

SR 228

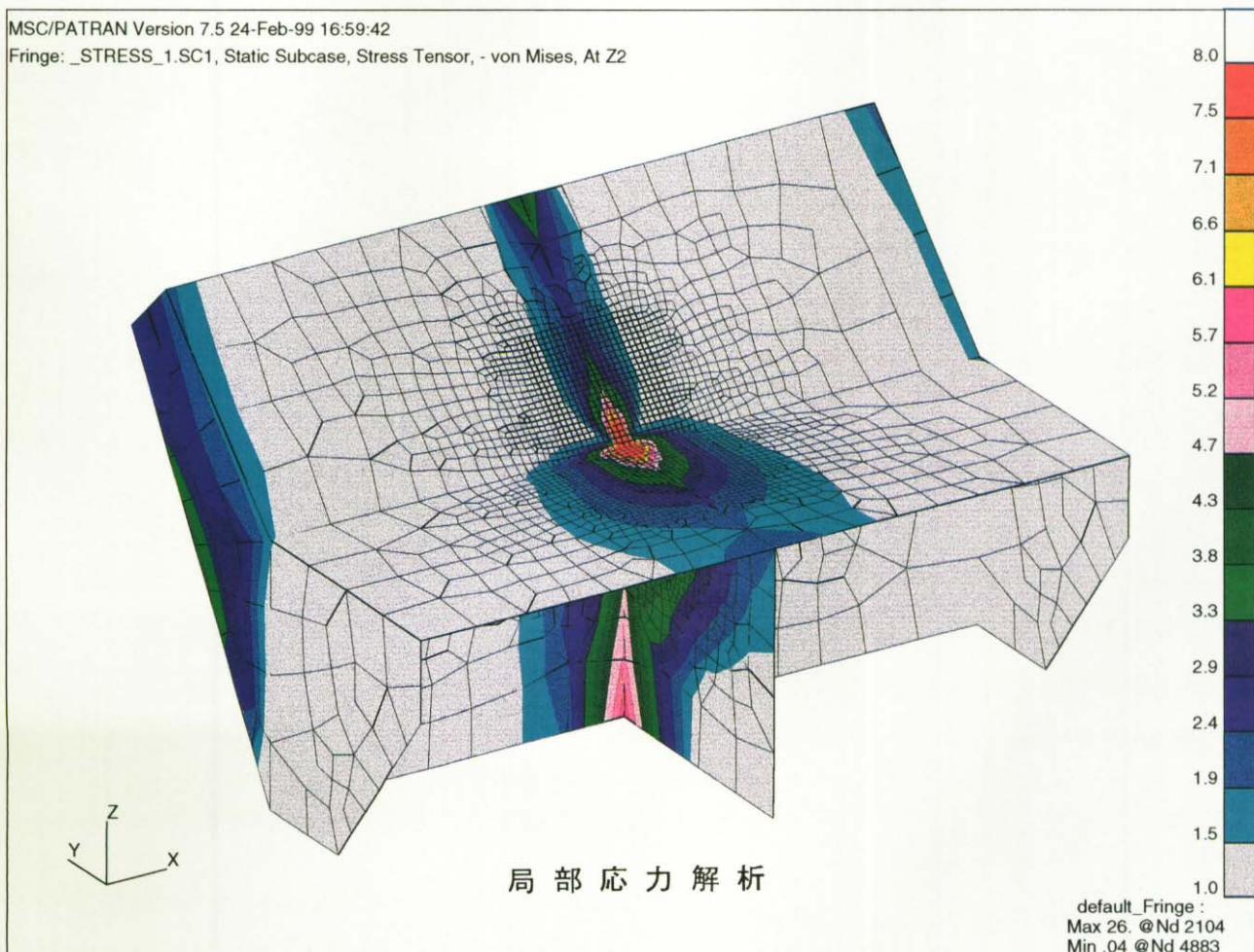
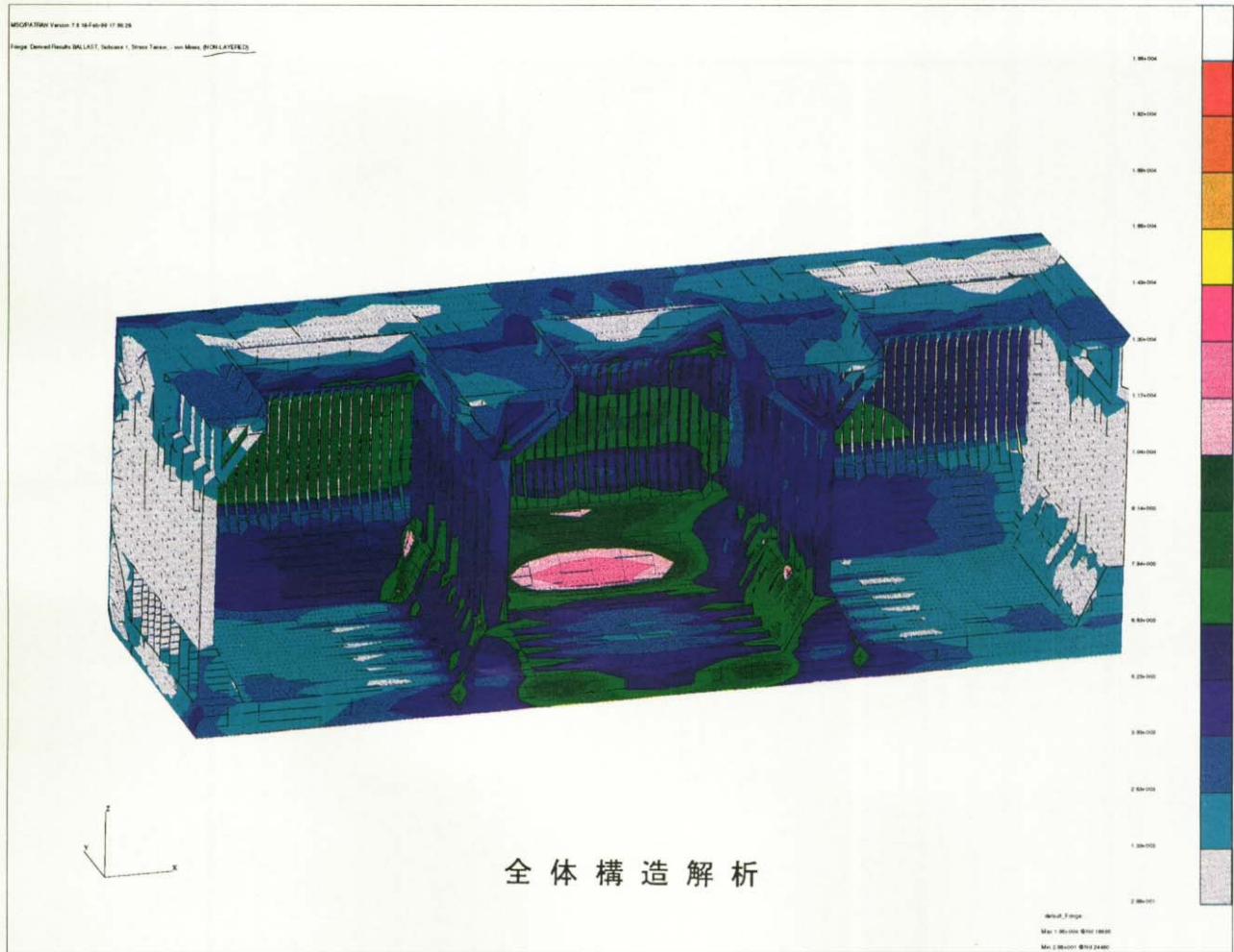
SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

波浪中の船体構造の安全性評価の研究

成 果 報 告 書

平成11年3月

社団
法人 日本造船研究協会



要 約

Ship Research Panel 228

「Study on loads and stress long-term responses of hull structures in waves」

With the casualties of oil tankers and bulk carriers which caused the loss of human lives and sea pollution by spilled oil, securing the safety of ships at sea have been widely discussed and various measures have been adopted so far. Further efforts to improve the safety of ships at sea are expected.

In order to inquire into the causes and to take measures of those casualties, it is indispensable to develop the procedures to estimate loads and stress responses of hull structures in waves.

This research project is intended to investigate the applicability of strip theory to estimate wave loads and to develop the calculation procedures of stress response function by which the stress long-term distributions are estimated for fatigue and buckling/ultimate strength evaluation. It is also intended to propose new design wave method to estimate the stress long-term responses more practically.

The procedures are applied to the existing bulk carrier and the fatigue and the buckling/ultimate strength are investigated.

