

第 9 9 研 究 部 会

航海中の船体応力頻度に関する実船試験

報 告 書

昭 和 4 3 年 3 月

社 団 法 人

日 本 造 船 研 究 協 会

は し が き

本報告書は、日本船舶振興会の昭和42年度補助事業「巨大船に関する調査研究」の一部として日本造船研究協会第99研究部会がとりまとめたものである。

第99研究部会委員名簿（敬称略、五十音順）

部会長	高橋幸伯	東京大学生産技術研究所
幹事	安藤文隆	船舶技術研究所
〃	大石剛	三井造船
〃	大森秀夫	三菱重工業
〃	金井一十三	昭和海運
〃	真田良	(株)日本船主協会
〃	清水作造	石川島播磨重工業
〃	寺田泰治	(財)日本海軍協会
〃	長沢準	船舶技術研究所
〃	直井洋	東京タンカー
〃	西牧興	日立造船
委員	仰木盛綱	佐世保重工業
〃	河島吉彦	(財)日本海軍協会
〃	久津間裕良	運輸省
〃	小島喜七郎	浦賀重工業
〃	鈴木宏	日本鋼管
〃	中村昭和	川崎重工業
〃	三浦致和	(株)呉造船所
〃	宮崎敬一	山下新日本汽船
〃	毛利武広	大阪商船三井船舶
討議参加者	安東重美	三井造船
〃	榎原憲二	日立造船
〃	大桑義昭	三井造船
〃	栗原至道	日立造船
〃	関内実	三井造船
〃	土屋九一	〃
〃	名章利昭	〃

目 次

1. ま え が き	1
2. 明扇丸による実船試験	2
2.1 試 験 の 概 要.....	2
2.2 計測結果および考察	3
3. 東京丸による実船試験.....	20
3.1 前年度の試験の概要	20
3.2 前年度報告以後の試験.....	20
3.3 試 験 結 果	20
3.4 試験結果の解析	21
4. む す び	45

1. ま え が き

波浪中を航走する船舶にどのような外力が働き、それによつてどのような応力が生ずるかを明らかにすること、とくに船体縦強度部材の応力から、波浪曲げモーメントを求めて、その頻度分布や最大値の分布などを知ることは、船体構造設計の合理化のためには必要なことである。

これを実船計測によつて明らかにするために、従来からきわめて数多くの計測が試みられており、とくに最近では、各種の計測・記録およびデータ処理用機器の進歩および統計解析手法の発達に伴い、各国で系統的な研究が盛んに行なわれるようになってきている。

本会では、これまで第44研究部会（昭和34年度）、第49研究部会（昭和35、36年度）および第63研究部会（昭和38～40年度）などの諸部会によつて、波浪中の船体応力頻度の実船計測が行なわれてきた。しかし、これらは主として北太平洋航路における12,000 T.D.W.級の高速貨物船を対象としたもので、最近非常に増加している大型油送船については、その運航中の荷重や応力、航路の気象海象との関係などについて、ほとんど実測資料がなく、各方面からデータが渴望されている。

本部会は、巨大船に関する調査研究の一環として、大型油送船の航海中の船体応力および波浪荷重の頻度計測を目的として、昭和41年度から3ヶ年継続研究を計画して発足したものである。昭和41年度は東京タンカー㈱の油送船「東京丸」（150,000 T.D.W.）について3航海の計測を行なつた。本年度はこれに引続いて、同船によつて引続き2航海と、新造された大型油送船明治海運㈱の「明扇丸」（152,800 T.D.W.）について1航海の計測を実施した。

計測は船体中央部上甲板の曲げ応力を計測して、波浪曲げモーメントを類推することに重点を置いたが、「明扇丸」においては油槽内の横構造部材についても若干の計測を行なつた。

2. 明扇丸による実船試験

2.1 試験の概要

(1) 試験船

明扇丸	明治海運(株)所属
長さ	30 4.00 m
幅	4 4.00 m
深さ	2 4.20 m
吃水	1 6.53 m
満載航海速度	1 6.5 Knot.
載貨重量	1 52,852 Kt.

(2) 試験航路

千葉からペルシヤ湾のラストヌラ間の中近東航路で第1回の往航での計測を行なった。往航時の航路図を図2.1に示した。

(3) 計測期間

第1回計測 昭和42年8月12日より同年8月28日

(4) 計測要員

今回の計測には本部会委員、大石剛(三井造船千葉工場)および河島吉彦(日本海事協会技術研究所)の2名が乗船して計測した。

(5) 計測項目と計測方法

i) 気象、海象および本船状態

風力、風速および船と波との出合角等の気象、海象についてはすべて本船側の記録を用い、船の速度は船の速度計により記録を行なった。

ii) 応力

船体の波浪による縦曲げ応力を計測するため、機械式応力頻度計のピックアップおよび電気式応力頻度計のピックアップとして抵抗線型歪計を船体中央部上甲板上のほぼ中心線に近い点にとりつけた。この歪計の位置を図2.2に示した。

これらのピックアップは防水と防爆をかねて鋼製の保護ケースをとりつけた。頻度計の計数部は計測室に設置した。計測の方法は毎日一定時間に4時間ごとの記録をとり、したがって連続作動する応力頻度計の4時間ごと、24時間ごとの応力頻度を記録した。

また、その他に毎日一定時間に新興通信工業(株)製の自動平衡記録計を使用して10～20分間継続して計測を行ない10～20分間の短期分布を求めた。

つぎに船体中央部の船底トランスの波浪中の動的応力を計測するため、No.3 Ballast Water TankにおけるFr. 81左舷側で抵抗線歪計による計測を行なった。計測位置を図2.3に示す。

同タンク内における計測点は往航はBallast Waterを積むため歪計が水中にあるので水密にする必要があり、また同時に防爆の必要からも各歪計は鋼製の保護箱の中に入れて箱にはワセリン等を充てんした。

計測の方法は動的歪計(共和電業製 DPM 60CT および 8AT) およびビシグラフ(三栄測器製)を使用し、毎日一定時間に10~20分間継続して行なつた。

上記応力頻度計測は引続き第2回の計測が予定されている。

(6) 計測装置

本実験に使用したおもな計測装置は東京丸で使用した装置とほぼ同じものである。すなわち電気式応力頻度計はピックアップとして抵抗線歪計(ゲージ長さ60mm)を使用し変動応力を計数するもので製作所は昭和測器研究所である。

応力の変動量はピークからピークまでの振巾の大きさを最小限0.336Kg/cm²の段階に分け、合計7段階の任意の応力段階に設定し、それぞれの応力段階に達した応力回数を計数できる。応力はピークからピークまでの複振巾を記録する。

詳細は本会研究資料第62(昭和41年3月)を参照されたい。

機械式応力頻度計はピックアップのゲージ長さを1000mmとして1セグメントの応力を0.168Kg/cm²として記録した。

その他の機構については本会研究報告第49号(昭和40年3月)を参照されたい。

2.2 計測結果および考察

(1) 気象、海象

計測期間における Beaufort 風力階級、風浪階級を図2.4および図2.5に、うねり階級を図2.6にそれぞれヒストグラムで示した。

縦軸に示した度数は風力、風浪とうねり階級とも4時間おきに観測した結果で、1日に4回の8月13日~8月27日の15日間のものである。

今回の計測は往航のみであり計測期間が2週間と比較的に短期間であつたが風浪階級の最大値は6であつた。また Beaufort 風力階級の最大値は8であつた。

(2) 船体縦応力

表2.1と表2.2に応力頻度計による毎日一定時間の船体縦応力として船体中央部上甲板上で計測した応力の頻度を示した。上甲板上での最大応力(複振巾)は3.2Kg/cm²程度に達している。

表2.1、2.2とも昭和42年8月13日~同年8月27日までの往航での値を示す。これらの応力測定結果を縦軸に応力頻度数をとつてヒストグラムに示すと図2.7のごとくなる。

つぎに今回の航海における計測結果から本船の一年間において遭遇すると予想される応力頻度数を推定した。この結果を図2.8に示す。これは1年間の本船航海数を8航海と仮定し、1航海の応力頻度数を8倍して求めたものである。さらに、この1年間の応力頻度数を20倍して20年間において本船が受けると予想される応力頻度数を求めた。

つぎに、本航海中の最も荒天時において自乗平衡記録計より求めた上甲板上縦応力の短期分布を求めた。この結果を図2.9に示す。さらにこの結果から Rayleigh 分布を計算して同図に比較して示した。実験値は Rayleigh分布に大体一致した傾向を示した。さらに応力の累積確率分布を求めると図2.10のごとくなる。

これまでに本会第9研究部会で行なわれた東京丸、および明扇丸の実船における応力頻度計測結果を図2.11に示す。

横軸は波高と Beaufort 風力階級を示し、縦軸は無次元曲げモーメント $\bar{M} = \frac{M}{\rho g L^3 B}$ で示した。

ここでMは曲げモーメント、 ρ は水の密度、 g は重力の加速度、Lは船の長さ、Bは巾である。

また毎日の縦応力のヒストグラムを海象状態、出合角、船速を参考として海象状態別に図2.12から2.17に示す。

これは毎日観測した海象状態のうち風浪階級の大きさに順に風浪階級別に比較したものである。

(3) Ballast Water Tank 内のトランス応力

今回の計測における計測値のうちNo.3 Ballast Water Tank 内の船底トランスのFacePlateの応力分布を図2.18に示した。

これは全ゲージNo.2の応力振巾(複振巾)が最大になった時刻における応力分布である。

船底トランスのコーナー部での最大応力(複振巾)は $5,000 \text{ kg/cm}^2$ 程度に達している。このときの海象はBeaufort風力階級6、波高3.8mであつた。またNo.2ゲージ位置の往航における応力のヒストグラムを図2.19に示す。

ここでの応力の回数数は応力変動の半周期を1回としている。

この結果から、Rayleigh分布を計算して同図に比較して示した。

実験値はRayleigh分布に大体一致した傾向を示した。

最後に、この短期分布の記録からJasperが異常値の推定について求めた式 $X_m = \sqrt{E_m \cdot \log_e \frac{N}{f}}$ ※

を用いて本船の20年間に、この部分に生ずる異常応力(最大値) X_m を求めた。

上式で E_m は船が最も苛酷な状態にさらされているときの応力変動の自乗平均、Nはそのような海象状態の持続時間中の変動回数、また f は危険率と呼ばれるものである。

本船の場合には、計測の結果から E_m として $2,059 (\text{kg/cm}^2)$ が得られ、また荒海中の荒れた状態の継続時間を48時間と仮定するとNとして30,960回が得られる。さらにこのような海象状態に本船は2航海程度に1回、すなわち年に4回遭遇するとして20年間の応力変動回数Nを求めると2,476,800回となる。

$f = 0.001$ とおくと、上の仮定における異常値は $X_m = 6.67 \text{ kg/cm}^2$ となる。

※ 造船協会誌 第382号(昭和36年7月)

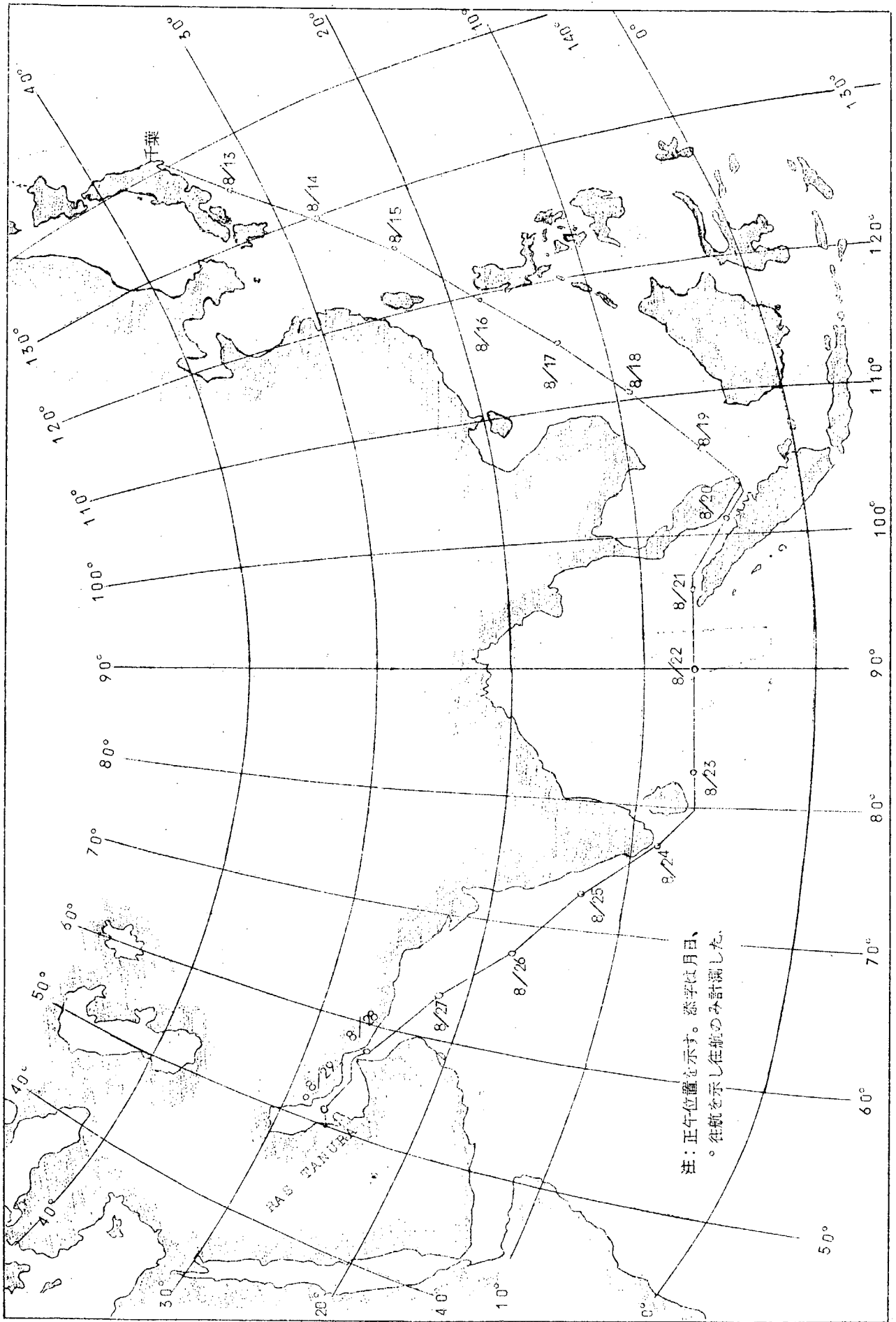


図2.1 航路図

設置位置



図 2.2 上甲板上のストレインゲージ (G.L.=60 mm) 貼布位置及び機械式頻度計位置

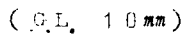


図2.3 Ballast Water Tank内のストレインゲージの貼布位置

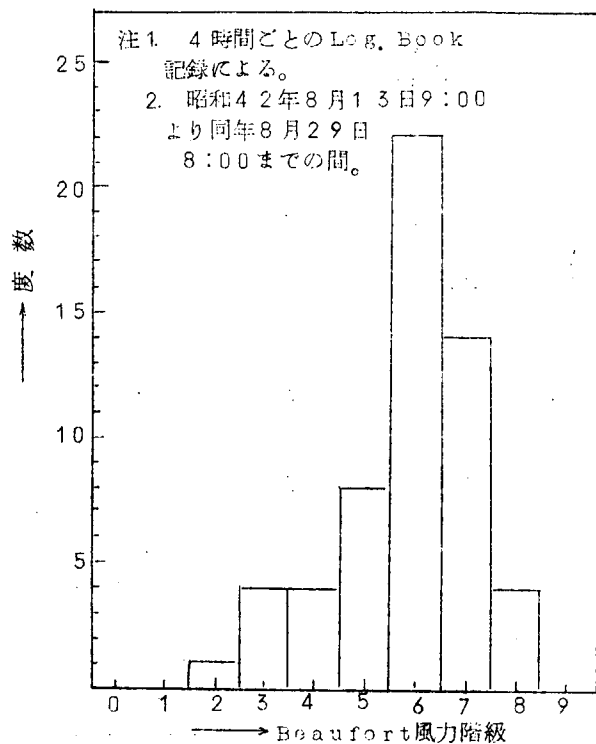


図 2.4. 風力のヒストグラム

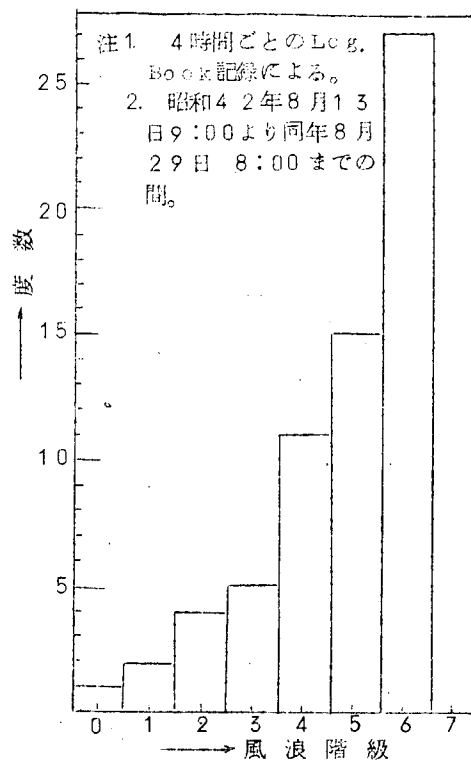


図 2.5 風浪のヒストグラム

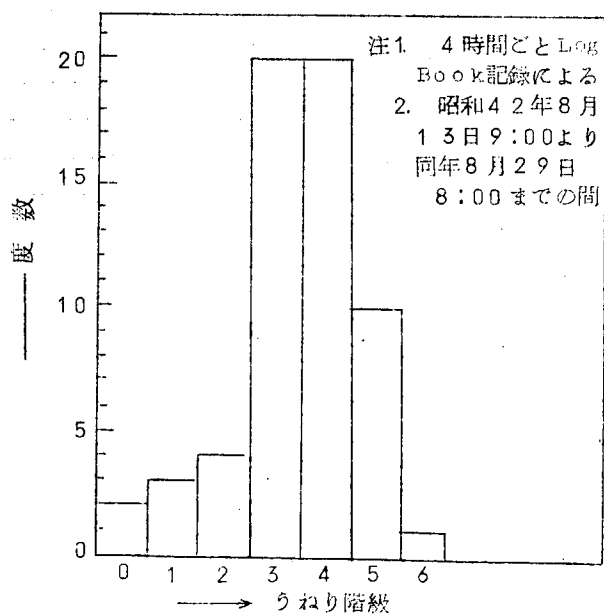


図 2.6 うねりのヒストグラム

表2.1 上甲板上縦応力頻度分布(電気式頻度計)

計測日	計測時間	風浪 階級	応 力 範 囲 (kg/cm ²)						
			0.34~0.67	0.67~1.18	1.18~1.68	1.68~2.18	2.18~2.69	2.69~3.19	3.19~4.03
42.8.13	20分間	5	334	177	59	8	1		
	4時間	6	3820	2247	763	179	17	1	
	4 "	6	4132	2439	587	96	3		
	4 "	6	5223	1436	144	2			
	24時間	6	28964	8403	1612	282	20	1	
8.14	20分間	5	366	2					
	4時間	5	3655	16	1				
	4 "	4	3040	3	1				
	4 "	4							
	24時間	5	24156	707	32				
8.15	20分間	4	153	72	18	3	1		
	4時間	4	3772	1132	204	28	2		
	4 "	3	4483	464	12				
	4 "	4	3002	18					
	24時間	4	21028	1704	218	28	2		
8.16	20分間	5	306	59	0	1			
	4時間	6	5144	2068	295	29	2		
	4 "	6	5224	1631	213	6	2		
	4 "	6	5572	812	69				
	24時間	6	32055	6791	666	36	4		
8.17	20分間	6	486	36					
	4時間	6	5808	979	33				
	4 "	6	5229	1403	107	2			
	4 "	6	5676	1028	69	1			
	24時間	6	32374	8064	578	12			
8.18	10分間	6	218	41	1				
	4時間	6	4557	1116	90	2	1		
	4 "	6	5857	637	3				
	4 "	5	5460	642					
	24時間	6	26331	2632	95	3	1		
8.19	10分間	5	109						
	4時間	5	5528	374	2				
	4 "	5	5172	244					
	4 "	4							
	24時間	5	16946	719	3				
8.20	10分間	1	0						
	4時間	3	3017	256	2				
	4 "	2	623						
	4 "	2	28	1	0	1			
	24時間	3	4684	258	2	1			
8.21	20分間	2	113						
	4時間	1	1413						
	4 "	5	4870	603	77	5			
	4 "	6	5384	710	29	2			
	24時間	6	26632	2928	121	7			

