

本調査研究はモーター・ボート競走公益資金による
（財）日本船舶振興会の補助金を受けて実施したものである

研究資料 No. 397

第207研究部会
船殻構造の強度評価と管理目標の
定量化の調査研究
成 果 報 告 書

平成5年3月

社 団 法 人
日 本 造 船 研 究 協 会

はしがき

本報告書は、平成2年度から4年度に日本船舶振興会の補助事業として、日本造船研究協会第207研究部会において実施した「船殻構造の強度評価と管理目標の定量化の調査研究」の3ヶ年の研究成果をとりまとめたものである。

第207研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	藤田 謙(東京理科大学)(H.2~4)	町田 進(東京大学)(H.2~4)
代表幹事	大石 剛(三井造船)(H.2~4) 中田 宣久(三井造船)(H.4)	野本 敏治(東京大学)(H.2~4)
委員	上田 幸雄(大阪大学)(H.2~4) 大坪 英臣(東京大学)(H.2~4) 板垣 浩(横浜国立大学)(H.2~4) 室津 義定(大阪府立大学)(H.2~4) 真能 創(防衛大学校名誉教授)(H.2~4) 恵美 洋彦(日本海事協会)(H.2~4) 堀 徹(日立造船)(H.2~4) 鴨井 紀之(川崎重工業)(H.2) 谷口 友一(川崎重工業)(H.2~4) 飯島 正明(住友重機械工業)(H.2~4) 後川 理(石川島播磨重工業)(H.2~4) 井上 修(常石造船)(H.2~4)	永元 隆一(東海大学)(H.2~4) 辻 勇(九州大学名誉教授)(H.2~4) 井上 肇(船舶技術研究所)(H.2~4) 仁保 治(三井造船)(H.2~4) 関浜 昌弘(日立造船)(H.2~4) 佐藤 博一(日本鋼管)(H.2~3) 後藤 隆昭(日本鋼管)(H.4) 前田 恰(石川島播磨重工業)(H.2~4) 伏見 彰(三菱重工業)(H.2~4) 渡辺 孝和(三井造船)(H.4)

幹事会委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	大石 �剛(三井造船)(H.2~4) 中田 宣久(三井造船)(H.4)	堀 徹(日立造船)(H.2~4)
委員	仁保 治(三井造船)(H.2~4) 後川 理(石川島播磨重工業)(H.2~4) 鴨井 紀之(川崎重工業)(H.2) 谷口 友一(川崎重工業)(H.2~4) 飯島 正明(住友重機械工業)(H.2~4) 関浜 昌弘(日立造船)(H.2~4) 川野 始(三菱重工業)(H.2~4)	渡辺 孝和(三井造船)(H.4) 前田 恰(石川島播磨重工業)(H.2~4) 佐藤 博一(日本鋼管)(H.2~3) 後藤 隆昭(日本鋼管)(H.4) 伏見 彰(三菱重工業)(H.2~4)

ワーキンググループ1 委員名簿(平成2年度～4年度)

(敬称略、順不同)

主	査 大坪 英臣(東京大学)(H.2~4)	
幹	事 仁保 治(三井造船)(H.2~4)	
委	員 都 井 裕(東京大学)(H.2~4)	矢 尾 哲也(広島大学)(H.2~4)
	遠 藤 久 芳(船舶技術研究所)(H.2~3) (テクノス-パ-ライナ)(H.4)	山 下 慎一(日本海事協会)(H.2~4)
	小 林 雅 志(三井造船)(H.2~4)	永 浜 信 一(日立造船)(H.2~4)
	川 井 浩 生(住友重機械工業)(H.2~3)	大 石 剛(三井造船)(H.2~4)
	九 嶋 孝 繁(住友重機械工業)(H.4)	中 田 宣 久(三井造船)(H.4)
協 力 者	北 村 充(広島大学)(H.2~4)	

ワーキンググループ2 委員名簿(平成2年度～4年度)

(敬称略、順不同)

主	査 野 本 敏 治(東京大学)(H.2~4)	
幹	事 堀 徹(日立造船)(H.2~4)	
委	員 角 洋一(横浜国立大学)(H.2~4)	豊 貞 雅 宏(九州大学)(H.2~4)
	今 井 史 彦(日本海事協会)(H.2~4)	谷 川 雅 之(日立造船)(H.2~4)
	渡 辺 孝 和(三井造船)(H.2~4)	海 野 誠(川崎重工業)(H.2~4)
	伊 藤 譲(石川島播磨重工業)(H.2~4)	大 石 剛(三井造船)(H.2~4)
		中 田 宣 久(三井造船)(H.4)

ワーキンググループ3 委員名簿(平成2年度～4年度)

(敬称略、順不同)

主	査 町 田 進(東京大学)(H.2~4)	
幹	事 後 川 理(石川島播磨重工業)(H.2~4)	
委	員 富 田 康 光(大阪大学)(H.2~4)	永 元 隆 一(東海大学)(H.2~4)
	的 場 正 明(東京大学)(H.2~4)	深 沢 塔 一(東京大学)(H.2~3) (金沢工業大学)(H.4)
	河 辺 寛(防衛大学校)(H.2~4)	井 上 肇(船舶技術研究所)(H.2~3)
	板 垣 浩(横浜国立大学)(H.2)	熊 野 厚(日本海事協会)(H.2~4)
	山 本 規 雄(日本海事協会)(H.2)	福 岡 哲 二(三井造船)(H.2~4)
	森 川 正 夫(日本鋼管)(H.2~3)	武 田 裕(石川島播磨重工業)(H.2)
	山 本 聰(日本钢管)(H.3~4)	楠 本 裕 己(石川島播磨重工業)(H.3)
	川 野 始(三菱重工業)(H.2~4)	真 鍋 真 一(石川島播磨重工業)(H.4)
		大 石 剛(三井造船)(H.2~4)
		中 田 宣 久(三井造船)(H.4)

ワーキンググループ4 委員名簿(平成3年度～4年度)

(敬称略、順不同)

主	査板垣 浩(横浜国大) (H.3~4)	
幹	事 大石 剛(三井造船) (H.3~4) 渡辺孝和(三井造船) (H.4)	
委	員 大坪英臣(東京大) (H.3~4) 町田 進(東京大) (H.3~4) 岡田博雄(大阪府立大) (H.3~4) 山本規雄(日本海事協会) (H.3~4) 堀 徹(日立造船) (H.3~4) 後川 理(石川島播磨重工業) (H.3~4) 伏見 彰(三菱重工業) (H.4)	野本敏治(東京大) (H.3~4) 室津義定(大阪府立大) (H.3~4) 藤本由紀夫(広島大) (H.3~4) 仁保治(三井造船) (H.3~4) 石川邦照(日本鋼管) (H.3~4) 神永肇(三井造船) (H.3~4) 中田宣久(三井造船) (H.4)

() 内数字は就任年度を示す

目 次

緒 言	1
1 構造解析手法と算定精度	2
1.1 まえがき	2
1.2 船体構造設計における構造解析の現状	2
1.3 構造モデル化と応答解析精度	3
1.3.1 はじめに	3
1.3.2 有限要素法解析	4
1.4 最終強度解析	5
1.4.1 はじめに	5
1.4.2 最終強度／部分構造の座屈解析	5
1.4.3 船体簡易最終級強度解析	6
1.5 あとがき	6
2 工作精度と構造強度	16
2.1 まえがき	16
2.2 工作管理の現状	16
2.3 工作精度と損傷事故	16
2.4 工作精度と強度解析	17
2.4.1 溶接形状	17
2.4.2 目 違 い	18
2.4.3 パネルの初期変形	21
2.5 今後の工作管理	23
2.6 ま と め	25
3 疲労強度推定における精度と影響因子	45
3.1 まえがき	45
3.2 波浪変動荷重下での疲労強度評価	46
3.3 疲労強度検討のための波浪荷重設定	47
3.4 疲労データと疲労強度推定	47
3.5 実船計測の重要性	49
3.6 あとがき	49
4 総合的な強度評価法	56
4.1 まえがき	56
4.2 構造物の破損形態	56
4.3 船体構造の破損シナリオ	57
4.4 総合的強度評価法	58
4.5 信頼性解析	61
4.6 ま と め	61
結 言	69

緒 言

船殻構造の信頼性向上に関してはこれまでに多くの研究が行われて來たが、最近のタンカーの損傷及びバルクキャリアーの重大損傷等は、人命の安全と海洋汚染防止の面から、船体構造に対する更なる信頼性の向上を要請している。この様な状況下で本調査研究は、船殻構造の信頼性を工作精度、荷重のばらつき等を考慮して、より正確に評価する手法を検討する目的で開始された。

一般に船殻構造は、構造の有する小さめの強度（R）と構造が受ける大きめの力（S）とから安全率 $\lambda = R / S$ を求め、 λ が 1 より大きくなる様に設計されている。

しかし、構造の強度を表わす値（R）は、その構造の材料や工作精度等によってばらつきを有している。一方、構造が受ける力（S）についても、船の航路や海象等によってばらつきがある。こうしたばらつきを考えると、同じ平均値をもつ R, S の値を採用しても、ばらつき如何によつては損傷の起る可能性が異なることになる。これは、これまでの様な R/S による確定論的設計法での評価では、信頼性を正確に評価することが難かしいことを示している。更に、運航中の腐食等の経年劣化の影響により構造の有する強度が変化した場合は尚更難しいことになる。そこで、本調査研究では、先ず解析精度、工作精度、船舶の運航状態の違い等が構造強度及び構造が受ける力等の算定へ及ぼす影響を定量的に把握して、信頼性をより正確に評価することを試みた。調査研究に当たっては大型バルクキャリアーを共通の検討対象船として採り上げ、総合的な信頼性の評価法を確立することを目的として平成 2 年度より 3 年計画で以下に述べる 4 つのワーキンググループで調査研究を行った。

本報告書は、この 3 年間の調査研究結果の成果報告書である。

WG 1……構造解析手法と算定精度

与えられた荷重条件下での骨組や FEM などの各種モデル化による応答解析精度の検討、降伏や座屈などの強度評価目的に対する有限要素法手法の適用性検討及び最終強度解析に用いられる手法の妥当性の検討等を行った。

WG 2……材料・工作の不整量と強度変化

工作不整による強度低下、即ち溶接形状、目違い、初期変形等による疲労強度低下、応力上昇、崩壊強度の低下の推定アルゴリズム等の検討を行い、実例について試計算を行つてその手法を提案した。更に、具体的な工作不整に起因する損傷例の分類を行い、工作管理のあるべき姿について検討を行つた。

WG 3……設計条件と寿命管理

波浪荷重によって船体に加わる変動荷重・圧力に関して大型バルクキャリアーを例に検討し、疲労強度を計算する場合の設計荷重設定法をまとめた。

又、疲労強度を推定する方法として各種手法を示し、その手法の適用法を明らかにした。更に、変動荷重下での疲労試験を実施し、疲労強度評価法を検討し提案した。又、これ等疲労強度解析のベースとなる実船データ計測の方針付けについても提案した。

WG 4……総合的な強度評価法

平成 3 年度より上記 WG 1 ~ 3 をまとめて、総合的な強度評価法を作成する目的で発足した。

総合的強度評価フローの検討を行い、強度を評価するのに必要な要因について検討した。

次に、それぞれの要因に含まれている Randomness 或いは Uncertainty を如何にして評価に取り込むかを、信頼性工学の手法を用いて検討し、更に撤積船を対象とした試解析によりその手法を具体的に検証した。更にはペイズモデルを用いて、損傷或いは検査結果をもととした強度評価についても言及し、検査計画の合理的立案法についても検討した。

1 構造解析手法と算定精度

1.1 まえがき

有限要素法（FEM = Finite Element Method）に代表される構造解析手法は今日では大型タンカーやバルクキャリアなどの設計において必要不可欠の道具として定着してきている。

数値構造解析技術の実船構造設計への適用は昭和40年代から始まったが、当初は骨組構造解析が主流であった。その後平面FEMを用いた、より忠実なモデルによる解析を行うようになった。更に、ここ数年前よりコンピュータの大容量化・高速化に加えFEM解析の入出力を効率的に行うPRE/POST PROCESSORなどの進歩により3次元FEMモデルが日常的に取り扱われるようになってきている。こうした構造解析技術の設計での活用法は詳細な応力解析による強度確認と合理的構造配置および寸法の決定にある。

ところで、一般に構造物を設計するステップは、構造物に作用する荷重／応力（Demand）算定と構造物の有する強度（Capacity）算定とから構造物を評価（Assessment）する過程から成り立っている。現在、設計で用いられているFEMの多くは船級協会などの規定による荷重を用いての応力解析にあてられており、上記のDemand算定の一部であるといえる。

しかしながら、このDemand算定においてFEMなどの構造解析手法を適用する場合、構造設計者は得られる解の精度を充分把握した上で設計を行う必要がある。この算定精度に影響を及ぼす要因は、骨組やFEMなどへのモデル化の方法、モデル化の範囲、FEMにおけるメッシュの大きさなどである。

また、ときおり実施されるCapacity算定－例えば最終強度解析についても上記と同様、モデル化の範囲など算定精度に及ぼす影響について記らかにしておく必要がある。

構造設計者としては、解析結果を真の解に近づけより合理的な構造を実現するのが目標であるが、設計因子は不確定の要因を含むものが多い。不確定要因は波浪荷重のごとく本質的にRandomなものと、解析技術の進歩により明らかにできるUncertaintyの部分とに分けて考えることができる。

本章では一応荷重は与えられているものと考え、構造解析手法の違いによる算定精度の変化を明らかにすること－Uncertaintyの解明－を目的とする。

本研究の実施に当たっては、仮想の構造要素ではなく実際の設計を念頭において実船構造を対象としてとりあげ、様々な構造解析はこの構造に対して実施し、構造物に対する解析算定精度を研究する。

対象船としては造船会社の違いによる構造様式に変化が少ない大型の撤穀貨物船をとり擧げる。本船の主要目は以下の通りである。

$$L_{pp} \times B \times D \sim d = 276 \text{ m} \times 45 \text{ m} \times 24.2 \text{ m} \sim 16.5 \text{ m} \quad (150,000 \text{ DWT})$$

なお、許容応力や座屈安全率などについては別の場で討議されるべきものと考え本研究からは除外し、モデル化などの相違による応答値の変化に焦点を当てて研究を進める。

また、今後の強度評価法の進展を見込んでCapacity算定の一つである最終強度算定解析手法についても調査する。

1.2 船体構造設計における構造解析の現状

船体構造設計においては強度を便宜上、以下の3つに分けて考えることが多い。

- ・縦強度………船体全体を一本の梁と見做したときの強度で縦曲げや剪断強度など
- ・横強度………船体横断面を構成する部材（横隔壁、横桁など）の強度
- ・局部強度………横桁で支えられた縦通肋骨などの小骨や、これらで囲まれた板パネルの強度

以上の強度のうち、一般に縦強度および局部強度は簡単な船級規則算定式に基づいて検討し、部材寸法を決定している。しかしながら横強度については各部材単独で境界条件を設定して精度の高い簡易算式を与えることは一般に難

しく、通常何らかの形で構造解析（直接強度計算）を行う必要がある。また、船体構造方式によっては縦強度と横強度との相互作用を考えなければならない場合もある。

なお実際の部材寸法は、その他振動面からの要求により決まることもある。

本研究の実施に先立ち、まず実際の設計現場においてどのような構造解析法が使われているかについて、本 S R 参加会社 8 社を対象としてアンケート調査を行った。その結果、バルクキャリアやタンカーなどの一般商船の構造解析において F E M 計算は、ほぼ全社で毎船ごとに行われ、応力、座屈さらには疲労強度の評価に用いられていることがわかった。各社共 F E M が主体であるが、骨組計算は

- ・骨組計算で十分と思われる場合（バルク、コンテナの二重底など）
- ・初期検討のため（構造配置の検討、部材形状変更）
- ・F E M 計算のための境界条件（縦部材からの変位、境界力）の算出

など補助的な手段として用いられている。

アンケートでは、解析を行う際に担当者が直面している疑問点などについても同時に調査したが、F E M メッシュの大きさと許容応力との関係、F E M 計算におけるモデル化の範囲、境界条件、座屈強度評価でのモデル化の方法などの点が挙げられた。本研究では、これらの疑問点についても回答を得るべく検討を行った。

1.3 構造モデル化と応答解析精度

1.3.1 はじめに

F E M などの直接強度計算に基づいて横強度部材を設計する場合は一般に、算定応力値と許容応力値との比較や座屈強度との照査を行っている。本研究ではこのような設計プロセスを念頭において解析対象の大型バルクキャリアの中央部貨物艤密について板骨要素モデルによる F E M 計算と、平面骨組計算（L R S D C P D）および立体サンドイッチ構造モデル（N K B C S T A P）による計算を実施し、構造モデル（骨組構造や板骨 F E M 構造）の選定やモデル化の範囲、手法および境界条件などが解の精度に与える影響について検討を行った。

まず、モデル化の範囲について図 1.1 に示すように、中央部貨物艤密の横隔壁を挟んだ $(1/2 + 1/2)$ HOLD, $(1 + 1/2)$ HOLD, さらに $1/2$ 貨物艤密全体まで拡大して実施し、それぞれの計算結果としての応答の差を検討して、モデル化の範囲、境界条件の設定方法や構造自重の影響などに対する考察を加えた。

以上の検討は、まず、バラスト状態（平水中）について行ったが、バルクキャリアの設計上不可欠な荷重条件である鉱石の隔艤密積み状態（船長方向のモデル化範囲は、鉱石の隔艤密積み状態に対しては前後面で対称条件を用いた $(1/2 + 1/2)$ HOLD で近似的に十分である）についても、同様の計算を実施し、構造モデルによる差異について検討した。本研究で実施した構造解析を表 1.1 に示す。

表 1.1 構造解析ケース

（○：計算実施）

荷重状態	バラスト			鉱石隔艤密
モデル化範囲 計算	$1/2$ HOLD + $1/2$ HOLD	1 HOLD + $1/2$ HOLD	$1/2$ 貨物艤密 全体	$1/2$ HOLD + $1/2$ HOLD
F E M 計算	○	○	○	○
骨組計算(LR)	○	○	-	○
サンドイッチ構造モデル(NK)	○	-	-	○

また、FEM計算結果に対する応力誤差解析として、(1/2+1/2) HOLDモデルについての計算結果、二重底GIRDER端部、およびビルジ部を含んだ二重底FLOORについてのズーミング解析結果に対する誤差解析を実施し、メッシュ分割などモデル化の妥当性を検討した。また、この検討に当たりズーミング範囲のとり方についての考え方を整理した。

1.3.2 有限要素法解析

(1) モデル化と応答解析精度

(a) モデル化範囲

ここで検討したFEMモデルを図1.2から図1.4に示す。なお1/2全体貨物艤モデルについては、粗いメッシュで分割したモデルで解析した後に、詳細モデル(1/2+1/2) HOLDにつないで解析した結果について評価した。

バラスト状態における解析結果の一例を図1.5に示す。この結果で代表されるように、部材寸法を決めるFLOOR端部やGIRDER端部の応力のモデル化範囲の違い(モデル後端での境界条件の違いを含む)による差異は高々数パーセントであった。ただし、内底板や船底外板など船体縦曲げ応力が生じる部材では船長方向のモデル化範囲による差が出たが、これを簡易計算で補正すると全てのモデルはほぼ同等の結果を与える。

すなわち、FLOORやTR. BHDなどの横部材や局部的応力集中が問題となるGIRDER端部の応力応答解析に当たっては、(1/2+1/2) HOLDのモデル化範囲で十分であるといえる。

(b) 構造モデルの選定

バラスト状態における各構造モデルでの応力算定結果によると、総じてモデル化範囲の差異は少ないものの構造モデル—骨組、サンドイッチ、FEM—の差による影響が大きくている。この原因を調べるために各FLOOR端部およびGIRDER端部における剪断力をひろい出しFLOORとGIRDERとの荷重分担の状況を調べた。結果を図1.6に示すが、特にここで用いた平面骨組計算ではGIRDERの荷重分担がFLOORに比べて過大であることがわかる。この原因は骨組モデルにおけるビルジホッパーの据り剛性の与え方などにあると考えられる。

またFLOORやGIRDERの軸(応)力評価に当たっては解析上の仮定によるものであるがFEM以外は正しい解を与えない場合があることがわかった。

すなわち応答解析精度向上のためには部材を忠実にモデル化したFEMの方が望ましいが、骨組構造などの簡易化したモデルを用いる場合には解析上の仮定や剛性の与え方などに充分注意を払う必要がある。

(2) 支持条件などの影響

(a) 上下方向支持方法の影響

部分構造をとり出した場合、一般に外水圧と貨物荷重とはバランスしていない。本解析では、横隔壁／上甲板／側外板の交点で支持し、上下方向の不釣合力を分布剪断力として横隔壁位置の側外板に負荷しているが、分布剪断力を与えず不釣合力を残したままその影響を調べた。この場合、支持点近傍以外の他の応力への影響はほとんどなかった。

(b) 前後方向支持方法の影響

前後端で対称条件を用いたが、サンドイッチ構造モデル(NK BCSTAP)による計算のように非検出倉(バラスト状態ではORE HOLD)側のモデル端の船長方向変位を自由かつ断面内一定として影響をみた。その結果、GIRDERの軸力がわずかに増加したが、その他への影響はほとんどなかった。

(c) 構造自重の影響

通常の構造計算では貨物が軽い場合を除き構造自重は考慮されないが、実船の構造自重を負荷して応力値への影響を調べた。その結果、応力値は3%程度増加した。本荷重条件とは逆に上向き荷重が主体の場合には応

力値は減少することが考えられるが、いずれにしても応答値への影響は小さいと考えられる。

以上から上述の支持条件などの影響は大へん小さいことがわかった。

(3) メッシュサイズの影響

一般に用いられている変位法に基づくFEMで応力が集中する箇所においてメッシュを細かく切ると応力が上昇し厳密解に近づいていく。

本研究では、バルクキャリアの応力集中部の代表例としてGIRDER端部およびFLOOR端部について、メッシュサイズを変化させてその様子を調べた。これらのうちGIRDERについての結果を図1.7に示す。この解析結果は実船における応力集中部の詳細な応力の程度を表わしている。

すなわち、通常降伏強度については前述の貨物艤モデルに示されるような1ロンジスベース程度のメッシュサイズの応力値を許容応力と比較することにより設計を行っているが、このときの詳細応力分布は例えば図1.8のようになる。すなわち、メッシュサイズの細かさと許容応力との関係については本図などを参考に考えることができるであろう。

(4) 応力誤差解析

本調査研究では、中央部貨物艤モデル、GIRDER端部モデルおよびFLOORモデルについて応力誤差解析を行った。ここではGIRDER端部モデル（図1.7参照）でズーミング解析を行った場合における応力誤差解析の例を図1.9に示す。本図により応力集中部のメッシュの細分割によってFEM解の精度をかなり向上させうることが定量的に把握できた。

その他、三角形要素を用いると誤差がふえるのでなるべく四辺形要素で分割することが望ましいことなどもわかった。

1.4 最終強度解析

1.4.1 はじめに

前節までは主として応答解析（Demand）について述べたが、本節では強度（Capacity）についての調査研究結果について報告する。

これまで船級規則などでは直接、強度に言及せずに過去の実績や経験を踏まえての許容応力・（安全率）ベースで部材寸法を定めている。しかしながら、万が一許容応力を超えたとき何が起こるかを把握しておくことは船体構造の安全性を論じるときに重要なポイントとなる。近年、高張力鋼の大幅な採用、構造解析技術の向上及び計算機の高速化などにより、構造設計において有限要素法による大規模な構造解析が行われるようになったが、現在の設計法は、構造部材毎に設計基準を満足するように部材寸法を決めるため、全体強度と局部強度とのバランスを取りにくいという欠点がある。したがって将来は局部強度から全体強度までを一貫して評価し、さらに最終強度までを考慮した構造信頼性手法を設計に導入すべきであると考えられる。

その際、最終強度の推定法（非線形構造解析を船体構造に適用する技術）が重要となり、短時間で実用的な精度を持つ最高耐荷力を推定するため、設計者は非線形解析に習熟する必要があると考える。

そこで本研究では、上記の事項を念頭において本SRで解析対象としているバルクキャリアを供試船として、座屈および最終強度解析について検討を行った。

1.4.2 最終強度／部分構造の座屈解析

(a) 板付ロンジの最終強度解析

まず、基本的な例題として圧縮荷重を受ける供試船のデッキロンジをとりあげ、汎用有限要素法コードを含む非線形解析コードを用いて弾塑性大撓み解析のベンチマークテストを実施した。モデル化範囲及びモデル図を図1.10に示す。

解析に当たっては初期撓み形状として座屈波形と痩せ馬波形の2通りを考え、また要素分割数を変化させて実施した。結果の一例を図1.11に示すが、どの解析コードもほぼ同程度の最終強度を与えている。しかし最高荷重後の挙動についてはコード間に差異があることがわかった。また要素分割のサイズは座屈の1半波形を8分割する程度で十分であることもわかった。

さらにこの知見を踏まえ、板付のボトムロンジ（横荷重も考慮）なども解析し、船体構造の最終強度を考えるに際しての基礎データを得た。

(b) 部分構造の座屈解析

1.3.2で述べたようにFEMにより応力分布を計算した後に、座屈強度の評価を行おうとする場合に、2通りの方法がある。簡単な方法としては、当該箇所を周辺支持の矩形板と仮定し、その平均応力と矩形板の縦横比および周辺の境界条件をパラメータとした座屈略算式から座屈応力を算定することができる。しかし、当該箇所が複雑な形状をしており矩形板に置き換えるのに無理がある場合あるいは境界条件や応力分布が複雑な場合には、FEM計算を用いて直接座屈固有値を算定することが必要となる。

ここでは二重底のフロアパネル対象として、FEMによる弾性応力計算および座屈固有値計算を行い、FEM解析精度に対するモデル化の影響を検討した。

図1.12に解析対象パネルと座屈固有値解析の結果の一部を示す。最も誤差が大きいのは剪断荷重を受ける場合であるが、計算効率も勘案してパネル当たり線形要素で 8×20 程度の分割が実用的であることがわかった。また実際の荷重条件のもとで得られた組合せ応力下でのFEM固有値解は、船級略算式（例えばLRSPASS）にほぼ一致した。したがって特殊なパネル形状や境界条件などがなければ通常の船級略算式でよいことがわかった。

1.4.3 船体簡易最終強度解析

船体横断面は過大な縦曲げモーメントが作用すると、曲げ荷重の増加と共に断面を構成する縦部材がつぎつぎに座屈あるいは塑性崩壊し、やがて断面全体の崩壊に到る。このような崩壊挙動の解析法として、材料非線形性および幾何学的非線形を考慮した有限要素法が考えられるが、計算機の容量および計算時間の面から、大型構造に対して現状ではほとんど適用不可能と考えられる。そこで、有限要素法に代わる簡易計算法がいくつか提案されているが、ここでは、Smithの方法に改良を加えて供試船のバルクキャリアのホールド断面の崩壊挙動の解析を行った。改良点は、個々の縦部材要素の軸圧縮下における簡易計算法を新しく提案したことで、この計算法の妥当性は前述の有限要素法による結果などと比較することにより確認している。

解析結果の一例を図1.13に示す。供試船は弾性設計に基づいているためサギング、ホギング状態とも設計モーメント（静水中と波浪中縦曲げモーメントの和）に対し安全率で1.5程度の初期崩壊強度を示すが、最終強度（最高耐荷モーメント）はデッキ側が圧縮となるサギング状態の方が低く、また最終強度後の耐力低下も著しい。このことは最終強度設計を行うときに注意を要する点である。

1.5 あとがき

本章では、船体構造設計における構造解析の現状、モデル化と応答解析精度および最終強度解析について調査研究を実施した。

まず、構造解析の代表例として大型バルクキャリア中央部貨物艤をとりあげ、有限要素法、サンドイッチ構造および骨組構造でモデル化し応答解析を実施した。荷重条件としては、船長方向で対称な境界条件を設定しにくいマスト状態（平水中）をまずとりあげ、モデル化範囲を $(1/2 + 1/2)$ HOLD, $(1 + 1/2)$ HOLDおよび貨物艤全体の $1/2$ の3通りに変えて解析を実施した。その結果、モデル化範囲を船長方向に延ばすことは船長方向の応力への影響はあるものの、横方向応力や局部集中応力にはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。従って、FLOORやTR. BHDなどの横部材や剪断が支配的なGIRDERの局部応力集中部の強度評価に対する船長方向のモ

モデル化範囲は（ $1/2 + 1/2$ ）HOLD長さで十分であることがわかった。またサンドイッチ構造や骨組構造を用いて同様のモデル化を行い解析を実施し、有限要素法の結果と比較した。有限要素法以外のモデル化においては、その特質を充分認識して結果を評価する必要があることがわかった。また鉱石隔艤積み（満載喫水で波の山谷考慮）についても解析を実施した。

実際の船体構造設計においては船級協会規則で規定される許容応力を判定基準としている。すなわち公称値を対象としているが、設計者は自ら実施している解析結果がどの程度の誤差を含んでいるのかを把んでおくことは大事なことである。そこで上述の貨物艤有限要素法モデルについて応力誤差解析を実施し、応力誤差の大きな部位および誤差の程度を明らかにした。さらに、この応力誤差がメッシュのサイズによってどのように変化するかをズーミングモデルで要素分割を系統的に変えて具体的に示した。

次に降伏強度を基準とした許容応力評価に関し、メッシュサイズと算定応力との関係を二重底のGIRDERS端部およびFLOORについて解析を実施し、許容応力基準で設計している場合のより厳密な応力分布を求めた。これらはメッシュサイズを変えた場合にどのような許容応力を設定すべきかを考えるときの参考になると考えられる。

また座屈強度評価に対する有限要素法の適合性について、FLOORを対象として座屈固有値解析を実施し要素の種類の選び方やメッシュサイズの影響について検討を加えた。

さらに本SR対象船のデッキロンジの最終強度試験解析をいくつかの非線形解析コードを用いて実施した。この解析を通じて拘束条件の与え方やメッシュサイズの影響などを明らかにした。得られた知見を踏まえ、板付ボトムロンジなどについても最終強度解析を行い、船体梁の簡易最終強度解析へつなげた。

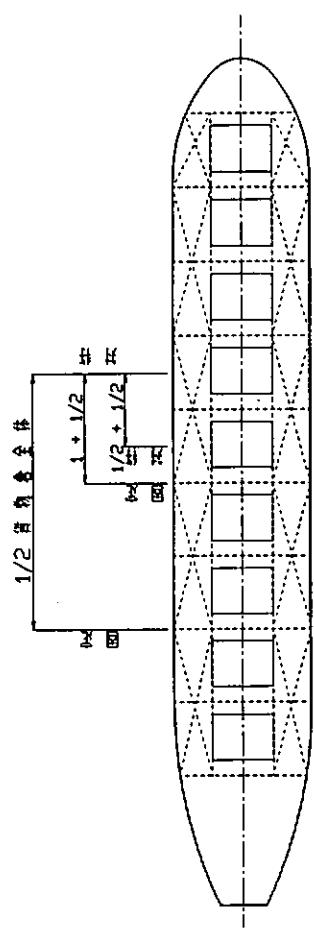
船体梁に対する簡易最終強度解析においては、新しい手法を提案し、これを本SRで対象としている大型バルクキャリアへ適用してその有効性を確認した。この解析の中でサギング及びホギング状態における挙動の差異や初期崩壊強度、最終強度の違いが明らかにされた。本研究成果は将来の構造設計法を考えていく上で大いに役に立つであろうと考えられる。

本研究では実船の貨物艤構造を対象とし横強度に主眼をおいて、与えられた荷重のもとでの構造応答の解析精度を調査し上述の成果を得た。

今後の船体構造設計において直接強度計算がますます多用されてゆくと考えられるが、波浪荷重などを含めた実際の船体構造応答解析と降伏・座屈崩壊などの強度算定などにおけるさらなる精度向上への努力をつづけて行く必要があろう。

150 型 備 積 貨 物 船

$$L_{pp} \times B \times D \sim d = 276.0 \times 45.0 \times 24.2 \sim 16.5$$



GENERAL ARRANGEMENT

図 1.1 モデル化範囲

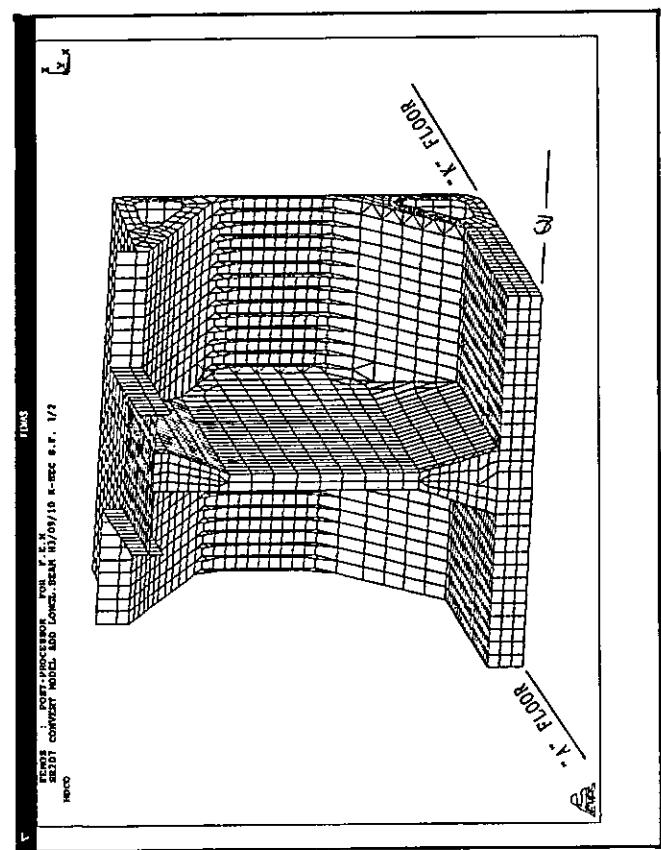
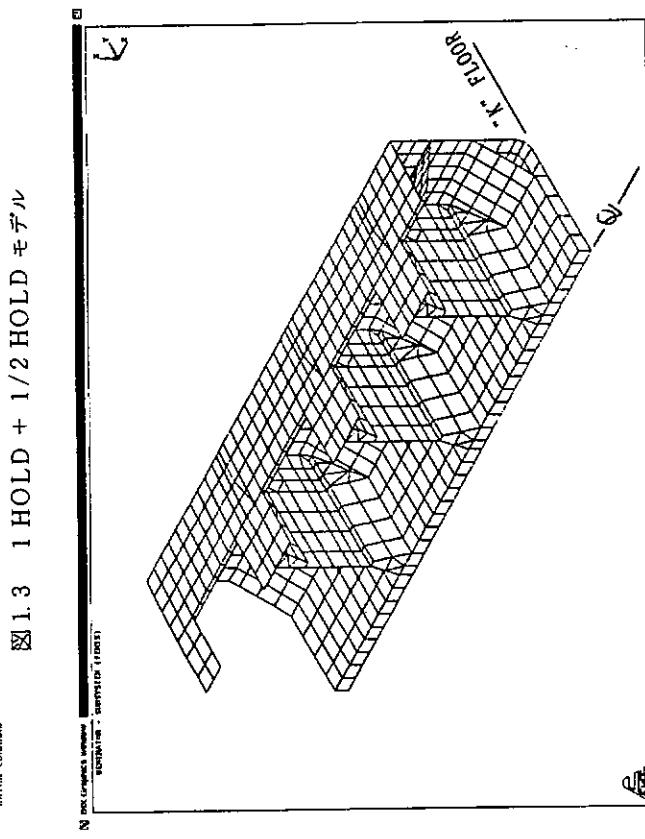
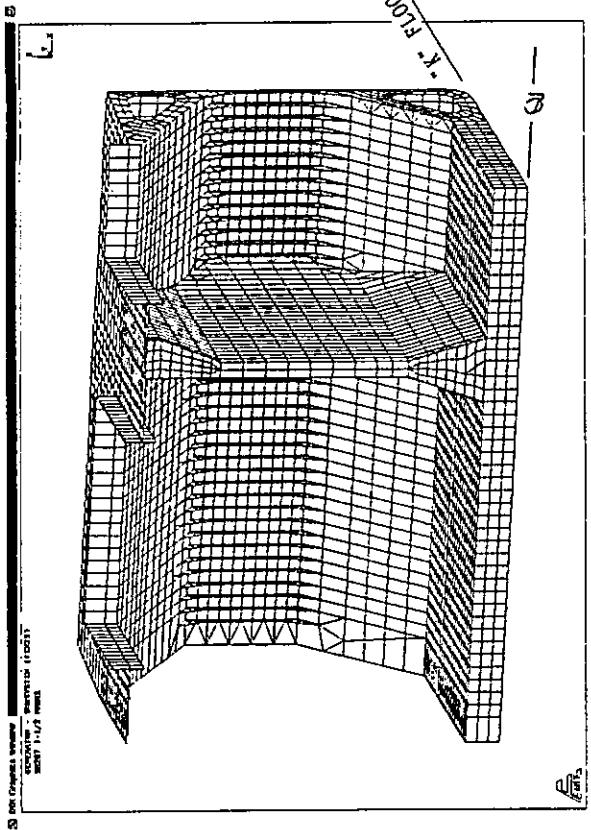


