反射は沿岸の目標点の標定をも困難にし、時には沿岸の輪郭を相当に歪めるので、該当する沿岸を良く知っている船長ですら、あれこれの目標点にかなり接近するまではそれらを正確に識別できないほどである。

§19 最適進路の選定

水中航行に適していない船体は構造的に弱いため、このような船舶の自力航行の成否は有利な氷況を巧みに活用できるかどうかにかかってくる。そのため船長は進路上に氷池や煉氷域をタイミング良く発見し、それらを活用して船が必要な方向に向って自力航行できるように努めなければならない。

水中航行の実際経験から一般の海洋型船舶の自力航行は氷域の密接度が5~6級以下である場合に可能であることが確認されている。その場合の限界密接度は排水量（トン数）が大きく船体構造が弱い古い船については5級であり、また良好な状態にある中程度のトン数の船では6級である。耐氷級の船舶では7級とされ、更に碎氷型の貨物船、特に<エニセイ>号級のディーゼル電気推進式の船舶については8~9級までの密接度の氷域における航行が可能である。

上記のそれぞれの限界を超えて氷が密集している場合でも船は航行を継続できるが、その航行成績は極めて低くなり、氷による損傷の危険が大きい。従って、このような航行が妥当と見做されるのは重い氷の区間の長さがあまり大きくなく且つ船長が前方にもっと有利な氷状が開展されると確信できる場合に限られる。これと同様な航行は氷の条件に依って船が、危険を冒しても密接氷群の深くに突入するか、またはそこから脱出しなければならない場合にも実際上妥当とされる。

重い氷が相当の距離に亘って拡がっていることが船長に判っており、且つ航行の継続が特別な状況によって指示されない場合には、船長は船を停止させ、氷状の好転を待機すべきである。

上記で掲げた氷域の耐航性限界としての密接度5～7級は実際経験から中程度の氷～重い氷に対して導き出された値である。重い（多年性の）氷域を航行する場合にはこの限界を1級下げる必要があり、また軽い（若く、弱い）氷域を航行する場合には限界密接度を上げる必要がある。それは前者の場合には船の操縦がより困難且つ危険になり、後者の場合にはその逆になるためである。

原則として海洋型船舶の自力航行は氷池から氷池へと進む場合に限定されるべきである。このような鎖状氷池コースの選定は船のマストからなされる。その場合の指針は次の通りである。

1. 鎖状氷池の全体としての方向ができる限り船の基本針路に近くなるように選定する。
2. 鎖状氷池を構成する個々の氷池が互に通じているコースを選び、また最悪の場合でも個々の氷池をつなぐ氷堤が当該船舶にとって突破可能であるように選ぶ。

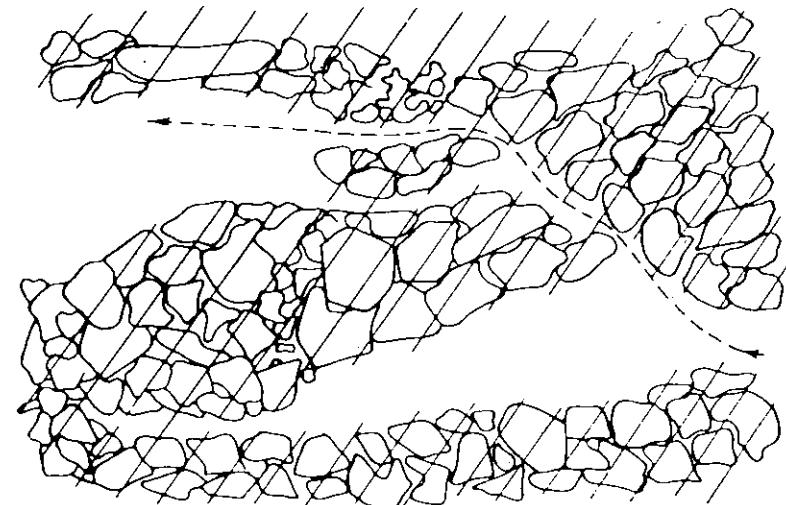
船長は個々の氷池が重い氷または船にとって突破不能な氷によって互に隔離されていないかどうかを綿密に調査しなければならない。その際、観察を航路付近にのみ、例えば唯1つの氷池にのみ限定してはならず、もっと遠くまで細心の注意を払って観察できるようにしなければならない。

若干の船乗りは予定された航路区間を船が通過するときにその後の航路の選定が成功裡に可能であると確信しているが、このような見解は正しくない。これは氷中航行の経験が不充分であるために出て来る意見である。このような誤った考えに従う船長は船を出口の無いいわゆる氷の袋小路—氷池（第47図）に導き入れてしまう可能性がある。

このような事態を避けるため船長は系統的に氷状観察を行なわなければならず、もし時を逸したならば、停船するとして、マストから氷状を観察して状況を検討しなければならなくなる。

以上のように、氷池づたいの進路の選定に当たり船長は次のこととに努めなければならない。

1. 決して最寄りの氷域だけに限定せず、全視野に亘って細心の注意を払ってマストから氷状を調べること。



第47図 氷池に沿った進路の選定(進路の左手に袋小路状の氷群が見える)

2. 航行のために選定した個々の氷池がどこに存在しまた互にどのように連なっているかを可能な限りはっきりさせ、また記憶すること。

船の前方の遠くに存在する氷に関しては視界の外に氷の存在を明らかにする既述の諸徵候に配慮すべきである。例えば、水平線上の水空に明瞭に現われる氷池を他のいずれの氷状よりも重視すべきである（たとえこれによって船の針路が若干ずれる場合でも）。マストからの視界の外に開水面があれば大抵の場合にこのようなやむを得ない針路すれば容易に補償され得る。

航行に最も有利な方向を選定した後に船長は船の前進途上において前方の氷状をマストから系統的に正確に把握するようにならなければならない。

この氷状把握の正確化は主として次の点に帰せられる。

1. 遠方から選定した氷池間の氷堤に近づくにつれて船長は1つの氷池から次の氷池へ渡るのにどのような場所が最も好都合であるかを判定しなければならず、或いは以前に遠方からは選定されなかった別の場所を選定しなければならない。

2. 選択した鎖状氷池の終りに近づくにつれて船長は詳細に氷状を知ることができ、また当初の選択の正しさを検証することができる。

自分の選定に誤りがなかったことを確認して、船長は次のように航行を継続することができる。

1. 航行を続けるにつれて船長はその後の運行のための方向を再び選択する。

船長は船が選定した鎖状氷池の外に逸脱しないかどうか、即ち以前に予定した最も有利な全体的な進路から船がずれたかどうかについて最も細心の注意を払って監視しなければならない。

この最も有利な進路から外れた船は条件の悪い氷域を通らざるを得なくなり、以前に選定した鎖状氷池コースに再び戻らざるを得ない。

両者の場合とも無益に時間を費やし、航行が煩雑になるだけである。

鎖状氷池は卓越風の方向に左右されて形成されるが、場合によっては必要な進路が氷池群の全体的な方向と大きな角度を成した位置をとることもある。しかし、この方向が基本針路と著しく相違しているとしても、そこに存在する氷池群を利用したコースを進むべきである。その場合、船は氷池群の中央を通らずに、必要とするコースの近くに存在する氷縁部分を通るようにすべきであり、このような考え方へ従って1つの氷池から次の氷池へ移動する際の場所を選定すべきである。

氷中航行時に船長が守らなければならない原則の1つは全視野の範囲に亘って氷状を観察し、調査し、比較することであり、このことは氷池群を航行する際に特に重要な意味をもってくる。このような航行は最も煩雑な航行の1つと看做され、船長に氷中方位決定の大変な技量を要求するものである。

1つの氷池から次の氷池へ移動し、氷堤に接近するとき、船長はこの氷堤を注意深く調べ、その突破に最も好都合な弱い場所を発見するように努めなければならない。

氷堤に突入するとき、船長は<氷中突入>の項で述べられている基本原則を思い出さなければならない。更に船長は下記のことを知らなければならない。

1. その氷堤の長さが最も短かい場合であっても氷丘状の氷が観察される場所を通過する進路をいかなる場合にも設定してはならない。このような場所を迂回して、もっと長くなろうとも別の進路を選定した方が妥当である。

2. 氷盤の角が接触し合っている場所（接合部）の横断は許されない。（船長にはそこの氷がかなり融解して弱くなっているので安全に強行突破できそうに思われる場合でも）。接触し合っている氷盤に作用している風と潮流の力のバランスが船の通過によって崩れ、船はその氷堤を突破できなくなり、また運動状態に入った氷盤によって船体が圧迫される危険にさらされることになる。

3. 氷池と氷池をつなぐ氷堤の強行突破はできる限り風上の方向に向けて行なうべきである。このような条件のもとでは船が氷に圧迫されることなく、また船尾方向に氷の無い開水面が確保される。更に、風に対向しての氷中操船は側面から風を受けた場合よりもはるかに容易で且つ安全である。

4. 船と氷と風と潮流が同時に作用するとき、氷堤を突破する方向を氷の実際の漂流方向に対して—それと対向して—方位を決定して選定すべきである。

5. 近い将来に氷況の好転が期待できる根拠があるならば、当該船舶にとって重い氷堤を強行突破すべきでない。このような氷堤は航路上唯一のものとして出現するとは限らないことを考えるべきであり、これを強行突破するリスクが正当視されるのは当該船舶がその後の航路においてこの種の障害物に再び遭遇しない場合に限られる。ところで、氷状の好転を待ち、リスクを冒すことなしに、この氷堤またその後も同様にして氷堤を容易に通過することができる。

開水面または大きな氷池（第48図）を航行し、個々の密接に集積した氷群（斑点—小氷群）に遭遇した船はそれを風上から迂回するように努めなければならない。

水域を航行するとき、最も有利な条件の場合ですら基本針路からの逸脱が避けられない。基本針路通りに保持するた

めに船長は、このような針路ずれがかなり大きく且つ持続する場合には、この針路ずれができるだけ左右両側に配分されるように努めなければならない。そのようにすれば、針路ずれは全体としては最も少なくなり、理想的な場合には零に近くなる。即ち船は実際には当初の基本針路を維持できることになる。

水域を航行中に船が運航条件に従って針路の両側にずれることができる場合には、このような偏りを主として風上に向って行なうべきである。疾風が持続的に吹く場合、氷の分散とそれに関連した水域の突破可能性は常に風上方向で有利になる。そこでの氷状は船を所望の針路に進め得るほどに有利になる。風に向って偏向することは風下の方向に岸または浅瀬が存在する場合に氷による危険な圧迫を受ける領域から船を脱出させるというプラスの側面をもっている。風下に向った偏向が可能な場合は船長がこの方向に著しく広い開水面または分離水域が存在することを知っている場合に限られる。

普通の船舶にとって最も困難な氷中航行は氷池が明瞭に現われていない場合に密接水域^(*)を運動することである。しかしこのような条件のもとでも迅速に且つ正しく方位を決定する能力をもったベテラン船長であれば、多くの場合ゆっくりではあるが停船することなしに船を進行させることができよう。

そこで、課題は未熟な観察者の眼には全ての方向に亘って同じように突破不能に見えるこのような水域のうちから弱い場所を探し出し、それを利用する手腕に帰せられる。

水域内でこのような弱点となるものは一般に次のものである。

1. 比較的分散した氷群から成る小氷帶。これは常に密集氷群中に発見されるが、氷が圧縮状態にない場合に限られる。
2. 密接水域内の小さな氷池およびあまり大きくない氷の＜斑点＞。即ち船乗りが＜水溜り＞と呼んでいる場所。
3. 強度がもっと低い小氷帶。海水は年令およびその他の特性の面で多種多様である。ベテラン船長であれば水域内で通過可能な小氷帶即ち強度が低く、氷丘度が小さく、または破壊度が大きい氷を特に困難なしに識別することができる。

このような条件の氷海を航行する際に船長は通過可能な小氷帶の方向に何んらかの法則性があるかどうかをまず第一に判定するように努めなければならない。もしそこに何んらかの法則性が認められるならば、船が基本針路からはるかに外れることにならない限り、このような小氷帶の方向に進路を保つべきである。また、しばしば実際にみられるように、このような小氷帶が船の針路に関して不利な位置を占めていたり、またはいかなる法則性も認められないならば、船長は或る弱い水域から次のそれへと通り抜け、その際全体として基本針路を維持するように努める以外に残された良い方策が無い。

船が任意の方向に徐行はするが停止しない状態で運動できるような水域の状態の場合には＜まっすぐ＞に進行し、所要の針路を維持するように勧告する。個々の氷池や疎水域を追って脇にそれることはこのような条件のもとでは実際には意味が無い。

氷状が複雑化し、水域の密接度が突破可能限界を超えている場合には、停船せずに進行することは不可能になる。その場合の船の運動の継続は氷の強行突破のみによって可能であるが、普通の船舶はそれに入ることができないので、氷状の好転を待つて漂流しなければならない。

原則として、氷状悪化の主な徵候の1つは氷の大形化が始まっていることである。即ち、船の進路上に板氷の代りに



第48図 氷 池

(*) ここでは板氷、軟氷、弱い氷など普通の船舶にとって通過可能な水域を意味する。

小氷盤が出現し始め、その後更に大きい氷盤が現われる場合である。氷盤領域への突入は、たとえそこに相当大きい氷湖の存在が認められる場合にせよ、非碎氷型の船舶は行なうべきでない。長くそして当初は好都合な氷湖を通っているように船は気づかぬうちに大氷群の奥深くに入り込んでしまい、そこから逆に脱出することは碎氷船の助けをかりなければ極めて困難になる。

§ 20 海洋型船舶の速度

既に指摘したように、耐氷級でない海洋型船舶は、その構造上、氷を強行突破するのに適していない。重い氷に衝突する都度、船体の損傷が殆んど避けられない。従って、この種の船舶の水中速度の限界（以下ではこれを限界安全速度と呼ぶことにする）としては船が偶然にまたは計画的に氷に衝突した場合に重大な船体破損を受けないような可能な限り大きい速度を指すこととする。

この点に関して特に意味をもつものは船首部の線図形状と補強である。これらが碎氷船のそれに近いほど、氷中航行の限界安全速度が大きくなる。

以上のように設定した氷中限界安全速度は、勿論、同一の船にとっても何んらかの一定の値で与えられ得るものではない。これは船体の構造と強度に依存するばかりでなく、その他の諸要因、なかんずく、その船が通過する氷域自体の性質や氷の厚さにも依存するためである。例えば、3～4 ktの速度で進行中の船にとって漂流中の板氷に船首部で衝突しても大抵の場合に船体の損傷を招くことがない。しかし、この船が重い多年氷より成る氷盤と衝突すれば、船体の破損を招く。

船がおかれている氷域内の氷が軽いほど、その船の限界安全速度は大きくなり；またその逆も成り立つ。更に、この限界値は船の前進運動の慣性の大きさに依存し（慣性が大きいほど、限界安全速度が小さくなる）、また船の吃水に依存する（吃水、特に船首部の吃水の増大は氷への乗上げ性能を悪くする）。周知のように、普通の海洋型船舶は空荷またはそれに近い状態の場合に限って氷への乗上げ能力を持っている。他方、吃水が大きい場合にはこのような性能は全く失なわれるので、氷と衝突した場合に被害を蒙る確率が高くなる。以上のように、船全体の吃水、また特に船首の吃水の増大は限界安全速度を低下させる。

同じ理由によって船尾トリムの著しい増大は限界安全速度を大きくすることができ、またその逆も成り立つ。

上述の諸要因を考慮したとき、ここで設定した限界安全速度は主として船の排水量に依存すると云える。それは船の慣性や吃水が排水量と直線関係にあるからである。ここから、船が大型であるほど、氷中の限界安全速度が小さくなることになる。従って排水トン数の小さい船またはバラスト状態にある船の方が常に限界安全速度が大きくなる。

以上を総括すれば、一方では船の構造、強度および排水量に依存し、他方では通過すべき氷域の性質に依存するこの限界安全速度は極めて相対的な指標であると云える。

以上のことから、各船舶毎にこのような限界安全速度を設定し得るものは実際の氷中航行経験に基づく各船の船長だけであると云える。ここでは、個々の各ケースにおいてこのような限界速度を設定することが不可能であるので、以下ではこの限界安全速度を平均的な条件に対し実際経験から設定された値として採用することにする。ここでの限界安全速度の解析に関して云えば、その目的はこの限界速度なるものがどれほど相対的な値であるか、またそれぞれの具体的なケースにおけるその値の決定に当りどれほど細心の注意を払わなければならないかを明らかにすることにある。

上述からまた次のように云える。即ち、実際の航行経験から設定された氷中の限界安全速度がいかに真の値に近かろうとも、船長はそれを盲目的に指針としてはならない。その逆に、それぞれの具体的なケースにおいて、船長は一方では氷状との関係において、他方では船の特性との関係においてこの限界安全速度を補正しなければならない。

実際の氷中航行では海洋型船舶の平均的な限界安全速度がしばしば＜低速進行速度＞として定義されている。しかしこのような定義に限定することは正しくなかろう。周知のように、＜低速進行速度＞は全ての船にとって共通な或る一定の値である。この値はその船の全速進行速度の50%に採られている。実際の氷海航行時に認められるように、低速進

行時の速度は充分に広い範囲に亘って変化し、船の他の技術的諸特性とはそのような関係はない。小型船、例えば＜Sakko＞級の木材運搬船は全速進行速度が9～10ktまでの場合、低速進行速度は4kt程度の値であるが、このクラスの船舶が小型であり且つ船体の強度が比較的大きいので、その限界安全速度を大き目に探ることが許される。他方、弱い半浮接式船体と大きな慣性をもっている＜Leningrad＞級の船舶は全速進行速度が13ktまでの場合、低速進行速度は約6ktである。このような速度をもって＜Leningrad＞級船は重い氷に最初の一撃を加えただけで駄目になる恐れがある。

このような例からして、限界安全速度の概念を若干の指針書で採用されている＜低速進行速度＞の表現またはもっと具合の悪い＜低速進行速度のみ＞の表現によって何故に定義してはならないかが判る。恐らく、何んらかのもっと具体的な最低許容速度の定義を利用するか、または多分、それをktで直接表現するべきである。

実際の観測に基づけば、普通の海洋型船舶にとってこのような平均的な限界安全速度となるものは船体の寸法、構造および強度との関係において3～5ktの速度であると探ることができます。この場合3ktは大型船（積載容量 7000～8000トンまたそれ以上）並びに船体が弱い、また古い船（この場合、船体の寸法には関係なく）に対する限界安全速度となる。また5ktの速度は＜Anadyr'＞級また＜Arktika＞級の耐氷級船舶に対する限界値となる。

上記のことと並んで無視してならない点は、氷域内に船が長期間滞在することは好ましくなく、危険ですらあることがある。いかなる輸送船でも港間の回転率を高めるためにあらゆる可能性を活用する義務があり、これは主として船速の増大によって達成されることを忘れてはならない。

以上のように、限界安全速度の概念と並んで別の概念 — 水中運動の最大許容速度、即ち正常な旋回性能を有し、経験を積んだ操舵手によって操縦される船が氷と衝突する明らかなリスクを冒すことなしに重い氷塊の間を左右に迂回して通り抜けできる最大速度 — が登場てくる。

この最大許容速度（以下ではこれを許容速度と呼ぶことにする）は氷域の密接度、氷の重さ（厚さ）および当該船に対する限界安全速度の大きさによって決められる。この限界速度は最も苛酷な氷海航行条件における当該船に対し最小限に許容される速度、即ちその船が氷域内を運動するときの最小限界許容速度となる。これについて以下で若干検討してみる。

分離氷域（密接度1～3級）を航行するときの許容速度

海面上に分散した氷が均等に分布している場合、船が正常な旋回性能を有し、ベテラン操舵手によって操縦される限り、殆んど速度を下げることなく航行が可能である。このように、密接度2級までの氷域では全速進行が可能であり、密接度が2級以上または3級までの氷域では中速または若干高速の進行が可能である。

しかし実際の水中航行においては、船が原因不明のまま氷域内で自由に縦横できなくなり、直進コースを航行せざるを得なくなる場合が起きてくる。このような場合には船速を当該船級に固有な限界安全速度に制限しなければならない。

ここで特に指摘しておきたいことは、分離氷域の条件下では船の操縦は氷が重いほど、一見して不思議なことに、容易となる。その理由は次のように説明される。即ち、全体の密接度（1～3級）が同一であるとき小氷盤、ましてそれ以上に大きい氷盤の間には板氷間よりも著しく広い開水面が残されている。板氷のある海域では海面が殆んど塞がれ、そのため操船が非常に困難になる。従って快適な速度で航行している船にとってこのような板氷の方が危険である。

疎氷域（密接度4～6級）を航行するときの許容速度

このような条件で船速は氷域の全般的な氷の配置状況と直線関係にある。氷が海面に一様に分布しているならば船速は氷域の密接度（および氷の重さ）に依存して低下し、密接度（および重さ）が増大することにつれて益々低下する許容速度が限界安全速度に近づいて行く。このことは、例えば密接度3級の氷域において船が個々の氷塊との衝突のリスクを特に伴なうことなく氷塊の間を左右に迂回して通り抜け得ることを考えれば、理解できる。しかしもはや密接度5級、ましてや6級の氷域では氷との衝突は回避できず、しばしばそれが起きる。また氷が重いほど、操船のリスクが大きくなる。

他方、船速を下げれば操縦性が悪くなり、従ってまた氷と衝突し、船体が損傷を受ける確率が高くなることを考慮し

なければならない。またそのため、船速を安全限界値まで更に下げざるを得なくなる。

このようにやむを得ず船速を逐次低下させることは浅瀬を航行する場合と同様に水域の航行においてもくストップ付き>と呼ばれる航法をしばしば採用することになる。この航行の要點は船が慣性を消滅させて進行するとき、前進運動を維持するために時々長時間でないが非常に低い前進速度を与えることにある。その際に出す運動速度はこのような推進機運転状態のみにおいて達成可能な最低の速度になる。一般にこのような航法は開水面から重い氷に突入する場合、氷池を伝って重い氷堤に接近する場合、重い氷盤の間の狭い危険な通路に入る場合、迂回できない重い氷片を押し分けまたは航路から<掃除>する場合、水域の奥深くを航行する場合、などに適用される。

また、この航法はスクリューの回転速度が低い場合の旋回性能が悪い若干の船または最低速進行に対応する運転モードをもたない高速回転機関を備えた船にも適用される。

ここで、実際の観測に基づいて導き出された近似的な数値（第5表）によって許容船速の平均値を表わしてみる。その場合、全ての船舶を2つのグループに分ける。第1群の船は船体が弱く、また古い大型船とし、第2群は耐水級の船とする。このように区分すれば、或る一定の水海条件のもとで第1群の船の速度は最小許容速度となり、第2群の船の速度は最大許容速度となる。上記のいずれのグループにも該当しない船については同一密接度の水域において両者の速度の中間的な値を探ることができる。

第5表に示した速度は視界が良く且つ氷の厚さが平均的な場合に依拠すべき数値である。更に、これらの速度値は海面に氷が均等に分布している場合を対象にして算出されたものがあることを考慮する必要がある。例えば、同じ4～6級の密接度でも氷が不均等に分布している水域の場合、即ち一方ではこれよりも密接度の大きい個々の氷群が存在し、他方では密接度の小さい分離氷域的な氷群や氷池が存在する氷域の場合、には船は所定の速度を変更しなければならない。分離氷域または氷池を通過するときには殆んど全速力を出すことが可能であるが、密集氷群の間を通過する場合には下記に述べるように船速を下げることになる。

密接氷域(密接度7級以上)を航行するときの許容速度

既に示したように、海洋型船舶が水域を通過できる限界は水域の密接度で表わせば、一般的には5～6級であり、耐水級の船では7級までである。従って、ここでは、このような船が意のままにできる板氷から成る弱い氷または軟氷の密接氷域を通過する個々のケースについてのみ語ることができる。

このような条件のもとでは、小氷盤～板氷の水海を航行する際に氷の抵抗を克服するための推進機の運転モードまたは進行速度はその水域の密接度によって決まり、また密接(軟氷の)氷域を航行する際にはその氷の厚さと強度によって決まる。

このような条件のもとでは主機を全速運転する場合が最も多いため、氷の抵抗が著しく大きい場合には、通常、船速がその限界安全速度を超えることはない。

若し、限界安全速度を大幅に上廻る速度を出せるほどに水域が突破し易い状態であれば、船の前方の氷況を注意深く監視して、氷況が変化したときそれに対処して船速を完全に低下できるようにしなければならない。

この種の必要性は航路上にもっと重い氷塊が出現し、それまでの船速でこれに突入することが危険な場合か、または今迄よりも分散した氷域に入ったときに同一の推進機回転数では船速がその許容限界を超てしまう場合かに生じる可能性がある。

第5表 疎水域における海洋型船の許容速度

氷の密接度 (級)	進行速度 (kt)		備 考
	第1群船	第2群船	
~ 3	7 ~ 8	10 ~ 12	密接度2級までの水域
~ 4	4 ~ 5	6 ~ 7	では全速進行が可能
~ 5	3 ~ 4	5 ~ 6	
~ 6	3*	5	
~ 7	—	3	

* 板氷または軟氷より或る水域の場合のみ

もっと密接度の大きい水域に入った後に推進機の回転数を徐々に上げ、遂に全速回転に到達させることができる。

密接度7～9級の水域における航行の特徴は密接度が増すにつれて、この水域内でその船の運動が一般に可能である限りにおいて、損害を受けることなしに船速を増大できる点にある。このように船速を増大できる理由は密接度が10級であるが突入が許される水域、即ち、とりわけ、板氷から成る水域また、弱い水域、を航行する場合にこれらの氷が船体を四方八方から取囲み、船の運動が均等になり、相当大きな速度の場合でも氷によって船が激しい衝撃を受けることがないためである。それ故に、密接度が7～8級以上であるがその船にとって＜入り得る＞密集水域に突入するとき、船長は推進機関の回転数を高めて全速回転に到達させ、所望のコースを探ることができる。ただし、重い氷塊だけは迂回する。他方、もっと有利と思われる条件、例えば密接度6級、の水域で小水面が交互に現われる場合の航行では、船速が一様でなくなり、船体に非常にはっきりと感知される氷との衝突を受けることになる。そのため、船長は船体の損傷を避けるため、船速を低減させなければならない。

近年、氷海航行用に新しい耐氷クラスの船舶として＜Angares＞級船、＜V. Kachalov＞級船などが就航したが、これらの速度は開水面で15kt以上である。

従って、これらのタイプの船舶が分離水域を航行するときの平均速度としては自力航行の場合でもまた碎氷船に誘導される場合でも、もはや12kt程度までの値を探るべきである。

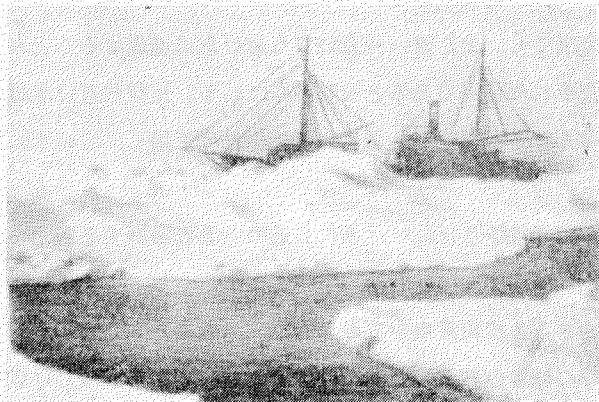
またそれに応じて、疎水域や密水域におけるこれらの船舶の平均誘導速度も増大している。しかし、これらのタイプの船舶の数がまだ比較的少ないことを考えれば、現時点では、第5表に挙げた誘導速度を高くする根拠が無い。