表 2.2 上甲板土総応力頻度分布 (電気式頻度計)

計測日	計測時間	風浪 階級	応 力 範 囲 (Kg/cm ²)						
			0.34~0.67	0.67~1.18	1.18~1.68	1.68~2.18	2.18~2.69	2.69~3.19	3.19~4.03
42.8.22	20分間	6	364	142	74	1			
	4時間	6	5854	1217	104	1			
	"	6	5210	827	24	2			
	"	6	5752	1015	38				
	24時間	6	27933	3267	167	3			
8.23	10分間	6	313	16					
	4時間	6	5214	279	1				
	"	6	5317	447	6				
	"	5	3066	55	1				
	24時間	6	25344	1137	14				
8.24	10分間	6	197	8					
	4時間	6	4167	126					
	"	3	3447	150					
	"	3	3282	32					
	24時間	6	17286	360					
8.25	10分間	4	95	2					
	4時間	4	3802	137	1				
	"	5	3778	253	10				
	"	5	4788	287	8				
	24時間	5	23921	1765	47				
8.26	20分間	6	423	54	3				
	4時間	6	4201	639	35	2			
	"	6	3883	631	40	2			
	"	6	4176	367	12				
	24時間	6	19016	1809	88	4			
8.27	10分間	5	37	1					
	4時間	5	1048	44					
	"	4	949	70	2				
	"	3							
	24時間	5	3465	191	4				
合 計	360時間	6	330135	40735	3647	376	27	1	

注、1 計測時間は本船時間

2 風浪階級はその時間内の最大のもの

3 10~20分間の計測時間：9:00~9:10または9:20

4 4時間の計測時間、9:00~13:00、13:00~17:00、17:00~21:00

5 24時間の計測時間、当日の9:00より翌日の9:00まで

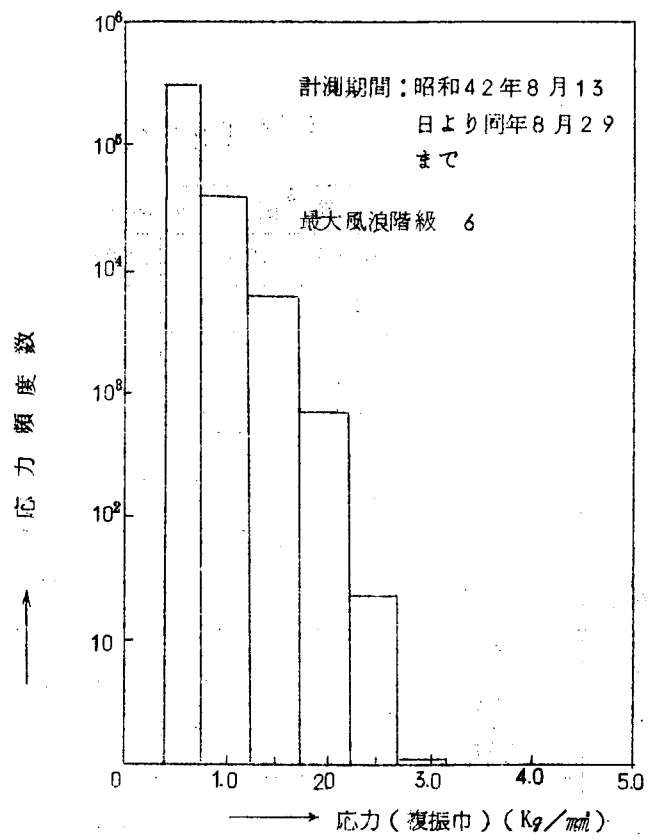


図 2.7 電気式頻度計により計測した上甲板の縦応力のヒストグラム

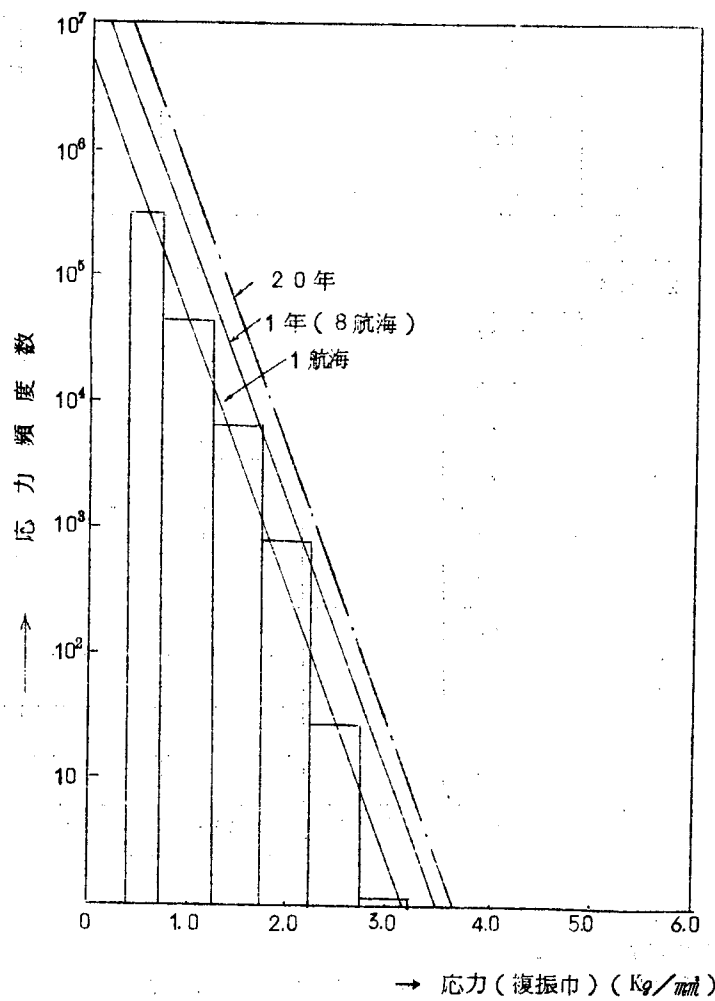


図 2.8 縦応力ヒストグラム

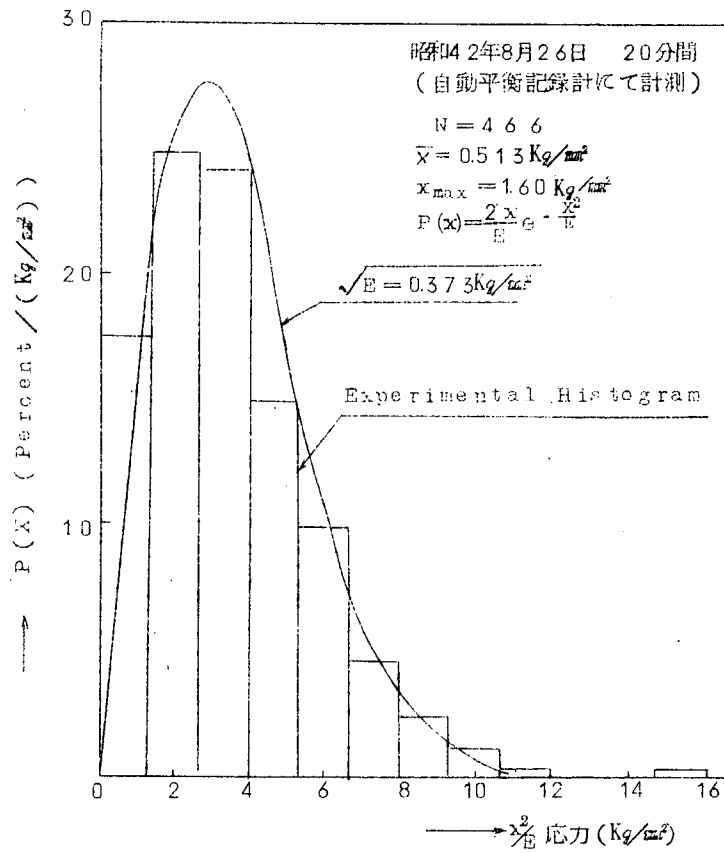


図 2.9 上甲板縦応力短期分布 (複振巾)

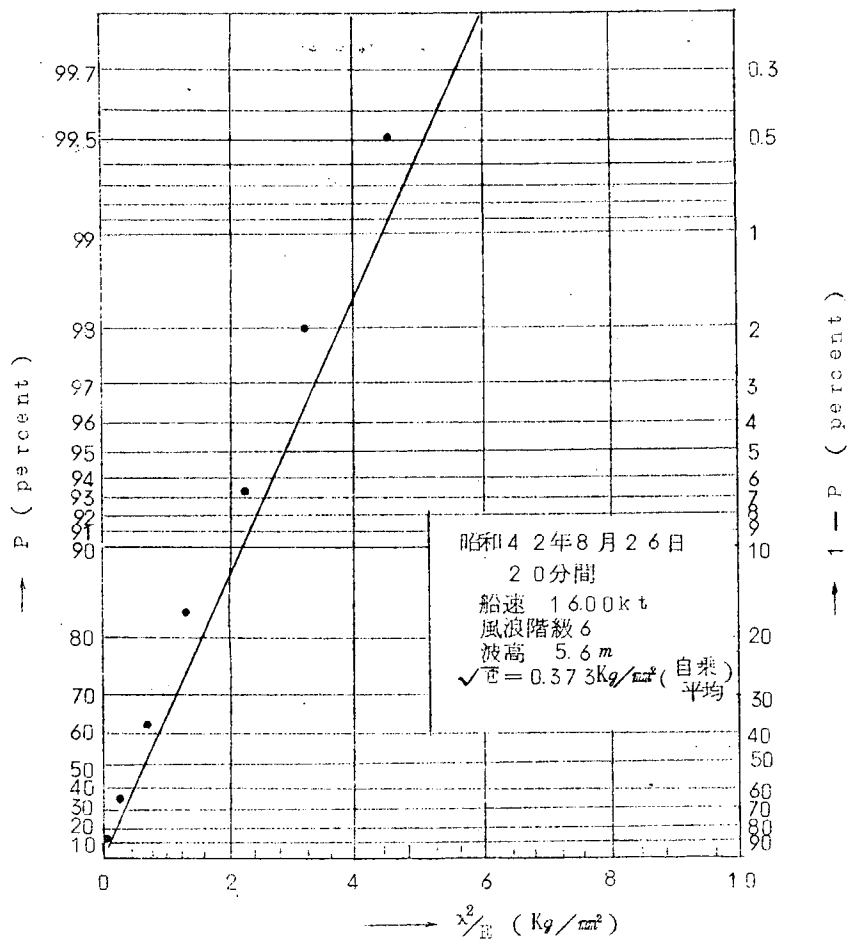


図 2.10 上甲板縦曲げ応力の累積確率分布

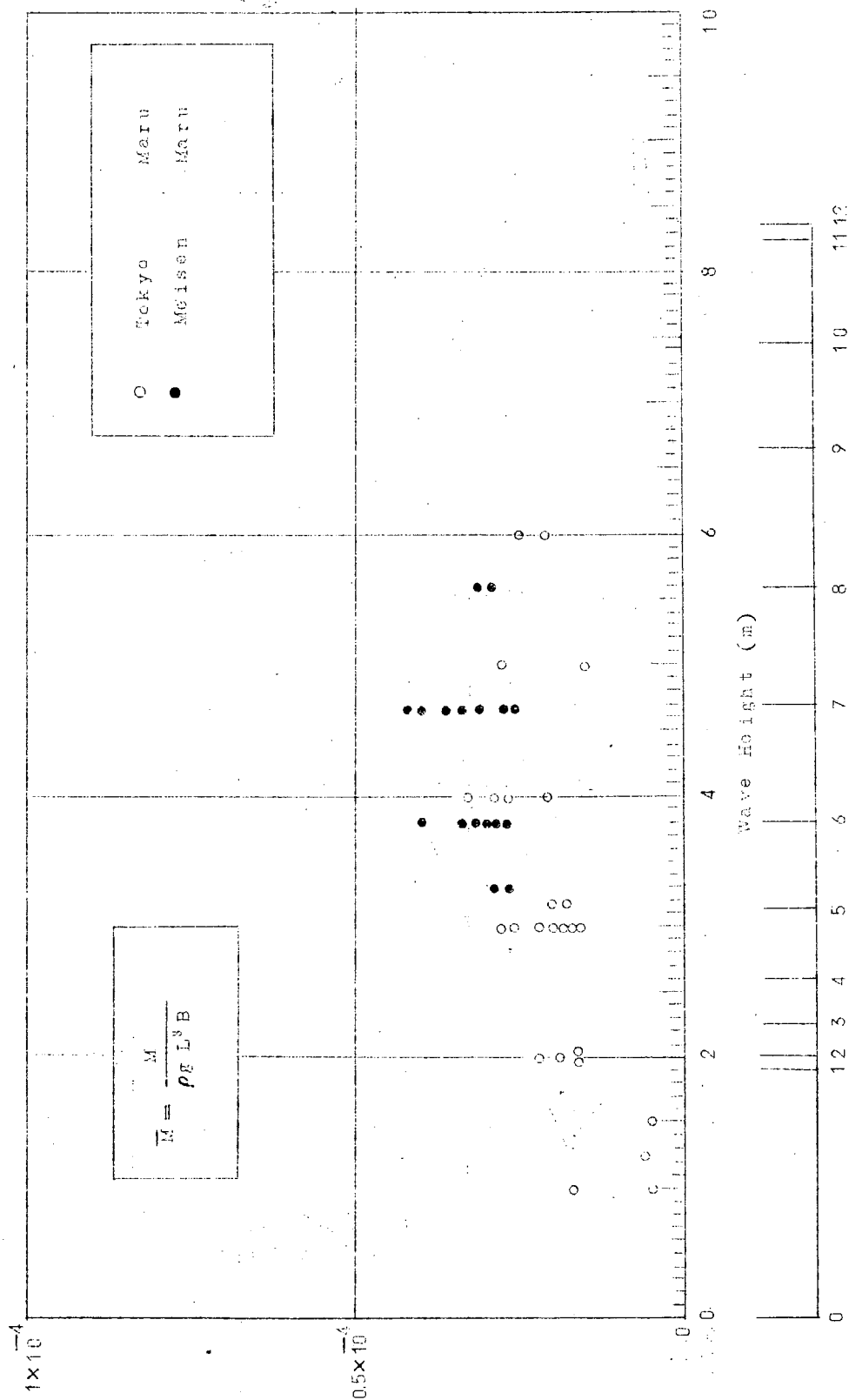
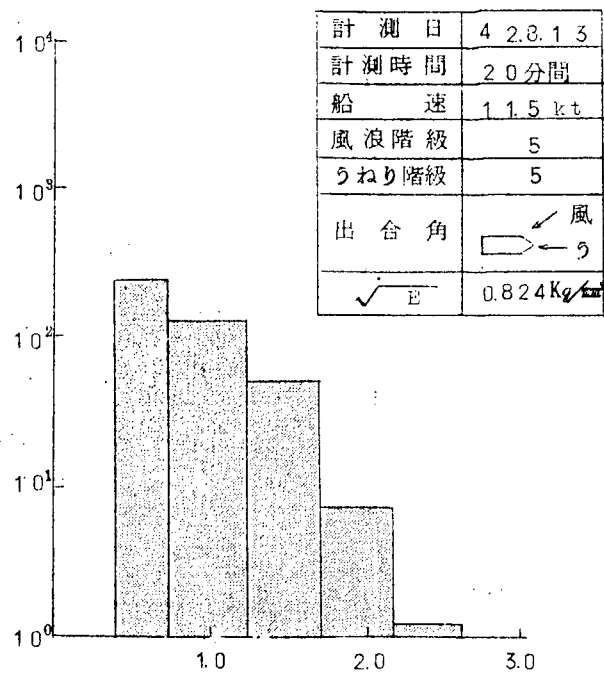
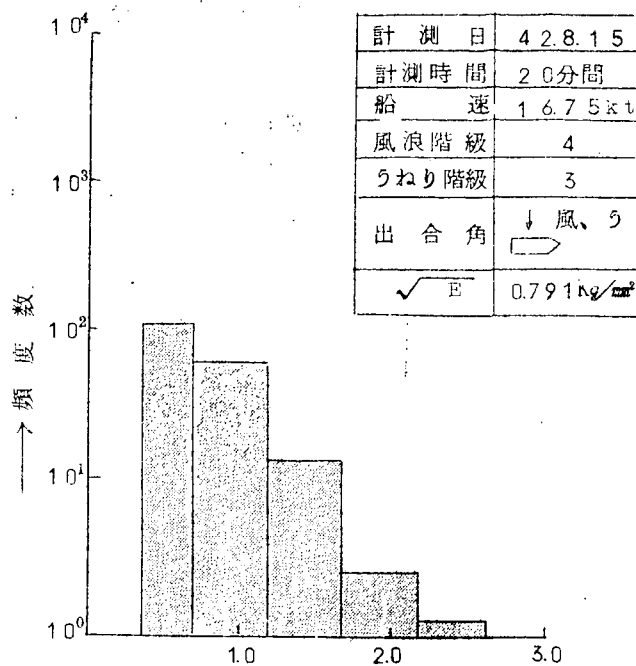
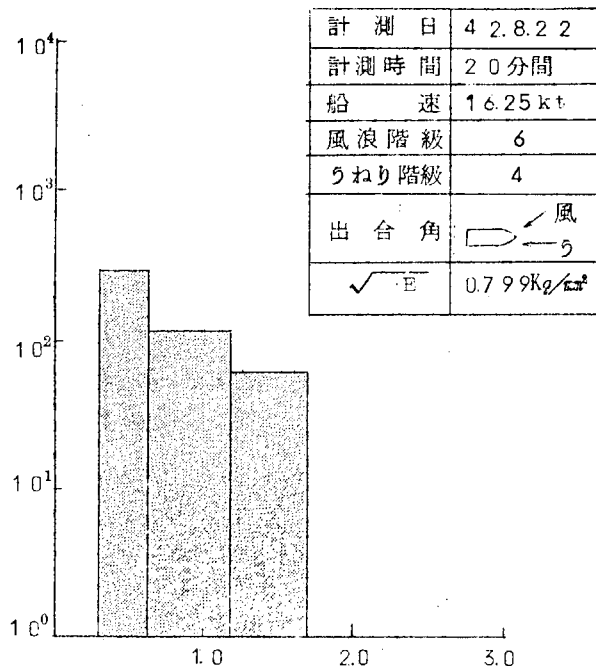
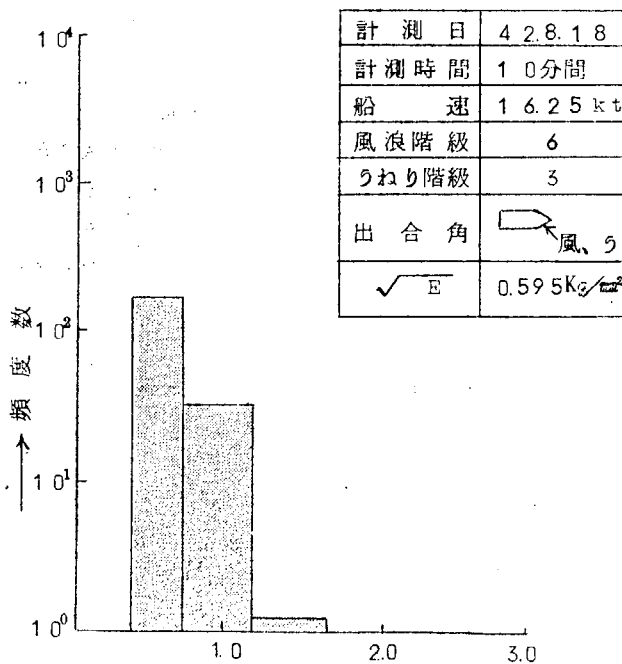


図 2.1.1 応力頻度計測結果



→ 応 力 (Kg / cm²)



→ 応 力 (Kg / cm²)