1. 研究の目的

- 近年、バルクキャリアーやタンカーの事故により、人命や財産の損失また油流出による環境汚染などが生じ、大きな社会的、経済的問題となった。
- これらを契機として、船舶の安全性確保について議論がなされ種々の対策が施されるようになったが、益々安全性の向上は厳しく求められる状況にある。
- 我が国は世界一の造船国として、船舶の安全性の向上に積極的な役割を果たす義務がある。また、安全性の向上に取り組むことで得られる技術とそれを反映した船舶を創出することにより、我が国造船・海運の国際競争力は一層強化されることになるはずである。
- そこで本研究は、船舶の安全性向上に関わる基礎的な技術開発の一環として、波浪中の船体構造の応答を明らかにすることを目的として研究を実施した。

2. 研究の内容と成果

(1) 波浪荷重推定法に関する検討

- 大波高時の非線形影響は波高4~5mあたりから現れることが明らかになった。
- ストリップ法において粘性減衰力や喫水線近傍での波の出入りを考慮した半波処理することによって大波高時の横揺れや波浪変動圧が概ね推定できる。一方ではストリップ法では説明がつかない縦運動や縦曲げモーメント等にも波高非線形影響が現れることがわかった。
- 波高非線形影響が応力の長期予測値に及ぼす影響は概略検討で約20%と結構大きいことが

わかり、今後非線形現象の推定法や非線形現象の長期予測法の開発が必要であることが認識された。

- タンク内液体貨物や粒状貨物の内圧分布の推定法を明らかにした。

(2) 有限要素法解析のための構造モデルに関する検討

- 取扱いが簡便で実用的である1ホールドモデルの有用性を明らかにした。
- 1ホールドモデルでは3ホールドモデルに対して船幅方向応力で数%、船長方向応力で10%程度の差が生じることがわかった。
- 縦曲げの修正方法や横隔壁に大きな荷重が作用する場合等の評価には課題があることを確認した。

(3) 波浪中の構造応答解析法の検討

- 高精度で省力化が図れる実用的な応力応答関数を求める手法を提案し精度を確認した。
- 長期予測値を求める従来の設計波法やピーク時比率法といった簡易手法の精度は良くないことを明らかにした。

(4) 長期分布と海象の関係の検討

- 船級協会規則のベースは船と波との相対角が全方向とするAll Headingを想定しているが、大波高に対しては航路により波向きの特徴が顕著に現れること、及び大波高時には操船によって船と波との相対角が特定の角度にコントロールされる可能性があること等を考えると、必ずしもAll Headingとは言えない。
- 大波高時の応答値は波向きにより変わる可能性があり、最悪の場合はAll Headingに比べて16%程度応答値が高くなる可能性もある。
- 最悪短期海象の波高は波浪テーブルの最大有義波高となるので、遭遇する最大波高や荒天避航等の操船条件に関する研究が必要であることが認識された。

(5) 短期予測値を基にした設計波法の提案

- 実海域での船体応答の状態をよりよく表現していると考えられる、短期予測値を基にした設計波法を提案し、良い精度であることを確認した。

(6) 疲労強度評価に関する検討

- 疲労被害度の算定においては、航路の影響が大きいことが明らかになった。
- 亀裂伝播解析により損傷実績を説明できる結果が得られ、伝播解析の有効性を示した。今後損傷解析に際し、亀裂発生寿命評価に加えて亀裂伝播解析の重要性が認識された。

(7) 座屈・塑性崩壊強度評価に関する検討

- 部分構造の座屈・塑性崩壊強度評価の結果、直接計算では船級規則算式に比べ作用応力、最終強度ともに大きめの値となることがわかった。
- 縦曲げモーメントに対する最終強度は、サギング状態で初期降伏モーメントを下回ることもあり、初期降伏モーメントが安全側の基準とならない場合があることがわかった。
- しかし、最終強度の信頼性解析から、最終強度は直接計算による超過確率 10^{-6} のモーメントに対しても安全余裕があることがわかった。
- 長期予測値は超過確率 10^{-6} のレベルで現行の船級協会規則算式による応力値よりも大きい応力値を予測する可能性があることがわかった。
- 現行の基準は多くの実績に基づいて定められたものであり、それによって設計された船の安全性は多くの実績の基に実証されているという事実は、現行の設計がその安全率の基に、上述の如く設計荷重を超える荷重に対しても安全性が確保されている、あるいは長期予測に用いる波浪頻度表が実際に遭遇する海象に比べて厳しすぎる、大波高時の実際の応答が非線形性や操船の影響等により直接計算ベースより小さい、こと等を示していると考えられる。
- 今後、荷重のレベルとそれに応じた構造強度評価法の整理、船体構造の最終強度評価法の開発が、また荷重に関して大波高時の非線形性や荒天避航等の実海域での条件を考慮した解析法の開発が必要であることが認識された。

3. 成果の活用

- 本研究を通して明らかになった波浪中の船体応答を精度良く推定する手法と、波浪や船体応答モニタリングの技術とを結びつけることにより、実海域において海象や運航の条件、船体の条件が強度にどのように影響するかを容易に把握することができるようになり、船体構造の安全性向上を目指した運航支援に役立つ。
- 海象と設計条件が結びつくことにより、強度からみた限界状態を明らかにすることができるようになり、また海象や運航の条件、船体の条件等が限界状態にどう影響するかを把握することができるようになり、設計のみならず運航や保守の観点からも船体構造の安全性向上に寄与することができる。
- 荷重や応力応答の精度が良くなることにより、疲労寿命評価も従来のマイナー則による疲労被害度評価に代わって、より理論的な亀裂伝播解析手法による評価が活かせる環境ができる。これにより、種々の部材や荷重、亀裂の形態に対して余寿命評価を精度良く容易に行うことができるようになり、運航や保守に有用な情報を提供し船体の安全性向上に役立てることができる。

はしがき

本報告書は、日本財団の補助事業として、日本造船研究協会第228研究部会において、平成8年度から平成10年度の3カ年計画で実施した「波浪中の船体構造の安全性評価の研究」の成果を取りまとめたものである。

なお、平成10年度は、日本造船工業会から受託して行ったものである。

第228研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	富田 康光(大阪大学)	
代表幹事	林 和男(日本鋼管)	豊福 正継(日本鋼管)
委員	角 洋一(横浜国立大学)	藤野 正隆(東京大学)
	矢尾 哲也(広島大学)	安澤 幸隆(九州大学)
	鈴木 克幸(東京大学)	河邊 寛(防衛大学校)
	内藤 林(大阪大学)	深澤 塔一(金澤工業大学)
	影本 浩(東京大学)	渡邊 巍(船舶技術研究所)
	酒戸 恒男(日本海事協会)	戸澤 秀(三菱重工業)
	末岡 英利(三菱重工業)	笹島 洋(石川島播磨重工業)
	渡邊 孝和(三井造船)	福岡 哲二(三井造船)
	亀井 前人(日立造船)	高坂 明(川崎重工業)
	清水 穂高(川崎重工業)	阿部 孝三(住友重機械工業)
	見上 孝一(住友重機械工業)	九嶋 孝憲(住友重機械工業)
	豊福 正継(日本鋼管)	小段 範久(日本鋼管)
	白木 東(日本鋼管)	松本光一郎(日本鋼管)

第228研究部会幹事会委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	林 和男(日本鋼管)	豊福 正継(日本鋼管)
委員	末岡 英利(三菱重工業)	戸澤 秀(三菱重工業)
	黒岩 隆夫(三菱重工業)	笹島 洋(石川島播磨重工業)
	渡邊 孝和(三井造船)	福岡 哲二(三井造船)
	亀井 前人(日立造船)	高坂 明(川崎重工業)
	清水 穂高(川崎重工業)	見上 孝一(住友重機械工業)

阿部 孝三（住友重機械工業）
豊福 正継（日本鋼管）
白木 東（日本鋼管）
九嶋 孝憲（住友重機械工業）
小段 範久（日本鋼管）
松本光一郎（日本鋼管）

第228研究部会WG1委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	角 洋一（横浜国立大学）	
幹事	福岡 哲二（三井造船）	
委員	富田 康光（大阪大学）	林 和男（日本鋼管）
	豊福 正継（日本鋼管）	藤野 正隆（東京大学）
	矢尾 哲也（広島大学）	鈴木 克幸（東京大学）
	河邊 寛（防衛大学校）	安澤 幸隆（九州大学）
	深澤 塔一（金澤工业大学）	田中 義照（船舶技術研究所）
	酒戸 恒男（日本海事協会）	重見 利幸（日本海事協会）
	戸澤 秀（三菱重工業）	佐藤 宏一（三菱重工業）
	黒岩 隆夫（三菱重工業）	関 紀明（石川島播磨重工業）
	野崎 修一（三井造船）	谷川 雅之（日立造船）
	佐野 耕作（日立造船）	清水 穂高（川崎重工業）
	藤田 卓也（川崎重工業）	見上 孝一（住友重機械工業）
	濱崎 稔文（住友重機械工業）	森川 正夫（日本鋼管）
柴崎 公太（日本鋼管）	小段 範久（日本鋼管）	
白木 東（日本鋼管）	松本光一郎（日本鋼管）	

第228研究部会WG2委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	藤野 正隆（東京大学）	
幹事	小段 範久（日本鋼管）	白木 東（日本鋼管）
委員	松本光一郎（日本鋼管）	
	林 和男（日本鋼管）	豊福 正継（日本鋼管）
	角 洋一（横浜国立大学）	河邊 寛（防衛大学校）
	内藤 林（大阪大学）	深澤 塔一（金澤工业大学）
	影本 浩（東京大学）	渡邊 巍（船舶技術研究所）

田中 義照（船舶技術研究所）	熊野 厚（日本海事協会）
伊東 章雄（石川島播磨重工業）	北小路結花（石川島播磨重工業）
戸澤 秀（三菱重工業）	黒岩 隆夫（三菱重工業）
安川 宏紀（三菱重工業）	福岡 哲二（三井造船）
伊藤 正明（三井造船）	三宅成司郎（日立造船）
池淵 哲朗（川崎重工業）	見上 孝一（住友重機械工業）
佐々木紀幸（住友重機械工業）	松本光一郎（日本鋼管）