§ 21 氷海航行の危険性

本項では、氷海航行時の主要な危険、並びに船長がそれらの危険を回避または危険との遭遇が避けられない場合に事故を軽減できる若干の実際的な方策について検討する。

そこで、氷による危険について述べる前に、まず、氷の強度（硬さ）の面から主な種類の氷の特性について述べてみる。これらの氷の特性を若干系統的に示すためにA. Burke 船長^(*)によって提案された氷の硬度（同一温度のもとでの）に依る種類分けの基準を適用してみる。

- 1) 氷河氷、氷山および氷山片には主として高緯度圏で遭遇する。この種の氷の全体的な数は我々の海域では他の種類の氷の数と較べて僅かである。厚さ30～40m以上の氷山片に遭遇することは稀である。
- 2) 脱塩氷盤（desalinated ice floe）および古い海水片——多年性の氷丘氷は高緯度圏で見かけられ、また部分的には高緯度圏との境界水域でも見かける。単層の一年氷の厚さは2.5～3m程度であり、多年性の氷丘氷の厚さはもっと大きい（6～7mまで）。
- 3) 圧力がかかって形成された氷丘核。この種の氷の特徴は氷丘の中心に大きな圧力がかかった結果として丸い形状をしていること、また多孔質の構造をしていることがある。この氷丘核は普通の海水よりも著しく堅固であり、その硬度は多年性の脱塩氷に殆んど劣らない。
- 4) 一年性の氷丘氷および氷丘氷片（第49図）は高緯度圏およびそれに接した海域に出現する。単層の一年氷の厚さは一般に1.5mを若干上回り、丘氷の厚さは3～4mである。



第49図 一年氷

(*) A. Burke : 海氷。＜北洋航路総局＞出版所。1940年。

- 5) 高い平らな氷盤およびその破片。これらは一般に起伏度の低い氷盤の形をしており、比較的平坦な一年（または二年）氷であり、その厚さは約 1.5 ~ 2.0 m である。この種の氷はもっぱら高緯度圏またそれに接した海域に出現する。
- 6) 薄い氷盤およびその破片。これらの氷令は 1 年以内のものである。この種の氷盤の厚さはその生成時期と生成条件に応じて 0.5 m から 1 ~ 1.5 m までとなる。この種の氷はソ連圏の全ての凍結海域で見かける。

7) ニラス

8) スポンジ氷および薄氷（薄膜状晶氷）

氷は外見がさまざまのように、その色調もさまざまである。もし場合によっては氷外見からその氷の強度を判定することが充分にできないならば、氷の色調を知ることは船長にとって大きな助けになる。

氷山片はそのモノリティックな構造が特徴的であるが、その色調は蒸溜水の色に似た空色が明瞭に現われている。多年性の、著しく脱塩され、また圧縮によって稠密化された氷は一般に青色の、時として非常に明るい（特に太陽に映えて）色調を帯びている。このような氷は他の種類の氷をバックにして充分に鮮鋭に識別される。

その他の種類の脱塩度の低い海水は基本的には緑色がかった色調を帯びている。その色調の明るさは氷令と氷中の塩分によって左右される。ニラスのカテゴリーから出たばかりの軟氷類は明るい緑がかった色調を帯びている。脱塩氷のグループにまだ入らない旧氷に特有な色は淡い緑色である。氷丘核も同様な緑がかった色調をもつが、或る種の独特な獨りがある。このような氷の淡い緑の色調をバックにして白っぽい色、獨った灰色、また時には空色の小塊または屑の相似を確認できる。

時には海面に独特な白味がかった色調の氷が現われることがあるが、これは氷中に多量の雪と気泡を含んでいるためである。このような氷は構造面での均質性が低く、孔質性が高く、また緑がかった色調をもつ普通の海水よりも軽い範囲に属している。

沿岸でまた沖合いでも、暗い褐色から淡い褐色、殆んどばら色までの色調をもつ氷が出現することがある。この種の氷は一般に「汚れた氷」の名称で知られている。雲がかかっているときに水平線上にこの種の氷が多量に存在すれば、誤って「水空」の印象を受ける。

「汚れた」一年性のまたもっと若い氷が最も頻繁に出現する場所は海岸付近であり、その表面の色はそこに含まれる泥、ごみ、砂、粘泥の量に実際に左右される。この種の氷は他のいずれの氷よりも融解が激しい。従って、その強度は「汚れていない」氷よりも著しく低い。

海岸から遠く離れた海上で遭遇する古い「汚れた」氷について云えば、その暗褐色の色調はそこに多量のプランクトンが存在するためであるとしばしば説明されている。しかしこの種の氷の強度は、氷が褐色の色調を帯びているにも拘わらず、これと類似した種類の普通の海水のそれにはんの僅か劣るだけである。

海岸でも、また遠い沖合いでも薄い氷に遭遇することがあるが、それがもつ汚れた色調はやはりそこにプランクトンが含まれた結果であると説明されている。比較的若い氷は淡褐色、また殆んどばら色がかった色調を帯びているが、これはそこではプランクトンが更に密集度を増し、古い氷に特有な暗い色調に達することができない場合であると説明される。

「肉桂色」氷は弱い、また普通の急速に融解する河水の残留物であり、大きな河の河口付近の海域で遭遇することがある。

さまざまな密接氷中で最も弱い氷は一年氷（またはそれに近似した氷）であり、これは何らかの原因で凹凸のある海岸の保護のもとに長期間存続したものである。激しい太陽の輻射と暖かい沿岸水のためにこの種の氷は上側からも下側からも激しく融解する。この氷は灰青色のような、斑点のある色を帶び、湿りを帶び、海綿状になり、氷隙や穴ができ、巨大な蜂巣またはレース編物にすらも似た形状になる。このような氷は場所によってはかなり厚いが、全般に非常に弱く、いずれの船でも船体損傷の危険を伴なうことなく強行突破することができる。

以上のように、氷はその強度の程度に応じて次のような色調を帯びている。即ち、最も堅固な氷は空色または青色の

色調、その次に硬く、脱塩されていない海水は淡緑色から明緑色までの色調、多量の雪と気泡を含む氷は白っぽい色調をそれぞれ持ち、最後に、汚れた沿岸氷が位置する。

海水は淡水氷に較べると弾性と塑性が大きいが、強度が低い。海水に塩分が含まれているため氷の特性が著しく変わり、また熱的特性も全く変わったものになる。

海水の凍結温度と最大密度は塩分含有率と密接な関係にある。＜正常な＞塩分(35‰)のとき海水は約-2℃の温度で凍結し始める。-8.2℃の温度までは溶液中から純水のみが析出し、更に温度が下がれば塩類の析出が始まる。即ち、最初に硫酸ナトリウムがその後に(-23℃のとき) 塩化ナトリウムが析出する。海水は約-50℃の温度で氷晶(Cryo-hydrate)状態に達し、そのとき全ての塩類が液相から固相に移る。

以上のように、航行時に実際に遭遇するあらゆる温度のもとで海水の組成はかなり複雑であるが極く近似的にみて3つの要素、即ち淡水氷、ブラインおよび固体塩類から構成される。

海水の密度(強度)に言及するならば、その水令に依る構造変化といった重要な問題に触れないわけにいかない。既に明らかのように、氷結開始当初からブラインは、特に氷の最も上側の層においては、ほんの僅かの熱を与えられただけで氷中の穴から流出し、空気と置換する傾向をもっている。従って、数回も夏期を経て残存している氷はその殆んど全体に亘って完全に淡水氷となっているほどに脱塩されている。氷中のブラインと交代した気泡の量は時間と共に次第に減少する。これは氷の表面からの淡水による穴の充填によっても、また氷に強い圧縮と低い温度が働くこと(古い氷はそれを幾回となく経てきたものである)によっても起きる。これら全ての結果として、多年性の海水は著しく稠密化しているので、気泡やブラインを殆んど含まない(即ち実質的には淡水的な)モノリティックな氷塊となっており、その強度は最も強固な淡水氷のそれに匹敵する。

全般的な結論として、海水の強度はその温度、塩分、空気含有量また構造に依存する。温度が低いときには高い場合よりも氷の強度が大きく、塩分が少なくなるにつれて、また氷中に含まれる気泡の量が少なくなるにつれて氷の強度が大きくなる。

以上のように、海水は冬期に、即ち温度が低く、圧縮が殆ど止まない条件のもとで、特別な強度をもっている。逆に、海水が比較的高い温度のもとに長期間存在する場合(春期、夏期)には密度(強度)は断えず低減して行く。ここから、海水の一般的強度を特徴付ける表現:冷たい氷(冬期の堅固な氷)と暖かい氷(夏期の弱い氷)が出てくる。

氷の評価に際して船長にはいずれの氷でもその外見から判断すれば実際よりも弱く見えることを考慮に入れなければならない。その理由は次のように説明される。即ち水面上の氷の高さは氷全体の厚さの僅かな部分に相当するだけであるので、氷海航行の経験を積んだ船乗りでも時には氷の実際の厚さを推定することが全く容易にできない場合すら起きた。まして、氷が稠密であるほど、水面下に没する部分が多くなるので密度の異なるさまざまな氷の強度を判定し、互に比較することは非常に困難になる。いま仮に、海水の平均密度が0.85～0.90であると見做せば、水面下に没している部分は水面上に現われている部分の5～8倍になる。

ここで、一例として海水の水中部分と水上部分の比率を5:1に採ってみる。この場合、厚さ1.0～1.5mの氷、即ちいずれの船舶にとっても充分に重い氷、の水上部分の高さはせいぜい20～25cm程度にすぎない。このような高さ(可視氷厚)は経験不足の観察者にとっては、船橋の高さから観察する場合においてすらも、大抵の場合にそれが重い氷であるとの印象を受けないので、その突破可能性についての評価を明らかに誤る恐れがある。また、最も密度が高く、船にとって危険な海水にみられるように水中部分と水上部分の比が更に大きい場合には、その突破可能性を過大評価する確率はもっと大きくなる。

ここで特に下記のことを強調しておきたい、即ちさまざまな氷塊の全厚に相当大きな差異(同一密度の氷でも)がある場合に、それらの氷塊の水上部分の高さの見掛け上の差異を船橋からの観察によって捕捉することはかなり困難である。例えば、船の安全にとって極めて重大な全氷厚の差が1mである場合、可視氷厚の差はせいぜい15cm程度にすぎない。

更に、観察者には判らないが密度がさまざまな氷を比較するときに容易に誤ちを犯すことがある（これは実際にしばしば起きている）。例えば、密度不明の2つの氷塊を観測して、一方は可視水厚20cm、他方は30cmと確認したとする。そこで何んの疑いもなく、後者の氷塊は前者の氷塊よりも著しく厚い（堅い）と思われる。しかし、ここで前者の氷塊（こちらの方が密度が大きいと仮定して）の水上部分と水中部分の比率を1:6、また後者のそれを1:3と採るならば、両者の氷塊の全厚はそれぞれ140cmと120cmになる。これらの氷塊の水上部分の比率が1:1.5であるにも拘わらず、前者の氷塊の全厚は後者よりも大きく、また強度も大きいことが判かる。この例から、経験不足の船長にとって氷厚の判定と比較がどれほど困難であるか、また海面上の氷の高さのみに依って強度を評価すればいかに誤算し易いかが理解できる。そこで常に念頭においておくべきことは、水面上に見える氷は全水厚の僅か $1/6$ ～ $1/9$ 程度であり、氷の密度が大きくなるほど水面上に現われている部分が少なくなることである。

ここでことわっておくべきことは、海水の水上部分と水中部分の状態について上記で挙げたデータは、いわば、理論的な性質のものであり、一般に研究用に使用される規則的な形状の氷塊に適用されるデータである。他方、実際の航行では、一般に不規則な形状の氷塊を相手にすることになるので、上記とは別の、ほぼ下記のような関係（水上部分と水中部分の比）が採られる。

平坦な氷盤	—	1:5	～	1:6
重い氷盤片	—	1:4	～	1:5
氷丘状の氷盤	—	1:3	～	1:4
(起伏度が非常に大きい場合には1:2～1:3)				
坐氷丘	—	1:1	～	1:2

次に、実際の氷海航行に際して用いられている氷域通過性（可航性）の概念について簡単に触れておく。

この氷域通過性とは氷域を自力航行する可能性を指す。従って、同一の氷群域でも船のタイプが違えば通過性が異なるてくる。

それと共に、氷域の通過性は一方ではその氷域の密接度に、他方では強度（硬さ）に依存する。後者の決定には氷の強度を律する全ての因子、即ち氷の厚さ、起伏度、温度、塩分含有量、気孔率、破壊度などが統合される。

氷域の通過性は可航度の等級スケールによって表わされ、そのスケールとしては幾通りかのものがある。そのうち最も簡単なスケールは1級（当該船舶にとって困難なく通過できる氷域）から4級（当該船舶にとって突破不可能な氷域）までに分かれたものである。

次に、氷海航行時に船が遭遇する氷による危険性について述べる。

(1) 多年氷より成る中氷盤は板氷の多い密氷域を航行する際に最も危険な存在である。疎氷域および分離氷域では注意深く観察することによってそれを発見し、迂回することが可能であるが、密接な板氷域ではそれを確認することが非常に困難であり、特に船が快調な速力で進行している場合には重大な船体損傷の原因となる恐れがある。この危険性は氷盤に新冠雪が存在すれば更に大きくなる。この雪は氷盤の凹凸を滑らかに見せ、氷盤の表面を一様に白色に見せている。

上記に劣らず危険な場合はこのような中氷盤が新冠雪によってマスクを覆けられたように滑らかに見える若い（ニラス段階の）氷の氷域に所々混入している場合である。

このような条件のときには冠雪面の極く僅かな凹凸に対しても最も注意深く観察する必要がある。このような重い氷盤の縁に船体が偶然に衝突しただけでも航行不能にすらなる恐れがあるので、船長は速度変更時の不注意な操船を行なわないよう特に注意しなければならない。

(2) 水面下の氷衝角およびくさび氷 分離氷域または疎氷域を航行する際、特に、かなり大きい速度で航行する際には、水面部分に著しい融解の痕跡をもつ個々の重い氷塊に接近して通過してはならない場合がある。氷の表面が激しい融解と浸蝕（海水によって）を受けた結果、このような氷は水面下に張出し、いわゆる氷衝角を形成することが非

常にしばしばみられる。このような氷衝角は大抵の場合に先端が尖った形をしており、船がこのような張出し氷と接触すれば水面下の船体に裂口があく恐れがある。急旋回によってこのような氷塊に密接するように接近する際には尚一層の警戒が必要である。氷衝角に舷側が衝突すれば船体に重大な損傷を受けることが避けられず、また船尾部分が衝突すればプロペラの喪失、舵の破損、更にはスクリュー軸の破損すらも起きる可能性がある。

水面部分に著しい融解と浸蝕の痕跡を残している2つの氷塊の間の狭い間隙を通過しようと試みてはならない。その理由は、第一には、これらの氷塊が氷衝角をもっているので、水面上に見える両者間の見掛けの通路幅は船長にそれが船の通過にとって充分な幅と認められることがあっても、実際には非常に狭いものであり、また第二には、両者の氷塊が水中で連ながっていることもあり得るからである。

船が2つの氷衝角の間を航行するとき、初めに一方の氷塊と衝突し、次にそこから離れて他方の氷塊に衝突するような場合には特に重大な損傷を蒙る可能性がある。その結果として、水面下の両舷側に穴があく恐れがある。

上記のほかになお、氷盤とその破片はいわゆるくさび氷をもっている場合がしばしばある。これは強い圧縮作用によって氷盤（または氷盤片）の水面下の端部が張出したものである。

船がこのようなくさび氷に接触すれば船体、舵またはスクリューの破損を招く恐れがある。

(3) 密接水域内および個々の氷盤間の狭い水路および割

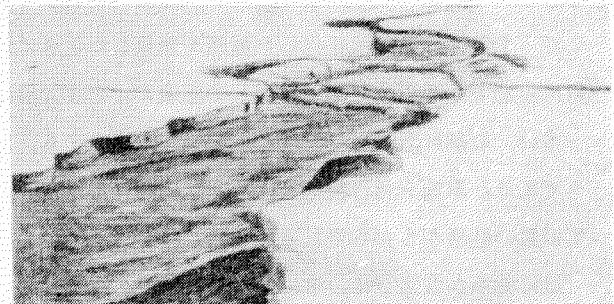
れ目　密接水域の狭い割れ目に入る際に決して增速してはならない。このような割れ目の氷縁（第50図）は非常に凹凸が激しく、これと滑り衝突（Sliding Shock）した場合でも船にとって危険な場合がある。

このような狭い間隙を縫って進む際に船は必然的に氷縁側に押し付けられ、全ての凹凸氷縁に文字通り「くすれすれ」に進行することになり、その結果、船体に破裂口または、良くて、一連のへこみを生じる可能性がある。更に、このような条件のもとでは船が氷中に膠着することは極めて容易であり、またそこからの脱出に多くの時間を費やす恐れがある。更には、このような割れ目が閉じる傾向にある場合には船は非常に大きな圧迫を受け、場合によっては圧潰すら起す可能性がある。

以上で述べられたことから全く明白なように、普通の船舶はこのような割れ目に乗り入れるべきではない。これは恐らく何らの実際的な意味も持たないと思われる。非碎氷型の船がこのような割れ目を押し抜けたり、脇へ押し分けたりできるとは殆んど期待されない。これが成功すると期待されるのは割れ目のある水域の幅が僅かで且つ氷が弱い場合に限る。

上記と同じ理由により、厚い氷盤の間の狭い水路の通過は避けるべきである。たとえ水路の幅が船の自由な通過に充分な幅をもち、またその長さが僅かである場合、即ち船が迅速に通過できる水路である場合、でも非常に慎重に通過しなければならず、且つそれもきりぎりの必要性に迫られた場合に限るべきである。船の通過を制限する氷盤または氷盤片は同じように漂流するとは限らない。一方の氷盤が他方の氷盤を追いかけるように運動する場合もあれば、また互に向い合って回転運動する場合もあるので、このような状態の氷盤域に入った船は氷盤によって圧迫される可能性がある。

氷による圧迫や氷衝角またはくさび氷による危険性の無い場合に狭い通路を縫って進むときには舵取装置の動作を細心の注意を払って監視しなければならない。このような通路に入る際には基本的な進行方向に最も近い針路を常に探るべきであり、いかなる場合でも氷縁に接触しないようにすべきである。船が一方の氷縁に衝突すれば、通常、反対側に押しやられ、その氷縁に衝突するが、そのときの船速が大きいほど衝突が激しい。もし、最初の衝突が滑り衝突であり、船にとって危険でないものであっても、第2の衝突は反射衝突であり、反対側の氷縁に対しより大きい鈍角で衝突し、重大な船体破損をもたらす恐れがある。

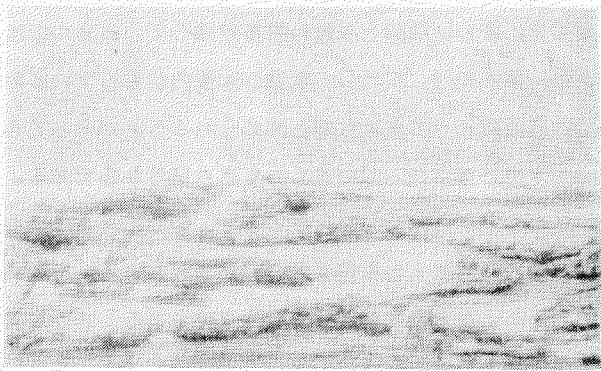


第50図　密接水域内の割れ目

重い氷盤または氷盤片の周囲を迂回するとき、これらの氷縁の極く近くで操船してはならない。遇然に氷縁と接触した場合でも船は反対側へ押し返される。その結果、他方の舷側が別の氷塊と衝突したり、または迂回すべき氷盤に船尾が接触したりして、重大な損傷を受ける恐れがある。

- (4) 氷丘化、圧迫 密接氷域の通過に際し、氷丘が形成されている場所（第51図）には、たとえ比較的弱くて薄い氷の間を行進する場合でも、決して入ってはならない。このような条件のもとでは船は不可避的に氷による圧迫（ニップ）を受け、良くても、圧迫が止むまで動きがとれなくなる。

氷丘化した重い氷群内に入り込んだ船は重大な破損を蒙る恐れがあり、場合によっては難破の危険性すら考えられる。圧迫が持続する場合には船が氷塊と一緒に危険な漂流状態に引込まれる可能性があり、圧迫が繰り返され、益々強くなれば船が“越冬”または難破する恐れが出てくる。



第51図 新氷丘

従って、進路上に氷丘化した場所を発見したときには、それからできるだけ遠くに離れて迂回するか、或いは氷海内に停泊できる安全な場所を探して圧迫が止むまで待機する必要がある。

古い、以前に形成された氷丘と遭遇した場合にも、非碎氷型の普通の船舶では手に負えないもの、これも迂回すべきである。氷丘を強行突破しようと試みれば、氷による船体破損または長時間の膠着を招くだけであり、ここから全ての悪い結果がもたらされる。

既に明らかなように、氷による最も苛酷な圧迫は海岸付近で認められる。この場合、海岸はそこに向って漂流して来る流水に対して障壁となる。更に、このような氷群中に入り込んだ船は、しかるべき条件のもとで、地面に押し出される可能性がある。従って、海側からの氷塊の締付けを予想できる根拠があるならば、オープンな海岸の付近にはいかなる場合にも近づかないようにすべきである。船はいかなる犠牲を払っても風上の方に向て脱出しなければならない。

船が海岸の近くで氷によっていずれかの坐氷丘に押し付けられる場合は特に危険な状態であり、このような場合には船が破滅から救われることは殆んど無いだろう。その可能性がある限りは、船と坐氷丘との間に板氷から成るクッションが来るよう配慮すべきである。

船が氷に圧迫されて海面から坐氷丘の陰に（即ち坐氷丘と海岸との間に）隠れる場合に、坐氷丘は氷の圧迫を受けまたは海水に押され、また特に両者の作用を同時に受けるときには海岸の側へ移動することがある。このような場所の極く近くに存在する船は困難な状態に陥り入る恐れがある。

- (5) 重い氷塊の氷堤 原則として、非碎氷型の船は、たとえその船が海岸に押し付けられたり、氷による非常に強い圧迫を受けたり、好ましくない漂流または“越冬”を余儀なくされる恐れが無いにせよ、重い氷塊群中を強行突破すべきでない。何んらかの氷堤を突破する必要がある場合でも、船はその氷堤を構成する氷を押し分けるだけにとどまるべきであり、そこを強行突破してはならない。

情況の好転が期待されるならば、重い氷塊の氷堤に入るべきではない。まして不利な天候および水況が予測される場合には、長い距離に亘って延びている重い氷群域に突入してはならない。圧迫、危険な漂流、不可避的な被害—これら全ては船がこのような条件のもとで進航することができる僅かな距離（マイル数）の割合にはあまりにも高価につきすぎる。若干時間の後に情況が好転すればそれまでの待機は全て完全に償なわれる。

広海側へ漂流する重い氷塊もまた避けるべきであり、海洋で氷が最も発達した海域に入り込まないようにすべきである。この場合、氷の漂流が弱まるか或いは氷が分散して、船が自由に通過できるようになるまで待機する必要があ

る。

寒期の到来 — 活発な氷結開始期 — には重い氷群域（それが秋には疎氷域であっても）に入ることは特に危険である。このような条件のもとでは旧氷が新氷と迅やかに繋ぎ合わされるので、このような氷域に自由に突入した船でももはや逆行して開水面に脱出することが不可能になる。

§ 22 操船上の特徴

氷海航行時に船舶、特に輸送船、の操縦性は著しく低下する。進行速度の低下、操縦に対する場所的制約、速度変更を伴なう進行の必要、氷による船体破損の危険 — これら全てが、船の操縦を著しく複雑化し、また緩慢化する。冠雪、若い氷、特に旧氷中に混在する新氷、また浅瀬などはいずれの船にとってもその操縦性を制約するものである。ただ船長の豊富な経験と操船技量だけがいかなる条件のもとでも氷域における非碎氷型の普通船の成功裡の航行を保障することができる。

それと共に、多年に亘る氷海航行の経験から、さまざまな氷海条件における海洋型船舶の操縦の特徴に関して以下に述べるような一連の一般的ルールが既に開発されている。

(1) 吃水、ヒーリング、トリミング 舵やスクリューの破損の防止、また氷への良好な乗上げのために船は船尾トリムを持つ必要がある。このようなトリムを作り出すことが特に重要とされる船はバラスト状態の船であり、そこではスクリューおよび舵板が非常に水面近くに位置するようになっている。載荷船では氷域航行時のトリムを1 mを下廻らないようにする必要があるのに対し、空荷船では3 mまたそれ以上のトリムが必要とされる。

空荷船でしかるべきトリミングを作り出すため船外水を1つまたは2つの（船の大きさに応じて）船尾倉に注入する。動搖時に水が片方の舷側から他方の舷側に移流しないように、水位がこれらの船倉を貫通している推進機軸のトンネルよりも高くならないようにしなければならない。

注水する前に船倉をしかるべき準備しておかなければならぬ。それは下記の点に帰せられる。

- 1) 排水系のビルジ道と取水網を入念に清掃しなければならない。
- 2) ビルジボードを片づけるか、またはしっかりと固定しなければならない。
- 3) 船倉自体もきちんと整頓し、全ての副次的な物体を撤去しなければならない。
- 4) 両舷のばら打張りが存在する場合には、それをしっかりと楔で止めるか、またはもっと好しい事には全面的に撤去しなければならない。

船倉内に残された塵芥またはほんらかの大形木製品は動搖時に壊れたり粉砕されたりするので、不可避的に取水網の目を閉塞し、排水系を作動不能にする恐れがある。船倉内に固定されていない金属物体は強い動搖があるときに排水管を破損したり、また船側に被害を与えることすらも有り得る。船倉からの汲出しが最初に必要とされるときにそれが可能かどうかは船倉準備の入念さに依存する。

氷海を航行する際には、一般に、船尾トリムを大きくすれば有効である。他方、浅瀬を航行する際には船尾トリムの方が適していると見做される。しかし、船首トリムを適用すべき対象は満載状態または部分的にせよ載荷状態の船であり、バラスト状態の船ではない。後者の場合、船首トリムを実施したとき舵やスクリューが水面上にかなり露出するので、正常な進行および操縦性が失なわれるほどである。またその場合、氷が存在しているもとで露出した舵やスクリューが破損する確率は船が地面に乗上げる確率よりも遙かに高いことに留意する必要がある。舷側の外板に補強氷帶が設けられている場合には、その上縁が常に水面上に出ているようにしなければならない。船が氷域に入ったとき氷帶の上縁が水面の位置、または、もっと悪いことに、水面の下に来るような超過載荷は許されない。