図 2.12 風浪階級別の上甲板上の縦応力のヒストグラム

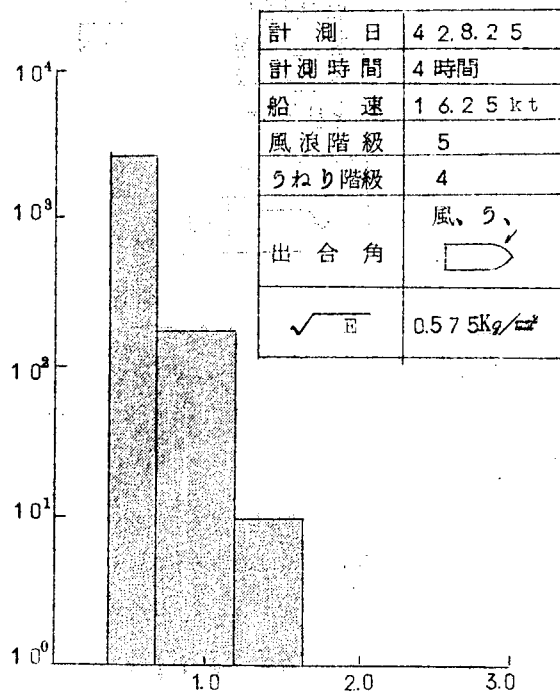
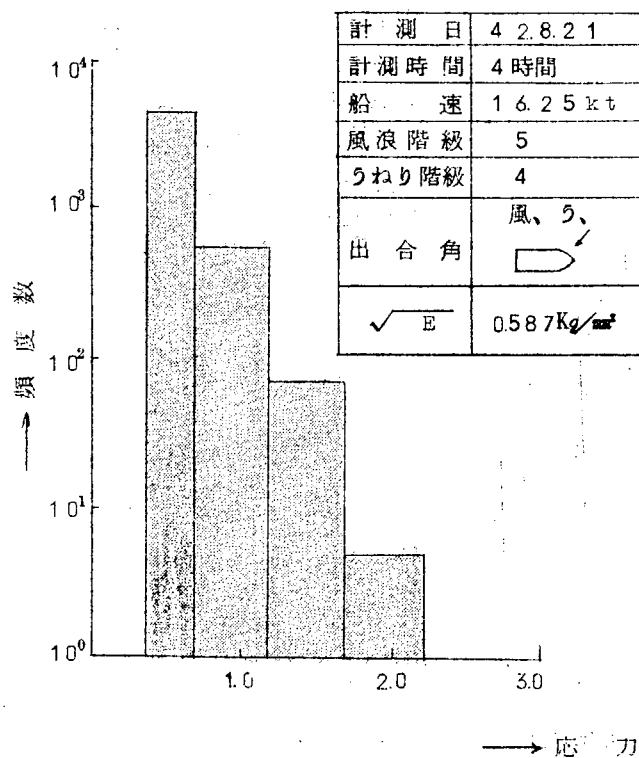
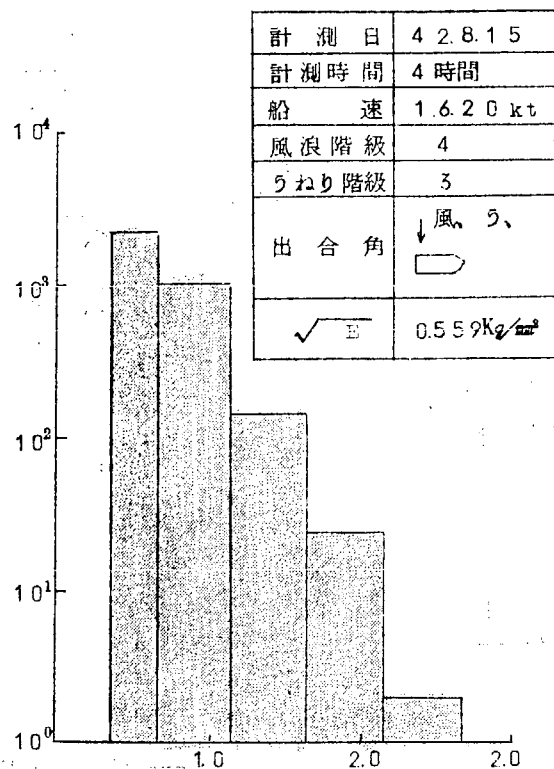
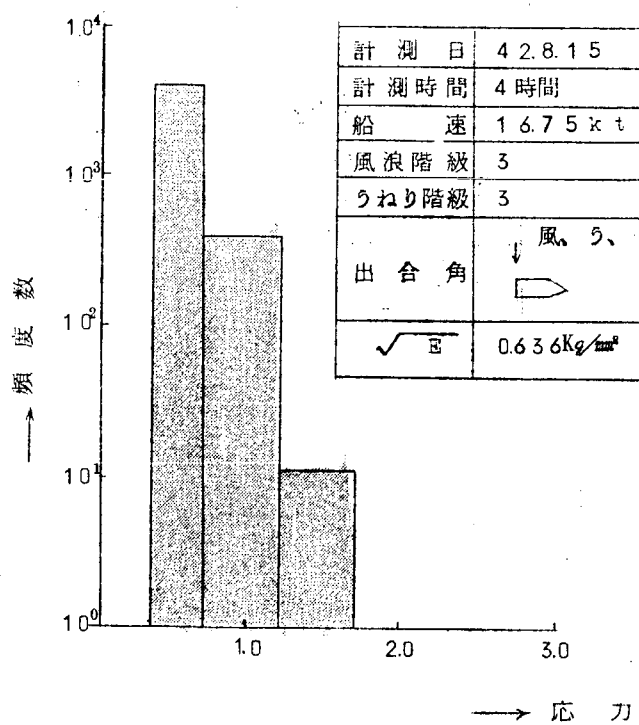


図 2.1.3 風浪階級別の上甲板上の縦応力のヒストグラム

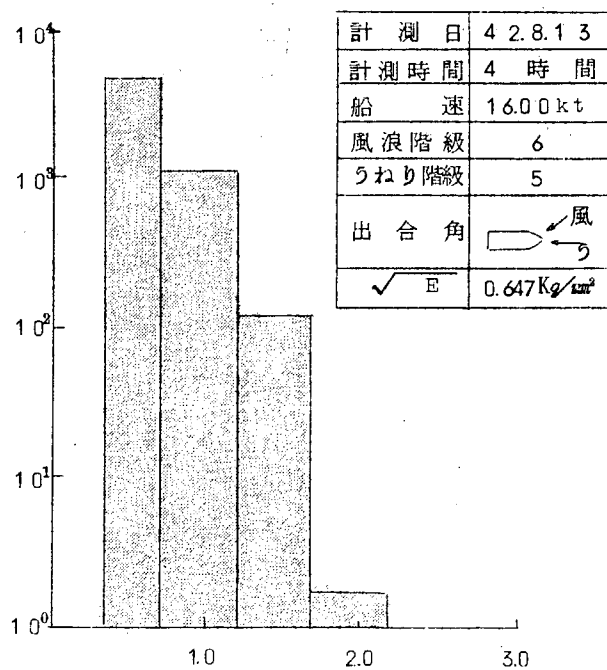
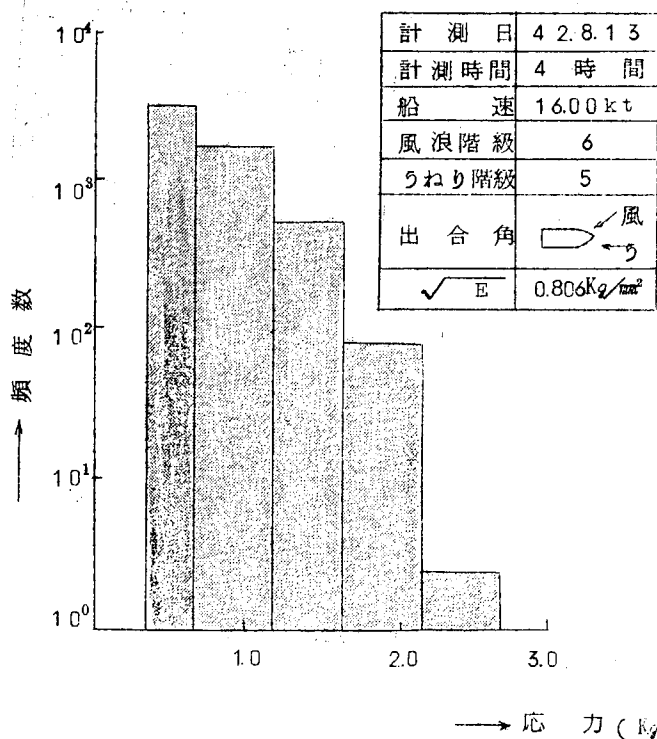
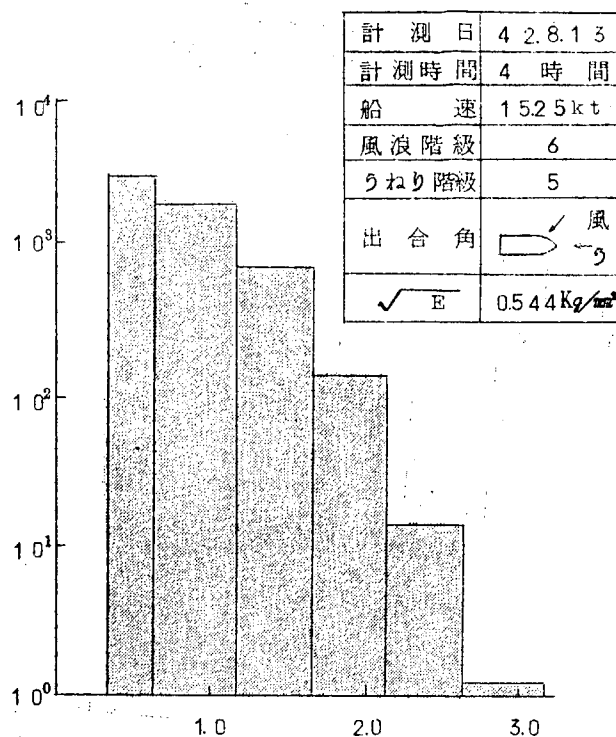
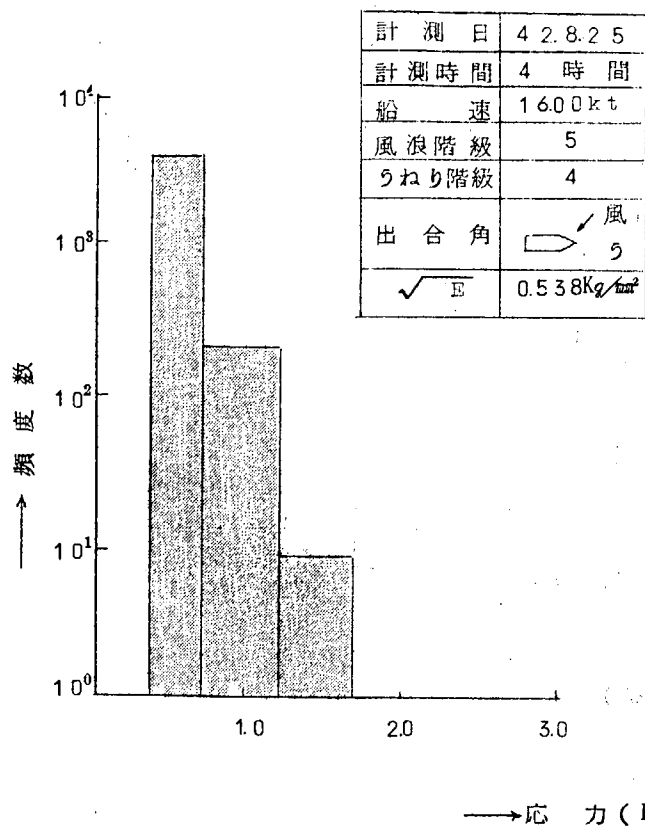


図 2.14 風浪階級別の上甲板上の縦応力のヒストグラフ

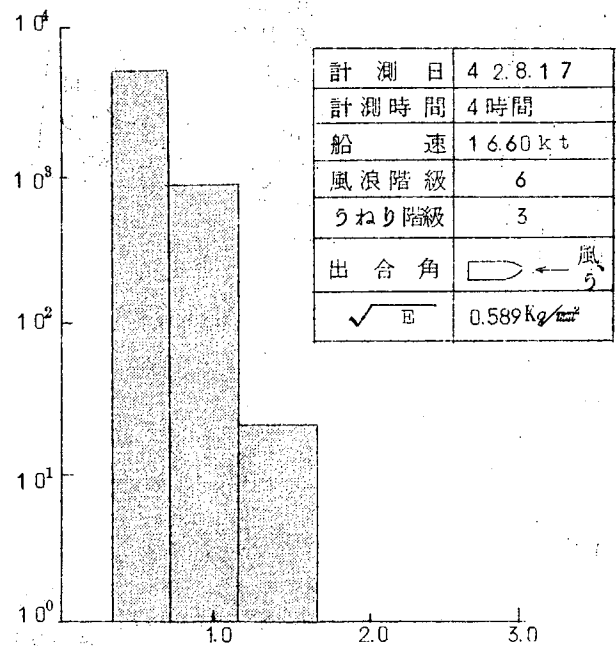
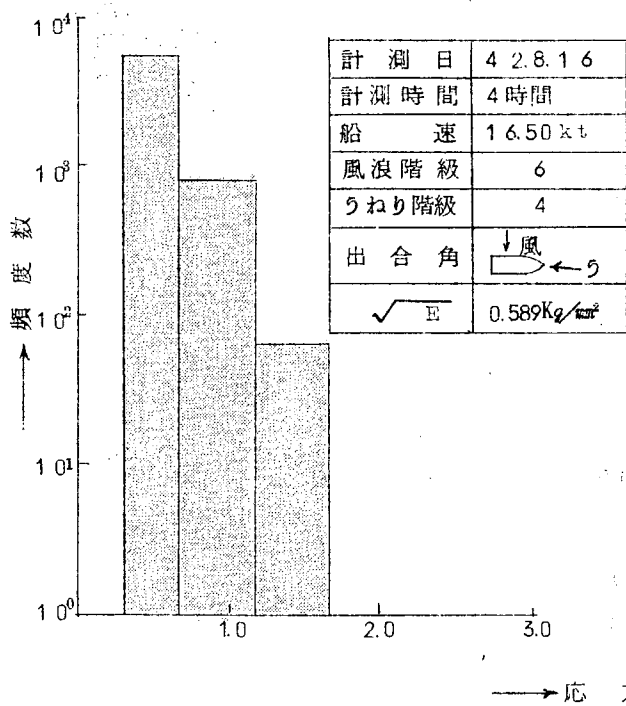
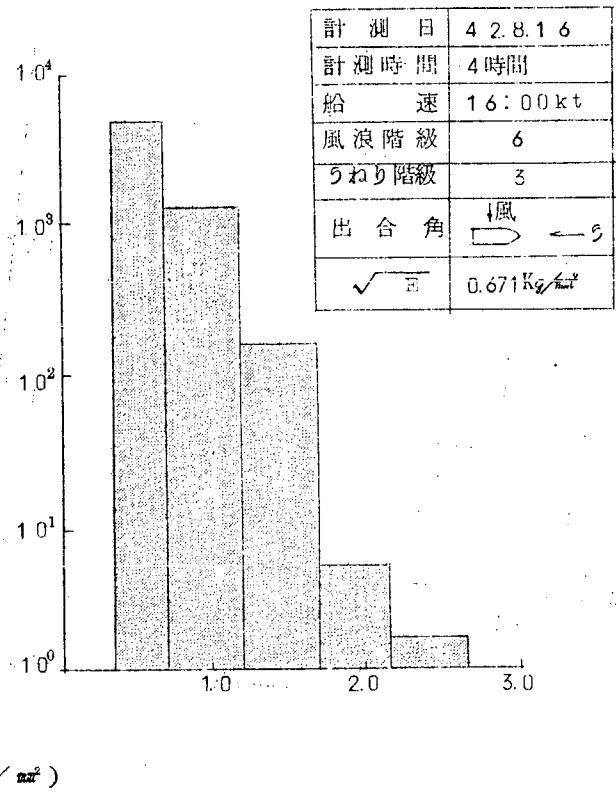
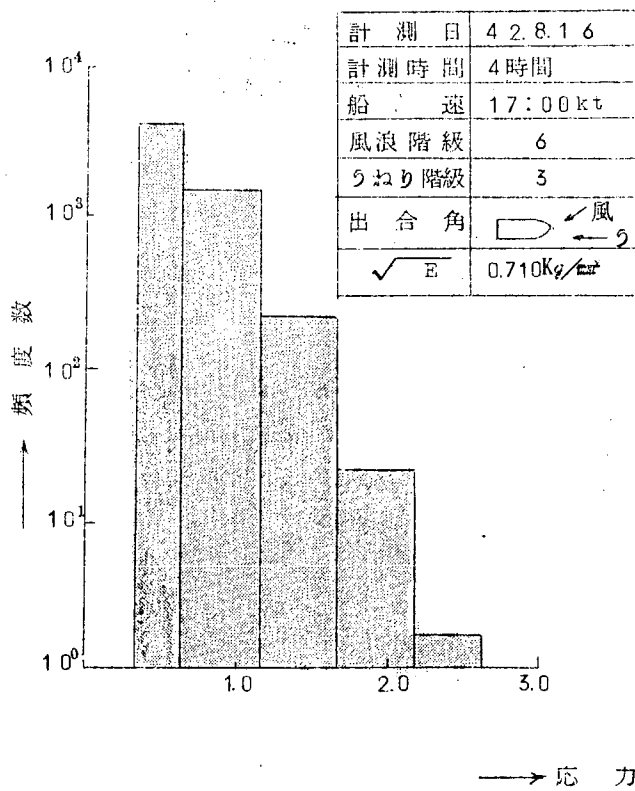


図 2.15 風浪階級別の上甲板上の縦応力のヒストグラム

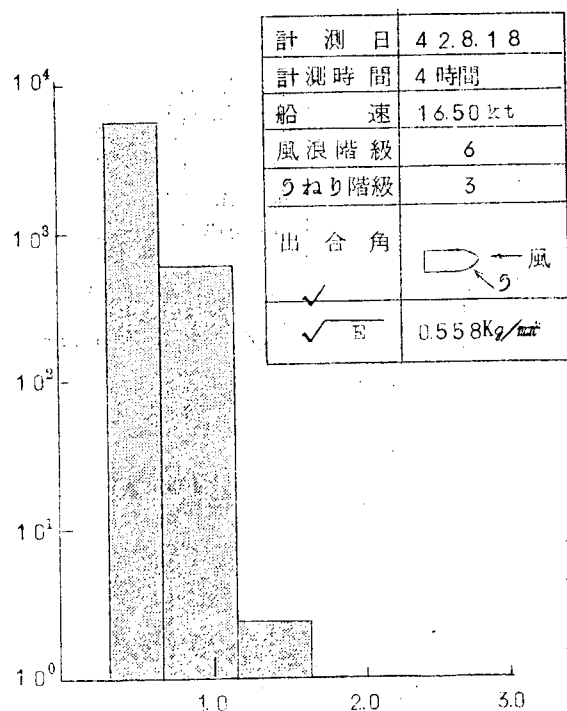
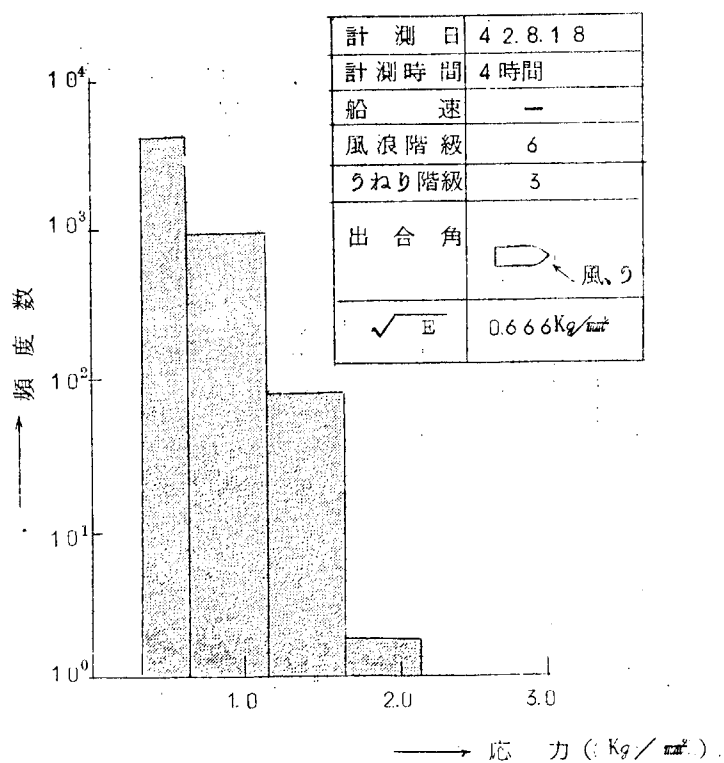
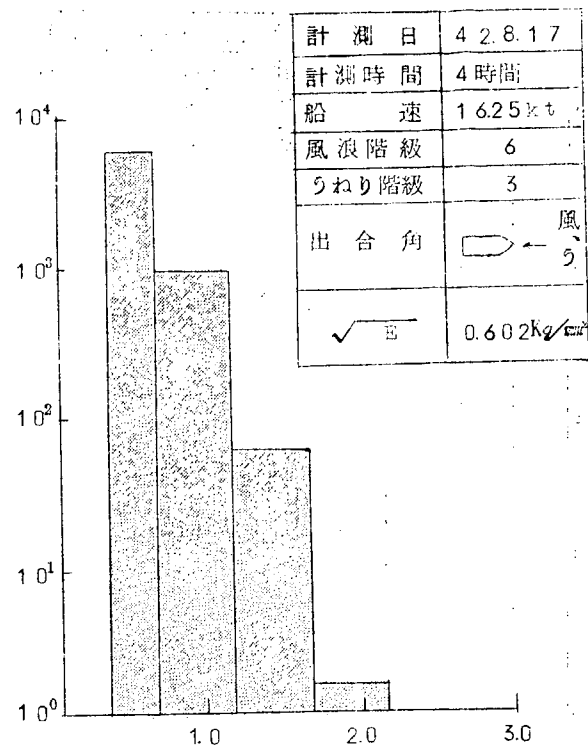
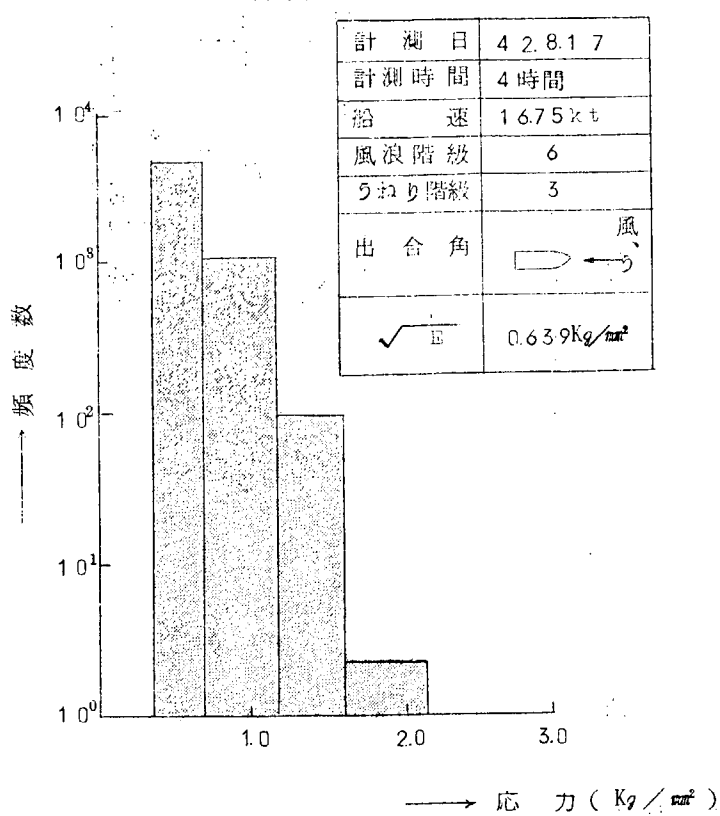


