

SM-S14-16

(公社) 日本船舶海洋工学会
S-14 コンテナ船最終強度検討 FS 委員会

最終報告書

平成 28 年 7 月

委員構成

(2016年6月時点)

	氏名	勤務先・所属
委員	飯島 一博	大阪大学大学院工学研究科
委員	石橋 公也	一般財団法人 日本海事協会 船体開発部
委員	板野 昌也	(株)商船三井 海上安全部
委員	岡田 哲男	横浜国立大学大学院工学研究院
委員	川村 恭己	横浜国立大学大学院工学研究院
委員	柴沼 一樹	東京大学大学院工学系研究科
委員	鈴木 克幸	東京大学人工物工学研究センター
委員	鈴木 英之	東京大学大学院新領域創成科学研究科
委員	角 洋一	横浜国立大学名誉教授・放送大学客員教授
委員	孝岡 祐吉	川崎重工業(株) 船舶海洋カンパニー
委員	竹内 健	(株)商船三井 技術部
委員・会計	辰巳 晃	大阪大学大学院工学研究科
委員	堤 成一郎	大阪大学接合科学研究所
委員	寺田 伸	三菱重工業株式会社 交通・輸送ドメイン
委員	豊田 昌信	ジャパン マリンユナイテッド(株) 商船事業本部
委員	日野 圭	(株)商船三井 技術部 (途中、竹内委員に交代)
委員	深沢 塔一	大阪府立大学大学院工学研究科
委員	福岡 哲二	一般財団法人 日本船舶技術研究協会
委員長	藤久保 昌彦	大阪大学大学院工学研究科
委員	村瀬 知行	DNV GL AS 図面承認部
委員	山崎 伸也	川崎汽船株式会社 技術グループ
委員	山田 安平	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
委員	山本 輝明	ABS 横浜 船体技術部
委員	柳井 良哉	ロイド船級協会 横浜テクニカルサポートオフィス
委員	柳原 大輔	愛媛大学大学院理工学研究科
委員	吉川 孝男	九州大学大学院工学研究院
委員	米澤 拳志	日本郵船株式会社 技術グループ

目次

1.	背景と目的	1
2.	委員会開催経過	2
3.	問題認識	3
3.1	全般	3
3.2	主に運航関連	3
3.3	主に荷重関連	4
3.4	主に強度関連	4
4.	研究レビュー	6
4.1	荷重	6
4.1.1	環境条件	6
4.1.2	流力弾性応答・波浪荷重解析	6
4.1.3	実験解析	8
4.1.4	極値統計解析	9
4.1.5	塑性変形を考慮した流体構造連成（流力弾塑性）応答	9
4.2	最終強度	10
4.2.1	横強度影響を考慮した縦曲げ最終強度計算法	10
4.2.2	捩り影響を考慮した縦曲げ最終強度計算法	11
4.2.3	曲面防撓パネルの最終強度	12
4.2.4	波浪中における縦曲げ逐次崩壊プロセス	12
4.3	安全性評価	13
4.3.1	信頼性手法	13
4.3.2	荷重・強度の確率モデル	14
4.3.3	強度と操船方法の関係	14
4.3.4	ホイッピングが強度に及ぼす影響	14
4.3.5	船級協会規則への反映	16
4.4	実船計測・モニタリング	18
4.4.1	実船計測	18
4.4.2	海象の推定	19
4.4.3	DSS (Decision Support System)	20
5.	研究提言	22
5.1	海象・運航条件と荷重	22
5.2	縦曲げ逐次崩壊挙動と最終強度	23
5.3	荷重・強度の不確実性と安全性評価	26
5.4	モニタリングと収集データの安全対策への適用	27
5.5	提言のポイントのまとめ	31
6.	あとがき	32
	【参考文献】	33

1. 背景と目的

大型コンテナ船の座屈・折損事故を受けて、国土交通省ならびに関係機関による事故原因調査が実施され、安全対策に対する提言がなされた。事故の主要因として、ホイッピング荷重の影響、船底局部荷重が最終強度に及ぼす影響、およびこれら荷重および強度の不確実性の影響が挙げられている。しかし、いずれもさらに究明すべき点が多い。一方、コンテナ船は、近年ますます大型化が進み、20,000TEU クラスに達する状況である。これらの大型コンテナ船の構造安全性を適切に確保するためには、荷重・強度それぞれの推定技術の向上とこれに基づくより合理的な最終強度基準の確立、また就航後も、モニタリングによる収集データを、設計基準の合理化あるいは運航判断支援に活かすことが重要である。

コンテナ船の流力弾性応答、荷重、最終強度などの個別の課題については、国内外に研究例が存在する。しかしながら、これらを総合的に結びつけて縦曲げ崩壊に対する安全性を予測し、設計および運航に反映させる研究は十分に進んでいない。特にホイッピング応答や曲げ・振り連成応答は、海象条件だけでなく運航条件に依存するため、モニタリングの活用を含めて、設計者と運航者が一体となった安全性の検討が必須である。

以上の背景のもと、コンテナ船の縦曲げ最終強度に関して、現時点で解明されている部分とできていない部分を明らかにし、今後の研究展開のためのターゲットを設定することを目的として本委員会を設置した。委員には、大学、研究機関、造船、海運、船級協会から幅広く参加いただき、学術的立場から課題点を抽出し、研究戦略を練ることを主題とした。具体的には、大きく以下の4項目を取り上げた。

- (1) 海象・運航条件と荷重
- (2) 縦曲げ逐次崩壊挙動と最終強度
- (3) 荷重・強度の不確実性と安全性評価
- (4) モニタリングと収集データの安全対策への適用

各項目について、まずフリー・ディスカッションにより、大型コンテナ船の構造安全性に関する各委員の問題認識を整理した。つぎに文献調査を実施し、国内外の研究動向ならびに現状技術レベルを分析した。これらの結果を基に、今後探求すべき研究課題を提示した。また各研究課題の重要度および優先度のランク付けを行った。

近年、船舶・舶用機器のインターネット化 (IoT) やビッグデータを活用した安全性の高い船、省エネルギー船等への期待が高まっている。本提言は、わが国の有する荷重・強度解析技術のさらなる高度化と、モニタリングおよびビッグデータを活用した構造信頼性評価技術の構築により、設計、運用のそれぞれにおいて、縦曲げ最終強度から見た大型コンテナ船の安全性向上を図るものであり、より高信頼度の船体構造の実現に資するものと期待される。

平成 28 年 7 月 31 日

コンテナ船最終強度検討 FS 委員会

委員長 藤久保 昌彦

2. 委員会開催経過

第1回：平成27年8月18日（火）JMU本社、21名

- (1) 国交省委員会・NK検討会報告書の概要
- (2) コンテナ船強度に関する研究・技術情報交換
- (3) 委員会の検討項目に関するブレーン・ストーミング

第2回：平成27年10月19日（火）大阪大学医学・工学研究科東京ブランチ、22名

- (1) 必要と思う課題、知りたい課題
- (2) 荷重・強度・安全性評価グループの検討項目

第3回：平成28年1月13日（水）大阪大学医学・工学研究科東京ブランチ、20名

- (1) グループ検討報告と審議
- (2) 今後のまとめ方

第4回：平成28年3月30日（木）新大阪丸ビル別館、22名

- (1) グループ検討報告と審議（文献調査中間報告と考察）
- (2) 船長アンケート
- (3) 最終強度に関する研究紹介

第5回：平成28年5月30日（月）大阪大学医学・工学研究科東京ブランチ、22名

- (1) グループ検討報告と審議
- (2) 実船計測・モニタリングに関する審議
- (3) 提言内容について

第6回：平成28年7月13日（水）AP東京丸の内 22名

- (1) 提言内容について
- (2) 最終報告書について
- (3) 成果の活用について

3. 問題認識

第1回および第2回委員会では、大型コンテナ船の最終強度に関係する各委員の問題認識（検討・解明が必要と考える課題、知りたい課題）を意見交換した。その主な内容を以下に列記する。

3.1 全般

- ・ 構造・荷重の両方に大きな不確定性があり、現状では荷重に関する不確定性の方が大きいと認識される。荷重の不確定性には実運航状態も含まれる。
- ・ 崩壊に至った事故船について、確率的な整合とレポートされた崩壊挙動の点から、どのようなシナリオで崩壊したかについてこれまで明らかにされている調査（報告書）で十分に解明されたとはいえない。
- ・ 従来言われている不確定性のモデルを再度検証すること、一方でいまだ不明確な不確定性要因を特定すること、信頼性理論によってどの不確定性要因がどのように破損確率に寄与するかを検討することも価値ある。
- ・ 安全性を担保するストーリーとして、地震荷重のようにレベル I, II のように分類し、設計条件を超えた荷重が作用した場合の被害度評価から、最低でも人命は守られるという安全性レベルの設定も考え得る。
- ・ 構造安全性確保のために構造強度とオペレーションをつなぐ仕組み作りが必要である。