氷域内を運航する船は横傾斜（ヒーリング）してはならない。氷域内で船を操縦するとき、このヒーリングは横傾斜した舷側への旋回を困難にし、氷域を強行突破するとき船が氷中に膠着（ビセッテ）される確率が高くなり、また浅瀬を航行するときには走航が困難になり、吃水を増大させる。更に、ヒーリングは持ち上った舷側の側の氷による

被害を常に促進する。ヒーリングが有効に働く唯一のケースは船が氷に圧迫されている場合であり、これについては下記で触れる。

(2) 機関の運転 機関長はその船の氷海航行時の走航指示書によって機関に課せられる最小限の要求条件をはっきりと知らなければならぬ。

そのためには、いかなる走航条件のもとでも、指揮船橋からの指示に従って迅速に船速を変更できる体制が確立していかなければならない。全速後進は可能な限り迅速に且つ最大出力をもって実施しなければならない。このため、蒸気機関式の船では所要の蒸気圧力を常に維持しておく必要がある。2基または3基の機関が存在する場合にはこれらを同時に後進運転させることが非常に大切である。

氷海航行の実際経験から確認されているように、推進器の羽根の破損が最も頻繁に起きるケースは船がスクリューを停止して（機関を停止して）慣性で後進するときに氷に衝突する場合であり、他方、船が前進する場合には破損の発生が最も少ない。従って、氷域内で船を操縦するとき、ベテラン機関士であれば、テレグラフの針が＜ストップ＞を指しているにせよ、通常は機関を停止せずに若干の回転数をスクリューに残しておく。更に、蒸気機関式の船ではこれによって冷却器内の真空の＜喪失＞が防止される。この真空喪失は、一連の場合に、機関の全速後進運転への切替えを遅延させ、危険な状態に導く恐れがある。船が長時間停止（これについては当直機関士に予告する必要がある）している場合にのみ機関が全面停止される。上記のような運転操作は、勿論、はじめ船長と上級機関士とが相談した結果に基づいてのみ決定される。

スクリューに氷塊がからみ込んだ場合には激しい衝撃音が機関室でも充分に確認され、機関の停止（＜機関の膠着＞）すら起り得る。これについては直ちに船橋に報告しなければならない。前進中にスクリューに氷塊が巻き込まれる事態は氷況の悪化を予告する非常に重要な信号である。

このような場合に船橋への報告は、通常、機関室からテレグラフのハンドルを数回続けて引っぱる方法によって伝達される。＜膠着＞した機関が水中から1回で脱出できないような場合には、船橋への通報は電話で行なう。

舵取装置全体の状態の監視は機関長によって系統的に且つ綿密に実施されなければならない。時々、舵取機室に検査員を送り込み舵の動作状況を監視するよう勧告する。作動中の舵が破壊される場合、また舵が氷に激しく衝突する場合には直ちにその旨を船橋に連絡しなければならない。また舵角指示器を絶えず監視する必要がある。その指示値は舵の保全にとって極めて重要な意味をもっている。

全ての排水設備は完全に準備された状態になければならない。バラスト、ピータンクおよびディープタンクの状態を系統的に監視して、そこからの漏洩を適宜検出できるようにしなければならない。

特殊目的のタンク、即ちヒーリング用およびトリミング用のタンクが存在する場合には、それらを空にして保持し、他方、移送手段（ポンプ系）は作動準備完了の状態にしておく必要がある。

夜間航行の場合にはサーチライトおよび照明灯の準備が必要である。一般に、船首甲板に前方の氷域を照明する強力な照明灯が配備される。このような照明灯（1～2セット）は船首甲板のエプロンの外に設置するよう、またエプロンが付いていない場合には船首錨鎖孔付近にでも設置するよう勧告する。船の前方の氷を照明する目論みで信号灯型の小型サーチランプが船首甲板に設置されるならば尚一層好ましい。照明灯の点滅のための開閉装置は、サーチライト（船橋またはマストに取付けたものも含む）の制御卓と同様に、船長が直接操作できるように船橋に配置されなければならない。

(3) 船倉およびビルジ道の検査 載荷船ではビルジ道の水位の測定があれこれの船倉での漏洩現象を適宜検査する唯一の手段である。この測定は系統的に全ての船倉について1直當り最低1回、また船首倉については1時間毎に実施しなければならない。船体の損傷をもたらすように激しくまた強く氷と衝突した場合には、その衝突区域のビルジ道の水位測定を定例の測定とは別にして行なうべきである。氷域を空荷状態で航行する船の船倉は整頓され、清掃されていなければならない。そこには、応急用の資材と器具の外にはいかなる副次的な物体も存在してはならない。応急用

の資材と器具はできるだけ高い場所に置き、船体に裂口が万一あいても水に漬かることの無いように配慮しなければならない。全ての船倉に電気照明装置を設け、破損箇所ができる限り急速に発見し、それを修理できるようにしなければならない。

また可能ならば、ビルジ道の水位のチェックのほかに、氷と激しく衝突した後に、また一般には時々、内部から船側を検査するように勧告する（特にこれは船首倉に対して適用すべきである）。

(4) 水域における船の操縦 水域を航行する際の船の操縦指揮を船長は船橋からのみ行なうべきであり、船に船橋が若干（複数）存在するならば、それからより遠方の展望が可能であり、船を導くうえで一層便利である。

ここで、上述のような恐らく何んの疑いも無い基本原則に言及せざるを得ない理由は、船長にとってマストに設けられた観測用ボックスから操船指揮を試みる場合が見受けられるためである。マストから船橋の航海士や操舵手に指示を与える方法による操船方法は近代的な大型船の氷海航行を成功させ得る方策であるとは決して認められない。マストの観測ボックスに当然の意義を認めるにしても、これが船の操縦を直接指揮するのに適切な方法であるとは決して考えられない。その理由は、それぞれの船長は、まず第一に、正に船橋から指揮することによって自分の船を＜感じたり＞、＜理解したり＞することになじんで来ていることだけでも理解できよう。更には、自分の身近かに操舵手が居たり、操縦に必要な全ての手段が自分の手のとどく範囲にあったりすれば、船長としては航行上遭遇する全ての予期しない出来事や氷状の複雑化に対して極めて敏速且つ適確に応対することが可能になる。また、氷の強度の評価は船橋からの方が一層充分にできる。しかし、このことは、船長が時々直接の操船から離れて、マストに登り、氷海内の最も有利な進路を探すことと決して矛盾しない。

時として氷状がマストからの長時間連続観察を必要とするほどに非常に複雑化する場合がある。このような場合に、船長は船の直接的な操縦指揮を副長（assistant）に委任しなければならない。即ち、船長自身はマストの観察用ボックスに入って、操船に直接＜巻き込まれ＞ないようにし、氷況変化の監視に力を傾注しなければならない。そして船長は船の全般的な進行方向を指示するにとどめ、できるだけ副長の活動を見守るようにすべきである。

実際には、氷況観察と操船の方法としては上記と別のやり方も採用できる。例えば、船長は氷海中で最も有利な基本進路を選定したならば、マストから降りて、自から船橋に立って指揮する方法がある。また、マストに当直航海士を送り込み、船長が指示した基本的な進行方向を保持させつつも船の運動を修正させ、その結果を船橋に報告させる方法もある。

以上のように、いかなる状況においても、操船のための場所は船橋にすべきであり、また氷海内の最も有利な進路を選定するための場所はマストにすべきである。

ここで付言すれば、全ての複雑な操船条件のもとでの操縦指揮は船長自からが当るべきである。その例外として認められるケースは必要に迫られてやむを得ず船長が上級航海士（senior navigator）に操縦指揮を委任する場合であるが、その際でも後者が氷海操船技能を充分に身に付けていることが船長によって検証済みであるとの前提が必要である。それと共に、各船長は身近かな航海士（上級）ばかりでなく、他の全ての航海士をも氷中操船活動に習熟させる必要がある。上級航海士は氷海内の操船を船長のように巧みに行なえるように熟達しなければならぬ、必要が生じればいかなる場合でも船長に代ることができるようにになっていなければならない。また、そのためには、船長は、上級航海士が次第に複雑な状況のもとでも独立で操船指揮できる（当初は船長の助けを借りるが、後には完全に自立する）ように系統的に援助しなくてはならない。他方、下級航海士（junior navigator）については、彼等全員が、極めて容易な氷況条件のちとにせよ、それぞれ独立で船を操縦できるようになることが船長の名誉でもある。

氷海可航型船では操舵室をできる限り高い場所に配置して、操舵手の視界を妨げるものが無いようにすべきである。その場合、操舵手が船尾を見通せるように、また船が急旋回したとき船尾が氷と接触しないように見守れるように配慮すべきである。

船長に大いに勧告したい点は操舵手にできるだけ大きい自立性を賦与することである。勿論、その前提として、操

舵手がこれに充分練達している必要がある。全ての場合に、分離水域では、また疎水域においてすらも、船長は状況に応じて氷域内の進路目標物またはコンパスの指示値を用いることによって操舵手に基本的な進行方向を与えることとどめるべきである。その他の場合には、操舵手が独立で氷域内の障害を迂回して通り抜けるようにすべきである。船長が基本的な進行方向を指示せずに、ペテラン操舵手に「執拗につきまとつて、**面舵！**」、「**取舵！**」、「**突破！**」などと命令するだけで、その後に操舵手の操作活動の是非を追及するやり方は最も好ましくない。系統的に氷海航行している全ての船舶で採用されている最も適切なやり方は操舵手に例えば次のような訓示的な指示を与える方法である。**この氷塊は左手にやりすごせ**、**その大きい白い氷盤を右手から迂回して、あそこの氷池に入るよう計算して針路を保て**等々。

その他の場合には操舵手は独立して進路方向を決定しなければならない。ただし、勿論、これは船長が見守るもので行なう。船長としては、操舵手まして氷海航行のペテランの操舵手は舵輪を手にしたとき他の誰よりも遙かに良く船を**感じる**ものである点に留意しなければならない。氷海で独立して操舵するペテラン操舵手は船長の操船指揮全般を著しく容易にし、船長が氷況観察にもっと力を入れることを可能にする。ただし、操舵手が船を巻く氷状の判別力をしかるべき程度に学び取り、いかなる場合に船が機関の助けを借りることなしに方向を変えることが不能になるかを理解し、また船長自身がそれに気付かないときには、適宜、船長の注意をそれに向けさせることに習熟する必要がある。しかしその反面、操舵手に過大な信頼を寄せるることはマイナスの結果を招くことも考慮すべきである。即ち操舵手のうちの若干の者には余計な自信過剰がつづつくるので、船長は操舵手の仕事ぶりを絶えず注意深く観察していくなければならない。

氷海航行係の操舵手が氷海航行時の若干の基本的操船ルールに習熟することは非常に大切なことである。このルールの要点は下記の通りである。

- 1) 後進速度が与えられるときには命令を待たずに舵を直立させる。後進後は船が前進運動に入るまでは舵の切替えをしてはならない。操舵手ばかりでなく多くの航海士の間にも、後進中の船において機関が前進運転を開始したとたんに舵を操作して良いとの正しくないまた有害な考え方方が存在する。この無条件に誤った見解が由来する動機は前進回転中のスクリューから放出される水流があたかも船尾の下から氷塊を駆逐でき、それによって船尾部と氷との接触が防止され、また直立位置からいずれかの側に向きを変えられた舵の破損も防止されるとの発想にある。もし、船が弱い板氷群の氷域を常に航行するならば、上記のような考え方も成り立つであろう。しかし問題は、巨大～中氷盤は云うに及ばず、小氷盤ですらも最も強力な船のスクリューからの放出流によっても放逐できない点にある。従って操舵手にとっても、また船長にとっても、常に、またいかなる氷中走航条件のときでも、船の前進運動が無いときには舵を直立位置のみに保持することが自動的な習慣になる必要がある。舵板の実際の位置を常に知つておくためには、舵角指示器の動きを入念に見守り、それと舵との協調性をしばしばチェックする必要がある。
- 2) 氷との衝突が避けられない場合には氷塊が船首とのみ衝突するように船を向け、いかなる場合にも船体の脹んだ部分（ビルジ部）が氷に接触することのないように配慮しなければならない。
- 3) 氷盤（第52図）、氷盤片、重い氷塊また坐氷丘の脇を通過する場合、これらに密接して押し付けられないようにし、氷衝角、くさび氷、尖った角などを警戒する必要がある。
- 4) 重い氷群の氷域内では急旋回を避け、船尾の動きを注意深く見守り、船尾が氷と接触しないように防ぐ必要がある。
- 5) 常に船首をより弱い氷の側へ向けるようにし、従ってまた船の針路維持が必要なときには、より重い



第52図 二年 氷

氷の側へはじめ舵を切替えておくべきである。

- 6) 氷塊間の狭い、しかし船の通過にとって充分な幅をもつ水路に入った場合には水路の真中を走航すべきである。水路幅が明らかに不足している場合には、そのことに船長の注意を喚起させ、船長の承認のもとに障害となっている氷塊の1つに船を突進させ、それを進路から押しのけるか、または破碎すべきである。
- 7) 水域を強行突破または個々の氷塊に船首部で打撃を加える場合、船首が水縁に対し直角（またはそれに近い角）で衝突するように配慮すべきである。鋭角で打撃を加えると船首は水縁面を滑り、船体のビルジ部に苛酷な衝撃を受ける恐れがある。また別の場合には、激しく方向を変え、更に船尾が氷に引掛る恐れがある。
- 8) 密水域または密接水域を走航する場合には余計な舵角変更を避けるべきである。このような場合には、氷の抵抗が最も小さい方向に向けて船が運動するままに委せた方がよい。このような方向は、基本コースから遙かに逸脱しない限りにおいて、自然に判明するものである。このような状況下での舵の切替えは、しばしば無益であり、舵の動きに船が追従しない場合が多い。更には、頻繁な舵角変更は有害ですらあり、これが船速にマイナス効果をもたらすことが判明している。例えば舵を進行方向に直角の位置におけるば、船速は開水面で20～30%も低下する。密水域または密接水域で船速が極めて低いとき舵を直角に切れば船の停止を招く。

水域内に停泊中の場合、一挙に全速進行を開始したり、舵を切替えたりしてはならない。はじめ低速運転して船尾から氷片を全部追い出すか、或いは追い出すには氷が重すぎる場合には、せめて一部の氷でも船尾から逐放すべきである。それから速度を上げて全速力に到達させたり、舵を操作することは許される。

稀ではあるが実際に遭遇するケースとして船尾が板氷群の中に入らなければならない場合があるが、その際には最低速度で（增速せずに）航行し、船尾を氷にもたれかけさせ、かかる後に初めて後進速度を所与の条件下で可能な値まで増大させるという方法を探るべきである。このような場合に船長自身は船尾に居て、船尾下の氷の挙動を監視し、船橋に速度変更の指令を伝えるようにしなければならない。

一般に、水域内で船が速度変更を伴なって走航する場合には、航海士のうちの1名を船尾に配置し、後進時における氷と船尾の関係を監視するように配慮しなければならない。船尾が重い氷に接触する危険性が生じた場合には、その航海士はその旨を船橋に通報しなければならない。

- (5) 水海航行時に適用される若干の実際的な方策 通過すべき水域の密接度に応じて船長は船速を船にとって安全な値になるように断えずコントロールしなければならない。

非碎氷型船にとって密接水域の氷堤の通過は次のようにした場合にのみ可能である。即ち最低の速度で氷堤に接近して氷に船首を乗せ、次第に速度を増し、それから通過速度を一様に維持しつつ氷塊を押し分けて行かなければならぬ。もっと弱い氷群の中に入ったときには船が增速を開始しようとする場合でも、追突や衝突を避けるために速力を下げる必要がある。水域にもっと重い氷塊が入り込み始めた場合または弱い氷帶と重い氷帶が交互に現われる場合には、このような追突や衝突は特に危険な存在となる恐れが大きい。

密接水域または密水域において最後の力を出して動いている船で旋回を実施するためには進んで来た航路をたどって後方に迂回し、舵を直角に切り、そして全速前進に入るという操船方法を探らなければならない。船が所要の針路に向きを変えた後に舵を直立位置に戻し、船が再び針路から大きくそれない限りにおいて氷の抵抗が最も少ない方向に進路を自立的に選定できるようにする。

密接水域または密水域をゆるやかな速度で航行するときには、いかなる場合でもこの速度を間接的な方法（舵角を大きくして舵を取る）によっても、また直接的な方法（推進機の回転数を下げる）によっても下げてはならない。このような運動条件のもとでは短時間にせよ上記によって出力の一部が失なわれれば、船の停止を招く可能性がある。他方、低いとはいえ一定の速度を保持していれば船はそのまま前進を続けられる。

分離水域で何んらかの氷塊を迂回する必要が生じた場合には船速を最低限に減じつつ船首をその氷塊に向けるべきである。そこで後進運動に入るが、これは氷塊との距離が大きい場合に限られる。他方、氷塊の近くに船が来ている

場合には後進は有害ですらなり得る。その理由は操縦性を失ない、且つ慣性をまだ消し終えない状態の船はこの氷にビルジ部で衝突する可能性があるためである。

破砕することも迂回することもできそうにない重い氷塊と遭遇した場合にはそれを進路から遠ざけることも考えられる。このため、慣性を消滅させつつこの氷塊に接近して船首をそこにもたれかけさせ、速度を全力前進速度まで上げて氷塊を脇に押し離す方法を探る。また氷塊の向きを変えるだけでよい場合には、上記の場合のように氷塊の中央ではなく、端部に船首を掛けて必要な動作を行なえばよい。

時として、密接水域内の狭い割れ目、隙間、また水路（第54図）に入って（まして増速して）はならない場合がある。これらに入れば船は容易に膠着し、重大な船体損傷を受けるか、更には極めて危険な圧迫状態に陥り入る恐れがある。後者は他のいずれの水域におけるよりも危険が大きい。即ち密接水域以外の水域では圧迫を緩和する板氷または砕け氷が常に存在している。

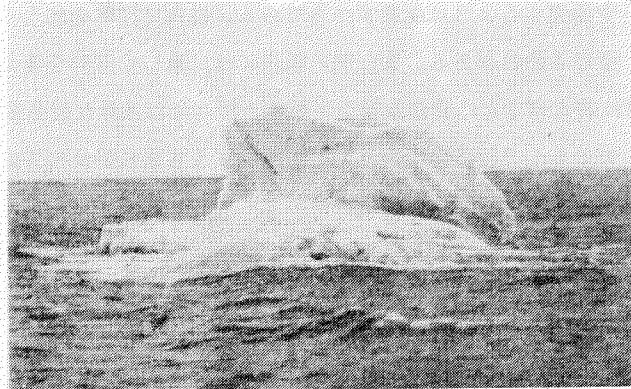
周知のように、氷中に割れ目が現われた場合、船は、原則として、舵に従うことを止めて、その割れ目に沿って進む。このことは、特に他の船の近傍で操船するときに考慮する必要がある。それはこの場合、割れ目が幾隻かの船が存在する水路の方へ走っているからである。またもし機関や舵の働きによる操船を適宜抑えなければ、船は他の船の方へ走航し、その結果として重大な事故を招く可能性がある。あまり大きくなき氷池、弱い水域、即ち針路から離れた側の水域のあらゆる＜弱点＞も船をそちら側へ走り込ませる可能性がある。

密接水域を強行突破する際には船が氷中に膠着しないように注意しなければならない。膠着を防除する主要な方策は船にタイミングよく全力後進を与える点に帰せられる。これについての命令は、船が前進運動の慣性を失って自然に停止する時点までに機関が全力後進運転を開始するように計算して与えられなければならない。このことを考慮しつつ、船の運動速度を綿密に監視して、危険な減速が認められたとき、タイミングよく後進に入らせることが必要である。

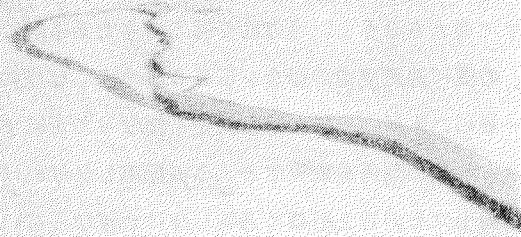
水域を強行突破する際には＜チャージング＞の長さを一方では船体の強度に応じて、他方では氷の硬さに応じて決めなければならない。しかし、チャージングの長さを大きくしようと考えてはいけない。それは船に危険となる場合があり、また長い時間を費やすことになる。

密接水域の氷盤間の接合部および氷盤自体の強行突破はそれらが圧縮状態にある場合には避けるべきである。実際に、船が氷盤内水路を殆んど全長に亘って成功裡に通り抜けて来たが、開水面への出口の手前で最後の打撃を受けたケースが幾つか確認されている。それは氷路の両縁が集合して、通過したばかりの水路を閉じてしまったためである。まだ水路を開けられない氷盤部分で抑制されている圧縮（従って船長には気付かれない圧縮）は開水面への出口においてすらも船を締め付けるほどに急速に発生することがある。

板氷群中の限られた空間で方向転換しようとする場合には船長はいずれかの重い、しかし広がりについては小さい氷塊を＜支点＞として利用することができる。この方策は走航中に氷と軽く衝突または滑り衝突する場合でも船は一般



第53図 氷 岩



第54図 密接水域内の水路

に反対側へ押返されることに立脚するものである。選定した氷塊に注意深く船体のビルジ部分をもたれかけさせてから、次第に推進機の回転数を上昇させる。その際、舵を使いながら、船体を充分に迅速に回転させて、氷塊と平行の向きになるようする。それから、もし必要ならば、更に次の＜支点＞氷を選んで同様な操船を繰り返し、このようにして船の向きを次第に必要とする方向に変えて行く。このような回転のための＜支点＞に大きい氷塊を利用してはならない。即ち、船は方向転換したものので、片舷全体が氷塊にぴったりと押え付けられ、そこからの離脱が船体の破損無しにはできなくなる（特にその氷塊に氷衝角やくさび氷が付いている場合には）場合が有り得るからである。船が前進し始めて氷塊の縁にぴったりと沿って動く場合にはまず第一にプロペラ羽根が被害を蒙ることになる。

氷との滑り衝突を利用した同様な方向転換方法が時として走航中に実施されることがある。しかしこのような方法の適用は操船時のほんの僅かなミスも船体のビルジ部分に重大な破損をもたらすのでベテラン船長にのみ許される。その場合、船尾が氷塊に接触しないように注意する必要があり、もし船尾部分が氷の方向へどんどん動いて行くことが判ったならば、船の動きを止めなければならない。

氷が無いか或いはまばらに氷が有る氷湖では船首をいすれかの氷盤または重い氷塊にもたれかけさせて方向転換を行なうことができる。この方法は疾風の吹いているときに船尾トリムの大きいバラスト状態の船が風上方向に向きを変える際によく適用されている。

板氷を中心とする氷域の限られた面積内で船の向きを変える必要が生じた場合にはアイス・アンカー（または単に係船索 - dupline）を氷盤に打ち込む方法が可能である。

終りに、小氷盤域を走航する際にはリスクを冒して船体を回転させるよりも若干数の氷塊の周りを迂回した方が遥かに有利である場合がしばしば存在することを指摘したい。

またもし船体の回転が避けられないときには、それを行なう場所を特別に選定すべきである。困難な条件のもとで回転して船を危険にさらす代りに安全な回転実施場所を選定するために、船が針路から若干逸脱しても、その方がまだ好ましい。

船長は氷海中での大旋回を常に避け、もし可能ならば、幾つかの部分に分けて方向転換を実施した方が良い。

(6) 氷中膠着時の脱出方策 氷中に膠着した船で機関を全力後進運転させても後進できない場合には、交互に前進運転と後進運転を更に数回繰り返す方法に頼るべきである。またこれが役に立たないならば下記の方策をとる必要がある。

- 1) 機関を全力前進運転させつつ、舵を180°操作して船体をゆする。機関が2基備えられている場合にはそれを＜一斉に＞動かせる。その後に急激な全力後進をかける。もし必要ならば、このサイクルを2～3回繰り返す。
- 2) 上記の方法で船を離脱させることができない場合には、前進一後進運転を交互に行ないつつ船側の（そこに存在するならば）タンクを用いて水を片方の船側から他方の船側へ移してみる（ヒーリング）。船体が横傾斜し始めたことが判かったら直ちに全力後進をかけ、脱出する。一般に、この全力後進は最大横傾斜の時点で既に機関が全力後進運転するように若干の先行性をもって与えられる。船側（ヒーリング用）タンクを持たない船では一般にtrimming用タンク（ピークタンク）が使用される。その場合まず最初に船首で氷を押し沈めるため船首トリムを作り、これに成功したならば、それから、船尾に氷を移すか、船首タンクから船外へ放水するかし、後進によって脱出する。
- 3) 船から若干離れ、且つ船体の最も広い部分に対向する場所に爆薬を仕掛けて氷を爆破する。この爆破時までに機関は既に全力後進運動していかなければならない。爆発による氷の振動と機関の全出力運動が組合わさって、大抵の場合に、膠着状態からの脱出が可能になる。
- 4) 最後の手段としては、舷側（場合によっては両舷）の周囲の氷を、船尾から始めて船体の最も広い部分に終るまで、破碎する方策を探る。鉄挺類、つるはし類、また時には少量の爆薬を用いて舷側の周りの氷を氷厚に応じて約1～2mの幅で帶状に破壊する。砕けた氷は長い棒で船尾から後方に放逐し、大形氷塊は船尾ウインチまたは揚錨機を用いて鋼索によって引き出す。なお、もしその近くに別の船が存在するときにはその船によって周囲の氷を破碎してもらう方法による脱出が最も簡単である。

第3章 碎氷船と航空機の誘導による船舶の航行氷海内の止むを得ない漂流

第7節 碎氷船に誘導される船舶のための規程

碎氷船の誘導を受ける船舶の航行は可能な限り迅速に且つ無事故で実施されなければならない。氷海航行の観点からみて相反するこの2つの要求条件の併立が可能になるのは、一方ではいかなる航行条件のもとでも非のうちどころない操船手腕があり、他方では氷海航行全般また特に碎氷船誘導時における基本的な操船操作を充分にわきまえている場合に限られる。

実際の氷海航行に際しては同一タイプの2隻の船といえども同様に好調な挙動をすることは非常に稀れである。その理由は両船で操縦者が当然異なるためもある。それと共に、氷海内で作業する能力の無いいすれかの小出力船の方が耐航性の著しく高い耐氷クラスの船よりも氷海を碎氷船の後に従って遙かに好調に走行する場合も認められる。これら全てのこととは船の操縦を指揮する船長の氷海知識、経験また個人的資質の差に由来すると説明されている。

碎氷船の後に続く航行、正確には碎氷船に誘導された航行についてはソ連ではく碎氷船に誘導されて氷海を通過する船舶のための規程によって定められている。この規程は水先案内用指示書に印刷され、ソ連船隊水路局から発行されるく海洋航行者への通達>で毎年初頭に公表される。

氷海を航行する全ての船舶の船長はこの規程をしっかりと覚え込み、それを碎氷船誘導下のあらゆる場合に正しく適用しなければならない。従って、碎氷船に後続する航行の特徴を検討するに当り、それを上記の「規程」と直接関連付けて、その規程の記述順序に従って、「規程」に対する注釈の形で以下に述べてみる。