図 2.16 風浪階級別の上甲板上の縦応力ヒストグラム

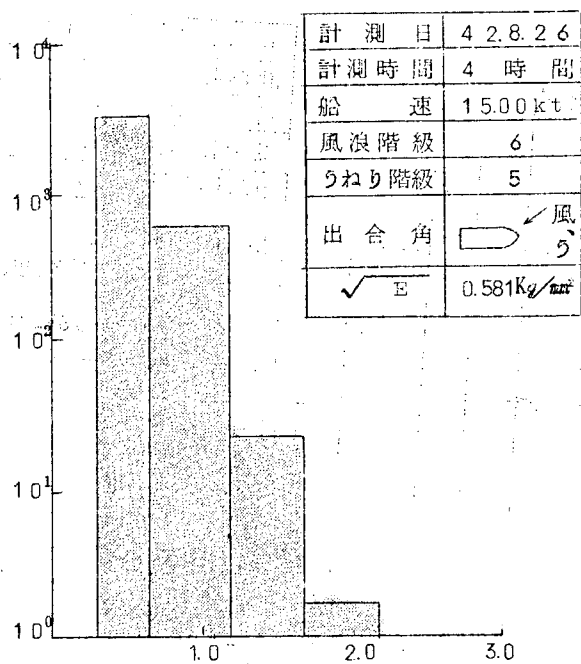
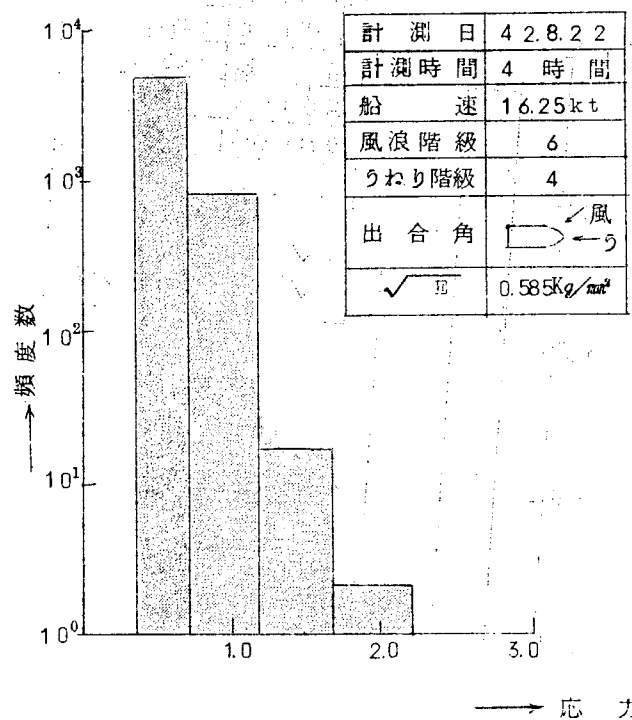
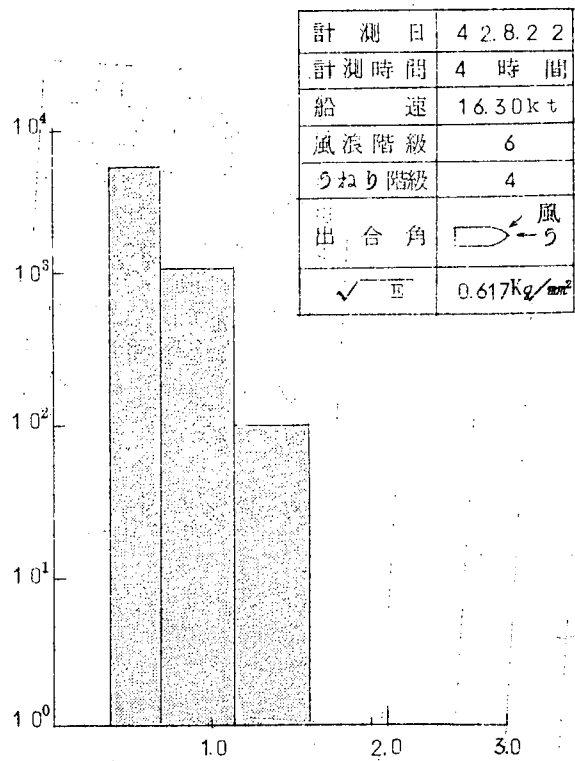
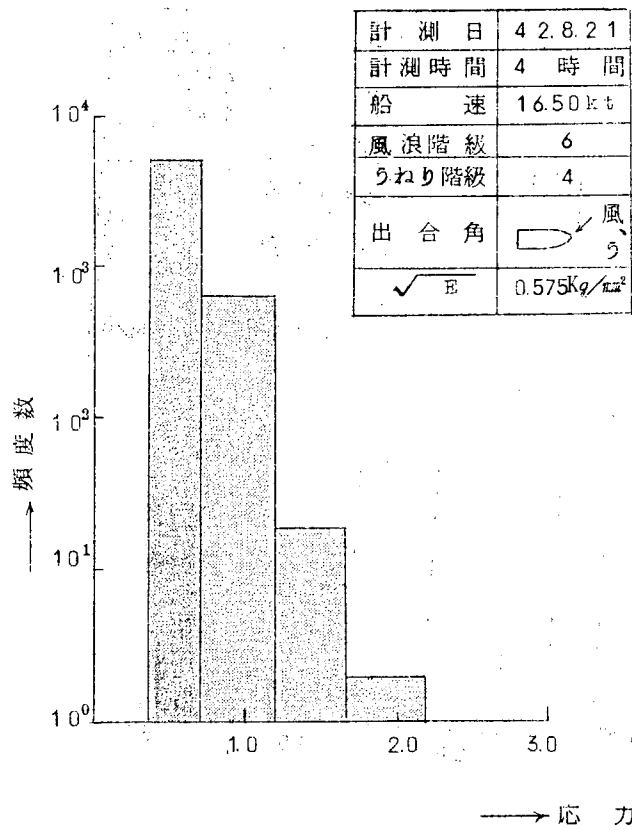


図 2.17 風浪階級別の上甲板上の縦応力ヒストグラム

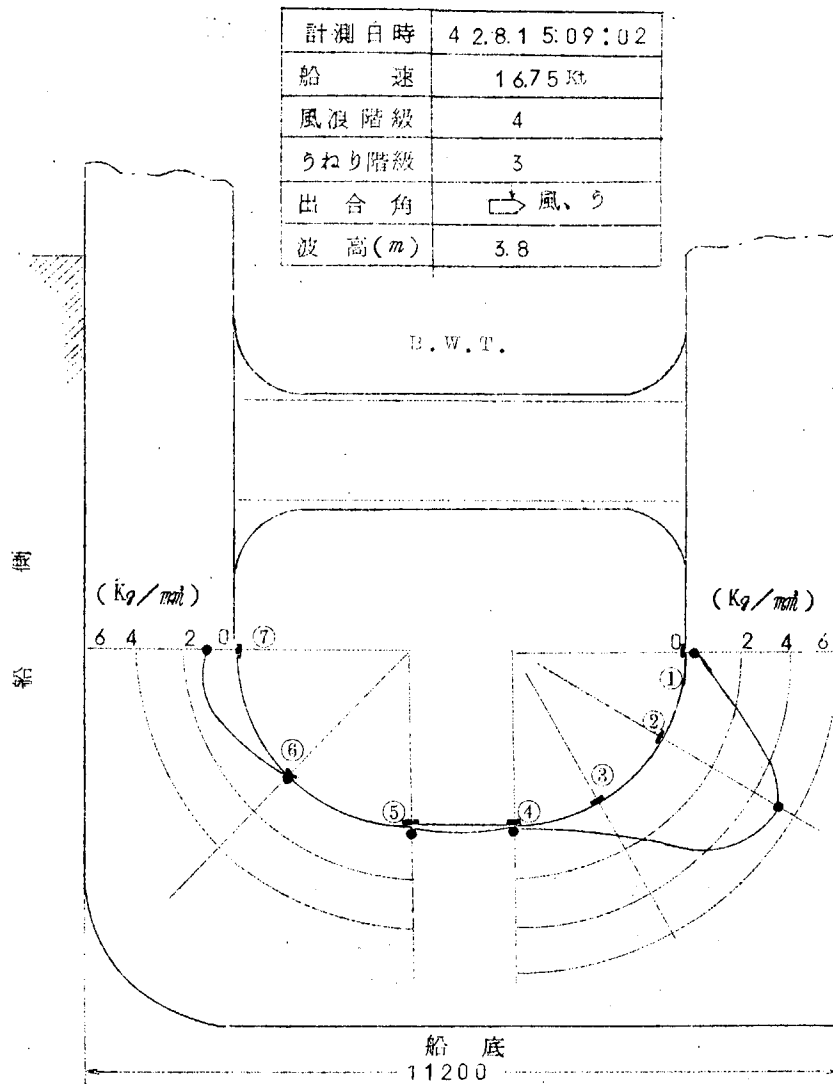


図2.18 Ballast Water Tank内における最大応力分布(複振巾)

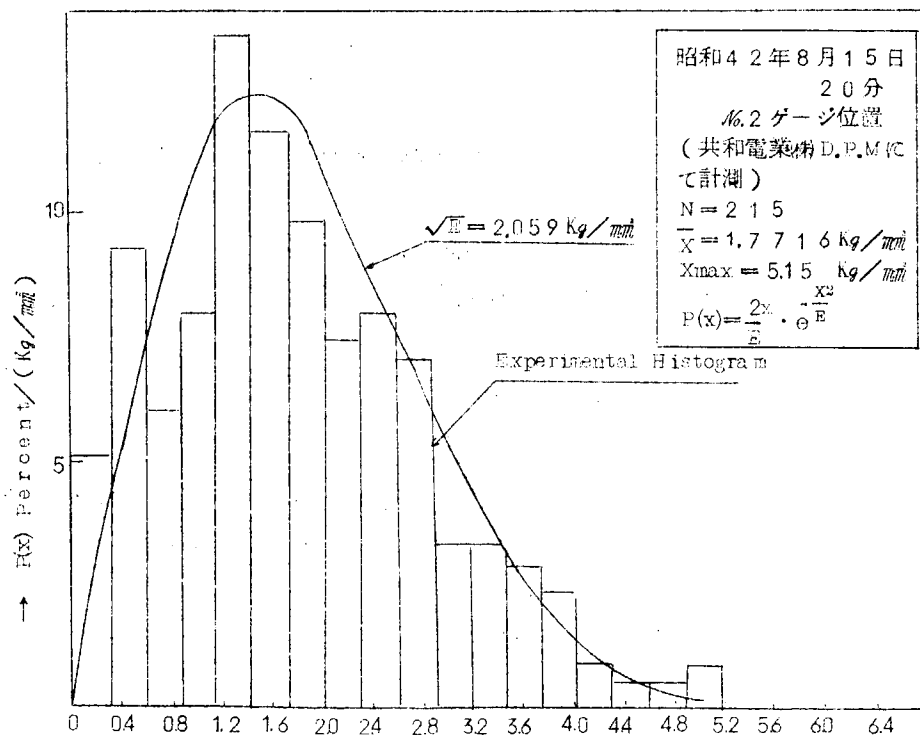


図2.19 Ballast Water Tank 内横応力短期分布 (複振巾) (Kg/mm²)

3. 東京丸による実船試験

3.1 前年度の試験の概要

東京丸による実船試験結果のおもな部分はすでに本会の研究資料第62においてすでに報告したが、その内容は昭和41年10月2日から同11月6日に至る第1回計測、同11月9日から12月13日に至る第2回計測および同12月16日から昭和42年1月24日に至る第3回計測についてであり、計測の種類は第1回計測においては船体中央部上甲板における船体の縦応力1点と第2 Ballast Water Tank内のトランスのフランジ上における曲げ応力5点および機関室内のフレームのコーナー部の応力2点について主として行ない、第2回以後の計測においては船体の中央部上甲板上の縦応力1点のみについて計測を実施した。

第3回までの計測結果および簡単な解析については、上述のごとく前年度本委員会報告に記したが、本報告ではその後の第4回、第5回の実験結果の報告と、これまでの全計測結果についてさらに解析を行なったので、それらの結果について報告する。

3.2 前年度報告以後の試験

(1) 試験船

東京丸	東京タンカー(株)所属
長さ	290.00 m
巾	47.50 m
深さ	24.00 m
吃水	16.00 m
航海速力	16.0 Knot
載貨重量	150,000 t
C_b	= 0.806
L/B	= 6.1
L/d	= 18.1
B/d	= 2.97

(2) 試験航路および期間

横浜からペルシヤ湾のラスタヌラ湾に至る中近東航路で第1回の計測時と全く同じ航路である。

計測期間は

第4回計測 昭和42年1月26日～同42年3月4日

第5回計測 昭和42年3月8日～同42年4月13日

(3) 計測項目および計測装置

第4回および第5回の計測においては、気象、海象および本船状態については計測員がとくに乗船しなかつたので、本船側の記録を採用した。

応力の計測は船体中央部上甲板における縦応力1点のみについて、応力頻度計により連続的な計測を行なった。記録は毎日の正午における応力の頻度分布を読み、したがって24時間ごとの値を求めた。

計測装置として使用した電気式応力頻度計は、前述の研究資料第62において詳細が記されている光電式応力頻度計を改修したもので、その性能は全く同じである。

3.3 試験結果

前年度の報告後に行なった第4回および第5回の計測時における海象の記録をヒストグラムにしてあらわした結果

を図 3.1 および 3.2 に示す。この 2 航海における波浪階級の最大値は 7 であり、両航海は大体同程度の海象状況であつたと推察される。さらに、前年度の 3 回にわたる計測時の海象と比較するとオ 3 回が最大波浪階級 8、オ 2 が最大 6、オ 1 回が最大 7（いずれも気象庁波浪階級）となつているので、これらの平均値的な海象状況であつたと考えられる。

つぎに縦応力の頻度分布の計測結果を表 3.1 および表 3.2 にそれぞれ示す。また図 3.3 および図 3.4 にオ 4 回計測およびオ 5 回計測時における応力のヒストグラムを示す。縦軸に応力頻度数を対数目盛で示してあるが、応力との関係は、ほぼ直線的になつている。応力の最大値はいずれの場合も複振巾で 6 kg/mm^2 程度であつて、オ 1～オ 3 回の計測に比べるとやや小さい値となつている。

3.4 試験結果の解析

これまでの全試験結果について、前年度に引続いて行なつた解析の結果について以下に記す。

(1) 海象、気象

オ 1 回の計測においては計測員が乗船して、海象状況、気象状況および本船の状態等について、直接観測を行なつたので、その結果をもとにして解析を行なつた。表 3.3 に計測値の一覧表を示す。

この表から実験を行なつた Operating Condition の分類を行なうと、表 3.4 のごとくなる。この結果からみると実験状態における船の速度は、ほとんど $1.5 \sim 2.0 \text{ kt}$ の範囲にあり、波との出合角は斜め向い波の状態がきわめて多いことがわかる。

図 3.5 に波高と波長との関係を示す。すなわち横軸に波長をとり、対応する波高段階の回数を縦軸にとつて示したものである。

図 3.6 は海象の各観測値について、波長 L_w と波高 H_w の関係を示したものであるが、図中には Neumann-Pierson の完全発達不規則波に関する次の式から導いた波長と波高の関係を示した。

Neumann-Pierson の関係式

$$R = 0.622 \left(\frac{V}{10} \right)^5$$

$$h_{1/3} = 2.832 \sqrt{R}$$

$$\lambda_m = \frac{3.25}{g} V^2$$

ここに V は風速 (m/sec)、 R は完全発達不規則波の累積エネルギー密度、 $h_{1/3}$ は波高の最大 $1/3$ 平均値、 λ_m はエネルギー・スペクトラムのピークに対応する波長である。これらの式から V と R を消去し λ_m と $h_{1/3}$ との関係求めたのが図 3.6 の実線である。

この図から観測値の L_w と H_w の関係と、計算によつて求めた λ_m と $h_{1/3}$ との関係を比べてみると、観測値の方がかなり波長が波高に対して比較的短い結果となつている。この傾向は従来の実船試験における北大平洋での海象の観測結果と同じ傾向にあるが、この差の生ずる原因としては観測による波長は観界内の海面の平均的なものになる傾向があるのに対して、計算によつて求めた波長は海面の代表的な、あるいは卓越した波の波長を示すことによるものと考えられる。

図 3.7 には観測波長と波高との関係を、実測値は○印で示し、次式で示される波長 λ と波の周期 T との関係を実線で示したものである。

$$\lambda = K \frac{g}{2\pi} T^2$$

K は波のスペクトラムによる係数であり、スペクトラムが狭く、したがつて規則波に近いほど 1 に近い値となる。この図から判断されるように観測値は K が $1/3$ から $2/3$ の範囲内におかれていた。

図 3.8 (1) は風速 V と波高 H_w との関係について観測値を示したものである。WMO による観測記録と比較してみると、風速が比較的小であるが、実測値の方が大きい傾向になつている。同じように波高を風力階級との関係で

示したのが図 3.8(2)である。

図 3.9 は気温、水温および気圧の変化について、航海を通じての計測値を示したものである。気温の最高は約 33°C 、水温の最高は 31°C となっている。

(2) 船体の動揺

船体の動揺については、横揺のみ計測を行なったが、動揺周期と動揺角度との関係を、船と波との出合角度ごとに示してみると図 3.10 のごとくなる。追い波の場合は動揺周期と角度との関係は非常にばらついているが、向い波あるいは横波の場合は、横揺周期は大体一定にしており、前者の場合で $10 \sim 12$ 秒、後者の場合で 6 秒前後となっている。

(3) 横 応 力

オ 1 回の計測を通じて No. 2 Ballast Water Tank 内のトランス底部のもつとも横応力変動の大きいと考えられる実験値を図 3.11 および 3.12 に示した。

すなわち、往航時における最大応力変化の記録として計測 No. 10 および No. 11 における応力の複振巾の値を、復航時における最大応力の値としては計測 No. 25 および No. 3 における計測結果をそれぞれ示した。これによると、往航時の波高は 1.6 m であつたのに対し応力の最大値は 2.2 Kg/mm^2 となっている。また復航時の記録では波高が 8 m 程度であつたのに対して応力の最大値は 3.5 Kg/mm^2 となっている。

したがつて往航時の軽荷状態と復航時の満載状態における応力変化量を比較すると、同じ海象状態では往航の方がかなり大きい値となつていることがわかる。この差を生ずる原因として考えられることは軽荷状態の方が船体の運動が激しく、したがつて動的な水圧変動量が大きいことである。