討議參加者

山内 八郎（日本鋼管）	米田 尚弘（日立造船）
有馬 俊朗（日本海事協会）	松永 昌樹（日本海事協会）
大坪 聰（日本海事協会）	溝上 宗二（三菱重工業）
柳原 大輔（広島大学）	平野 靖之（住友重機械工業）

事務局

（日本造船研究協会）	山内 康勝・村上 好男・関内 實・武田 晴雄
（日本造船工業会）	吉識 恒夫

目 次

1. 研究の目的	1
2. 研究の内容	3
2. 1 波浪荷重推定法に関する検討	3
2. 2 構造解析モデルに関する検討	5
2. 3 波浪中の構造応答解析法に関する検討	6
2. 4 長期分布と海象の関係に関する検討	8
2. 5 短期予測値を基にした設計波法の提案	11
2. 6 疲労強度評価に関する検討	12
2. 7 座屈・塑性崩壊強度評価に関する検討	14
3. 成果のまとめと課題	17
4. 今後の活用	20

1. 研究の目的

- 近年、バルクキャリアーやタンカーの事故により、人命や財産の損失また油流出による環境汚染などが生じ、大きな社会的、経済的问题となった。
- これらを契機として、船舶の安全性確保について議論がなされ種々の対策が施されるようになったが、益々安全性の向上は厳しく求められる状況にある。
- 我が国は世界一の造船国として、船舶の安全性の向上に積極的な役割を果たす義務があり、そう期待されている。また、安全性の向上に取り組むことで得られる技術とそれを反映した船舶を創出することにより、我が国造船・海運の国際競争力は一層強化されることになるはずである。
- そこで本研究は、船舶の安全性向上に関わる基礎的な技術開発の一環として、波浪中の船体構造の応答を明らかにすることを目的として、以下の項目について研究を行った。

(1) 波浪荷重推定法の検討

以下の検討により高精度波浪荷重推定法を明らかにする。

ストリップ法に基づいて波浪荷重を算定する場合の精度及び適用限界を明らかにする。

大波高時の非線形影響を明かにし、応力の長期予測に及ぼす影響を求める。

液体・粒状貨物による内圧分布を明らかにする。

(2) 構造解析モデルに関する検討

設計実務に有用な有限要素解析モデル（1ホールドモデル）の精度を検証し、有効性を示す。

(3) 波浪中の構造応答解析法の検討

応力長期予測値を計算する為に必要な応力応答関数を精度良く、実用的な労力で求めることができる手法を提示する。

(4) 長期分布と海象の関係の検討

応力長期予測に影響を及ぼす支配的な海象に関する検討を行い、設計海象条件を明らかにする。

(5) 設計波法の提案

従来の設計波法に代わる実現象をよりよく再現できる設計波の考え方を提示し、精度を検証する。

(6) 疲労強度評価に関する検討

(1)～(3)で検討した高精度応答解析法を適用して疲労強度の検討を行い、海象等の影響を明らかにし、また、亀裂伝播解析の有用性についても試計算により明らかにする。

(7) 座屈・塑性崩壊強度に関する検討

部分構造の座屈崩壊強度や船体断面の縦曲げ強度に関して、直接計算により荷重や強度を求め、船級協会規則との比較などにより、強度と荷重の関係を明らかにする。

2. 研究の内容

2.1 波浪荷重推定法に関する検討

(1) 内圧に関する検討

(船体動揺は改良ストリップ法にて推定)

- 液体貨物による内圧

→ S R 207法にて推定すれば良い。(図2.1-1)

ただし、自由表面影響は別途考慮が必要。

- 粒状貨物による内圧

→ Janssen法にて推定すれば良い。(図2.1-2)

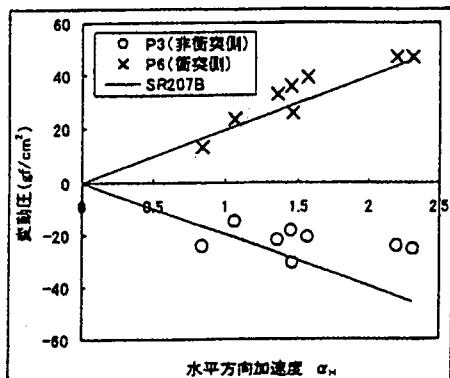


図2.1-1 液体貨物のS R 207法と実験結果との比較

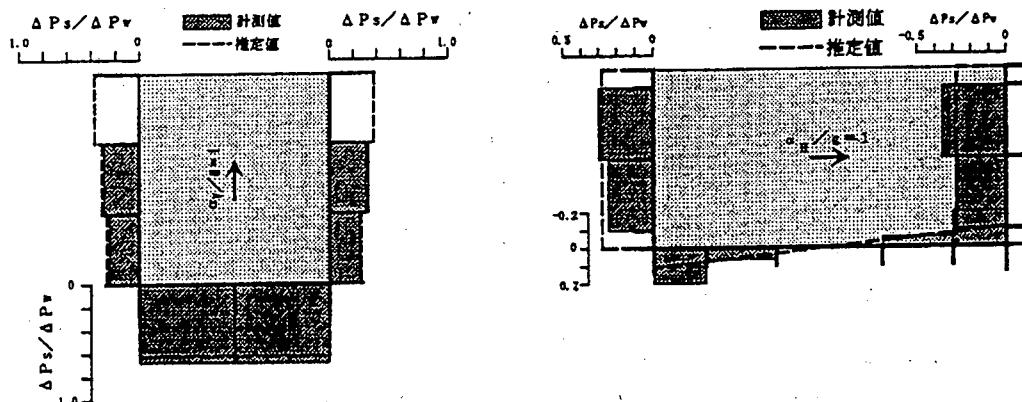


図2.1-2 粒状貨物のJanssen法と実験結果の比較

(2) 波浪外力に関する検討

(船体動揺／波浪荷重／波浪変動圧は改良ストリップ法にて推定)

- 大波高時の非線形影響 (図2.1-3)

- ① 実船計測結果 (S R 207データの再解析)

→ 波高 4 ~ 5 m より高い波高で非線形現象が確認された。

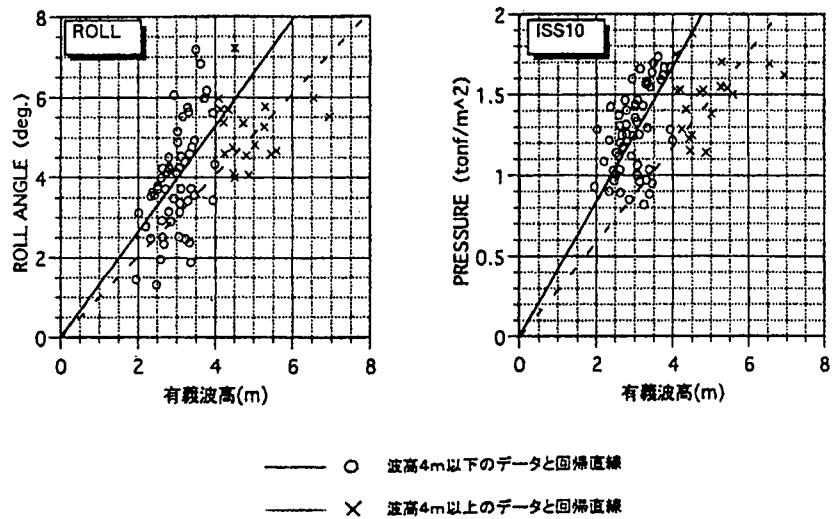


図 2.1-3 有義波高と実船計測値との相関

② 大波高時の模型試験を実施 (V L C C 供試船型)

目的：波高に対する非線形性の定量的把握

結果：下記の非線形影響が確認された。

理論推定時にも下記の考慮は必要。

A) 横揺れ

粘性減衰力を考慮すれば、推定値は試験結果に概ね合う。（図2.1-4）

B) 水面近傍の外板での波浪変動圧

半波処理を施せば、推定値は試験結果に概ね合う。（図2.1-5）

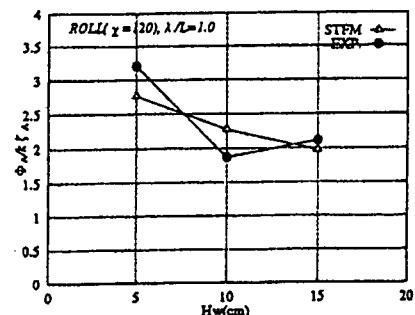
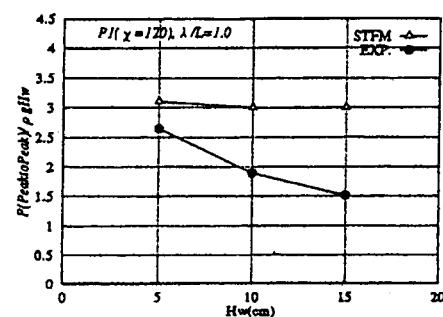
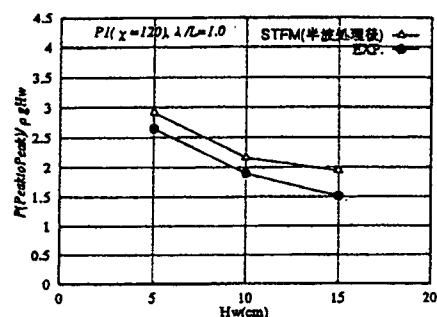