§27. 碎氷船による船舶誘導の規則とその準備

「規程」の本文にはく氷海通過時の船舶の誘導に関する本規程は港域内では港長、海上では碎氷船長に適用されるべきである>（第1条）と述べている。

そこで、我々の場合には殆んど全ての氷海運航が組織化された体制に従って実施されていることを指摘しておく。従って、誘導に関する船長の要求は「規程」第1条で指定されている2人の責任者に対してばかりでなく、該当海域における氷海運航の指導に当る責任者または責任機関に対しても適用されなければならない場合が少くない。第1条に対する我々の解釈はこの点に限られる。ただ、全ての船長に共通な勧告を付け加えることができるだけである。彼等がそれぞれ独自で航行し、碎氷船の援助に頼る意思表示をしない場合にも、氷域に入る前または1つの氷域から次の氷域に移る前には彼等は当該氷域を守備範囲に入れている碎氷船の船長と必ず連絡をとるようにしなければならない。全ての場合に碎氷船長は該当海域の氷状について、その海域に入ったばかりの被誘導船の船長よりも良く知っているなければならない。両者の連絡は直接面接して行なうことが最も望ましいが、それが不可能な場合には無線連絡をする。その情報に助けられて被誘導船の船長は該当海域の氷状を正確に把握し、それに基づいて最も有利な氷域通過方向を選定することができる。その際、氷状の正確な把握と予想される変化に応じて船長は最も通過困難な進路区間での救援について碎氷船の船長と直ちに相談した方がよいかどうか判断することができる。

氷海に入る前に被誘導船の船長が入手した最も詳細な情報といえども、守備範囲の海域の氷の状況を自分で調べた碎氷船の船長から直接入手できる情報よりも劣る。

更に、「規程」では次のように指示されている。即ち、く誘導を受ける船では氷域通過に充分な石炭、食糧の貯え、木角材、急結セメント、プラスター、マットなどが海洋運航基準の規程内になければならず、排水施設がきちんと調整されていなければならず、更に無線設備も調整済みの状態になっていなければならない。これらの条件が満たされない場合、または船が航行準備に関する法手続に従って発行された政府機関または適格性審査協会の証明書（有効期限内の）

を持っていない場合、には港長、また港外に砕氷船が存在するときには砕氷船長、はその船の出港または入港要請を拒否する権限を有する>（第2条）。

船に積み込む緊急用器材の品目と数量はソ連船舶管理局の該当規程に従って決められる。その規程を完全に守っている船は氷海航行上のニーズに対し充分に保証されていると見做せられる。

燃料、水および食糧の貯蔵量については船または船團の氷海通過の誘導に必要とされる時間数から決められる。誘導に要する時間はその年の該当海域に固有な最も苛酷な条件を考慮して決められるべきである。またそのうえ、もし誘導期間中にこれらの補充の可能性が無いことが予じめ判かっているならば、船の海洋可航性を完全に保障するため貯蔵量を更に20～25%増加すべきである。

水域を走航する船はその航行の準備度に対する証明書を必ず持たなければならない。

氷海誘導規程では船の資材装備と並んで船舶性能証明についても若干の特別な要求条件を設定している。しかしこれらの要求条件は、砕氷船に誘導される船の航行の特質から更に一連の諸要求が提示されるので、列挙すれば際限がないほどである。その大部分は氷海における船舶の自力航行条件にも固有なものであるので、ここではそれらを逐一詳しく吟味せずに、一応下記のように挙げておくにとどめたい。

- 1) 船は船尾トリムを持ってはならず、イーブンキールは可能であり、またバラスト状態の船については船尾トリムを持つ方が好ましい。このトリムの大きさは船が正常な運動と操縦性能を保持しつつ、スクリューと舵ができるだけ水中深くに位置させ得るような値に採るべきである。ヒーリング、まして著しく大きいヒーリング、は許されない。
- 2) 機関は常に進行変更に備えていなければならず、逆転運転、特に前進から後進に移る際のそれ、は迅速に実施しなければならない。全速後進はできるだけ短時間で且つできるだけ大きい出力で実施しなければならない。
- 3) 舵装置は誘導開始までに綿密に点検し、完全に調整済みの状態になっていなければならない。特に、舵角指示器が正確に働くように注意しなければならない。
- 4) 排水設備（補助的移送装置を含む）は直ちに作動できる状態に準備され、点検済みの状態になっていなければならぬ。補助移送装置（原動機駆動式および電動式のポンプ）は氷による被害を受ける確率が最も大きい区域、即ち船首部に配置されるべきである。
- 5) 事故対策用、応急用の器材はそれぞれかかるべき場所にきちんと存在するようにし、必要時に直ちに使用できるよう準備されていなければならない。
- 6) 舵側の外に出ている装備（錨を含む）は予じめ取片づけなければならない。
- 7) 船外連絡用通信設備並びに船外との通信設備に対し特に注意を払うべきである。機関室用および操舵室用テレグラフは綿密に点検しなければならない。若干の立入り困難なテレグラフ系統では予じめ外套や被覆を取り外し、砕氷船に誘導されるときにもオープンなままにしておくべきである。

船橋、機関室、舵取機室の相互間の伝声管系統、電話連絡系統および呼鈴信号系統も入念に作動試験をしておかなければならない。

警笛（typhon）用の蒸気または空気は実際に吹き出して点検しなければならない。全ての音信号系統は完全に調整済みの状態になっていなければならない。また、光信号系統も完全に準備された状態になければならない。

- 8) 夜間などの暗い時に水域を誘導する場合には予じめサーチライトや照明灯を配備しなければならない。船團編成で航行する場合には船尾にも1セットの照明灯を配備しなければならない。これは船尾の下方の水面を照明し、後続船の乗組員にまぶしくないような位置と向きに固定しなければならない。この照明灯が無い場合には一般に尾舷灯が使用される。

余計な光が暗いところでの方位決定の妨げにならないように航海灯を除いて船は暗くしていかなければならない。

- 9) 船はいかなる時でも砕氷船による曳航を受け入れる準備ができていなくてはならない。そのためには錨を通常、甲板に引上げ、錨鎖をもしそれが外されていない場合には舷側にぴったりと張り回わし、また錨鎖留めが外れている場

合には錨鎖管からすっかり片付け、碎氷船の曳航ストップ用の鋼索をはじめ錨鎖管に通し、その通索を船首甲板に取出してそこに固定し、碎氷船の曳航用ストップまたは端木環を受取り、固定し、それから引き出すための装備を誘導開始前から船首甲板上に準備する。誘導準備に当り銘記すべきことは船団編成による成功裡の航行を保障する諸措置のうちで些細な事柄は無いことである。水域内では時機をまちがえた汽笛といえども同じく時機をまちがえた後進操作または後進中における舵の直角配置操作に劣らず重大な事故の原因となり得る。

§28. 水縁での碎氷船待機規則と船隊編成の一般原則

「規程」の第3条には〈碎氷船による誘導を必要とするいかなる船舶も碎氷船の到着を待ち、碎氷船無しには水域に入ってはならない〉と指摘されている（第66図）。

この規程に従えば、水縁に接近した船はいかなる場合にも碎氷船無しには水域の奥深くに入り込んではならない。ただし、該当海域での誘導の総括責任者から船長が直接指示を受けて碎氷船と合流するために水域を走航する場合だけが例外として認められる。

その場合、船長は漂流する氷の状況を見守り、それによって船が圧迫されないようにしなければならない。特に冬期に寒気によって新氷が旧氷と急速に一緒になって堅い氷を作る場合に圧迫が起きる可能性がある。

従って、このように水域が稠密化し水縁が風上に拡がって行く場合には船は風上方向に進行して常に開水面内に存在するようにしなければならない。水中で圧迫されるよりも水縁付近に滞在して開水面上で若干時間に亘って暴風雨に遭遇する方がまだ危険が少ない。

誘導を待っている船に碎氷船が到着するまで水域に入る

ことを禁止することは船がいずれにせよその水域を通過することになるので何んの意味も無いと一見して考えられる。

ペテラン碎氷船長であれば、各船に水縁付近での〈ランデブー〉指令を出したときに大抵の場合に各船長に対しこの規程について特に通告する。それは主として下記の2つの理由に依る。

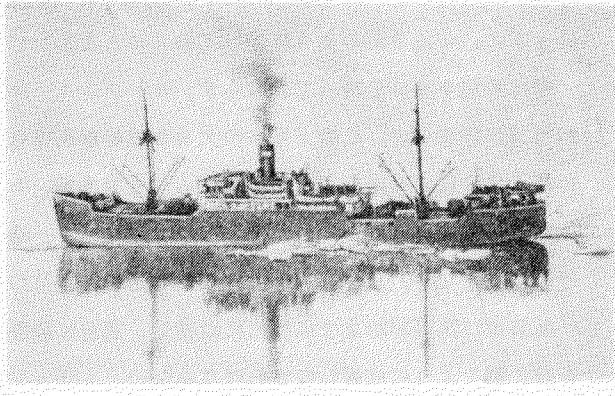
第一に、水域に自力で入る船は氷による被害を受ける可能性があり、また更には、海側から疾風が吹く場合には氷に圧迫（ニップ）される可能性がある。その結果、氷と一緒に漂流して益々危険な圧迫を受ける恐れがある。場合によつてはこのように氷と一緒に漂流するはめになつた船の状態緩和は碎氷船が水縁に到着しても長引く圧迫が止まない限り必ずしも可能にならない。

第二に、碎氷船の船長よりも被誘導船の船長は氷状に詳しくないので、難航水域に入り込み、そこから自力で戻って脱出できなくなる恐れがある。その結果、この船の許に到来した碎氷船はこの船を更に長距離に亘って苛酷な条件のもとで誘導したり或いは氷縁に連れ戻さなくてはならなくなる。その場合、苛酷な氷海条件のもとでは非碎氷型船の逆戻り脱出、または逆コースへの1旋回ですらも、多大の労力と時間を要することを考慮すべきである。

次に、「規程」の第4条には〈水域を船舶が走航する時間と手順、また同時に誘導すべき船舶の数は港内では港長によって、海上では碎氷船長によってそれぞれ決められる〉と述べられている。

この条項に注釈を加えるならば、定航碎氷船（line ice-breaker）はさまざまな天候条件および氷状のもとで何隻の船を、どのような手順で、また各船間の距離をどの程度に保って誘導すればよいかがまず第一の問題になる。

現代的な氷中誘導においては苛酷な氷海条件の場合には小船隊（例えば2隻）が編成され、定航碎氷船隊は通常3～4隻編成となる（第67図）。碎氷船の数が多い場合、船隊中の被誘導船の数も勿論多くなるが、その割合は各補助碎氷船当たり1～2隻の割合で多くなる。



第66図 水縁で誘導を待つ待機中の船

なお、氷海航行の実際経験から、中緯度海域の軽易な氷海条件のもとでも定航砕氷船が2隻以上の船を誘導できないような場合が多いことが判明している。その原因は氷の漂流が激しく、氷の圧縮が頻繁に起き、その結果として砕氷船の開いた水路がたちまち閉じてしまうことがある。

以上のように、砕氷船によって誘導できる船の数は砕氷船が作る航跡（水路）の長さに直接依存する関係にある。船隊中の船の数が少ないほど、船隊の長さが短かいほど、誘導の成功率は大きくなる。

なお、被誘導船の数が同一の場合でも船隊の全長は必ずしも同一でない。これは各被誘導船の間隔をどの程度の距離にするかによって全く左右される。その距離が短かいほど誘導が容易に且つ迅速に実施できる。その際の間隔の最短限度は被誘導船群の慣性走航距離の平均値から決定される。

この問題は非常に重要であり、船隊内の船間距離を適正に選定し断えずそれを維持することは各船の適正配置に劣らずに船隊誘導の成功の鍵となることを何んの誇張もなく断言できる。

この船間距離は船隊の誘導が最も効果的に経過するように計算して選定されなければならない。

船間距離を過度に大きく採れば誘導の成功率にマイナスに影響する。航跡の長さが同一のとき船隊の全長を増大するにつれて1隻の船といえども（砕氷船の直後に従う船ですらも）航跡を考えていたほどに良く利用できなくなる恐がある。ここで、3～4隻編成の船隊で先行の2隻が非常に遅れ、従って正規の距離の場合よりも悪い条件のもとで、しかも砕氷船隊内で走航すると仮定してみる。このように長く延びた船隊航行では第3まで第4の船は砕氷船の航跡を感じ取れなくなり、あたかも殆んど破壊されない氷中を走航するようになる。この船隊の延びの影響は後尾の船に対して最も著しく現われる。

船隊の先行船の間隔をせいぜい60～70mだけ増大させたとしても最後の船は砕氷船から200～300mも余計に遅れることになる。即ち、砕氷船の航跡が消えてしまった状態で航行し、そのため船速が失なわれることになる。船間距離の過度の増大は後尾船の氷海通過成功率に反映されるばかりでなく、最も有利な条件のもとで正規の間隔（これについては後述する）で、また時には開水面で砕氷船の伴流（wake stream）に乗って、走航する先頭の船でさえもはや板氷または氷泥状の氷域ではなく更にもっと厳しい条件の氷域を走航することになる。後続船は更に一層悪い条件におかれれる。

このような航行から避けられない結果は、まず第一に、船隊全体の速度が低下し、砕氷船から取残されること、また氷によって益々狭く閉じられて行く水路を走航せざるを得ないこと、第二には、氷片との衝突による船体損傷の確率が高くなること（砕氷船から遠く離れるほど被害の程度が大きくなる）である。

しばしば見受けることであるが、開水面での航行に充分な経験を積んでいる船長ですらも当然の船間距離を保たず、それを引延ばす場合がある。このような措置は、一方では、先行船（特にそれが砕氷船であれば）が突然停止または急激に減速した場合の衝突の可能性に対する保険的な望みから、また他方では砕氷船に短間隔で後続して走航することの長所の過小評価から採られるものである。

先行船との衝突の心配は大抵の場合に根拠の無いものであり、まして氷が常に自然の防舷材の役割を果している。このことは砕氷船に後続する航行の多年に亘る実際経験が最も良く証明している。我々はこのような条件で生じた重大な接触事故のケースを一つも知らない。ただし、船長、最も頻繁には砕氷船長、の直接的なまた粗雑な操船ミスによって発生した事故例を除く。

いずれかの強制的な条件が無い限り船内で自分の船を最短間隔に保って走航させる氷海航行のベテラン船長達は全員

が上記とは異なる考え方をしている。即ち、砕氷船にぴったりと従って航行する長所を良く理解し、自信をもって自分の船を指揮する船長は周囲の氷状および先行船の挙動を注意深く観察し、また正にそれ故に船内で最も短かい間隔を保って走航し、衝突を全く心配していない。このような船長の適正な操船によって砕氷船が打開した水路を最も良く利用することができ、最少限の出力を使って最大限の速度でそこを通過し、且つ氷による被害の発生確率を下げる事が可能になる。

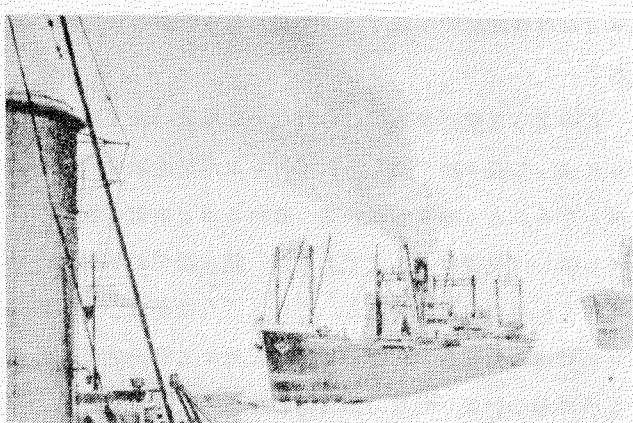
では一体、船間の距離はどの程度にすべきであるか、まず第一に、それは一定の値としてはあり得ない。これは誘導コース上の氷状および被誘導船の慣性の大きさに依存する。

氷が重い（厚い）ほど、即ち砕氷船によって開設された水路の閉鎖が迅やかであるほど、船間距離を短かくしなければならない。またその逆も成り立つ。この船間距離は分離氷域または大きな氷池を走航する場合に最も大きくしなければならない。近代的な中型船舶は機関の運転を全速前進から全速後進に切替えた時点から全面停止の時点までに平均して船長の4～5倍の距離を走る。ここから船隊編成の航行に際しての船間距離の上限、いわゆる＜理論上の＞限界が決められる。いま船長を平均して120～130 mと見做せば、求むべき値は2.5～3.5 kbt^(*)になる。砕氷船に後続する航行は分離氷域においてすら通常、平均速度で行なわれることを考えれば、この限界値をほぼ25%下げる事が可能である。このようにして得られ、0.5 kbt^(*)まで端数処理された値1.5～2.5 kbtは密接度4～5級までの氷域において砕氷船に従って航行する際の最大で且つ全く安全な船間距離であると充分な根拠をもって見做すことができる。上記のkbt値で上限寄りの値は大型船（排水量10000～12000トン以上）に、また下限寄りの値はそれ以外の船にそれぞれ適用されるべきである。

氷状が悪化すれば上記の間隔を短縮する必要がある。例えば、氷域の密接度が5～6級また若干それ以上に大きくなれば、1.5～2.5 kbtの間隔はもはや大きすぎる。3隻だけで編成される船隊の場合でも最後の船は砕氷船の船尾から7～8 kbt離れて進航することになるがその場合、このような氷状のもとで水路に何んらかの航跡が残留していることは殆んど無かろう。そのため、全般的には船隊、また特には後尾の船の運動を大幅に容易にするため船間距離を1.5～1.5 kbt^(**)まで短縮せざるを得なくなる。氷域の密接度が5～6級の場合には、このような距離の短縮は決して船隊内の船と船の衝突の確率を高めることはない。砕氷船隊の場合においてもこの氷域における船速は著しく下がられ、従ってまた船間距離も短縮できる。

同様な理由によって、更に氷域の密接度が7級から8級に増大した場合に船間距離は最大値として1 kbtまで短縮できる。密接度が8級を超えている氷域ではこの間隔は大きすぎる。通常、このような条件における船の誘導は船長以下の間隔、即ち0.5 kbtより若干大きいだけの距離でのみ可能となる（第68図）。

しかし、これでもなお、砕氷船に後続する場合の船間距離短縮の限界ではない。若干の特別な場合にはこの間隔は文字通り40～50 mに接近する。これは、例えばオホーツク海の冬期運航時に実際に見られる。この海域では氷の強い圧縮が頻繁に起きるため船舶の誘導が非常に困難になり、正規の船間距離を守っているならばしばしば誘導が全く不可能にすらなることがある。そして、砕氷船の船尾に被誘導船をぴったりと付けさせ、砕氷船のスクリューから出る水流によって形成される開水面を続航



第68図 短かい間隔で続く2隻編成の船隊の誘導

(*) kbt = kabelt = cable's length

(**) 原文のミスプリと思われる（訳注）

させるという<超短>間隔での誘導によってのみ誘導の成功を期待できる。実際に、このような場合に船同士の衝突による事故の危険性は若干生じるが、実際の経験が示しているように、船長が適正に且つ巧みに操船処理した場合には何の事故も発生せずに誘導が可能である。

終りに次のことを強調しておきたい。即ち、水域内で船間距離を短かく保つ誘導はしばしば唯一の可能な方法であるが、他方では船長に非常な緊張、自分の船の特徴の熟知、またいかなる条件のもとでも操船できる技量を要求する。また、これは船の操縦指揮の面で船長を対象とする一種の高等学校でもある。

§ 29. 碎氷船長と被誘導船長との相互関係

碎氷船の船長と被誘導船の船長との相互関係は「規程」の第5条、第12条および第15条に定められている。

これらの条項のうちで基本的なものは第15条であり、そこは<水域通過のために碎氷船を利用するいかなる船舶も、そのことによって本規程の諸規定に服従することに同意を表わすものとする>と述べられている。

この命題は極めて明瞭であり、特に注釈を必要としない。ただ更に正確さを期すならば、碎氷船のサービスを受けるに当って、いかなる船舶の船長も第15条に従って氷海誘導に関する全ての規則を遵守する義務があり、このことに対する同意を特に求める必要はないと言える。

第5条では<碎氷船の後に従って水域を航行する船舶の船長は氷海航行に関する碎氷船の指示に従い、且つそれに応じて行動する義務を負う>と述べている。

いかなる連合形態の船舶の航行も、それが民間船であれ、軍艦であれ区別なく、単一の指揮系統無しには、また全ての船舶に共通の航行規律無しには、考えられない。碎氷船の後に続く船隊は諸船舶の連合体にはかならないが、大抵の場合に極めて相異なるタイプの船から構成され、従って、またコントロールしにくい連合体である。この重要な事情からも単一の指揮命令系と最も厳格な航行規律が更に強く要求される。

碎氷船の船長の指令に直接違反することは云うに及ばず、個々の被誘導船の船長の余計な独立心と行動の不一致は非常に重大な結果を容易に招く恐れが大きい。被誘導船の船長としては通常の航海と異なり船隊の一員としての自分の船は独立した単位ではなく碎氷船隊の一要素にすぎないことをしっかりと覚えておくべきである。それと共に、個々の船長の活動が共通の課題—船隊全体の最も迅速且つ無事故な水域通過—の遂行の成否を左右する。従って、最も厳格な規律と碎氷船の船長が掌握する単一の指揮命令系統こそがあれこれの氷海運行の成功を保障するものである。

このような単独責任体制の重要性の裏付けとして第12条では碎氷船の船長には自分の命令を無視するような船長の居る船に対しては誘導を拒否する権限が賦与されている。即ち、この条項には<碎氷船の誘導を受けて走航する船舶の船長が碎氷船の船長の指令を遂行しない場合には後者はその指令が遂行されるまで前者の船の誘導を拒否する権利を保有する>と述べられている。

第8節 碎氷船に誘導される船舶のための規則

(碎氷船隊における船舶の移動および曳航手順を定めた規則)

§ 30. 碎氷船隊における船舶の移動手順

碎氷船隊における船舶の移動手順は「規程」第6条および第7条で定められているが、これらは必ずしもこの重要な問題の全ての側面をいかなる程度にせよ包括するものではない。従って、上記条項の吟味に当り、碎氷船隊内の船舶の移動に関してこの「規程」では触れていないがそれに直接または間接に関係している若干の特質について検討してみる。

「規程」では<碎氷船に後続する船舶は互いに追い越してはならない>（第6条）と指示している。

この規則は特に解明を必要としないが、それに対し次の事項を付け加えるべきであろう。即ちくそして指示された船隊内の間隔を厳密に守らねばならない。その間隔がはじめまたは誘導中に指示されなかつた場合には、各船は互にできる限り接近した位置を保持し、先行船の船尾からの放出流に入つて後続するように努めなければならない。

船隊内の船間距離の維持は航行中に非常に頻繁に船速が変更されることと不可避的に結び付いている。従つて、先行船の速度および氷状変化に応じた船速の調整は船隊編成による航行において船長が絶えず配慮すべき課題である。船速の変更は（稀な例外を除き）、推進機関の回転数の増減によって、即ち主として、機関室用テレグラフを用いずに、実施するように勧告する。船隊を構成する船舶のタイプがさまざまであり、且つ氷海条件もさまざまな場合にはテレグラフの使用を予定される速度範囲は速度調整にとって不充分である。

被誘導船の船長は指揮碎氷船の船長が設定した船速を常に維持するためにあらゆる可能性を利用する義務を負う。

碎氷船に後続して航行する際にさまざまな理由によって船隊が止むを得ず停止する場合が少なからず生じる。その場合、先行船が停止したために前進できない各船の船長はそれぞれ自分の船を停止させてはならない。その理由は運動の慣性の喪失に伴ない船が通過した後の水路に出現する板氷や氷泥状の氷によって船が包囲され、その後の運動の可能性が奪われることがあるためである。氷に圧迫された船は船隊の行動再開に際して、碎氷船がその船の周囲の氷を破碎するまでは、その場所から動けない。更に、気温が低いときには船を取囲む氷群は表面で凍着し合い、時には船自体も水線の処で氷に凍着する場合がある。

従つて、実際の氷中行動においては、一時的で長時間でない停止に際して船を停止させずに交互に後進、前進運転させ、短かい水路区間をゆっくりと後進させたり前進させたりする方策が採られる。このことによって少なくとも短時間の船隊停止期間においては船の運動の自由が確保される。

ついでに次のことを指摘しておきたい。即ち、短時間の氷中停止の全ての場合において、たとえ前進運動の可能性が無い場合でも被誘導船は機関を前進運転させておくべきである。これによって船尾の氷を若干分散させることができ、それによって必要な場合には後進できる可能性が生じ、また漂流並びに碎氷船の近傍通過による氷の締付けがある場合に舵とスクリューの保全が促進される。

後続船もまた船長が注意深く観察すべき対象にしなければならない。自分の船が突発的に停止または減速するときは、しかるべき信号を発し、後続船の行動を見守り、それとの接触の危険が生じた場合に必要な対策をタイミング良く講じるようにしなければならない。

このような措置としては下記の方法が可能である。

- 船が力不相応の氷に引掛かった場合に全速回転までの速度上昇を利用する方法。これはスクリューから放出される水の力によって背後から接近して来る船の慣性を若干消滅させるか或いは接触時に滑り打撃を加えることによってせめて船首を脇へ偏らせるために行なうものである。
- まだ運動の可能性を失っていない船が先行船または船首方向に現われた重い氷との衝突を避けるためにはじめ減速するか或いは停止した場合にその場所での旋回を利用する方法。この場合、船尾を反対側に向けさせて不可避的な衝撃を緩和するためには、背後から追って来ている船の船首をどの方向に転じさせるか決め、次に舵を迅速に切替え、その時に全速前進を与えるべきである。

船長にとって船隊に共通な速度を維持する義務があるにも拘わらず、それでもなお、船長が独自に船速を下げなければならない場合が有り得る。これは危険な水路部分、重い氷群域中の水路の急な曲がり角に接近した場合、また氷縁、浅瀬等に接近した場合に必要とされる。しかし、その際にも後続船が近くに存在することを常に考慮しなければならない。

船長は自分の船が船隊の一部であることを常に念頭におかなければならず、また船隊全体の成功裡の行動に専心を寄せる船長であれば、後続船の行動条件を可能な範囲で緩和してやらなければならない。このような協力は具体的には、まず第一に、自分の船の速度を一様に保持することと適正な船間距離を保持することに表わすことにより可能である。

後続船はこのような協力を感じ取って、自からも所定の間隔をより良く守るようになり、また遅れないようにする。このような遅れを防ぐためには各先行船からそれぞれ後続船の航行状態を観察することが非常に大切であり、もし遅れ、まして氷中膠着を確認したならば、直ちにその旨を碎氷船に通報しなければならない。

水海内を誘導する際には大きい速度を採用することはかなり稀である。しかし、船長に勧告したい点は<速度の余裕>を持つことであり、氷堤、狭い場所、水路中の急峻な曲り角などを通る際に、或いは背後から接近している船が接触する危険性が生じた場合に、この余裕を利用するようにしたらよい。