この横応力の分布はビルジの中央部で最大となつているので、この最大応力を生ずる点について、その頻度分布を表 3.5 に示した。またこの結果から各計測日における応力の最大値、最小値および応力の自乗平均の平方根 $\sqrt{E}$ を計算によつて求めて、この数値を表 3.6 に、波高に対応して $\sqrt{E}$ の値を図 3.13 にそれぞれ示した。

図 3.13 には往航と復航に分類し、さらに船体と波との出合角度に分類して計測値を示してあるが、この結果からも前述のように、往航時における方が復航時におけるよりも、一般に同じ波高に対して応力の変動量が大きいことが明らかである。

このほか、向い波の方が横波あるいは追い波に比べてはるかに大きい応力が生ずる結果がでている。

このように同じ海象でも船体の載貨状態、波と船体との出合角によつて生ずる応力に大きな差を生ずることは主として船体の運動の大小が大きく影響するものと考えられる。

また応力の変動量の絶対値としては、波高 10 m のきわめて荒天と考えられるような海象においても、満載状態においては複振巾で 3.5 Kg/mm^2 にすぎない結果がえられており、この応力の大きさは載貨によるこの部分の静的負荷に比べればかなり小さいものと判断することができよう。

(4) 縦 応 力

前年度の 3 回の計測結果にさらに 2 回の計測値を加えた合計 5 航海の計測における甲板上の船体縦応力をヒストグラムにして図 3.14 に示し、このヒストグラムを直線で近似した式から 1 年間 9 航海として 20 年間にわたって船体に生ずると考えられる応力のヒストグラムの推定を行なった。この結果を同図に一点鎖線で示した。

この 20 年間にわたる応力のヒストグラムが船体の強度にどのような影響を与えるかを検討するために図 3.15 に鋼材の疲労強度曲線を一点鎖線で示し、これとの関係を調べてみた。この結果から判断されることは、この計測結果をもとに推定した船体の縦応力ヒストグラムに応力集中係数 3 をかけたとすると、20 年の間にこの船体の縦応力部材は腐蝕し易い場所では疲労寿命に達することは十分考えられる。

次に毎日の計測応力の自乗平均の平方根 $\sqrt{E}$ を Beaufort Wind Scale に対応して示してみると、図 3.16 のごとくなる。Beaufort Wind Scale は 1 日における 4 時間ごとの観測結果を平均した値をとつ

である。図中○印、△印、●印の区別は応力頻度計の応力段階をそのときの海象状態によつて変化させたので、その応力段階の設定値別に区別したものである。この結果をみると Wind Scale が大きくなるにつれて、次第に $\sqrt{E}$ が大になる傾向を示しており、とくに Wind Scale 7 以上になると急に応力が大きくなっている。

図 3.17 は本実験の計測結果を、規則波中における縦曲げモーメントの計算値と比較したものである。横軸は船表しと波長 λ との比の平方根で縦軸は縦曲げモーメントを無次元化したものである。計測値のうち●印が輕荷状態○印が満載状態の計測値を示すが、この結果は計測値に対応した波長が船長に比してかなり小であるので、計算値との比較があまり適切に行なえないが、 $\sqrt{L/\lambda} = 2.0$ 程度においては、計測値と計算値が大体近い値になっている。

図 3.18 は応力変動の短期分布から求めた自乗平均の平方根 $\sqrt{E}$ と、累積確率密度のパーセントとの関係を求めたもので、これは Beaufort Wind Scale の大きさに分類して、それらの関係を示したが、その結果はいずれの場合も直線上に計測値が分布している。このような関係は米国での Jawahta 号での実験結果の報告と比べることができるが、それによると東京丸の方がかなり小さい応力であると考えることができる。なお Jawahta 号の積貨重量は 52,555 ton である。

図 3.19 は不規則波の向い波中で航行するタンカーの船体中央部の波浪による曲げモーメントの変動量の計算値と実測の値とを比較したものである。縦軸はモーメントの無次元値をとり、横軸は波長 λ をとつたものである。図中実線、点線であらわされている曲線は類似船型タンカーとして、 $C_b = 0.83$ 、 $L/B = 6.0$ 、 $L/d = 17.5$ 、 $B/d = 2.917$ の船が、フルード数 $F_r = 0.15$ における各種の波周期に対する理論値であり、東京丸と近似している船型に対するものである。

実測値の波周期は、船と波との出合周期と船速から近似的に算出したものである。この図では観測値は 80 m 以下の波が多いので、理論曲線において大きく変化する部分になり、誤差を含む実測値との比較からは、一かいにその傾向をつかむことは困難と思われる。

図 3.20 は同じような方法によりタンカーの標準船型に対する波周期と曲げモーメントの関係を、船速の各段階に応じて計算したものおよび出合角度に応じて計算したもので、この計算値を実測値と比較した。同図の上図は船速別に示したものであるが、実測値は計算値を中心として上下にかなりばらついている。同じように下図は出合角度別に計算値を実験値とともに示したものであるが、この結果は両者が比較的よく一致している傾向がみられる。

図 3.21 は波浪曲げモーメントの自乗平均を無次元量であらわしたものを波高と対応して示したものである。図中の曲線は実船が本研究協会でさきに行なつたシアトル丸の結果、点線が同じく大島丸、鎖線は穂高山丸で、それぞれの実験値をプロットした平均曲線である。

○印は東京丸の昭和 41 年 10 月 3 日から 11 月 4 日における航海の一日一回 10 分間の計測による記録から求めたもので、他の船での値に比べて曲げモーメントの値はかなり小さくなっている。東京丸以外の実験例はいずれも北大平洋航路の定期貨物船であつて、東京丸とは大きさ、船種とも大きく異なり、直接比較することはできないと思われるが、それにしても大型船では比較的波浪による縦曲げモーメントは小さくなることは明らかである。

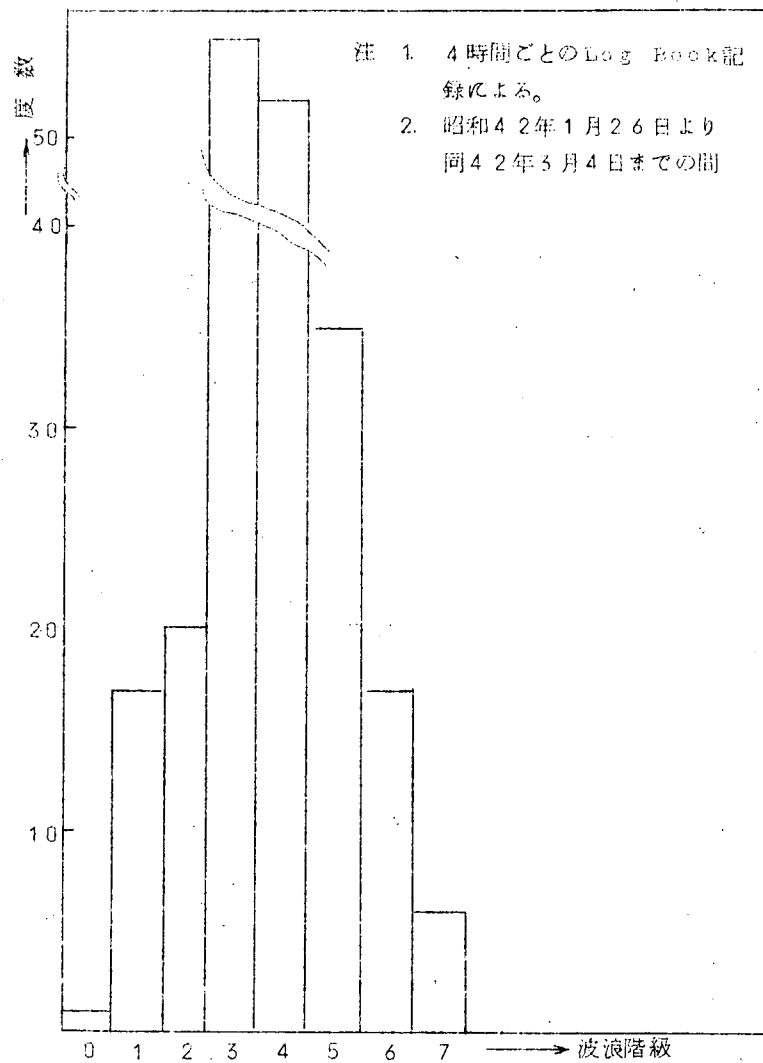


図 3.1 波浪のヒストグラム (第4回計測)

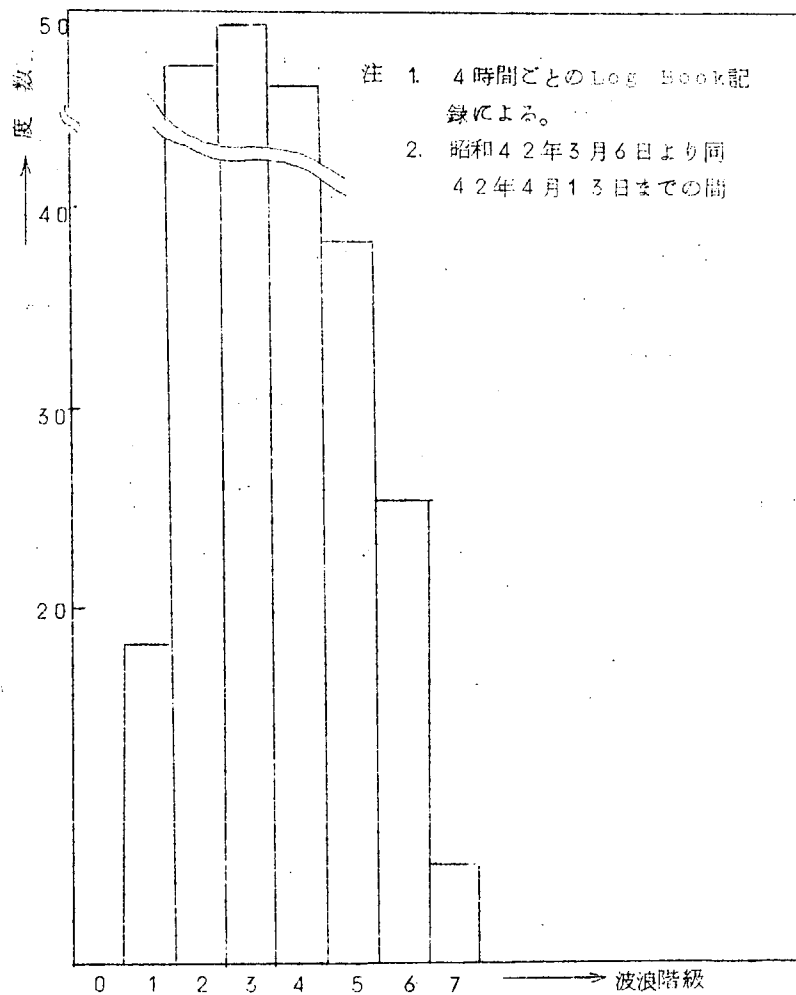


図 3.2 波浪のヒストグラム (第5回計測)

表 3.1 上甲板縦応力頻度分布

計測日	波浪 階級	応 力 範 囲 (kg/mm^2)						
		0 ~ 2.0	2.0 ~ 3.5	3.5 ~ 5.0	5.0 ~ 6.6	6.6 ~ 8.1	8.1 ~ 9.6	9.6 ~ 12.1
42. 1. 27	3	423						
1. 28	5	24,340	489	1				
1. 29	4	28,062	78					
1. 30	6	7,561	82	1	1			
1. 31	5	1,741	3					
2. 1	4	1,296	1					
2. 2	4	561			(15:00 マラッカ海峡入)			
2. 3	3	605	2					
2. 4	4	2,615			(04:15 マラッカ海峡出)			
2. 5	3	2,168						
2. 6	4	8,396	9					
2. 7	4	9,628	129					
2. 8	4	5,485	1					
2. 9	4	10,603	7					
2. 10	4	9,832			(13:30 ベルシヤ湾入)			
2. 11	3	5,248			(17:50 カーク島入港) (13日18:25カーク島入港)			
2. 14	3	975	3					
2. 15	4	676	1					
2. 16	3	1,871						
2. 17	4	10,027	7	3				
2. 18	3	1,013	1					
2. 19	6	3,116	2	1	1			
2. 20	3	2,731						
2. 21	3	1,602						
2. 22	3	275			(05:30~12:15 ENG. STOP) (19:15 マラッカ海峡入)			
2. 23	2	6						
2. 24	1	11			(13:47 マラッカ海峡出)			
2. 25								
2. 26	5	1,228	2					
2. 27	5	10,000	46					
2. 28	6	3,775	171	2				
3. 1	5	3,520	12					
3. 2	3	290						
3. 3	2	142						
3. 4	3	210						
合 計		160,032	1,046	8	2			

表 3. 2 上甲板縦応力頻度分布

計測日	波浪 階級	応 力 範 囲 (Kg/mm^2)						
		0 ~ 2.0	2.0 ~ 3.5	3.5 ~ 5.0	5.0 ~ 6.6	6.6 ~ 8.1	8.1 ~ 9.6	9.6 ~ 12.1
42. 3. 8	4	5,206	2					
3. 9	5	3,382	5	1				
3. 10	6	4,091	17		1			
3. 11	6	7,455	22	1	2			
3. 12	5	3,072	11					
3. 13	3	459		(14:35 マラッカ海峡入)				
3. 14	1	52		(12:42~14:18 ENG. STOP)				
3. 15	1	63		(12:55 マラッカ海峡出)				
3. 16	3	199						
3. 17	3	1,014		(18:38 ドンドラ通過)				
3. 18	2	541						
3. 19	3	1,665		(08:36~11:30 ENG. STOP)				
3. 20	2	584						
3. 21	4	5,928						
3. 22	6	11,234	43	(12:52 ベルシャ湾入)				
3. 23	5	8,995	5	(18:05 カーグ島入港)				
3. 24	2			(入港時 ENG. STOP) (26日 10:30 出港)				
3. 27	3	488						
3. 28	4	4,503						
3. 29	3	918						
3. 30	2	460						
3. 31	3	1,220		(10:40 ドンドラ通過)				
42. 4. 1	3	3,493						
4. 2	3	2,236						
4. 3	4	860		(マラッカ海峡入 00:30)				
4. 4	1	9		(20:42 マラッカ海峡出)				
4. 5	1	13						
4. 6	1	7						
4. 7	3	2,588						
4. 8	4	4,187						
4. 9	6	5,352	493	24				
4. 10	5	10,004	146					
4. 11	4	5,271	7					
4. 12	4	4,711	3					
4. 13	6	9,622	608	13				
合 計		109,932	1,362	39	3			

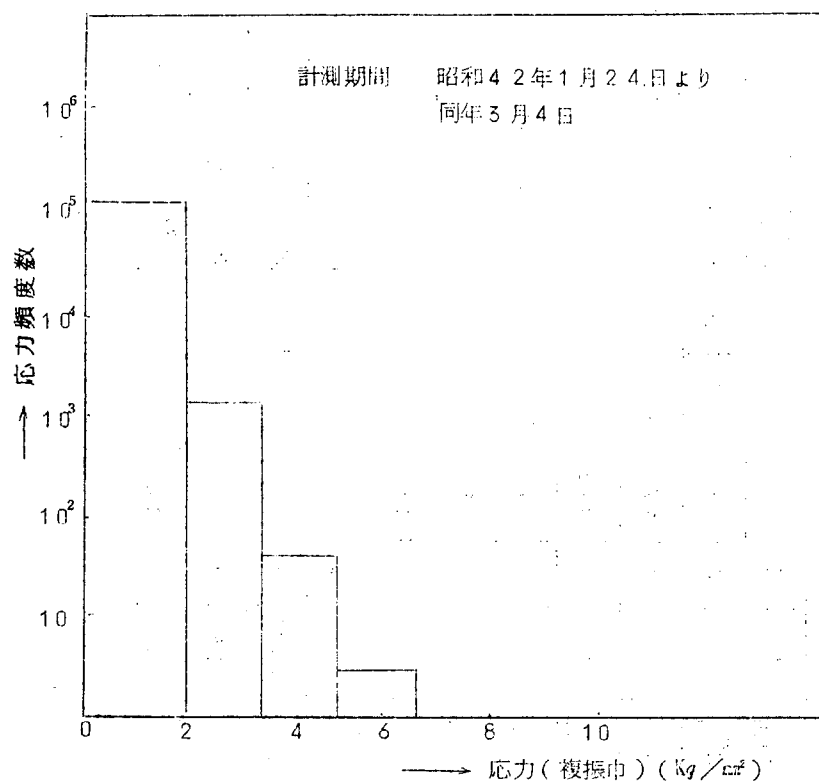


図3.3 縦応力ヒストグラム(上甲板上)(第4回計測)

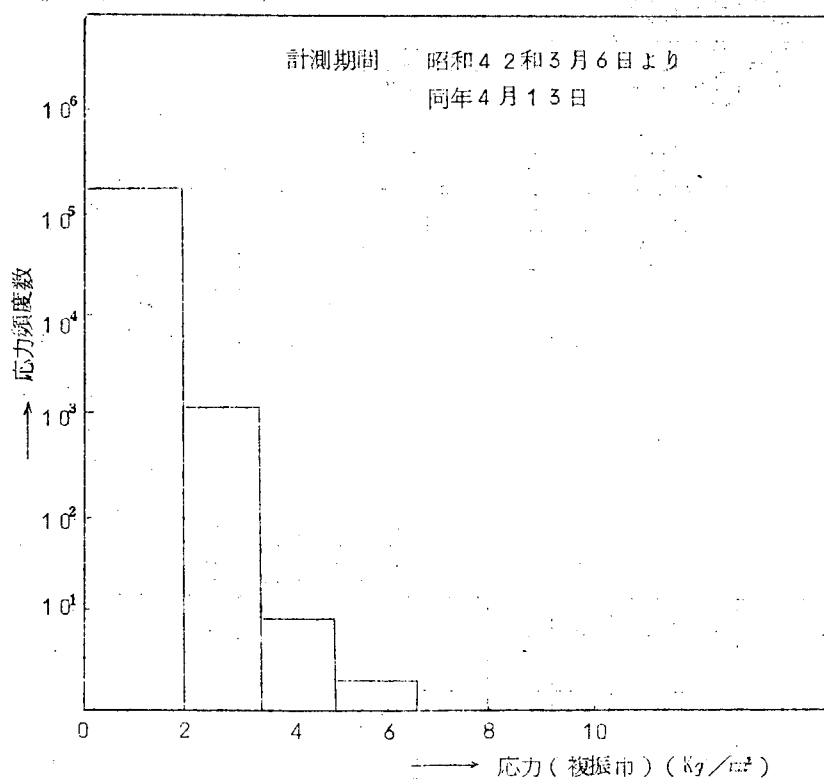


図3.4 縦応力ヒストグラム(上甲板上)(第5回計測)

表3.3.3(1) 海象観測記録 (東京丸 昭和41年10月2日～11月5日)