3.2 主に運航関連

- ・ オペレーションと荷重の関係が未解明。バラスト水や燃料を含めリアルタイムの荷重は、実際どうなっているかを知りたい。
- ・ オペレーションの実際を知ることは時間が掛かるため、先に評価・クライテリアを整理した上で、厳しい荷重・運航条件の設定と、それに対する構造の限界状態を考えるべきではないか。
- ・ いや、設計不確実性による強度の振れ幅よりも、操船不確実性による荷重の振れ幅の方が大きいはず。
- ・ 操船不確実性の検討だけでは、無理な操船を抑えるというだけの議論にならないか。
- ・ いずれにしても、操船影響をよりクリアにしようという方向は意義がある。
- ・ 運航する側は、積み付け計算機による BM/SF/ 復原性のチェックは行っているが、局部強度や二軸圧縮を考慮した構造安全性を確認するツールはなく、運航時に船の構造安全性まで配慮できる状況とはいえない。船長はロールに関する加速度や傾斜角に対して最も危険を感じるのが普通である。大きな船はこれが少ないので、むしろ安全であるという認識があり、構造設計者と運航者の間に認識のギャップがある可能性がある。
- ・ 大型化した場合でも、運航者にとっては従来通りの運航でも安全が確保できるような設計を目指すべきである。特殊な運航を要する船は運航者の立場から受容しにくい。無理な運航をすれば船は壊れ得るわけだが、船長の五感に頼るところもあり、実測データで認識されるべきである。

3.3 主に荷重関連

- ITTC で行われたベンチマークでは、剛体運動は精度良く推定されているが、弾性振動の計算結果はコード、ソフトによってかなり差が存在する。
- 計算には非線形ストリップ法、三次元パネル法ともに採用されている。ベンチマークでは正面向い波を想定するケースがほとんどであり、斜め波を考慮したケースはない。
- 大型船に関する現状の規則・基準（例えば S11、船体長 200m程度が当時の主なターゲットとして開発された経緯がある）から与えられる荷重レベルと、直接計算から得られる最大荷重レベルの間に差異があることが明確になりつつある。現状の規則・基準の背景にある海象条件や運航条件を明確化し、現状の船の船体構造の相対的な安全性レベルを把握する必要がある。
- その上で（遭遇海象、船速、波向きなどの）運航条件により荷重がどの程度変化しうるかを明確化する必要がある。
- 現状の IACS Wave Scatter Diagram (No.34)は観測船による観測（Global Wave Statistics）を基に確率分布が理論的に整合するようにして提案されたものであり、船が航行できるところのみの観測、という点では運航条件が含まれている。一方で波浪追算などの技術で、従来に比べて全球的で完全な波浪情報が得られつつある。しかしながら、船体の設計に用いる荷重設定には船体が現実的な確率で実際に遭遇する波浪を考慮することが大事である。
- 実運航を調査するための船体モニタリングの利用。計測技術も向上しており、例えば、光ファイバーで各倉のコンテナ重量を多点計測し、実静水縦曲げモーメントを計測しうる。
- 横強度荷重について、従来より二重底構造への上向き荷重が大きい one bay empty のコンディションを評価しておけば、就航後のコンディションを包含すると考えられてきており、2015年に策定された IACS URS34 では、満載喫水においてバラスタタンクを空にし、ホールド内のコンテナ重量が比較的軽い状態(軽貨物コンディション)を想定した FEMによる強度評価を行うことを要求することになっている。二重底構造に対して、バラスタ等の条件が同じであれば、これら one bay empty と軽貨物コンディションによる荷重に大差は無く、コンテナ重量が小さく喫水が深い場合には、設計荷重程度の応力が発生する可能性がある。

3.4 主に強度関連

- Smith の方法の妥当性はバルクキャリアやタンカーについては確認されているが、コンテナ船への適用性について十分確認したとは言い難い。コンテナ船に則した平均応力ー平均ひずみ関係を用いる必要があり、場合によってはコンテナ船では平面保持の仮定が満たされない可能性もある。
- 横強度的な荷重が加わり、かつ縦曲げが二重底に加わったときに、二重底は二軸圧縮状態となる。二軸圧縮状態の強度について、これまで十分な検討が行われているとは言い

難い。船底外板であればさらに水圧による横圧が加わる。

- 局所変形と縦曲げが重畳した場合、縦曲げ最終強度が低下する。従来あまり考慮されてこなかった横強度と縦強度の **interaction** を検討する必要がある。
- ホイッピング荷重下の最終強度と疲労強度への影響に関する知見を深める必要がある。

- 事故に関する Q&A :

Q : 船底の崩壊後、ホギングモーメントはどの程度緩和されるのか。

A : その辺りは未解明であり、課題のひとつ。

Q : 曲げ圧縮側座屈部から一気にき裂が発生するようなことはあるのか。

A : 座屈による曲げ変形部を起点に低サイクルでき裂が発生する可能性等考えられるが、このような破損の詳細プロセスの解明も今後の課題といえる。

4. 研究レビュー

大型コンテナ船の最終強度安全性評価に関わる文献調査を行い、荷重、最終強度、安全性評価、実船計測・モニタリングの4つの分野に分けて研究動向をまとめた。基本的に過去10年間（2006年以降）を対象として、次の文献を調査した。

- ・ 学術雑誌：JASNAOE 論文集, JMST, Marine Structures, Ship and Offshore Structures, Journal of Ship Research, Journal of OMAE, IJOPE
- ・ Conference Proceedings：OMAЕ, ISOPE, PRADS, Hydroelasticity,
- ・ 研究機関報告、船級協会技術報告、SR 報告書、JASNAOE 研究委員会報告書

また、モニタリングで必要とされる情報に関して、過去に行われた実海域運航の実態に関する船社へのアンケート結果を参照した。

4.1 荷重

4.1.1 環境条件

荷重の入力の前提になるのは波浪条件である。従来の IACS などの波浪頻度表は当時の船上計測によっており波浪モデルの精度向上の余地がある。より正しい波浪情報を入手する努力が必要である。文献[1]では人工衛星に搭載されたレーダー高度計による長期(25年)・広域のデータに基づいて、25年間の平均風速を比較して明確な増加傾向を報告している。一方、波浪についての明確な増加傾向は見られないとしている。文献[2]では有義波高の長期的変化をモデル化し、船体構造設計にどのような影響が生じるかを議論している。

欧州では Maxwave Project (Freak wave)が終了し、ついで Extreme Seas Project の研究が行われている[3]。フリーク波の理論的記述法、砕波の表現と非線形荷重計算への応用法の開発を行っている。非線形荷重計算への応用が進んでいない。また、文献[4]によれば ShortCresT の JIP で多方向波の海洋構造物設計への影響が検討されている。大抵の場合で、長波頂の仮定は安全側の値を与えるが、砕波衝撃を考慮する場合には多方向波の方が大きな荷重を与えることが示されている。

さらに文献[5]では 1) 波浪ブイ、2) 波浪レーダー、3) 船首部の瞬時波高の直接計測で、海象予測と実測値を比較している。文献[6]はウェザールーティングの効果と波浪遭遇確率の関係について言及した。大波高中では減速し、追い波を避ける傾向が明確に確認された。一方で、減速を行わず運航スピードを保つ確率も高いことを見出した。

4.1.2 流力弾性応答・波浪荷重解析

流力弾性の理論はすでに 1970 年代に Bishop[7]らによって確立されていると思われるが、より正しく考慮するために流体領域・構造領域での精度向上が続けられてきた。ストリップ法も依然として(古くからの NTNU や DTU、日本で)併用されているものの、この 10 年で韓国などの新勢力によって三次元理論の実際への適用が深化した。背景には ABS, BV や LR などのサポートがあるようである(WILS JIP プロジェクト)。文献[8]はその中で開発された現状の最先端のソフトウェアといえる。流体力は時間領域のランキンソース法で評

価を行い、構造については梁、三次元構造モード法、三次元構造直接法の 3 レベルで定式化されている。衝撃荷重評価は二次元の Wagner などのモデルによる。このような三次元（流体も構造も）法の開発にわが国はやや乗り遅れてしまった感がある。国内でも [9], [10] のようなランキンソース法によるツールが開発されているが、さらなる検証や機能追加が必要である。

国内の開発が遅れた背景には、ストリップ法と三次元法で縦曲げモーメントの評価結果に大差がないこと、ある特定の断面を選んだときの圧力評価結果にも差が現れにくいこと、理論的な研究はほぼ実施され尽くされていて大幅な向上は期待しにくいこと、が挙げられる。しかしながら、構造強度評価の際には同時性のある自己平衡した荷重分布が必要であり、そのためには三次元的な手法が必ず必要である。理論的な新しい向上がないという点で研究や論文にはなりにくい、これまでの各所の成果を統合化したソフトウェアの開発が必要と思われる。しかもそれはひとつのレベル（例えば三次元構造+Green 関数）だけではなくて複数レベルのソフトウェアが統合化されていることが望まれる。

このような開発は長期の時間を要する。韓国の WILS プロジェクトでは 10 年弱ほどを費やして、耐航性三次元コードを作り、これにより人材を育てた。WILS JIP は韓国の KRISO/KIOIST が事務局となった大型コンテナ船のための実験中心のプロジェクトであり、2006-2008（10,000TEU 級コンテナ船の縦曲げ弾性振動）、2008-2011（振り振動）、2011-2013（衝撃荷重分布）の第三期まで実施された。日本においても数年で成果を期待するのではなく、人材を育てることを含めて長期のプロジェクトを用意する意識が必要である。