水路中の通過困難な場所に接近した場合には、加速力を付けるように、即ちはじめ速度を増大させて、船が必要な慣性をタイミング良く出せるように勧告する。機関の出力は小さいがタイミング良く充分な慣性を出すことができる船の方が、出力は大きいが必要な速力を出すのに遅れる船よりも、水路の通過困難な区域を容易に突破できる。勿論、このような加速が船体に危険をもたらすことになってはならない。

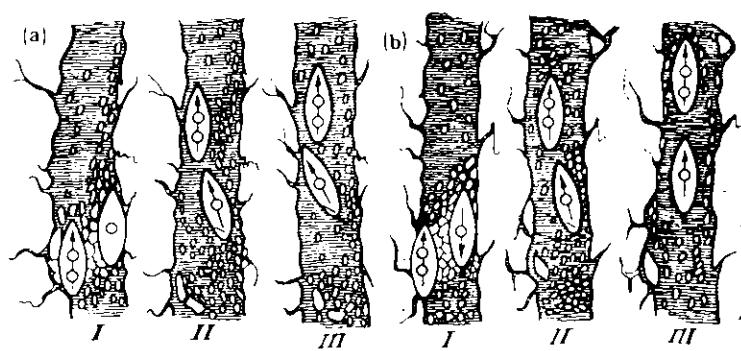
次に、氷中にはまり込んだ船の周囲の氷を碎氷船で破碎する手順について検討する。

各被誘導船の船長は自力で脱出するための可能性のある全ての措置を尽し切ってしまった後に初めて碎氷船に援助を要請すべきである。前進一後進運転を繰り返したり前進運転状態で舵を切替えて船体をゆすぶったりすれば、碎氷船の助けを借りずとも、板氷の凍着した氷域からの脱出がしばしば可能となる。自分の船の周囲の氷を碎氷してもらうために碎氷船をその都度呼び出すことは時間の損失であり、また碎氷船がそのために消費する貴重な燃料の損失でもある。

船の周囲の碎氷作業の要点は次の通りである。即ち、氷中にはまり込んだ船の舷側に沿う形でその極く近くを碎氷船が通って前方に抜け、その航跡に従って船を既設水路に脱出させる。舷側の脇を碎氷船が通過した後に船の前方に氷が若干分散した水面が一時的に作り出される。これは氷域中の<弱点>とも呼ばれるもので、船の前進を可能にする。しかし、このような氷の分散は長時間持続しないことを忘れてはならない。僅かな時間（圧縮下では分単位の時間）の後に氷が再び密集して以前の状態に戻る。

圧縮が無い場合には、碎氷船通過後に浮上したり、また碎氷船のスクリューから放出される水流によって追い出されたりした破碎氷が再び密集化し始める。この水流の動きは被誘導船の前方の氷域をかなり稠密化するもので、水流が強いほど、碎氷船に後続する船の動きは遅くなる。

以上のように、船の周囲を碎氷してもらう船長の主要な課題は碎氷船の船尾からの水流によって作り出される開水面へ出るために氷域中のこの弱点をタイミング良く利用することにある。これは碎氷船の船尾にぴったりと続いて運動する場合にのみ可能であり、そのためには決して碎氷船が遠ざかるまで待っていてはならない。その際の操船に成功するためには、碎氷船が接近して来たときには待機船の機関が完全に準備完了状態になっている必要がある。碎氷船の船首が待機船の船尾を通過するときに（第69図(a)、状態Ⅰ）、待機船に初めは低速の、その後に全速の前進運転をかける。これを行なう目的は待機船の船首を碎氷船の船尾が通過する時点（同図(a)、状態Ⅱ）までに前者の機関は既に全速運転状態にあるようにするためである。待機船は動き始めたとたんに舵を碎氷側と反対の舷の側へ向ける。この操作は通過中の碎氷船の船尾の側へ必然的に倒れかかる船首をできる限り保持するために必要である。しかし、タイミング良く舵を切替えたとしても船は碎氷船によって新しく開通された水路の軸に向って若干の角度をもって方向を変えさせられることが始んど常である（同図(a)、状態Ⅲ）。逆の側—碎氷船の跡への回転は、特に碎氷船が待機船の舷側からなり離れた位置を通過し、その船尾を待機船の船首のできるだけ近くに向けない場合には操縦を困難にする。即ち、船尾を待機船の船首に接近させて向ける場合にはそこに



第69図 碎氷船に周囲の氷を破碎してもらう船の操縦の図式

待機船を<引掛ける>ことができる。即ち、待機船は碎氷船の船尾に密着して運動することができる。

碎氷船の船尾によって（即ち、後進して）氷を破碎する場合には、被救出船は碎氷船が碎氷作業を終えて前進を開始した時点で全速前進をかける。このようにした場合にのみ被救出船が碎氷船の船尾に続いて動けるようになる。その場合、碎氷船の船尾との接触を恐れて決して船速を激減させたり、または機関の運転を止めたりしてはならない。圧倒的に大抵の場合に碎氷船は自分で増速するか或いは少なくとも船に減速せよとの信号を送って衝突を避けることができる。碎氷船の後に従って運動を開始した時点で減速すれば、周囲の碎氷が終了した時点で全速前進をかけることが遅れた場合と同様に、船は密集化してきた氷群中に取残され、再び周囲の碎氷作業をせざるを得なくなる。

碎氷船の後に従って難航域を突破して開水面に脱出した場合にのみ船速を下げる碎氷船から所要の間隔を保って進航することが許される。それから、解放された船は所定の間隔を保って初めは碎氷船の後に続き、その後には（船隊に追いついたときには）碎氷船によって連れ込まれた位置で先行船の後に従い、その伴流を利用して進む。これは、勿論、碎氷船に放置された船隊が移動している場合のことである。しかし、水中にはまり込んだ船の周囲を碎氷する救出作業中には、通常、船隊は移動せずに、碎氷船が戻って来て誘導を再開するまで待機している。

その際、水中から解放された船は船隊内の自分の位置に戻り、船隊全体の行動開始を待って停っている。この点に関して再び船長が思い出すべきことは、このような条件のもとでは機関を停止すべきではなく、短かい水路区間内で前進→後進運動を繰返して誘導の再開を待つべきであることである。

水中にはまり込んだ船の周囲の氷を破碎した後に碎氷船の後に従って脱出するのに上記とは別的方式も存在する（第69図、(b)）。船隊の先頭に立っている碎氷船の船首が被救助船の船尾を通過する時点に後者は前進ではなく後進運動をかける（同図、(b)、状態Ⅰ）。その際、後者の船は大抵の場合に当初はその場所から動き出せない。しかし、碎氷船が被救助船の最も幅広い部分（船腹）の周りの氷を破碎し終ると直ちに後者は氷を排除した水路を後進し始める。この時点で機関を全速前進運転に入らせ（同図、(a)、状態Ⅱ）、もはや碎氷船の後に従って、且つ、その船尾にできるだけ接近して、進むようとする。

上記のような第2の案は次の長所をもっている。

- (a) 被救助船が後方に退く際に、密集氷群中からの脱出を保障するに足りる慣性を出すための大きい加速力をもっている。
- (b) 被救助船が碎氷船の伴流中に直接入ることが遙かに容易になる。第69図(b)（状態ⅡおよびⅢ）から判かるように、後進する際に必然的に船は氷（また風）の圧力に押されて静止水路縁の側から分散氷群（碎氷船の通過によって舷側の下に作り出された）の側へ動かされる。それから、前進運動をかけば、大抵の場合に碎氷船の航跡内に真直ぐに入れる。（状態Ⅲ）

しかし、この第2案は唯一つの非常に大きな短所をもっている。即ち、後進から前進へ切替えたとき、船は必ずしも常に前進運動の慣性を発揮できるとは限らず、碎氷船から取残され、再び氷中に停止することに問題がある。このような事態は氷の圧縮がある場合に最も頻繁にみられるが、普通の条件の場合にも完全に起き得る。従って、恵まれた条件の場合に対しても第2案は第1案よりも普及していない。

水中にはまり込んだ船の周囲の完全な碎氷方法について上記で述べた場合のほかに、氷に阻止されなかった船でも、水路を閉塞している密集氷群の氷堤に遭遇したときに進行を継続できなくなる場合も生じる。このような場合には、碎氷船の作業の要点はこの氷堤を突破して船に独力で水路を進航する可能性を与えてやることに帰せられる。碎氷船が碎氷作業をしている間は船は後方に離れ、打開されるべき氷堤から若干の距離を保って待機し、碎氷船の操縦に邪魔にならないように、また氷堤が貫通した後にそこを通過するために若干加速できるようにしておくべきである。

「規程」の第7条には<碎氷船の後に続いて航行する船は必要な際に直ちに全速後進できるように準備されなければならない>と述べられている。

全速後進の準備は、通常、下記の条件によって整われる。

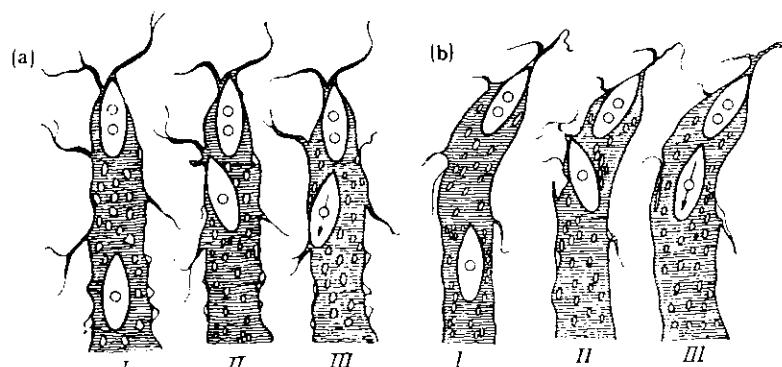
- (a) ボイラの蒸気圧力をしかるべき値に維持しておくこと。砕氷船の後続した航行は、通常、若干低い船速で行なわれる所以で、被誘導船のボイラの蒸気圧力は規定値よりもかなり低く維持される。従って、必ずしも常に完全な全力後進速度が出せるとは限らない。不利な状況のもとでは、このことは重大な結果をもたらす恐れがある。それを回避するためには蒸気圧を定格値まででないにせよそれにあまり離れていない値までに徐々に上昇させる必要がある。
- (b) 機関室制御盤に当直機関士（または上級機関士）を常駐させておくこと。このように制御盤に常駐し且つ、その場所で交替する当直体制は氷海航行に際して通常の体制であり、機関の頻繁な逆転運転が避けられないこと自体がそこからの制御員の離脱を許さない状況を作り出している。
- (c) 機関を或る運転状態から別の運転状態へ迅速且つ確実に移行することを保障する関連機器を正常に作動する状態に維持しておくこと。

ここで、氷域誘導時に全力後進を徐々に与える必要が生じた場合の検討に移ってみる。このような状態は先行船、また特に砕氷船自身、が前進運動の力を突然失った際に最も頻繁に生じる。

水路を開設中に砕氷船が重い氷と遭遇したときしばしば動きを阻止され、時には警戒信号を発する間も無い場合がある。< I. Stalin >級の砕氷船は疎水域を航行するときですらも、時々、突然停滯してしまうことがある。この型の砕氷船の船首は構造的に短所があり、そのため氷が船首の下で引留められ、船の前に引きずり出される。砕氷船の船員達によって< Sev >と呼ばれている砕氷船は重い氷塊を相手にする船であるが、この型の砕氷船は急激に、しかもなお悪いことには、全く予期せずに船速を減じる恐れがある。船首の下に引留められた氷塊はそれ自体でも他の氷塊と引掛けたり、そのため砕氷船の速度が更に大幅に低下することになる。このような場合に最も危険と見做すべき事は航行が一般に快調な速度で進み、被誘導船側でも砕氷船の突発的な停止を最も予期しないふうな疎水域を進航する際にこのような突発的で急激な船速喪失が最も頻繁に起きている点である。従って、このような特質をもつ砕氷船の直後を航行する船の船長は常に警戒心を働かせ、砕氷船の動きを注意深く見守らなければならない。第2のまたそれ以降の船に対しては砕氷船の突発的な速度喪失（または突発的な停止であっても）による危険度は遥かに低くなる。これらの船では先行船の信号を注意して監視していれば進航速度をタイミング良く低下させることによって殆んど常に突然停止を避けることができる。

先行船が突然停止した場合に後続船との衝突を防止する最善の策は後者が全力後進することである。しかし、短かい間隔で走航している際には、先行船との関係ではタイミング良く与えられた全速後進が衝突を避けるばかりでなく、その逆に更に重大な結果をもたらすこともあり得る。

例えば、先行の船が幅広い水路の右側の縁または右側の曲り角に突然はまり込んだ場合がみかけられる（第70図(a)および(b)、状態Ⅰ）。このような状態から脱出する最善の方策は速度を下げるかまたは機関をも停止することであるが、その際船の操縦性を保持し、舵を使って船首を左側へ向けさせる（状態Ⅱ）。その際、後から追い付いた船が先行船の舷側に沿って左側から船首を氷に乗せる。また、船首を氷に引掛ける場合には滑り打撃（sliding attack）のみにとどめておく。実際に、このように行動するに際して、船体があまり左側に寄りすぎないように、また左舷のビルジ部分を水路縁に衝突させないように注意する必要がある。慣性が著しく有る場合には衝突がかなり強いため船首が右側へ押し戻され、事故が防止できなくなる。



第70図 先行船が水路内で突然停止した場合の操船の図式

この場合、全速後進は無益であるばかりか、有害ですらあることが判かる。船速がかなり大きい場合には後進することができず、または前進運動の慣性を消滅させることもできず、必然的に操縦性を失なう。前進運動を保持しつつ、船首を右側へ傾け、先行船の船尾に直撃を与えることができる（同図、(a), (b), 状態Ⅲ）。

勿論、船同士が危険な接近をする大抵の場合に、まして船首をどちら側でもよいが傾ける場合には、船長は全速後進をかけることになる。しかし、繰り返して云うが船速を減じ、船首を氷の無い水路縁の側へ向けた方が無条件に適正である場合が有り得る。水路縁に何んらかの突出部分または曲り角があるか、或いは氷が弱い場合にはそこへの突入が可能である。このような打撃を加えることによる結果の重大性は2隻の船が衝突することによるそれよりも常に低い。

板氷群の中を短かい間隔で航行するとき衝突を避けるための最善の方策は先行船の脇を迂回し、慣性を消して、氷群中に停止することである。また、船首をいずれかの氷塊にもたれかけて船を停止させる方策も可能である。先行船から脇の方へそれたときには舵を操作すると共に機関の運転を再開してよい。このような操縦方法は機関を2基（3基）備えた船で適用すれば特に好都合である。即ち、1基の機関に全速後進運転をかけることによって、船の方向転換と前進運動の慣性の低減を同時に達成することが可能になる。

後進が危険となる上記と同様なケースは船首のすぐ近くに重い氷が突然出現した場合にも起きる。例えば、碎氷船が開設した水路を5~6 ktの速度で進む場合に30~40 mの先に水路の左半分を閉塞している重い小氷盤群を発見することがある。このように近い距離では船が後進をかけても慣性を消滅できず、船首を右側へ向けることになり、その結果、左舷のビルジ部分で氷に衝突することになる。従って、このような場合には船速を最低限に下げ、船首で氷に衝突した方が良い。

最後に、碎氷船の直後に続く船では碎氷船との衝突の危険が見掛けられるときでさえも船長が後進を与える措置を差控えざるを得ない場合があるが、このような場合について検討してみる。このような条件は水路内に氷の圧縮があるとき船が碎氷船に短かい間隔で後続する場合に生じる可能性がある。碎氷船はその進路上で今迄よりも重い氷に遭遇したとき、速度を下げ、その旨を後続船に信号で伝える。短かい間隔で後続している船はその信号を受け取った後に、タイミング良く減速し必要な速度に下げるとする。しかし、後続船は碎氷船が作り出す伴流による開水面を走航しているので、自船の慣性を消すには碎氷船よりも長い時間を要する。従って、若干の時間は碎氷船への接近を続けることになる。この接近が氷海航行のベテランでない船長にとって危険なものになる恐れがある。従って、その船長は、通常、耐えきれなくなって、衝突を恐れて船に後進をかけることになる。その結果、船は慣性を急速に失ない、碎氷船から遅れはじめるが、他方では碎氷船のスクリューからの水流によって追い出されて密集した氷塊が水路に益々多く集合していく。結局のところ、船は運動できなくなる。そこで、例の通り船の周辺を長時間費やして碎氷作業する必要が生じる。

正にこのような事態を考えてベテラン船長であれば上記のような条件のときでも船に後進をかけないのが普通である。その場合には慣性を失なわない程度に且つ碎氷船から遅れない程度に船速を下げ、舵を操作して船首を碎氷船の船尾からそらし、そこから数メートル離れて若干の時間走航する。それから次第に船の慣性が失なわれてきたとき、或いは碎氷船が速度を増大したとき、徐々に碎氷船から遅れ、遂に所定の間隔を保った当初の位置に戻ることになり、その後は正常な走航を続けて行く。

§ 31. 碎氷船による船舶の曳航

「規程」の第8条に依れば、〈碎氷船に曳航されて氷域を行く船はいかなる場合でも碎氷船長の特別な指示が無い限り機関を前進運動させてはならない。これらの船は碎氷船長の要求に直ちに応じて曳航される準備および全速後進をかける準備が常に整っていなければならない〉とされている。

碎氷船による曳航が必要になる場合は、第一に、船隊内に故障を起した船または機関の出力と船体の状態の面で所与の条件に対して弱い船がでた場合、即ち自力でその氷域を走航する能力に欠ける船がでた場合であり、第二に、船隊内のいずれの船にとっても碎氷船による曳航無しには個々の重い氷塊を通過できないような苛酷な氷海条件内で誘導され

る場合である。

水域を航行する際の曳航の仕方は下記の通りである。

- (1) 短間隔の曳航（第71図）。この場合の曳航索の長さ（20～50 m）は被曳航船が碎氷船の伴流による開水面に入れるようにする必要条件から決められる。この曳航方法は碎氷船が開設した水路において密接氷群内を通過する際に、特に氷の圧縮があるときに、また主として、＜密着＞曳航の装備を持たない碎氷船で適用される。
- (2) 密着曳航（第72図）。この場合、被曳航船は碎氷船の船尾に設けられた特殊な切欠きに引張り込まれる。この曳航法は難航水域を通る際に船尾に切欠きを持つ碎氷船によって採用される。
- (3) 長間隔の曳航。曳航索の長さは水域の密接度に応じて50～150 mの範囲にされ、密接度が大きいほど短かい曳航索の使用が許される。この曳航法の適用は分離水域を航行する場合に限定される。

水域中を碎氷船に誘導される各船は、その時点において曳航を必要とするか否かにかかわりなく、常に碎氷船からの曳航申し込みを受け入れられるように準備された状態になければならない。このような準備体制は主として下記によって整えられる。

- (1) 鎖は錨鎖留めを外して甲板に横たえておかなければならぬ。錨鎖管が充分に広くてそこに錨鎖と一緒に曳航索も通すことが可能であれば、必要な長さの鎖を弛め錨鎖留めを外して錨を甲板に横たえずに済む。それから鎖ができる限りしっかりと張り回わして後方に送り込み、錨鎖管に通した曳航索の動作の妨げにならないようする。しばしば実際に行なわれているように錨鎖留めを外さない状態で錨をビルジ部分にまで（または舷側面に）引延ばしたり（錨を甲板に揚げなくするために）しているが、これは避けるべきである。舷側は原則として何物も付属物が無い状態にすべきである。船外に錨が残されていれば重大な事故の原因となり得る。
- (2) 碎氷船からの曳航索を迅速に受取るために、両船の錨鎖管に予じめ軽量のスチールワイヤの案内索を通しておかねばならない。準備手順に従えば、一時的に互に結び合わされる案内索の外部端は船首樓（半船首樓）の孔を通して甲板に引込む必要がある。投げ綱、ストームトラップ、フェンダ材などは手のとどく場所に配置されていなければならない。
- (3) 被曳航船に受取った曳航索（ストロップまたは曳航索の端末環）を固定する装置も完全に準備が整っていなければならない。甲板員は最もよく用いられる曳航索固定方式を予じめ確立しておくべきである。

碎氷船に誘導される船舶を実際に曳航する際に前者からの曳航用ストロップを後者で固定する方法としては下記の方

法が採用されている。

- (a) 碎氷船からの曳航ストロップの両方の端末環（被曳航船の錨鎖管を通して甲板に引上げられた）に短かい丸太を通す（第73図、(a)）。この方法はストロップが丸太に食い込まない限りにおいて、最も迅速に固定でき、また解くにも便利な方法である。曳航索を弛めるだけで丸太を引抜き曳航索を解くことができる。曳航索を強く引張るときストロ



第71図 碎氷船に短間隔で曳航される状況



第72図 碎氷船による密着曳航の状況

ップの端末環が丸太に食い込まないようにするには、そこにマットを下敷に挿入するか、或いは帆布で包むなどの措置を施す必要がある。端末環が丸太に深く食い込んだ場合には、それを解くのに長時間を要し、丸太を切断しなければならないことも有り得る。なお、四角棒を使用すれば、面の角に容易に端末環が深く食い込んでしまうので、これは使用すべきでない。

(b) 曳航用ストップの端末環を被曳航船の甲板で大型の綱具用およびロープ用シャックルで結合する。この方法のプラス面は曳航索の固定が迅速且つ容易にできる点にある。しかし、これには極めて重大な短所もあり、曳航索を強く引張ったときにシャックルが変形し、索を解くのが困難になるほどになる可能性がある。これを避けるためには、ねじ山を刻んだボルトの付いたシャックルは全く使用しないように勧告する。その理由はシャックルがほんの僅かねじれただけでもボルトが外れなくなるためである。従って、アンカーシャックルやチェーンシャックルのタイプの使用が最も望ましい。

(c) 曳航用ストップの端末環を被曳航船の甲板でマニラ麻ロープから成る縛綱 (lashing) を数列巻いて結合する。

(第73図、(b))。この固定法は前記2つの方法よりも時間がかかるが、その代り曳航索の解き戻しは容易で且つ迅速にできる。曳航索がいかなる引張り状態にあるときでもこの縛綱は斧で簡単に切断できる。この方法のマイナス面としては、頻繁に且つ急に激しく引張られるときスチール製の端末環によってマニラ麻のロープが次第に切れて行く点にあると見做される。しかし、このような状況は実際には稀れに、またそれも長時間曳航する際にのみ、見られるにすぎないので、この方法は曳航索の迅速な解き戻しが常に決定的な意味をもっている短時間性の氷中曳航に際して最も便利な方法であると見做されるべきである。

ストップを備えていない碎氷船からの曳航

索の固定方法はさまざまであり、また、上記よりも複雑である。以下では、そのうちの若干について検討してみる。

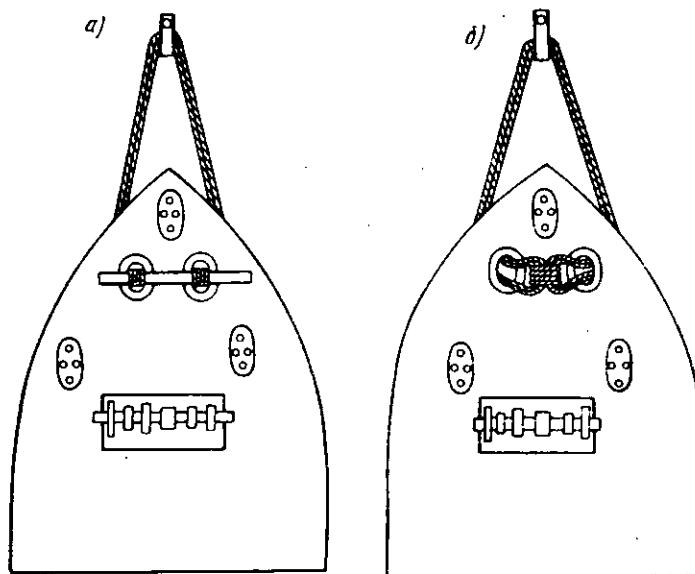
案内索を用いて錨鎖管の1つを通して甲板に曳航索を引出した後に、その端末環に丸太を通し、曳航索を固定する。その際、端末環が小さすぎて丸太を通すことができない場合には、シャックルを付け、曳航索の端末を丸太の結び目に引掛ける。ここで指摘したいことは1つの錨鎖管を介すだけの氷中曳航は極めて不適当である点である。いわゆるく片方の鼻孔>を介しただけで曳航される船は激しく揺れ、水路内で氷に遭遇したとき船首をそれに真直ぐに向けられず、或る角度をもって衝突することになり、そのため曳航が困難になり、また氷の被害を受ける確率も高くなる。

従って、長時間曳航に備える場合には被曳航船自体でストップまたは類似の添えロープを両方の錨鎖管に通すように勧告する。

(4) 船首楼において曳航索を受取る準備はそれを固定また解き戻すために必要な全ての器具を用いて整えられなければならない。

既に述べたことから明らかのように、碎氷船の船長の最初の要求に応じて曳航索を解放することに関する規則が遂行できるか否かは主として曳航索の固定方法に依存する。従って短時間性の曳航に際してはマニラ麻のロープで縛り付ける方法による曳航索（ストップ）の固定法を採用すべきである。

ここで、碎氷船に曳航される船の機関をどのように利用できるかについて検討してみる。



第73図 碎氷船からの曳航索を被曳航の甲板で固定する方法

「規程」第8条に依れば被曳航船の船長は砕氷船の船長からの特別な指示が無い限り自分の船の機関を前進運動させることができない。この規則は前進について規定したもので、船同士の衝突の危険性がある場合には被曳航船の船長は砕氷船の船長の指令を待たずとも自から、後進を命じることができ、また、それをしなければならない。従って、被曳航船の機関はその船長自身のイニシヤチブによっても、また、砕氷船の船長の要求によっても後進運動に入れるように常に準備できている状態になければならない。

砕氷船の船長が最も頻繁に被曳航船の船長に指令することはその船の操縦性を良くするためと砕氷船を援助するために前進運動をやり抜くことである。両者の機関のこのような共同運動は特に密着曳航に際してしばしば採用されている。また、間隔のある曳航、まして重い氷群中のそれ、が被曳航船の機関運動なしに済まされる場合は非常に稀れである。その場合、被曳航船で大きな進航速度を出すことは重い氷群域での運動に有利になるものの、他方では時として極めて重大な事態を作り出す恐れもあることを指摘しておきたい。それは一連の諸要因によって被曳航船の運動速度が一定に保たれなくなる点に帰せられる。その際、速度が大きいほど、速度の変動が激しく、それが曳航索の応力に反映し、その破断を招く可能性がある。

上述の考えに従えば、間隔のある曳航に際して被曳航船としては低速以下の速度で進航した方が良く、特に苛酷な水域条件の場合にのみ速度を全速力まで上げることが許される。

密着曳航に際して被曳航船は砕氷船の船長の許可のもとに全速力までの速度を出すことができる。

既に「規程」から判明しているように、被曳航船で前進をかけ得る場合はその船を曳航している砕氷船の船長が直接指令した場合に限られる。その指令をタイミング良く且つ誤りなく遂行するため、被曳航船の船長は両船間の交信のルールと手段について曳航開始以前に砕氷船の船長から指示を受けなければならない。

このような場合に最も頻繁に用いられる交信方式は音響信号（汽笛）方式である。正にこの種の通信手段は船速変更信号が被曳航船にタイミング良く受取られ、理解されることを最大に保障するものである。