図2.1-4 横揺れの波高影響



<半波処理前>



<半波処理後>

図 2.1-5 波浪変動圧の半波処理した推定値と実験結果の比較

C) 上記以外の非線形現象

(縦運動／曲げモーメント等)

実験結果として確認された。(図2.1-6)

応力応答(長期最大値)に及ぼす影響は無視

できない。(図2.1-7)

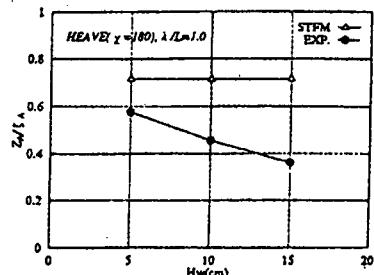


図 2.1-6 非線形影響(ヒーブ)

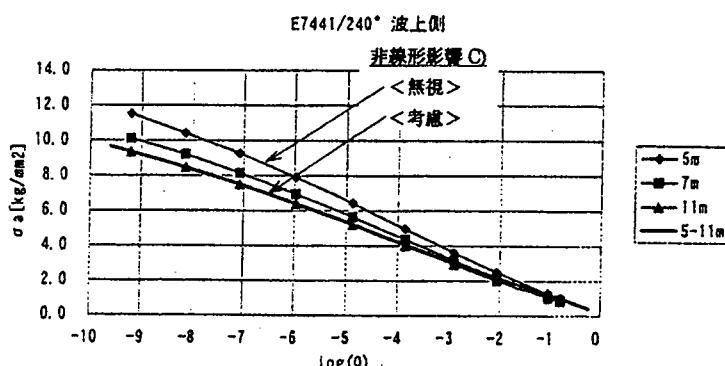


図 2.1-7 波高の非線形性の応力応答への影響

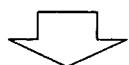
【波高荷重推定に関する課題】

- 非線形現象の物理的考察
- 非線形現象の理論推定手法の開発
- 非線形現象の長期予測法の開発

2.2 構造解析モデルに関する検討（1ホールドモデルの精度検証について）

船体の部分構造について、有限要素法により強度解析を行う際に通常用いられるホールドモデルについて、下記の2通りのモデル化を比較し、精度の検証を行った。

- 1ホールドモデル(横隔壁を中心に前後方向0.5ホールドづつ)(図2.2-1)
- 3ホールドモデル(モデル前後端では、全船からの切り出し境界における船体断面力を与え、全船モデル相当の状態をシミュレートしたモデル)



- 1ホールドモデルの有効性が確認できた。
- 船幅方向の応力については、1ホールドモデルは3ホールドモデルと比べてその応力値の差は、ホールド中央部の各位置でばらつくが数%程度である。
- 船長方向の応力については、1ホールドモデルに対し船体縦曲げ応力分の補正を行うことにより精度を向上させることができ、3ホールドモデルとの差は10%内外に収まる。ただ

し前記補正を、船体を単純梁と見立てた曲げ応力にて修正する場合には、船底や上甲板での縦曲げ応力分布が一様と仮定されるが、実際には剪断遅れの影響が出て一様分布とならず、その差が生じることに注意して評価する必要がある。

- 横隔壁近傍における部位を強度評価する場合には、1ホールドモデルにおいては船側外板と横隔壁の交点に与えた境界条件（支持点）の影響が、剪断応力を中心として発生するため注意する必要がある。また、1ホールドモデルにおけるその支持点反力を打ち消すか否かの取扱いを変えても、応力応答への影響は小さい。
- バルクキャリアのヘビーバラスト状態のように、横隔壁に大きな液圧がかかる場合には、その荷重が二重底・船側外板・上甲板に伝達され、これらの大板構造に船体前後方向の軸応力が発生するため、1ホールドモデルの前後端における拘束条件により、船長方向応力が変化することに注意する必要がある。

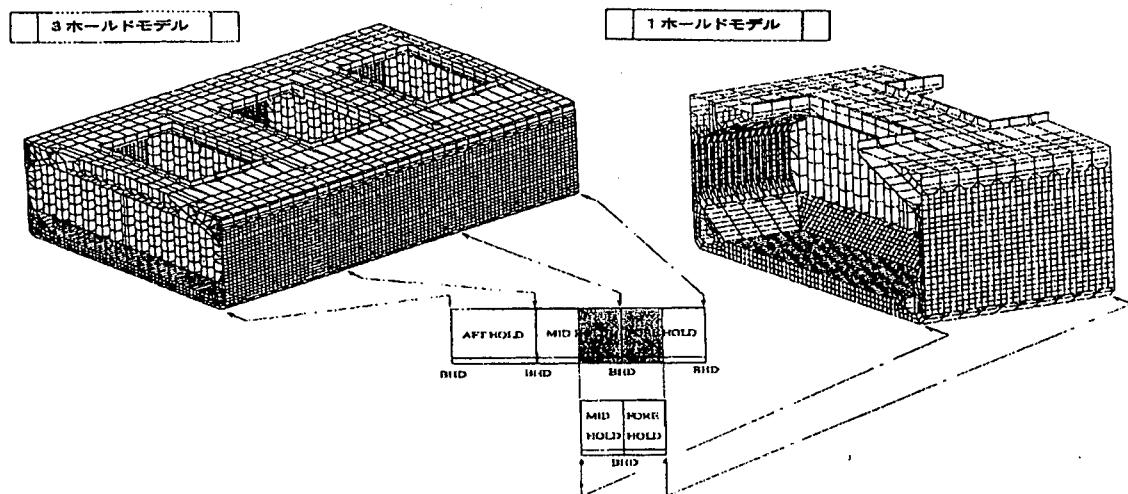


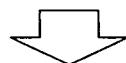
図 2.2-1 1ホールドモデルと3ホールドモデル

【1ホールドモデルに関する課題】

- 船体縦曲げ応力修正における、剪断遅れを考慮した評価方法
- 船体前後方向の拘束条件設定の違いによる影響評価

2.3 波浪中の構造応答解析法の検討

波浪中の応力は規則波に対する応答関数から不規則波中の短期予測および長期予測により求めするのが基本である。しかし、応力の応答関数を求めるためには、膨大な有限要素法解析を必要とするため、この種の解析は余り実施されていない。そこで、精度を落とさず省力化が図れる解析手法の検討を行った。



- ・波浪変動圧力分布を直線近似する手法（パターンロード合成解析法）、
 - ・代表周期における圧力分布を用いた応力応答関数の近似的計算法（最大・最小法、簡略化法）、
- 以上の手法を提案し、有効性を確認した（図2.3-1）
- ・従来の設計波法（S R216レベル2B法）およびピーク時比率法（S R216レベル2A法）の精度が余り良くないことが確認できた。

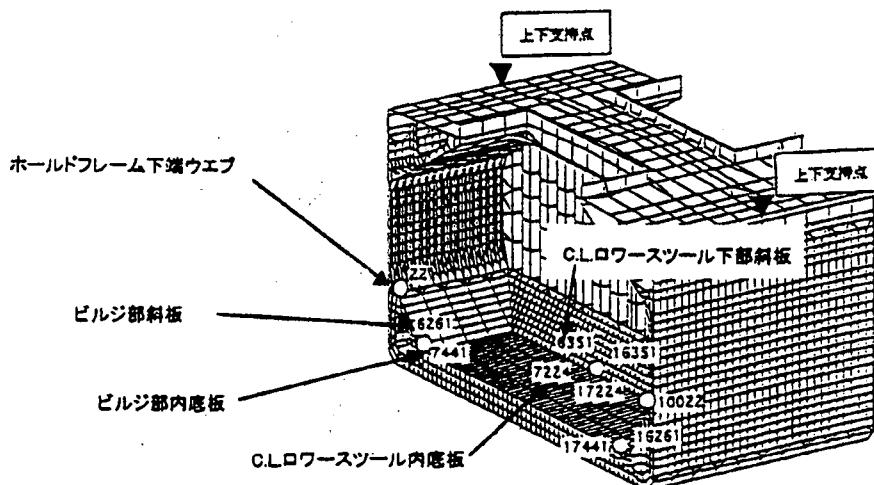
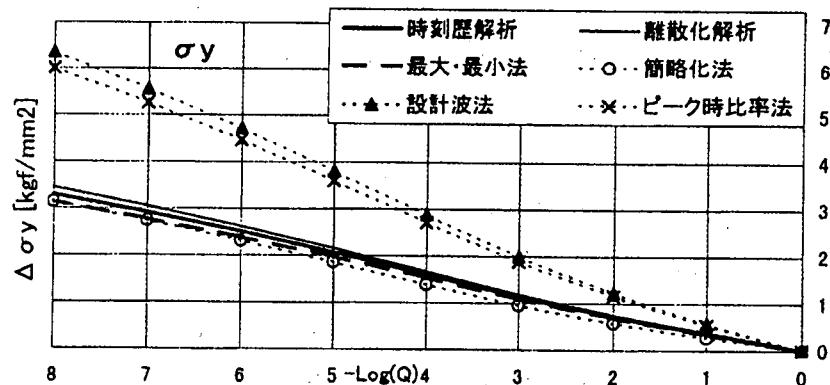