三次元的方法の間には、大きく分けてランキンソース法とグリーン関数法があり、さらにこれらの中でも様々の流派がある。例えばランキンソース法では前進速度による散乱波の評価方法に違いがある（高速を仮定して展開？あるいは低速で展開？など）。グリーン関数法では単純な前進速度修正か、あるいは周波数領域のグリーン関数を時間領域に変換して、時々刻々と積分方程式をとく厳密解か、など。これらの優劣は文献[11], [12]で調査されている。大半の船級のソフトで採用しているグリーン関数法+前進速度修正はやや精度で劣り、ランキンソース法の方に精度上の分があるとしている。

一方で、ランキンソース法やグリーン関数法などのポテンシャル法ベースの理論では、いずれにしても非線形項に関する適用の限界があるので、青波・衝撃荷重、砕波を直接的に扱うことができない。そこで、衝撃的荷重を含む外力の評価のために CFD の利用も進められている。たとえば [13], [14] の文献がある。文献 [13] では Navier Stokes ソルバー（いわゆる RANS 法を用いた CFD; 商用 Star- CMM+）により大型コンテナ船の断面荷重を調査し、5m の波高程度まで線形 Rankine 法コード+弱非線形修正による結果とよく一致することを示した。

もうひとつの新しい方向性は、設計荷重を考える際の運航条件の考慮である。文献 [15], [16] などでは運航条件が弾性応答へ与える影響について検討が行われている。文献 [15] は、縦曲げモーメントは前進速度や出会角などの操船効果と、波高や波周期の自然環境条件の両

方に依存するために、最大の縦曲げモーメントが生じるのは必ずしも波高が最大の条件とは限らず（船速は低下する）、波高がやや低いが高速で運航する場合に最大が生じうることを示した。従来から日本では河邊や深沢らが2000年ごろから最悪短期海象（＝ピッチ運動、プロペラレーシングや加速度などの運航条件で決まる海象の最大）によって最大荷重を生じさせる設計海象が決められることを提案してきたが（例えば文献[17]）、文献[15]の考えとも一部一致するものである。河邊らは当時、弾性応答を含めていないので、簡単なコードを用いて、運航条件とホイッピングを含めたときの最大応答を生じさせる短期海象（＝新しい最悪短期海象）を絞り込むことをやってみるべきであると考えた。

4.1.3 実験解析

波浪荷重の性質は、数値シミュレーションだけでなく水槽実験により把握できる。近年の船体作用荷重の実験解析分野では NTNU[18]-[21]、韓国の WILS プロジェクトによる実験[22]を除くと、わが国の貢献も大きい [20], [23]-[25]といえる。弾性応答を含めた実験や振りを含めた実験をかなり初期の段階で実施している。しかしながら、規則波中の実験による分析が大半であったという反省点がある。これはなによりもわが国で行われる実験が計算手法の検証に主眼が置かれているからであると考えられる。一方で、文献[18]のように不規則波中の極値を実験で計測・推定するようなことをもっとやってもよいと思われる。極値の統計的な性質（極値は非線形効果によりレイリー分布から徐々に乖離してくる）を実験モデルで明らかにすることによってはじめて、非線形的な性質が見えてくること、数値シミュレーションツール中の非線形モデルの検証の素材にもなることからである。

大型コンテナ船では斜め波中でより大きな縦曲げ荷重が生じるという指摘が行われている。文献[26]では、船長 350m 程度の船体を対象とし、船の長さ＝波の長さのときに、縦曲げモーメントが最大値を取ると考えたとき、大型コンテナ船の長さが自然界に存在する波をすでに超えてしまうこと、斜め波中では波の角度を β としたとき波から見た船の長さは $\cos \beta$ 倍されて斜め波中で「船の長さ＝波の長さ」が達成される可能性が高い、とした。大きな縦曲げモーメントを避けるために、向い波を航行するべきという、操船ガイダンスにも繋がり得る。これは、これまでの、船体運動に伴う荷物の損傷をさけるために向い波を避けるべきという操船の常識と異なる。構造応答を意識した運航は現状で行われておらず、操船者への構造応答の可視化が期待される。

振りの Whipping/Springing の実験計測は 100% うまく計測できているわけではない。たとえば、文献[20]では、バックボーンモデルで振りに関する弾性振動の計測を行っているが、必ずしもせん断中心などがモデルに再現できていないので固有周期はあわせ込まれていても固有モードは一致していないことが指摘されている。固有モードが異なると振りモードに効くモード荷重も異なるので（モード荷重は、モード×荷重分布の内積で与えられる）、実験で得られた振動特性がそのまま実船で生じるわけでないことに留意が必要である。構造応答まで含めて相似にするためには、バックボーンでなく全弾性模型による必要があり、このときは振り剛性を含めた相似模型の開発が再度必要である。

4.1.4 極値統計解析

統計解析も古くからあるテーマである。近年も 複合荷重(典型的には静水荷重と波浪荷重、あるいは波浪荷重+弾性振動)の確率モデル開発が引き続いて行われている[27]-[30]。これら文献中で取り扱う問題の大半は、波浪荷重+弾性振動=全応答の統計的な性質である。実験での計測結果あるいは数値シミュレーションによる推定結果を対象としている。問題の定式化自体は、古くから「静水荷重+波浪荷重」の問題に対して開発されてきたが、同じような手法を、「波浪荷重+弾性振動」の極値予測に用いている、あるいは簡単な設計算式に用いる係数を求める点が新しい。短期海象中の応答極値を求めるための手法自体は概ね開発されていると考えられる。

今後さらに、このような短期予測を多数、重み付けして積分して得られる長期最大値を得ることが重要であろう。その際は重み付け(=発現確率)を知る必要があり、これは従来のように波浪発現確率だけでなく、操船や運航条件を考慮した上での発現確率を考慮する必要がある。

このとき別の視点として、静水縦曲げモーメントと波浪荷重の相関の考慮がある。文献[31]は静水縦曲げモーメントと動的運動の相関を調べている。静水荷重は積み付けによっており、積み付けによって喫水も異なることから、積み付けは波浪荷重に影響する。長期で見て静水縦曲げモーメントと波浪縦曲げモーメントは完全に無相関とはいえないので、この方向の検討も必要である。

もうひとつの方向性は、統計解析で得られるピーク値を簡便に得るための、設計海象の絞込み(NKガイドライン参照)や設計不規則波浪の導出である。後者については将来的にCFDを荷重評価に用いる場合に、不規則波中のどの瞬間を解析対象として切り取るか?が重要となる。たとえば文献[32]-[34]で構造信頼性理論FORMを用いた手法が検討されており、非線形性を含めた任意の確率レベルの荷重を生じさせる波浪時刻歴を推定できる。適当な確率レベルに応じたいわば設計波時系列が求められる。Drummen[35]は水槽実験と数値計算によって、MLRW(Most Likely Response Wave)やMLER(Most Likely Extreme Response)などに代表される、いわゆるConditioned Waveの手法(不規則波列の中から最も極値応答に効く波列を効果的に取り出す)を長期予測に適用している。

最も初期の長期予測自体は、日本の福田[36]らが開発した方法である。波浪荷重解析の項目で紹介した、河邊や深沢らが提案したような最悪短期海象も、ごく初期のアイデアはわが国から出てきたが、残念ながら研究の継続性が弱く、ここ15年ほどの間に世界に主導権を握られてしまった(NKのガイドライン開発に使われたが、そこで止まった)。近年わが国では荷重の確率モデル検討が弱体化している。この方面の研究の再興が望まれる。

4.1.5 塑性変形を考慮した流体構造連成(流力弾塑性)応答

弾性領域にとどまらず塑性変形を含めた船体構造の流体構造連成を扱うこの分野はわが国が世界に先駆けていると思われる。阪大、藤久保らのグループ[37]や東大、鈴木(克)ら

のグループ[38]では、いわゆる一発大波の下の崩壊事象について解明が進んでいる。ついで、連続する極限荷重が作用する場合の逐次崩壊事象について解明が進められている。より実地的なモデルを用いた（局部荷重+Hull Girder、一度崩壊が進んだ後の連続する崩壊）現象の解明が待たれる。そのためには構造モデル、流体モデルともに改良が必要である。流体荷重モデル側の課題を挙げれば、前述の研究[37], [38]では非線形ストリップ法を用いており、局部荷重を評価するには各瞬間の荷重分布を正しく評価するうえでの限界がある。たとえば、三次元ポテンシャル理論の利用、CFD の利用が考えられる。これらの研究課題は、4.2.4 においても述べられる。

4.2 最終強度

4.2.1 横強度影響を考慮した縦曲げ最終強度計算法

コンテナ船は、船底水圧とコンテナ重量の差分の突き上げ荷重を船底部に受けるため、横隔壁間の二重底に局部的な曲げ変形が生じ、船底外板に二軸圧縮が発生する。これにホギングによる縦圧縮荷重が重畳するため、ホギング最終強度の評価では、船底局部荷重の影響を考慮する必要がある。