図 1.2 1/2 HOLD + 1/2 HOLD + 1/2 HOLD モデル

図 1.3 1 HOLD + 1/2 HOLD モデル

図 1.4 1/2 貨物艤全體モデル

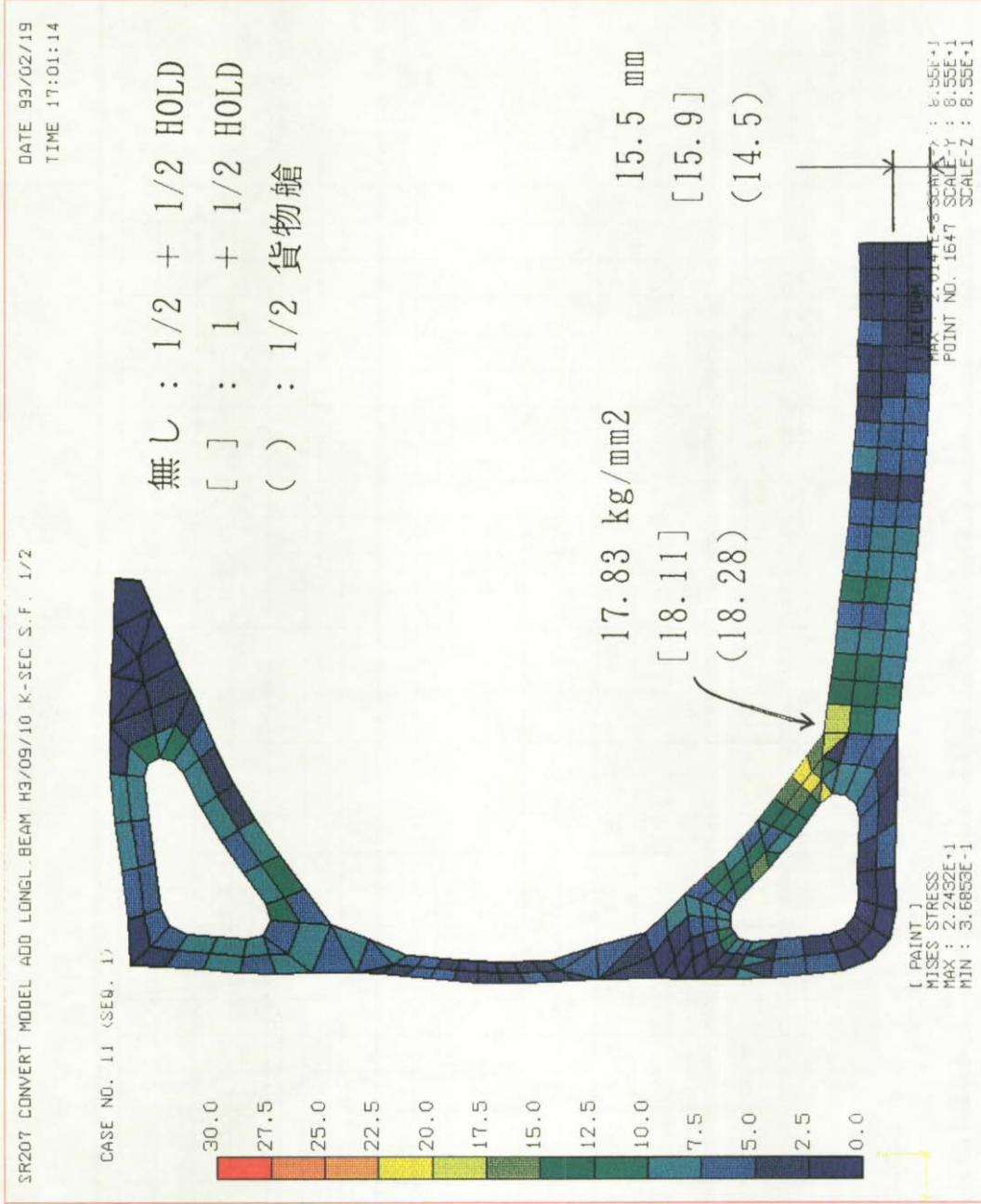


図 1.5 変形／等価応力図（1/2 + 1/2 HOLD モデル “K” FLOOR）

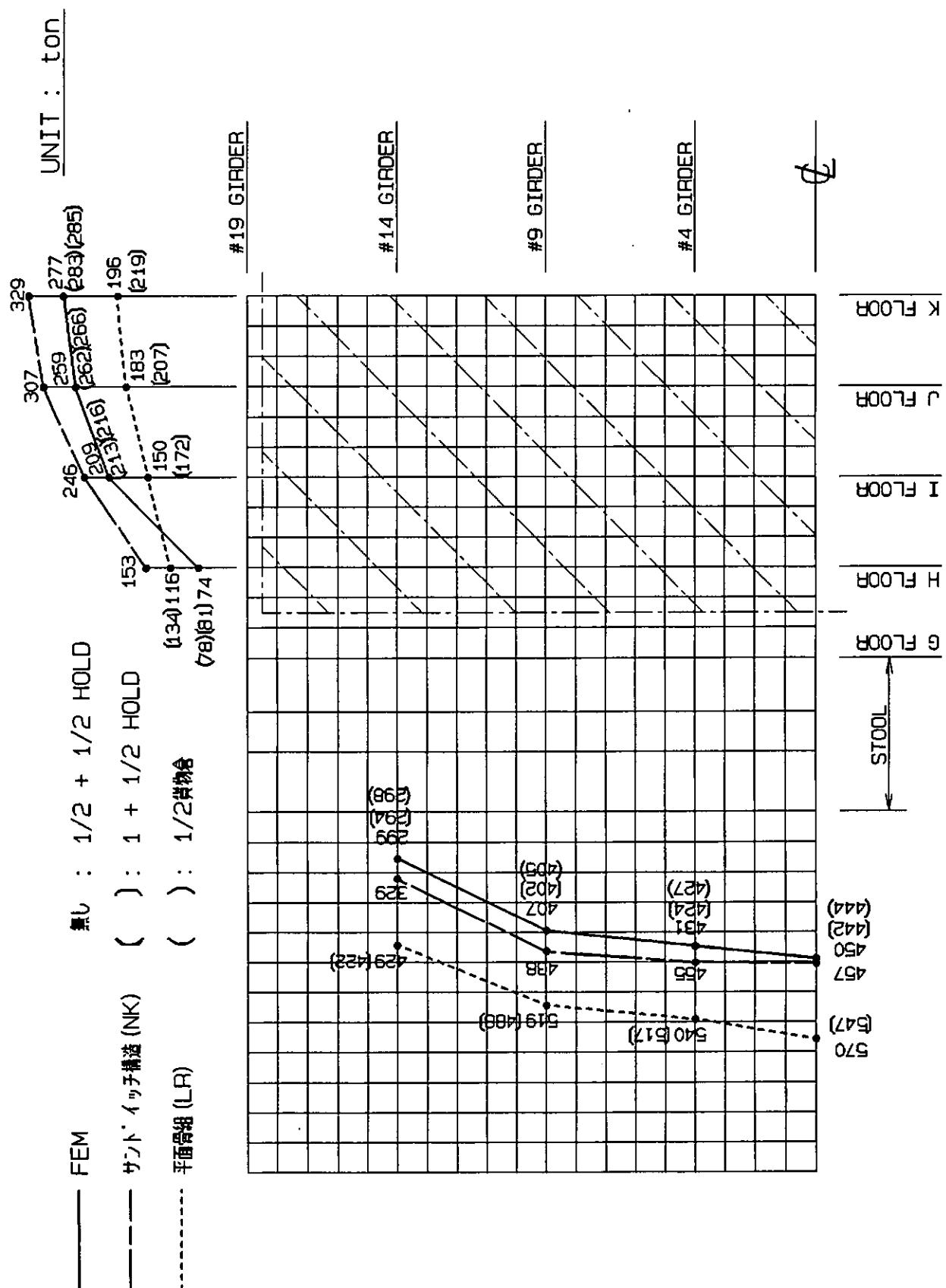


図 1.6 GIRDER / FLOOR 荷重分担比較 (BALLAST HOLD 内二重底)

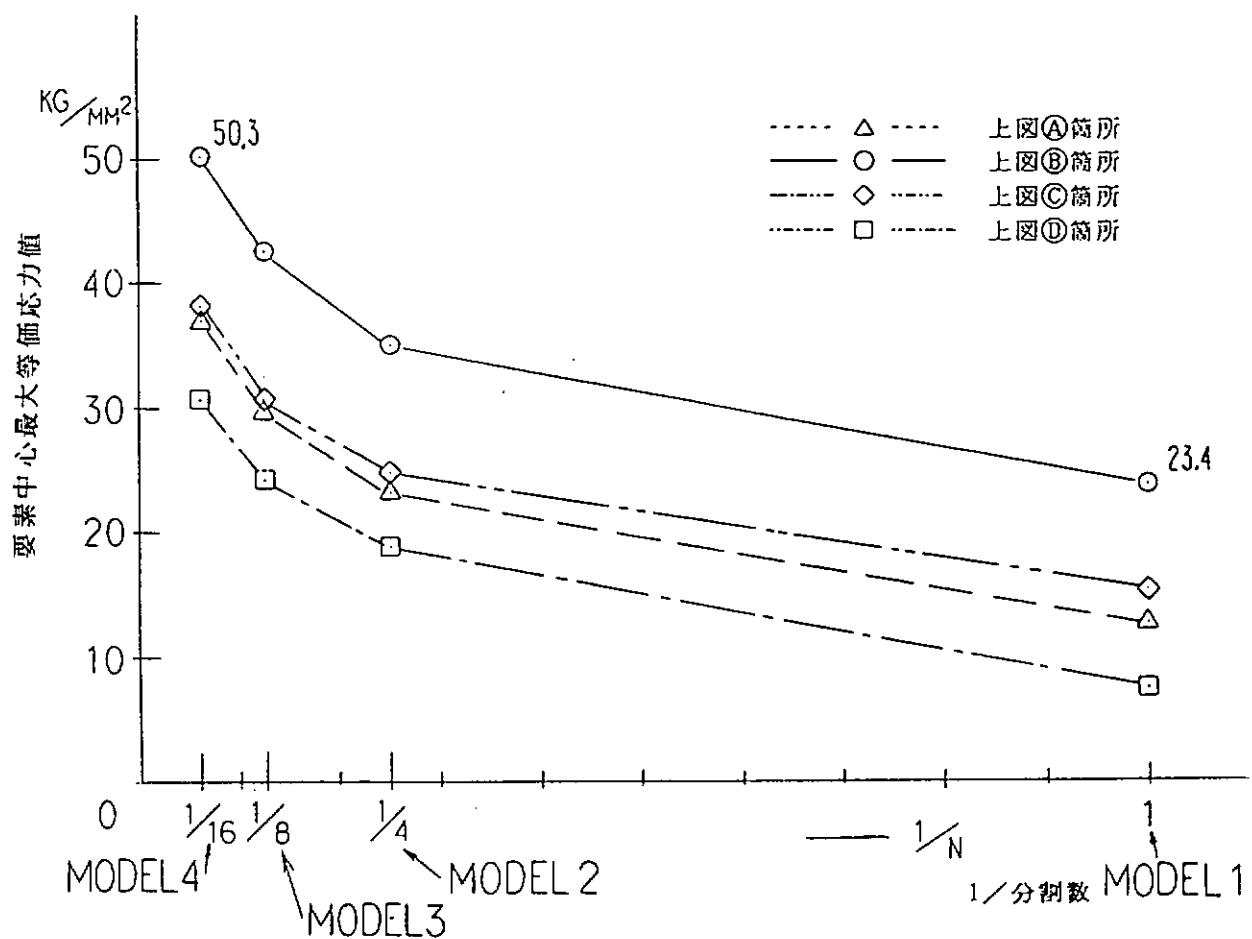
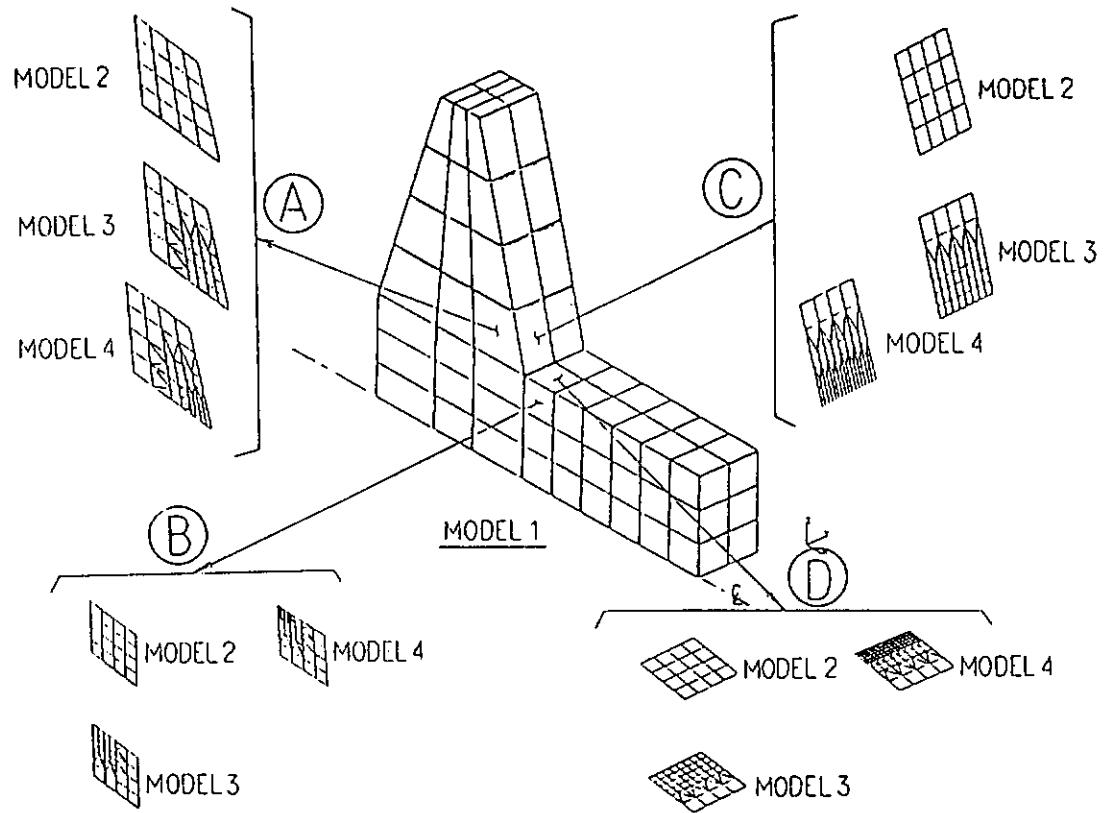


図1.7 メッシュの大きさ－応力関係図

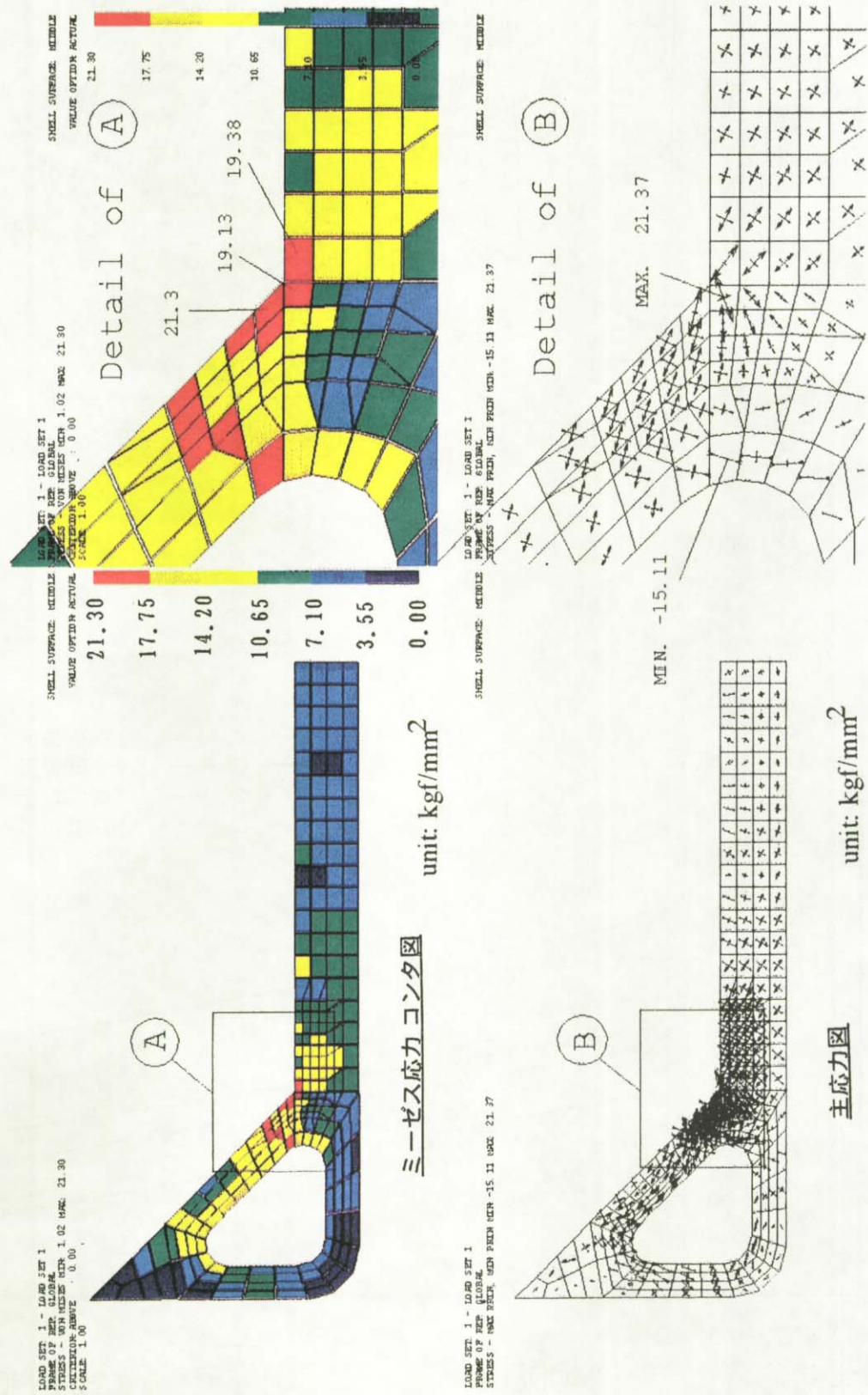
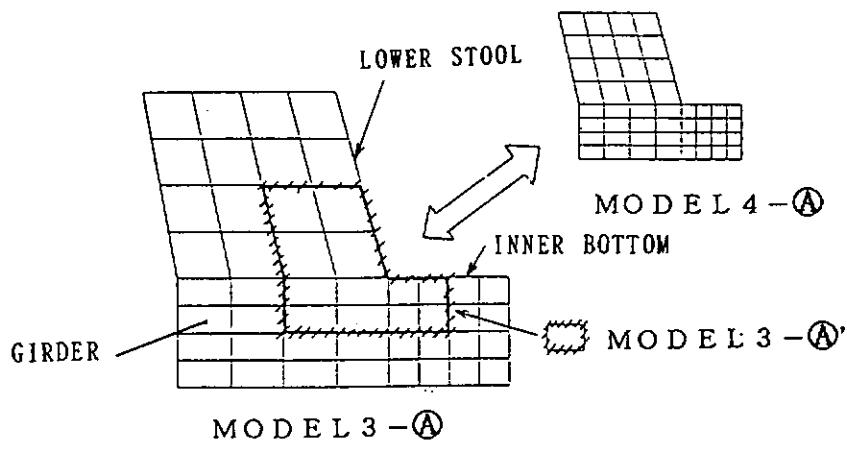


図 1.8 フロア詳細応力解析 許容応力限界での応力分布(ミーゼス応力、主応力)



モデルとメッシュ分割

再分割領域に限定した誤差解析結果の比較

モ デ ル	$\ e \ $	$\ u \ $	$\ e \ / \ u \ $	要素数
MODEL 3 - A'	29.86	230.6	12.95 %	12
MODEL 4 - A	19.95	225.0	8.86 %	48

$\| e \|$: 誤差のエネルギーノルム
 $\| u \|$: 変位のエネルギーノルム
 $\| e \| / \| u \|$: 相対誤差

図1.9 ズーミングモデルと再分割領域における誤差解析結果

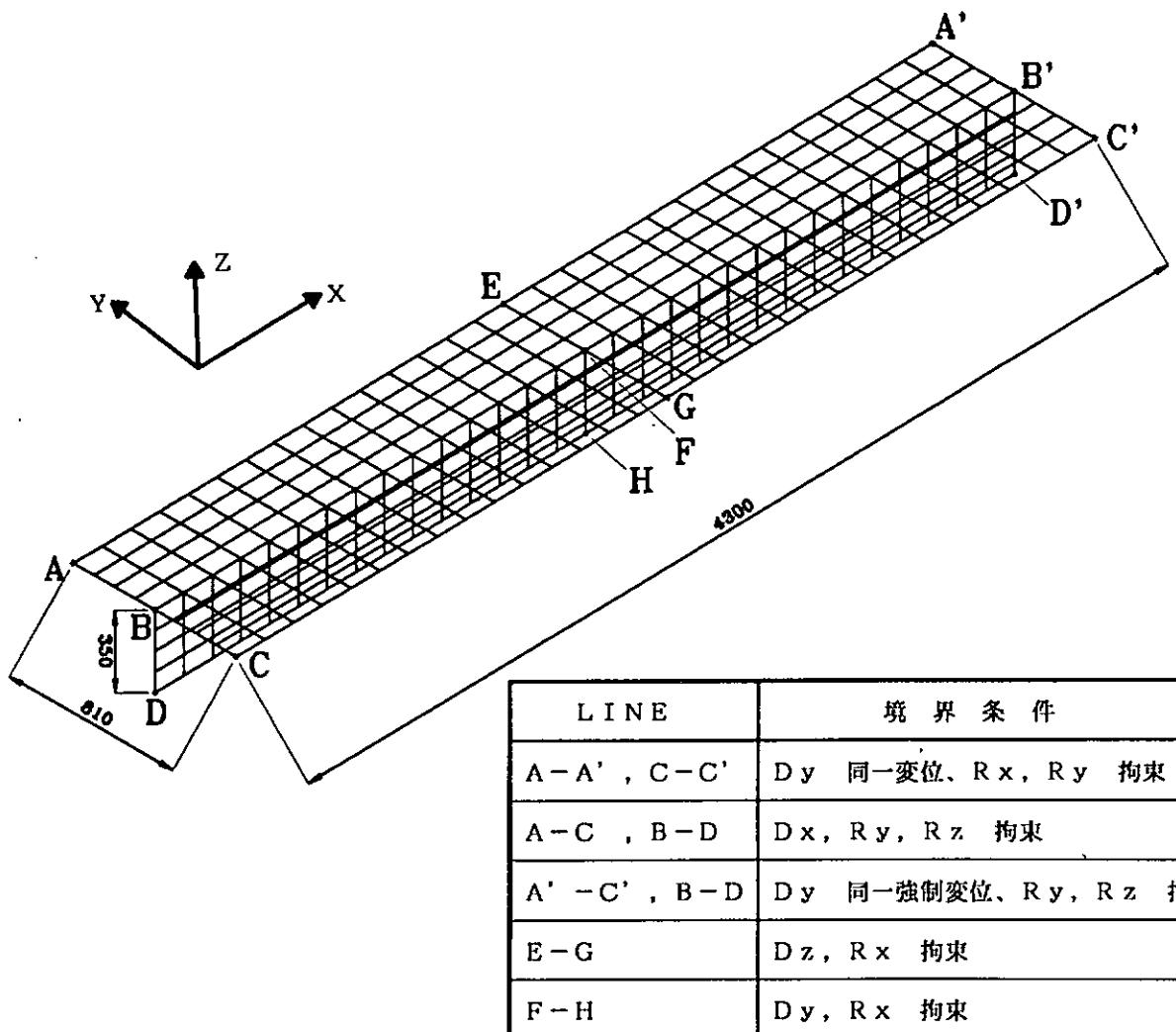


図 1.10 板付きロングモデル

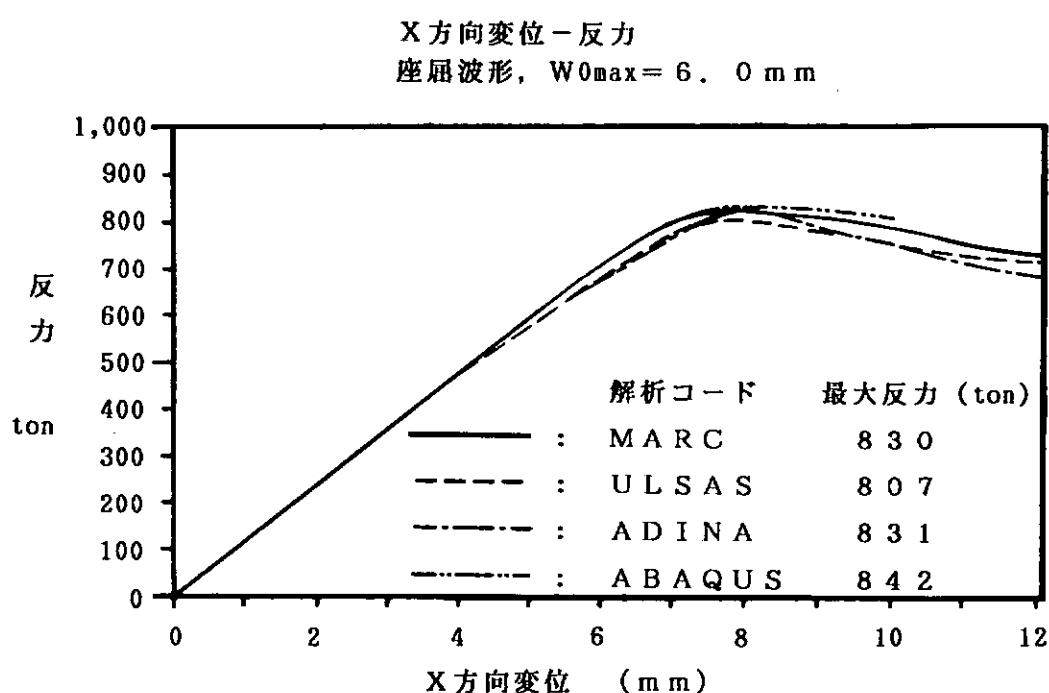
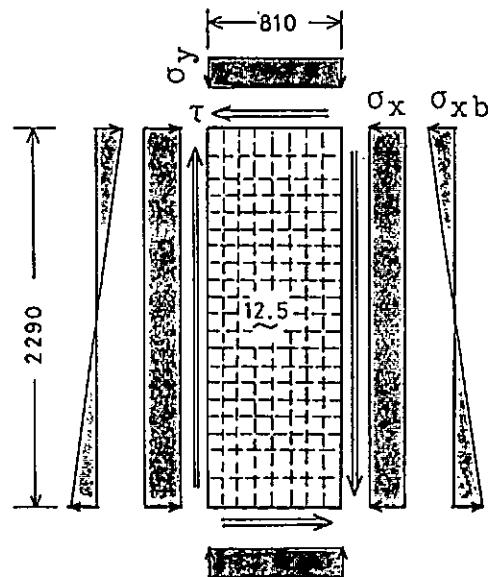


図 1.11 X方向変位－反力曲線(座屈波形の初期撓みの場合)



L.C.	σ_{x_c} / σ_0	$\sigma_{x_{bc}} / \sigma_0$	$\sigma_{\tau_c} / \sigma_0$	τ_c / σ_0
EXACT	1.27	3.88	4.0	5.84
FEM, 8*20	1.29	4.17	4.11	6.52
FEM, 4*10	1.38	4.49	4.45	9.30

$$\sigma_0 = E \pi^2 (t/a)^2 / (12(1-\nu^2)) = 44.340 \text{ N/mm}^2$$

$$a=810, t=12.5$$

図 1.12 周辺支持パネル座屈固有値

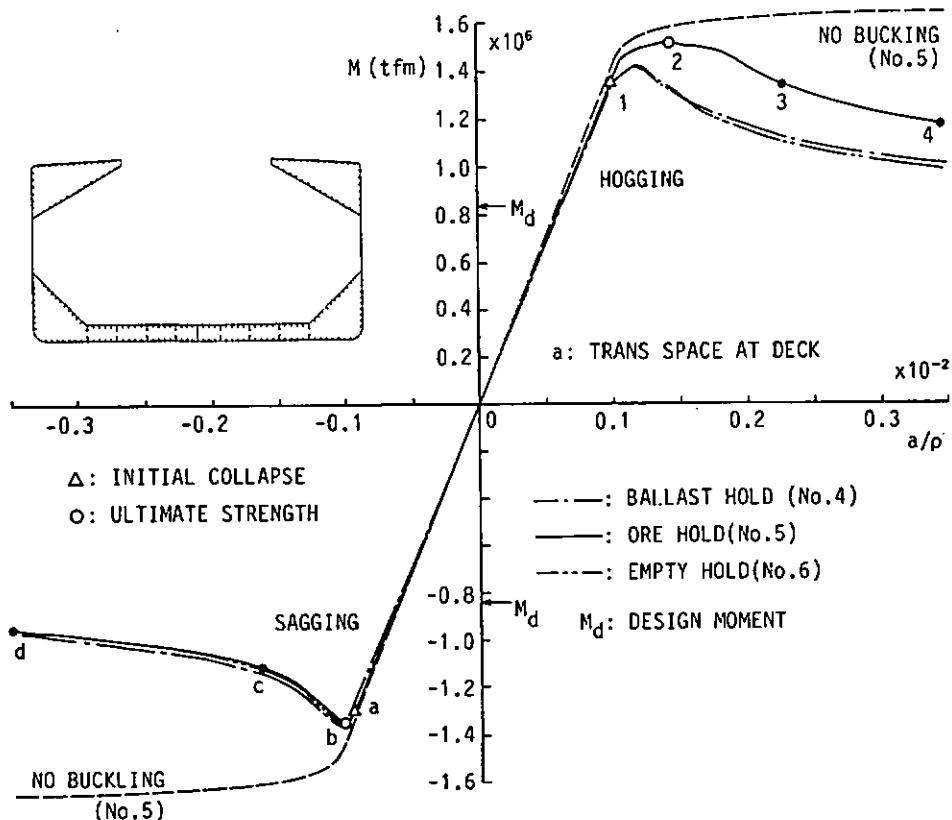


図 1.13 サギングおよびホキング状態におけるモーメント～曲率線図

2 工作精度と構造強度

2.1 まえがき

船体を建造する場合、ある程度の工作誤差が生じるのはやむを得ないが、工作誤差があれば無いものに比べ強度の低下は不可避であることを考えれば、強度を保つためには工作誤差の大きさを制限する必要がある。問題は如何にして許容される工作誤差を定めるかと言う点にあった。日本にはJ S Q Sと言う立派な造船工作に関する基準があり、この役目を果たしてきた。J S Q Sの場合、制定当時の工作技術と解析技術とのバランスを考えた適度の領域に工作基準が定められており、その後の造船建造技術の信頼性保持に大いに役立ってきたと言える。

現状に於て、工作誤差と構造強度の関連を考える場合、回りを取りまく環境はJ S Q S制定時とは大きく変わっていることを認めざるを得ない。例えば、材料面でみれば従来船殻はすべて軟鋼で作られていたのに、最近はT M C P鋼の占める領域が非常に大きくなっている。又、工作面では従来人手で行っていた溶接が溶接ロボットなどメカトロ機器にとって変わられるケースが非常に多くなってきている。最も大きな変化と考えられるものとして、最近のコンピューター計算能力の急速な向上に伴ってもたらされた解析能力の大幅な向上を挙げることが出来る。

本章では上記の環境の変化を考慮して、“現状の各種技術を駆使した場合どの様な工作管理が可能か？、将来の工作管理はどうあるべきか”と言う問題について研究調査した結果について説明する。

2.2 工作管理の現状

工作管理の現状を知るために国内造船各社を対象にアンケートを実施するなどによって調査した。調査の結果によれば、

- (1) 検査官による特別の要求時を除き、工作管理は目視によるものが主流を占め、道具を使う場合にもハンマーなど簡単なものに限られているのが現状である。
- (2) L N G船など付加価値の高いものについてはかなり高度の機器を用いた管理が行われる例があるものの、大勢は昔ながらの方法が踏襲されており、この点での改良の余地は大きいものと考えられる。

目視による管理の精度を判断する例として、図2.1を示す。図は溶接について、目視結果と実際の溶接形状から予想される応力集中係数との関連を示したものである。(図において、優、良、可として示したものは目視による検査結果から判断された溶接の出来具合を示している) 図によれば、上に示す例では目視結果と応力集中係数について微かな相関関係がみられるものの、下の例ではほとんど相関関係を見る事はできない。この例は目視に頼った管理の問題点の一つを示す例と考えられる。

2.3 工作精度と損傷事故

工作誤差が船体強度に影響を与えるものであれば、実際に発生した損傷事故と工作誤差との因果関係に関する情報はより優れた工作管理を実現する上で貴重なデーターと見なす事ができる。

日本海事協会は毎年損傷事例の調査結果を報告しているが、1980年から1989年までの10年間の報告を調査した結果を図に示したのが図2.2である。図によれば損傷原因の大部分を「衰耗」が占め、工作誤差に起因するものについてはほとんど例が示されていない。これは調査目的が必ずしも工作精度と損傷事故との関連に焦点を当てたものではないところに起因しているものと考えられる。現実には工作精度と損傷原因に焦点を当てた調査は将来の工作管理办法を考える上で非常に重要な事を考えると、従来の調査手法をさらに精密化した手法が望まれる。これには船社、造船所、船級協会などの緊密なる協力が必要であり、新しい調査体制の構築が望まれる。