極東海域で採用されていた信号を第7表に示す。

この信号表は、基本的には、氷中誘導時の機関の運転状態の変更に関する通常の信号を用いて作成したもので、更に、誘導時には殆んど使われないが船の通過のための信号を追加したものである。

このような原則に基づいて作成した信号表の肯定的な面は砕氷船と被曳航船との間の信号の交換がこのような方式のものであれば、船隊内の他の船をミスリードしない点である。即ち、船隊全体に關係する速度変更についての交信は、第7表に示されているように、水域誘導時に使用される共通信号によって表示される。また、被曳航船だけに關係する交信は船隊内の他の船とは直接關係の無い補助的な信号によって行なわれる。

第7表 氷海で砕氷船が船舶を曳航する際の交信用信号

信号 №	砕氷船から	被誘導船から	信号形態
1	低速前進せよ	低速前進する	—
2	次のレベルまで速力を上げよ	次のレベルまで速力を上げる	•
3	次のレベルまで速力を下げよ	次のレベルまで速力を下げる	—•
4	機関を停止せよ	機関を停止する	..
5	全速後進せよ	全速後進する	•••
6	了 解	曳航索を固定した。曳航準備よし	—•—
7	曳航を開始する	了 解	— — •
8	機関を停止した。 曳航を中止する	了解。機関が運転中であれば 停止する	— —

<注> (1) 実線は長音、点は短音を表わす。

(2) №2信号<次のレベルまで速力を上げよ>は低速→中速、中速→全速、全速→最大全速へとそれぞれ増速を意味する。

№3信号<次のレベルまで速力を下げよ>は上記の逆を意味する。

№4信号は被曳航船でのみ機関停止の必要がある場合に用いる。

№8信号は船隊全体の動きを停止する必要がある場合に用いる。

予じめ№4信号が与えられていない限りにおいて被曳航船は共通信号№8に従って機関停止しなければならない。

船隊内の他の船に対する№7信号は船隊全体の行動開始を意味する。

短かい曳航索で船を曳航する実際面では時として被曳航船の機関が低速または最低速の後進運転を行なう特別な方策が採られる。これは操縦不能になった船を曳航する場合に最も多く見られる。

その場合、操縦不能船の針路ずれや曳航索の急激な引張は遙かに少なく、従って、曳航索の破断の可能性も小さい。更に、この方法のプラス面としては砕氷船が氷中にはまり込んだとき、脇にそれることのできない被曳航船が衝突する確率が著しく低いことが挙げられる。

終りに次のことを指摘する必要がある。即ち、被曳航船が損傷を受けずに無事であるかどうか、また、曳航索が完全に保たれるかどうかはその船の船長の注意力と操舵手の運転操作の適確さに著しく左右される。特に重要な点は曳航する砕氷船の伴流に従って上手に操縦することである。

§32. 砕氷船に誘導された船舶の事故

「規程」第10条には<砕氷船の後に従う船舶に事故が起きた場合にはその船は国際法に基づく遭難信号を発信する義務がある>と述べられている。

現在、被害情報は、通常、無線によって砕氷船に伝達される。一方、<われ遭難中、直ちに救助乞う>の信号は船またはその積荷が破滅の危機に接した特に重大事故の場合にのみ発信される。氷による比較的軽微な被害、即ち、船の航行の安全性およびその誘導走航に影響しない程度の被害については、通常、その情報は最初の適当な時、また場合によつては誘導終了後に総括報告の形で報告される。しかし、水域誘導中に受ける個々の被害についてはその規模にかかわりなく船長はそれを発見次第直ちに砕氷船の船長に通報する義務がある。

砕氷船の船長は船隊誘導が終了したときに、各船に対し誘導中に蒙った氷による被害について自から問い合わせ、その結果を航海日誌に記録する義務がある。

実際には、自分の船が誘導進航中に蒙った氷による被害を過大に報告する船長がしばしば居る。大抵の場合、これは被害規模を正確に確認することができない（特に貨物を積んだ船では）ためであると説明される。後程になって、荷揚げ後またはドック入り後に、はじめて正確に確認できるあれこれの被害の規模を記録されずにおかれることを望まないため、各船長はどんな場合でも過大に報告することになる。

蒙った被害についてあますところなく詳細に報告しようと思っても必ずしもそのようにできない船長の困難な立場を充分に理解するとしても、それは発見した被害を誇大化するいかなる根拠にもならないと判断すべきである。報告情報は船長によって明らかにされた事柄のみを反映するものでなければならない。それと共に船長が報告情報に自分で推定される被害を含ませる権利を誰も奪うことができない。このような場合に船長はそれについて説明すると共にそのような推定の根拠を示さなければならぬ。

以下では、砕氷船に後続する航行に特有な危険について簡単に触れつつその回避方法を示す。

(1) 被誘導船は砕氷船が開いた水路の中央部を航行すべきであり、決していかなる場合にもくさび氷との衝突を避けるために水路縁側に押し付けられてはならない。

- (2) 被誘導船は先行船が作り出す伴流内に確実に入って進航しなければならない。伴流内の氷の条件は常に伴流外のそれよりも軽微になっていると見做すことができる。
- (3) 伴流内を続航する際、前方の氷を注意深く観察する必要がある。水路内の破碎氷群に船にとって苛酷な重い氷塊（第74図）が混入して来る場合がある。このような氷塊を発見してもそれを迂回できない状態にあるときには船の速度を最低限に下げ、船首でその氷塊に立ち向わなければならぬ。
- (4) 水路内で迂回も破碎も不可能な重い氷塊に遭遇した場合には、その氷塊の向きを変えさせるか押し退けるかして船の通路を確保しなければならない。
- (5) 重い氷塊に極く接近して通過する際には、それとの接触による舵やスクリューの破損を防止するため、舵をしかるべく操作して船尾をそれに接近させないようにする必要がある。その場合、決して機関を停止してはならない。
- (6) 急旋回に際しては船尾の動きを注意深く見守り、それが氷に（まして加速度をもって）押し付けられないようすべきである。
- (7) 開水面側から氷縁に接近する際には予じめ、氷に突入する前に、船速を減じるべきである。その目的は既に氷に遭遇して速度が低下している先行船に対し危険な接近を避けるためである。
- (8) 水中から脱出して氷池に入る際にも速度を若干低下させて、次に突入する氷帶に慣性を小さくして入れるようにすべきである。



第74図 破氷船が開通した水路内の重い氷塊

§33. 破氷船による船舶誘導時の信号表示の手段と方法

「規程」第11条では次のように規定されている。*<破氷船の後に従って氷域を航行する船舶は汽笛またはサイレンによって発せられる別掲の信号（付録219頁参照）による指揮に必ず従わなければならない。これらの信号は、No.6信号を除き、破氷船または信号を発した船に最も近い位置の船から順次後続の船へと復誦して伝達されなければならない。各船はこれらの信号によって伝達された破氷船の要求を直ちに満たさなければならない。>*

破氷船が発する信号を知り、その要求内容をタイミング良く遂行することはいかなる誘導においてもその成功と無事故を保障する最も重要な要因の一つである。被誘導船の船長は自分の助手達（assistants）に氷海信号に関する完璧な知識を要求すると共に、氷海信号表が船橋に、見易い場所に置かれているかどうかを誘導開始前に再度チェックしなければならない。

なお、信号表が当直航海士の目の前に常時存在すれば、氷海信号の習得を大いに促進する。

「規程」第11条では破氷船が発する全ての信号は被誘導船の船長によって聴取された限り直ちに復誦され且つ信号内容が遂行されなければならない旨を指示している。この命題は何んの注釈も必要としないが、これに更に次の指示を追加しておくべきであろう。即ち、*<自船に關係の無い原因によって破氷船の要求を直ちに実行できない船は、その信号を復誦せずに、必ずその旨を無線または可視信号によって破氷船に通報すべきである。>* また、そのように実際にも行なわれている。船隊の全ての船による信号の順次復誦は指令受理の確認であると共に指令の遂行または遂行準備の報告でもある。このようなシステムの場合に全く明白なことであるが、信号によって伝達された指令内容を遂行できない船はその信号を復誦してはならない。そのこと自体が破氷船の船長にその船は何んらかの理由で自分が発した命令を遂行できない状態にあることを知らせることになる。

そこで、次の信号伝達順番に当る船は若干の時間間隔を置いて信号の復誦を行なわなければならない。

更に、もう1つ次の問題に触れてみる。即ち、これは被誘導船で船長が船橋にひとりで居る場合に彼は信号の復誦と命令の遂行のいずれをまず第一に行なうべきかの問題であり、貨物船隊が砕氷船に従って航行する際に実際にこの問題に時々当面する。

速度の低減、停止または、まして全速後進、を必要とする全ての場合に対して、無条件に、まず初めに命令を実施し、次に信号を復誦すべきである。勿論、この両方の動作に要する時間は最少限に短かくなければならない。その他の場合には動作の順序はそれほど重要な意味をもっていないので、通常はまず初めに信号を復誦し、次に命令を遂行するという順序が採用される。氷中誘導時に使用される全ての信号は第11条で指示されているように、汽笛またはサイレンによって伝達される。後者は前者が無いか或いは作動不能な場合に限って使用される。

砕氷船による船舶誘導の実際面では上記とは別の手段にたって信号を発し、また、復誦する場合も稀れない。

例えば、疾風が吹いている時また特に船間距離が大きい場合には普通の汽笛音はしばしば非常に聞えにくく、また実際に、汽笛から立上る蒸気の塊りの長さに依って見当を付けざるを得ない場合がある。さまざまな原因によって、また特に、空気式警笛（typhon）を使用する場合に、蒸気塊の長さに依る見当付けが不可能な場合に可視信号に頼らざるを得ない。

極東海域の氷海ではこのような場合に定航砕氷船は速度変更を表示する信号として球型型象物または旗（一般に＜お化け＞）を最も良く見える場所（高さ）に掲げる方法を採用していた。

球型型象物（または旗）による信号表示は下記のように非常に簡単でまたそれ故に覚え易い方式で行なわれた。

1. 球型型象物（旗）を所定の高さまで掲げる場合：－<前進せよ。我れに続け>
2. 球型型象物（旗）を半分の高さまで掲げる場合：<速度を下げよ>
3. 球型型象物（旗）を下まで降す場合：－<我れに続くな。停止せよ>

<全速後進せよ>の信号は汽笛で発する。その理由は汽笛音を聞き取れる近い距離に被誘導船が居る場合に、通常、このような信号の必要性が生じるためである。その他の全ての信号は必要に応じて無線で伝達される。

このような信号方式に依れば、船隊が正常に進航しているときには球型型象物（旗）はいつも高く掲がりっぱなしの状態になる。半分の高さに降された球型型象物（旗）（<速度を下げよ>）は他の諸被誘導船が信号を復誦し終ると直ちに再び高く掲げられる。

信号を逆に高く掲げる場合、速度を次のレベルに更に一段下げる必要があるときにこの信号を復誦する可能性が保持される。

もし必要ならば、補足的な信号<速度を上げるか間隔を短縮するかせよ>を導入できる。この信号は球型型象物（旗）を迅速に半分の高さまで降し、復誦を待たずに、再び元の高さまで迅速に掲げる方法で伝達される。夜間誘導時、特に風や波がかなり強い天候のとき、氷海信号は一般に発光信号により上記と同様な復誦方法で伝達されるが、その際、長光信号は普通よりも若干長く与えられる。これらの信号はマスト灯によっても、また、任意の指向性送光灯または信号投光器によっても伝達される。しかし、実際面から明らかのように、マストの信号灯の方が遥かに便利である。これは船上の高い位置に配置され、注意を引き易く、何物にも遮蔽されることなく、また、船橋に居る人間の眼にまぶしくないという利点をもっている。

発光信号方式は夜間においては通常の音響信号方式よりも信頼性が高く、また更に、もう1つの無条件に注目に値する長所をもっている。それは騒音を発しないことであり、そのため当直外の船員が平穏に休息することができる。船に強力な投光器が装備されているならば、可視信号方式が明るい昼間でも成功裡に適用される。

「規定」第11条で指示されているように、砕氷船の信号は船隊内の全船舶によってタイミング良く必ず復誦されなければならない。このことはその信号が1隻の船（曳航信号を除き）にのみ関するものである場合にも効力をもっている。他の船の船長はその信号が自船に関するものかどうか迅速に判別する能力、また、もしそうであればそのときに状況に

応じて迅速に行動する能力をもっていかなければならない。

この面について若干の例を以下で検討してみる。第3の船がいつも余計に大きな間隔を保ち、それに先航する第1船と第2船は両者の間および砕氷船との間の間隔を正規に保っている場合があるとする。砕氷船の船長は遅れている第3船を追い付かせようとして<間隔をつめよ>の信号を発し、全ての船がそれを復誦する。その際、しばしば見られることであるが、第1船と第2船がこの信号を受取って速度を上げ、限界間隔まで接近する。第3船も速度を上げるが、これは悪い条件のもとで進航しているので先行船との間隔が益々大きくなってしまう。

上記のような場合に先行2船の船長が所定の間隔をきちんと維持し、第3船の遅れを見て信号を復誦するだけで、少なくとも遅れている第3船が追い付くまでは速度を上げずに自己のペースで走航すれば問題が正しく解決される。また別の場合もあり得る。即ち、遅れた第3船を待つとの考え方から砕氷船が<速度を下げよ>の信号を出し、それを遅れている船を含む全船が復誦し、その通り実行する場合である。その場合、第3船は船隊内の自船の位置を知るならば信号を復誦だけにして今迄通りの速度で進航すべきであり、信号に従って減速すれば益々取残されてしまう。

上記のような場合には第3船は減速要求の信号を復誦せずに、その信号に<我前進する>の信号で答え、少なくとも先行船との間隔を所定の距離に短縮するまで今迄通りの速度で進航してよいと考える。このような応答信号を発すればその船の状態（位置）が完全に明らかにされよう。

更に一層ナンセンスな場合も生じ得る。即ち、遅れた船ができるだけすみやかに追付かせようとして砕氷船が長音を2つ汽笛で発し船隊全体を10~15分間停止させ、その間に遅れた船を追い付かせる場合である。しかし、この試みは全く無駄に終る。即ち、遅れている最後の船もこの指令を正確に遂行して、砕氷船からの信号を受けた場所で機関を停止してしまう。遅れた船を追い付かせようとしたこのような無駄な試みは、砕氷船が無線を使ってその船に待っているから追い付くようにと伝えるか、或いはその船の処に出向いて船隊に追い付かせるようにするまで続くことになる。

被誘導船の船長が砕氷船の信号内容を誤解する場合も実際にしばしば起きる。砕氷船が或る特定の船だけに関する音響信号を発する際に併せてその船の船隊内の順位を表わす番号旗を帆桁に掲げた方が適切である。記名信号は稀に使われるだけであるから音響信号の補足としての旗の掲揚は砕氷船にとって大した負担にならない。このような信号の場合、その復誦義務は、勿論、指定された船だけが負う。

ここで、船隊内での船の立遅れ問題について更に詳しく触れてみる。これはしばしば船長が自分の船は船隊の共通速度について行けないことが判かっていても砕氷船の速度を下げる信号を出すべきであると考えないためである。それはこのような信号が信号表に入っていないからである。

いずれにせよ、有利な氷海条件での船隊の進航速度は船隊内で最も船足の遅い船の速度によって決まる。従って、立遅れた船の船長は砕氷船の船長に対して砕氷船の速度を少し下げる必要がある旨を指摘することは正当である。このことにより、立遅れた船を待つため船隊が系統的に停止すること、また、立遅れた船の周囲の砕氷作業や追付かせにやむを得ずあちらこちら走航することが未然に避けられる。

立遅れた船の前を走航する船の船長がこの遅れは所定の間隔を維持する技量が劣るために、別の原因によるものであることを確信したならば、速度低下の信号を出すこともできる。後続船からの信号は遅滞なく復誦されて砕氷船に届けられなければならない。

水中膠着の報告信号は船隊が膠着した船（ましてそれが最後の順位の船であればなおのことであるが）から遠ざかってしまわぬうちにタイミング良く発信し、また復誦することが極めて肝要である。

霧中誘導に際しては、通常の氷海信号のほかに、全ての船舶は規則15 PPSSによって規定されている霧中信号を発する義務がある。この点に関して砕氷船は、進航中の船として、唯1つの霧中信号—長く続く汽笛音—を発しなければならない。これらの霧中信号は砕氷船が行動中であることおよび被誘導船群は砕氷船の後に従って平穏に航行中であることを示している。その際、砕氷船から発せらるる霧中信号をタイミング良く且つ、肝心なことには、それを厳密に順次復誦することの重要性を強調しておきたい。その復誦信号音の方向と大きさに依って砕氷船の船長はどの船がどこにま

たどの位の離れて存在しているか、また、はたして全ての船が後に続いているかどうか、またはどの船が船隊から立遅れているかをほぼ判定することができる。

昼間に、まして夜間に、船隊を誘導する場合には、砕氷船は急旋回を行なう前にはその都度、船隊にその旨を予告する信号を与えなければならない。その際、このような旋回が船隊にとって予期されなかつたためそれへの準備ができるほどに突発的なものであつてはならない。

船隊指揮および氷状情報のための船隊内交信に砕氷船の船長は極超短波無線通信、長波無線通信（送信器出力を最低にして）、また、無線電話といった手段を広く使用すべきである。

船隊内無線交信用のマイクロフォンは砕氷船および被誘導船の指揮船橋に設置し、船の操縦と直結して会話ができるようにされなければならない。

§ 34. 砕氷船に誘導される船舶のためのその他の規則

砕氷船に誘導される船舶に対し「規程」第9条では次のように指示している。
＜誘導される船の順位はまず第一に軍艦、郵便・旅客船、次ぎに期限を特に指定された貨物を積載している船、その後に残りの全ての船となるが、これらは氷縁に到着した順および出港準備の完了順によって順位を付ける。＞

第13条では＜砕氷船も、その所有者も、また荷主も氷海誘導時の被誘導船に起因する、また、誘導結果としての並びに誘導に関連した操船結果としての船体破損およびその他の損害に対して財産上の責任を負わない＞と述べている。

第14条では次のように規定されている。
＜いかなる船籍の貿易船でも該当港湾管理局の砕氷船によって氷縁から港内への誘導、港内から海上への誘導および港内での誘導、また、砕氷船の船長が必要と認めた場合には上記の諸誘導に際して曳航を無料で受けられる。荷積みー荷揚げ作業、石炭など燃料積込み、ドック入りなどのための船の移動と係船は曳航サービス、ドック入りなどについてそれぞれ定められている料金を払って（有料）で行なわれる。＞

第16条では＜ソ連のいづれの港でも従来有効であった砕氷船による船舶の誘導に関する諸規定は本規程の発効と同時に廃止される＞ことが示されている。

上記の諸条項には特に注釈を必要としないが、ただ第9条については次のように言えよう。即ち、その第1項は無条件に満足されるべきであるが、第2項については、砕氷船の船長が船隊編成に際して、これらの船の到来順または準備完了順よりも互に適当（類似）な船の配置を重視しなければならない場合もあり得る。公海上の氷中誘導の順位は、一般に、運航指揮責任者によって運航計画全体または氷状との関係において決められる。

§ 35. 砕氷船に従って航行する際に「規程」に反映されていない若干の特徴

氷海を砕氷船に誘導される船舶のための規則は主として港湾用砕氷船の作業に適用して作成されたものである。公海上で砕氷船が作業する場合には更に下記のような問題が追加される。

1. 砕氷船に従って航行する船舶における船位推算と航路記入（プロッティング）
2. 砕氷船に従って浅瀬を航行する際の特徴
3. 視界が限られている場合における砕氷船の後に続く航行

砕氷船隊の後に従って走航する全ての船舶の船長は、船隊から離脱した場合或いは誘導終了時に自力で航行を続けることができるようにするため、海図に航路をプロットする義務がある。

しかし、残念なことに若干の船長は船位推算に非常に怠慢で、時にはそれを全く実施しない場合さえ見られる。彼等によれば、どうせ砕氷船が目的地点まで自分達を連れて行ってくれるし、また、もし誘導が早めに終了したとしても、現行の実際例によれば砕氷船がその後の自力航行のための出発点を与えてくるので同じ事であると考えている。

海洋において砕氷船による誘導の実施に際し1日に1~2回の割合で船隊内の全船の天体観測または推算による位置を砕氷船の位置と対照することを義務的な規則として導入すべきであろう。被誘導船の船長に対して大いに勧告したい点はこのような

規則の有無にかかわりなく自船の位置をより正確な砕氷船の位置と1日に2回の割合で対照する事である。

砕氷船に後続して浅瀬を航行する際の主要な特徴は砕氷船の吃水が殆んど常に大きい点にみられ、それ故に砕氷船が先行することによって被誘導船の座礁が避けられる。従って、被誘導船は砕氷船の航跡内に厳密に入って走航するよう勧告する。

第2の、しかし、それはほど本質的ではない特徴の考慮も非常に重要である。それは浅瀬の有る海域を砕氷船に従って走航する際の適正な速度と距離の選定である。それは砕氷船が限界水深に達したとき（または海底と接触さえしたとき）突然、何んの予告もなしに、全速後進をかけざるを得ない場合があるためである。

従って、浅瀬のある海域内を砕氷船に従って走航する船は下記の事項を守らなければならない。

1. 適度の速度（通常、砕氷船の指示による）を維持すること
2. 砕氷船の動きに注意深く追従すること
3. いかなる時でも全速後進をかけられる準備をしておくこと
4. いかなる時でも砕氷船が後進しても接触の恐れが生じないような間隔を保つこと

これらの諸事項全てを通じて非常に肝要な点は船隊内の全ての船で、また、とりわけ砕氷船の直後を走航する船では、その吃水が砕氷船のそれよりも著しく小さい場合であっても、水深を系統的に測定することである。これを実施すれば被誘導船が砕氷船の航跡から逸脱した場合に浅瀬に座礁することが避けられる。更に、被誘導船の船長は、水深の変化を見守り、また近似的にせよ砕氷船の吃水を知ることにより、浅瀬のため砕氷船の後進または停止がいつ必要となるか事態を見渡できる。

視界が限られている状況のもとでの砕氷船に後続する航行は基本的には2つのカテゴリー即ち、夜間誘導と霧中誘導とに分けられる。

夜間誘導は、もしこれを砕氷船の船長が可能と判断するならば、本質的に昼間誘導と相違する点と云えば、注意力の集中度が著しく高いことと慎重な行動を必要とすることぐらいなものである。夜間誘導は原則として相当に低速で且つ船間距離を大きく取って実施されるので氷海内のより良い針路を求めることができ、また、船隊内で暗い時に発生確率が著しく高くなる船同士の衝突や氷による被害を防ぐことができる。

このような夜間誘導に際しては適正に配置されたサーチライトや照明灯が航行条件を著しく緩和してくれる。まず、第一に必要な照明設備は船首の前方の氷を照明する1セットの照明灯である。これは観察の妨げとならないように通常、舷側エプロン板の外に、また時には錨鎖孔にさえ、設置され、その投光角は氷に対し30~45°の範囲に設定される。第2の照明灯は船尾下の氷の照明と後続船のための進路標識の役割を果すものであり、これは船尾レールに設置され、船首の照明灯よりも大きい角で下に向けられる。第3の照明灯は測深鉛操作台の付近に配置し、定期的な水深測定の必要時に点灯できるように常に備えておくべきである。また、サーチライトを装備している場合には船の前方の氷状観察に用いるが、これは時々使用するにとどめるべきである。サーチライトのような強力な光を常時使用すれば人間の眼を痛め、進路決定の妨げになる。

霧中またはブリザート中の航行は一般に最もやっかいな部類の航行に属するが、その際、船長には最大の緊張、注意力また警戒心が要求される。このような状況下での氷中誘導は一般に氷状が有利で且つ船隊が少數編成の場合にのみ実施される。このような場合には砕氷船の後を短かい間隔で走航する船長の技量が特に問題となる。このような走航方式は先行船が視界内にある限り最も有効である。霧中あるいはブリザート中の走航に際して船隊内の全ての船尾に備えられている強力な照明灯またはサーチライト（後尾船を除き）が若干の助けになる。これらの強力な光源からの光線はそれを積んだ船体のシルエットよりも著しく早く目に入る。船隊内の各船に相互の位置関係を明らかにするのに役立つ霧中信号を正確に復誦することの意義も決して低くない。また、既に指摘したように、砕氷船（または被誘導船）の旋回についてタイミング良く発せられる信号もまた非常に有益である。

既に述べたように、被誘導船に電波探知器が装置されていれば限られた視界条件のもとで砕氷船に後続する走航が

著しく容易になる。電波探知器を利用すれば船長は氷状ばかりでなく船隊内の他の船の位置についても観察することが可能になる。しかし、その際に考慮すべき点はこれらの船での電波探知器の作動は指揮碎氷船での電波探知器による観察に電波干渉を与えることが有るので濫用してはならないことである。

第5章 碎氷活動

第13節 碎氷船隊の編成

§49. 碎氷船による船舶の誘導、碎氷船隊の編成

周知のように、ソ連の殆んど全ての海域は冬期に凍結する。ソ連の北方領域に沿った海域では一年中に亘って氷が存在する。これらの氷は夏期にはかなりまばらになるが、それでも完全には融け去らない。このような状況と関連してソ連の碎氷船隊にはソ連の諸海域間の連絡路を一年のうちの該当時期において運航可能な状態に維持するという責任の重い課題が課せられる。

碎氷船の活動に課せられる基本的な要求は氷海においてできる限り迅速且つ無事故裡に船舶を誘導することである。碎氷船の船長は被誘導船の氷による被害を防ぐため自分が駆使できるあらゆる手段を尽す義務がある。そのためには彼等は、まず第一に、いかなる状況のもとでも自分の船を立派に操縦指揮すること、碎氷活動の特質を充分にわきまえること、また、実際の碎氷活動に当って有利な氷状をタイミング良く且つ正しく活用することができなければならない。

この面に関して、我国で既に長期間に亘る氷海航行で蓄積されてきた碎氷活動の経験を碎氷船の船長が習得して自分のものにすることは非常に意味がある。^(※) 正に課題は若い碎氷船員がすみやかにこれらの経験を会得するのを助成することにある。

碎氷船によるいかなる船舶誘導についてもその成否を決める主要な要因は氷の条件と船隊の編成（被誘導船のタイプと数）である。ここから、もし船を選ぶことができるならば、当面する誘導に際してその構造上の大きさと技術的性能について氷の条件から課せられる諸要求条件を満すことのできる船から主として船隊編成する必要があると言える。

船隊編成の全ての場合に耐氷クラスの船舶、即ち、船体構造、船体線図、また、スクリューと舵の保護の面で氷海での活動に適応性の有る船舶、に優先権が与えられるべきである。また、このようなクラスの船舶は原則として強力な機関を備えている。

氷海航行に向けられる船舶としては全く欠陥の無い信頼できる船体をもち、むしろあまり大きくない、望むらくは、8000～10000トン^(※)程度の満載排水量および開水面で12 ktを下廻らない平均速度をもつ普通の海洋船も含まれる。