同様の問題は、隔艙積み (Alternate Hold Loading; AHL) 状態のばら積み貨物船の空艙部でも生じる。Amlashi and Moan は、1/2+1+1/2 ホールドモデルを用いて大規模な非線形 FEM 解析 (ABAQUS による陰解法解析) を実施し、この問題を詳細に調べた。船底外板が座屈後、内底板への荷重再配分が生じ、これにより“double-maxima”型の曲げモーメント-曲率関係となることを明らかにしている[1]。また船底水圧とホギングモーメントの関数として、ホギング最終強度相関関係を提案している[2]。Kippenes らは CSR 準拠船を対象として最終強度解析を行い、約 15%程度の低下率を得ている。また“double-maxima”型の曲げモーメント-曲率関係の内、始めのピークが初期たわみの影響を大きく受けることを示している[3]。Zhu and Moan は、CSR 準拠船を対象として最終強度解析を行い、最終強度相関関係式を次式の形で与えている[4]。

$$\frac{M}{M_u} + \eta \frac{P}{P_u} = 1 \quad (4.2.1.1)$$

ここで、 M と P は、それぞれホギングモーメントと船底水圧、 M_u はホギング縦曲げ最終強度、 P_u は船底の局部曲げ崩壊強度、そして η は局部荷重の影響を表す係数である。さらに Zhu and Moan は、式(1)に基づく構造信頼性解析を行い、破損確率に対する支配因子について論じている[5]。

以上のばら積み貨物船のホギング最終強度に関する研究に比べて、コンテナ船のホギング最終強度に関して公表された国外文献は少ない。一方、国内では MOL-Comfort 号の事故原因調査に関係して、船底局部荷重の影響を考慮した 1/2+1+1/2 ホールドモデルの非線形 FEM 解析 (LS-DYNA による陽解法解析) が行われ、船底外板の二軸圧縮がホギング最終強度に有意な影響を与えることが示された[6]。この知見に基づいて、竹村らは、二軸圧縮を考慮した船底外板の圧縮最終強度に基づくホギング最終強度の簡易推定式を提案して

いる[7]。松井らは、二重底構造の構造配置・寸法や Partial Bulkhead 構造のばねとしてのはたらきをもたらす諸寸法をはじめとする船体の主要な断面寸法から、ローカル荷重作用下の二重底応力分布を求める簡易算式を開発した[8]。辰巳らは、二重底を平面格子梁要素、二重底以外の船側部をひとつの梁要素で表し、それぞれを横隔壁面とビルジ部で結合したモデルを用い、局部荷重の影響を考慮した縦曲げ最終強度解析のための簡便な逐次崩壊解析法を提案している。Partial Bulkhead 構造は、松井ら[8]により導かれた等価ばねに置きかえる。このようなモデルによる簡略逐次崩壊解析により、局部荷重によって縦曲げ最終強度の低下が起こる主な要因として、二重底の横置き隔壁間の変形（局部曲率の増加）による船底外板の圧縮応力の増大と、船底外板崩壊後における内底板の有効強度低下を挙げている[9]。また、1/2+1+1/2 ホールドモデルの非線形 FEM 解析 (Marc による陰解法解析) から得られた船底防撓パネルの荷重履歴より、局部荷重により船底外板は二軸圧縮を受けるが、周辺構造からの変位拘束ならびに鉛直上向きに凸となる二重底の局部曲げ変形（防撓材が曲げの引張側）が存在するため、防撓パネル単体の解析に比べて、縦圧縮最終強度の低下は小さいことを明らかにしている[10]。成瀬らは、2 軸圧縮下の防撓パネルの崩壊挙動を弾塑性 FEM により観察し、横方向応力によって板の有効幅低下が増長することを表すパラメータとロンジ横倒れの増長を表すパラメータを CSR 算式に導入し、有効性を検証している[11]。

このように、局部荷重を考慮したコンテナ船のホギング崩壊挙動の分析および最終強度の実用計算法の研究では、わが国が先行している。弾塑性解析や実験結果とのキャリブレーションを進めて精度を検証し、使いやすいシステムにしていくことが必要である。また最終強度上有利な、より合理的な構造方式の研究開発につなげていくことも重要である。

4.2.2 振り影響を考慮した縦曲げ最終強度計算法

コンテナ船は、甲板に大きな開口を有するため、閉断面を有する他の船種と比較して振り剛性が小さく、縦曲げ最終強度に及ぼす振りの影響を考慮する必要がある。13,000TEU クラスの超大型船では、波長・船長適合の関係から、正面波中よりも斜波中の方が縦曲げモーメント応答が大きくなるとの結果もあり、曲げと振れの連成の考慮は、より本質的に重要になると考えられる[12]。

振りモーメントが縦曲げ最終強度に及ぼす影響については、Paik らが 4,300TEU コンテナ船を対象に理想化構造要素法 ISUM (Idealized Structural Unit Method)により、垂直曲げと振りの組み合わせ荷重下の最終強度を解析し、最終強度相関関係を提案している[13]。Alfred Mohammed らは、10,000TEU コンテナ船について FEM 解析を行い、最終強度相関関係を導いている。また、曲げモーメントが主たる荷重効果であるとの仮定のもとに、曲げと振りを受ける船体断面の信頼性評価を行っている[14]。

振りを受けるコンテナ船には、剪断応力とともに反り応力（縦方向応力）が発生する。反り応力は、船の長さ方向の振りモーメント分布と剛性分布に依存するため、その影響を評価するためには、原理的に船体全体を解析する必要がある。また、振り変形は、水平曲

げ変形と連成するため、垂直・水平曲げと振りの連成を考慮した荷重および最終強度評価が必要である。この問題に対処するため、田中らは、船体を振りと反り応力を考慮した薄肉梁要素で変断面梁としてモデル化し、スミス法の考え方を適用して、縦曲げ最終強度を簡便かつ合理的に計算する手法を提案している[15,16]。規則で設定される振りモーメントを負荷したあとに曲げ崩壊挙動を解析し、LS-DYNAによる計算結果と良好に一致する結果を得ている。しかしながら、本手法も、さらに多様な荷重および構造ケースについて適用性を検証する必要がある。

なお、振りモーメントに加えて、縦剪断力が曲げ最終強度に及ぼす影響について検討した例が報告されている[17]。縦剪断力は、横隔壁の基部において二重底に局所的な曲げを引き起こすため、縦曲げ最終強度への影響は存在すると考えられるが、この影響度については、組み合わせ荷重の分布や発生の同時性を考慮した、さらなる究明が必要である。

4.2.3 曲面防撓パネルの最終強度

コンテナ船はビルジ部をはじめとして曲面部が多いため、縦強度評価において、曲面防撓パネルの座屈・最終強度評価は、重要な要素となる。ホギング最終強度に関しては、特にビルジ部の防撓曲面パネルの圧縮強度が重要である。従来、曲面パネルの座屈強度は、平板強度に曲率効果を加味して評価されている。Parkらは、矩形曲面板および矩形曲面防撓パネルを対象として、FEM解析を系統的に実施し、初期不整や2次座屈の影響を含めて、最終強度の特性を論じている[18]。また、簡便な最終強度推定式を提案している[19]。これらの成果は、コンテナ船の縦曲げ最終強度推定に活用できると考えられる。

なお、ホギング崩壊の場合は、フラットな船底からビルジ部に逐次座屈が拡大するため、このような逐次崩壊において曲率効果がどれだけ機能するかについては、船底部とビルジ部を一体とした最終強度解析を行って、耐荷力を確認する必要があると考えられる。

4.2.4 波浪中における縦曲げ逐次崩壊プロセス

国土交通省報告書[6]に記載されているように、コンテナ船の縦曲げ崩壊では、ホイッピング荷重の影響を考慮することが重要である。ホイッピングはスラミング衝撃に起因するため、長周期波による曲げ荷重と比べて、入力エネルギーが有限であり、作用時間が短い（2節振動固有周期程度）ことが考えられる。他方、航行状態次第では、高頻度で繰り返し作用する状況が考えられる。MOL-Comfortの事故調査では、姉妹船で観察された船底パネルの残存座屈変形の原因として、「荷重は縦曲げ最終強度に達しないが、繰り返し作用下で座屈変形が累積した」という考え方と、「荷重は縦曲げ最終強度を超えたが、ホイッピングの入力エネルギーの有限性により部分破損でとどまった」とする考え方が示されている。本委員会は、事故原因の検討を目的とするものではないが、コンテナ船一般の波浪中縦曲げ崩壊挙動を明らかにする上で、この問題は注目せねばならない。

ホイッピングによる入力エネルギーの問題や、繰り返し荷重下の座屈変形累積の問題を取り扱うためには、「運動応答と構造崩壊を一体化した全体挙動解析」ならびに「材料の繰

り返し硬化/軟化特性を含む、部材レベルの座屈変形累積挙動の解明」という、マクロ・ミクロ両面の研究が必要である。前者については、既存の研究のほぼすべてが、構造崩壊を準静的挙動と見なし、運動および流力弾性応答と切り離して取り扱っている。これに対し、飯島らは、船体を中央で二つの剛体に分離し、中央断面に縦曲げ崩壊時の曲げモーメント-曲率関係を表す非線形回転バネを挿入して、波浪中応答を解くことにより、運動・構造崩壊一体化解析を行っている[20]。このような解析を流力弾塑性解析 (hydro-elastoplastic analysis) と名付けている。その結果、同じ曲げモーメントピーク値でも、ホイッピングのように作用時間の短い場合ほど、崩壊変形量は小さいことを明らかにしている。後者の座屈変形累積については、堤らが小型試験片を対象に実験と計算の両面で研究を行っている[21]。これらの研究は、いずれも緒についたばかりであり、今後より実船に近い構造および荷重条件について研究が待たれる。