2.4 工作精度と強度解析

工作管理は然るべき管理指標をどの様な精度で管理するかで成り立っている。このときどの様な管理指標（工作精度）が構造強度上重要であるか、その管理指標（工作精度）の大きさが構造強度にどの様に関係してくるかを知る必要がある。これらの点を現状の解析技術でどの程度明らかにできるかは新しい工作管理手法を考える上で重要な意味を持っている。

そこでここでは船体構造においての典型的な管理指標である、溶接形状、目違い、パネルの初期変形を取り上げ、これらの管理指標が構造強度に与える影響度を最新の解析手法によってどの程度明らかにする事ができるかについて研究調査した結果について報告する。

2.4.1 溶接形状

現在船体構造を建造するためには溶接は不可欠の建造技術であるが、溶接部は一種の構造不連続部を構成するため疲労亀裂の発生源になる事が多く、重要な管理指標の一つと考えられている。

疲労強度評価技術について言えば、従来からの数多くの研究者の努力によりかなりの解明が進んでいるものまだ曖昧のまま残されている部分も多いと考えられるが、その原因の一つは以下に示す事実に関連している。つまり疲労強度は疲労亀裂発生強度と亀裂伝播強度の和として考える場合が多いが、後者の亀裂伝播強度については非常に明快な理論が確立している反面、前者の亀裂発生強度については明快な説明が成り立たず曖昧のまま残されており、疲労強度の分かりにくさの原因の一つとなっている。

今回はまったく新しい理論をベースに上記の亀裂発生強度、亀裂伝播強度を包含した疲労強度の評価に挑戦し、溶接形状が疲労強度にどの様に関係するかについて研究した。今回の疲労解析手法はふたつのステップから成立している。最初のステップは溶接止端部近傍の極く局部的な領域の応力分布を求める過程であり、次のステップは前のステップで得られた応力分布を基に亀裂伝播則をベースに該部の疲労強度を評価する過程となっている。各々の過程について以下にその概要を説明する。

(a) 極く局部的な領域の応力評価

近来、有限要素法の応用によって応力解析能力は飛躍的に向上しており、ほぼすべての応力解析は有限要素法によって可能になったといっても過言ではない状態となっている。ただ一つ有限要素法の欠点を言えば、ここで対象としているような極く局部的領域の応力解析（例えば溶接止端部に存在するアンダーカットによる応力集中評価）については不可能ではないにしても非常に苦手としている点を挙げる事ができる。

ここでは上記の問題点を克服するため、有限要素法とは逆に極く局部的な構造不整がもたらす応力評価に適した振動法を適用する事にした。通常振動法による応力解析は1次の項の評価にとどめる場合が多いが、今回は次の疲労強度評価のステップに於いて応力集中部の最大応力にとどまらず集中部の応力傾斜も必要なため、2次の項まで解析を進めた。また溶接止端部の非常に多様な形状に対応が可能とするため任意の局部形状に対応が可能なプログラムを開発した。

図2.3は実際の溶接部に整形ゴム材を当てその形状を求めたものの例を示す。図の溶接止端部形状は疲労実験に使用した試験片から採取したものであり、止端部を図に示す処理を施したものに対応している。この形状を上記プログラムに入力し応力分布を求めた結果を図2.4に示す。これらの解析を通じて解析手法の有効性を確認した。

(b) 亀裂伝播則をベースとした疲労強度解析

今回新たに開発した疲労強度解析手法は非常に膨大なノウハウを土台にしており詳細を説明するにはかなりの言語数を必要とするが、ここでは厳密さを多少犠牲にして、手法の背後にある基本的な考え方を判りやすく説明する事にする。

溶接止端部のアンダーカットなどは非常にシャープな構造不連続を構成するため応力集中は非常に大きく、疲

労強度が問題となるような応力下では降伏応力を大きく越えた応力（歪と言った方が正確）が局部的に働くと予想される。このような領域に荷重が1サイクル働いた場合を考えると、切り欠きの近傍に正及び負の塑性歪を同時に経験する領域を求める事ができる。もし同じ場所に亀裂があるとすれば同様に亀裂の近傍に正負の塑性歪を経験する領域を求める事ができる。本手法の基本的な考え方対象とする構造不連続がもたらす正負の塑性領域と同等の正負塑性領域をもたらす仮想上の亀裂長さを求め、その亀裂長さを初期亀裂とし後は亀裂伝播則により伝播解析を実施する事により疲労強度を評価しようとする点にある。そして、この塑性域の大きさを求めるには応力集中部に於ける応力分布が必要となり、上記の摂動法による応力解析が力を発揮する事になる。

図2.5は図2.4に示した応力分布のうち、TIG(TIG溶接), TW(化粧溶接), NO(処理無し)の3種に対応する応力分布を基に上記の疲労解析を実施した結果の一例を示す。図では亀裂進展とともに応力拡大係数の大きさを亀裂長さとの対比で示しており、通常の亀裂伝播解析に用いられる応力拡大係数と変わりはないが、少し違うのは欠陥の大きさが非常に小さな場合には拡大係数の計算を通常よりかなりきめ細かい方法で計算をする必要があり、この辺りに本手法の基本的ノウハウが有るのであるが、ここではその説明を割愛する。

図2.6に本解析での最終結果と考えられる、荷重サイクル数に対応した亀裂長さを上記の溶接処理された溶接止端形状毎に示した。図には同様の止端形状を持った試験片を用いた疲労試験の結果も同時に示している。疲労実験結果の通例で実験結果にバラツキが有り、本解析の結果とは必ずしもピッタリ合うという訳ではないが、疲労実験結果が純粹の解析値と定性的、定量的にこれほど良く合致する例はほとんど皆無といって良く、本手法が問題の本質を非常に良く解明している事を示すものと解する事ができる。

(c) まとめ

以上に説明した全く新しい疲労強度解析手法の開発、及びその手法を用いた試験結果を得られた事をまとめると次のようになる。

- (1) 前述のごとく、従来の疲労強度解析に於いて曖昧さの源であった亀裂発生強度の概念を使わずに強度を求める事ができ、疲労強度をようやく解析的に取り扱う道筋を示す事ができた。これは今後の疲労強度解析を考える場合に非常に大きな意味を持っているものと思われる。
- (2) 止端形状を与えれば、その止端形状を持った溶接部の疲労強度を求める事ができる。従って、この計算を積み重ねれば止端形状を定義する各種パラメーターのうちどのパラメーターが疲労強度上重要であるか、疲労強度を保つためにはそのパラメーターの値をどの程度の大きさ以下に制限する必要があるかなど溶接作業の工作管理に必要な管理指標を求める事ができる。(この部分は今回の研究でやり残した領域である。)

2.4.2 目違い

近代造船建造はブロック建造法に依るところが大きいが、ブロック建造では宿命的にブロックの継ぎ目に生じる部材位置の不一致(目違い)が生じる可能性があり、この値を強度上問題とならない範囲に管理する事は造船工作管理の主要問題の重要な一つと考える事ができる。

目違いが強度上問題となるのは、部材位置が接続部でずれるために生ずる局部的な曲げ応力などが該部の応力値を上昇させ、疲労強度を減少させるためと考えられる。この局部的な応力上昇を解析的に評価する事は従来はなかなか大変な事であったが、最近のコンピューターの能力向上、解析ソフトの充実、解析コストの大軒なダウン等により比較的容易に取り扱う事が可能の状態になりつつある。

そこでここでは最新の解析ソフトを用い、できるだけ丁寧に目違いを有する構造の応力解析に取り組んだ。その目的は、

- (1) 目違いに依って生じる応力上昇を可能な限り正確に求め、その結果をもとに現状のJSQSの目違いに関する基準を見直し、現在の解析能力を背景とすれば、JSQSはどの様な表現になるかを試みに考察してみる事。
- (2) 解析は有限要素法を用いる事になるが、目違いを有する構造の場合、その特徴からいくつかの精度レベルに対

応した解析が可能である。解析の目的に応じどの様な解析が適当であるかを考察する事。等にあった。

(a) 実施した有限要素解析

当節の対象である、目違い構造の解析はかなり局部的な応力評価を目標としている。このような応力評価の場合は直接局部構造を対象に応力解析するのは解析精度の点で問題があり、該部を含んだ全体解析結果を徐々にズームアップする方法により評価するのが一般である。また局部構造の解析に於いてもシェルとしての応力評価を目標とする場合と更に詳しく板厚方向の3次元応力変化まで対象とする場合では解析手法が異なってくる。そこで、ここでは本問題解決のために実施した諸解析について簡単に説明する。

今回の解析の対象は目違い構造の象徴ともいえる、バルクキャリアトランスバルクヘッド下部、ボトムプレート、ツール斜板、トランスフロアが一点に会する部分の構造とした。また、対象船はS R 207の各WGの共通対象船である、15万トンバルクキャリアとした。図2.7は対象船に於いて今回対象とした上記目違い部の詳細を示す。ここで問題は図の斜板の中心線とフロアの中心線が不一致の場合、このズレ量を目違い量と呼び、これに依ってもたらされる応力の上昇量を評価することにある。

(1) ホールドモデル（図2.8参照）

対象とする局部構造の解析に先立ち実施する解析で、対象構造の境界条件（境界力、境界変位）を求める事を主たる目的として実施する。図に見るごとく、比較的荒いメッシュを用いたシェル要素による解析となる。この解析では、目的からも明らかのように該部における目違いは考慮していない。

(2) 構造不整解析モデル（図2.9参照）

目違い構造の解析を実施する場合の最も一般的なモデルと考えられるもので、シェル要素を用い、目違い部における応力集中を求めるため応力集中部近辺は十分に細かいメッシュを施し、境界線には(1)で求めた境界変位を与える。本解析では当然の事ながら目違いを考慮しモデル化を構成する事になる。

(3) 3次元ソリッドモデル（図2.10参照）

図2.7より明らかに、目違い近傍ではシェル要素の解析で得られる面内応力、板曲げ応力に起因する応力以外に3次元的な応力が生じる事が十分に予想される。そこでこの3次元応力を求めるために実施したのがここに述べる3次元ソリッドモデルによる応力解析である。図2.10に示すごとく、本解析の場合、非常に詳細な解析であるため(2)に示す部分構造の更に一部を取り出したズームアップ解析が必要となる。当然の事ながらソリッド要素を使い、境界線での境界変位は(2)の構造不整解析モデルの解析結果を用いる。

(4) 平板モデル（図2.11参照）

目違いによる応力上昇のメカニズムを明らかにするたは、系統的なシリーズ計算を必要とするが、大きなモデルでこれを実行するのは非常に手間がかかる。そこで、計算の精度をある程度保ちながら、手軽にシリーズ計算が可能なモデルとして本モデルが用いられた。図に見るごとく、計算目的に応じいくつかのモデルが使用されている。

(b) 解析結果

上記のごとく、本解析ではいくつかの検討対象項目を念頭に実施されたが、ここでは各項目について得られた解析結果の主要なものについて説明すると同時に主な結論を示す。

(1) 目違い部の応力（一般）

図2.12から図2.14に構造不整解析モデルを使った計算結果の一例を示す。図から得られた結論を示すと、

- ・当然予想される事であるが、目違いに依って応力上昇するのは曲げ応力であり、膜応力はほとんど影響を受けない。（図2.12～図2.14の(c)参照）
- ・ガーダーロンジの位置ではロングが板曲げを拘束するため、目違いによる応力上昇は非常に小さくなる。

したがって目違いの存在に依って、疲労強度低下がもたらされるのは、ロンジ間の板部である事を注目すべきである。（図2.12から図2.14(c)）

- ・目違い部には内底板、ツール斜板、トランスクロアの三つが交差するが、目違いの存在に依って応力上昇するのは主として内底板と斜板と考えられ、クロアに於いては他の二つに比し半分程度の上昇しか生じない。勿論これは各板の板厚等により変わるべきものであるが、ここで対象としている構造（バルクキャリア、トランスクロア下部三叉部）については一般的に言える事と考える。（図2.12～図2.14(c)）
- ・図2.15に目違い量を変化させた場合の応力上昇について示す。図にみると、本解析が対象としている範囲内では応力上昇は目違い量に概略比例していると言える。

(2) ソリッド解析とシェル解析の相違

ここでは目違い構造の解析に際し、ソリッド要素による解析とシェル要素による解析の特質を述べる。

- ・図2.16は上記二つの解析結果を比較したものであるが、図にみると両者の解析値に相違がみられるのは、ガーダー、ロンジ等が板曲げ変形を拘束し、その結果として3次元的応力が発生する領域や、溶接止端部近傍で元来応力が3次元的分布をする領域に於いてのみであり、その領域は非常に小さい。（板厚のオーダー）
- ・応力集中部で両者の解析値を比較すると、シェル解析値はソリッド解析値を常に上回っている。（応力比較位置を溶接止端位置とする事に注意）従って、シェル解析を行えば安全の評価となると考えられる。
- ・当然の事ながら応力が3次元的に分布する領域の応力評価はシェル解析では不可能であり、ソリッド要素の解析が必要となる。その一つとして溶接脚長の大きさが応力上昇に与える影響を調べる問題がある。図2.17はこの問題を対象として解析した結果を示したものであるが、この例では10%の脚長増により15%の応力ダウンがもたらされた。一般的に言って、溶接脚長の増加は応力減少に効果的といえる。
- ・ソリッド解析が必要な問題として、溶接とけ込み状態が応力に与える影響を調べる問題がある。特にここで対象としているツール下部三叉部では該部の溶接を開先をとったフルペネとすべきか、単なる隅肉溶接でよいか議論の多い構造であり興味がもたらされた。図2.18はこの問題を対象とした解析の結果の一例を示すものであるが、図に依れば隅肉溶接で未溶接部分を含んだ場合にはフルペネの場合に比較して倍以上の応力が発生している。この割合はケースによりかなり変わるとしてもとけ込み状態の応力に対する影響は本ケースのように溶接部が荷重を負担する場合には非常に大きいと言え注目を要する。目違い構造をシェル要素で解析する場合はフルペネを前提として解析している事に注意すべきであろう。

(3) 目違いによる疲労強度低下

今まで目違いによる応力上昇に焦点を当て述べてきたが、最終的には目違いの存在が強度にどの様な影響を与えるかが問題となる。そこで2.3.1で述べた新しい疲労強度評価法を適用して、目違いによる疲労強度の低下を試算してみた。図2.19は前述に摂動法に依って止端部近傍の応力分布を目違いのあるケースと無いケースについて求めたものである。この分布を新しい疲労強度評価法に適用して、荷重サイクル数と亀裂長さの関係を求めた結果を図2.20に示す。このケースでは該部に働く応力値をかなり大きめに与えたため、結果は比較的短寿命を与えているが、ここでの注目点は疲労寿命そのものではなく、目違いの有る無しによる相対的な寿命である事を考えると、図は目違いの存在に依ってかなり疲労寿命が低下する事を示している。

(4) JSQSとの対比

今回かなり詳しい解析を実施し、その結果から現在のJSQSがどの程度実状を反映しているものか考察し、更に精度の良い基準式を作るとすればどの様な形になるかを検討した。

- ・詳しい解析をすれば当然の事ながら、JSQSでは説明がつかないケースもあるが、総じて言えばJSQSの基準式はかなり問題の本質をついていると認めざるを得ない。

- ・ J S Q S の改良を試みた結果を要約すると、精度を上げるためにには当然の事ながら、 J S Q S では想えていなかったパラメーターをつけ加える必要があり、基準式そのものもかなり複雑にならざるを得ず、実際に利用するとすればかなりの手間暇とかなり丁寧な工作精度計測を必要とする。このような基準式を作る事が目的に叶う事かについては議論の余地があると感じられた。

(5) まとめ

- ・一般に目違い構造の解析としてはシェル要素を用いた解析で十分と考えられる。
- ・勿論、3次元的応力が問題となる構造では相応の解析が必要である。
- ・詳しい解析結果を基に現状の J S Q S を複雑化する事については議論の余地がある。

2.4.3 パネルの初期変形

鋼構造物に共通する破壊モードとして、疲労強度とともに座屈強度を挙げる事ができる。そしてこの座屈強度に関連する工作上の問題としていつも取り上げられるのが、ここで取り上げるパネルの初期変形である。

従来、座屈強度は解析に依って解明するのが非常に難しい問題の一つと考えられてきた。その理由は、

- (1) 昔の解析手法に不備な点が多く、非常に単純化された構造対象にしか対応できなかつたのに反し、実際に現れる構造、荷重は単純ではなく、実際を解析に反映するのが難しかった。
- (2) 解析の結果を検証するには座屈実験の結果との比較によるのが常道であるが、問題なのがこの座屈実験が非常に難しく、実験結果は大きくばらつくのが常であり、解析値との違いが本来の誤差なのか実験のばらつきなのかの見分けが非常に難しい。

と言った点にあった。

その後有限要素法などの適用に依って解析技術の発展は著しく、解析に当たって入力に誤差がなければほぼ正解に近い解を得られる状態にあるものと考えられる。唯現在に於いても、解析値を実験値と比較すると両者は必ずしも一致する事はなく、座屈解析に対する疑念を抱かせる事があるが、これは主として上記(2)の理由である場合が多く、解析手法の不備に帰せられる例は少ない。

ここでは最近開発され、座屈解析ソフトとしては定評のある A B A Q U S をもちい、パネルの初期変形がパネル、もしくはスチナー付きパネルの座屈（または座屈崩壊）強度に与える影響度について検討する。座屈強度の場合、他の強度の場合と比較して強度を決定するパラメーターの数が非常に多く全てのパラメーターの変化を考慮した検討には膨大な計算量を必要とする。本章の目的が船構造の工作管理という観点からの検討である事を考え、ここでは実際の船に現れると考えられるパネルに限定して検討する。

(a) 解析対象

実際の船構造に於いてはかなり広範な部材に座屈が起り得るが、船体強度の観点から考えると、大部分の座屈は2次的な破壊と考えられ、それが大破壊につながる可能性は低いと考えられる場合が多いが、外板、甲板等プライマリーメンバーに生じるものについては船の折損等大破壊につながる可能性を否定できず、十分に検討する必要がある。

そこでここでは船のプライマリーメンバーに働く外力パターンの特徴を考え、次に示す二つのパネルを解析の対象とした。

・パネル 1

上甲板のパネルを想定したもので、特徴として本パネルには縦曲げに由来する縦方向の面内力が強制変位として与えられるだけで他の外力は考へない。

・パネル 2

船底外板のパネルを想定したもので、パネル 1 との相違は外力として縦曲げ以外に横部材の曲げ変形に伴う横方向の応力、及び水圧を考慮にいれている点にある。

(b) 解析条件

前述のごとく、座屈強度の場合考慮すべきパラメーターの数が多く、ある程度パラメーターの変化を制限せざるを得ない。本解析で採用した解析条件を以下に示す。

・解析対象モデル

図2.21に本解析で使用した解析モデルを示す。図に見ると本モデルではパネルをその長さ及び幅の1/2の所で切断した1/4パネルとそれに付着したロンジとランスで構成される。切断線に沿った境界条件としては対称条件及び連続条件を適用し、全ての座屈モードに対応可能の条件としている。

・荷重条件

本解析ではパネルの縦方向及び横方向に働く面内外力、及び水圧を考慮した。このうち前2者については、対象とする解析モデルは相連続するパネルから切りとられたものであり、モデルの境界線に沿った変形の変化は隣接するパネルより拘束を受ける事を考慮し、等価の強制変位として与えた。

・初期変位

パネルの長手方向及び幅方向に半波のSIN変形を与えた。実際のパネルに現れる初期変位はバラエティに富んでおり、全てを網羅するのは不可能であるが、変形の主なる原因が溶接であり、溶接により生ずる変形には一つのパターンがある事を考えると、本解析で採用した初期変形パターンを考慮すれば、実質上問題は少ないものと思われる。

・計算条件

前述のごとく、本解析ではプログラムABAQUSを使用している。想定する外力（変位）の増分を順次与え、弾塑性解析を実施した。座屈荷重は外力増分に対する応力変分が負に転じる限界値として求めている。

(c) 解析結果

・モデル1

図2.22にモデル1で実施した計算対象の形状諸元を示す。図に示すごとく、2ケースについて解析しているが、上甲板パネルとして板厚比が最も小さいと想定されるもの及び最も大きいと想定されるものがそれぞれのケースに対応している。

図2.23はモデル1について行った解析結果の一例を示す。図2.24は解析した二つのケースの結果を座屈解析によく使われる座屈値-細長比曲線にプロットした。モデル1で得られた結果の主なものについて、これらの図を参考に述べると、

(1) アスペクト比5と言ったかなり細ながのパネルであるため、負荷の結果生じる座屈モードは図にみると、アスペクト比1のパネル（スクウェアプレート）の座屈モードに非常に似たものとなる。このことは本パネルの座屈値がスクウェアプレートの座屈値に近いのではないかと言う事、および初期に想定した変形が座屈モードと大きく異なる結果、初期変形の座屈強度に対する影響が非常に小さい事を窺わせるが、解析結果も同様の事実を示している。

(2) 図の荷重-変位に関する結果を見ると、座屈値はほぼ降伏応力に達している。このことはここで対象としている形状寸法のパネルでは座屈現象がそれほど顕著ではなく通常の塑性崩壊に近い破壊モードを示す事を窺わせる。

・モデル2

図2.25にモデル2によって解析したパネルの形状諸元を示す。前述のごとく、このモデルでは図に示すように、縦方向の力だけでなく、横方向の力及び水圧を外力として取り扱っている。これらの外力はその大きさの比を一定に保ちながら、各々の増分をパネルに加えその弾塑性応答の増分を求める形で解析された。

図2.26はモデル2について解析した結果の一例を示す。図に示される座屈モードはモデル1の場合に比較し

てかなり異なるが、これは横方向力（変位）による座屈モードが重畠されるためと考えられる。図2.27はモデル2に於いて初期変形の値を変化させた場合の座屈時の縦方向及び横方向応力に示したものである。（外力としては変位を与えるため、図の応力は座屈時の解析結果として得られるものである。）これらの図を参考にモデル2による解析結果の主なものを述べると、

- (1) モデル1の結果では初期変形は座屈値に余り影響を与えていなかったが、モデル2の場合には様相をかなり異にしている。つまり、縦方向力に対する座屈モードは初期変形と大きく異なりこれが座屈値に影響を与えない原因であったが、モデル2の場合、横方向にも力（変位）が働いており、横方向力（変位）に対応する座屈モードは初期変形とほとんど一致する。このことは初期変形は横方向の座屈値に大きな影響を与える事を意味している。
- (2) 本モデルに於いては縦横の力（変位）はその比を一定に保ちながら増加されているが、図の結果を見るに従うとまず横方向の力（変位）によって横方向の座屈が生じ、その後に縦方向の座屈によって崩壊状態にいたる事が判る。
- (3) 船の構造を考えると、もしパネルが横方向に座屈したとしても船には大きなトランスがあり、パネル座屈後もその形状を保つ。一方、パネルが縦方向に座屈すれば他に力を支える部材はなく崩壊にいたる事が予想される。このことはパネルの座屈を考える場合、縦方向の座屈は横方向の座屈に比較してより大きな意味を持っている事を示している。
- (4) 図2.27を見ると、初期変形が大きくなるとかえって縦方向の座屈応力が大きくなっている。これは初期変形及びその後の横座屈によって、パネルがあたかもシェル構造になったような効果を与えるため座屈値を上昇させていると解釈する事ができる。
- (5) 図2.27には水圧を変化させたケースの結果も示されており、図では水圧の存在によって座屈値が減少する結果となっている。しかしながら更に水圧を大きくしたケースについて解析したところ、今度はより小さな水圧をかけたケースに比べ座屈値が上昇した。（図2.28）この現象は水圧による変形モードが初期変形のモードと異なる事に起因したものと解する事ができる。結論的に言えば水圧の存在によって座屈値は若干減少するもののその減少には限度があるといえる。

(d) まとめ

一連の解析を実施した結果をまとめると、

- (1) ABAQUSによる解析により、考慮したパラメーターの影響度はかなり正確に評価できるのではないかと思われる。
- (2) ここで対象とした、外板パネルの場合には初期変形の座屈強度に対する影響はかなり小さい事が予想される。
- (3) 同様に面外水圧も多少座屈強度に影響するもののその程度は小さい。

以上、代表的な工作管理指標である、溶接形状、目違い、初期変形について現状の解析能力を検証した。結論的に言えば、工作管理上考慮すべき指標、パラメーターが強度に与える影響度については完全とは言えないまでもかなりの精度で評価できるものと思われた。

2.5 今後の工作管理

2.1～2.3に於いて検討した結果を基に、今後の工作管理のあり方について考察を行う。上記の検討に於いて得られた結果のうち、ここに特に関係の深いものを今後の工作管理を考える上での前提として再述すると、

- (1) 現在実施されている工作管理は、非常な速度で進歩している計測技術の現状から考えれば、前時代的な状態にあると言わざるを得ない。

- (2) 工作管理の管理指標の合理化の面で重要な意味を持っている、工作誤差と損傷事故との相対関係については情報が必ずしも十分に集積されておらず、今後の課題の一つと考えられた。
- (3) 損傷に関する過去の情報によれば、衰耗等いわば船引き渡し後の状態変化に由来する損傷がかなり大きな割合を示す事が窺われ、引き渡し以後の船体管理の重要性が注目される。
- (4) 工作精度が強度に及ぼす影響度を評価する解析手法は、コンピューターの演算能力の急速な向上と解析ソフトの充実が相まって、その能力を大きく伸ばしており、完全とは言えないまでもほとんど全ての問題に対応できる状態にあると考えられる。

工作管理を考える上で、全てを総括的に述べるよりは、管理密度の濃淡、設計手法の相違などを考え、いくつかのレベルに分解して考える方が判り易いものと思われる。そこでここでは次のようにレベル分けし述べるものとする。

- レベル 1 本来工作管理は設計と深く関係するものであり、設計が変われば工作管理も変わるのが理想である。しかしそれ以前に船建造に当たっての常識、少なくとも満足すべき工作精度が存在するものと考えられ、このレベルの工作管理をレベル 1 と呼ぶ事にする。
- レベル 2 船は一般にルールに基づき設計される。これに対応した工作管理をレベル 2 と呼ぶ事にする。
- レベル 3 最近の趨勢として、解析に基づき船を設計する事も希ではない。このような設計手法に対応する工作管理をレベル 3 と呼ぶ事にする。
- レベル 4 現在必ずしもルーチン化していないが、船の安全を考える上で重要な意味を持つと思われる、建造後の状態管理をレベル 4 と呼ぶ事にする。

(a) レベル 1 の工作管理

必要最低限の工作管理、個々の建造会社、建造工場に係わらず共通の管理目標として位置づけられる。特徴として、

- (1) 管理の性格上、詳細な管理項目は対象となり得ず、船構造に固有の管理目標を対象とする。
- (2) 同様に、比較的簡単な手法によって管理可能なものに限られる。
- (3) 全造船会社が遵守すべき管理標準として、第 3 者機関による権威づけが望まれる。

等を挙げる事ができるが、現在の J S Q S はレベル 1 の工作管理標準として十分その役目をはたしているものと理解できる。本 WG では J S Q S の改善を試みたが、管理手法の複雑化を避ける事ができず、レベル 1 の標準としては問題が多いと考えられた。

今後のレベル 1 の工作管理の問題点として、以下を述べる。

最近の船建造の傾向として、人手による建造の範囲を極力避け、C A D、C A M 等を大々的に導入し自動建造の範囲を可能の限り増やす傾向がみられる。この時、自動建造の場合に固有の工作上の問題が数多くある事に注目すべきと考えられる。将来的には自動建造を前提とした J S Q S の制定が待たれる。

(b) レベル 2 の工作管理

ルールは過去の実績の上に定められた事を考えると、このレベルの工作管理も過去の実績をベースに主として各造船会社の責任で実施される場合が多いと考えられる。

このレベルの工作管理の将来を考える場合、以下の問題点を挙げる事ができる。

- (1) このレベルの工作管理の管理密度を上げるために、上記のごとく過去の実績を随时フィードバックする必要があるが、実績のうち特に重要なのは損傷と工作管理との関連を示す情報であると考えられる。が、現実にはこの情報の集積が十分ではなくフィードバックも十分とは考えられない状態にある。ルールが船級協会によって定められる事、個々の造船所が全ての損傷事故に立ち会う事が不可能な事を考えれば、これらの情報集積はある程度船級協会の責任に於いて実施される事が望ましい。

- (2) 上記のフィードバックに当たっての道具建てが必ずしも十分でない。前述のごとく、個々の解析手法は十

分の能力を持っており、どの様なストーリィの上に解析を実施するかについての検討が今後必要と思われる。

- (3) 工作管理は設計が変わればそれに合わせて変えるのが本来の姿、今後ルールが更新される事も多いと予想されるし、新しい船種が出てくる事も考えると、レベル2の工作管理は将来的には次のレベル3の工作管理に移行する事が望ましい。

(c) レベル3の工作管理

いわゆる“DESIGN BY ANALYSIS”的設計思想では工作管理は設計の一環として考えられるべきものである。通常、“DESIGN BY ANALYSIS”では、構造に働く応力及び構造の強度は一つの確率変数として取り扱われる。そして、工作の結果生じる誤差は強度を決定するパラメターの一つと考えられ、同じく確率変数の一つとして取り扱われる。このレベル3の工作管理を行うにあたり問題と考えられる点を以下に述べる。

- (1) 工作の結果生ずる誤差を確率変数として取り扱う為には、誤差をかなり精度良く計測できる必要があるが、現状ではまだ精度良く誤差を計測できる体制がない。計測技術は既に有るものと考えられるが、体系立ったシステムの構築が待たれる。
- (2) 同様に、確率変数の精度はサンプルの量で決まるが、現状は情報の蓄積がはなはだ乏しく、確率的取扱いに至っていない。
- (3) レベル3の工作管理は究極的にレベル4の工作管理につながる。この意味でレベル4の工作管理上の問題点はレベル3の問題点でもある。

(d) レベル4の工作管理

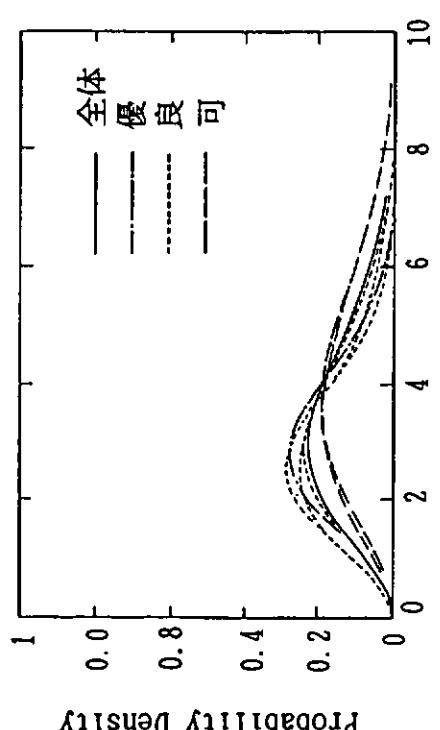
保証ドック等レベル4に属する管理に似たものはあるが、現状の造船は引き渡しまでが造船会社の責任であり、引き渡し以後はその管理には一切関係しないと言うのが一般的な考え方と思われる。現実にはかなり年数を経た船に於いて事故が続出している現象を無視する訳には行かない。また、今後“DESIGN BY ANALYSIS”に基づく船が多くなるとすれば、その基本思想が船の安全性を維持できる設計をする事にあり、安全性の評価に於いては船引き渡し以後の状態管理が大きく設計にも関係してくる。今後はここに述べるレベル4の工作（状態）管理の重要性が増すものと予想される。レベル4の工作管理を行うに当たっての問題点を以下に述べる。

- (1) まず、引き渡し後かなり年数の立った船は建造直後の船とは全く違った船であるとの認識が必要である。
- (2) 船構造の安全性を確保するため、どのような状態管理システムが必要かについて官民共同での調査研究が必要と考える。
- (3) 年数の立った船の強度上の診断を行う、システム、アルゴリズムがほとんど研究されていない。
- (4) 例えば、衰耗状態の船の余寿命（疲労、最終強度などの観点から）など今まで検討されていない研究領域についての研究が急がれる。

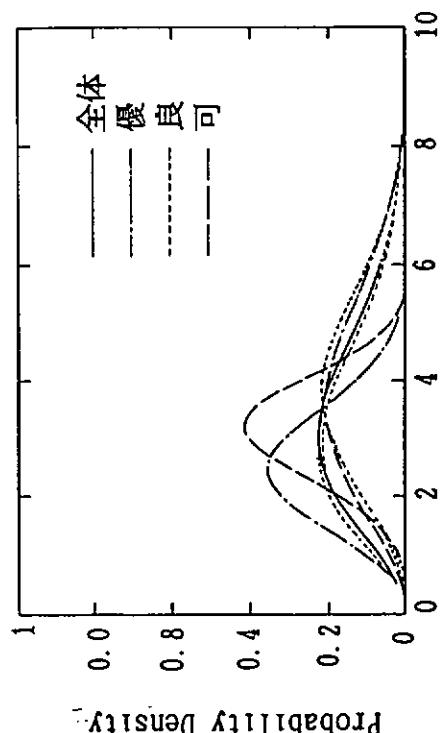
以上、今後の工作管理について考察し、問題点を提示した。

2.6 まとめ

工作管理の現状について調査し、現状の解析技術で工作誤差が構造強度に与える影響をどの程度明らかにできるかを具体的な例を用いて検証した。結論として、現状の解析技術を正当に使えば、完全とは言わないまでも、工作誤差の強度に与える影響度を明らかにできると思われた。最後に以上の技術の現状を基に将来の工作技術について考察し問題点を提示した。



(a) 応力集中係数の分布 (トウ音)



(b) 応力集中係数の分布 (ヒール音)

図 2.1 溶接形状目視結果と応力集中

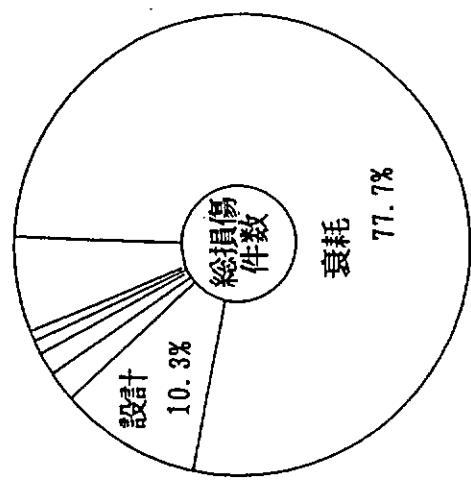
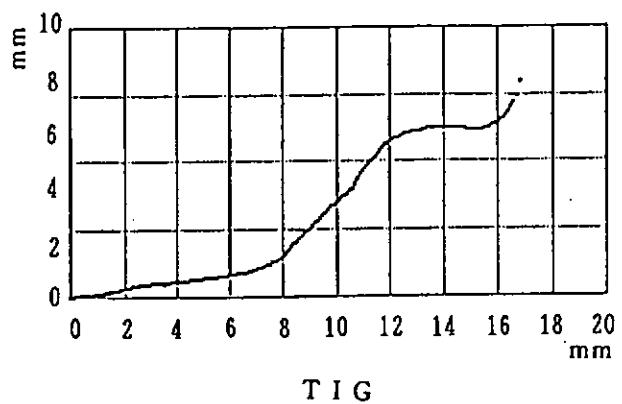
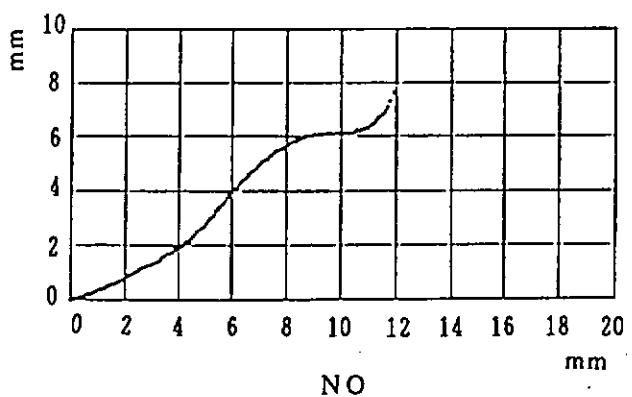