碎氷船による誘導にとって最も不適当な船舶としては下記の船が挙げられる。

1. 船体の弱い船。特にそれが木材運搬船タイプのように貫通船倉をもっている場合
2. 機関の出力が小さく、開水面での平均速度が10 kt以下である船
3. 船体または機械類の損耗が著しい船または故障した船
4. 各種の小型船（タグボート、漁船、バージ、はしけ（lighter）、など）
5. 船体が大きく且つ弱い船
6. 氷海航行を予定しては設計されていない特殊用途の船

しかし、氷海航行に参加する船のタイプは極めてさまざまであり、碎氷船の船長の希望とは別な船隊編成になることもある。それに関連して、氷海誘導計画は船隊内の全ての船を合理的に配置し、それらの適正な間隔を保つことによっ

(※) 新鋭大型碎氷船 レーニン号およびモスクワ号の活動経験については本書ではまだ触れていない。

(※) 原文では8～10トンと記されているが8000～10000トンのミスプリントと思われる（訳注）。

て連合船隊が氷域内で行動力を発揮できるように立てなければならない。

各船隊の誘導に当っては最も有利な誘導期間を選定することが少なからず重要である。氷海航行に適さない船舶の誘導は氷海条件からみて最も有利な時期を当てるべきである。このような船舶は予定航路の実際の状況を詳細に調べたうえで、これらの船の誘導が最少のリスクで実施可能と判明した場合にのみ氷域に入るようすべきである。また、このような船舶の誘導作業は数隻の砕氷船にゆだねるべきである。

氷海航行への出発点にさまざまなタイプの船が集結する場合、次のようにするのが最も望ましい。即ち、氷海条件がいかに複雑であろうとも、次第に好転する見込みがある（例えば、高緯度海域で氷海運行の開始時または中緯度海域では春期の運航時にしばしばそのような状況がみられる）ならば、船隊編成は出力が大きく且つ氷海航行に適している船舶からまず構成すべきである。適性が低く、出力が小さい船舶の誘導については、それを最後に行なう。即ち、該当海域における氷の条件の好転に応じて誘導するように計画すべきである。

しかし、或る時点において有利であった氷状が後に著しく劣悪になるような場合もある。この場合には、時間の許す限り、氷状が悪化し始める以前に弱い船から遅滞なく誘導を始めるべきである。

船隊編成に際しては全誘導期間を通じて有利な氷状が予測される場合に限って弱い船を選び出して別個の編成にすることが実際上通用する方策である。

中程度の氷海条件の場合にすら、たった3隻の弱い船で編成されている船隊の誘導でも、例えば、氷海航行に適した船を2隻だけでも含む4隻編成の船隊の誘導よりも一般に著しく困難になろう。この見地から、数隻の弱い船の誘導が課題となる場合、船隊内におけるそれらの配置は氷海航行に信頼できる船2～3隻に対し多くて1隻の割合で弱い船を配するように考慮すべきである。その際、耐水クラスの船を船隊の最後尾船として1隻でも含ませることが極めて望ましい。船隊に1隻以上の弱い船を含ませれば船隊全体の進航は常に遅滞することを常に念頭におくべきである。

1隻の砕氷船による3～4隻の船の誘導が許されるような氷状の場合には船隊内に弱い船が1隻存在しても他の船の誘導にとって特にマイナスの影響にはならない。しかし、そのためには、この弱い船を砕氷船の直後に配置して、短かい間隔で後続させ、所定の速度を維持させ、船隊全体にとってやっかいな重荷にならないようにする必要がある。このような弱い船が第2船または第3船の位置に配置され、また従って、もっと苛酷な氷の条件での航行を余儀なくされる場合には不可避的に船隊進航の遅滞をもたらす。その船の機関の出力が充分にないか或いは船体が弱いことが船隊全体の進行速度を守る上で支障となる。以上のことからして、かなり複雑な状況が予期され、しかも誘導を短期間に完了しなければならない場合には砕氷船隊に弱い船を2隻以上含めないようにすべきである。最悪の場合でも2隻にとどめるべきであり、極端な場合、即ち、その後の誘導ルートに非常に有利な条件が存在する場合にのみ3隻までとすべきである。

大型船の誘導問題については若干特異な面がある。氷中誘導の観点からみたそのマイナス面は氷域での活動に充分に強力な機関をもっているにも拘わらず、船体が弱いことおよび操縦性に制約があることに帰せられる。

大型船の誘導には砕氷船の船長に注意深い態度が要求される。大型船の誘導を成功裡にまた無事故に遂行できるための主要な条件は下記の事項であると考えられる。

1. 氷海内の進路は水池を最大限に利用するようにして細心の注意を払って選定すること。また、氷への突入は迂回が明らかに不可能な場合に限って行なうこと
2. 船隊内の船間距離を最小限に保つこと
3. 氷海内で砕氷船はできる限り直線運動すること
4. 誘導速度を氷状に応じて適正に選定し、また、氷状の変化に応じて系統的に修正すること

上記の諸条件に加えて、大型船の船隊はできるだけ少數の船より編成し、且つ最も強力で大型な砕氷船を配備すべきである。

小型船—タグボート、漁船、獣獵船、水路測量船など—の氷中誘導も独得な特徴をもっている。

これらの船は機関と船体の両面で弱く、また、肝心な事には、氷海航行に必要な慣性に欠けているので、苛酷な条件の氷域においては碎氷船の直後に配置されたとしても船隊の一員としては行動できない状態になる。碎氷船の通過後の水路が良好な状態に保持されている場合ですら、このような誘導は、ましてそれが快適な速度で行なわれるならば、リスクを冒す行動である。碎氷船の船体の下から浮上し、また、スクリューからの水流によって大きさ速度で追出される重い氷片は小型で弱い船に重大な損傷を与える、碎氷船に従って航行できなくなる恐れがある。

船体が木造の獣獵船や水路測量船の誘導は、たとえそれらが一般に氷海を自力航行できるように建造されていると見做されていても、最も困難である。< M R S >型の小型漁船（第95図）もこの種の船舶に該当し、時として氷群内で翻弄される。

この種の船の誘導は平均的な複雑さを上廻らない或る一定の氷状のもとでのみ成功する可能性がある。このような船を碎氷船の後に従えて誘導することは常に避けるべきである。碎氷船の直後に船幅の大きい強力な貨物船を走航させ、その後に上記のような船を続かせる方策が最も好ましい。その場合、水路の凹凸を滑らかにし、碎氷船のスクリューからの水流によって追出される氷片から小型船を保護するという掩護船の役割を果す貨物船によって小型船の誘導が著しく簡単且つ安全になる。なお、このような掩護船が数隻存在すれば更に望ましい。

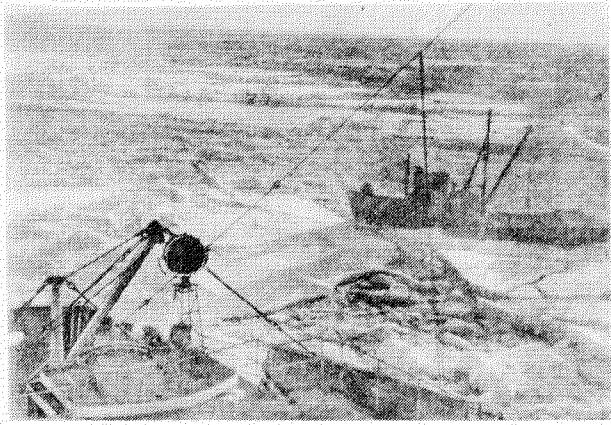
小型船が碎氷船の直後に従わざるを得ない場合には、碎氷船の船長はこのような誘導を低速でのみ実施しなければならない。その場合、進路上の重い氷の氷堤を低速では突破できない場合があり得る。その場合には、碎氷船は船隊の誘導を中止して氷堤を突破してから後方に戻り、誘導を上述のように低速で再開すべきである。あまり長くない氷堤に遭遇した場合にはそれを突破して碎氷船が後進しつつ小型船を1隻づつ通過させる方策をとることができる。これについては既に述べた通りである。

水域内で小型船の曳航が必要になる場合にはこれに適した唯一の方法、即ち、密着曳航法を実施すべきである。しかし、このような曳航法が採用できるのは中程度以下の困難さの氷海条件の場合に限られる。それよりも苛酷な氷状の場合には曳航の困難さと重大事故発生の危険性が急激に増大する。即ち、浮上する氷片による船体破損の恐れが急激に大きくなるが、更に、碎氷船が急旋回したとき被曳航船の船尾が氷と衝突する危険性が益々大きくなる。このような衝突は、それが最も弱い衝突であっても、非常に重大な結果（スクリューまたは舵の喪失、船尾または船体中腹部に穴があくことなど）をもたらす可能性がある。

小型船を密着曳航するとき碎氷船の曳航索は被誘導船の船体に張りめぐらされたスパンに結び付けて固定するべきである。その他の固定法ではそこに生じる応力に一般に耐え切れない。更に、曳航索の頻繁な破断は被曳航船の船首部の強度に極めて有害な影響を与える。上記のスパンに曳航索を固定した場合には引張り応力は船体全体に比較的均等に分布し、船体に全体的な圧縮が現われるが、これは船にとって有害性が遙かに低い。

小型自走船の曳航はエピソード的なものにすぎないと考えられる。即ち、氷域ルートのうちの困難さが大きい区間を通過する場合に限って実施される。その他の場合にはこれらの船は自力で走航すべきであり、船隊内のいずれかの信頼できる船の後に続き、必要な場合にはその船に曳航を依頼するやり方が最良の策である。このような曳航は、特にこのような援助船が氷海航行能力をもっているならば、碎氷船による曳航よりも比較にならないほどリスクが少ない。

以上で述べた全てのことから、さまざまな船級またタイプの船舶を水中誘導するには碎氷船長はこれら被誘導船の特質に関する知識を広く且つ深く得る必要があると言える。従って、誘導のための船隊の編成または船隊の引受けに当って、碎氷船長は各船について熟知する義務がある。それには各船長と直接面談する方法が最適である。そのような場合



第95図 小型漁船の誘導光景の1つ（碎氷船が船隊の先頭に立っている）

に砕氷船長は被誘導船について最も完全な情報を得るばかりでなく、それと同時にそれらの船長に全ての基本的な誘導問題について指示を与えることも可能になる。なお、砕氷船長が被誘導船の船長全員と同時に会談する時間と機会をもてれば最良である。そうなれば砕氷船長は全ての被誘導船長との必要な氷域内の連絡方式また相互理解方式を設定することができる。このことは長期間に亘る氷中誘導に際して少なからず重要な役割を果すもので、複雑な海上運航を成功裡に遂行する条件の1つである。

また、船長同士の直接的な接触が不可能な場合には砕氷船長は必要な情報を無線連絡によって得ることができるが、その範囲は上述の場合に較べると狭く制約されることは事実である。このような情報は各船についてそれぞれ下記のような基本的事項を含むものでなければならない。

- (1) 船長、船幅および最大吃水量
- (2) 機関の台数、型式および出力、並びに開水面での速度
- (3) 排水設備の有無と性能
- (4) 非常用・救急用器材の装備状態
- (5) 舵制御システムおよびその重複（バックアップ）系の有無
- (6) 氷中誘導規則および関連信号に関する船長の習熟度
- (7) 氷海航行を許可するかまたは少なくとも禁止しない公文書の携帯の有無
- (8) 貨物の積載度と貨物の性質
- (9) 曳船設備の有無
- (10) 全ての種類の通信手段の有無並びに夜間誘導用の投光器および照明灯の有無
- (11) 航行用計測器類、海図、参考資料類の装備状態
- (12) 氷域における自力走航および砕氷船の誘導による走航に関する船長の習熟度
- (13) 燃料、真水および食糧の積込み状態
- (14) 船の構造上の特質：耐氷補強、二重船底、横隔壁および縦隔壁の有無；スクリューと舵の防水システム、その構造と材質；予備のプロペラ羽根の有無およびその取替えに必要な全ての補助器材の有無
- (15) 氷海中の活動の信頼性の見地からみた船体および推進機関の全般的な技術的状態

以上のように沢山のチェックポイントが有るが、船の大きさ、構造上の特質および技術的状態に関するデータを記憶（または記録）することこそ肝要である。いずれにせよ、第8項～第13項については砕氷船長にとって自分が誘導を引受ける船に全ての必要なものが確保されているかどうか知る必要があるだけである。勿論、否定的な答えの場合には砕氷船長は自分の意のままになるあらゆる措置を施してその船が全ての必要条件を満せるように援助するべきである。

船の構造上の特質に関する問題について砕氷船長の関心事は、主として、それが船隊内の各船の適正配置にどの程度役立つか、また、誘導時に特に注意を要する船との関係においてどの程度の意味を持っているかの点にある。

全ての船について全般的に知ることはそれぞれの船の可能性について概念が得られ、船隊の氷中誘導の成功を助成する。

砕氷船長は被誘導船長に予定のコースと誘導の特徴、砕氷船に後続して航行する際の規則、連絡方式など誘導に必要な全ての事項を説明しなければならない。被誘導船の船長達に情報が同時に伝達されれば、船隊内の各船の配置順位はその場で決まるか、或いは単に各船長に通達されるにとどまるかする。もしこのような全体会議を開催できない場合には砕氷船長は各被誘導船長にその船の船隊内の位置について、必ずはじめ、即ち、船隊が行動を開始する以前に、無線通信で通告しなければならない。

氷海中の安全航行のための規律の意義を船長達に解説することは極めて重要である。いかなる編成の船隊も（それが軍艦であれ、商船であれ）統一的な原則（全ての船にとって唯一つの規律）無しには考えられない。砕氷船隊は大抵の場合極めてさまざまなタイプの船の連合体であり、従って、单一の指揮命令系統と最も厳格な規律が特に要求される。

各船長は船隊全体の迅速且つ無事故の誘導の成否が各船の動きにかかっていることをはっきりと銘記しなければならない。

§50. 氷域誘導のための船隊編成の基本原則

船隊構成の基本原則に関して言うならば、課題は定航砕氷船がさまざまな天候、海洋および氷の条件のもとで、どのような順序で、何隻の、どのような船舶を、どのような間隔で誘導することができるかという問題を解明することに帰せられる。

若干過去においては船舶配置順序は船幅だけによって決められていた。即ち、船隊内で最も大きい船幅をもつ船が砕氷船の直後に配置され、最も狭い船幅の船は船隊の最終位置におかれていた。これは砕氷船による誘導が主として湾港内で、即ち、流水ではなく静止した氷域、を非常に僅かな距離だけ実施されていた時代のことである。このような場合に砕氷船隊は、一般に2隻、稀れには3隻のあまり大型でない船から構成されていた。このような条件のもとでのこのような配船は実際面からみて妥当なものであったと思われる。

また、理論的には、もし氷が砕氷船の後に浮上せず、水路いっぱいに充満もしないならば、このような船舶配置（いかなる隻数の場合でも）は改善の必要が無かったであろう。しかし、実際には決してそうではなく、移動しない密接氷域を行動する際にすら、そこでは砕氷船の後に浮上する氷片が相当細かく破碎され、碎け氷とも呼び得る状態になっており、しかも、それが次第に砕氷船の航跡を覆って行き、遂には水路を普通の船にとって通過不能にしてしまうことがある。流水域では、また特にその漂流方向が船隊の針路に対し直角に近い角度をもっている場合には、誘導条件は一層やっかいなものになる。そのような場合に、水路は時として砕氷船の船尾の後から文字通り閉塞され始め、船尾から、100mも離れた場所ではもはや砕氷船が通過した跡が残らなくなってしまう。

近代的な誘導方式では小船隊例えは、2隻編成の船隊（第96図）は苛酷な氷海条件の場合にのみ編成される。一般には、長期の海洋誘導を予定する砕氷船隊は3～4隻編成であり、従って、船隊全体の長さは相当に延びている。船隊編成での船の行動は砕氷船からの距離が遠くなるほど困難になることは全く明らかである（第97図）。また、もし船隊の第1船が水路に入るときそれが殆んど開水面の状態であるとしても、第2船が入る時にはそれが板氷から成る分離氷域的な状態になっており、即ち、水路条件が悪化しているが、まだ比較的有利な状態にある。第3船、まして第4船は更に一層困難な条件のもとにおかれ、時には水路が全く見えないこともある。従って、後の船ほど水の抵抗を克服するのに大きな出力を出す必要がある。更には、後の船ほど水中航行に要求される船体の適性も大きくなる。

以上のように、砕氷船隊の編成はかなり複雑な課題であり、各被誘導船の特質を総合的に判断して、また時には、純粹に主観的な要因である船長の経験や個人的資質をも考慮して、解決されるべき課題である。

幾隻の船が氷海航行の適性をもっているか、それらの船体の大きさ、主機出力、載荷率、全般的な技術的状態、特に船体の状態、はどうか。このようなさまざまな面に亘る特性に基づいて船隊内におけるそれぞれの船の位置が決定される。

1隻の砕氷船が存在するとき、小出力の船、船体の弱い船、またバラスト状態の船などは砕氷船の直後にまず第1に配置されるべき船である。それよりも出力が大きい船、強度のある船、まして氷海航行能力をもつ船は氷域におけるそれらの自力走航能力を或る程度まで考慮して、一般に船隊の後尾に配置される。

更に、1隻の砕氷船で大船隊（例えば、タイプの異なる4～5隻の船）を実際に誘導する際には、上記の一般原則から逸脱する場合もあり得る。ここで、5隻の被誘導船のうち3隻が小出力船であるとする。平均的な氷海条件のもとでの船隊内の各船の配列順位は次のようになる。即ち、砕氷船の後に2隻の最も弱い船が続き、第3番目に強力な船のうちの1隻が入り、その後に3隻の弱い船のうちで最も強い船が第4船として入り、最後の第5船の位置を船体が最も強く、水中行動への適応性が最も大きい船が占める。このような<交互に>配船する方法が実際に採用され、大抵の場合にそれは妥当であることが判明している。

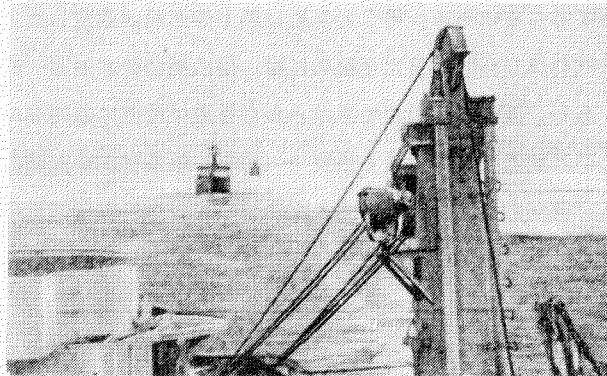
以上のように、船隊内の船舶は最も強力な船を最も良く利用することを自論で配置されなければならない。特に肝要な点は船隊の最後の船は最も強力で且つ氷海航行の適応性が最も大きい船にすることである。また、それに劣らず重要な点は、この後尾船が氷海航行のベテラン船長によって操縦指揮されることである。そうなれば、この船は船隊の最終位置で自力走航できる状態になるばかりでなく、必要な場合には先行船を援助することもでき、そのため誘導船（砕氷船）の仕事が著しく軽減され、船隊全体の走航が加速される。

このような一般原則に基づいて、通常、いわゆる「複雑な」船隊の構成も行なわれている。このような船隊は2隻またはそれ以上の砕氷船（砕氷船数の増加に従い誘導船数も増加する）によって行なわれる。第2または第3の砕氷船は船隊の中央に配置され（第98図、状態A）、氷群中にはまり込んだ船の周囲の砕氷活動、また遅れた船の引寄せ活動に当たる。このような場合、誘導砕氷船の役割は進路の選定と水路の開通だけに帰せられる。

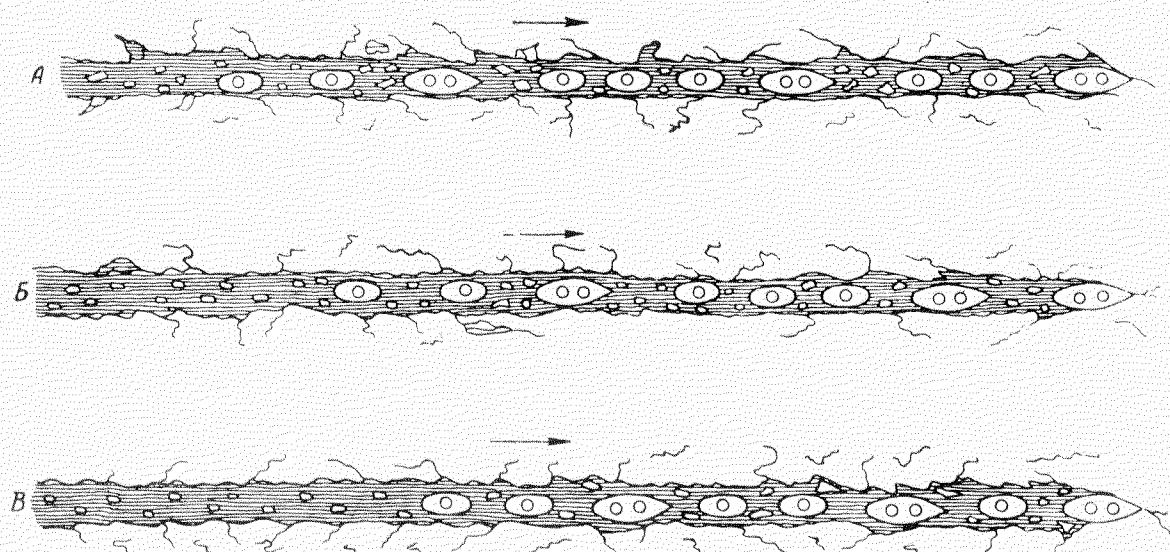
次に、第2の砕氷船が船隊の中央部分ではなく誘導砕氷船の直後に配置される複雑な船隊編成案（第98図、状態B）について検討してみる。これは複雑な船隊を2隻の砕氷船で誘導する場合にしばしば採用される編成方法である。このような誘導体制が採用される場合は誘導砕



第96図 適正に編成され適切な間隔を維持している2隻編成の船隊



第97図 極端に長く延びた砕氷船隊



第98図 複雑な編成の船隊

氷船による進路選定に僅かな誤りがあっても氷域からの脱出が非常に困難になるほどの苛酷な状態に大船隊が陥り込むような特にやっかいな氷海条件の場合である。このような事態にならないようするため、先頭の強力な砕氷船は直接的な船隊誘導にかかわらずに、船隊のための通路の選定とその開通に専念すべきである。この先頭の砕氷船は時々船隊から離れて先航して、新しい進路の選定または既設定進路の通過準備を行なうことが可能である。このような活動は、もし被誘導船隊を自船の直後に従えているならば、実施できないだろう。

船隊の先頭に2隻の砕氷船が配置される場合、第2位

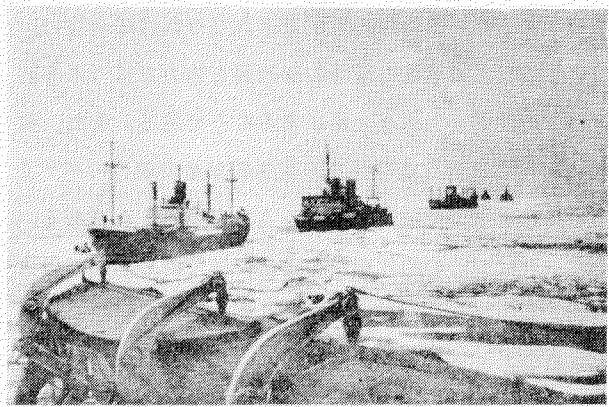
の砕氷船の任務は第1位の砕氷船の後に従って船隊を誘導することにある。第2砕氷船は第1砕氷船が選定した方向を守り、直接誘導するための水路の拡張や直線化を実施しなければならず、また全般的には、他の補助砕氷船と一緒にになって船隊の通航にサービスしなければならない。

もし、第1砕氷船が船隊からかなり遠い位置に長時間に亘って離れざるを得ないような場合、例えば、進路選定のためいわゆる＜船体による偵察＞、即ち、船長自らが誘導ルートの氷状－氷域を突破できるかどうかをはじめ調査する必要がある場合^(*)には第2砕氷船の船長が船隊指揮責任者として留守を守ることになる。第1砕氷船長からの指令に応じて第2砕氷船長は指定された方向に船隊の誘導を続けるか、或いは第1砕氷船の帰還または第1砕氷船からの後続指令を待って船隊と一緒に漂流する。

第98図には更にもう1つの複雑な船隊編成として3隻の定航砕氷船が含まれる場合（状態C）が示されている。この場合、第1砕氷船の後にはあまり大型ではないが氷海航行の適性の有る船が配置される。このようにすれば、船隊全体の長さを短縮でき、また、他の2隻の砕氷船がサービスすべき船数を減少できる。

水中誘導において最も弱い船は砕氷船の直後に位置すべきであることが原則的に正しいと認めるにせよ、この原則を船体が特に弱い船、また、まして故障した船に適用すれば場合によってはマイナスの結果をもたらすことがある。周知のように、重い氷群内を航行する場合砕氷船は、一般に、針路から著しくずれるので、その航跡は非常に曲折したものになる。氷海での操縦性能に制約がある非砕氷船にとって砕氷船のような急激な旋回を成功裡に実施することは不可能である。まして、船体の弱い船や故障を起した船はこのような条件のもとでは重大な損傷を避けることが非常に困難となる。更に、重い氷域を航行する際には砕氷船の船尾からスクリューによる水流によって強い力で放出される重い氷片が重大事故の原因となる可能性がある。船隊が高速で疎氷域を通過するような場合には特に損傷を蒙るリスクが大きくなる。この場合、砕氷船のスクリューからの強力な水流によって大きな速度で後続船に向って追い出される重い氷片は後続船にとって極めて現実的な危険な存在であり、それとの衝突を避けることは非常に困難である。それ故に、このような航行条件のもとでは弱い船や損傷を受けた船を第2位に置く方が適している。砕氷船が開通した水路の凹凸を若干でも平滑にでき、また重い氷片に自からも打撃を加え得るような強力で船幅が広く且つ船体の強い船が上記のような船の前に配置されるならば最良の策である。

重い氷域において大多数の砕氷船に特有な左右への偏走の故にも旋回性能の低い船を直後に従えることが許されない。また、逆転運転への切替を緩慢にしかできない機関を持つ船を砕氷船の直後に従えることも許されない。このような船は一般に急激な旋回または逆転運転が要求されない船隊中央部に配置するか、或いは操縦性能に制約があつても衝突事



第99図 複雑な砕氷船隊の全景

(*) このような砕氷船の＜船体による偵察＞は機関出力が小さく船体の強度が充分でない船が船隊内に存在する場合は非常に有効な方策である。

故を招かない船隊後尾に配置すべきである。

以上で述べたことは船隊内の各船舶の配置順序を決定する際の基準となる全ての原則を必ずしも網羅していない。そして、この問題が船隊の行動開始前に理論的に、即ち、各船の技術的および戦術的因素に関する知識に基づいて、いかに正しく解決されたかのように見えて、実際の誘導過程において船の配置変更は殆んど避けられない。砕氷船長が各船の性質および各船長の活動ぶりに実際に接し、また、それに準拠して船隊を再編成した後にのみ、その船隊の航行は成功裡に進む。