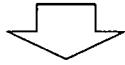
図 2.3-1 各種手法による応力の長期予測結果の比較
(センターライン・ロワースツール内底板)

【応力応答関数を求める手法に関する課題】

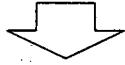
今回有効な手法として提案した手法について、今後さらに他の船種や構造部位に適用し精度を検証する必要がある。

2.4 長期分布と海象の関係に関する検討

船級協会規則の荷重条件は長期予測に基づいているとされているが、海象との関係は不明確。



海象との関係が明確になれば（本SRで検討）、操船等の運航条件と強度の関係、腐食耗等の経年変化や損傷に対し、強度の観点からの運航限界や運航条件の影響、が明確にできる。



これらの情報を設計・運航・保守の間で情報共有することで船舶の安全性の更なる向上に役立つ。

(1) 長期分布の最大値に影響を与える海象（図2.4-1）

- 応答の超過確率 $Q = 10^{-1} \sim 10^{-2}$ → All Heading状態
 $Q = 10^{-4} \sim 10^{-8}$ → 特定の海象、航行条件の寄与率大
- $Q = 10^{-8}$ 付近の最大応答に最も影響を及ぼす海象、航行条件を最悪短期海象と呼ぶ。
 最悪短期海象：規則波中の応答関数が最大値をとる航行条件（波向き）と平均波周期およびその波周期で遭遇する最大有義波高

(2) 長期分布の最大値は最悪短期海象の短期予測値の関係（図2.4-1）

長期分布の超過確率 10^{-8} の極値 ≈ 最悪短期海象の 10^{-3} 付近の短期予測値

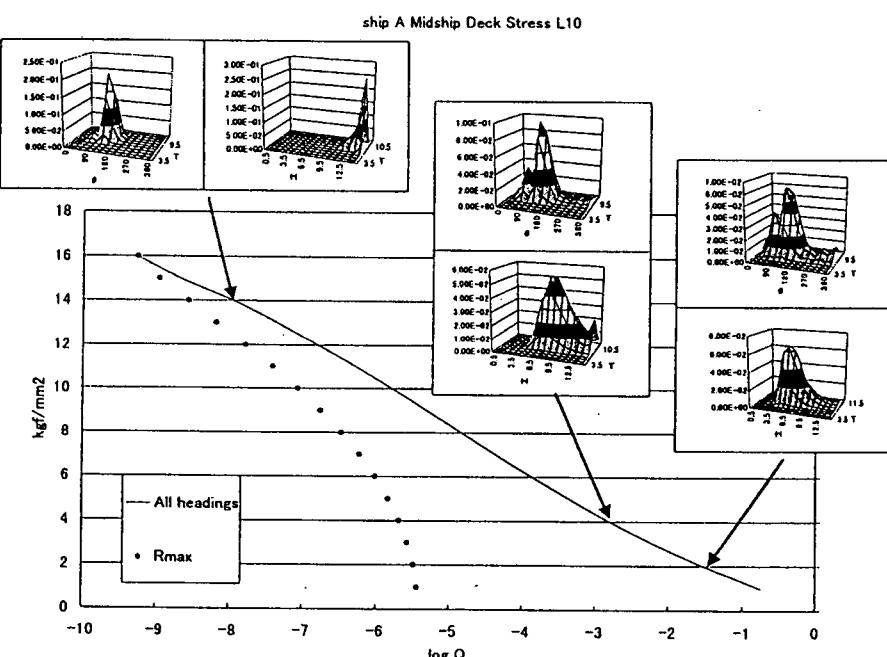


図 2.4-1 長期分布における海象寄与率例

(3) 最悪短期海象下での長期予測値とAll Heading 想定の長期予測値の関係

- 船級協会規則のベースは船と波との相対角が全方向とするAll Heading を想定しているが、大波高に対しては航路により波向きの特徴が顕著に現れること、及び大波高時には操船によって船と波との相対角が特定の角度にコントロールされる可能性があること等を考えると、必ずしもAll Heading とは言えない。
- All Heading に代わって特定の海象、航行条件（最悪短期海象）に基づいて荷重の設定等が整備することで、海象との関係を明確にすることができます。
- 最悪短期海象下での長期予測値は、All Heading で求められる長期予測値の1.16倍。

(図2.4-2)

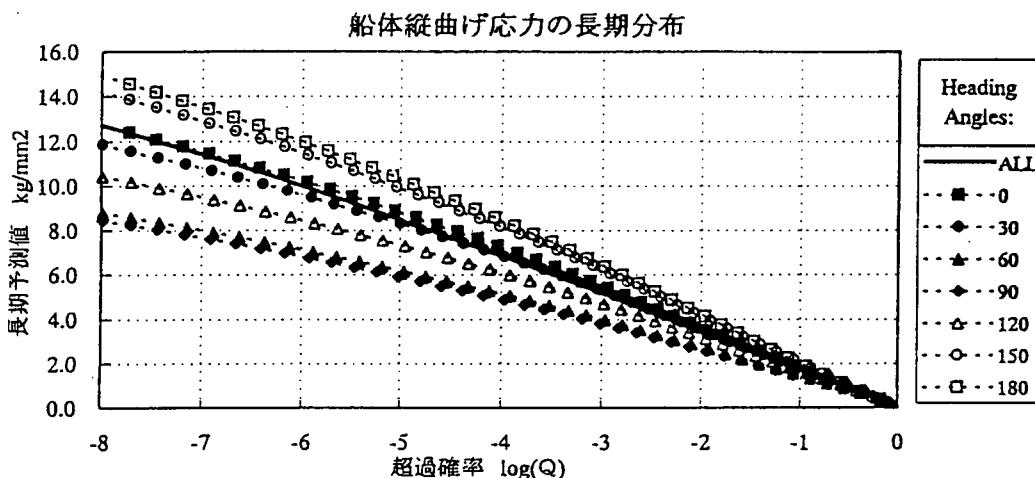


図 2.4-2 船体縦曲げの応力分布（波向きの影響）

【長期分布と海象の関係に関する課題】

- 最悪短期海象は、対象とする部材や応力に応じて求められる。今後多くの解析を通じて明らかにする必要がある。
- 最悪短期海象の波高は、波浪テーブルの最大有義波高となるので、船が遭遇する最大波高や大波高時の操船条件に関する研究が必要。このためには、波浪や船体応答のモニタリングが有効。

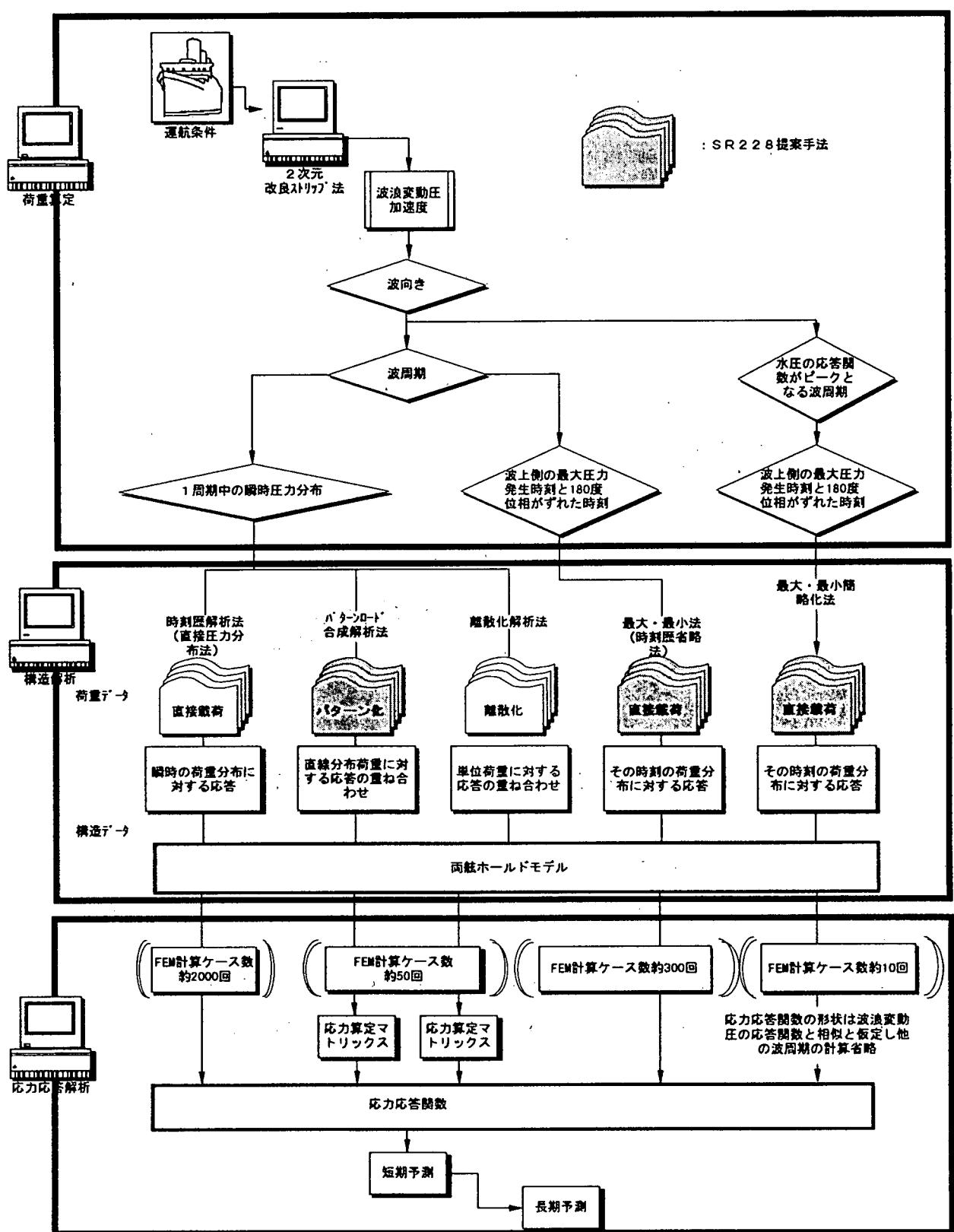
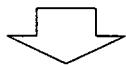