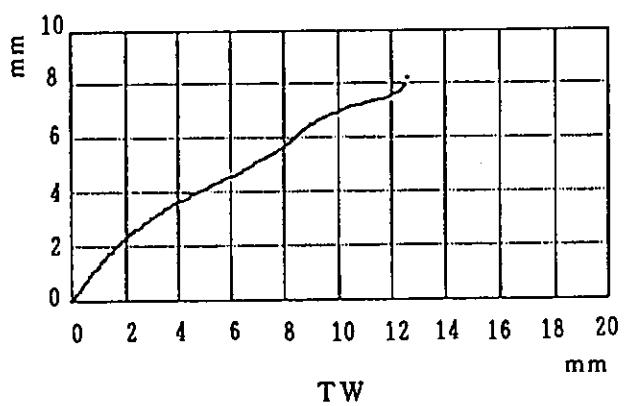
図 2.2 総損傷件数の原因別内訳



TIG



NO



TW

図 2.3 溶接ビード形状

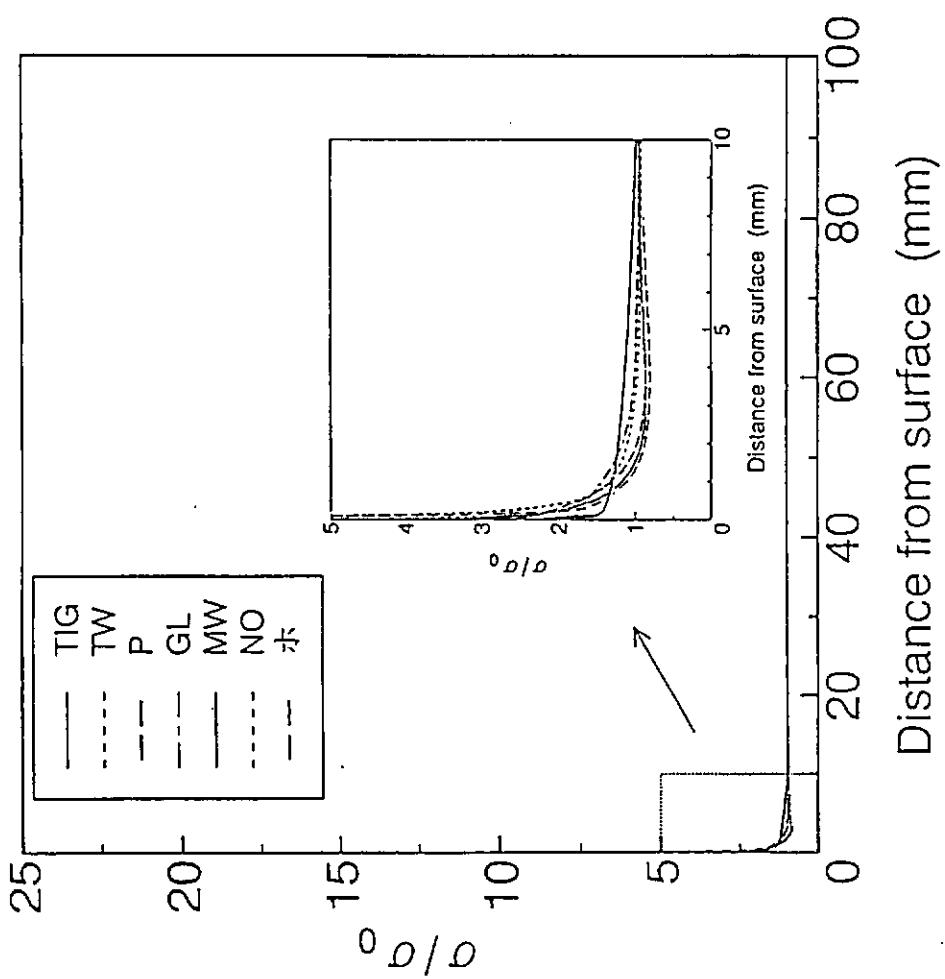


図 2.4 各種溶接ビード形状に対する応力分布

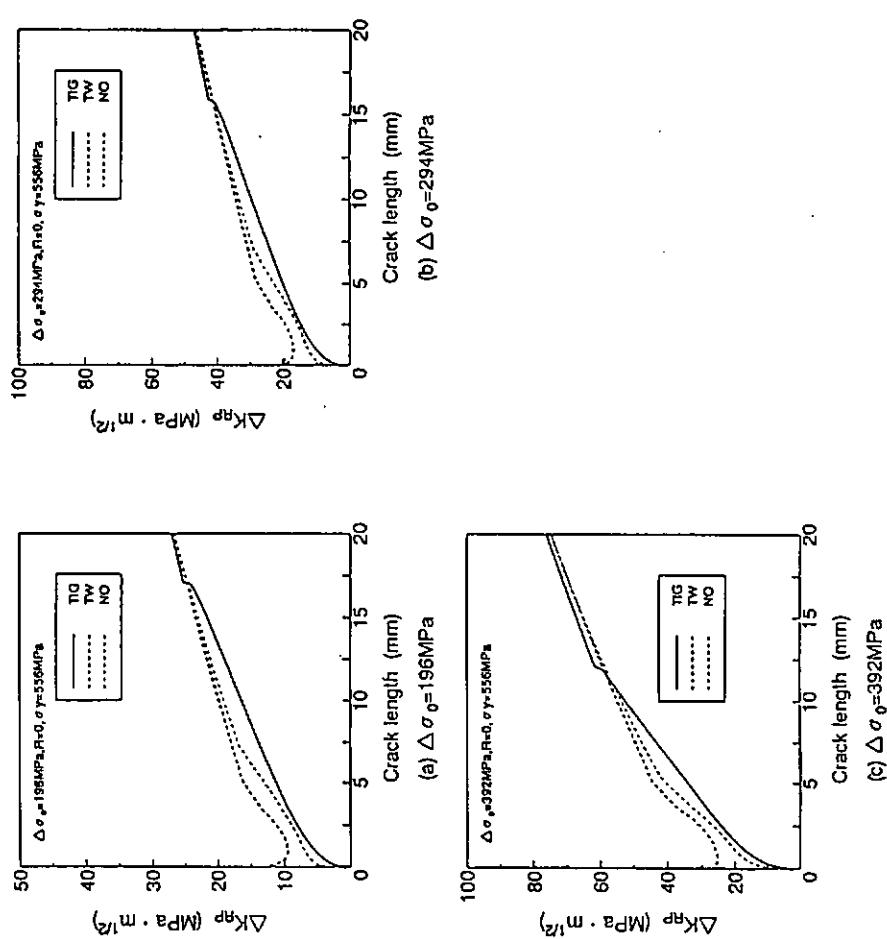


図 2.5 応力拡大係数 ΔK_{rp} の変化挙動

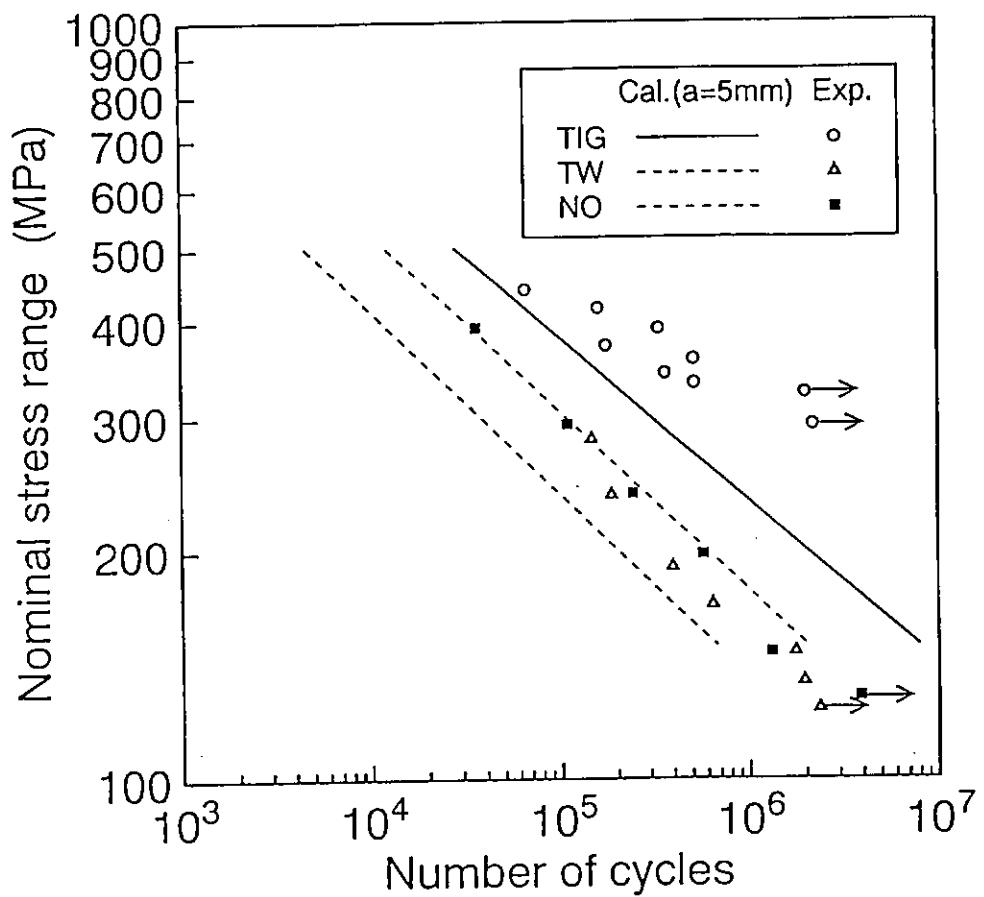


図 2.6 S-N 曲線の解析値と実験値との比較

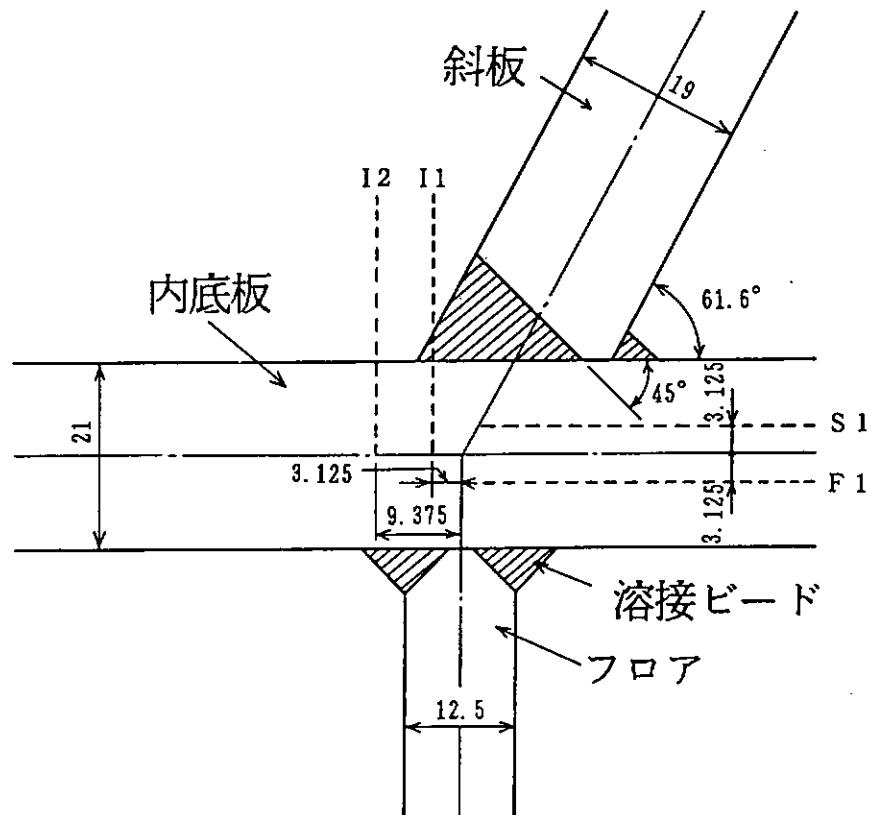
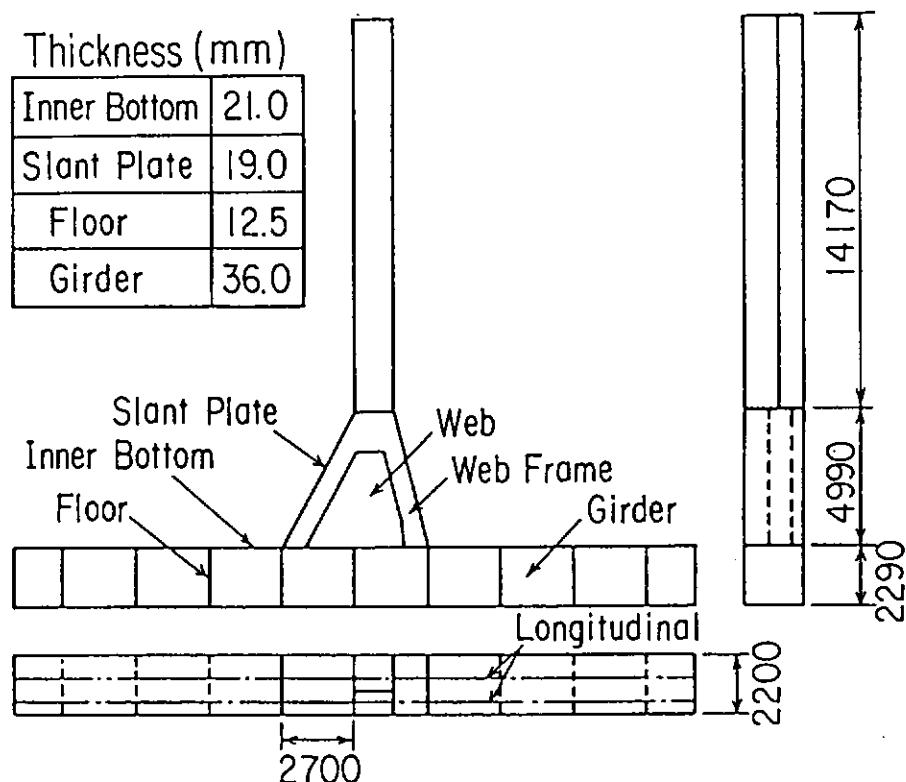
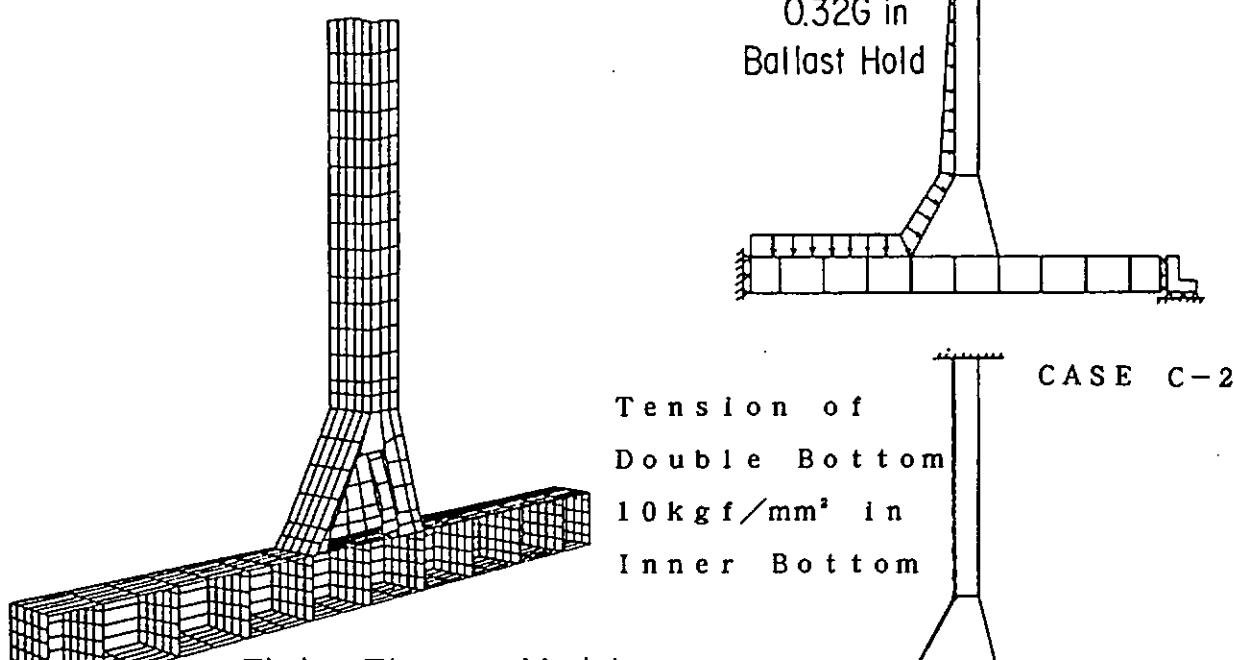


図 2.7 ロアスツール下端部形状と応力評価位置

Thickness (mm)	
Inner Bottom	21.0
Slant Plate	19.0
Floor	12.5
Girder	36.0



CASE C-1
Hydro Pressure
0.32G in
Ballast Hold



CASE C-2
Tension of
Double Bottom
10 kgf/mm² in
Inner Bottom

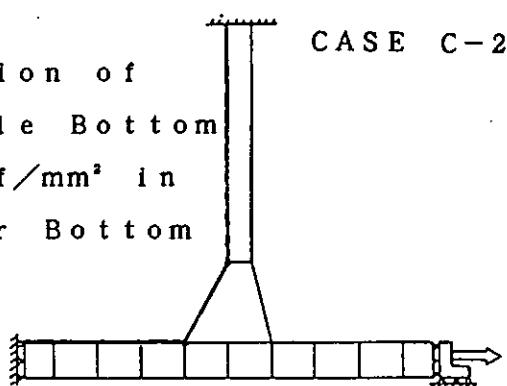


図2.8 解析モデル(ホールドモデル)

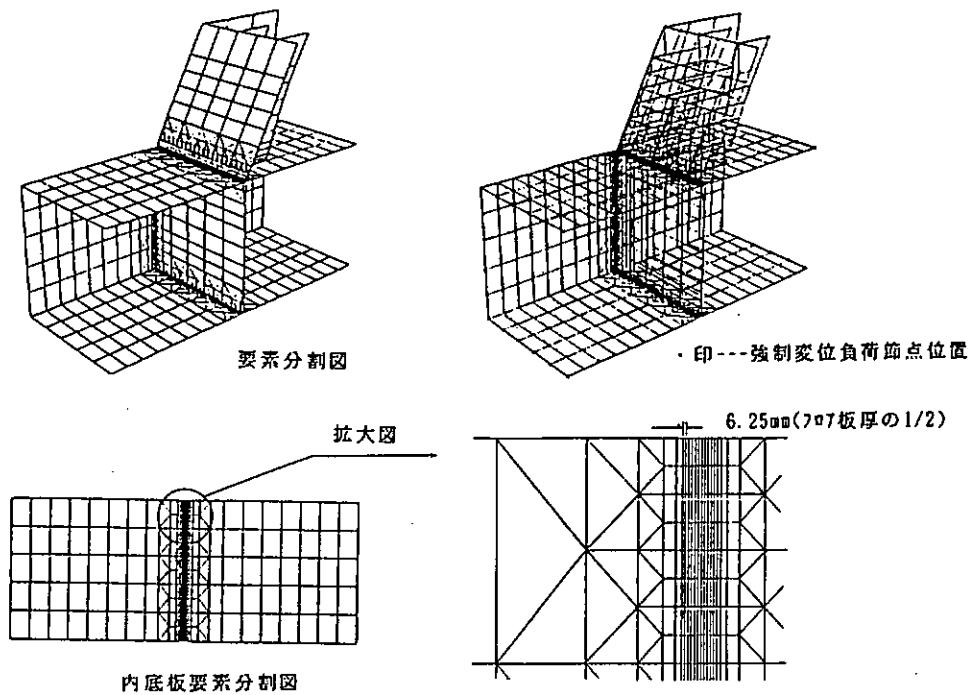


図 2.9 構造不整解析モデル

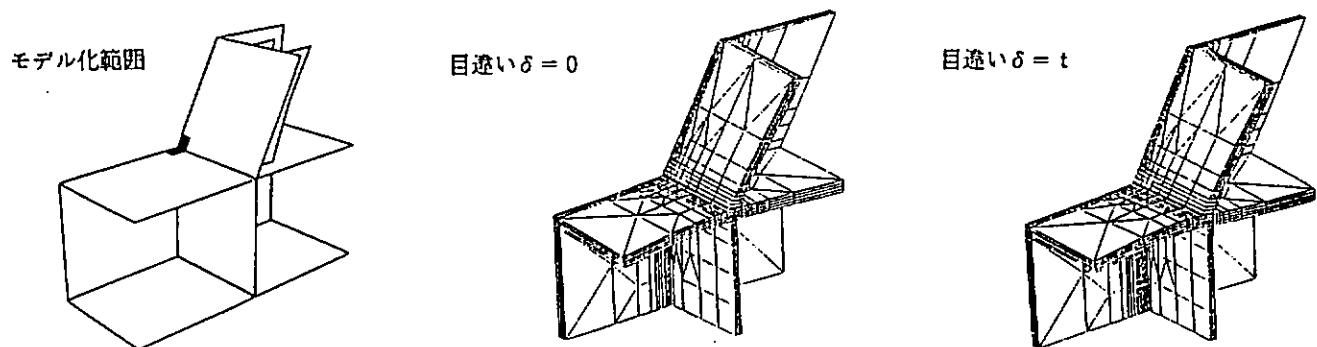


図 2.10 3次元ソリッドモデル

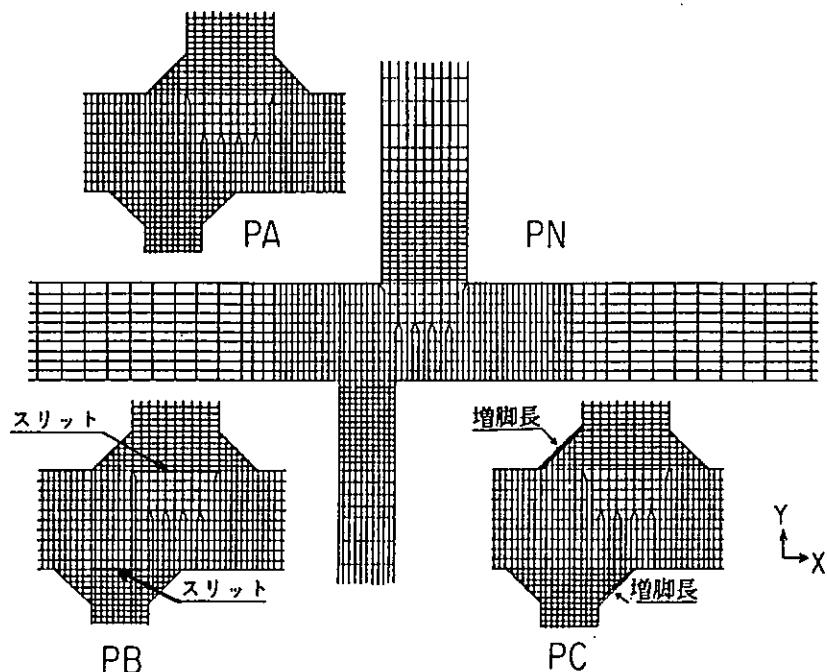


図 2.11 平板モデルの要素分割

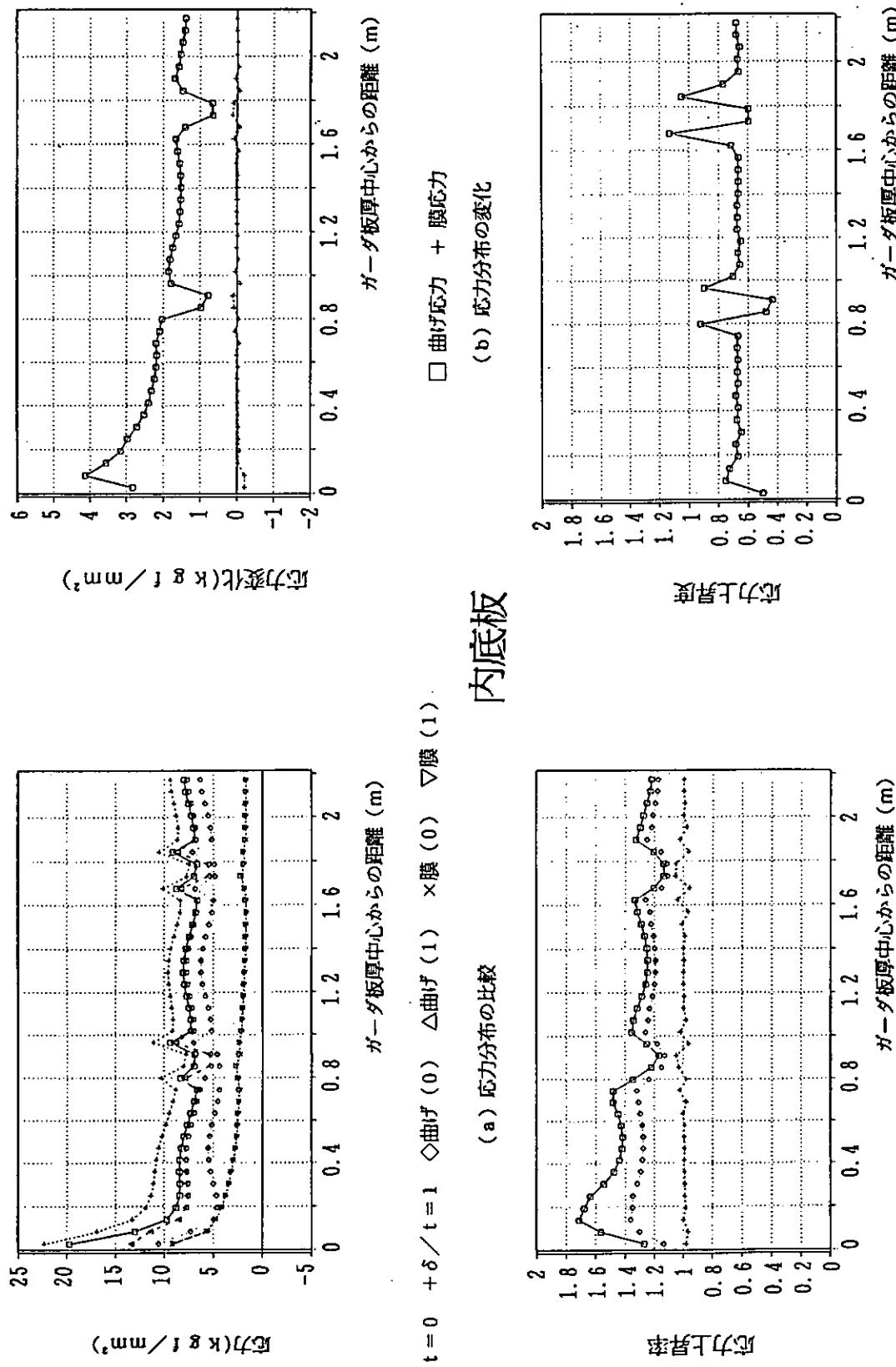
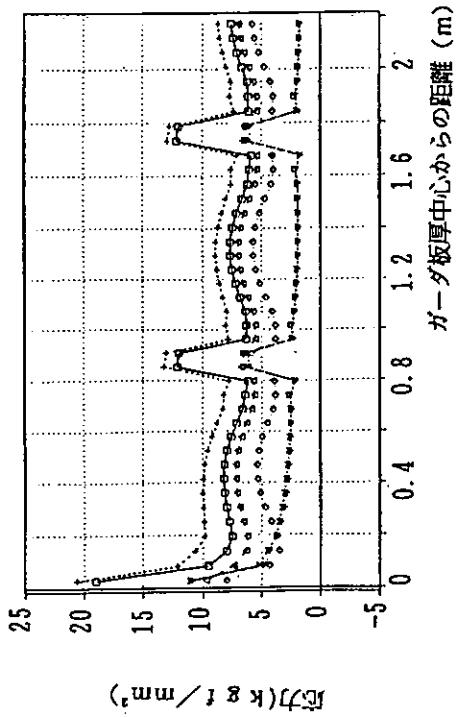
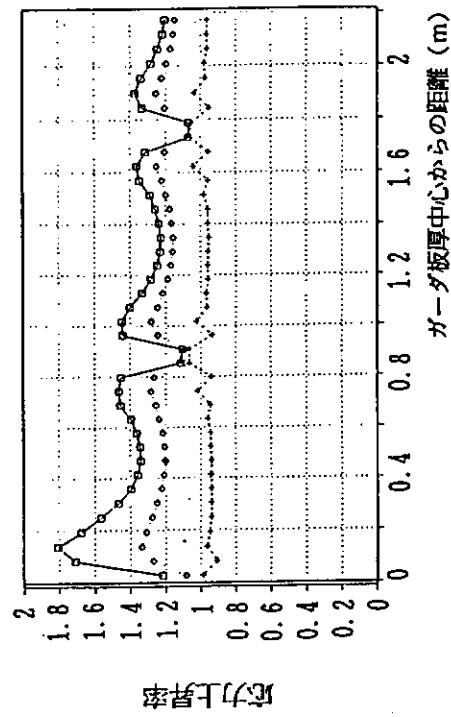


図 2.12 ロアスツール下端に沿った応力および応力変化の分布
(c) 応力上昇率の分布 (目違いがある場合の応力)
(d) 応力上昇度の分布 (目違いによる曲げ応力上昇/膜応力)



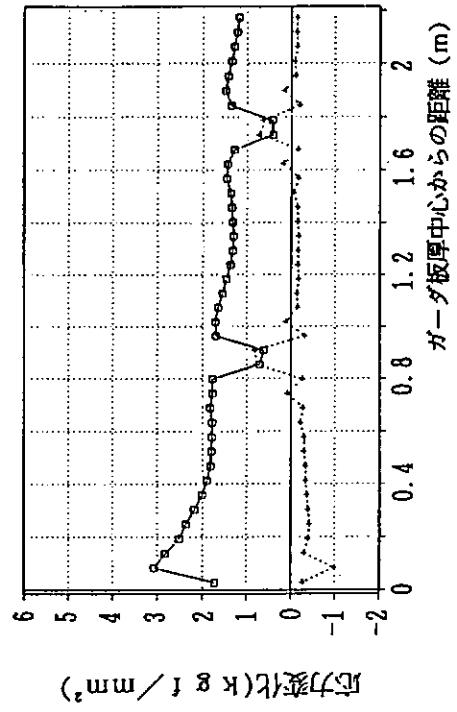
余材板

(a) 応力分布の比較
 $\square \delta/t = 0 + \delta/t = 1$ \diamondsuit 曲げ (0) \triangle 曲げ (1) \times 膜 (0) ∇ 膜 (1)



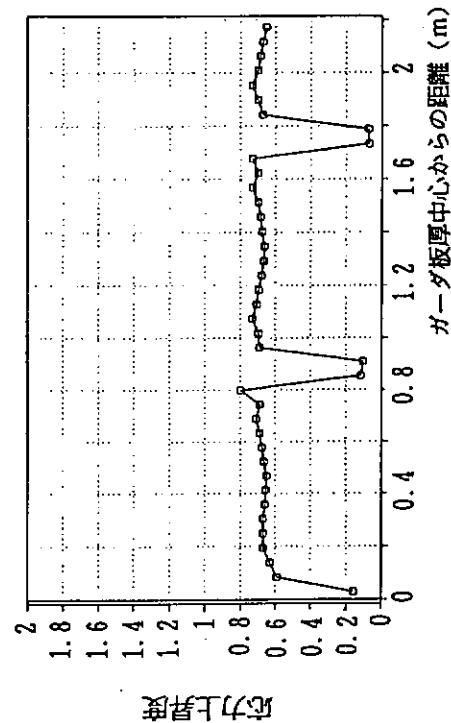
(c) 応力上昇率の分布（目違いがない場合の応力／目違いがない場合の応力）

\square 曲げ + 膜 \diamondsuit 膜・曲げ



(b) 応力分布の変化

\square 曲げ応力 + 膜応力



(d) 応力上昇度の分布（目違いによる曲げ応力上昇／膜応力）

図 2.13 ロアスツール下端に沿った応力および応力変化の分布

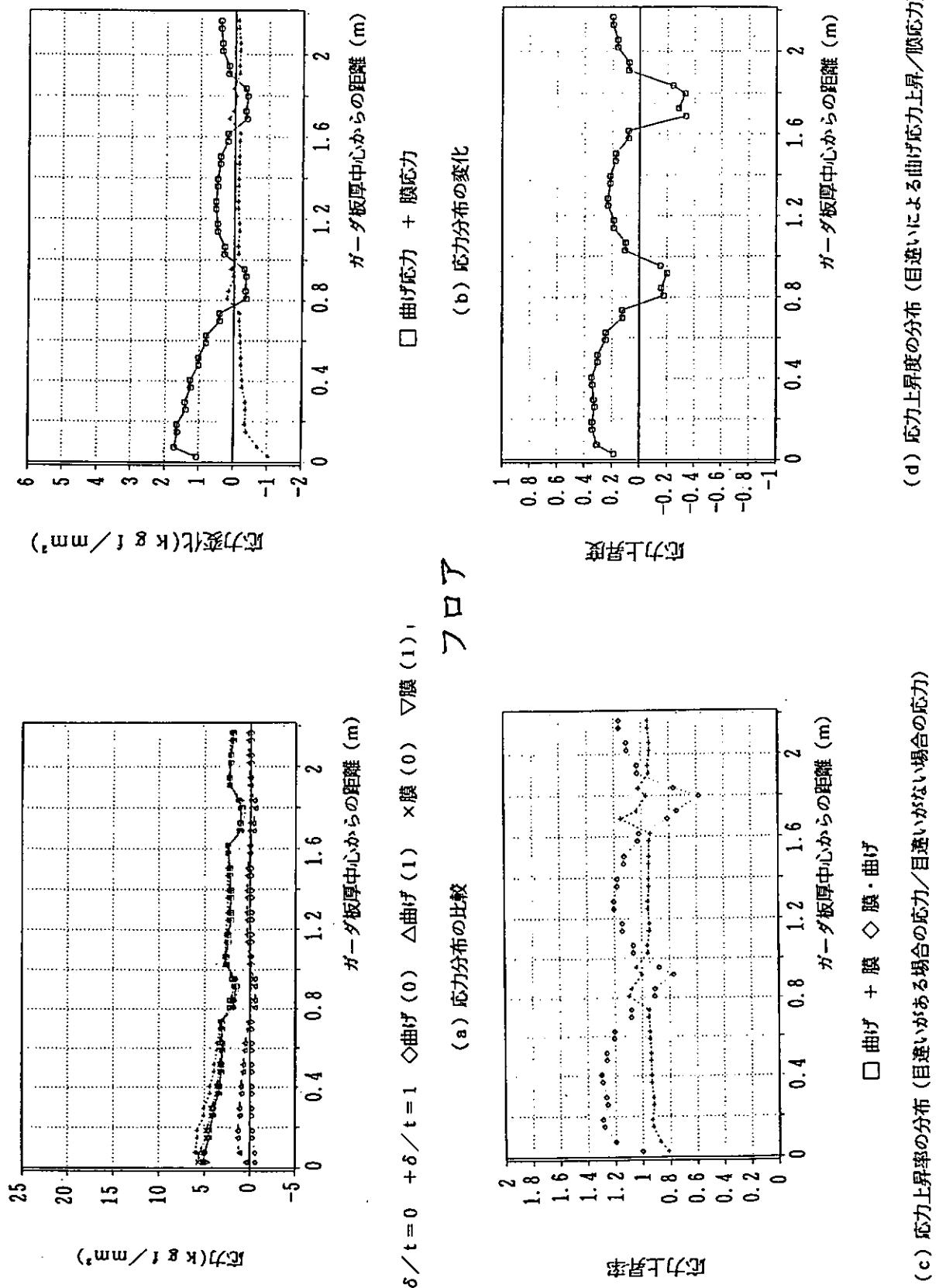
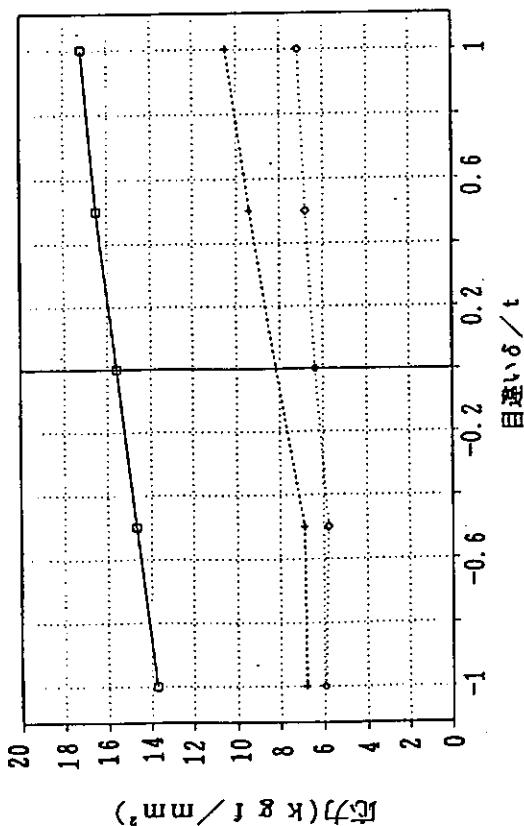
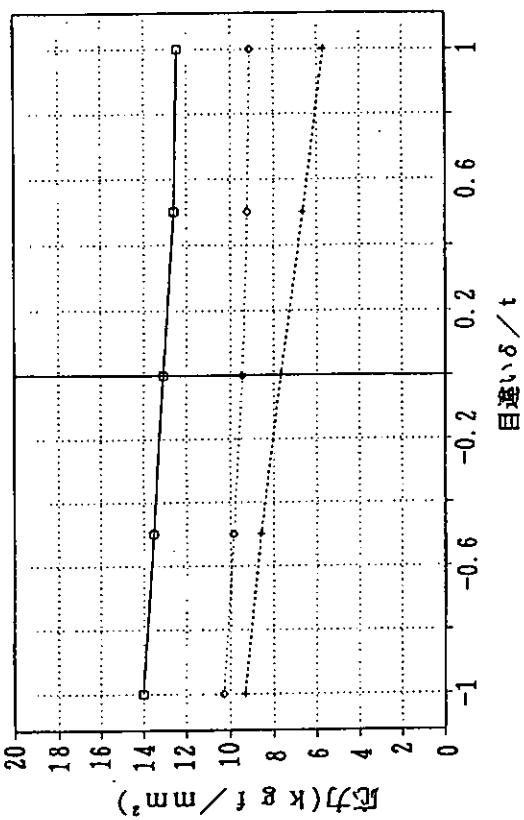