計測日	天候	計測番号	計測時間	横揺(Deg)		波	浪			* () 内の数字は 風浪の値			風		力	船速 対水 (kts)	プロペラ 回転数	備考
				左	右		うねり方向	波高(m)	波長(m)	周期 (Sec)	波級	対船方向及 び風速(m/s)	絶対風 速(m/s)					
41.10.3	晴たり 曇つたり	1	11:00	2	0	うねり風	(0.3) 0.5	(5) 50	(2.7) 8.4	2	S	3.0	1	17.6	939	小波が小さくはつきりし波がしらはなめ らかに見え砕けてない。		
10.4	"	2	11:25	2	2	風	(0.8) —	(1.0) —	(7.0) —	3	NNW	7.5	4	18.0	940	小波が大きく波がしらは所々だけ始め 海上は白波が点在。		
10.5	晴	3	11:25	0	0	風	(0.5) 0.8	(2.5) 7.0	(3.0) 15.5	4	NE	8.0	4	18.0	942	うろこのようたさざなみができ波がしらは くすれていない。		
10.6	"	4	11:25	1	0	うねり風	(0.8) 2	(8.0) 50.10	(5.6) 10	3	NE	13.0	6	17.3	941	白波が生じ始める。		
10.7	曇	5	11:30	1	0	うねり風	(0.3) 1.5	(5) 50.10	(3.5) 10	2	NE	7.0	4	17.8	945	小なみがある程度で白波は点在しない。		
10.8	"	6	11:30	0	0	うねり風	(0.5) 1.4	(3) 50	(2.7) 13.0	2	WNW	9.0	4	17.5	936	同上		
10.9	"	7	11:30	0	0	風	(0.5) —	(3) —	(1.5) —	1	NNW	1.0	0	17.3	911	うろこのようたさざなみがあるていど。		
10.10	晴	8	11:30	0	0	うねり風	(0.1) 0.5	(0.5) 30	(1.8) 6.0	1	ENE	0.5	1	18.0	973	同上		
10.10	晴たり 曇つたり	9	13:30	7	5	風	(0.4) 1.5	(3) 50	(4.0) —	5	SSW	7.0	5	16.7	941	白波多し		
10.11	"	10	11:30	7	5	風	(0.4) 1.5	(3) 40	(4.0) 8.0	5	SSW	8.5	5	17.2	943	同上		
10.11	雨	(特)1	17:00	10	8	風	(0.4) 1.6	(3) 40	(2.2) 7.2	5	SW	10.0	5	16.5	942	同上		
10.12	晴たり 曇つたり	11	11:30	5	2	風	(0.8) 3.0	(2.0) 50	(4.0) 15.5	5	WSW	7.5	4	17.0	940	同上		
10.13	"	12	11:30	1	0	うねり風	(1.5) 3.0	(3.0) 50	(2.5) 10.0	4	WSW	9.0	5	17.2	941	うねりと風浪が判別しにくい海面に白波 が点在。		
10.14	曇	13	11:30	2	1	風	(1.0) —	(2.0) —	(2.2) —	3	WSW	5.0	3	17.0	938	小波が大きくなつたていど 白波はほとんどない。		
10.15	晴	14	11:30	1	1	うねり風	(0.3) 1.2	(3.5) 30	(1.2) 5.1	3	NNW	5.0	3	17.0	937	同上		
10.16	"	(特)2	11:30	1	1	風	(0.5) —	(1.0) —	(1.6) —	3	NNW	7.0	4	16.5	943	同上		
10.17	"	15	11:00	0	0	風	(0.5) —	(1.0) —	(1.5) —	2	W	3.0	2	16.2	940	同上		
10.21	"	16	11:30	0	0	うねり風	(0.1) 0.5	(0.5) 20	(5) —	1	S	2.0	1	16.5	946	同上		

表3.3(2) 海象観測記録 (東京丸 昭和41年10月2日～11月5日)

計測日	天候	計測番号	計測時間	横揺(Deg)		波			浪			風		船対水速(kts)	プロペラ回転数	備考
				左	右	うねり方向	波高(m)	波長(m)	周期(Sec)	波級	対話方向及び風速(m/s)	絶対風速	風力階級			
10.22	晴	17	11:30	1	0	風	(0.5)	(5)	(3)	3	NNE	9.0	4	18.6	94.8	白波点在
10.23	晴たり曇ったり	18	11:30	1	1	風	(0.5)	(3)	(1.8)	3	ENE	3.0	3	17.0	93.1	小波が大きくなつた程度
10.24	曇	19	11:30	0	0	風	(0.5)	(10)	(2.7)	1	N	5.5	0	17.0	94.3	小波がある程度
10.25	晴たり曇ったり	20	11:30	0	0	風	(0.1)	(1.5)	(1.1)	2	NW	7.5	2	17.25	94.5	同上
10.26	"	21	11:30	2	1	風	(0.4)	(8)	(2.7)	3	W	4.5	2	17.5	94.9	小波が大きくなつた程度
10.27	雨	22	11:30	2	1	風	(0.5)	(10)	(2.5)	2	W	8.0	2	17.0	94.2	同上
10.28	曇		11:30	0	0	風	(0.6)	(8)	(3.8)	1	ENE	5.5	1	17.25	94.0	小波の小さいのがある程度
10.29	晴たり曇ったり		11:30	0	0	風	(0.2)	(15)	—	2	WSW	8.0	2	15.0	92.0	同上
10.30	"		11:30	0	0	風	(0.4)	(5)	—	2	SSE	9.0	2	17.25	94.5	同上
10.31	"	23	11:30	0	0	風	(3)	(15)	(4.2)	5	NNE	18.0	6	16.2	94.0	風浪強く白波多し
11.1	曇	24	11:30	2	0	風	(25)	(30)	(8.4)	5	N	16.0	5	16.14	93.5	同上
"	"	25	23:45	2	1	風	(6)	(40)	(10.0)	7	N	18.5	6	14.0	91.5	船首に青波が打上がる。白波多く波頭がくずれ散る
11.2	"	25	10:20	2	2	風	(6)	(40)	11	7	NNE	25.5	7	12.0	88.5	同上
11.3	"	26	11:45	0	0	風	(1.2)	(10)	(4.2)	5	ENE	16.0	5	17.0	94.0	白波多し
11.4	"		12:00	1	0	風	(25)	(10)	—	4	ENE	15.0	4	17.0	93.3	同上
11.5	晴		10:15	1	0	風	(1.0)	(8)	—	4	NNE	15.0	4	16.0	89.1	同上

注:.....計測番号 5. 12. ⑤ --- 2は応力(B.W.T)を記録せず

表3.4 Classification of Operating Condition and Weighting Factors

○内の数字は計測番号

Ship Speed (Knot)		Heading Angle (C)		Wave Hight (m) (A)				
				Class 1	2	3	4	5
		Class	Range	0 ~ 1.5 ^m	1.5 ~ 2.5 ^m	2.5 ~ 3.5 ^m	3.5 ~ 5.5 ^m	5.5 ^m 以上
class 3	10~15	1	H					②
		2	Q.H					④-3
		3	B					
		4	Q.F					
		5	F					
4	15~20	1	H	⑥ ⑬		⑫		
		2	Q.H	⑦ ⑧ ⑭ ⑮-2 ⑮ ⑯ ⑰ ⑱	⑨ ⑩ ⑪-1	⑪	⑳ ㉑ ㉒	
		3	B	⑰				
		4	Q.F	① ② ⑤ ㉑ ㉒ ㉓	④			
		5	F	③				