図 2.4-3 各種応力応答関数作成方法の比較

2.5 短期予測値を基にした設計波法の提案

応力応答関数を用いて応力長期予測値を求める統計的直接計算手法は、特定の応力成分を対象とする船体縦曲げ強度や疲労強度等では有効。

一方では、構造設計のためには構造全体の荷重の流れや応力分布を把握することも必要。



荷重の同時性を考慮した荷重条件の設定 = 設計波 が必要

(1) 従来の設計波法の精度 (図2.5-1)

従来の設計波（荷重に相当する応答値が $Q=10^{-8}$ に相当する値となるように設定された波高をもつ規則波）の精度は不十分。理由は実海域での応答を規則波の応答で代表させていることにある。

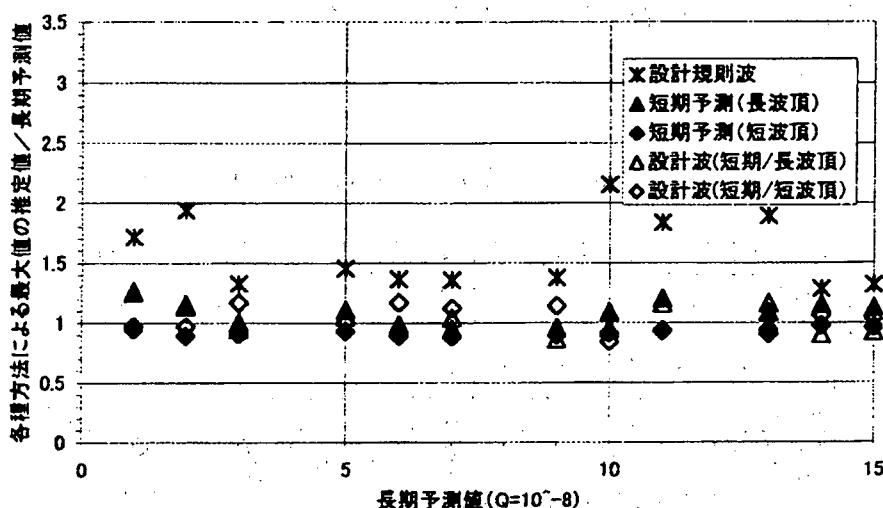


図 2.5-1 長期予測による $Q=10^{-8}$ レベル応力と各種方法により推定された最大値との比較

(2) 短期予測値を基にした設計波法の提案

- 実海域における応答は、荷重の応答のピークが応答関数のピーク通りに大きくなりらず、短期海象の影響により平均化されピークが小さくなる。(図2.5-2)
- 長期分布の最大値 ($Q=10^{-8}$) は、支配的な短期海象（最悪短期海象）における短期予測の最大値に一致する。

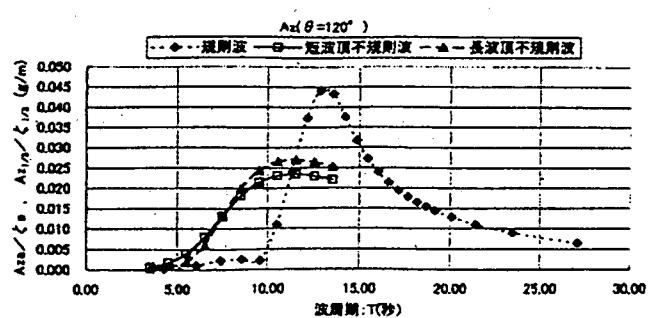
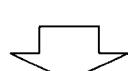


図 2.5-2 応力応答関数と応力の短期予測との比較

本研究で得られた以上の知見を基に、実海域での現象をよりよく表現でき、設計波高の意味が明確な、短期予測に基づく設計波法を提案し精度を検証した。（図2.5-1）

短期予測に基づく設計波の定義：

- ✓ 最悪短期海象下の加速度、運動、波浪変動圧分布等の短期予測値を荷重として負荷。
- ✓ 各荷重の位相はピーク周期に相当する規則波中のものを仮定。
- ✓ 波高は波浪テーブルにおける最大の有義波高を設定する。

【短期予測値を基にした設計波法の実用化に向けての課題】

前節の最悪短期海象に関する課題に加えて、応力長期予測値と支配的な荷重要因（加速度、波浪変動圧、運動等）との関係を多くの試解析により明らかにし、設計波浪条件（表2.5-1）を具体化することが必要。

表 2.5-1 支配的荷重と波向きの例

支配的荷重	縦波(180°)	斜波(120°)	斜波(150°)	横波(90°)
縦曲げモーメント	◎ 1.2	○	○	-
上下加速度 (ピッキング)	◎ 1.2	○	○	-
ローリング	-	○	○	◎ 1.4
船側圧力	-	◎ 0.8	◎ 0.9	◎ 1.4, 0.6
ビルジ部圧力	○	◎ 0.9	◎ 0.9	○
船底圧力	◎ 1.0	◎ 0.9	◎ 0.9	○

数値は C 船の場合の波長 λ_{L} を示す。

2.6 疲労強度評価に関する検討

(1) マイナー則による疲労被害度評価

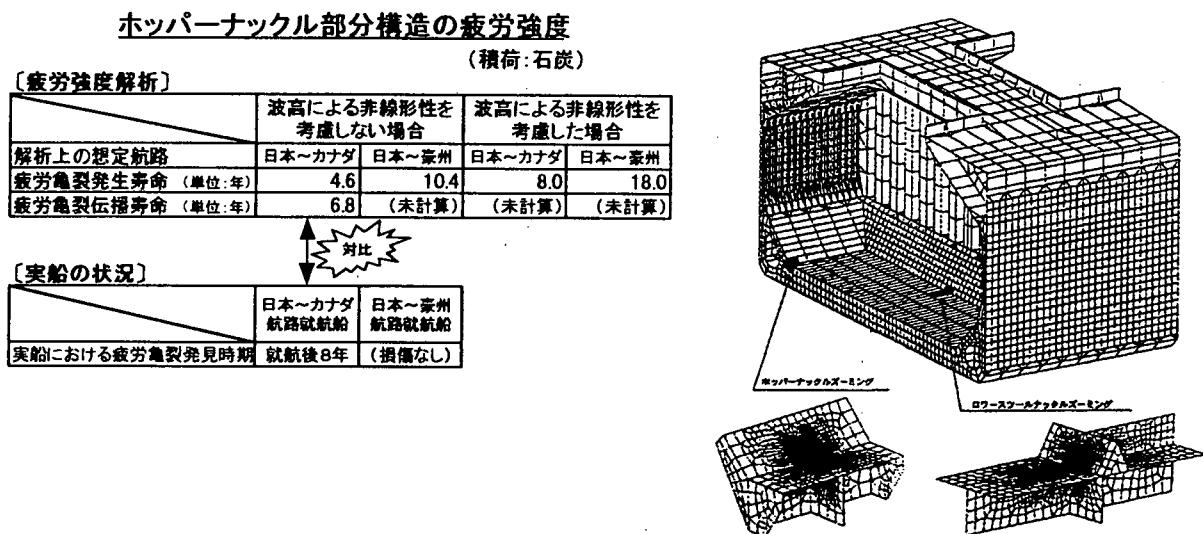
大型バルクキャリアー供試船を対象にマイナー則に基づく疲労強度評価を行った。



- 疲労被害度の評価においては波浪頻度表、即ち航路の影響が大きい。（表2.6-1）

従って、正確に疲労寿命を評価するためには、実際にその船が航行する航路における波向きも含めた正確な波浪頻度表を用いる必要がある。

表 2.6-1 ホッパーナックル部分構造の疲労寿命推定比較



● 疲労被害度の算定では、有義波高 8 ~ 10m の寄与率が最も大きく、支配的海象である。

(図2.6-1)