図 2.14 ロアスツール下端に沿った応力および応力変化の分布



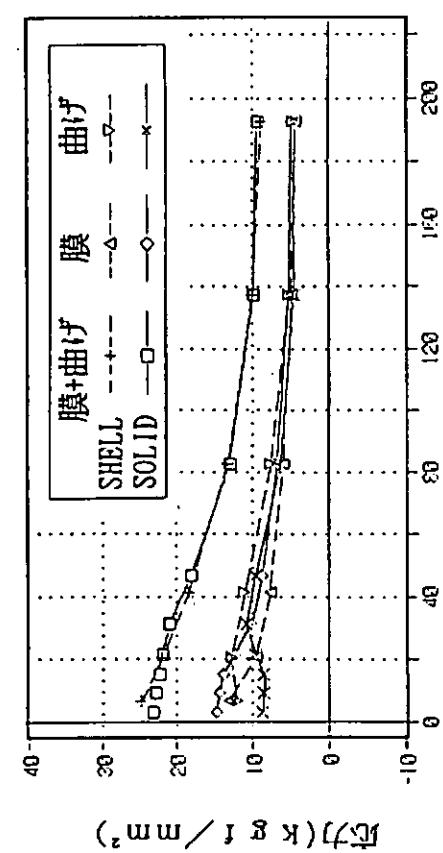
(a) 内底板



(b) 斜板

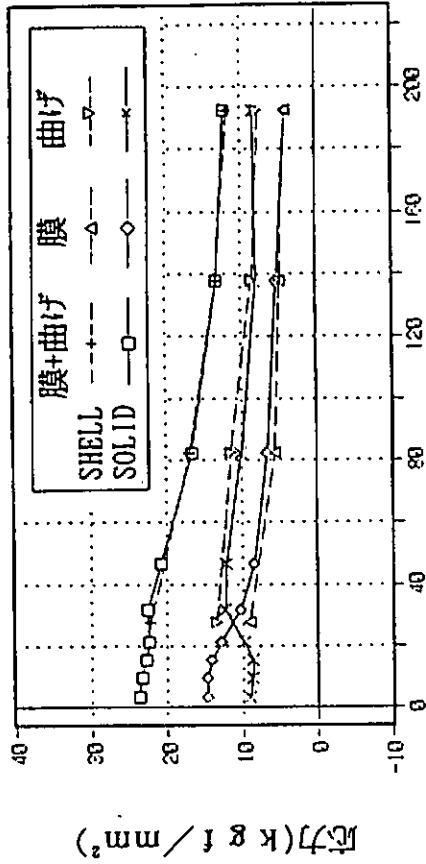
□ガーダ (z = 27.5 mm) +ガーダ・ロング間 ◇ロンジ (z = 85.2.5 mm)

図 2.15 目違い量による応力上昇



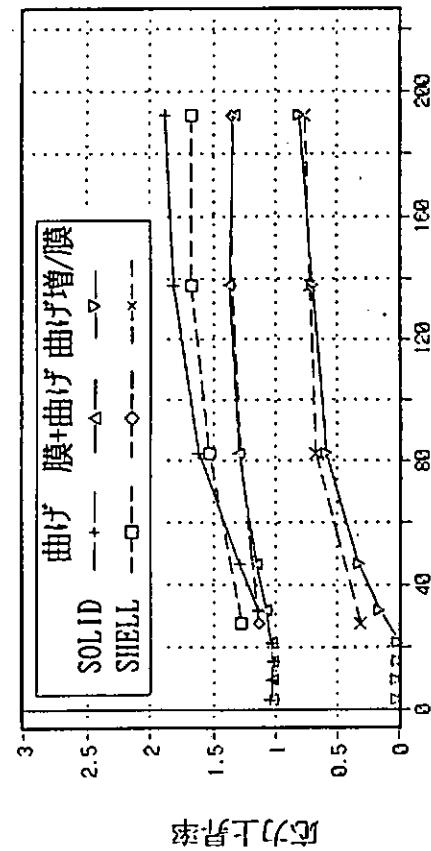
ガーダ板厚中心からの距離 (mm)

(a) 目違い $\delta / t = 0$, 内底板上面



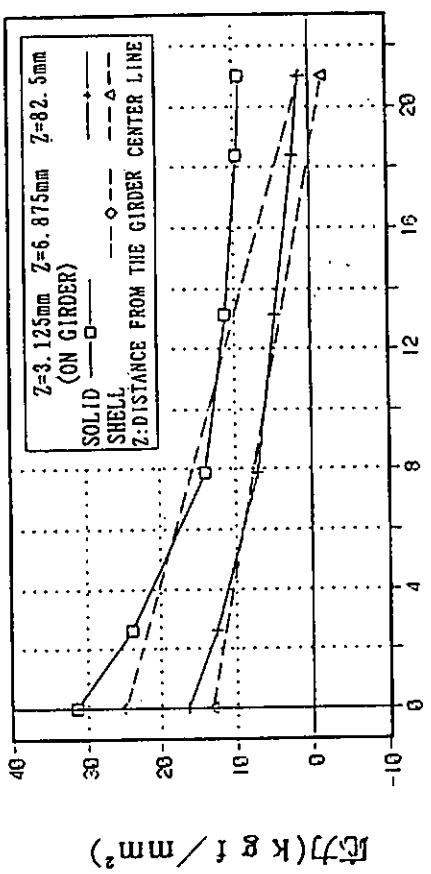
ガーダ板厚中心からの距離 (mm)

(b) 目違い $\delta / t = 1$, 内底板上面



ガーダ板厚中心からの距離 (mm)

(c) 目違い $\delta / t = 1$, 内底板上面



ガーダ板厚中心からの距離 (mm)

(d) 目違い $\delta / t = 0$, 内底板内部

図 2.16 シェル解析とソリッド解析

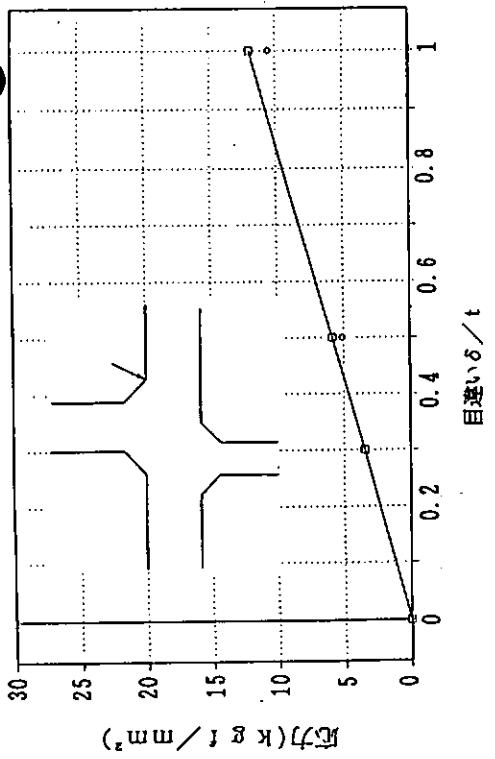


図 2.17 溶接脚長増の効果

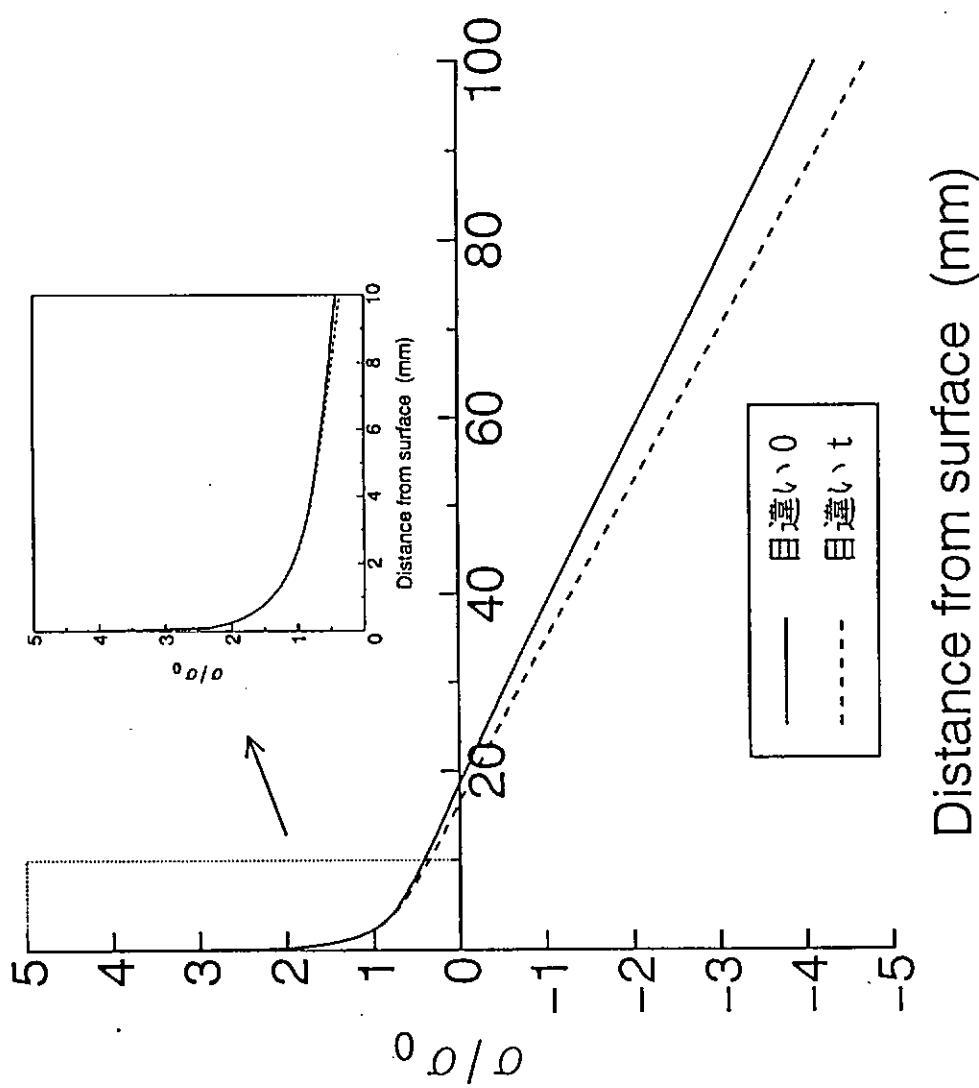


図 2.19 ロアスツール部の応力分布

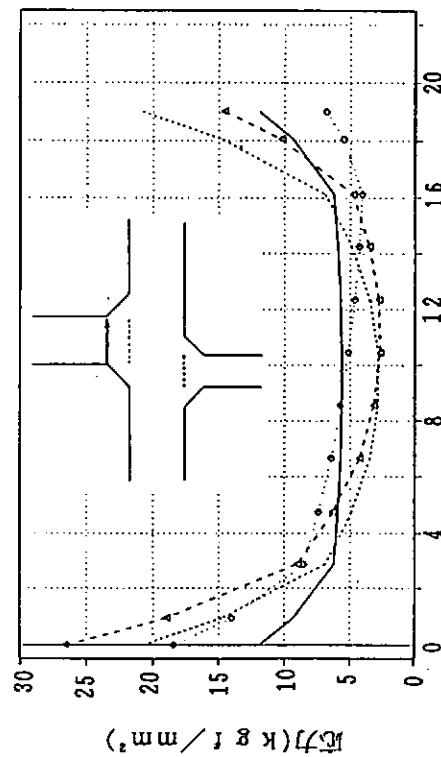


図 2.18 溶接止端部の応力分布に対する溶込み
および目違いの影響 (斜板)

$\delta=0$ (\triangle) $\cdots \delta=0$ (隅肉) $\diamond \delta=t$ (\triangle) $\triangle \delta=t$ (\triangle) $\triangle \delta=t$ (隅肉)

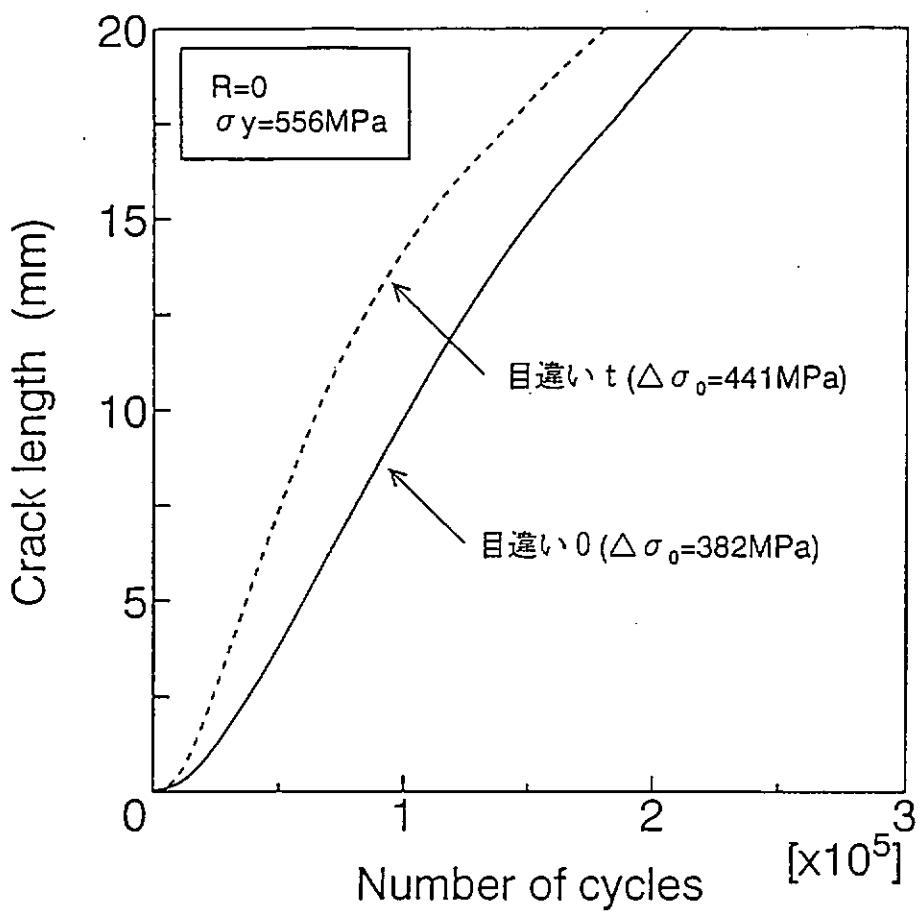


図 2.20 寿命解析結果

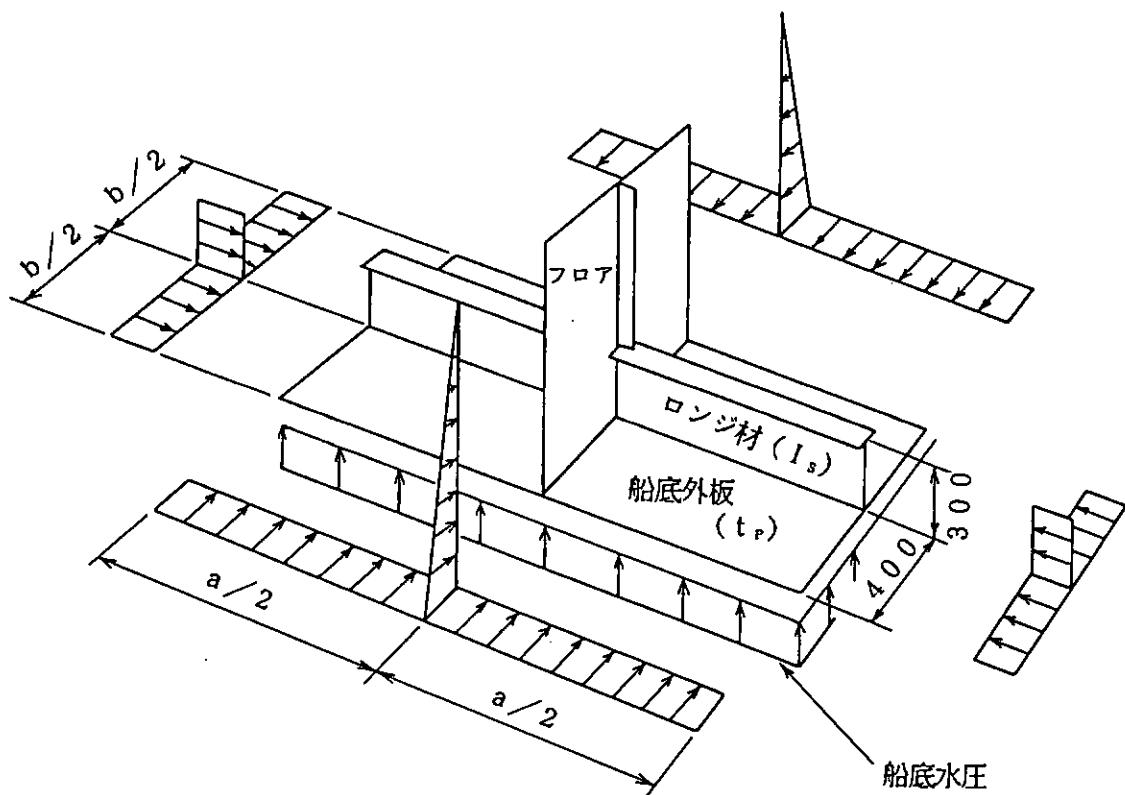


図 2.21 船底外板構造解析モデル

モデル	b/t_r	α	σ_{yr}	β	γ	短辺の拘束条件	初期不整量	
							$W_o = 0.2 t_r$	$W_o = 0.4 t_r$
D 1	50	5.0	36.0	2.07	533.	対称(SYM.)	D-11°	D-13°
						連続(CONT.)	D-12°	-
D 2	30	5.0	36.0	1.24	115.	対称(SYM.)	D-21°	-
						連続(CONT.)	-	-

$$\alpha = a/b$$

$$E = 21,000 \text{ kg/mm}^2$$

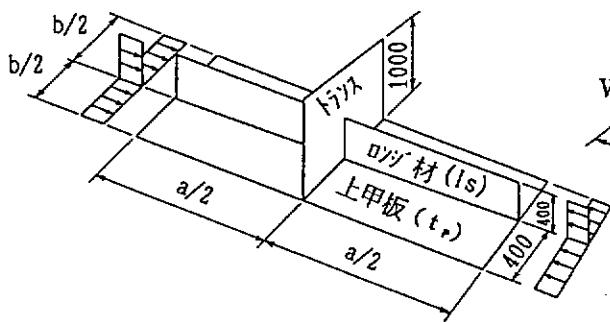
σ_{yr} : 上甲板およびロング材
の材料降伏応力 (kg/mm^2)

I_s : ロング材断面2次モーメント

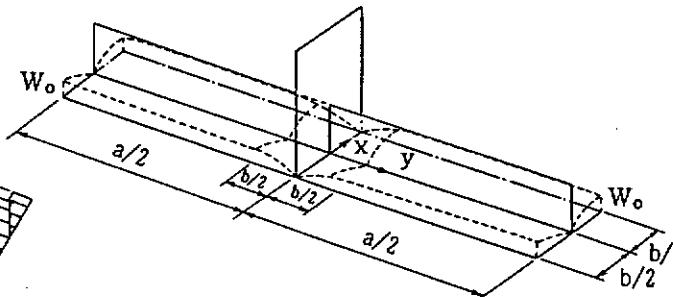
$$\beta = b/t_r \sqrt{\sigma_{yr}/E}$$

$$\gamma = \frac{E I_s}{b D}$$

$$D = \frac{E t_r^3}{12(1-\nu^2)}$$

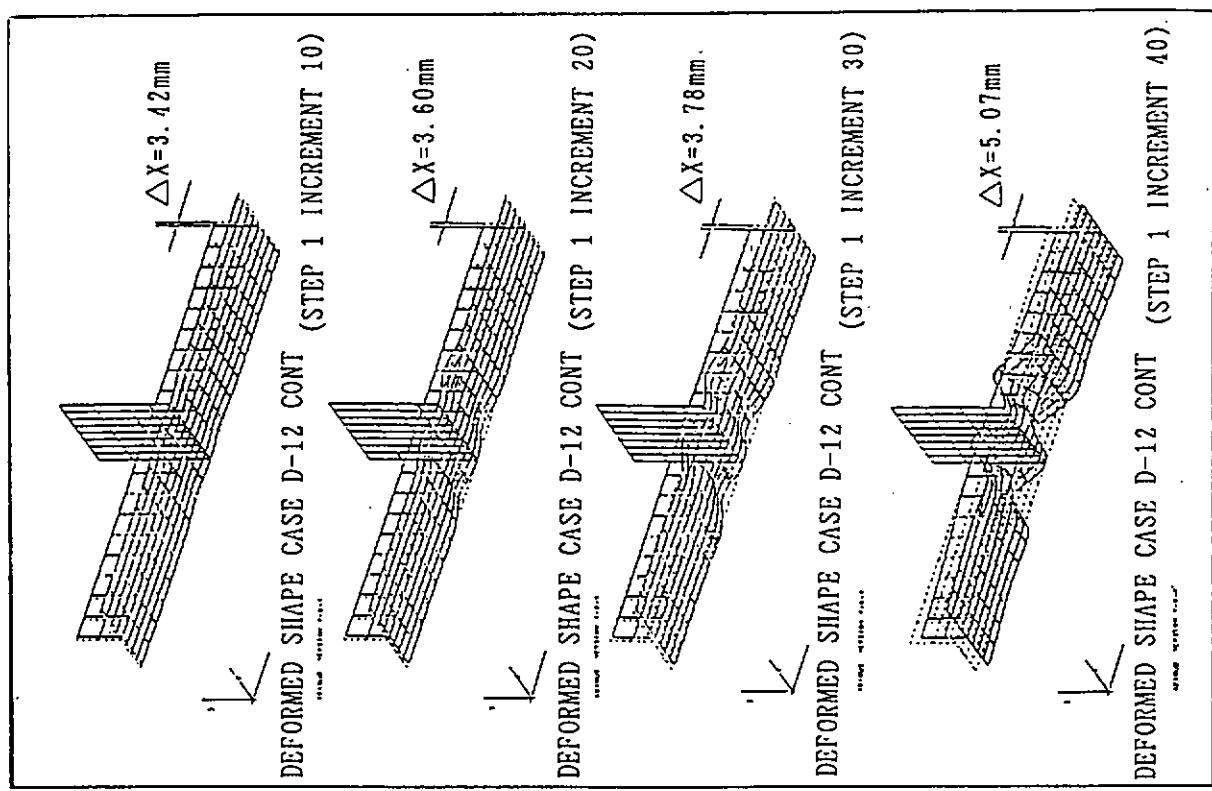


(a) 上甲板構造モデル



(b) 初期不整量

図 2.22 モデル 1, 解析対象形状寸法



(b) 多形図

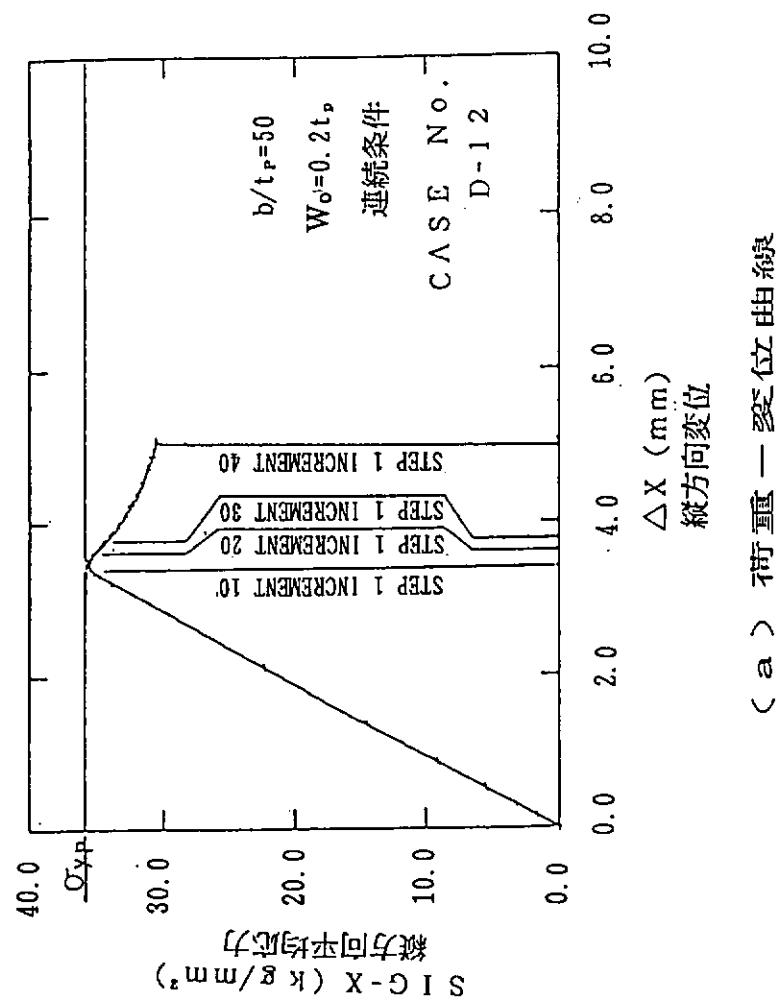
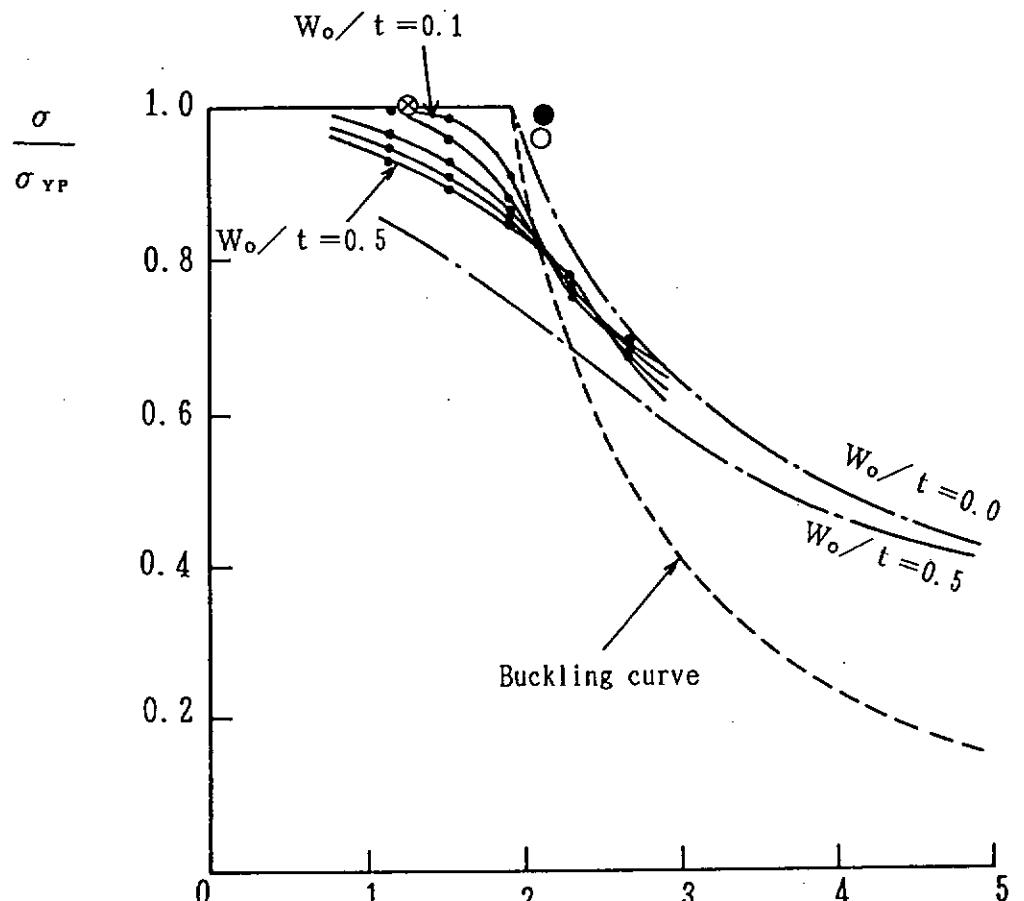


図 2.23 パネル 1 , 解析結果例



$$\beta = \frac{b}{t_p} \sqrt{\frac{\sigma_{YP}}{E}}$$

——— 正方形パネル単独モデル（周辺単純支持）の最終強度曲線

四辺形パネル単独モデル（周辺単純支持）の
最高耐荷重 FEM 解析値

—●— $\alpha = 5.0$ $W_o/t_p = 0.1 \sim 0.5$

⊗ $\alpha = 5.0$ $W_o/t_p = 0.2$ (対称条件ケース)

● $\alpha = 5.0$ $W_o/t_p = 0.2$ (対称条件ケースおよび
連続条件ケース)

○ $\alpha = 5.0$ $W_o/t_p = 0.4$ (対称条件ケース)

図 2.24 モデル 1, 解析結果

$$\beta_x = b / t_p \sqrt{\sigma_{yp}/E}$$

$$\beta_y = a / t_p \sqrt{\sigma_{yp}/E}$$

モデル	b / t_p	a	α	σ_{yp}	β_x	β_y	γ
B 1	50	3.0	32.0	1.95	5.85		198.