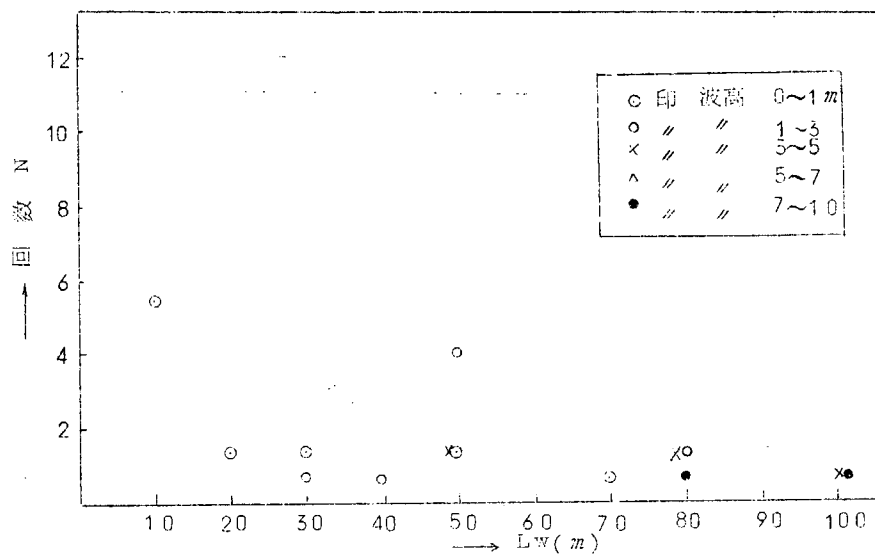


図 3.5 一航海 (34 日間) における定時計測時の波高と波長のグラフ

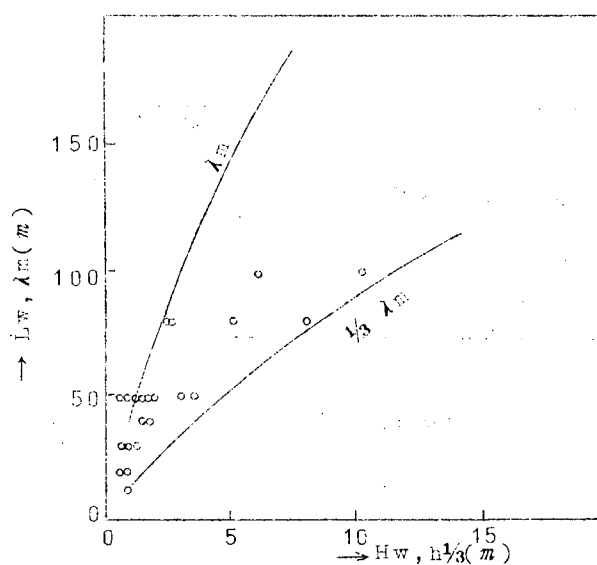


図 3.6 波高と波長の関係

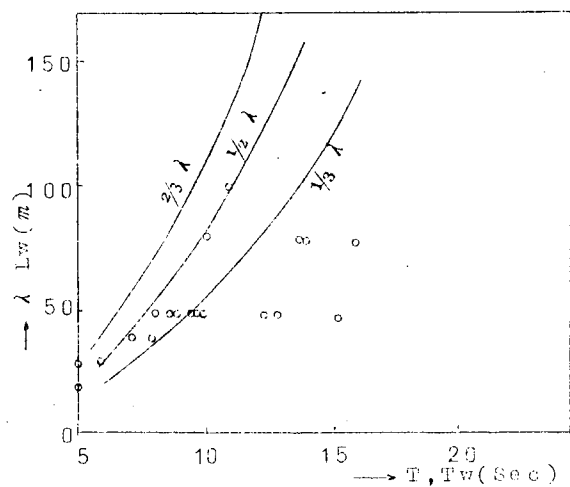


図 3.7 波長と周期の関係

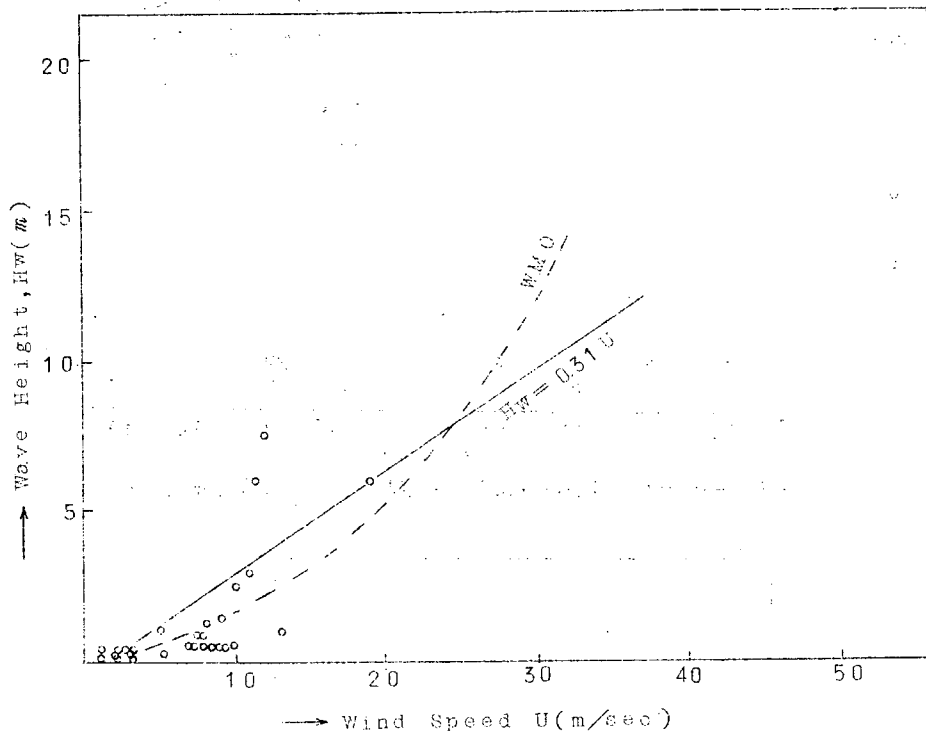


図 3.8(1) 風速と波高の関係

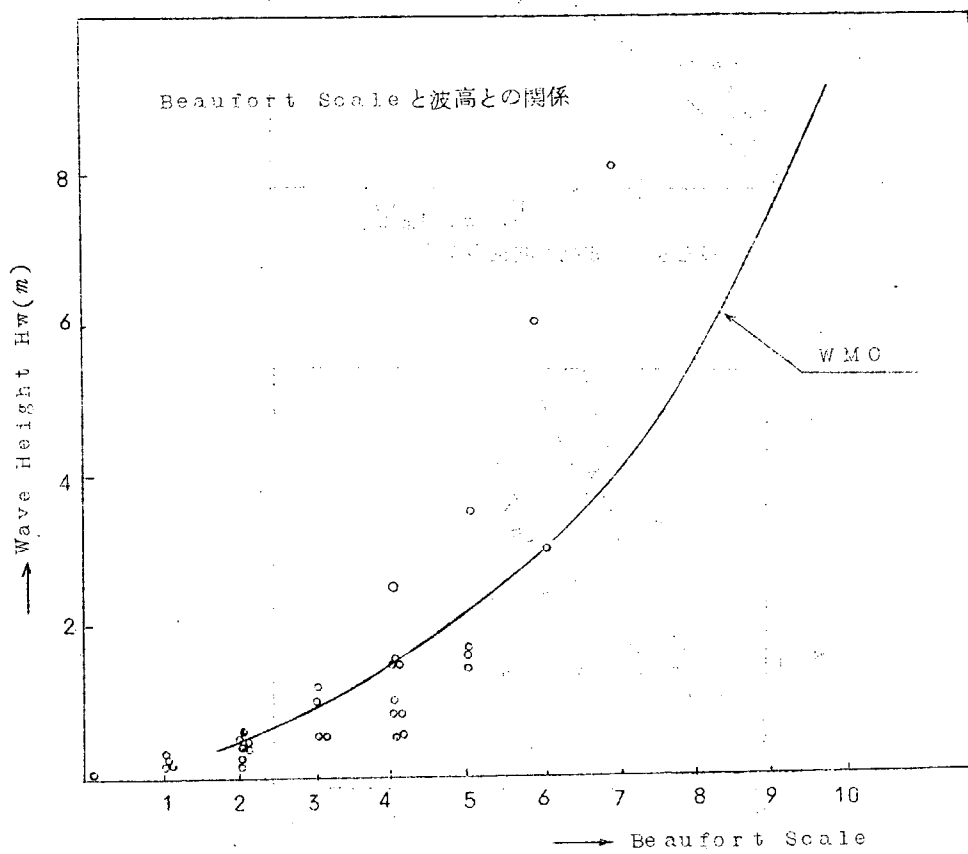


図 3.8(2) 風速と波高の関係

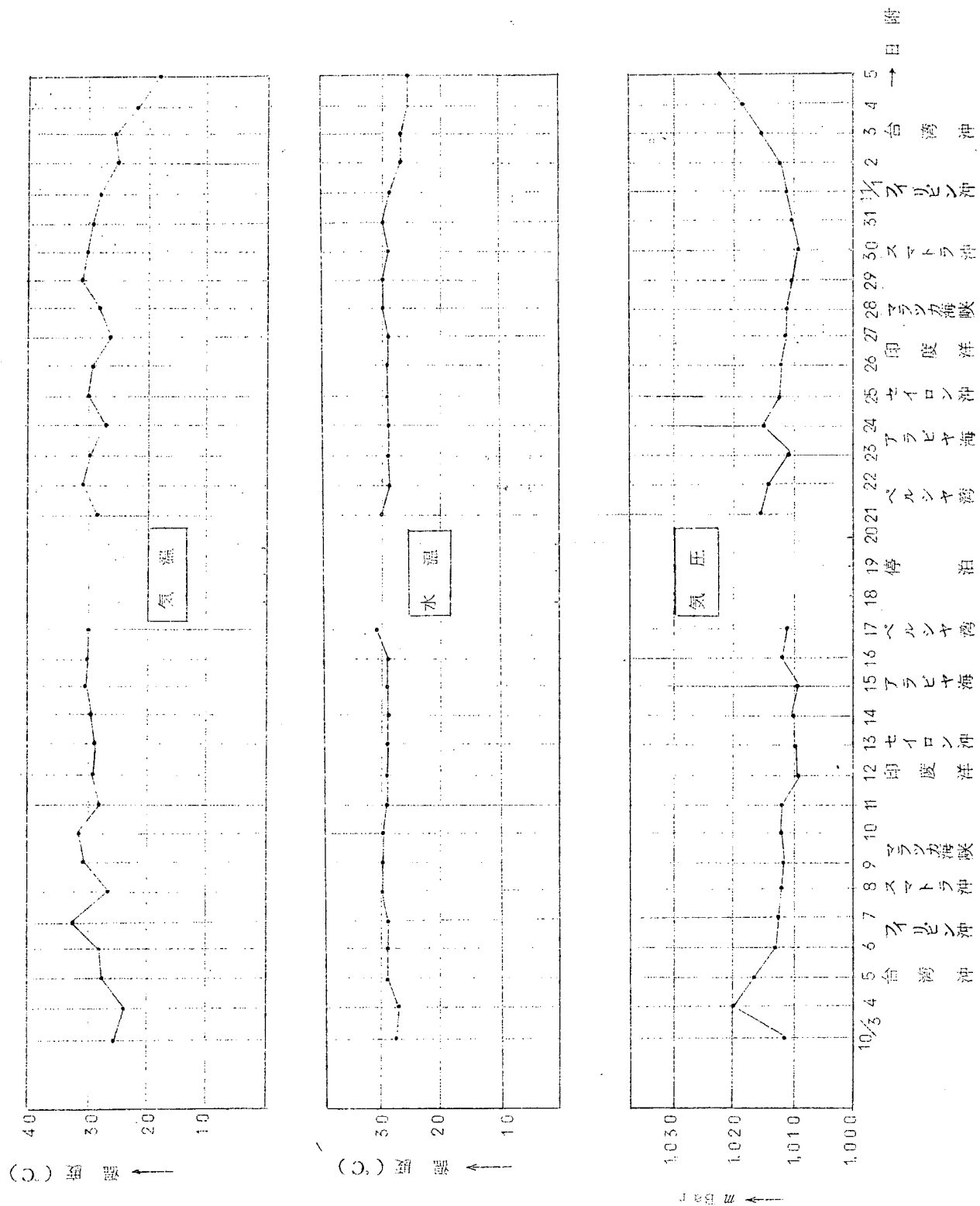


図3.9 気温、水温および気圧の記録

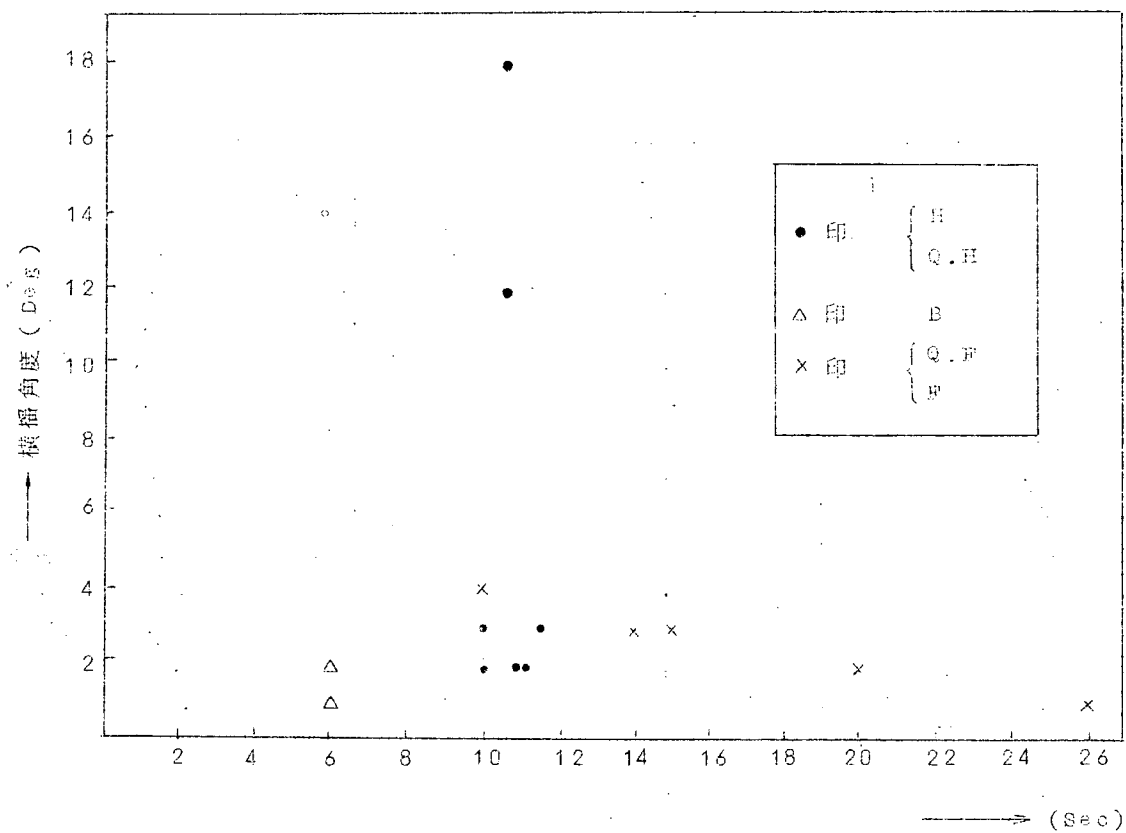


図3.10 出合角による横揺分布図

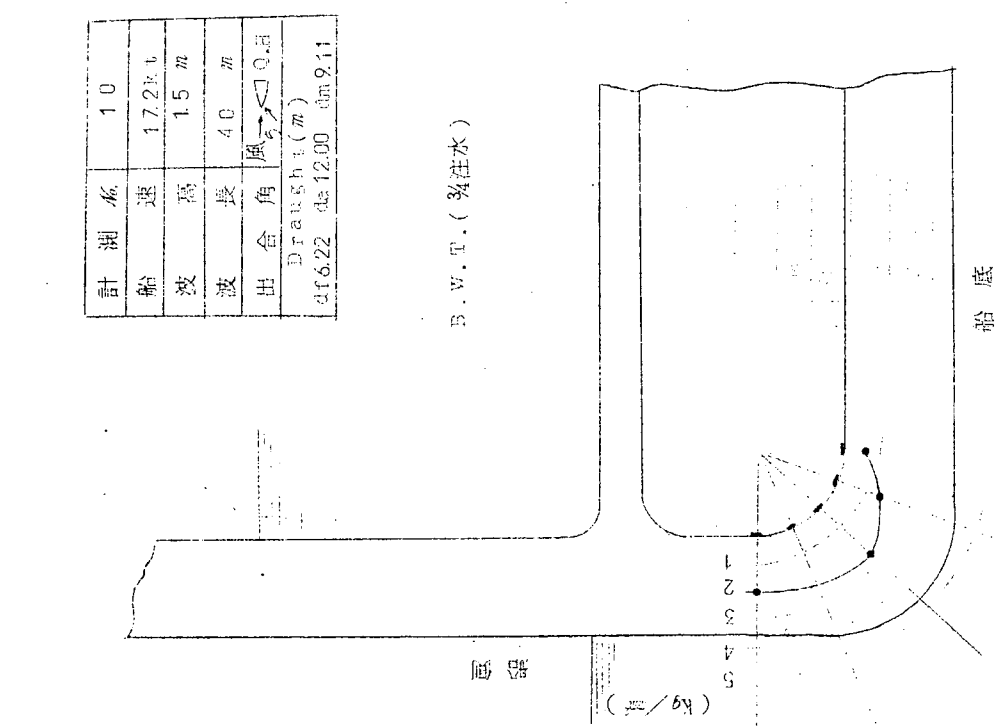
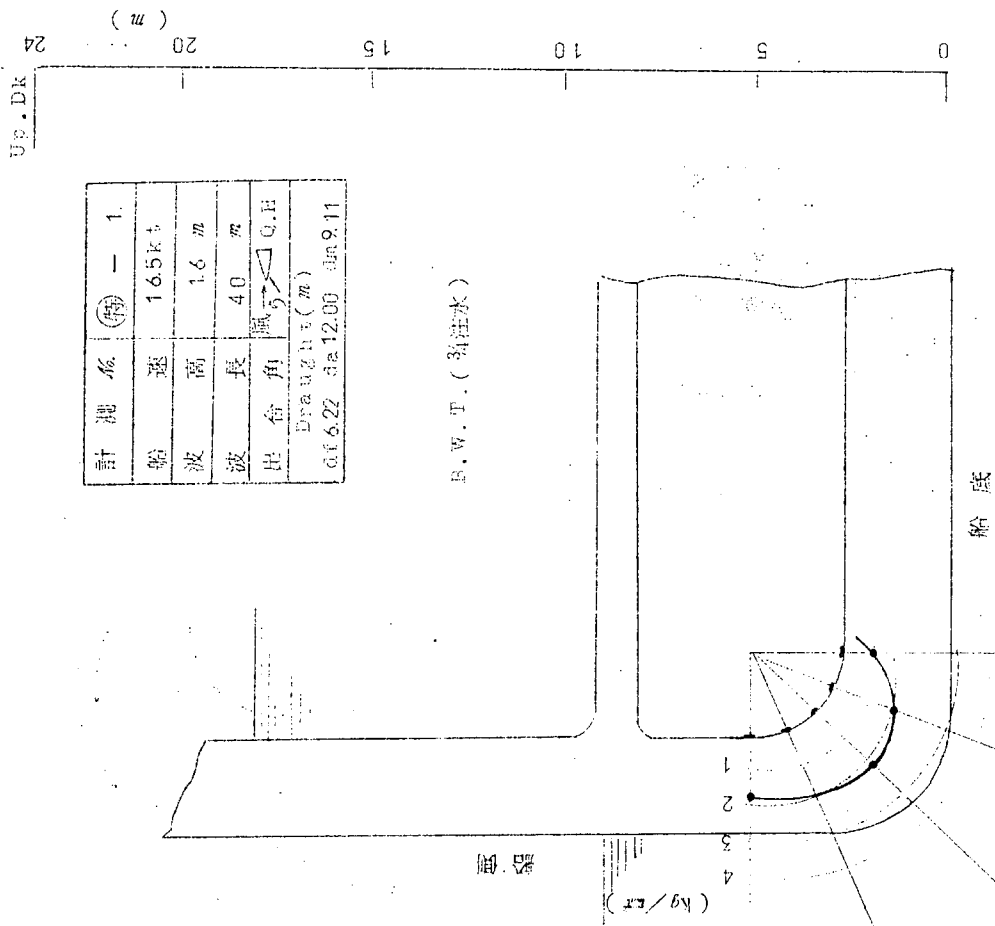


图3.11 横断力分布 (往航)

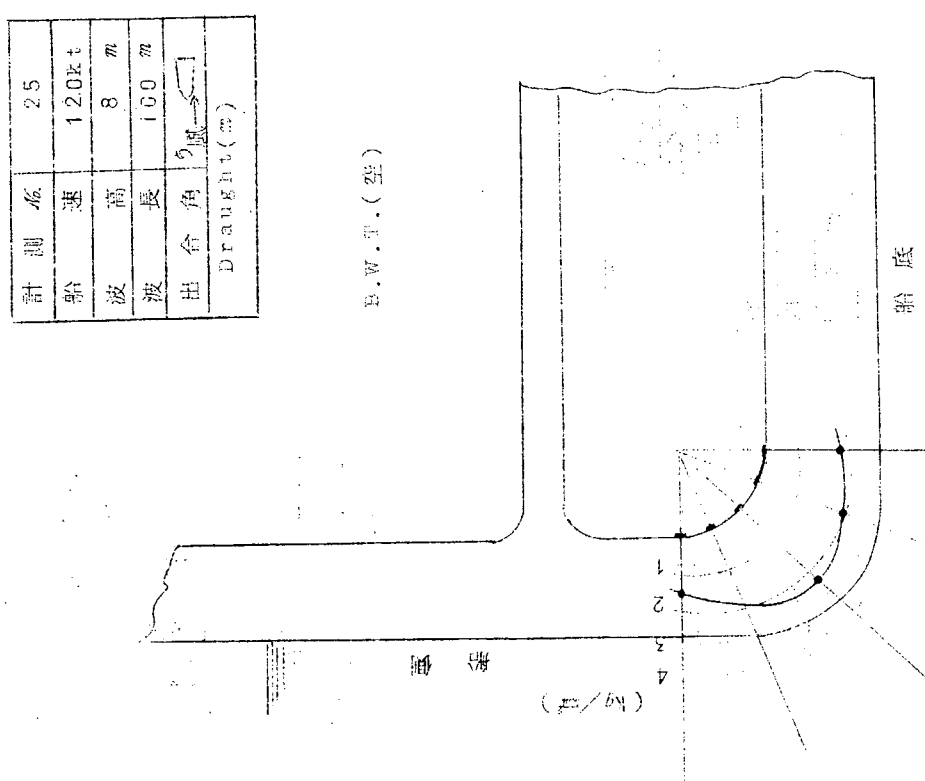
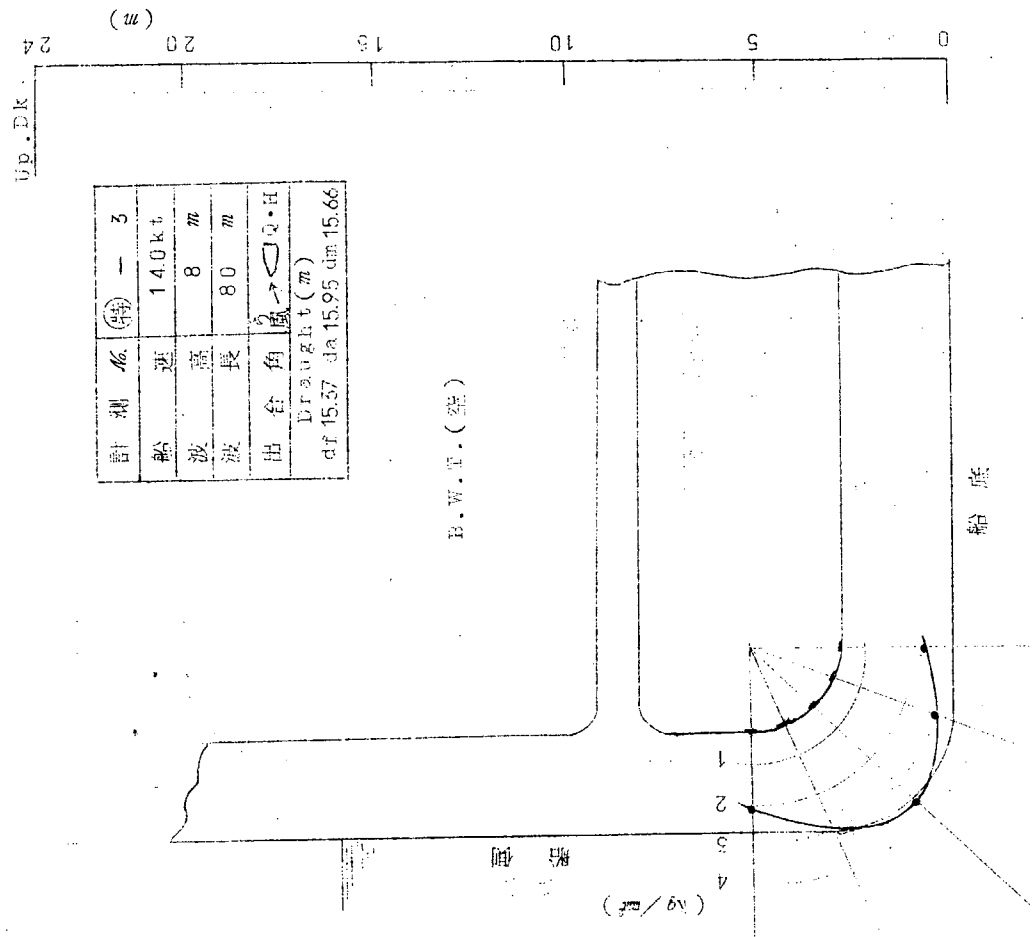


圖3.12 橫應力分布 (復航)

表3.5 Ballast Water Tank 内の応力頻度分布

計測日	波浪 階級	応 力 範 囲 (Kg/mm^2) 複 振 巾															
		0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0	1.0 ~ 1.2	1.2 ~ 1.4	1.4 ~ 1.6	1.6 ~ 1.8	1.8 ~ 2.0	2.0 ~ 2.2	2.2 ~ 2.4	2.4 ~ 2.6	2.6 ~ 2.8	2.8 ~ 3.0	3.2 ~ 3.5
4.1.10. 3	2	69	40	13	6												
10. 4	3	23	12	1													
10. 5	4	6	33	26	6												
10. 6	4	35	14														
10. 8	4	57	2														
10. 9	0	35															
10.10	1	27															
10.11	5	1	21	19	33	25	14	5	3								
⊕ 10.11	5	1	5	11	26	14	12	10	14	4	6	1					
10.12	5	0	4	8	11	5	13	14	20	9	2	1					
10.14	3	13	66	9	0	1	1										
10.15	3	20	52	12	1												
10.17	2	37															
10.21	1	102	17														
10.22	3	36															
10.23	3	38	56	10													
10.24	1	58	13														
10.25	2	12	45	21	1												
10.26	3	28	42	7													
10.27	2	32	30	4													
10.31	5	1	30	83	51	23	15	3	2								
11. 1	5	3	29	40	41	53	28	36	11	3	5	0	1				
11. 2	7	2	13	13	22	26	25	29	17	13	14	7	3	2		1	
⊕ 11. 2	7	8	17	14	17	23	27	27	23	9	13	10	5	6	1		2
11. 3	5	29	109	88	32	9	2										
合 計		673	650	379	247	179	137	124	90	38	40	19	9	8	1	1	2

表3.6 Ballast Water Tank 内の横応力の $\sqrt{E}$ 、最大値、平均値

Operating Condition 船速 出合角	計測点		$\sqrt{E}$	最大値	平均値	波高(m)
△ (1.4.4)	10/3	1	0.279	0.77	0.238	0.5
△ (1.4.4)	10/4	2	0.190	0.40	0.170	0.8
□ (1.4.5)	10/5	3	0.397	0.75	0.357	0.8
△ (2.4.4)	10/6	4	0.187	0.32	0.166	2.0
○ (1.4.1)	10/8	6	0.110	0.17	0.104	1.5
● (1.4.2)	10/9	7	0.032	0.10	0.050	0.5
● (2.4.2)	10/10	8	0.055	0.10	0.058	0.5
● (2.4.2)	10/10	9	0.876	1.73	0.825	1.5
● (2.4.2)	10/11	10	0.869	0.20	0.793	1.5
● (2.4.2)	10/11	特-1	1.307	2.22	1.210	1.6
● (3.4.2)	10/12	11	1.239	1.99	1.165	3.0
○ (1.4.1)	10/14	13	0.330	1.10	0.297	1.0
○ (1.4.2)	10/15	14	0.297	0.66	0.275	1.2
○ (1.4.2)	10/17	15	0.055	0.11	0.063	0.5
○ (1.4.2)	10/21	16	0.141	0.31	0.133	0.5
× (1.4.3)	10/22	17	0.032	0.11	0.063	0.5
○ (1.4.2)	10/23	18	0.286	0.57	0.255	0.8
○ (1.4.2)	10/24	19	0.195	0.36	0.162	0.5
△ (1.4.4)	10/25	20	0.348	0.58	0.327	2.0
△ (1.4.4)	10/26	21	0.243	0.56	0.229	2.5
△ (1.4.4)	10/27	22	0.243	0.50	0.223	1.2
○ (4.4.2)	10/31	23	0.665	1.56	0.615	3.5
○ (4.4.2)	11/1	24	0.953	1.97	0.873	5.0
(5.3.2)	11/1	特-3	1.315	3.48	1.127	8.0
(5.3.1)	11/2	25	1.283	2.83	1.164	10.0
○ (4.4.2)	11/3	26	0.475	1.14	0.417	5.0
○: 船速 15~20 kt 出合角 Head ●: " " Q.H ×: " " Beam △: " " Q.F □: " " Following						