従って、疲労強度評価のための応力は 8 m程度の波高の下で波高非線形影響を考慮して計算すればよい。

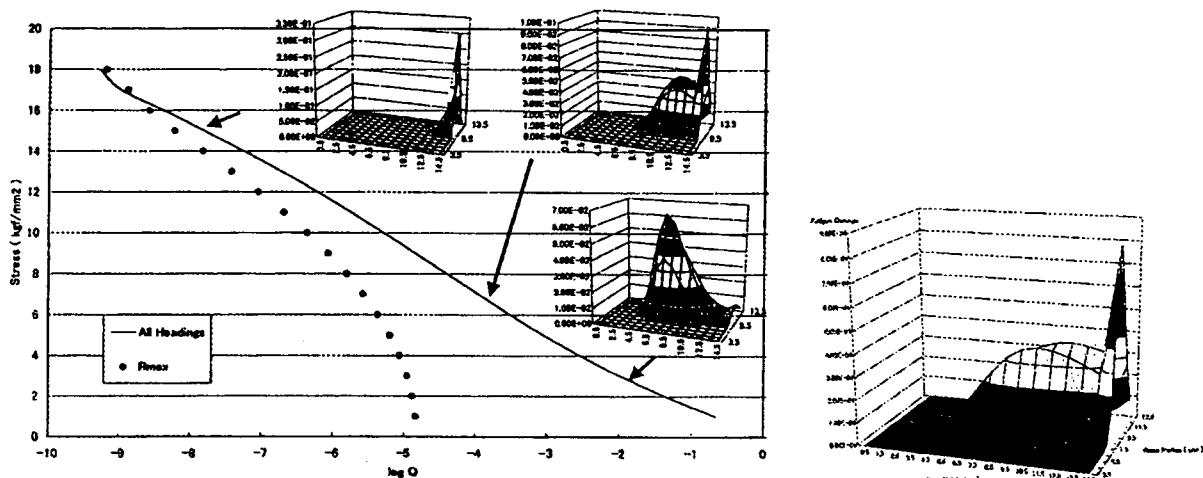
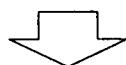


図 2.6-1 疲労被害度計算時の応力の長期分布と海象寄与率 疲労被害度の海象寄与率

(2) 亀裂伝播解析による疲労強度評価

亀裂伝播寿命評価によれば、その亀裂が船体構造全体の安全性あるいは貨物漏洩といった機能喪失に対してどの程度の影響度を持つのかという判断のための重要な情報を得ることができる。この様な情報を保守や運航に役立てることにより船体構造の安全性向上に寄与することができる。

大型バルクキャリアー供試船のビルジホッパーナックル部の亀裂伝播解析と余寿命評価を行った。



- 損傷実績をほぼ説明できる結果が得られ、有効な手法であることを確認した。
- 航路により余寿命が倍以上違う結果になることが明らかになった（図2.6-2）

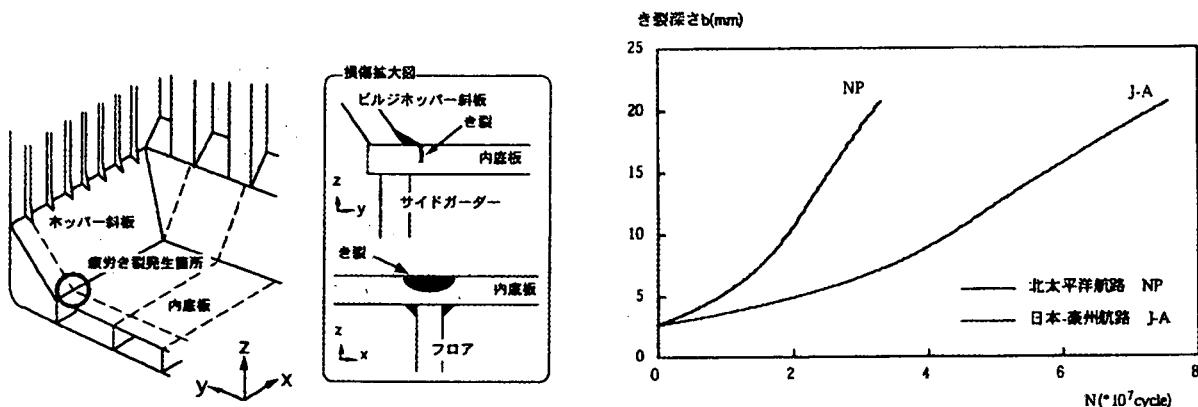


図 2.6-2 大型バルクキャリア供試船の亀裂伝播解析結果

【疲労強度評価に関する課題】

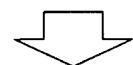
今後、船体構造の代表的な部材交差部の亀裂寸法、形状と余寿命係数の関係を求めておけば、板厚、作用応力レベルの異なる類似構造に対する余寿命評価が可能になり、疲労損傷の重要度判断に有力な情報を与え、船体構造の安全性の向上に寄与することができる。

2.7 座屈・塑性崩壊強度評価に関する検討

(1) 部分構造の座屈・塑性崩壊強度評価

大型バルクキャリアー供試船の部分構造（船底外板、ホッパー斜板、上甲板）の防撓パネルを対象に、座屈・塑性崩壊強度評価を行った。

- 有限要素法弾塑性解析により最終強度を求めた。
- 応力応答関数から長期予測による直接計算手法により作用応力を求めた。
- 船級協会規則（ロイド）算式による評価と比較した。



- 直接計算では船級協会算式に比べ、作用応力、最終強度とも大きめの値を与える傾向にある。（図2.7-1）
- 直接計算では相対的に最終強度より作用応力を大きめに算定する傾向にあるため、直接計算ベースでは船級規則ベースに比べて保守的（大きめの部材寸法を与える）な設計になる。
- 船級協会規則は実績をベースに作用応力と強度の関係がバランスのとれたものになってい

ると考えられる。従って、直接計算による応力や強度を船級協会規則算式と結びつけて評価することはバランスを欠く結果となる可能性がある。

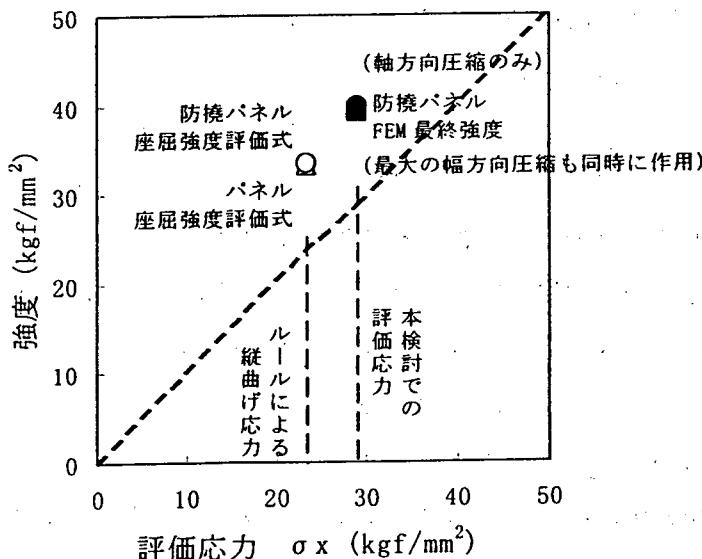
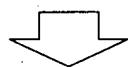


図 2.7-1 船底外板の強度と評価応力の関係

(2) 縦曲げ最終強度評価

Smith の方法に基づいた縦曲げ逐次崩壊解析コード (HULLST) を用いて、大型バルクキャリアー供試船の他、10隻について最終強度解析を行った。



- 縦曲げモーメントにたいする最終強度は、サギング状態で初期降伏モーメントを下回るケースが見られ、初期降伏モーメントが安全側の基準にならない場合がある。
- 大型バルクキャリアーの最終強度解析の結果、最終強度は船級規則による設計モーメントに対して30%以上の余裕があり、3ミリ程度の一様衰耗まで許容できる。（図2.7-2）

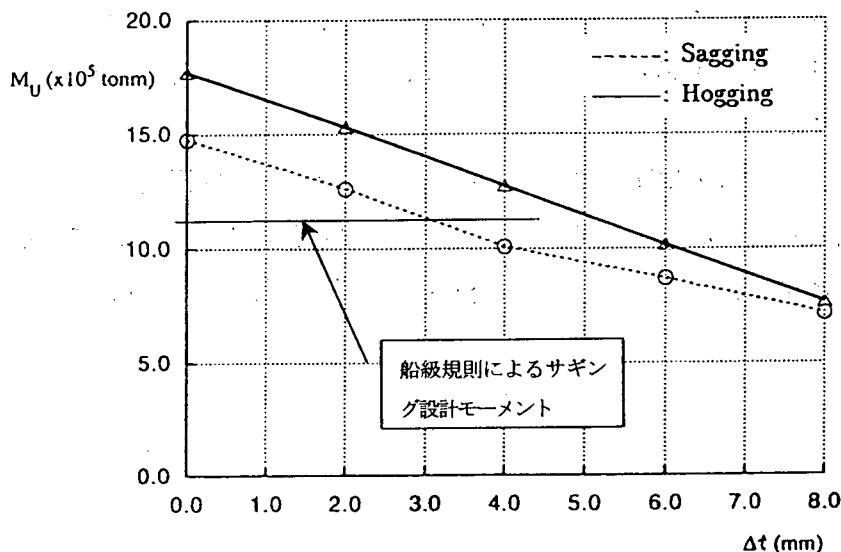


図 2.7-2 板厚衰耗が縦曲げ最終強度に及ぼす影響

- 大型バルクキャリアーの最終強度に対する信頼性解析の結果、最終強度は直接計算による $Q = 10^{-8}$ のモーメント（船級規則値より大きい）に対しても安全余裕を有している。
- 長期予測値は使用する波浪頻度表によるが、超過確率 $Q = 10^{-8}$ のレベルで現行の船級協会規則算式による応力値よりも大きい応力値を予測する可能性があることが分かった。一方、現行の基準は多くの実績に基づいて定められたものであり、それによって設計された船の安全性は多くの実績の基に実証されている。以上のことから現状の設計における安全性は以下の何れかあるいはそれらの組合せの基に確保されているものと考えられる。
 - レ 長期予測に用いた波浪頻度表が厳しすぎる。即ち、船体が実際に遭遇する波浪条件は今回用いた波浪頻度表における海象よりも穏やかである。
 - レ 大波高下で実際に生じる応力は非線形性や船の減速、変針等により線形理論により予測される応答値よりも小さい。
 - レ 現行の荷重と強度の関係における安全率の基に設計荷重を超える荷重に対しても船体構造の安全は確保されている。