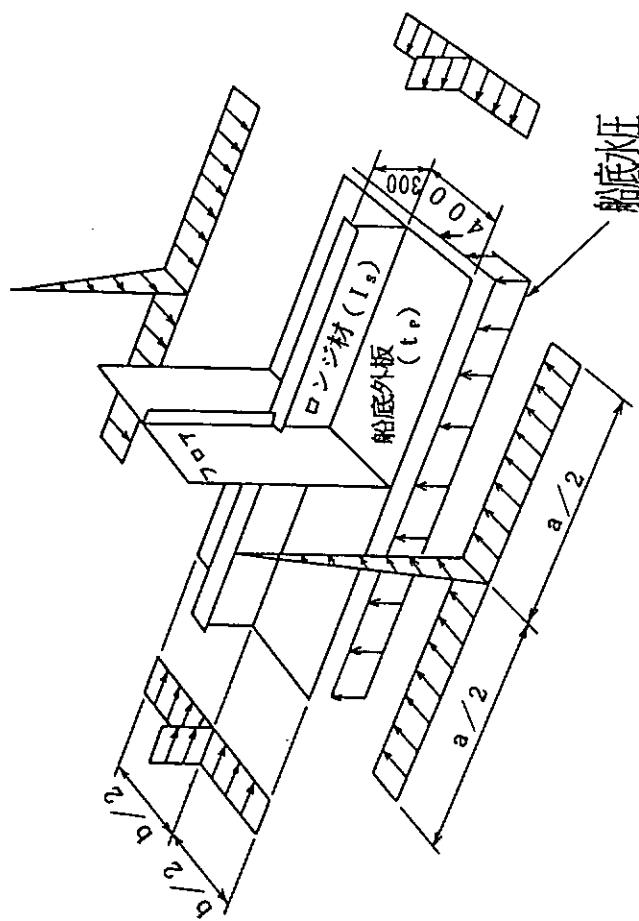


図 2.25 モデル 2、解析対象形状寸法

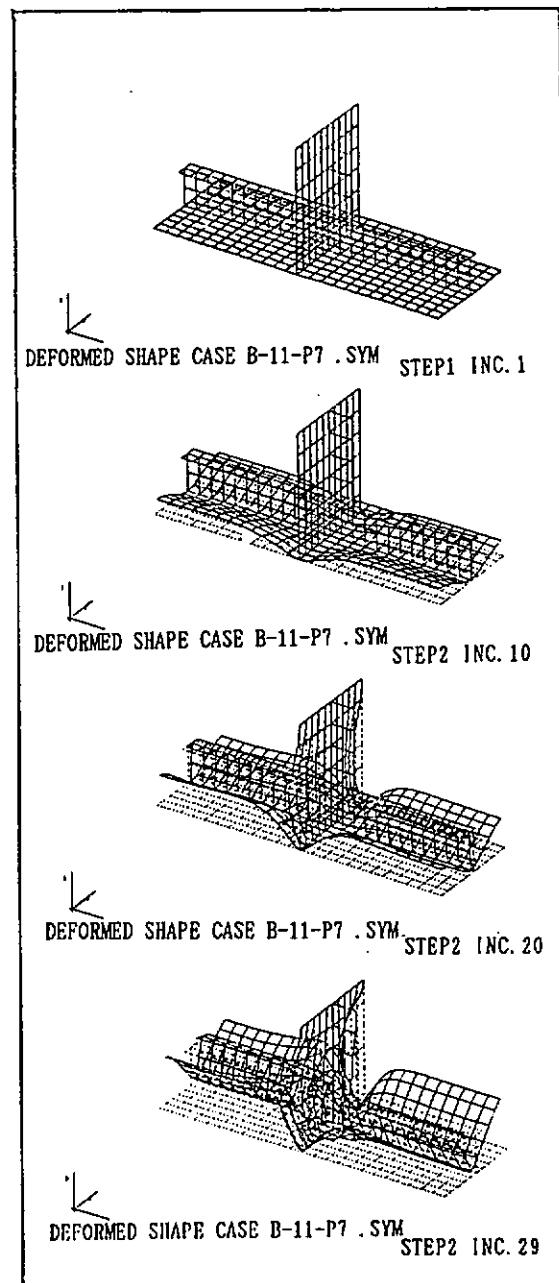
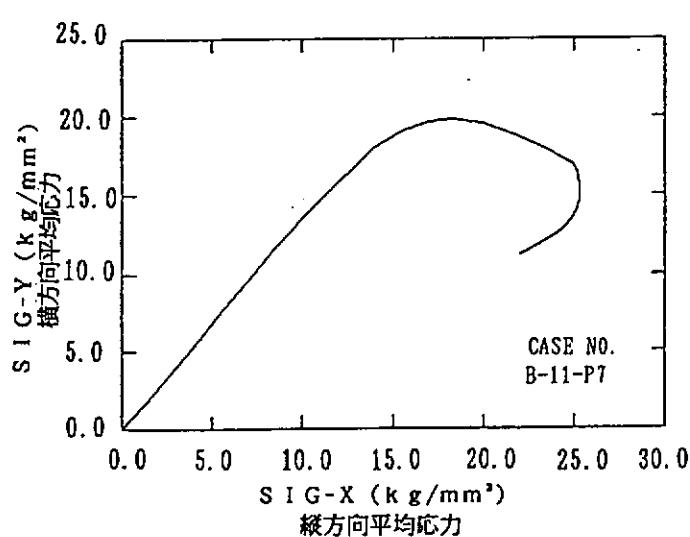
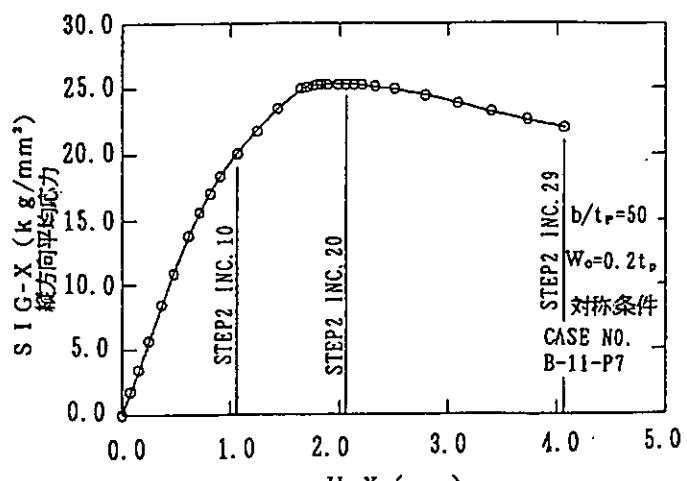


図 2.26 モデル 2, 解析結果例

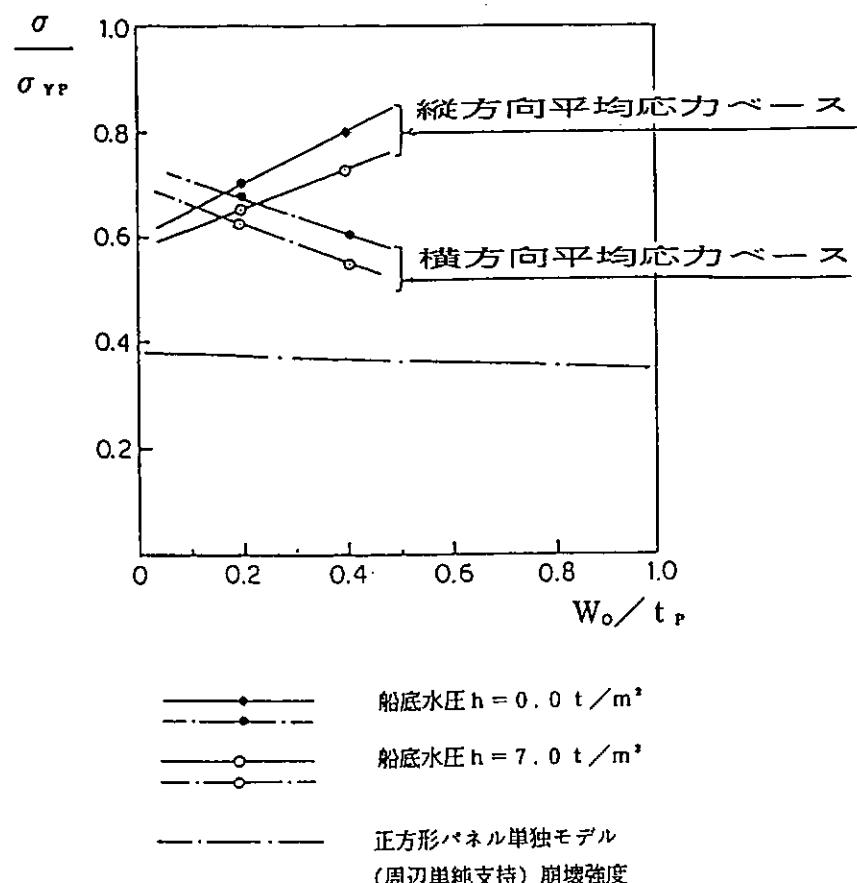


図 2.27 初期変形の影響

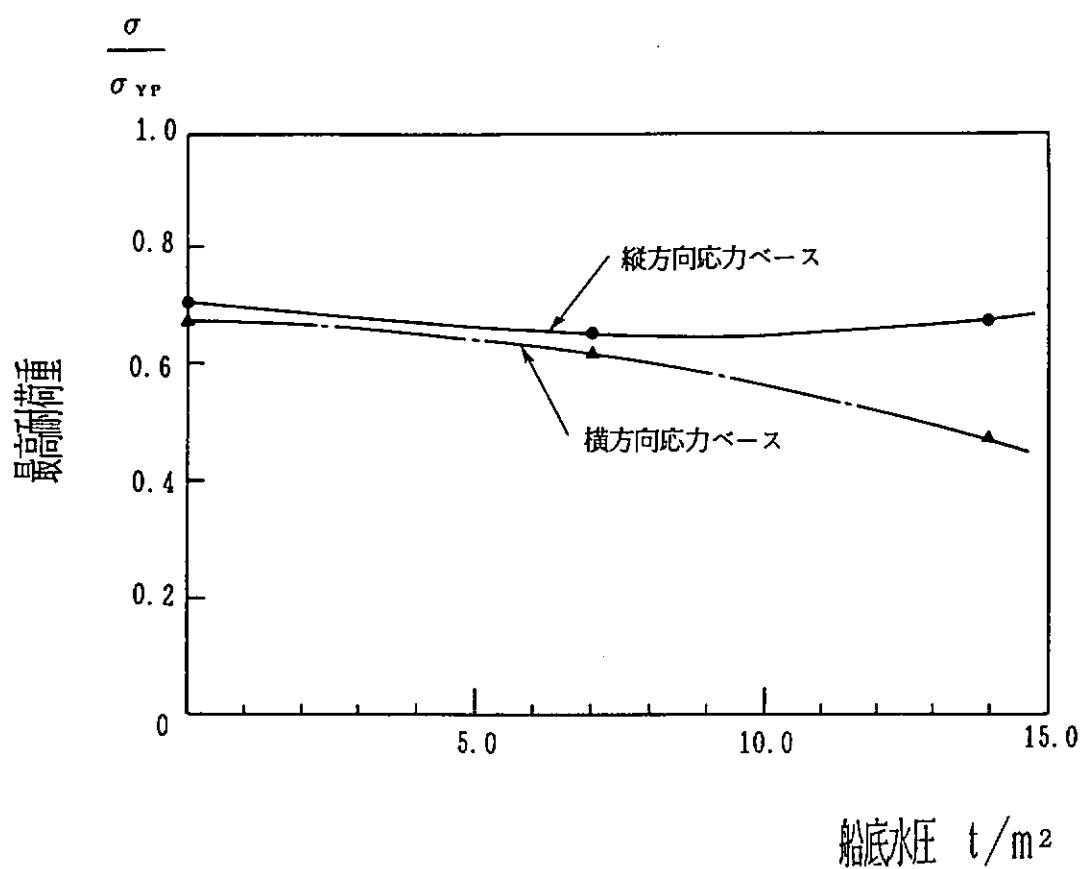


図 2.28 最高耐荷重～面外水圧の関係

3 疲労強度推定における精度と影響因子

3.1 まえがき

船体構造の安全性を高めるためには、波浪荷重の推定、その波浪荷重による構造応答の推定および船体強度の推定における精度向上と、それらの因子が安全性にどの程度影響を及ぼすかを定量的に把握する必要がある。

本章では、船舶の設計、建造、運航の実情にあった疲労強度予測を総合的かつ定量的に評価できる方法の精度向上させることにより、船殻構造損傷の減少に寄与できると考えて実施した3年間の研究成果を報告する。

まず、研究対象を明確にするため、航行中の船舶の構造部材に発生する可能性のある疲労亀裂現象の特徴について考える。

船舶は不規則な気象・海象中の航路を航海するので、不規則な気象・海象下における船体まわりに作用する波浪荷重により、船体構造部材に繰り返し応力が発生する。疲労亀裂が発生する可能性のある箇所は、船体構造を形成する局部部材での応力集中部である。波浪荷重は船体外板が受け持ち、その荷重はロンジやフレームなどの小骨材へ伝達され、その小骨材をトランスやガーダーなどの大骨材が支持する。外板面で変動する波浪荷重がいくつかの部材に伝達されて、疲労強度が問題となる局部部材に繰り返し応力を発生させる。

板や骨材が溶接で結合された船体構造部材には、構造部材形状による応力集中やミクロ的には、溶接ビード形状の凹凸に起因する応力集中が避けられない。

したがって、このような応力集中部では、荒れた海象においては局部的に降伏するか微小な疲労亀裂が発生する可能性がある。この亀裂は大きな振幅の繰り返し応力でのみ伝播するが、その伝播速度は遅い。例えば、通常、微小な疲労亀裂が数十皿の長さに達するまでには船の一生が費やされる。つまり、その亀裂が、構造安全上、有害な亀裂長さになる可能性は少ないだろう。

このような実船における疲労亀裂現象を予測するには、流体力学や材料力学の数値解析や疲労実験を実施する必要がある。

船体構造部材の疲労強度推定の基本フローを図3.1に示す。

船体構造部材の疲労強度を推定する場合には、大きく分けて、波浪荷重により構造部材に発生する応力の長期頻度分布と部材の疲労強度を表すS-N線図を準備する必要がある。

応力の長期頻度分布を求める通常の方法は、規則波中でのストリップ法による船体運動解析を行い、波浪変動圧と船体運動から求めた加速度からタンク内の変動圧力を計算する。次に、これらの荷重を負荷し、船体構造をモデル化したFEMによる応力解析を実施する。FEMによる解析のモデル化の程度によっては、疲労強度上問題となる応力集中が評価されないので、ホットスポット応力法により、構造の応力集中を考慮する。船の航行中に生じる応力は統計的性質をもっているため、周波数応答解析と波スペクトルをもちいて、応答の短期解析を行い、応答の標準偏差値を求める。この標準偏差値と波浪頻度表を用いて長期予測解析を実施する。

本章では、船舶の長期遭遇海象データから波高の大きい部分のデータを重視した嵐モデルを設定し、その嵐モデルを組み合わせて負荷することにより、まわし溶接継手試験片についての変動荷重下の疲労試験データを使った変動荷重下の疲労評価法を提案した。

線形疲労被害則を適用して疲労強度を推定する場合は、一定荷重下での船体構造部材の設計S-N線図が必要となる。疲労データの蓄積が多い溶接継手の基本的な試験片による疲労データ（S-N線図）を利用する方法が一般的である。この溶接基礎継手の疲労データと船体構造のFEM応力解析結果を関連づけるのが、ホットスポット応力の考え方である。つまり、ホットスポット応力を、船体構造部材の応力解析結果から共通的に構造部材形状による応力集中係数を考慮し、溶接ビード形状によるミクロ的な応力集中係数を除いたものと定義すれば、船体構造部材の応力解析結果の疲労検討箇所の応力値と溶接基礎継手のS-N線図を用いて、疲労被害度を計算できる。

また、構造部材の寸法や形状による応力集中係数の影響のみならず、溶接などの工作性を考慮した疲労強度を検討する場合には、溶接や切欠きによる応力集中を考慮したピーク歪を求め、平滑材の疲労データから疲労強度を推定することも可能である。

溶接ビード形状による疲労強度への影響を評価するもう1つの方法として、溶接止端部から発生・進展する疲労亀裂の応力拡大係数を計算することにより、疲労寿命を推定する方法がある。このような疲労強度推定法がどの程度の精度をもつかは、直接的な比較は難しいが、実船での損傷データと照合することにより、その有効性を確認できる。

本章で行った研究と関連する項目を図3.1においてパターンで塗りつぶして示す。

以下、次の項目の研究内容について述べる。

- ・船からの気象通報データに基づく嵐モデルによる変動荷重疲労試験を実施し、その試験結果から提案した変動荷重下での疲労強度評価法について
- ・大型バルクキャリアーでの波浪変動圧の計算結果とタンク内変動圧の実験結果から求めた疲労強度を計算する場合の波浪荷重設定法について
- ・船殻構造部材の疲労強度を目的に応じて推定する方法として、ピーク歪による方法、ホットスポット応力による方法および疲労亀裂伝播解析による方法について
- ・疲労強度から見た実船計測法について

3.2 波浪変動荷重下での疲労強度評価

現在、船舶の疲労強度を評価する場合の基になっているのは線形被害則（マイナー則）である。つまり、疲労被害度は船に作用する波浪荷重による繰り返し応力の時間的な波形や荷重順序には、関係なく線形に重ね合わせができるとしたものである。

この法則を適用することにより、船体構造部材に生じる応力の長期頻度分布とS-N線図があれば、簡単に船体構造部材の疲労強度を評価できる。

しかし、不規則波の繰り返し荷重下での疲労強度は線形被害度で評価するには限界があり、より合理的な評価法が望まれる。

例えば、航空機では、実機での荷重履歴をシミュレートした荷重を負荷した疲労試験によって、疲労強度を評価する方法がとられている。船舶においては、長期間の実船に作用する荷重や応力状態を疲労試験のために計測することは種々の事情により、困難である。

そこで、北太平洋航路の船舶と日本-インド洋航路を航海した多数の船舶の遭遇海象に基づいて波浪荷重を計算し、比較を行い、航路によってどの程度波浪荷重にバラツキがあるか検討した結果、日本-インド洋航路は北太平洋航路に比べ、波浪荷重は低荷重であることが分かった。また、北太平洋航路の船舶の遭遇する海象のパターンは、1つの嵐において、前半で波高が増大し、後半で減少し、継続時間は平均3.5日であることが分かった。

ここでは、少しでも実際に近い荷重状態における繰り返し荷重下での疲労試験に基づく疲労評価法の提案として、前記の調査結果から船舶が短期の海象と遭遇する波の持続時間とその間の最大の有義波高（応力）で表される1個のパターンを想定し、そのパターンを組み合わせることにより、異なった強さの嵐にランダムに遭遇することをシミュレートした変動荷重疲労試験法を提案した。

つまり、図3.2に示すように1個の嵐による応力振幅の変動パターンを、前半で増大し、後半で減少するように設定し、嵐の大きさに応じた6段階の応力振幅パターンを用意した。そして、嵐の間に平穏な海象を挿入し、それぞれの嵐の段階だけを連続して負荷した場合と、船舶の遭遇頻度に応じた嵐の段階をランダムに負荷した場合について、船体構造で一般的なまわし溶接継手の疲労試験を実施した。

それらの試験結果の1例として、図3.3に、船体が実際に経験すると思われる荷重をシミュレートした荷重（ラン

ダム）の場合について、試験片の破断までの実船に換算した年数（寿命）を横軸に示す。図3.3の縦軸は、この疲労試験とは別に実施した一定応力振幅下での疲労試験結果を使って、線形被害則による累積被害度を計算した結果を示す。

この累積被害度が1であると線形被害則が成り立つことになる。

このバラツキが変動荷重による影響と考えられるが、今回の疲労試験結果でのバラツキが小さいことから、適当な修正を加えることにより、従来の線形被害則が適用できることが分かった。

3.3 疲労強度検討のための波浪荷重設定

船体構造部材に発生する応力の長期頻度分布を推定する場合には、規則波中での波浪荷重による変動圧や船体運動によるタンク内液圧変動を正確に求める必要がある。

疲労強度を検討するときの荷重は、船体構造の最終強度、座屈強度および降伏強度に対する最大荷重ではなく繰り返し荷重であるので、波の1周期分の波浪荷重についての検討が必要である。

これらの波浪荷重下での対象部材の応力を求めるには、膨大な応力解析が必要であり、現在の設計では、より実用的な方法が採用されている。ここでは、応力解析まで含めた大規模な計算による方法でなく、疲労強度検討を前提とした波浪変動圧の特徴を把握することにした。

大型バルクキャリアーについて、従来のストリップ法に、静止水面から実際の波面までの船側部分の波浪変動圧と船倉内のパラスト水によるタンク内変動圧成分を追加して船体断面内での時々刻々の変動圧力を計算し、波長の差による運動量の影響や波浪変動圧とタンク内変動圧の位相差による圧力分布の変化を検討した。

計算例として、図3.4に嵩載状態での波浪変動圧分布を示す。

図より、波浪変動圧の分布形状は、波長が短い場合には圧力が船底から水線付近に掛けて指數関数的に急激に増加するのに対し、波長が長い場合には船底から水線付近に掛けてほぼ線形に変化しているのが分かる。

これらの計算結果の圧力分布を単純化して図3.5(b)に示す疲労検討用の波浪変動圧とした。

もう1つの考慮点として、船体外部からの波浪変動圧とB/Cでは倉内のパラストタンクではタンク内変動圧との位相差の関係も重要である。

船体運動加速度によるタンク内変動圧を明確にするために、模型タンクによる動搖実験を実施した。実験条件として、加振方向（船の運動成分であるHeave, Sway, RollおよびHeave/Swayの連成）、液位、外部との空気の流通の状態、加振周期（実船換算で波の周期程度を選択）、加振振幅、加振方向の位相差を変化させた。これらの実験結果をまとめると図3.5(a)に示すように加振方向が単独の場合は、Heaveに対しては上下方向加速度による変動水圧の分布は重力加速度によるものと同様に作用し、Swayに対しては、水平方向加速度により変動水圧分布は左右非対称になるように作用し、Rollに対しては、回転角による傾斜静水圧分布になるように作用することが分かった。

また、HeaveとSwayが連成する場合はそれぞれの加振方向による変動水圧を運動加速度との位相差を考慮して、重ね合わせることにより推定できることが分かった。

したがって、ストリップ法により船体運動成分が分かれれば、図3.5(a)から、タンク内変動圧の大きさと分布が設定できる。

3.4 疲労データと疲労強度推定

図3.1に示した応力の長期頻度分布と疲労強度データ（S-N線図）を用いて疲労被害度を計算する場合には、両方の応力の定義をそろえる必要がある。

つまり、船体構造部材に作用する応力の長期分布を有限要素法による応力解析で求めるとして、その求められた応力値が構造部材形状の応力集中を含んでいれば、疲労試験データのS-N線図の縦軸の応力値も同様の応力集中を含

める必要がある。

この船体構造の応力解析結果の応力値とS-N線図の応力値を結び付けるのがホットスポット応力である。

つまり、ホットスポット応力を、船体構造部材の応力解析結果から共通的に構造部材形状による応力集中係数を考慮し、溶接ビード形状によるミクロ的な応力集中係数を除いたものと定義して、船体構造で疲労損傷が発生しやすいまわし溶接部に注目して、溶接基礎継手とバルクキャリヤーサイドフレーム下端部とスチフナ付ブラケットの構造疲労試験体のホットスポット応力を計算することによりそれぞれの疲労試験結果を、ほぼ統一的に表せることにより、検証した（図3.6参照）。

まず、まわし溶接継手試験片（溶接基礎継手）について、FEMによる応力解析を実施し、溶接止端部からある距離はなれた2点の応力値を外挿し、止端部での応力値をホットスポット応力とする。このホットスポット応力を縦軸として疲労試験データをプロットして整理した結果を、図3.6の点線（平均値）と1点鎖線（平均値 $-2\sigma < \sigma$ ：標準偏差値）で示す。この標準偏差値が主に溶接ビード形状による応力集中の影響を示していると考えられる。

そして、B/Cの船体構造部材の模型であるサイドフレーム下端部モデルとスチフナ付ブラケットモデルの試験体についての疲労実験結果を上記と同様な方法で解析し、ホットスポット応力で整理すると、図3.6のプロット点となる。

これらの実験点は先に述べた溶接基礎継手のバラツキと同等なことから、船体構造の応力解析結果からホットスポット応力を求めることにより、溶接基礎継手の疲労データを利用して、疲労被害度が計算できることになる。

船体構造部材の疲労強度を推定するときに利用する疲労実験データも単一でなく、船体構造部材をモデル化した構造模型の疲労データ、突合せ継手、隅肉溶接継手、まわし溶接継手などの溶接基礎継手および平滑材の疲労データまたは疲労亀裂伝播データなどがある。

溶接基礎継手の疲労実験データが数も多く信頼性が高いので、これらのデータを有効に利用することにより、疲労強度推定精度は上がると考えられる。

上記のホットスポット応力法は正に溶接基礎継手の疲労実験データを有効に利用できる方法である。

その部材に対応したS-N線図がない船殻構造部材の疲労強度を検討する場合に、平滑材の疲労データを利用して、構造的応力と溶接ビード形状による応力（歪）集中も含めた局部歪で評価する方法がピーク歪解析法である。

図3.7に、構造模型の疲労試験体の材料の歪硬化特性と弾塑性解析によるピーク歪を求め、実験値の疲労データを整理することにより、実用的な疲労寿命の推定が可能であることを示している。

図3.7は、SR202で実施された疲労実験の船体構造部材のモデルであるブラケットモデル、スチフナモデルおよびダブルーモデル試験体の応力計測データから応力集中を求め、材料の応力-歪線図から、溶接止端部における局部歪（ピーク歪）を計算し、そのピーク歪振幅を縦軸に整理したものである。

試験体の種類にかかわらず、整理された疲労データのバラツキが小さいことから、この方法による有効性が分かる。

さらに、溶接ビード止端部から発生・伝播する疲労亀裂を破壊力学的手法で解析し、溶接基礎継手の疲労寿命を推定できることを図3.8に示した。

まず、リブ十字継手試験片の溶接ビード形状データ（止端部半径、溶接角など）を使って、溶接断面形状の境界要素法による応力解析を実施し、最大応力発生点から亀裂伝播想定線に沿う応力分布を求め、降伏応力を越える部分は塑性修正を行った後で、応力拡大係数を求める。この応力拡大係数を使ってパリス側（亀裂伝播速度と応力拡大係数を関連づける実験式）を亀裂が止端部から深さ方向に2mmになるまでを積分することにより疲労寿命を求めた。このようにして推定した疲労寿命は実験値とかなり合っている。

この方法は疲労亀裂の初期段階だけでなく順次、構造部材を伝播していく過程を解析していくことも可能である。

いずれの方法においても、実船の構造部材における繰り返し応力を合理的に推定することと、実際の疲労現象に近いモデルによる疲労解析を疲労実験データをうまく利用して解析していくことがポイントである。

3.5 実船計測の重要性

これまでに述べてきた船体構造部材における疲労強度の推定精度を検証するには、どうすればよいか？

規則波中の波浪荷重は水槽試験で検証でき、一定荷重下および変動荷重下での疲労強度はそれぞれの条件下での疲労強度は、それぞれの条件下での疲労実験データにより検証できるが、不規則波中を航行する船舶の構造部材での疲労強度の検証は困難である。そこで、波浪荷重、構造応答、疲労強度を総合的に検証するための実船計測による方法を検討する必要がある。

今までに、実船計測を行った例を調査した結果、計測対象が綫強度で短期計測、計測目的も応力状態確認・安全性確認が主で、横強度部材や局部部材を対象にしたかつ疲労強度を主眼においた実船計測例は少ないと分かった。

従って、これら部材では、作用する繰り返し荷重（長期頻度）の設計推定値を実船計測データとの比較により検証するための現実的手法が確立していない。

まず、実船計測の応力波形から疲労強度を評価する場合の波形計数法として、レインフロー法を用いると、正しく疲労ダメージの蓄積を算入でき、広域周波数波形も問題なく、高次振動成分が重畠するケースも評価できることを示した。

そして、今後の実船計測の方向を図3.9にまとめた。つまり、従来の設計の確認的的から、船体運動・構造応答理論の検証のための計測と運動や応答のモニタリングのための計測の2方向があることを示した。

また、計測装置システムについてもまとめた。

3.6 あとがき

これまでに述べたこと以外に、現状の船体構造設計に関連し、各種の疲労強度評価法の相対比較表、損傷データベースから収集・整理した大型B/Cの疲労に起因する損傷の全体的傾向の調査、船体構造と海洋構造物との疲労設計の差の調査を行った。

そして、荷重条件の設定・モデル化の違いにより生じる疲労寿命の算定結果の差についていくつかのシミュレーション計算により検討し、航路すなわち波浪データの違い、および線形疲労被害則における不確かさが最も大きいこと、各種波の応答スペクトルから平均周期を求め、疲労被害度のシミュレーション計算を実施して、その算出法による差、船速の影響について検討した。

船体構造部材の疲労強度を信頼性解析により、総合的に評価し、管理するために、疲労強度へ与える影響度と疲労強度推定精度に関する調査研究を実施したが、最終目的に到達するまでには、まだ、研究すべき課題が残されている。

例えば、疲労亀裂伝播解析による船体構造の安全性評価の確立、海水中腐食環境での疲労問題、疲労強度検討に対する波浪変動圧の推定精度向上、実船の変動荷重における疲労強度および解析の検証のための実船計測法とデータの収集などである。