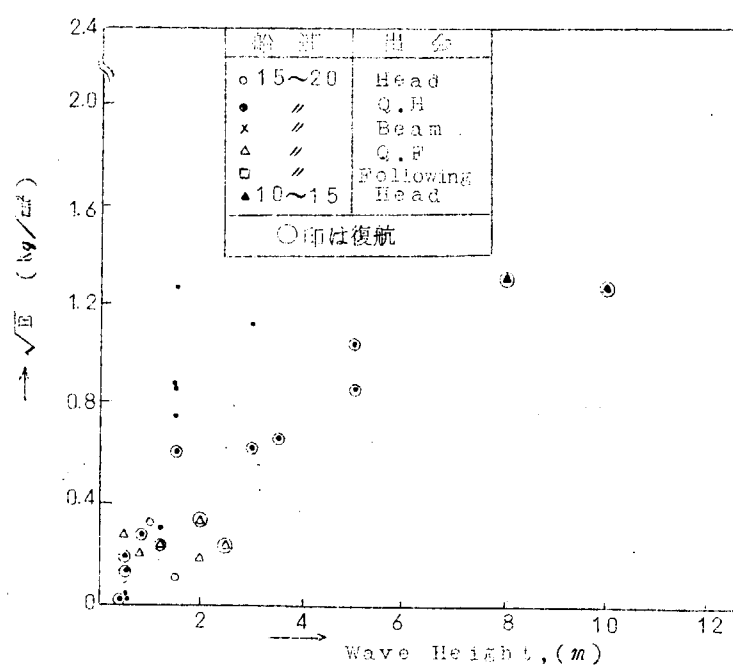


図 3.13 波高と横応力の $\sqrt{\sigma}$ の関係

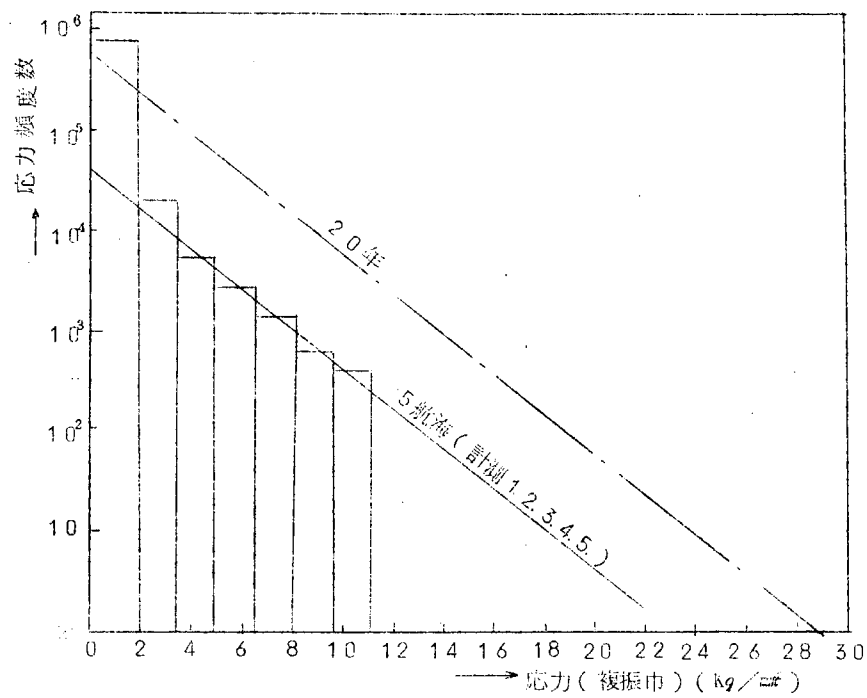


図 3.14 縦応力ヒストグラム

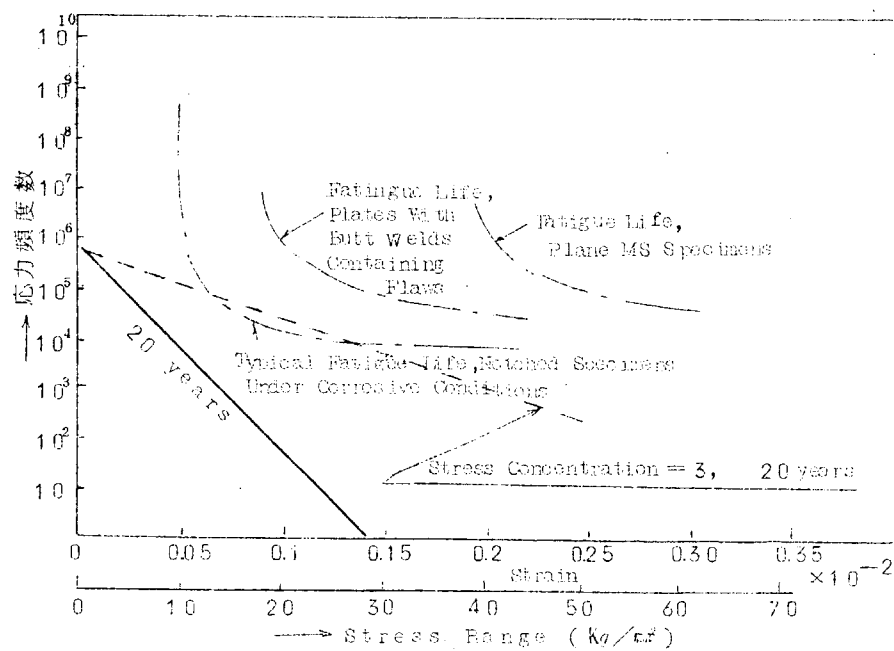


図 3.15 縦応力頻度と疲労寿命

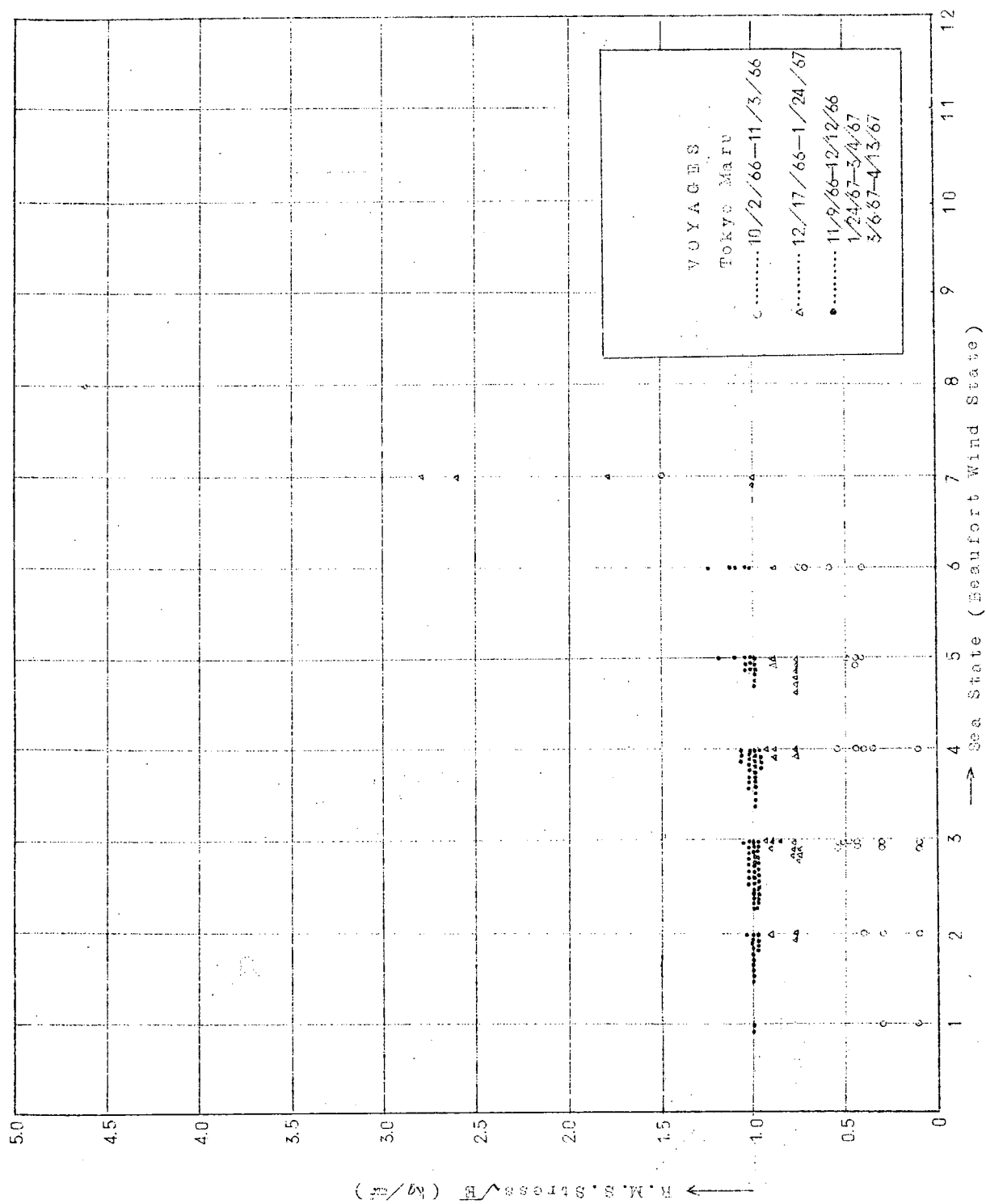


図3.16 Beaufort Wind State と $\sqrt{E}$ の関係

“TOKYO MARU” Longitudinal Stress

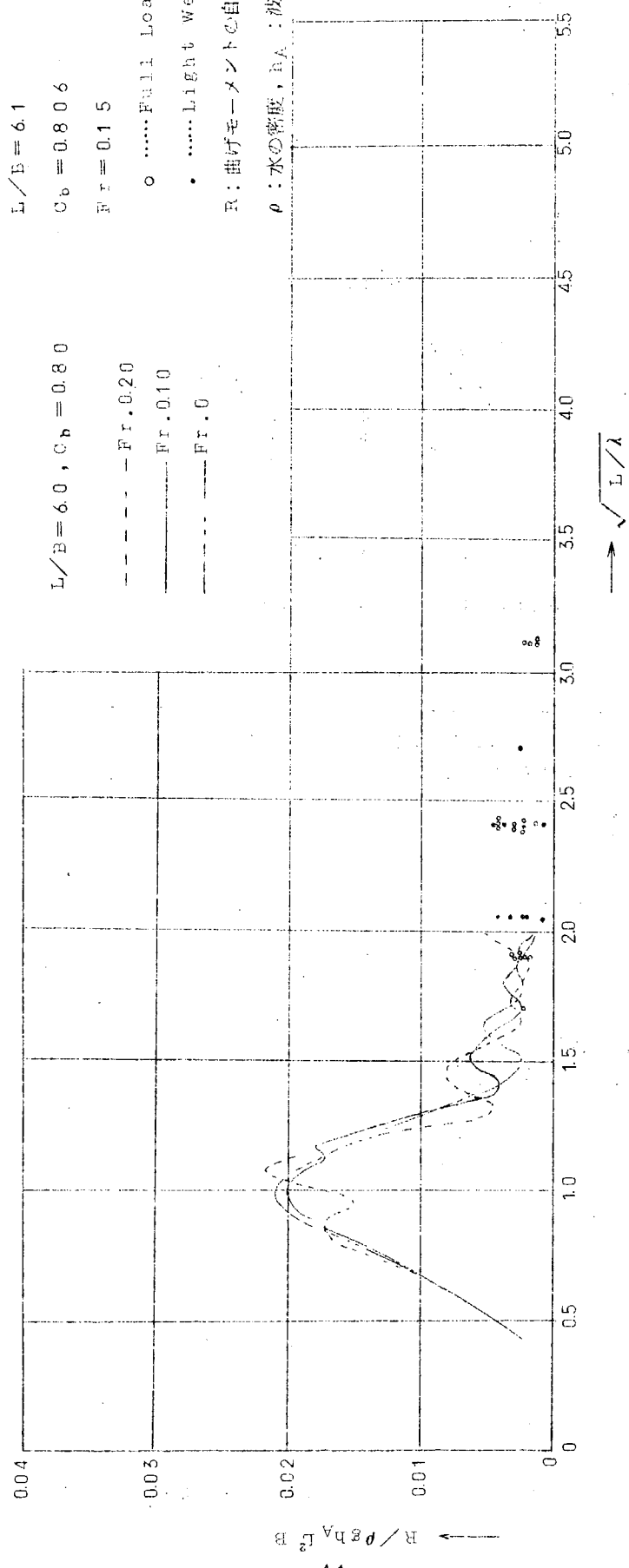


図5.17 $\sqrt{L/\lambda}$ と縦曲げモーメントの関係

SHIP
T/T "JAWACHTA"
Observed probability
distributions within
wind groups.
Normal prob. paper

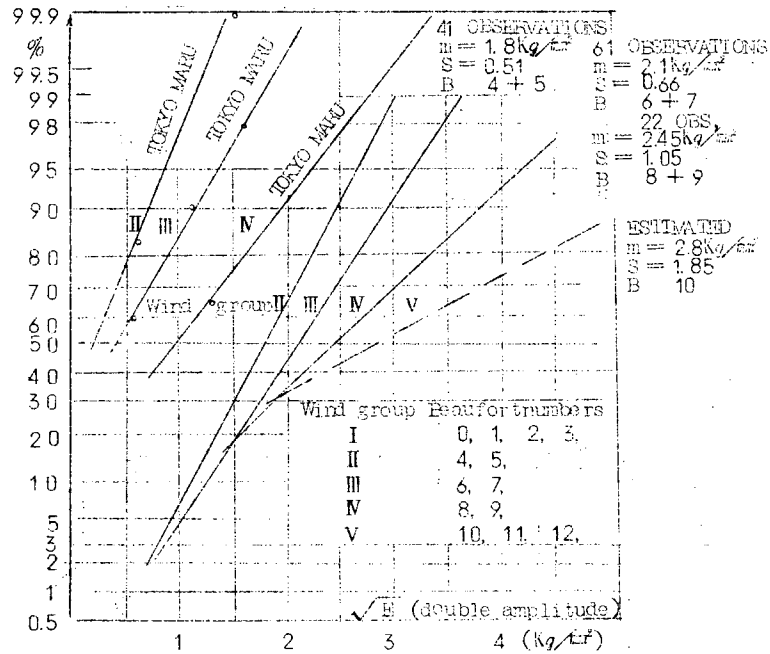


図3.18 縦応力の累積確率密度

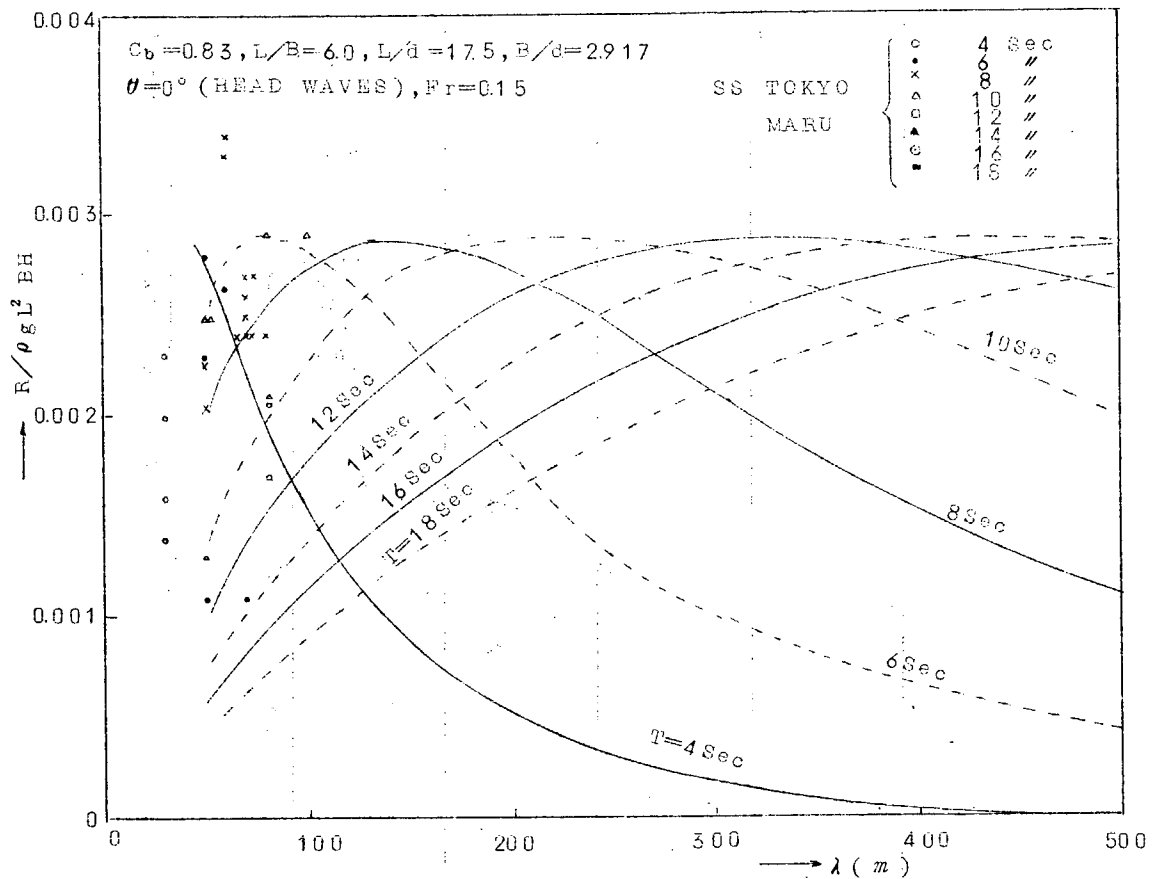


図 3.19 不規則波中の標準曲げモーメント曲線との比較

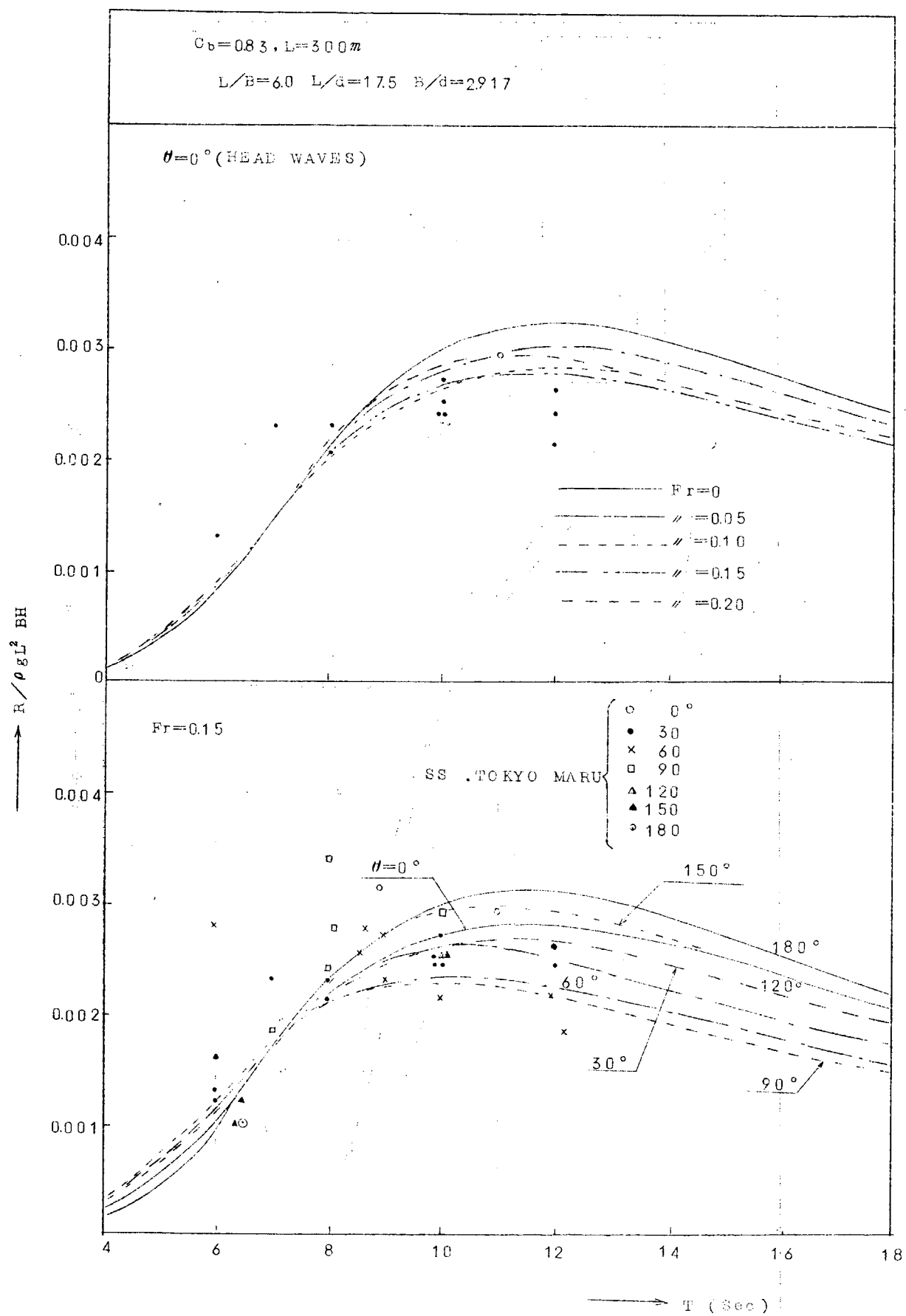


図 3.20 不規則波中の標準曲げモーメント曲線との比較

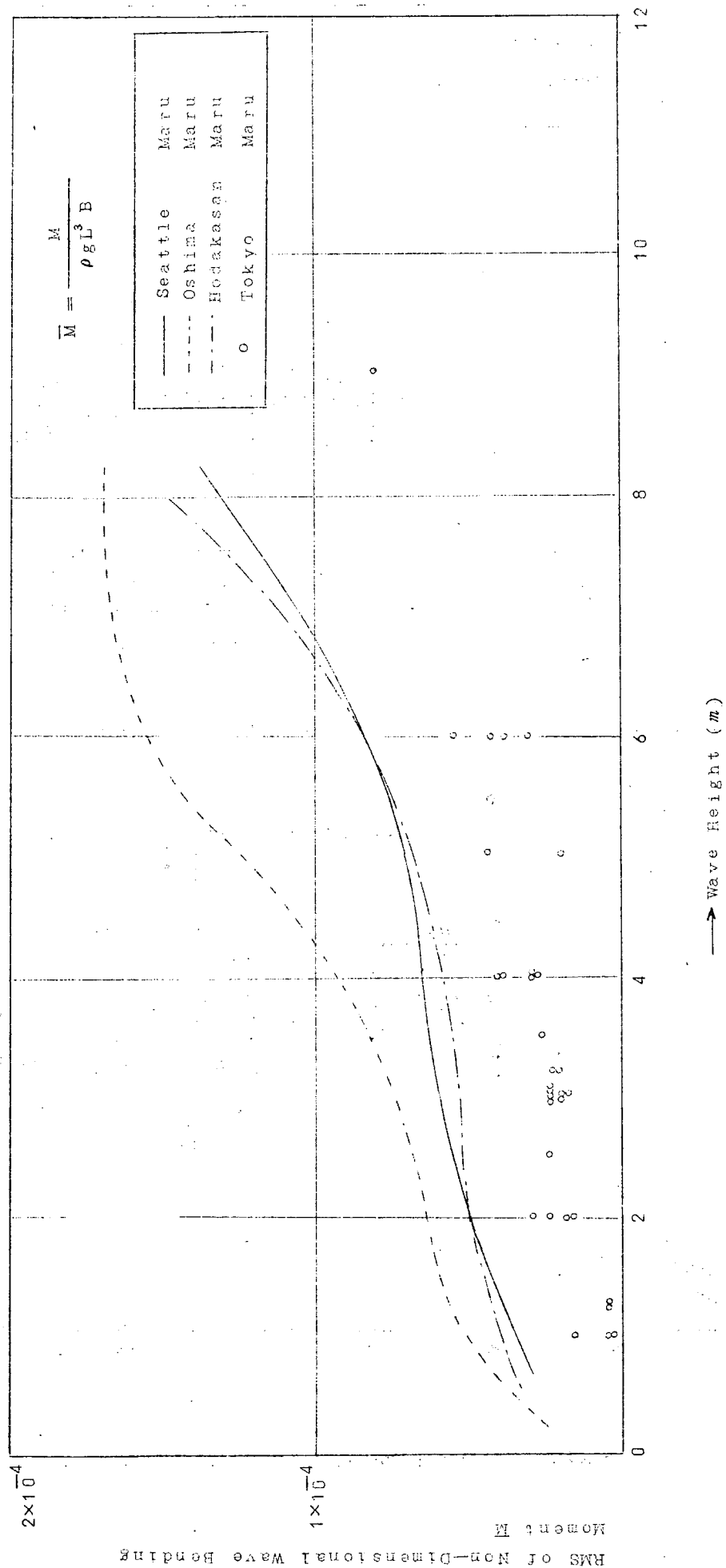


図3.2.1 波高と縦曲げモーメントの無次元量のR.M.Sとの関係

4. む す び

昨年度に引続いて、大型油送船「東京丸」(150,000 T. D. W)と「明扇丸」(152,000 T. D. W)による航海中の波浪曲げモーメントおよび曲げ応力の頻度計測、ならびに「明扇丸」における横部材応力およびその頻度の計測結果の概略を報告した。

本報告は3ヶ年継続研究の第2年度の結果であつて、現在も解析作業継続中であるが、総合的な結論を下すにはなお資料不十分といわざるを得ない。次年度も「明扇丸」による1航海と中間程度の大きさの油送船による数航海の計測を計画中で、最終結論は次年度報告に譲りたい。

油送船における実船計測については、経費や労力以外にもいろいろの問題があり、実験の機会を得ることに困難が多いので、データ蓄積がなかなかはかどらないのは残念である。

最近、電子計算機によつて波浪中の船体応答を計算するプログラムも各種開発され、任意の船型について波浪条件を与えれば荷重頻度も近似的に類推できるようになつてきた。しかし、油送船については実測資料がきわめて乏しく、この計算の近似度を確認することができない現状で、一層のデータの蒐集が渴望されている。

本年度の計測実施について、得がたい機会を提供され絶大な協力を賜つた日本船主協会、東京タンカー会および明治海運協の各位に対して厚く感謝の意を表する次第である。