更に、船隊内の船の適正配置に対する少なからず重要なもう1つの条件について触れてみる。船隊内で最も責任の重い任務を負う船は砕氷船の直後の船または船隊後尾の船である。従って、誘導の効率を大きくするためには、選択の可能性があるならば、これらの位置に配する船は戦術的・技術的数据が相等しいかまたは殆んど等しい場合には経験度のより高い船長に操縦指揮される船とすべきである。

また、特に指摘したい点は船幅に差があるが他の船体要目（寸法、性能）がほぼ相等しい複数の船舶が船隊に含まれている場合には船幅の大きい順にこれらを配列することである。

以上で述べた全てのこととは主として中程度の大きさの船舶に該当する事柄である。排水量が大きく、誘導砕氷船にあまり劣らない船幅をもつ大型船を誘導する場合には砕氷船長はそのことに留意しなければならない。このような船舶はなるべく砕氷船に近い位置に配置し、その際、それよりも船幅が狭く且つ弱い船と交互に配置するようにする。

以上で船隊内の配列問題について述べてきたが、それに併せて1船隊に可能な船隻数の問題にも触ってきた。以下では、この問題を実際に遭遇する氷海条件との関係においてもっと定量的に解いてみる。

船隊内の可能船数は砕氷船の出力と隻数、被誘導船の氷海航行への適応性、誘導前途の氷状といった諸データに基づいて決定される。氷状とは、この場合、水域の密接度、氷の性質、誘導時期・海域に固有なその他の諸特性を指す。更に、実際面で最も頻繁に遭遇する<平均的な>条件、並びに1隻の定航砕氷船に誘導される船隊において何らかの<平均的な>耐氷性能を有する船の<正常な>隻数を検討して求める。このようにすれば、問題の検討が著しく簡単になり、唯1つの要因、即ち氷状、のみとの関係で問題を検討できるようになる。

実際経験から明らかのように、平均的な氷海条件のもとで密接度5～6級のとき1隻の砕氷船に対して氷海航行に適した正常な被誘導船数は3～4隻であると見做すことができる。

ここで、正常な船数という概念を更に掘り下げる検討してみる。

周知のように、砕氷船に誘導される船の航行の成否はその船が砕氷船の通過後に残された航跡－水路－をどれだけ利用できるかにかかっている。この水路は砕氷船が遠ざかるにつれて氷塊によって閉塞されるが、その場合、氷塊が重いほど、また、その漂流が強いほど、水路の閉塞は早めになる。それ故に船隊の長さはそれぞれ具体的なケースにおいて水路が砕氷船通過後どれだけの時間また距離に亘って保存されるかに常に直接左右されることになる。

以上のように、正常な船隊構成の問題をとりあげ、それが平均的な氷海条件のとき3～4隻であると決めた場合、これは次のことを意味する。即ち、船隊を構成する全ての船がそれぞれしかるべき間隔を保って砕氷船の航跡を利用できる（船によって、その利用の程度に差が出るにせよ）に足る長さ（時間的、空間的）の航跡が砕氷船の後方に残存していることを意味する。換言すれば、船隊の全長は砕氷船の後に残る水路の長さに対応する。

氷状が悪化した場合には氷塊による水路の閉塞が早くなるので船隊の全長を短かくする必要がある。それは初めは船間距離を短縮することによって行なわれるが、それができない場合には被誘導船の数を削減しなければならない。このような状況下での被誘導船数の削減は重い氷群中においてこれらの船が操縦困難になることによっても要求される。例えば、船隊が密接度5～6級の板氷域を砕氷船に誘導されて航行しているとする。その場合、最後尾の船が走航する水路は板氷および砕氷船によって破碎された氷片によって50～60%蔽われており、この船は困難を伴ないながらも進航可能である。しかし、上記と同じ密接度の氷域であっても、それがもっと重い氷から構成されている場合には、もはや状況は全く異なってくる。即ち、上記と同様に水路の閉塞率が50～60%であったとしても、それが重い小氷盤片による閉

塞であれば、もはや船の進航は船体破損のリスク無しには考えられなくなる。また、そのため誘導の質も悪化し、砕氷船が所定の針路を保持することの困難さが増大する。このような状況下では砕氷船にとってもこのような重い氷塊を迂回する必要があり、そのため予定進路からしばしば大幅にずれる場合が生じる。船隊内の全船舶、特に最後尾船、にとってこのような条件のもとで砕氷船に従って走航することは、まして砕氷船の航跡が著しく短かくなっている状況下では、非常に苛酷な課題となる。

以上のことから、水域の密接度の増大ばかりでなく氷の厚さの増大によっても被誘導船数の削減が必要になると言える。

水域の密接度の変化が船隊構成にいかなる影響を及ぼすかについては下記の実際の状況が説明してくれる。即ち、水域の密接度が約7級の場合、4隻編成の船隊はそれらが耐氷クラスの船であっても1隻の砕氷船では規模が大きすぎる。従って、このような条件の場合には被誘導船数が2～3隻を超えないようにすべきである。また、水域の密接度が8級またはそれ以上の場合には定航砕氷船が誘導可能な船数は1隻、また稀れには2隻までである。

ここで特に指摘したい点は流水で覆われている海域では殆んど止むことなく氷の圧縮が起きている時期が有り、その場合に氷の性質にかかわりなく2隻以上の船を同時に誘導することは不可能であるとの点である。被誘導船の数が多い場合には常に氷による圧迫を受けて立遅れる後尾船は船隊全体の進航に非常に妨げになり、むしろ船隊誘導を部分的に分けて実施した方が遙かに適切であることになる。

氷がその厚さと強度の面では船隊誘導にとって重大な支障にはならないが、氷の漂流が強く且つ断え間なく続くため船の通過が非常に困難になる場合がしばしば見られる。比較的弱い氷の場合でも断えず圧縮があれば、砕氷船の航跡をその船尾の殆んど直後から覆い隠してしまう（第100図）。このような条件の場合の被誘導船数は原則として2隻または場合によっては1隻にとどめるべきである。

船隊が2隻またはそれ以上の砕氷船に誘導されて航行する場合にはこれらの砕氷船には下記のような特別な戦術的活動方式が適用される。

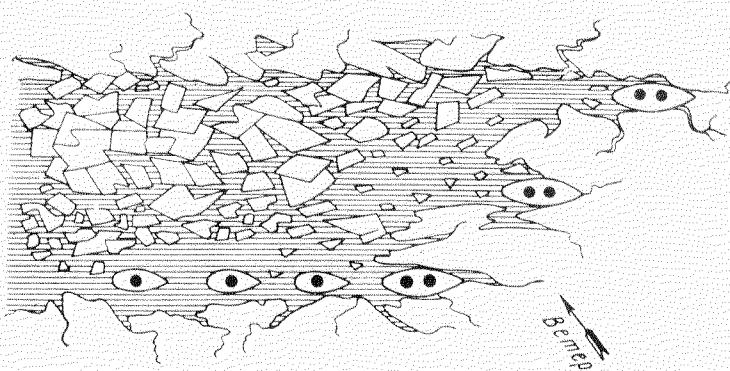
氷の圧縮がある場合には砕氷船に＜分担砕氷＞行動をとらせる。即ち、この場合、複数の砕氷船が互に平行して、＜前線＞体形または＜階段＞体形を組んで水域を進航する。その際の船間距離は氷状、とりわけ氷の性質、漂流方向および漂流速度に応じて設定される。風が吹いている場合には流水は風下の砕氷船が開通した水路の方に移動し密集する。そこで、風上側に形成された弱点（通過し易い水路）を被誘導船が利用できるが、その際これらの船は風上の誘導砕氷船の後にできる限り短かい間隔で従って走航しなければならない。この＜分担砕氷＞行動には第101図に示すように3隻の砕氷船が参加すれば最も大きい効果が認められる。

氷の圧縮が更にもっと強い場合には船隊を分けて砕氷船1隻に対し被誘導船1～2隻以内の割合で誘導する。たった1隻の船でも砕氷船が密着曳航した場合にのみ誘導可能になるケースがしばしば見られる。

高緯度海域において重い氷群に圧縮が起きて



第100図 砕氷船が開通した水路内の圧縮氷



第101図 砕氷船の＜分担砕氷＞行動の図式

いる場合には船舶の誘導は実際上不可能である。船隊にとって残された方策は氷中停泊のための安全な場所を探し出し、氷の圧縮が止むまでそこで待機する以外にない。

砕氷船に引率された船隊が霧中また夜間航行する場合の船数は正常な視界条件で昼間に普通に航行する場合よりも少なくすべきことは当然である。このような場合には氷状にかかわりなく誘導船数として2隻以内がとられる。視界が失なわれて操船が困難になれば、第2船が自船の進路の大部分についてそれを探し出したり、砕氷船の航路を利用したりするのに困難を伴なう。このような条件のもとで船隊に第3船が存在するならば、その船は砕氷船からのいかなる援助をも受け得ない状態に陥り込んでしまう。

水中誘導の成功は船隊内の各船の適正な配置ばかりでなく適正な船間距離の選定とその遵守によっても保障される。

さまざまな誘導条件における砕氷船隊の各船間の適正な間隔に関する問題については既に第3章第7節§28で詳しく述べた通りである。従って、ここでは下記の範囲の適正間隔を示すにとどめる。

- (1) 1.5～25 kbt : 密接度4～5級までの水域を誘導する場合。上限の値は排水量の大きい船（10000～12000トン）に適用される。
- (2) 1.0～1.5 kbt : 密接度5～6級の水域を誘導する場合
- (3) ～1 kbt : 密接度7～8級の水域を誘導する場合
- (4) ～0.5 kbt : 密接度8級以上の水域を誘導する場合

最後の場合のような0.5 kbtでもまだ最短間隔でない。若干の場合には例えば冬期のオホーツク海の水域でみられるように間隔を40～50mまで短縮することがある。この海域では氷の圧縮が強く且つ頻繁に起きるので誘導が非常に困難になり、場合によっては正規の間隔を守っていれば誘導が全く不可能にすらなる。このような場合には＜極超短＞間隔で、即ち、砕氷船の船尾に密着させて、スクリューからの無氷水流に乗せて船を誘導する場合にのみ成功を期すことができる。実際にはすでにその際に船同士の衝突の危険性が生じるが、各船長が適正で秩序立った活動をするならば、事故の発生をみるとなく誘導を進めることができる。

広範囲に亘る氷海誘導経験の分析から次の結論が許される。即ち、船隊内の適正な船間間隔という水中誘導の成功にとって最も重要な条件を守ることに正当な意義を認めている砕氷船員は決して全員ではないことである。もし誘導砕氷船長が砕氷船と船隊の先頭船との当然の間隔を守るように忍耐強く配慮するならば、船隊全体も、原則として、正常な間隔を保持して進航するようになる。その逆の場合には、即ち、砕氷船長がこの初步的であるが最も重要な水中誘導原則を無視したり、また、自船の後に続く船から遠く離れてどこかへ行ってしまったりするだけで船隊内の所定の船間距離がばらばらになり、船隊は無秩序な単なる船の集団に転化してしまう。

また、実際面では、砕氷船の直後に従う1～2隻の船が所定の間隔を充分に守っているが船隊全体の誘導の進み具合は明らかに不満足である場合がみられる。このような事態は船隊構成を充分に考えて決定しなかった場合に発生しており、砕氷船の後に配置される船が他の船よりも速度が大きくまた耐水性能が優れている場合がある。このような条件のもとでは前置船は所定の間隔を容易に保持できる反面、砕氷船と一緒にになって残りの船を置きざりにして先航してしまうことになる。他方、後置船は、もしそれらの機関出力が前置船よりも弱い場合に、またはそれに等しい場合であっても、その位置からしてより苛酷な条件の氷海を走航することになるので、立ち遅れてしまう。船隊の最終位置に最も強力で最も氷海航行の適応性が大きい船を配置する理由は正にそこにある。なお、船隊内の船舶が全て同じタイプのものである場合には氷海航行経験の最も豊富な船長に操縦指揮される船を船隊の最後尾に配置する。しかし、このような後尾船と言えども先行船よりも劣悪な氷海条件に常におかれるので若干の立ち遅れは避けられない。船隊全体が長く延びないようにするために砕氷船長は後尾船の立ち遅れをできる限り無くすために誘導砕氷船の速度を誘導過程で調整する必要がある。

しかし、そこでまた指摘したい点は、上述の措置にも拘わらず、各船の配置が適正であっても、断えず変化していく氷海条件のもとで誘導が行なわれるので後続船の立ち遅れは時々避けられないことである。ここで、船隊が全ての船に

とって達成可能な速度で走航し、そのため後尾船も所定の間隔を保って続いていると仮定する。そこで、船隊がもっと大きい密接度の水域または構造と強度の面でもっと苛酷な水域に突入したときに、先頭船群と後尾船群との速度関係が不可避的に変わることになる。いま先頭船群の速度が1～2 kt低下するならば、後尾船群のそれはもはや2～3 ktまたそれよりも大幅に低下することになる。最良の場合、即ち、後尾船群の速度に若干の余裕が残されており、また、氷の性質から船体の安全が特におひやかされることなく速度を増すことが可能な場合、には後尾船は短時間遅れた後に船隊に追付き従来通りの間隔に戻ることができる。実際面で最もしばしば見かけるように、これらの船に速度の余裕が無いか或いは速度を上げると船体損傷の危険性が極度に大きくなる場合には、先頭集団から益々取残されて行くことになる。

碎氷船とその後に続く先行船群（後行船群よりも有利な氷海条件で走航できる）が当初の進航速度を保持しようとして增速する場合には上記のような後尾船群の立ち遅れは更に一層ひどくなる。このような場合に、後尾船群が速度の余裕を持っているとしても、必ずしも常に所定の間隔を保つことはできない。また、速度に余裕が無ければ更に一層立ち遅れることになる。

氷状の変化によって後尾船群が立ち遅れている場合、誘導碎氷船の船長はこの遅れをできる限り小さくするために、また、氷状が好転したとき遅れた船が船隊に追付いて所定の位置に戻れるように、自船の速度を調整する義務がある。

碎氷船と先行船群の走航速度が氷状の悪化によって低下する場合に碎氷船長が速度増加を実施できる場合は後行船群もその増加速度で氷域を走航できると確信した場合に限られる。碎氷船長にその確信が無ければ、スピードアップを行なうべきでなく、後尾船群が立ち遅れを取り戻すまでむしろ直後に続く先行船群に若干の減速を提案してよい。このようにして立ち遅れを取り戻した後にはじめて徐々に速度を上げて所望の値に到達させることができるが、その際にも後尾船の動きを断えず見守りながら増速しなければならない。

氷状が著しく悪化した際には後尾船群が全く取残されてしまうことの無いように碎氷船は既に低下している速度を更に低減させる必要がある。このような場合に立遅れた船を引寄せるとは時として意味が無く、むしろ氷状が好転するまで船隊を小グループに分けて誘導した方がよい。

氷状が好転する際に碎氷船が推進機関の回転数を従前と同じにしたままでは進航速度が増大して行くことになる。また、実際にこのような状況が起き得る。このような場合には碎氷船長は後尾船群の動きを注意深く監視して、それらが船隊から遅れることなく、むしろ前方の船群を追い立て始めさえしているとの確信を得た場合にのみ自船の增速を許可するようしなければならない。しかし、このような条件においても碎氷船の進航速度は氷による被害を蒙る危険を特に伴なわずに全ての船舶に受け入れられる限界速度を超えてはならない。

後尾船群の活動は困難なものであり、それらの船長に非常に大きな緊張を必要とする。従って、船隊に等価な船が存在するならば、時々それらと位置を交替すべきである。

次に、船隊の船間距離を短かくして航行する問題について検討してみる。若い碎氷船長の大部分は船間距離を短かく保って船隊を誘導することに懸念を抱いている。心理的にはこれは全く理解できるが、その反面、船同士の衝突を心配する根拠はあまり無い。ポイントは次の点にある。即ち、碎氷船による船舶誘導に関する多年の実際経験では氷海内で船同士が衝突して重大な結果を招いたケースは1つも起きていないし、また、このこと自体が背後から続いて来る船による追突を極端に心配すべきでないことを最も良く立証している。船と船との間の水路面に詰っている破碎氷片群は船の運動の慣性を著しく消滅させており、追突が起きても、その力は僅かなものになる。大抵の場合、追突が起きる原因是船長が周囲の状況を観察する際の注意力の不足にあると説明される。碎氷船に後続する船が碎氷船に衝突する確率は最も高い。普通の航行条件の場合（碎氷船の船尾から被誘導船隊の第1船までの距離を最短に保って航行する場合）、両船の間の水帶には極く少数の破碎氷片が存在するにすぎないので、追突を緩和することができない。

船隊内の他の船については状況が異なってくる。平均的な密接度の水域を誘導する場合のうち圧倒的大多数の場合において船と船との間の破碎氷片の数量は碎氷船から後方になるにつれて増大する。大抵の場合にこの氷の量は先行船が

突然減速または停止した際に起り得る追突を緩和するのに全く充分な量となる。先行船が突然停止（また、それに伴ない船隊全体も停止）した際ですらも砕氷船の直後の第2船から始まって次々に追突が起きる確率は低い。

以上で述べてきたことから、砕氷船の突発的な減速または停止の可能性を予見して砕氷船長は自船の直後に従う船の追突を避けることに主として配慮すべきであり、他の船については、それらの安全性は特に懸念すべき危険におひやかされないと言える。

若い砕氷船長が抱く短間隔誘導の心配が全て成り立たないものであることを示すため、このような航行の安全性は誘導砕氷船の側からのいかなる措置によって確保されるかについて検討してみる。その際、船隊内の船同士の危険な接近が2つの原因、即ち、氷状の悪化による砕氷船の速度低下か或いは被誘導船の過大な速度によってのみ起きるという命題から出発することにする。

砕氷船は後続船との危険な接近をする場合に対処して若干の速度の余裕を常に持っていなければならない。実際にも水中誘導に際して砕氷船はこの余裕を持っている。

砕氷船では前方の氷状を最も注意深く観察しなければならず、氷状の悪化をタイミング良く確認して適切な措置を施すことによって自船と被誘導船との間隔が短縮して危険な状態にならないようにしなければならない。このような措置としては、一般に、砕氷船自体を增速するか、或いはその逆に、砕氷船から信号を発して被誘導船を減速させるかの方策が採られる。

氷状の注意深い観察には氷の特性に関する知識および砕氷船にとっての水域の突破可能度の内眼判定能力と組合されなければならない。これに関連して短間隔誘導に際して砕氷船の船橋に船長または上級航海士が常駐することが要求される。

衝突を予防できる上記に劣らず重要な条件は船隊の動き、とりわけ第1船との距離の変化、を最大限に綿密に監視することである。その場合、砕氷船の後に接近して走航する被誘導船からは砕氷船の船尾が自船の船首に隠れて見えない場合があることを考慮すべきである。砕氷船の船尾が見えず、ただ、その上部構造物によって方向を見定めている状況のもとでは接近による危険について判断することはしばしば困難である。他方、砕氷船の船橋からはどんな場合でも船の接近をいち早く確認できる。これら全てのことから、砕氷船長は常に自分の観察結果にのみ頼るべきであり、いかなる場合でも後続船の船長が自分よりも早く接近を発見し彼等自身でしかるべき措置を講じることに決して頼ってはならないと言える。

以上のように、短間隔で船舶を誘導している過程でそれが更に著しく短縮したことを発見した場合、砕氷船長は被誘導船から何らかの動作があるまで待っていてはならない。むしろ自から自船の速度を増加させたり、或いは後続船に信号を発して減速を要求したりすべきである。両船の速度をえてもなお衝突が避けられない状況がある場合には砕氷船長に更にもう1つの手段が残されている。それは、砕氷船の船尾を衝突からそらし、背後から迫って来る船に脇へ向きを変えさせて氷中に突入させることである。これによって真正面からの追突が避けられ、また衝突したとしても滑り衝突に終らせることができる。

しかし、上述のような操船は時にはかなり大きいリスクを冒すことになるので、その実施に際して砕氷船長には置かれた状況下で迅速且つ適正に進航方向を決定する技量が要求される。砕氷船長が背後から迫って来る船の船首がいずれの側に向いているかを即座に判断できるならば上述の操船方法は効果を発揮し、両方の船を重大事故から防ぐことができる。砕氷船が船尾を脇にそらしたとき船体の最も傷つき易い部分に打撃を受ける場合には事態は逆に非常に悪化する。

このような状態について以下で事例を挙げて検討してみる（第102図）。まず、船同士が急に接近し始めた時点において被誘導船の船首が砕氷船の船尾に向って左側に向いているとする（同図、状態Ⅰ）。左側でのみ衝突すると予期して、背後に迫った船がその後にどのような動作するかを考慮せずに、砕氷船はその船尾を右側に向ける（状態Ⅱ）。しかし、被誘導船の船長は、実際面において最もしばしば見受けられるように、その時に全速後進をかけ、その結果として船首が激しくやはり右側に向きを変え始める（状態Ⅲ）。その場合、まだ慣性を失っていない船は相当な速さで前

進を続けることになる。その結果、被誘導船の船首は碎氷船の最後端部ではなく船尾部のうちで最も傷つき易い場所に向いてしまう（状態III）。その場合に追突が起こればその衝撃は滑り衝撃ではなく、もっと危険な角度で衝撃を受けることになる。碎氷船が船尾を脇に向けなければ、このような事態は起きなかつたことは明らかである。

衝突の恐れがある場合、碎氷船長にとって解決策を決定するための時間は非常に限られている。それと共に、2隻の船の操縦性は互いに非常に異なっている。従って、碎氷船長にとって背後に迫った船の意図が不明であるならば、最大速力で進航を続け、針路を変更せず、船尾部のうち最も補強され、最も傷つき難い場所である尾舷に意図的に衝突を受ける

ようにすれば最良の策である。このような操船方法はもう1つの長所をもっている。即ち、背後に迫った船の船長にとって碎氷船の意図がより明瞭になり、衝突を防ぐため、或いは、それが不可避であればせめて衝撃を緩和するために自船の船首をどちらの方向に＜突入＞させるべきか、或いは＜突入＞させ得るかを遥かに容易に決定できるようになる。

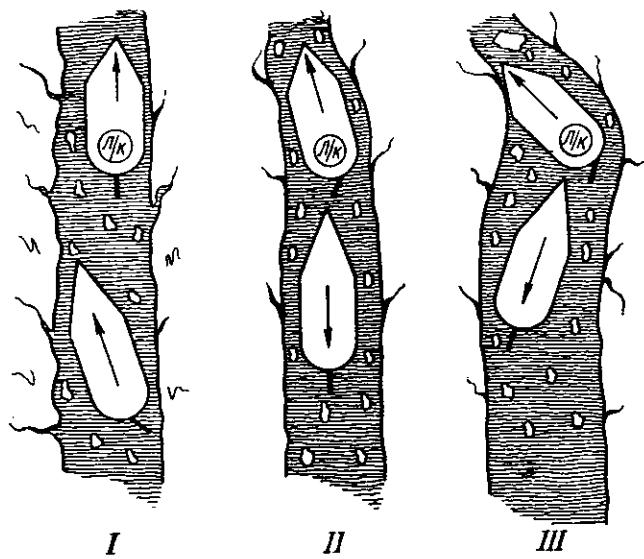
船隊誘導に際して最も苛酷な状態は碎氷船が進航状態から氷中膠着状態に陥り、運動する可能性を完全に奪われた場合に生じる。このような事態が起きないようにするために、既に述べてきたように、碎氷船の前方の氷状を細心の注意を払って観察すべきである。このような観察は秋期または冬期に氷海航行中に実施することは非常にやっかいである。即ち、この期節には新冠雪が全ての凹凸を滑らかに見せ、氷の状態を特徴付ける徵候を覆い隠している。このような状況のもとでは突然的な停船の確率がかなり高くなるので、碎氷船長と被誘導船長はこのことを一刻も忘れてはならない。碎氷船の停止によって追突の危険性が生じた際に、その防止またはせめて衝突の緩和は碎氷船の後の船の船長の技量に殆んど全面的に頼ることになる。その場合、碎氷船に残された措置は最大全速前進をかけること、また、それが早めに実施できなければ、3つの短かい汽笛信号を発して背後に迫った船に後進を命じることだけである。

碎氷船が突然に停止または急激に減速する場合には機関に全速後進を直ちにかけることを差控えるべきである。背後に短間隔で続航している船の速度がかなり高い場合には、この全速後進によって両船に重大な損傷をもたらす可能性がある。従って、碎氷船に全速後進をかけ得るのは、後続船がその意図を知らされて、速度を下げた場合に限られる。

碎氷船が停止したとき、スクリューから出る水流の力を強くして碎氷船に追突しようとしている船の前進運動に制動をかける目的で碎氷船に最大全速前進をかける方策がある。このようにすれば背後から迫って来る船が船首を碎氷船の船尾からそらすのを助成することにもなる。

短間隔による航行の効果を明らかにするため、碎氷船の直後の第1船が立遅れすることがどれほど有害であるかについて検討してみる。この船は一旦立遅れ始めると、大抵の場合、碎氷船の援助無しには当初の間隔を取り戻すことができない。氷状からしてこの船が船体損傷のリスク無しに増速できる状態にあったとしても、碎氷船の進航速度を最低限まで低下させることなしには、その船は碎氷船に追付くことができない。通常、碎氷船の直後に配置される弱い船が遅れ始めたとき、氷による被害の危険性から増速することもできない場合が極めてしばしば見られる。更に、その船の後に続くもっと強い船は減速を余儀なくされ、その結果として船隊全体が立遅れることになる。

碎氷船長としては、第1船の立遅れを認めたとき、その動きを注意深く見守らなければならない。その立遅れが偶然的なものではないことを確認したらば、碎氷船長は直ちに自船を減速させ、遅れている船が追付いて元通りの間隔に戻ることができるように配慮しなければならない。



第102図 被誘導船が追突する危険性のある場合の碎氷船の操縦方法

船隊内で短かい間隔を保持できるかどうかは砕氷船の船長自身の手腕に左右されるもので、砕氷船長は自船の速度と共に被誘導船の速度も調整しなければならない。

被誘導船について言えば、氷海航行の経験豊かな全ての船長達は、砕氷船が自分達の船から離れて＜立ち去って＞しまわない限り、通常、何んら注意されることなく、自から船隊内で最短間隔をとって走航していることを指摘しておく。このような船長達はこのような航行方法の長所を充分に理解しており、確信をもって自船を操縦すると共に、周囲の氷状および先行船の動きを綿密に観察し、先行船の船尾に文字通り＜ぶら下って＞走航する。このようにすれば、水域内に残された水路を最も良く利用することが可能となり、また、これと関連して船隊の進航を速めることができ、費やされる力が少なくて済み、また、それと同時に氷による被害を受ける確率も低くなる。多くの若い船長は短間隔走航法の長所を理解しないか、または、それを恐れているので、砕氷船の船長としてはこのような氷中誘導方式の長所を解明してやり、また、必要ならば、彼等に所定の短間隔を維持させ、それによって彼等自身がこの航法の長所を早く理解するようにしてやる必要がある。

短間隔走航にとって極めて重要な点は各船長が自船の操縦に関する諸要素を正確に把握していることである。従って、氷海航行を予定される各船に対してこのような諸要素を測線 (measuring line) で系統的に定量評価する必要があることを特に強調しておきたい。