これらの研究は、広範囲の技術分野にまたがっているため、造船界・海運界の共同研究により取り組む必要がある。

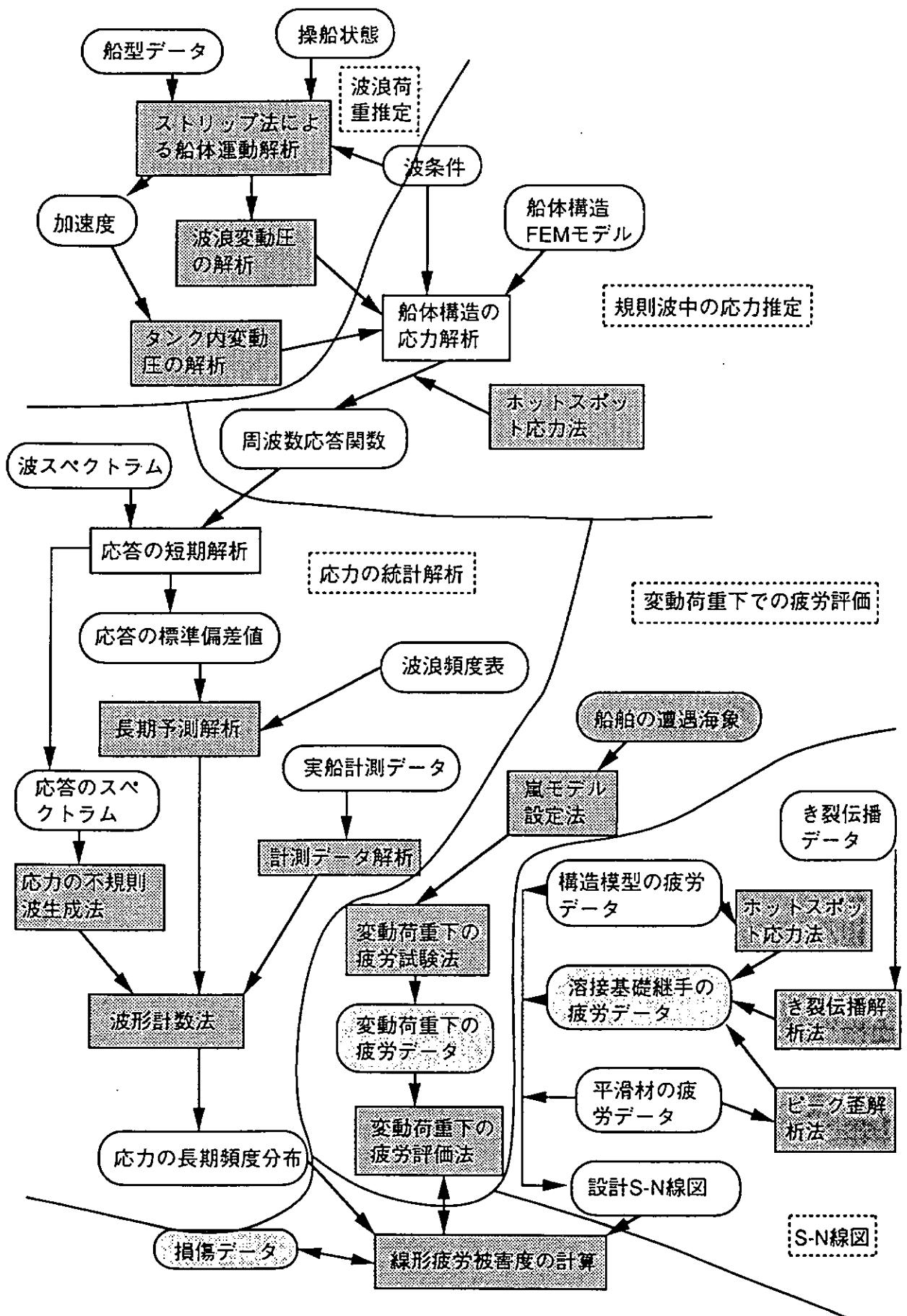


図 3.1 船体構造部材の疲労強度推定の基本フロー

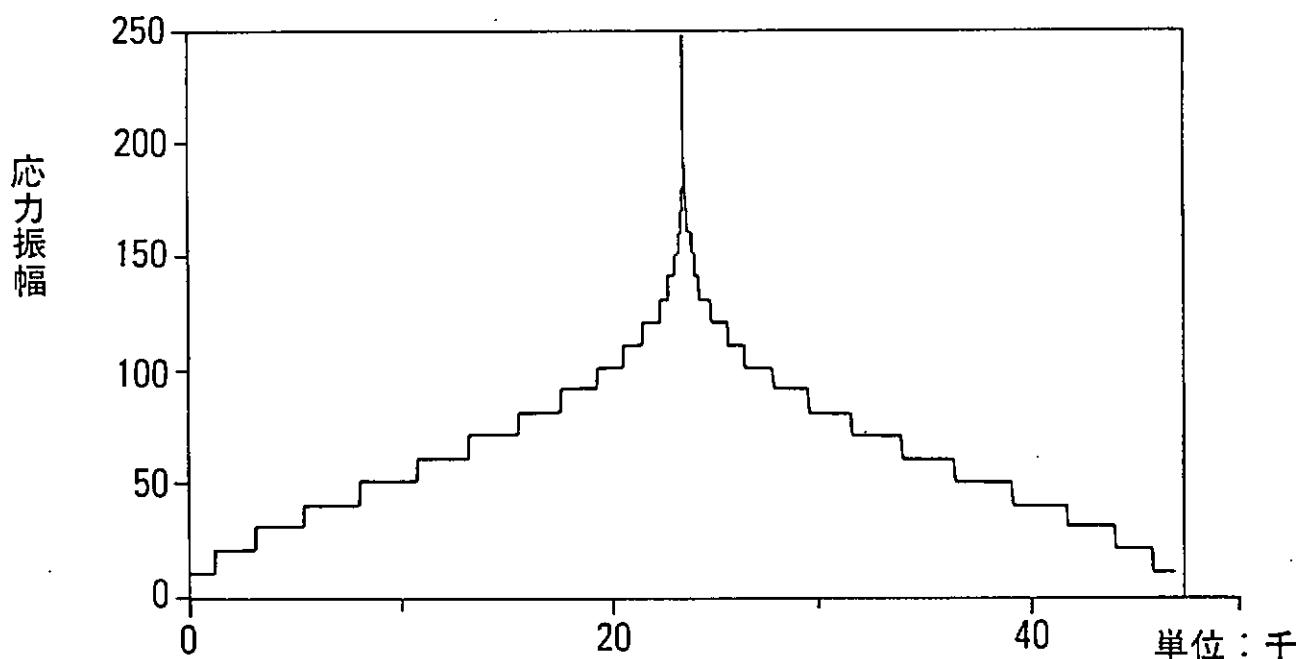


図 3.2 1 個の嵐中の応力の繰返しパターン

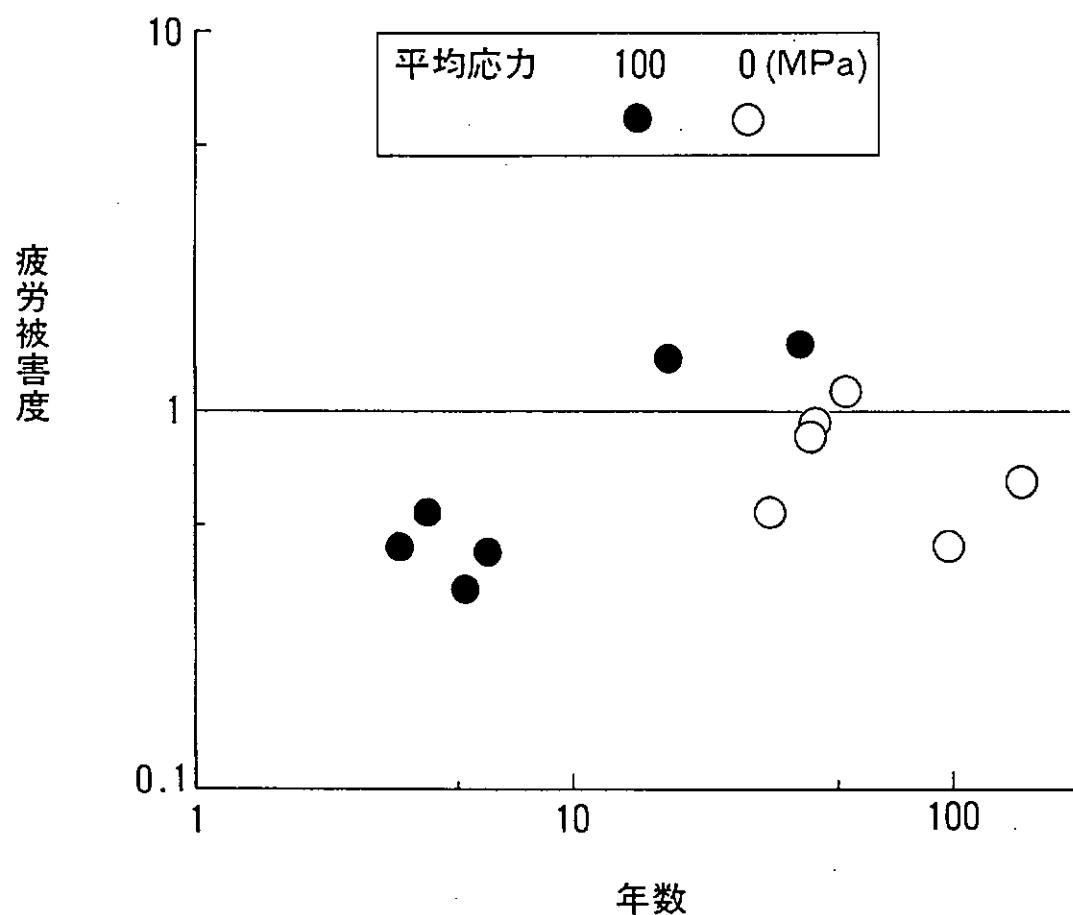


図 3.3 変動荷重疲労試験結果

注) 図 3.2 のパターンを組み合わせ、実船の遭遇海象をシミュレートした試験荷重について計算した疲労被害度（線形被害則が成立つと 1 になる）

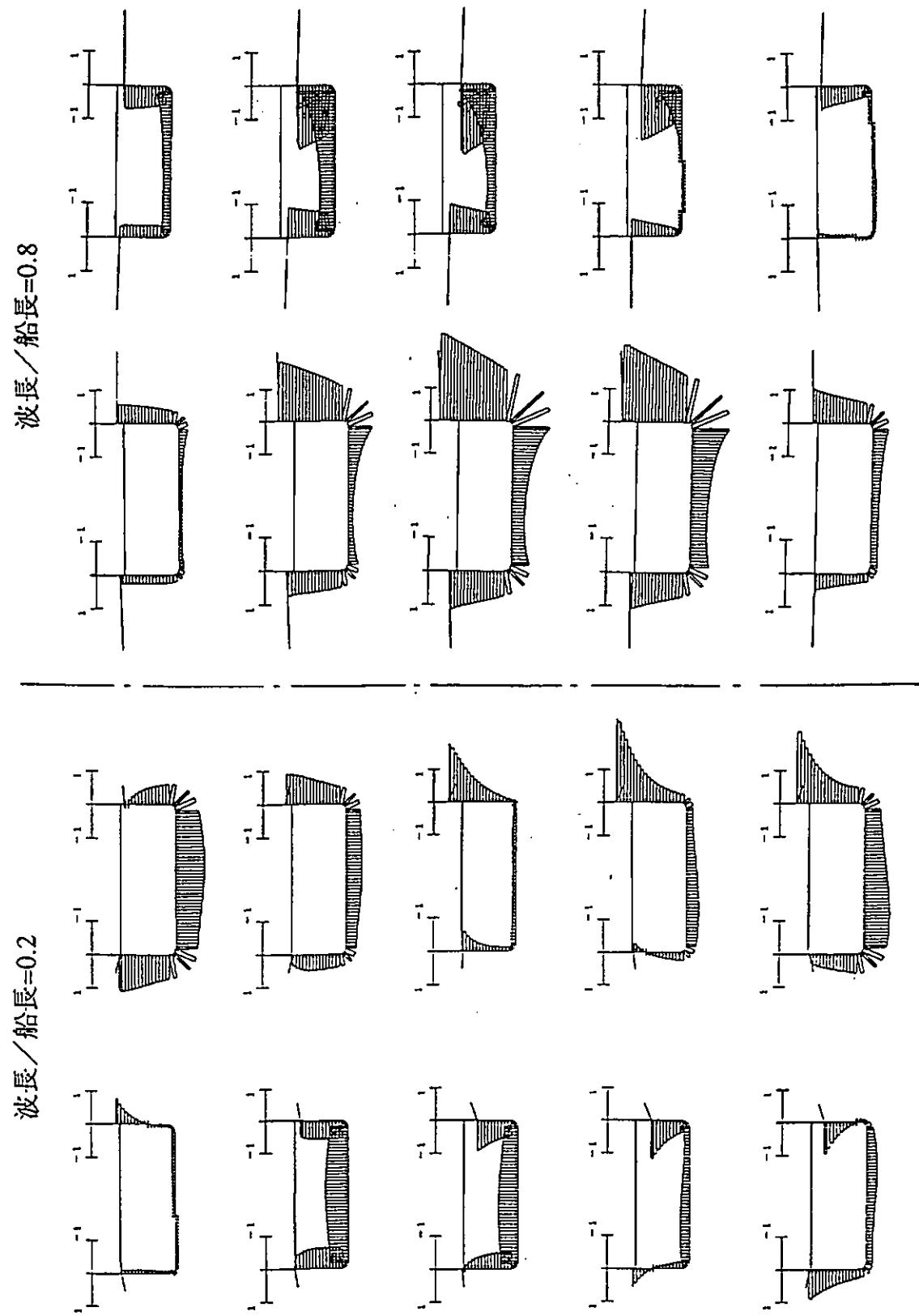
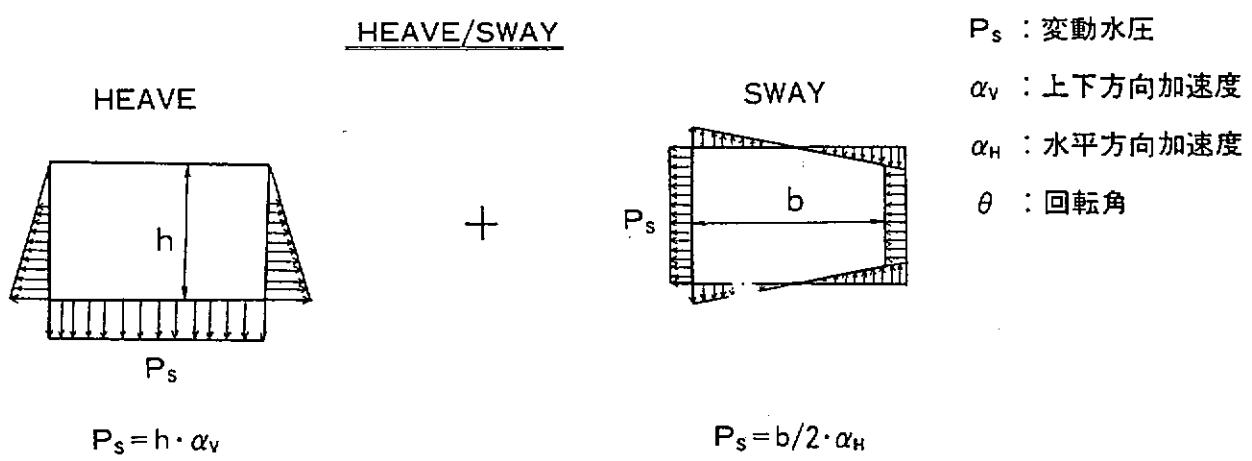
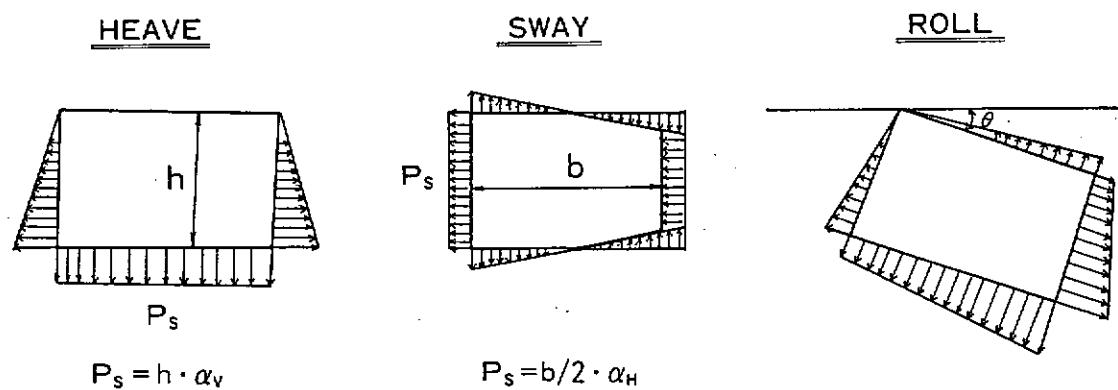


図 3.4 波浪変動圧分布 at S.S. 6.36 : 满載状態
($F_n = 0.14$, Wave Height = 5 m, $X = 120^\circ$)



但し、運動加速度との位相差を考慮

図 3.5 (a) 疲労検討用のタンク内変動水圧分布

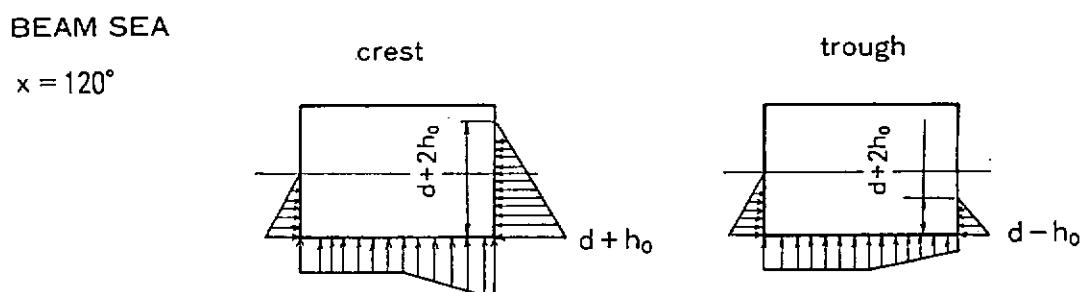
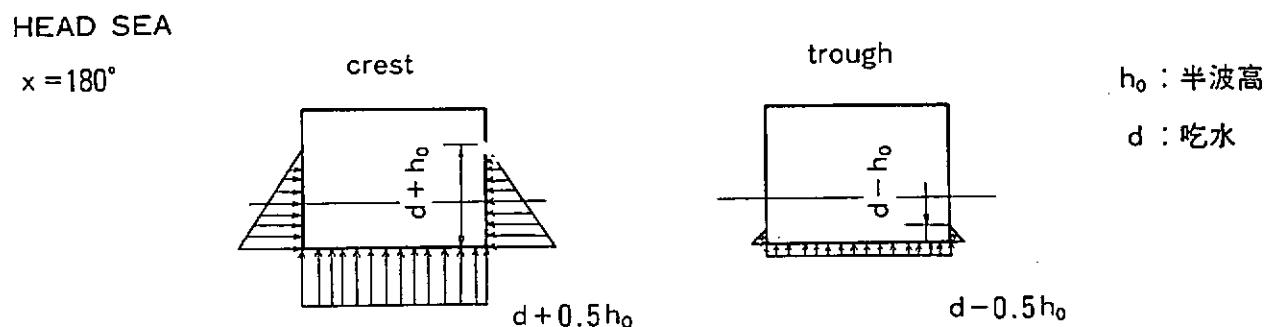


図 3.5 (b) 疲労検討用の波浪変動圧分布

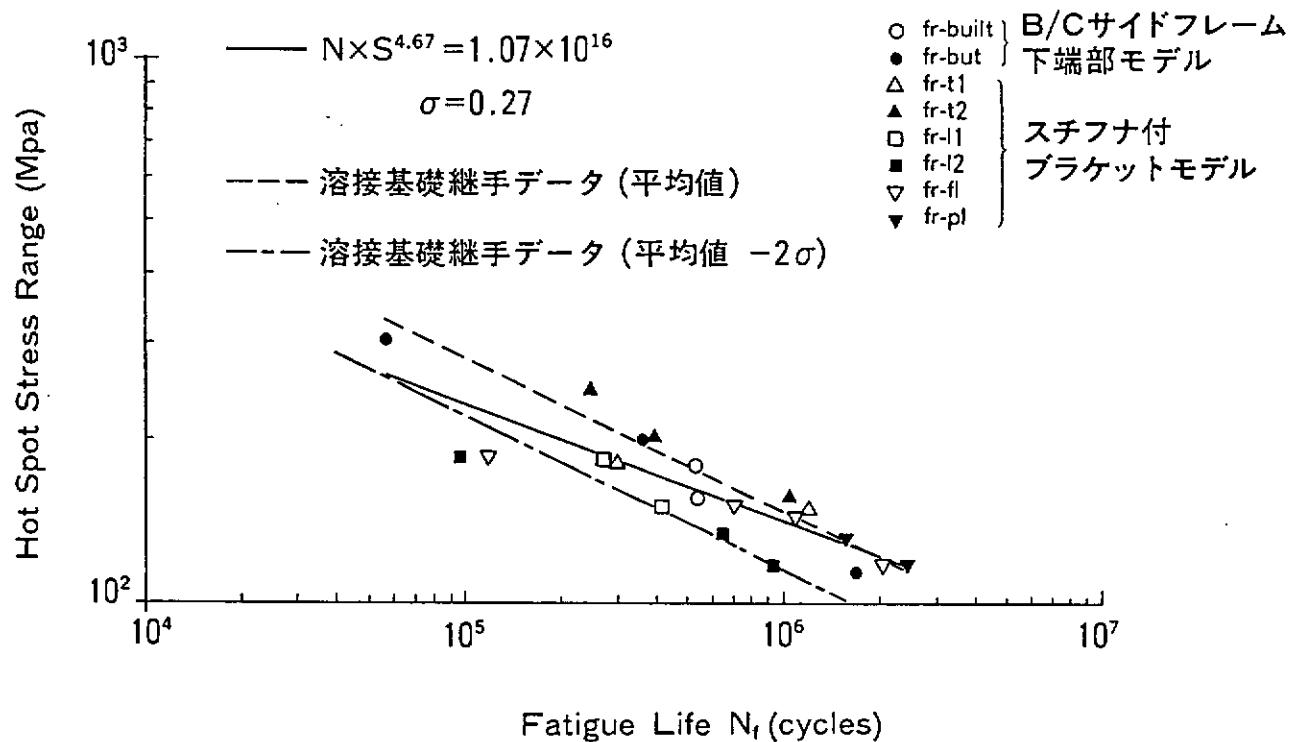


図 3.6 ホットスポット応力法による構造疲労試験体の疲労実験データの整理

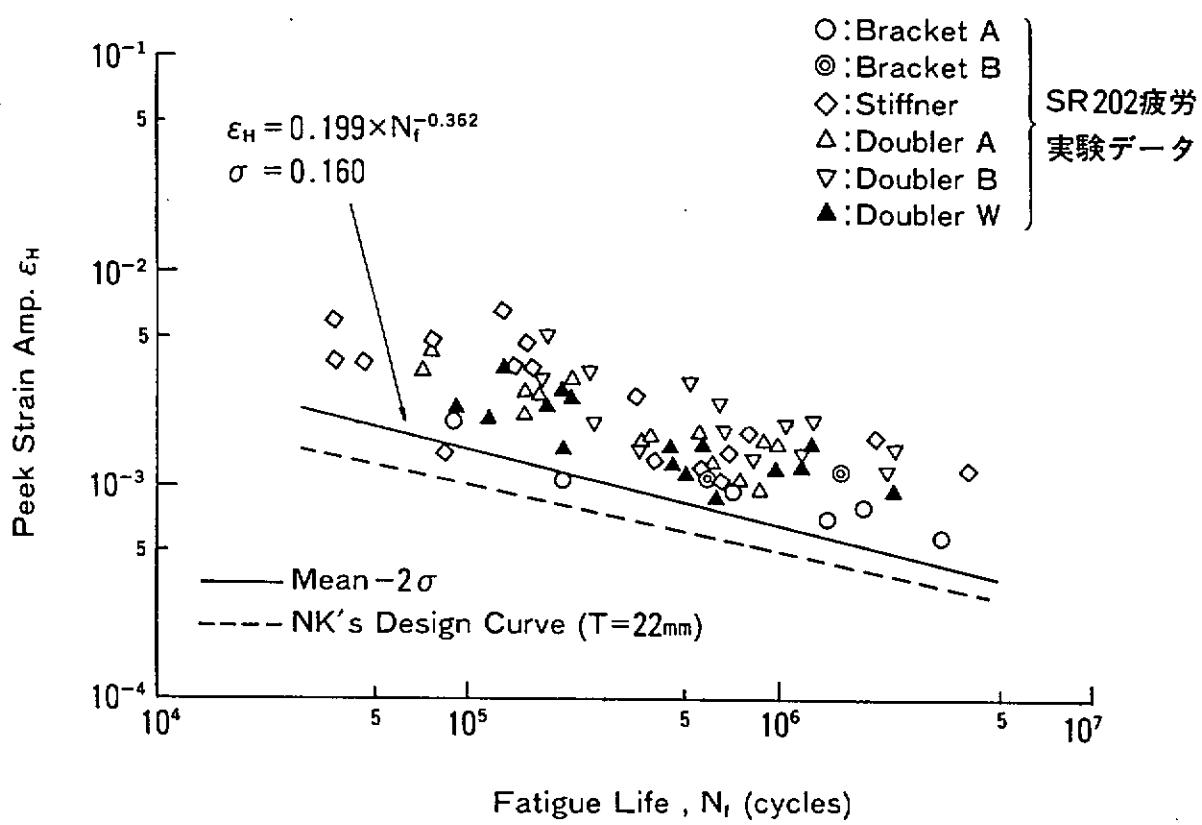


図 3.7 ピーク歪法による構造疲労試験体の疲労試験データの整理

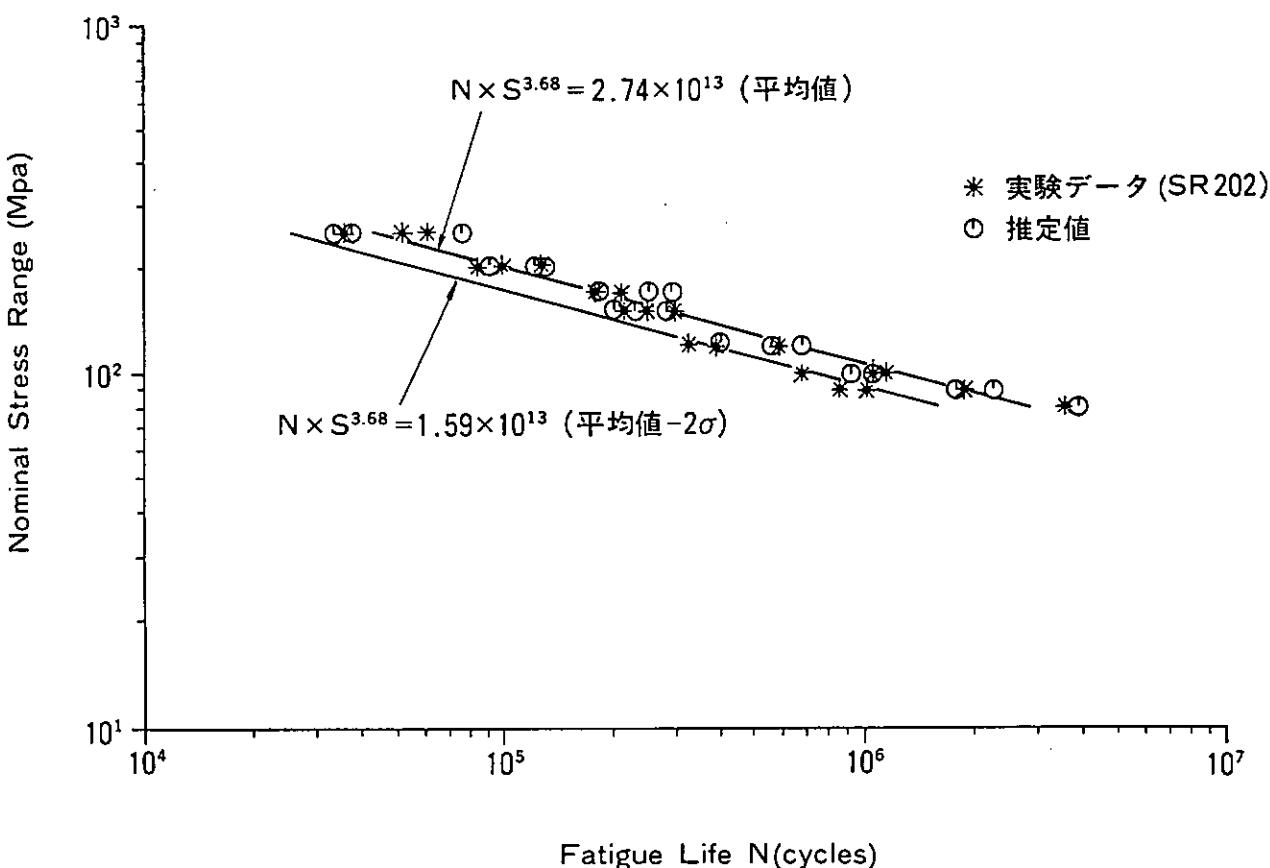


図 3.8 疲労亀裂伝播解析法によるリブ十字継手(As weld)の疲労強度推定結果

どの様な実船計測を指向するか？

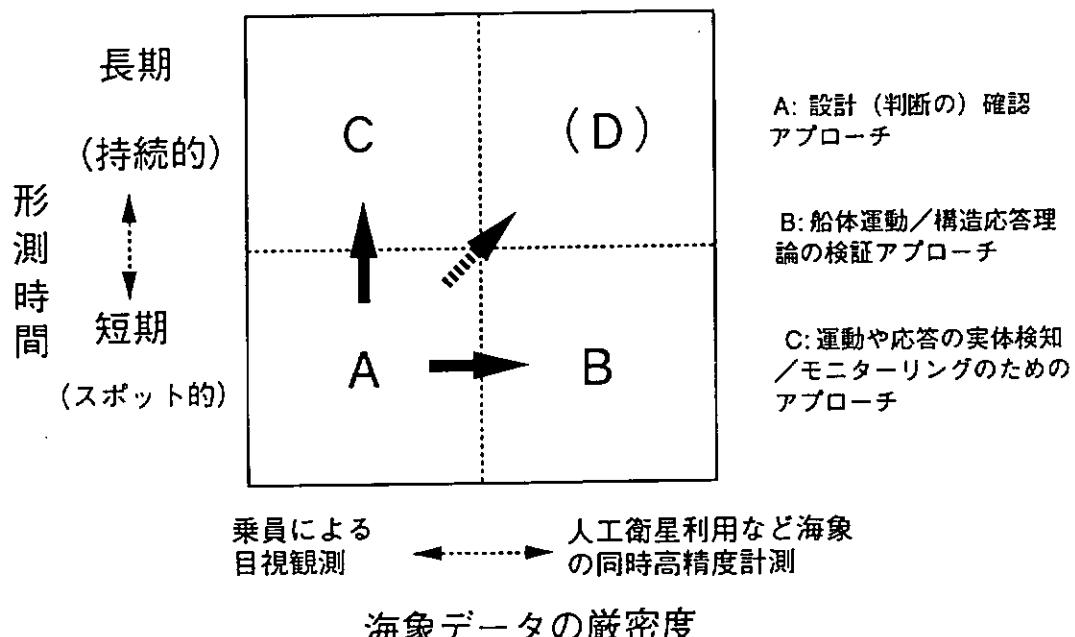


図 3.9 今後の実船計測の方向

4 総合的な強度評価法

4.1 まえがき

構造物の強度とは何を指しているのだろうか。応力を計算して許容応力を越えると「強度が足りない」と言われる。

構造物に要求される強度とは、その構造物が期待される機能を果たすことであろう。計算された応力が許容応力を越えた時、構造物の如何なる機能が果たせなくなると言うのだろうか。あるいは、許容応力を越えなければ機能を果たすと言い切れるのだろうか。

構造物に期待される機能とは使用期間中に、壊れないことと言えようが、およそ存在するものは絶対に壊れないものはないとするならば、壊れにくい或はある確率でしか壊れないことと言うべきであろう。

では、壊れるとはどういうことなのだろうか。許容応力を越えたら壊れるのだろうか。あるいは許容応力を越えなければ壊れないのだろうか。

壊れるとはどういうことなのか、あるいは壊れるか否かの判定はどのようになされるべきか、壊れることに対する影響因子にはどのようなものがあるのかについて考察する必要があり、明確化が必要であろう。

4.2 構造物の破損形態

許容応力を越えることと破損とは必ずしも 1 対 1 には対応していない。破損の形態には次のようなものがある。

- (イ) 塑性崩壊
- (ロ) 座屈崩壊
- (ハ) 疲労亀裂
- (ニ) 脆性破壊

上記のうち、(イ)は構造物のうち、かなりの範囲が塑性化し、荷重には耐えられずに大変形を来し崩壊するものであり、船体構造では一般には単独には生じるとは考えられない破損形態であるが、圧縮或は剪断を受ける場合は、(ロ)と相俟って生じることのありうる損傷形態である。

(ニ)も近年の鉄鋼材料の向上或は溶接技術の向上により、一般には生じるとは考えにくい形態であるが、(ハ)を放置しておき、長い亀裂となると低温で生じる可能性のある損傷形態である。

上記より、船舶においては一般に(ロ)座屈崩壊或は(ハ)疲労亀裂を一般的な損傷形態と見做して良いと思われる。

これらに対する船舶構造部材の耐力は衰耗等により弱まって行くことは言う迄もない。

座屈崩壊或は疲労亀裂は、なぜ生じるのであろうか。

前者は圧縮力あるいは剪断力を受けることにより生じ、後者は繰返し荷重を受けることにより生じる。前者は荷重を一度受けた丈で生じ得るし、後者は振動荷重のような微小な荷重であっても繰返し数が多いと生じ得る。

即ち、損傷形態に応じ、適切な荷重を考える必要があり、ある 1 つの荷重のみで応力を計算し、許容応力と比較するのは、単に便宜的手段である。

4.3 船体構造の破損シナリオ

船体構造に重大損傷が起きるとしたら、何がひきがねになるのかあるいは破損が生じるとしたら如何なる部分から破損が生じるか、又、その破損が起きたら船体構造に何が起るのかのシナリオを考えておくことは、設計上或は運用上大事なことである。

そこで、当 WG ではこれらについての考察をバルクキャリアに対して行った。前者を Fault Tree Analysis (FTA), 後者を Event Tree Analysis (ETA) を用いて実施した。例を図 4.1 及び図 4.2 に示す。FTA は、図 4.1 に示す通りある最も重大な事象を選び、その事象を惹き起こす為に必要と考えられる下位事象を順次結びつけて考

ていく手法である。ETAは逆に最も下位の基本事象から出発して次に如何なる事象が起こるかを考えていく手法である。これらの図から、例えば船側外板に大亀裂が生じる時の事象の組み合わせを追っていくことが出来、更に、検査の重要性、設計時に考慮すべき冗長性或は部材重要度が読み取れる。

更にこれらFTA或はETAを検証する為に撤去貨物船の倉内肋骨が外板からはずれた場合或は倉内肋骨が衰耗により薄くなった場合に応力がどのように変化するか、又、撤去貨物船のビルジホッパー斜板のナックル部に亀裂が入った場合、いかなることが引き起こされるかについての試計算を行なった。その結果、肋骨とビルジホッパー斜板との溶接がはずれた場合、肋骨に生じる応力が、増大すること、肋骨が衰耗した時も又、肋骨に生じる応力が増大すること又、肋骨が外板から離脱した時、外板の応力は上昇し、崩壊する虞れのあることが示された。一方、ビルジホッパー斜板のナックル部に亀裂が入ったとしてもある程度の長さに達すると亀裂は殆ど進展しないことが示された。即ち、発現確率 10^{-8} レベルの応力の変動に対応する亀裂長さ30mmの時の応力拡大係数範囲は90kg/mmであり、この値は亀裂が進展することを意味するが、亀裂長さが600mmとなるとこの値は20kg/mmとなり、亀裂は進展しにくいことが、明らかにされた。

4.4 総合的強度評価法

船体構造の総合的強度評価法を考える時、その損傷形態を念頭において考えるべきであることは先に述べた。

ここでは一般的に強度評価を行う時、如何にすべきであるかを考える。

構造物の強度評価とは構造物の強度が、構造物に加わる荷重に対して適正か否かを判断することである。即ち、壊れにくさ、或は荷重に対する強度の持つ余裕の程度の適否を判断することとなる。

強度余裕を定式化すれば、例えば次のようになる。

$$M = R - S$$

(余裕) (強度) (荷重)

従来、強度余裕Mは安全性を考慮して大きめの公称荷重 S_o と小さめの公称強度 R_o を用いた確定値で論ぜられ、 $M > 0$ なる事を確保するために、1を越える安全率を用いている。

$$\lambda \text{ (安全率)} = R_o \text{ (強度)} / S_o \text{ (荷重)} > 1$$

ここで言う大きめあるいは小さめと言われる量については明確にされていない。強度は構造物自身の持つ精度等によるRandomnessを持ち、又荷重には海象等に起因するRandomnessを含んでいる。強度の余裕を評価する為に、強度および荷重を算定し、比較することになるが、それぞれの算定時には現在の解析技術あるいは実験技術では必ずしも十分には解明されていないUncertaintyが含まれる。

即ち、強度及び荷重、それらの差である余裕はそれぞれらつきを持つものとしてとり扱う必要がある。模式的に図4.3に示す。

図の横軸は荷重と強度とを同一尺度で示す為に例えば応力あるいは圧力等とする。実線は真の荷重又は強度を示し、破線はそれらの算定結果を示す。破損確率は荷重（Demand）が、強度（Capacity）を上回る確率となる。設計時には荷重と強度を算定して始めて比較が出来る。従って比較は破線同士で成されるが、これらの線は、その精度を考慮に入れたものとする。破損確率は荷重と強度の分布が求められれば計算することが可能であるが、一般にはそれらの分布を正確に求められることは稀である。そこで荷重と強度の平均値および標準偏差を求め、分布を正規確率分布と見做すことがしばしば行われる。この時次式より信頼性指標 β が容易に求められる。

$$\beta = \frac{\bar{C} - \bar{D}}{\sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_D^2}}$$

\bar{C} ; CAPACITYの平均値

σ_c ; CAPACITYの標準偏差

\bar{D} ; DEMANDの平均値

σ_d ; DEMANDの標準偏差

β から破損確率は次式により求められる。

$$P_f = \phi(-\beta)$$

ϕ ; 標準正規確率分布関数

それでは荷重および強度のばらつきは、いかなることが原因で生じるのであろうか。これらの相関図を図4.4に示す。即ち、強度は工作精度等の関数であり、構造物へ加わる荷重は航路により決められ、構造物への要求は横荷あるいは航路により決められるが、構造物へ加わる荷重は決定値としては与えられない。

更に強度や荷重を算定する時にもその算定精度にばらつきを持つ。

同図には、ばらつきとは直接関係はないが、強度評価の是正あるいは検討の為に必要とされる実船計測或は検査のフィードバックも示してある。

望ましい強度評価法とは、図4.4の各影響因子を考慮に入れ、図4.3の模式図を数値化し、評価することと考える。

4.5 信頼性解析

強度と荷重およびそれらの算定にバラツキがある限り、強度評価は確率的取扱いとすることがわかり易く、妥当であろう。

いわゆる設計荷重を用い許容応力で評価するにしても、その裏にはバラツキを持つ量としての強度および荷重、およびその評価がある筈であり、いわゆる実績をもととすると称する評価もバラツキを持つものである。

確率を持つ量を互いに比較し、評価する手法として信頼性解析がある。バラツキを持つ荷重と強度から破壊確率を求めその破壊確率が許容されうるか否かを判断することになる。

その為にまず、荷重および強度もしくはそれらの算定のバラツキが如何なるものかを知る必要があり、又、一般に構造物とはどの程度の破壊確率を持つかを調査する必要がある。そこで当部会のWG1では主に構造応答の算定精度の検討がなされた。真の算定精度を求めるることは出来ないが、FEM手法におけるモデル化手法、誤差解析手法、モデルによる解析精度等の検討がなされた。

その結果、構造解析にとって重要な応答の比較的大きな箇所の誤差を数%程度以下とする為のモデル化手法の確認がなされた。又、対象とする構造毎に適正なモデル化範囲が異なることも示されている。一方、構造応答のみならず座屈又は崩壊荷重の算定モデルも検討され、モデル化範囲及び境界条件等の適正化の提案がなされている。

WG2では工作精度の強度に及ぼす影響について検討された。ビード形状の疲労強度への影響の調査が行われた。目違いによる応力上昇についてはその解析法が提案され、解析結果は隣接構造の影響を大きく受け、応力上昇率又は疲労強度減少率は構造配置の関数であることが示されている。最後にパネルの平面度の崩壊荷重におよぼす影響についてもその解析法が示され、単板に於ける強度低下率よりも防撓板の低下率は少ないと、撓み形状と応力状態による低下度の差などが報告されている。

WG3では、波浪荷重条件の疲労強度へ与える影響、疲労強度解析に用いるべき荷重分布又は応力履歴および疲労強度の算定法についての検討が行われた。

当WGではまず参考のため、他分野における構造物に対する許容破損確率を調査した。

CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) では

$$P_f = 10^{-4} K_s T / nr$$

T : 耐用年数

nr : 被災する人数

K_s : 社会的基準係数 公共建築 0.005 一般家屋 0.05 標架 0.5 海洋構造物 5.0

としており $T = 20$ $nr = 50$ $K_s = 5.0$ とすると $P_f = 2 \times 10^{-4}$

$T = 20$ $nr = 10.000$ $K_s = 0.5$ とすると $P_f = 10^{-7}$

となる。

又、Det Norske Veritas ではその Class Notes № 30.6 で船体構造に対し次表のように与えている。

	破損の結果引き起される事態		
	深刻さ小	深刻	深刻さ大
残存強度がある構造	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
破損前に明確な予兆のある場合	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
〃 に予兆がない場合	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

これらから許容破壊確率は $10^{-3} \sim 10^{-7}$ と思われるが、環境問題或は人命の観点等から、この値を決定づけるには社会的コンセンサスが必要である。

次に本 WG で行なわれた信頼性解析結果および検査法等について述べる。

(1) 信頼性解析試計算結果

疲労強度の観点からの信頼性解析および、座屈圧壊強度および崩壊モード法による信頼性解析を行った。

(a) 疲労強度信頼性試解析

疲労強度の観点からの解析法およびその結果を次に示す。

20年疲労寿命に対する信頼性評価モデルを次のように設定する。

$$F = 1/n(D_{cr}) - 1/n(D_f)$$

D_{cr} : 許容被害度

D_f : 累積疲労被害度

$$D_f = n \cdot (K \cdot \sigma_{max})^m \cdot \Gamma(m/h + 1) / (a \cdot (ln n)^{m/h})$$

$$a, m : S-N 線図の係数 (N = a \sigma^{-m})$$

n : 20年に相当する応力の繰り返し総数

σ_{max} : 波浪変動応力の $1/n$ 最大値 (直接計算より算出)

h : ワイブル分布の形状パラメータ (直接計算より算出)

K : 応力集中係数

信頼性指標 β を算出するにあたり、 D_{cr}, a は対数正規分布に従うとし、他は確定値として取り扱った。使用した各変数の特性値および計算結果をそれぞれ表 4.1, 表 4.2 に示す。

表 4.1 使用した各変数の特性値

変数名	平均値	標準偏差
m (確定値)	3	-
n (確定値)	10^8	-
h (確定値)	0.8~0.95	-
K (確定値)	1.0, 2.0	-
D_{cr}	1.0	0.15
$\log(a)$	12.237	0.22

表4.2 疲労解析結果

 β の値 上段 $K = 1.0$ 下段 $K = 2.0$

() 内は損傷確率

	Stringer	Web
北大西洋	8.0 (6.2×10^{-16})	11.4 ($< 1 \times 10^{-23}$)
	4.1 (2.5×10^{-5})	7.5 (6.8×10^{-14})
北太平洋	7.5 (6.8×10^{-14})	11.0 ($< 1 \times 10^{-23}$)
	3.5 (2.2×10^{-4})	7.0 (1.3×10^{-12})