以上のような崩壊プロセスの予測は、従来対象とされている縦曲げ最終強度 (最大耐力) の推定を超えて、どのような破損変形がどの程度生じるか、すなわち Consequences の予測を可能にする。これにより、例えば、ばら積み貨物船の崩壊と、ホイッピング影響の大きいコンテナ船のホギング崩壊で、崩壊によるリスクにどのような差があり、したがって安全余裕にどのような差異を付けるべきかなど、リスクベースの基準開発につながるものが期待される。

4.3 安全性評価

4.3.1 信頼性手法

Moan らは船の最終強度確認に関し、荷重の定義、荷重モデルの不確実性、人的要因、荒天回避などの操船影響について言及し、各種の船種の事例を検討し構造信頼性・安全性について論じた[2]。また、局部荷重を考慮した縦曲げ最終強度の信頼性解析として、ホギングモーメントと船底平均水圧を荷重効果とする破損確率を設定し、荷重・強度の多数の不確実因子を考慮して一次信頼性解析 (FORM) を実施、船底板厚をパラメータとして、破損確率とパラメータ感度について考察した[4.1 節 27]。Fujii ら[4]は、異なる設計クライテリアによって設計されたパナマックスばら積み貨物船の縦曲げ最終強度に関する信頼性解析を行い、信頼性指標の比較を行った。原田ら[5]は、荷重、強度に関わる様々な事象を確率モデルで表し、バルカー、タンカー、コンテナ船に対して、縦曲げ最終強度に関する信頼性解析を実施した。Harada ら[10, 11]は、荷重と耐力双方についての確率モデルを構築し、縦曲げ最終強度について SRA (Structural Reliability Analysis) を行った。タンカー、ばら積み貨物船、コンテナ船を対象とした。大型コンテナ船では満載・Hogging 状態の影響が最も大きかった。縦曲げ最終強度に関わる目標破損確率について論じた。Seng ら[16]は、スラミングを伴う強非線形構造応答に関する信頼性破損関数を MCFM (Model Correction Factor Method) により同定する手順を提案した。Ivanov ら[17]は、最終強度をひとつの損傷モードとして扱い、作用曲げモーメントの限界値に対する超過確率としてハルガーダの信頼性を計算した。

全体として大型コンテナ船を対象とする研究がまだ少なく、同様の研究をコンテナ船に対して早期に行うことが必要である。

4.3.2 荷重・強度の確率モデル

信頼性手法が正しく実施されるためには、荷重・強度それぞれの確率分布が正確にモデル化される必要がある。動的荷重や構造耐力に関わる確率モデルについてはある程度の知見が積み重ねられているが、静水縦曲げモーメントや、縦曲げ最終強度に影響を及ぼす二重底局部への静的荷重に関する確率モデルについては、いまだ不明な点が多く残っている。そのような中、Friis-Hansen ら[1]の研究は、コンテナ個々の重量のばらつきに基づいて与えられた喫水・トリム条件のもと、静水縦曲げモーメントの確率分布を検討した先駆的なものとして注目される。Ivanov ら[6]は、静水曲げモーメントの確率的な表現方法に関して研究を行い、Loading マニュアルより収集した静水曲げモーメントとせん断力のデータの提示、様々な荷重ケースの確率的な解析、静水荷重の表現法の将来的な展望、について議論した。ことに静水縦曲げモーメントの最大値と波浪縦曲げモーメントの最大値を足し合わせた荷重に対して設計する従来の方法に対して、それぞれの確率分布からトータル荷重の確率分布を明確化することが重要であり、海象予測技術の進歩に伴い、航海ごとに最適な計画が可能となり得るとの指摘は注目に値する。Ivanov らはさらに、確率的な項（静水曲げモーメント、波浪曲げモーメント、断面係数等）を考慮した縦曲げ応力の計算法を提案した[7]。その際サギング・ホギングの曲げモーメントを1つの bi-modal な確率分布で表現することにより、確率的な取扱いが容易となった。また、リスク評価に基づく点検計画への利用に向けて、確率論的手法によりハルガータの曲げ許容値を評価する手順を提案した[8]。

コンテナ重量の申告重量に対するばらつきや積み付け方のばらつきなども踏まえた、多数の実船でのデータに基づく更なる研究が望まれる。

4.3.3 強度と操船方法の関係

Oka ら[12]は、大型コンテナ船の船体弾性振動応答が疲労強度に及ぼす影響について、操船によるファクターを、水槽試験および実船計測結果を用いて定量的に評価した。

他の論文でも操船影響に言及したものはいくつか見られるが、現状では理論計算に基づく考察にとどまっているものが多い。今後、数多くの実船モニタリングデータを得て、実海象で実際に行われている操船方法の調査、操船方法に関する確率モデルの把握が必要であると同時に、設計強度と適切な操船方法との関連、操船判断基準の明確化、何らかの荒天回避手段を採った時の船体各部に作用する荷重・応力に対する効果を即座に計算し、船上での判断に資するシステムの開発、船上で表示すべき情報の有用性検討など、多くの研究課題が残されている。

4.3.4 ホイッピングが強度に及ぼす影響

コンテナ船の大型化に伴ってホイッピング応答が船体の最終強度・疲労強度に及ぼす影響が従来より大きくなっている懸念があり、これまでも様々な角度から、その定量的評価のための研究がなされてきている。

4.3.4.1 最終強度

大型コンテナ船の模型試験に基づく船体最終強度へのホイッピング影響の検討も数多く行われている。Storhaug ら[13]は、最大波浪曲げモーメントはホイッピング影響により IACS 規則荷重の 1.8 倍に及ぶことがあることを示した。Corak ら[21]は、9,400TEU コンテナ船のモデル試験のデータとの比較により、ホイッピングを考慮した波浪縦曲げモーメント推定の実用的方法を開発し、2 隻の大型コンテナ船の例を用いその手法について論じた。

数値シミュレーションに基づくホイッピング影響の推定も多くの研究がなされているが、現時点では実用的で信頼のおける汎用的な手法が確立されているとは言えず、研究段階である。Jensen ら[9]は、長さ、幅、喫水、ブロック係数、船首フレア係数、船速、船体剛性などのパラメータを用いた、シンプルであるが合理的なホイッピング応答も含む最大波浪縦曲げモーメントの推定手法を提案した。White ら[14]、Lee ら[15]は、等価設計海象を設定し、線形船体運動解析、バウフレアなどの船型影響を加味した非線形船体運動解析、チモシェンコ梁による弾性応答計算を加えた動的応答解析により、ホイッピング加味しない線形計算結果に対して、ホイッピングを加味した場合に縦曲げモーメントが、サギングで 1.98 倍、ホギングで 1.42 倍になるとした。またスミス法による縦曲げ最終強度の解析を行い、題材として取り上げたコンテナ船では、上記ホイッピング影響を考慮してもちょうど強度を満足していることを示した。Chatzitoliou ら[18]も、ホイッピングによる最大縦曲げモーメントへの影響、Springing による疲労強度への影響について検討した。

以上述べたように、ホイッピング応答の定量的評価に関する研究は緒に就いたばかりである。今後、計算手法の精度、計算速度などの実用性を向上し、より数多くの対象船について検討し、模型試験や実船計測結果と比較検証を行うことが重要である。

4.3.4.2 疲労強度

Storhaug ら[3]は、模型試験に基づいて、疲労強度に影響する海象条件や操船パラメータを同定し、船体弾性振動応答が疲労強度に及ぼす影響を定量化する手法について検討した。また、向かい波の場合、総疲労被害度の内の船体振動応答による成分が 65%に及ぶことがあることを示した[13]。

このほか、実船計測、模型試験や数値シミュレーションにより、船体弾性振動応答による疲労被害度の増加率を算出した数多くの文献があるが、算出の前提条件や方法が様々であり、結果として影響度合いも大きくばらばらしている。一方、強度の側面からの検討も重要である。従来の Rainflow 法カウントで弾性振動応答の重畳を正しく評価できるのか、実海域での特有の応力履歴によるき裂進展の遅延効果により、ホイッピング影響が変化する場合などについても、数多くの研究が実施されている。中でも、大沢ら[24]は特別に開発

した板曲げ振動疲労試験機により様々なパターンの高周波重畳による疲労強度影響を調査し、定常的に高周波成分が重畳する場合は、いわゆる **Enlargement** 法によって疲労強度を近似的に推測できるが、高周波成分が間欠的に重畳する場合は、**Enlargement** 法による推定よりも疲労強度が向上する可能性を示しており、注目される。

4.3.5 船級協会規則への反映

従来、コンテナ船の最終強度は、荷重として静水縦曲げモーメントと IACS 規則に基づく波浪縦曲げモーメントを考慮し、船体の断面係数を適切な安全率を持って設定することで、ホイッピングや局部荷重影響などの明示的には考慮していない要因に対しても安全性を保ってきた。一方、近年の大型コンテナ船の大型化に伴い、未考慮の要因による影響が大きくなっていることへの懸念に基づく諸々の研究成果や、事故に基づく安全性検討の結果を踏まえ、ホイッピング影響や局部荷重影響を直接考慮することが求められるようになってきた。

2015 年に制定された IACS UR S11A[23]では、二重底局部曲げの影響を考慮するための係数 γ_{DB} (S11A.5.4)、ポストパナマックスコンテナ船に対してはホイッピング影響を加味すべきこと(S11A.6.3)が織り込まれた。各船級協会ではそれらの具体的な規定に取り組んでいる。