【船体構造強度評価に関する課題】

- 荷重のレベルとそれに対応した構造強度評価法の整理
現状の構造設計法は、最大荷重を想定した設計基準とはなっていない可能性がある（但し、最大荷重に対しても結果として安全性は確保されていることは確認された）。しかしながら、実海域での船体構造の挙動をより良く表現でき、海象との関連が明確な設計基準ができれば、これを基に強度からみた限界状態や航行限界を議論することが容易になり、船体構造の安全性の一層の向上に寄与できる。船体構造の設計は今後、構造の限界状態を明確にし、それに対する荷重と構造強度を合理的に評価するという方向に向かうことが望ましい。
- 船体構造全体の最終強度評価法の開発
最大荷重条件に対しては現状の許容応力とは別の、縦曲げ最終強度の検討で示したような、安全性評価法の確立が必要になる。今後は更に様々な部分・全体構造の最終強度の評価を進める必要がある。
- 船体運動や荷重の解析に関しても、大波高時の非線形性や荒天避航等の実海域での条件が十分反映された解析が必要である。実海域で遭遇する波浪を明らかにするとともに大波高時の非線形性を考慮したシミュレーション技術と評価法の開発が必要である。

3. 成果のまとめと課題

(1) 波浪荷重推定法に関する検討

《成果》

- 改良ストリップ法による船体運動・加速度・波浪変動圧推定の精度を確認した。
- 大波高時の非線形影響を実船計測データの分析や模型試験により明らかにした。
- 大波高時の非線形影響が応力長期予測値に及ぼす影響を概略検討し、超過確率 10^{-8} 付近の長期予測値は非線形影響により約20%落ちることがわかった。
- タンク内液体、粒状貨物の内圧分布を明らかにした。

《課題》

- 非線形現象の物理的考察、理論推定手法の開発、長期予測法の開発

(2) 構造解析モデルに関する検討

《成果》

- 1ホールドモデルの有効性を確認した。
- 3ホールドモデルに対して、1ホールドモデルでは高々、船幅方向応力で数%、船長向応力で縦曲げ補正して10%程度の差であることがわかった。
- 横隔壁に大きな液圧がかかる場合には、モデル前後端の拘束条件により船長方向応力が変化するので注意が必要である。

《課題》

- 船体縦曲げ応力修正における剪断遅れを考慮した評価法
- 横隔壁に大きな液圧がかかる場合には、モデル前後端の拘束条件により船長方向応力が変化するので、拘束条件の違いによる影響を評価しておく必要がある。

(3) 波浪中の構造応答解析法の検討

《成果》

- 応力応答について、精度を落とさず省力化が図れる実用的な解析手法について検討し、パルスロード合成解析法や最大・最小簡略化法等の手法を提案し、有効性を確認した
- 従来の簡易解析法（設計波法、ピーク時比率法）の精度は良くないことを明らかにした。

《課題》

- 今回提案手法について、他部位、船種に適用し精度を検証する必要がある。

(4) 長期分布と海象の関係の検討

《成果》

- 応答のレベルの低い超過確率 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ ではAll Heading状態である。
- 応答のレベルの高い超過確率 10^{-8} 付近では特定の海象、航行条件（最悪短期海象と呼ぶ）が支配的である。
- 船級協会規則のベースはAll Headingを想定しているが、大波高に対しては下記のこと考えると必ずしもAll Headingとは言えない。
- 大波高時の応答値は波向きによって変わる可能性があり、最悪の場合はAll Headingに比べて16%程度応力値が高くなる可能性もある。
- 長期分布の 10^{-8} の極値は最悪短期海象の 10^{-3} の短期予測値で表せる。

《課題》

- 系統的な解析により種々の部材や応力について最悪短期海象を明らかにする必要がある。
- 最悪短期海象の波高は波浪テーブルの最大有義波高となるので、遭遇する最大波高や操船条件に関する研究が必要。系統的、継続的な波浪や応答のモニタリングが必要である。

(5) 短期予測値を基にした設計波法の提案

《成果》

- 実海域の現象を表わしていると考えられる、短期予測値を基にした設計波法を提案した。
- 従来の設計規則波に置き換える設計波法の精度は良くないことを確認した。

《課題》

- 提案した設計波法を有効に使えるようにするために、系統的な解析を通じて種々の応答に対する設計波浪条件を整備する必要がある。

(6) 疲労強度評価に関する検討

《成果》

- マイナー則による疲労被害度の評価においては、航路の影響が大きい。従って、実船の評価に際してはその船が航行する航路の波向きも含めた波浪頻度表を使う必要がある。
- 疲労被害度の算定では、有義波高 8 ~ 10m の海象が支配的である。従って、疲労被害度評価のためには波高 8 m 程度の下で荷重を計算し応力を求めることが良い。
- 亀裂伝播解析により損傷実績を説明できる結果が得られ、伝播解析の有効性を示した。

《課題》

- 伝播解析を系統的に実施し亀裂寸法、形状と余寿命係数の関係を準備しておけば、類似構造の余寿命評価が可能になる。

(7) 座屈・塑性崩壊強度に関する検討

《成果》

- 部分構造の座屈・塑性崩壊強度評価の結果、直接計算では船級協会規則算式に比べ、作用応力、最終強度とも大きめの値となることがわかった。
- 直接計算では作用応力を相対的に大きめに算定する傾向にあるので、直接計算ベースでは船級協会規則に従う場合よりも保守的（大きめの部材寸法を与える）な設計となる。
- 縦曲げモーメントに対する最終強度は、サギング状態で初期降伏モーメントを下回ることもあり、初期降伏モーメントが安全側の基準にならない場合があることがわかった。
- 大型バルクキャリアーの最終強度の信頼性解析から、最終強度は直接計算による超過確率 10^{-8} のモーメントに対しても安全余裕があることがわかった。
- 現行の基準は多くの実績に基づいて定められたものであり、それによって設計された船の安全性は多くの実績の基に実証されているという事実は、現行の設計がその安全率の基に、上述の如く設計荷重を超える荷重に対しても安全性が確保されている、あるいは長期予測に用いる波浪頻度表が実際に遭遇する海象に比べて厳しすぎる、大波高時の実際の応答が非線形性や操船の影響等により直接計算ベースより小さい、こと等を示していると考えられることがわかった。

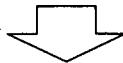
《課題》

- 荷重のレベルとそれに対応した構造強度評価法の整理
- 船体構造全体の最終強度評価法の開発
- 船体運動や荷重解析に関して、大波高時の非線形性や荒天避航等の実海域での条件を反映した解析法の開発が必要である。

4. 今後の活用

本SR研究を通じて、様々な課題はあるものの、次の見通しを得た；

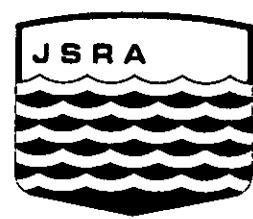
- 波浪中の船体構造応答が精度良く求めることができる
- 海象と設計条件を結びつけることができる



成果の活用；

- 本研究を通して明らかになった波浪中の船体応答を精度良く推定する手法と、波浪や船体応答モニタリングの技術とを結びつけることにより、実海域において、海象や運航の条件、船体の条件等が強度にどのように影響するかを容易に把握することができるようになり、船体の安全性向上を目指した運航支援に役立つ。
- 海象と設計条件が結びつくことにより、強度から見た限界状態を明かにすることができるようになり、また海象や運航の条件、船体の条件等が限界状態にどう影響するかを把握することができるようになり、設計のみならず運航や保守の観点からも船体構造の安全性向上に寄与することができる。
- 荷重や応力応答の精度が良くなることにより、疲労寿命評価も従来のマイナー則による疲労被害度評価に代わって、より理論的な亀裂伝播解析手法による評価が活かせる環境ができる。これにより、種々の部材や荷重、亀裂の形態に対して余寿命評価を精度良く容易に行うことができるようになり、運航や保守に有用な情報を提供し船体の安全性向上に役立てることができる。

我が国は世界一の造船国として、船舶の安全性向上に積極的に貢献することが期待されている。本研究の成果は、構造設計のみならず、運航や保守等の造船・海運の幅広い観点から船体の安全性向上に役立てることができる。また、このような技術とそれに裏打ちされた船を創出することにより、我が国造船・海運の一層の国際競争力強化に結びつけることができる。



The Shipbuilding Research Association of Japan