ここで D_{cr} および a を確率変数として取り扱ったが、 D_{cr} および a に関しては材料もしくはビード形状の非均一性を考慮に入れていることを意味する。

(b) 座屈・圧壊強度に関する信頼性試解析

撤積貨物船の中央部のモデルを用い、一軸圧縮場における信頼性指標を求めた。

破損関数 Z は次式で定義した。

$$Z = z_2 \phi \sigma_y - (1/K_{HT}) (\varphi \cdot z_{SW} \sigma_s + z_{MC} \cdot \sigma_w)^{y_1} / \gamma_{max}$$

ここで、

ϕ : 座屈・圧壊強度係数

K_{HT} : ハイテン係数

φ : 組合せ係数

であり、その他の記号の意味は表4.3に示す。

計算に使用した各変数の例を表4.3に示し、結果を図4.5にしめす。

図4.5に示された ϕ_{PP} 等は種々の算定法による座屈圧壊強度係数を示している。安全性指標は材料、工作精度および荷重等によって定まるが、この値は計算に用いる算定法によっても変化することを示していると言える。

なお、 γ に及ぼす影響を調べる為、感度解析も行ったが、降伏応力の圧壊強度に及ぼす影響が大きいことが示された。

(c) 崩壊モード法による信頼性試解析

面内力の加わる時の崩壊強度に基づく立体薄板モデルを用いた信頼性解析を行った。対象船は撤積貨物船でありモデルを図4.6、4.7に示す。結果の例を図4.8に示す。同図はサギングの場合の結果であり、曲げモーメントによる最大応力の平均値を175 MPa、変動係数を0.07とし剪断力による応力の平均値を40 MPa、変動係数を0.07とした場合の結果である。本方法は軸応力と剪断応力を同時に受ける時の解析が可能であること又、破壊の経路を辿っていくことが出来ることに特徴がある。同図は破壊経路がサイドシェルから始まり甲板に至ることを示している。

これらの試解析で荷重のバラツキ、疲労強度のバラツキおよび圧壊又は崩壊強度のバラツキによる信頼度への影響度が計算出来ることが確かめられた。

WG 1の結果として応力応答の解析精度は数%、WG 2の結果として溶接ビード形状による疲労強度への影響は上記の係数 a の対数のバラツキが5%程度、目違いの影響は応力の高い箇所で応力を1.4倍程度増加させ、座屈圧壊については $\phi = 0.9$ という結果が得られており、又、WG 3では応力応答が海域により30%程度の差があることがわかっている。これらの結果を上記の結果に折り込むと信頼度が求められる。但し、バラツキは上記以外或はWG 1～WG 3で行われた項目以外にも存在し得るもので注意を要する。又、バラツキは設計時にすべて把握出来るものではないし、損傷は皆無ではないので検査も船体の信頼性を維持する為に大切な項目である。

(2) 検査結果のフィードバック手法および検査計画について

(a) 検査結果フィードバック手法

従来から損傷又は検査結果の設計へのフィードバックはなされてきている。この時損傷あるいは非損傷の相対比較による線引が行われるが、定量的評価が難しく又、膨大なデータが必要とされた。本項では活用しうる数少ないデータから、いかに有効な情報をひき出せるかの検討を行い、VLCCのサイドロンジの疲労損傷の情報をフィードバックする為のペイズ手法の有用性を検証した。

疲労損傷については応力 S と寿命 T とに次の関係があると仮定した。

$$S = C T^{-1/n}$$

ここで C, n = 常数である。

T はばらつきを持つ量であり数少ない損傷の頻度から S を推定出来、ある信頼度を目標値とする為の S の値を求め、必要とされる補強の程度を求めることが出来た。結果については日本海事協会「高張力鋼構造検討会報告」を参照されたい。

凹損についても又

$$q = 16 M_p / S^2$$

q : 水圧 M_p : 塑性モーメント S : 心距

とし崩壊の有無により M_p の値を決定出来る。

次に検査計画立案手法の一例について述べる。

(b) 逐次コストミニマム法による検査計画立案

構造物の検査計画の立案は、構造物の信頼性とコストの両面からのアプローチが必要である。ここでは立案法に関する手法を示す。

構造物の検査計画の生涯最適化はきわめて複雑となる。その為に近似最適化手法の適用が必要となる。最適化パラメータを各部材に適用する検査手法および構造物の検査間隔とする。

ある検査時 (t) から次の検査時 (t + 1) の間にかかる期待コスト C_T は検査費用、検査で計画的に使用停止したときの稼働損失、破壊部材の補修費用および不意の使用停止に伴う稼働損失および部材破壊が大規模破壊に発展したときのリスク（費用）の和として考えられる。

最適化は各検査時毎にこの期待コストの最小化を計ることで行う。

検査手法は、検査無し (NO), 目視検査 (VI), 詳細検査 (MI), 目視および条件付き詳細検査 (V&M), およびサンプリング詳細検査 (SM), の 5 手法から選択する。試計算結果の一例を図 4.9 に示す。検査間隔をもパラメータとした時 COST が最小になることが示されている。この計算の為には検査費用、補修費用等の算出が必要であり、計算結果の精度はこれらの推定精度によるが、検査計画立案の一手法として役立つと思われる。

更に検査時にどの程度、損傷が見つかるかの推定も大事なファクターとなるので亀裂の発見の能力についても考察した。使用したデータは船級検査において報告された船舶の外板に生じた亀裂損傷である。亀裂を下記のように分類し、各々のタイプ毎の発見率と亀裂長さの関係を図 4.10 に示す。

type A ; 腐食を伴う外板自体の亀裂（溶接部含む）

type B ; 腐食により生じた内構材の損傷に伴って生じた亀裂

type C ; 腐食を伴わない内構材の損傷に伴って生じた亀裂

type Z ; 腐食を伴わない溶接部から生じた亀裂

4.6 まとめ

本WGでは、強度とは何を指しているのか、破損形態には何が考えられるのか、強度評価とはいかなるものであり

強度評価に影響を与える因子にはいかなるものがあり、その影響度はいかなるものか又、信頼性を維持する為の検査計画および検査結果の設計へのフィードバック法等について検討を加えた。

その結果、設計・工作・運用の面からバランスの良い強度評価を行うことおよびその為の管理目標を定めることについて成果を得られたが、一方で基礎的研究の大切さをも同時に見直されることとなった。

即ち、

① 応力の算定に通常 F E M が用いられているが、この算定精度に関する考察を系統立てて行われている例は少ない。

本研究においてモデル化手法の検討、誤差解析が行われ精度に関する情報を得ることが出来た。

② 工作不整の強度への影響度に関する試計算が溶接形状、目違いおよびパネルの平面度をサンプルとして成され、溶接部の応力集中の度合、応力分布、目違いによる応力の上昇度、平面度の崩壊荷重に与える影響等について種々の知見が得られ、疲労強度算定の手法も開発された。残留応力の影響、溶接形状の三次元変化等については今後の問題として残った。

③ 遭遇期待海象における波浪荷重の取扱い及び疲労強度算定法についての成果を得、Peak Stress 又は Hot Spot Stress 或は亀裂発生と進展との統一理論等の適用法が明確になった。更にこれらの統一的取扱いの明確化が望まれる。

④ 応答もしくは荷重の算定精度、工作精度及び荷重の Randomness あるいは Uncertainty を考慮に入れ、信頼性試解析が行われ、又 F T A, E T A および損傷フィードバック法についても検討され、成果を得た。

しかし乍ら信頼性解析においては、破損関数の設定が必要であり、この関数は必ずしも陽な形では書けず計算が非常に複雑になる。

特に精度との関連で Capacity と Demand との分離が非常に難しくなってくる。本研究により、崩壊モード法を用いた内面応力場における構造信頼性解析が可能となった。本手法では面外荷重の影響は近似的に取扱われている。一方、WG 2 の試解析によれば、面外荷重の崩壊強度への影響は面内応力方向と関係を持つ。従って本手法を更に発展させ、これらの現象をより忠実に取り入れた解析の適用が望まれる。

又検査に関しては、人間の能力には限界があり、すべての部材を人間の力で検査することは不可能に近い。船体構造の大部分は腐食雰囲気中にあり、凹損、クラックのみならず衰耗の検査も行なわなければならず、機械化も相当に困難である。本研究でクラックのモニタリング手法の初期検討も行なったが、いろいろな損傷をモニタリングする為の手法の開発が望まれる。管理目標は終局的には構造物の信頼度を目標信頼度以上にすることであると考えられる。目標信頼度の決定の為には社会的コンセンサスが必要である。

上記①から③の問題点は現時点では残されており、今後の研究が望まれるが、これら基礎的研究はいずれ明確になってくると思われる。更に、最近の数値解析技術の向上等により、④の問題も解決されていくと思われる。

構造物の強度評価に於いては、ますます信頼性評価の重要性が増すものと考えられる。本研究において評価に及ぼす影響度等について各要因について検討し、それらの有機的結合を図り、成果を得たが、更にデータを増すことにより、本解析手法を具体的に適用し、信頼性評価の活用を図るべきである。

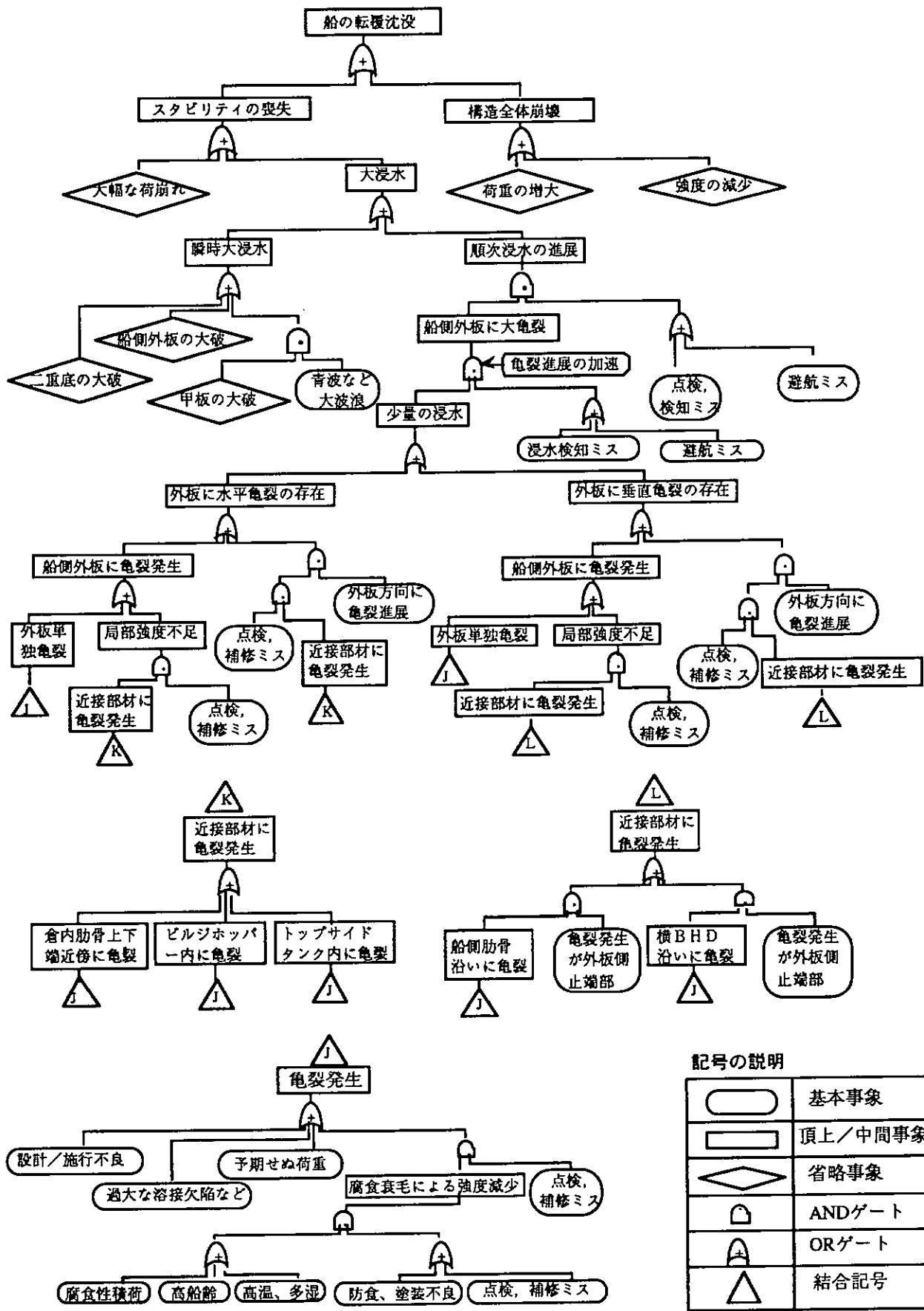


図 4.1 転覆沈没を頂上事象にした FT

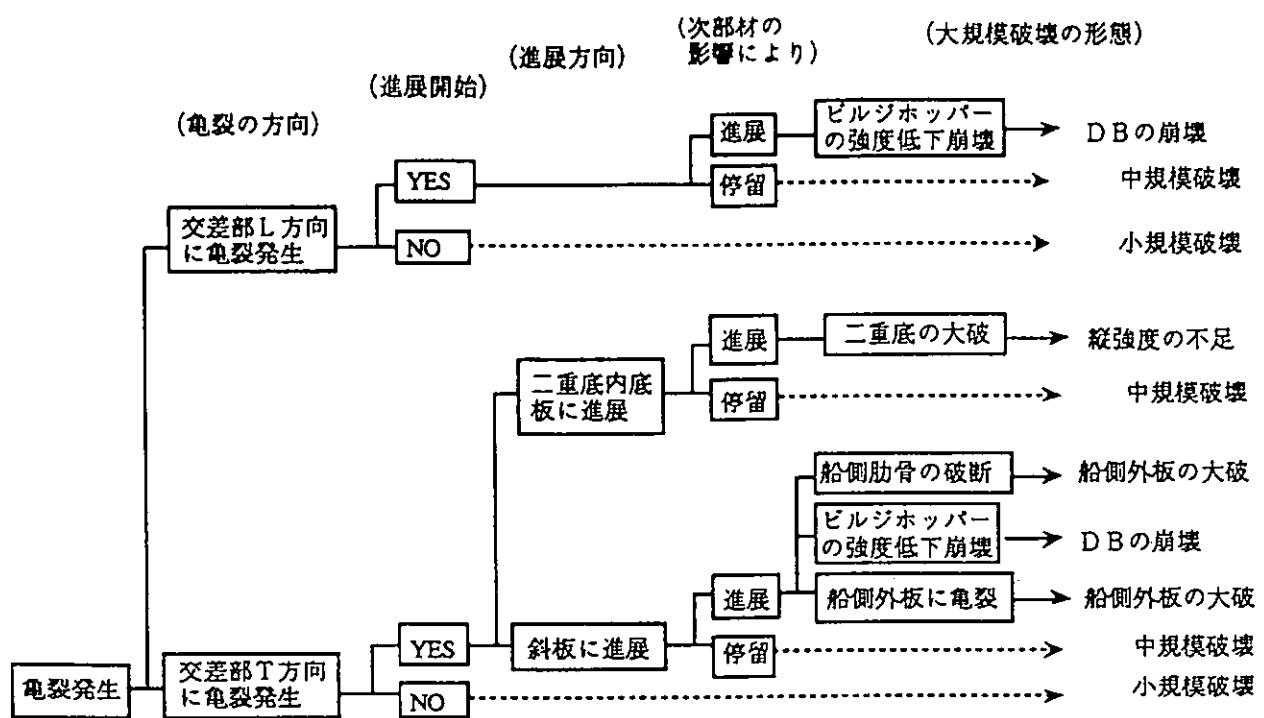


図 4-2 ビルジホッパー斜板と内底板の接合部(ナックル部)からの亀裂の ET

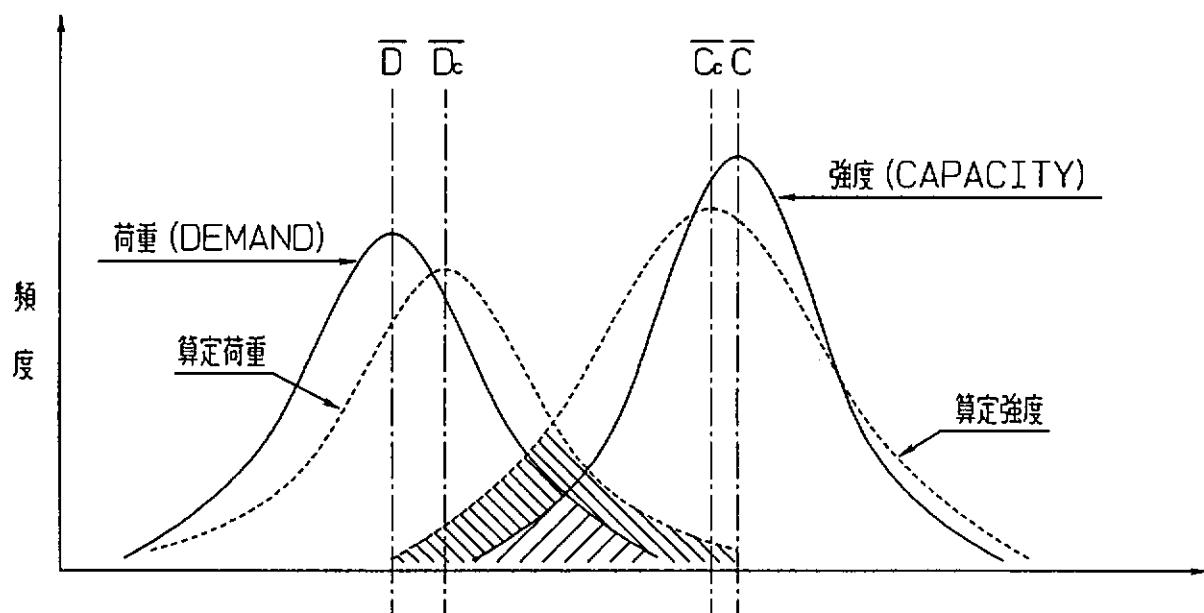


図 4.3 破壊確率

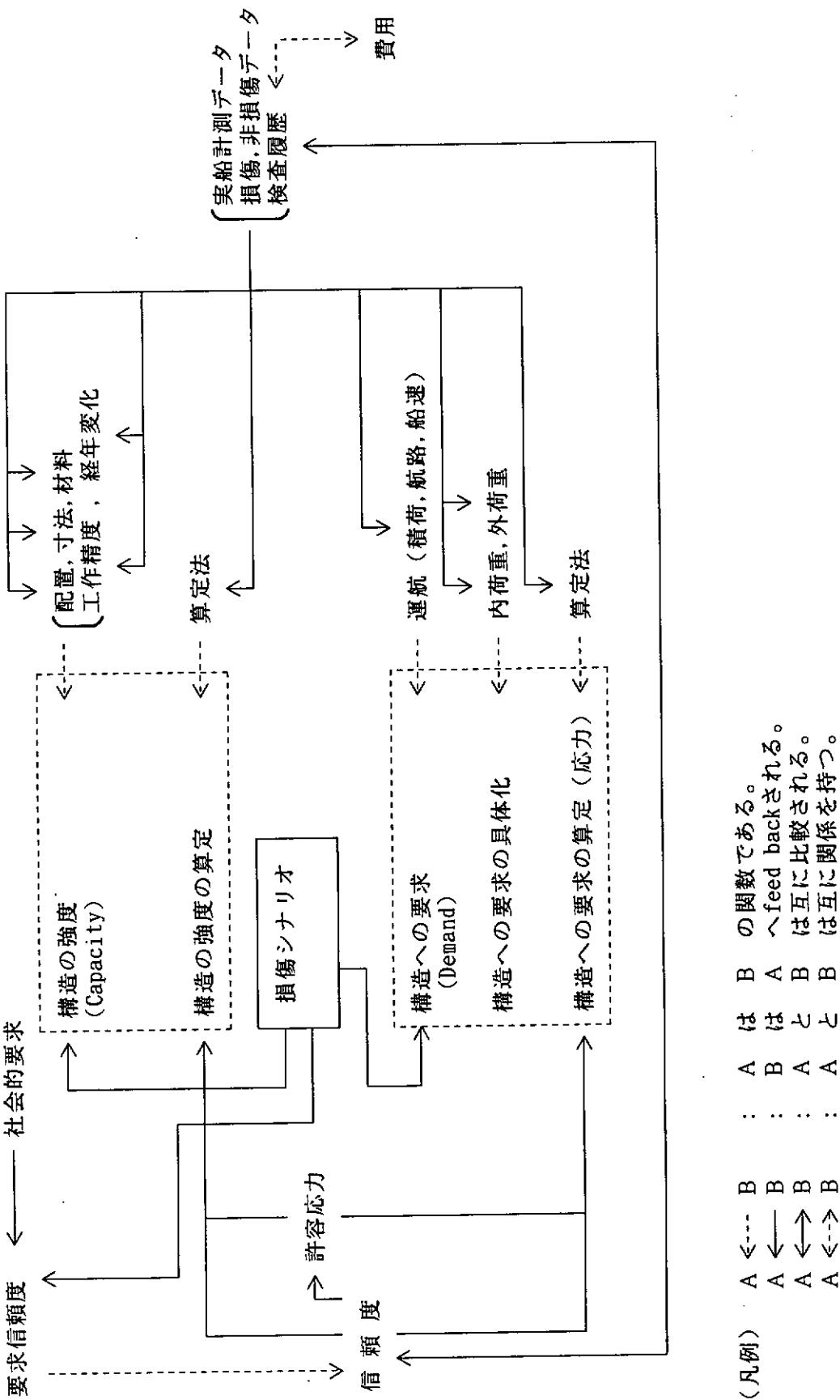
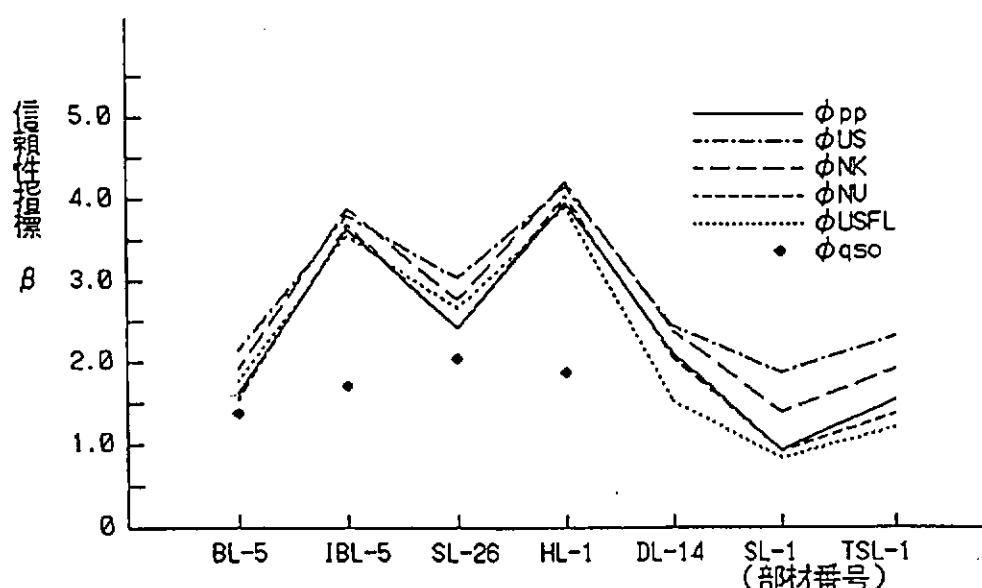


図 4.4 強度評価の為の相関図

表 4.3 各確率変数の平均値および変動係数 (BL-5 の場合)

変 数 名	(unit)	平 均 値	変 動 係 数
防撓材 (INV. A.) の寸法	H (mm)	(350.0)	0.04
"	B (mm)	(100.0)	0.04
"	t ₁ (mm)	(12.0)	0.04
"	t ₂ (mm)	(17.0)	0.04
平板の幅 (防撓材心距)	b (mm)	(810.0)	0.04
" 板厚	t (mm)	(17.5)	0.04
FLOOR or TRANS. SPACE	t (mm)	(2580.0)	0.04
材料のポアソン比	ν	0.3	0.04
" ヤング率	E (GPa)	206.0	0.04
" 降伏応力 (HT 32)	σ_Y (MPa)	(360.0)	0.08
" (HT 36)		(400.0)	0.08
" (HT 40)		(440.0)	0.08
		—	—
船体断面距離 *)	Y _{max} (mm)	13957	0.02
"	Y _i (mm)	(10943)	0.02
水圧・内圧	q (MPa)	(0.1887)	0.07
静水荷重	σ_S (MPa)	63	0.08
波浪荷重	σ_W (MPa)	112	0.07
モデル化不確定性係数	χ_2	1.0	0.10
"	χ_{SW}	1.0	0.05
"	χ_{MC}	1.0	0.10

図 4.5 信頼性指標 β

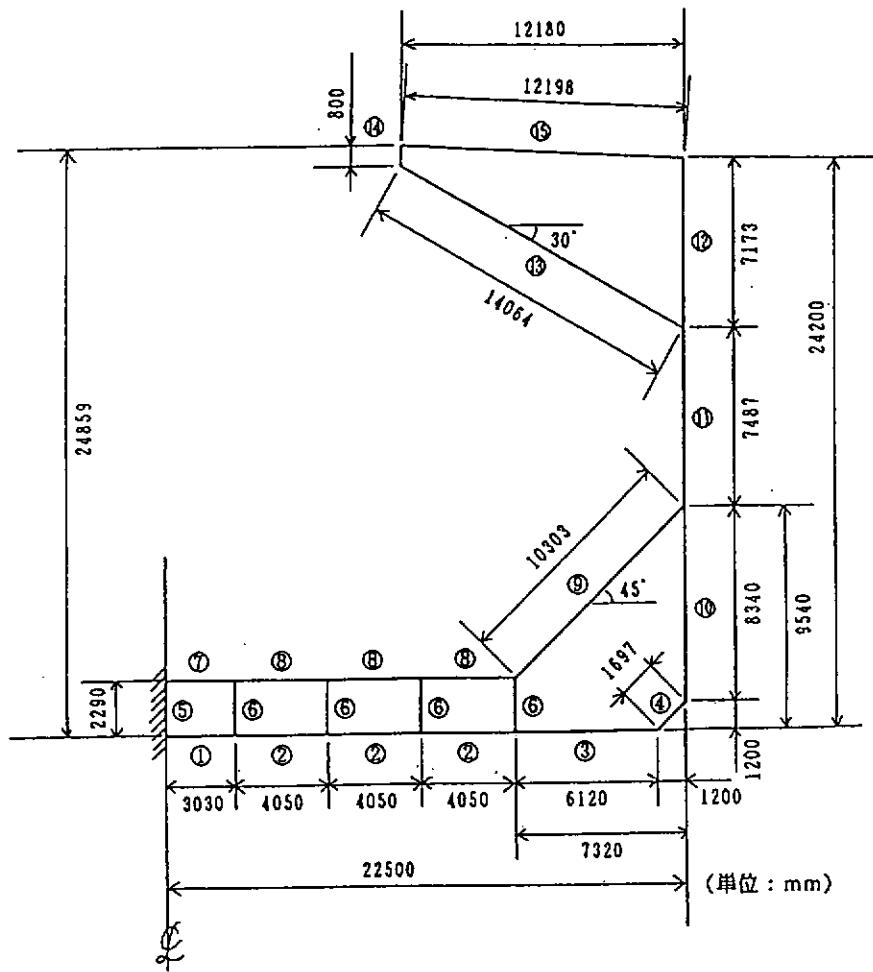


図 4.6 撹積貨物船の立体薄板構造モデルの断面形状

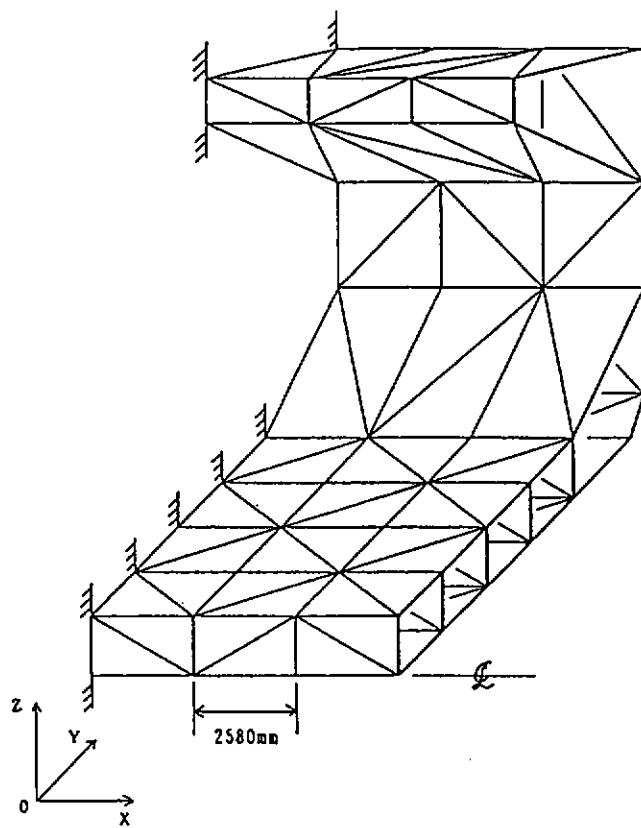


図 4.7 撹積貨物船の立体薄板構造モデル

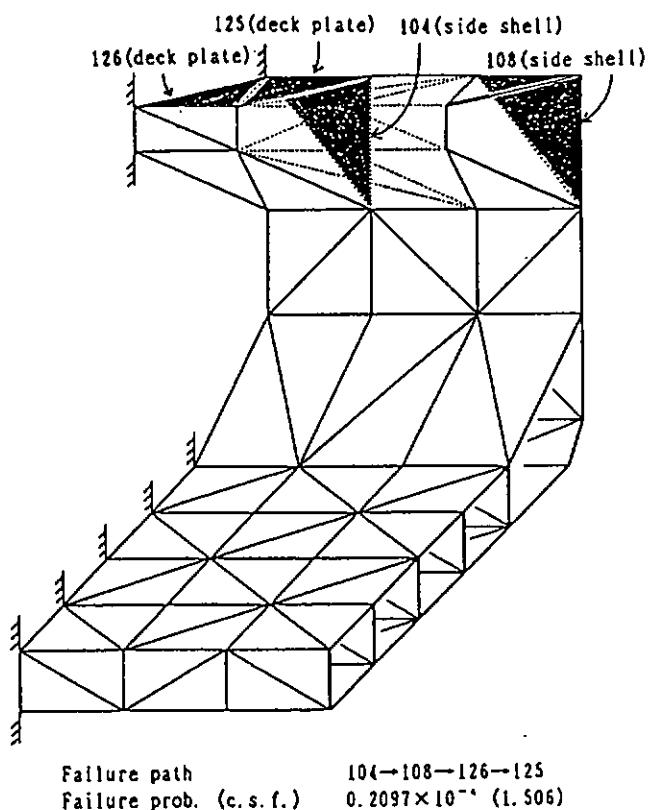


図 4.8 立体薄板構造モデルの最終崩壊解析結果 (Sagging)

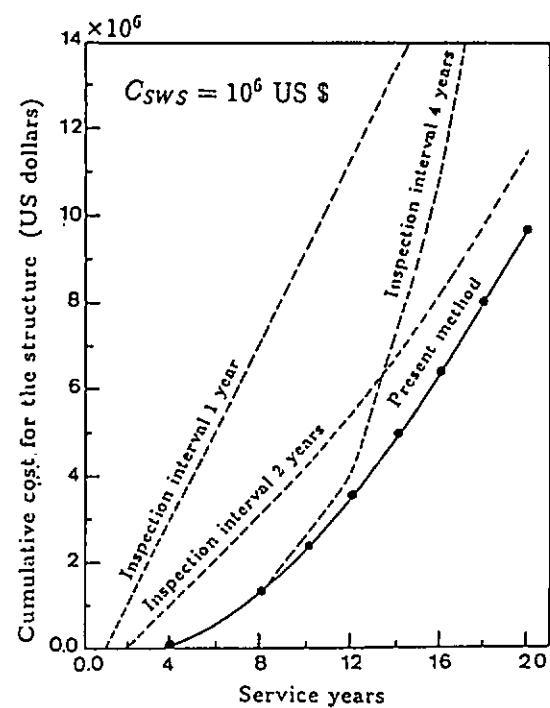


図 4.9 提案手法による累積使用コスト

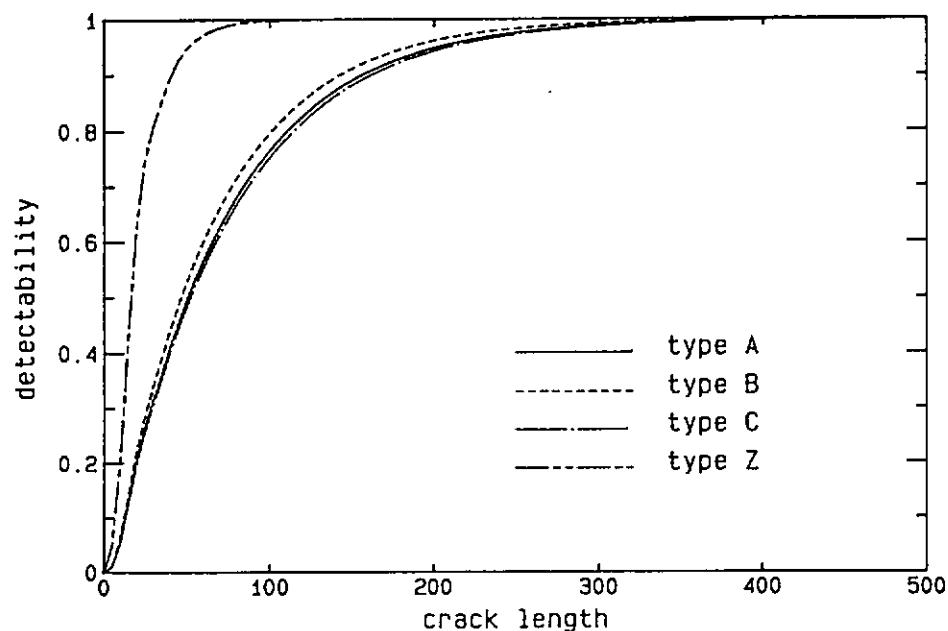


図 4.10 各分類毎の亀裂発見率の推定結果

結 言

平成2年度より4年度までの3年間、4つのワーキング・グループの下に「解析精度、工作精度、船舶の運航状態の違い等が、構造強度および構造が受ける力等の算定へ及ぼす影響を定量的に把握して、信頼性をより正確に評価する。」方法を検討して来た。

その結果、各種要因が強度に及ぼす影響度を定量的にある程度把握出来、又その方法を確立することが出来た。しかしながら、本文の中でも触れたように今後解決すべき課題もいくつかあることも分かった。特に、工作精度の実績データおよび船の運航実績データ等の収集は強度および外力でのばらつきを定量化するためには必要である。又、船舶の運航状態によっては、腐食等の影響により緒言で述べたように平均強度やばらつきが時間と共に変化していくことにも配慮しなければならない。就航後の船殻構造の総合的評価ではこの運航状態の把握は欠かせないものであり、設計・建造・運航という様に船の一生を考えた場合、今後の大きな課題となると思われる。

最後に本調査研究で目指した「確定論的評価法」から「信頼度による評価法」への脱皮のためには、社会的コンセンサスが得られる様な船殻構造の信頼度の設定が今後の課題と思われる。