4.3.5.1 ホイッピングによる影響

ホイッピングによる影響についての各船級協会規則の状況、取り組みを表 4.1 に示す。

表 4.1 ホイッピング影響に関する各船級協会の取り組み

ABS	<p>船長 130m 以上のコンテナ船について、</p> $\gamma_S M_s + \gamma_W M_{wu} \leq M_U / \gamma_M \gamma_{DB}$ <p>M_{wu} は、公称デッキ半幅 d_k、船長 L をパラメータとする次の簡易規則算式により得られるホイッピングを含む波浪縦曲げモーメントである。部分安全係数 γ_W の値は 1.2。 M_s は静水縦曲げモーメント。</p> $M_{wu} = k_u M_w, \quad k_u = 5.52 d_k / L + 0.873$ <p>また船長 350m を超える大型コンテナ船については、別途 Guidance Notes [19]による解析を義務化。</p> $\gamma_S M_{sw} + \gamma_W M_w \leq M_U / \gamma_R$ <p>ただし、M_w は解析より得られたホイッピングを含む波浪縦曲げモーメントである。部分安全係数 γ_W の値は、ホイッピングを含まない波浪縦曲げモーメントを M_{w0} として、$\max(1.05, 1.20 M_{w0} / M_w)$。 M_{sw} は静水縦曲げモーメント。</p>
DNV-GL	<p>船幅が 32.26m を超える大型コンテナ船について、</p> $\gamma_S M_{sw} + M_{wv} [\gamma_W + (\gamma_{WH} - \gamma_W) \gamma_{dU}] \leq M_U / (\gamma_M \gamma_{DB})$

	<p>γ_{u}は動的崩壊影響によるホイッピングの影響低下に関する係数で、通常0.9。ホイッピング影響に対する部分安全係数γ_{WH}に対して、バウフレア角度α、船速V、船長Lをパラメータとする次の簡易規則算式が与えられている。</p> $\gamma_{WH} = 1 + C_L \left[3.8 \cdot 10^{-7} (L + 1100) (V + 4.1)^2 (\tan(\alpha\pi/180) - 0.19) \right] \geq 1.3$
LR	<p>幾つかの指標に該当するコンテナ船(例えば船長 350m より大)は、Guidance Notes [20]の方法により、個船ごとに船体運動・弾性応答計算に基づくホイッピング解析、縦曲げ最終強度の確認を義務付け。</p> $M_s + \gamma_w VBM_{NL} \leq M_U / \gamma_R$ <p>ただし、VBM_{NL}はホイッピングを含む波浪縦曲げモーメントである。部分安全係数γ_wの値は1.2。</p>
NK	<p>長さ 300m 以上もしくは幅が 32.26m を超える大型コンテナ船について、ホイッピングを考慮し、HOG の波浪縦曲げモーメントに対する部分安全係数$\gamma_{wh} = 1.5$を導入した。</p>

White ら[14], Lee ら[15]は、4.3.4 節で触れたように、線形長期予測により、超過確率 $Q=10^{-8}$ の値に最も寄与率が高い短期海象を設計海象とし、その海象中での線形計算による波浪中縦曲げモーメントとホイッピングを考慮した非線形計算による波浪縦曲げモーメントを計算し、それらの3時間最大値の比をホイッピングファクターとした。例として取り上げられた13,000TEUコンテナ船での計算では、ホイッピングファクターとして1.42が得られている。またこの手法を織り込んだ縦曲げ最終強度の評価法を、LRがGuidance Notesとして発行している[20]。

河邊ら[25]は、非線形ストリップ法を用いて同様の計算を行い、 $L=280\sim 350m$ の7隻のコンテナ船についてのホイッピングファクターを求めたところ、平均1.35、標準偏差0.10となった。これらの結果から、NKは規則にホイッピングファクター1.5を導入した。

Oberhagemann ら[22]は、RANSモデルソルバーとチモシェンコ梁を組み合わせた流力弾性解析手法を適用し、18,000TEUコンテナ船を対象にホイッピング影響について考察している。船速影響をより合理的に考慮するため、各海象での自然減速のみ考慮した最大船速を用いて計算を行い、線形計算と比べて、より波高が小さく波周期の短い領域が長期予測値への寄与が大きくなることを示した。この研究の成果等を踏まえてDNV-GL規則が制定されているが、Hull monitoring systemを搭載しHMON notationを取得している場合は規則のホイッピング影響を30%減じてよいと規定されている。

なお、Oberhagemann ら[22]の研究では船速影響があるとされ、それがDNV-GL規則に反映されている。一方、河邊ら[25]の研究では、船速5kt, 10kt, 15ktについて、剛体モードのみを考慮した数値シミュレーションから得られる波浪縦曲げモーメントが、UR S11Aに規定される波浪最大縦曲げモーメントと一致する有義波高を求め、これらの有義波高の短期海象において、ホイッピングを考慮できる数値シミュレーションを行った。その結果として、船速に関わらず一定のホイッピングファクター1.5を導いている。

4.3.5.2 二重底への面外荷重の影響

二重底への面外荷重の影響についての各船級協会規則の状況、取り組みを、表 4.2 に示す。

表 4.2 二重底への面外荷重影響に関する各船級協会の取り組み

ABS	IACS UR-S11A に従い、面外荷重影響部分安全係数 $\gamma_{DB} = 1.15$ 。
DNV-GL	IACS UR-S11A に従い、面外荷重影響部分安全係数 $\gamma_{DB} = 1.15$ 、ホイッピングに対する部分安全係数を用いた算式中では $\gamma_{DB} = 1.1$ 。
LR	IACS UR-S11A に従い、面外荷重影響部分安全係数 $\gamma_{DB} = 1.15$ 。ホイッピングを含む波浪縦曲げモーメントを用いた算式中では $\gamma_R (= \gamma_M \gamma_{DB}) = 1.1$ 。
NK	IACS の規定に加え、長さ 300m 以上もしくは幅が 32.26m を超える大型コンテナ船については、以下の要求を追加。3 ホールドモデルの弾塑性大撓み解析のシリーズ計算より、面外荷重影響を考慮した縦曲げ最終強度を求める簡易計算法を開発し、これを規則化した。

各船級協会は IACS UR-S11A の規定による面外荷重影響部分安全係数を規則に織り込んでいる。竹村ら[4.1 節 7]は、大阪大学で開発された二軸圧縮状態を考慮した防撓パネルの最終強度評価式を用いて、面外荷重影響を考慮した船底外板の平均最終強度を求め、これに船底側の断面係数と修正係数を乗じることで、対象とした船長 280m~350m のコンテナ船に対して、比較的高い精度で縦曲げ最終強度を推定できることを示した。また、NK は、本手法に基づいた強度要件を規則に盛り込んだ。

4.3.5.3 まとめ

船級協会規則として織り込んでいくためには、精度がよく、過去の安全な就航実績を踏まえて過大な要求にならず、なおかつ簡便で使いやすい計算手法とすることが重要であり、さらなる研究が待たれる。なお、IACS ではホイッピングに関する調査、機能的要件の策定を目的としたプロジェクトチームの立ち上げが検討されている。

4.4 実船計測・モニタリング

4.4.1 実船計測

この 10 年間多数の大型船に関して実船計測が行われている[4, 5, 7, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]。海外で実施している主なものとして Storhaug らの調査結果[5, 11, 12, 15]、DTU (Jensen や Nielsen) [9, 19]、韓国のグループによるもの[14, 21]が挙げられる。国内からも数例がある[4, 7]。その結果としての疲労被害度の計算、Whipping を含む最大縦曲げモーメントの評価などが行われている。

ポストパナマックスコンテナ船に対する初期の研究としては Okada ら[4]の計測結果がある。ここでは 6690TEU コンテナ船の縦曲げ応力、横隔壁および甲板部変形について 3 年間の実船計測を実施、長期予測値は実測と比較的よい相関を示すものの、クロスデッキ

の前後変形は、設計値は実測値に比べて過度に安全側であることと等を示した。豊田ら[7]は引き続き 6400TEU コンテナ船に関して同様の計測を実施している。Storhaug ら[5]は、北大西洋を航走する 294m 長さのコンテナ船の実船計測により、船体振動応答が疲労強度・船体縦曲げ強度に影響を及ぼすとの結論を出した。Heggelund ら[12]は、LNG 船の実船計測結果に基づいて、疲労強度に及ぼす船体弾性振動応答の影響を論じた。縦曲げに関する総被害度のうち、振動影響が 30~50%に及んだとした。Koo ら[14]は、SHI/ABS/OOCL 共同による 8000TEU コンテナ船の実船計測の結果を示し、総疲労被害における弾性振動応答成分の割合は 30%であったとした。Heggelund ら[15]は、アジア・ヨーロッパ航路の 8600TEU コンテナ船において生じる、ホイッピング影響を含む荷重の計測システムとその計測結果について報告した。疲労強度に対する、船体振動の影響や、船速や海象の違いによる影響等を論じるとともに、振りや水平曲げ振動の観測等にも言及している。Rathje ら[17, 18]は、4600TEU 及び 14000TEU の 2 隻のコンテナ船の実船計測結果に基づいて、ホイッピングによる高周波成分が長期的に疲労強度に及ぼす影響を同定する半経験的手法を提案した。計測結果から、弾性振動応答による疲労被害度の増加割合を 2.36 と導いた。一方、これをそのまま適用すると疲労寿命が 13~16 年になる船が、世界航路を 20 年以上健全に運航していることにも触れ、高周波成分影響についての更なる研究が必要であると述べた。

このように、これまでの実船計測プロジェクトは、1 隻~2 隻を対象に、船型大型化による構造強度への影響を確認し、設計や規則に活かしていくことを主たる目的としており、これらの結果、大型化に伴う縦曲げ・振り・横置き隔壁前後変形などの変形量増大や、船体縦曲げ、振り、船体運動、局部荷重などの相関関係が定量的に把握され、またホイッピング応答成分の大きさも様々なケースで明らかとなり、多くの知見が得られた。一方、計測隻数や計測点の制約のため、海象条件、動的および静的荷重の統計的性質、操船判断の状況把握までは至っていない。構造応答に関してはひずみの計測がせいぜいであり、この場合、ローカルな情報しかない。光ファイバーを用いるとやや広い範囲のローカルな影響を一部除去したひずみが多点で得られるメリットがあるが、長期で利用する際には幾分のキャリブレーションが必要である。一方で、船の変形を計測している例として文献[4, 7]があるが、これらは少数派である。船の変形計測を行うことで、変形のモードをはっきりと把握できるので、GPS あるいは光学的計測によって船の変形全体を測るようなことを行ってもよいのではないか？GPS による計測は土木・建築分野で地盤計測のために用いられてきた実績があるが、近年建築構造物の変形計測の応用例がみられる。ディファレンシャル GPS により、2Hz 以下、1~2cm 程度の変位が計測可能とされており[6]、船上に基準点を置くことでホイッピング応答計測に応用することも可能と思われる。

今後さらに系統的かつ大掛かりなモニタリングによるビッグデータの取得と、それを活用した運航・メンテナンス・設計の合理化・高精度化を目指した研究が期待される。

4.4.2 海象の推定

船上での操船判断、設計時に想定された設計条件と実際に作用する荷重との比較検証による設計精度向上、モニタリング対象としてセンサーを設置した箇所以外の応力履歴の把握など、様々な目的のために、個別の船舶が遭遇している海象の把握は重要である。海象把握手段としては、目視、波浪観測レーダー、気象協会や気象予報機関からの予報値、追算値などがあるが、いずれも一長一短あり、船舶が遭遇しているまさにその海象を精度良く記録する技術は十分には確立されていない。

そのような中、船体運動などの船体応答から方向波スペクトルを逆算する手法の研究開発が進められている。Nielsen ら[3]は、船体応答から on-site 方向波スペクトルを同定する手法について論じた。応答には、荷重に最も sensitive であるとする roll を基本に roll, sway, pitch を考慮。スペクトルの同定には、基本スペクトルのパラメトリックな足し合わせによる方法と Bayesian update の2種類を適用した。コンテナ船の実船計測結果と比較して、両者優劣付け難しと結論した。

4.4.3 DSS (Decision Support System)

かつて日本造船研究協会の共同研究において、今後の船舶安全運航管理にとって真に必要な機器・システムの機能要件である運行システムを研究開発し、総合品質管理を実施する船陸一貫システムを開発するための共同作業が行われた[1, 2]。その中では幅広く、航海、船体、機関、船装それぞれに関わるシステムと全体を統合する情報処理・船陸通信などが取り扱われたが、中でも船体状態のモニタリングに基づいて耐航性監視システムを構築し、船上での安全性や操船の判断に役立てようとする提言は、当時として先進的なものであった。これらの報告では、それまで船長個人の知識と経験に基づいて五感に頼って検知していた耐航性阻害要因を客観的な指標でもって測り、「安全」であるか「危険」であるかを判別するための基準値を持つことによって、耐航性阻害要因の発生を未然に防ぎ、かつ回避するための判断に指標を与えることを提言している。

モニタリングを安全運航に役立てるためのひとつの有力な方策として、船上での操船判断支援に計測結果をリアルタイムで利用することが挙げられる。Nielsen ら[8]は、船体運動加速度を対象（閾値）とする、リスクベース DSS(Decision Support System)構築のための基礎研究を実施した。DSS のためには船速、波浪条件など様々なパラメータを考慮して、1-3hr 位の時間で最大応答予測を行う必要があるとしている。しかし関係するパラメータはいずれも確率変数であるので、信頼性評価が必要である。そこで並列システムを仮定した2次モーメント法(FORM/SORM)と直接的なモンテカルロシミュレーションの両方で、予測の試行を行っている。結果的に FORM/SORM でも上記を超える時間を要するので、リアルタイム DSS の実現にはまだハードルがあるとしている。しかし提示される考え方は、縦曲げ最終強度を条件とする DSS 構築においても参考になる。基礎研究を進めるべき分野である。Nielsen ら[12]はさらに、応力モニタリングを行って、極限構造応答や疲労被害度を基準に decision support をする方法論を提案するとともに、累積疲労被害度について、提案法による予測値を実測値と比較している。

DSS の研究は緒に付いたばかりであり、今後、流力弾性応答まで考慮することを含め、より合理的な強度計算法とリンクした操船判断手法の確立、操船判断の効果の船上シミュレーション、有効な表示内容・表示方法など、研究の深化が期待される

5. 研究提言

5.1 海象・運航条件と荷重

(1) 環境条件

最上流の入力条件である環境条件については、世界で様々なプロジェクトが動いている。これらに我々が関与するというよりも、調査結果や動向を常に把握しておく。特に注視しておくべき情報として、①フリーク波の頻度、②地球環境変化に伴う海象・気象の変化、が挙げられる。操船が遭遇海象に与える影響については世界的にも研究の最前線であると考えられ、他研究項目と共に研究を進めていく必要がある。

また、荷重評価に用いる際の、現実の海象のモデル化の問題点として、長波頂 vs 短波頂、波浪自体の非線形性の考慮、がある。これらの視点はこれまで弱かった、と考えられるので、荷重評価時に配慮する必要がある。

(2) 流力弾性応答・波浪荷重解析

今後の荷重評価に求められるのは、①局部荷重分布と全体荷重分布の両方を矛盾なく取り扱えること、②斜め波中の挙動を取り扱えること、③非線形性の考慮、である。

斜め波での事象や局部荷重分布を取り扱う場合には、三次元的手法による必要があると考えられる。そこで、ランキンソース法などの三次元的手法をベースとするツール開発を進める。各社ともに人材を育成し今後もキープすることには困難があると思われ、大学や船級でツールを整備し、メンテナンスする長期的な体制を作る。

衝撃荷重などの強非線形の領域までを扱える CFD などの手法がツール開発され商業化 (STAR-CCM+など) されてきている。上で挙げた弱非線形のポテンシャル理論に基づいたランキンソース法に比べて、計算時間などにおいて問題が残るが、Navier-Stokes 方程式を直接解く強みがある。商業化されたツールをうまく用いて、必要な出力を得る方法を積み上げる。例えば、ホイッピング応答を CFD と FEM の連成解析で評価する手法を開発する。

また、運航条件が応答に与える影響を解明する。船速とホイッピングを含む縦曲げモーメントの関係、船体応答の最大応答を生じさせる斜め波の条件などの解明が望まれる。

(3) 実験解析

水槽実験によって極限不規則波中の非線形応答の確率分布を求めて、数値モデルのベンチマークとする。また、ホイッピングを含む縦曲げモーメントに船速が与える影響を解明するための数値モデルのベンチマークとする。さらに MLER などの手法を実験的に適用して、少ない水槽実験で非線形応答の極限值を予測する手法を確認する。

斜波中の実験応答解析を行うために、曲げ振りを正しく再現できる水槽試験モデルの開発を行う。バックボーンモデルでは弾性モードの再現において限界がすでに見えているので、全弾性モデルによる FRP などの弾性をコントロールできる素材の利用によって、実際の船体の縦曲げ・サンブナン振り剛性・曲げ振り剛性を同時に満たすような全弾性モデル

ルの開発の可能性を探る。

(4) 統計解析

個々の条件下の、複合荷重下の極値応答予測技術(いわば条件付確率)は MLER や FORM を用いた手法などが知られ、おおむね確立できていると見なせる。今後、主に必要であるのは個々の条件に遭遇する確率を評価し、長期確率分布に結びつけることである。操船や運航条件を考慮した上での発現確率を評価する。運航条件の解明については船社などの協力が得られれば進む可能性がある。必要な情報は船速と波高と波向きの関係、操船のクライテリア、各積み付けの頻度などの情報が必要。積み付けと波浪荷重の相関(従属関係があるか?無相関か?)について着目した研究が少ない)について、解明することが必要。

非線形影響を含めた設計海象の絞込みを行う。このとき操船を考慮しない方法と操船を考慮した方法がありえる。前者については、例えば船級におけるルール開発にも用いられているが、非線形性を含めてどのような場合にホイッピングを含めた応答の確率レベルを解明し、生涯における最大の応答レベルを明らかにする。得られた結果から設計短期海象を絞り込む。さらに本質的であるのは、操船を考慮した設計短期海象の絞込みが重要である。すでに河邊らが操船クライテリアによって決まる最悪短期海象を提案しているので、この検証を行う(操船クライテリアの上限で最大荷重が決まるかどうか?)。これが確立できると、どのような操船時に構造応答が最大になるか?のガイダンスを与えることもできるので、設計にもオペレーションにも有用である。

(5) まとめ

以上に挙げた研究課題について、表 5.1.1 に重要度、優先度をランク付けした。なお、操船についてはすべてのほか項目に係る項目であるので、別途項目(5)として挙げた。

表 5.1.1 環境・荷重研究課題のランク付け

項目	重要度	優先度	実施機関
(1) 環境条件	B	C	U, R, CS
(2) 荷重評価のためのシミュレーション開発	B	A	U, R, CS
(3) 実験解析	B	A	U, R
(4) 統計解析	B	B	U, R, CS
(5) 操船の影響の考慮	A	A	U, R, SY, SP, CS

U: 大学、R:研究機関、SY: 造船、SP:海運、CS : 船級

5.2 縦曲げ逐次崩壊挙動と最終強度

(1) 逐次崩壊挙動の FEM 詳細解析と特性把握

コンテナ船の縦曲げ最終強度を、積み付け条件および構造変数(船体サイズ、二重底構造の構造配置・寸法、Partial Bulkhead 構造の剛性など)を系統的に変化させて FEM に

より解析し、逐次崩壊挙動、構造部材の耐荷力と最終強度の関係、およびこれらに対する横強度部材の影響を明確にする。また降伏応力や溶接初期不整の影響を明らかにする。これらは後述の簡略計算法や簡易算式の精度検証のため、また強度の不確実性の定量化のために不可欠である。曲面部の耐荷力や剪断力の影響は、これらの解析から付随的に明らかとなる。FEMによれば、詳細な逐次崩壊解析は可能である。ただし、可能な限り陰解法解析を実施して、最終強度後の挙動まで追跡する。

(2) 逐次崩壊挙動の簡略解析法の開発と検証

4.2.1 に述べたように、スミス法を拡張して、簡略的に縦曲げ最終強度を推定する試みが辰巳等によって行われている。このような簡略解析法による逐次崩壊解析を(1)と同様に系統的に実施し、解析法の適用性を検証する。一般に構造信頼性解析では、推定強度の不確実性は、次の Modeling parameter により評価される[1]。

$$X_m = \frac{\text{Actual strength}}{\text{Predicted strength}} \quad (5.2.1)$$

ここで、Predicted strength は簡略法による推定強度であり、Actual strength には実測値あるいは FEM などのより高精度の計算結果が使用される。 X_m の変動係数が小さく、かつ特定の確率変数に対して偏り（分布のゆがみ）が少ないことが優良モデルの要件である。このような Modeling parameter の統計量を同定する。なお、本課題は比較的短期に実施可能と考えられる。

(3) 最終強度簡易算式の開発

最終強度算式を船級協会規則として織り込んでいくためには、精度がよく、過去の安全な就航実績を踏まえて過大な要求にならず、なおかつ簡便で使いやすい計算手法とすることが重要である。また、モニタリングに基づく運航支援の場合も、安全性の判断にはできるだけ簡易的な評価式が望ましい。4.3.5 に述べたように、IACS UR-S11A では、二重底に対する面外荷重影響を、IACS/CSR と同形式で、面外荷重影響部分安全係数 $\gamma_{DB}=1.15$ により考慮している。NK では、これに加えて船幅方向応力をより直接考慮する最終強度算式を開発している。一方、4.2.1 に述べたように、Zhu and Moan は、船底局部荷重とホギング曲げモーメントによる最終強度相関式を式(4.2.1.1)で与え、信頼性解析の破損関数として用いている。課題(1)および(2)の成果に順次基づく形で、曲げ最終強度に対する荷重や強度変数の影響をより合理的に考慮しうる最終強度簡易算式を開発する。

(4) 流体・構造連成崩壊シミュレーションと挙動予測

縦曲げ最終強度を超える荷重が船体に作用した場合の崩壊挙動を、崩壊後の変形状態を含めて追跡するためには、文献[4.2-20]で飯島等が行っている弾塑性変形と流体力の相互作用を考慮した流体・構造連成崩壊シミュレーション（流力弾塑性解析）が必要である。特に、ホイッピングのように動的かつ有限な入力エネルギーの場合は、最終強度を一瞬超え

でも崩壊変形は一気に進まず、軽微な変形量に止まる可能性がある。逆に、荷重が最終強度に達しない場合も、ホイッピングの繰り返しによって局部的に塑性変形が累積し全体破損につながる可能性も考えられる。4.2.4 に述べたこのような崩壊挙動を解明し、合理的な設計および安全対策を可能とするため、流体・構造連成崩壊シミュレーション法を開発する。このような解析法は、コンテナ船に限らず、あらゆる船体構造の縦曲げ崩壊とそのリスクを推定する上で有用であり、船体構造強度の基盤的解析技術となり得る。

表 5.2.1 荷重モデルと構造モデルの組み合わせ例

レベル	流体（非線形、前進速度あり）	構造（材料・幾何学的非線形）
5	CFD	3D シェル
4	3D 特異点分布	3D シェル
3	ストリップ法	3D シェル
2	ストリップ法	梁+平面格子（二重底）
1	ストリップ法	梁

流体モデルと構造モデルの組み合わせとして、上表のように考えてみる。前進速度は簡略的であっても考慮する必要があると考えられる[4.2-20]。強非線形流体+3D シェルは、原理的には可能であるが実用ツール化するには5年~10年必要であろう。レベル3あるいは4は、5年以内には実用ツール化が望ましい。一方、適用が基本的に縦曲げ崩壊に限られるものの、レベル2の簡便法を短期的課題として指向すべきであろう。すでに、村田ら[2]は、スミス法における平均軸応力~軸ひずみ関係を擬似的なひずみ硬化/軟化挙動とみなし、これを梁要素によるFEM動的弾塑性解析に組み込んで、船体の崩壊挙動を付加質量力と静的復原力まで考慮して解析する手順を示している。

これらの解析により、「大波高+低速」あるいは「比較的低波高+高速+ホイッピングあり」といった様々なシナリオ中の縦曲げ崩壊の安全性評価が可能になると考えられる。

(5) まとめ

以上の研究課題(1)~(4)について、表 5.2.1 に重要度と優先度をまとめる。構造解析法の開発にあたって大学側の問題点の一つは、実船構造寸法の入手が困難である点である。したがって、詳細大規模解析は、企業・船級が主体となり、解析法の開発は標準的構造モデルを対象に大学が実施する協働体制が望ましい。解析法そのものは、大学の個別課題として多様な方法論が提示されることが望まれる。

表 5.2.2 最終強度研究課題のランク付け

項目	重要度	優先度	実施機関
(1) 逐次崩壊挙動の FEM 詳細解析と特性把握	A	A	U, R, SY, CS
(2) 逐次崩壊挙動の簡略解析法の開発と検証	A	A	U, R

(3) 最終強度簡易算式の開発	B	B	U, R, CS
(4) 流体・構造連成崩壊シミュレーションと挙動予測	B	C	U, R, SY, CS

U: 大学、R:研究機関、SY: 造船、SP:海運、CS : 船級

5.3 荷重・強度の不確実性と安全性評価

(1) 信頼性解析手法

信頼性解析手法は、荷重および強度の不確実性を考慮した合理的設計評価手段であり、縦曲げ最終強度への適用に関する研究も世界的に行われてきている。一方、わが国では「SR210 新世代造船システムに関する調査研究」における新船体構造設計法（Advanced Design by Analysis, ADDA）[1]の研究以降、総合的なプロジェクトは停滞している。国際的にはばら積み貨物船に関する研究成果が IACS/CSR でも取り入れられており、我が国においては導入がやや遅れ気味である。

その中、大型コンテナ船の縦曲げ最終強度に関する信頼性解析手法の研究は世界的にもまだ少なく、合理的規則開発のために早期に行うことが必要である。

(2) 荷重・強度の確率モデル

信頼性解析を正しく適用するためには荷重・強度の確率モデルの精度が重要であり、それぞれの不確実性の同定・定量化が課題である。数値解析シミュレーションに基づく検討はもとより、現実の確率分布を確認するためには広範な実測データを集めることも不可欠である。

特に静水縦曲げモーメント、HOLD 内コンテナ荷重分布などの静水荷重についての満足な確率モデルは得られておらず、今後実測値に基づく裏付けが必要である。操船が荷重に及ぼす影響に関わる確率モデルについても、理論計算に基づく考察にとどまらず、数多くの実船モニタリングデータを得て、実海象で実際に行われている操船方法の調査、それによる荷重変動の確率モデルの把握が必要であり、5.4 節に述べるモニタリングの成果を十分に生かしていく必要がある。

(3) 信頼性評価

上記のように破損関数とモデル不確実性を明確にしたうえで、既存設計規則の安全レベルを系統的に評価する。また、同等の安全レベルを確保する上での環境・操船条件の明確化（「極大波中+低速時」の破損確率と「通常波中+高速時」の破損確率の比較など）を行い、様々な運行条件下での合理的な信頼性評価を可能とする基幹技術を確立することが重要である。これはさらには 5.4 節に述べるモニタリングにおける信頼性に基づくリアルタイムの操船支援システムにもつながる。

まずは試行的な検討を実施しノウハウを蓄積し、その更新・改善は、5.4 のモニタリングとそれによる収集データの継続的な蓄積と活用に待つことになる。

(4) まとめ

以上の研究課題(1)~(3)について、表 5.3.1 に重要度と優先度をまとめる。特に静水荷重の確率分布や操船影響の確率分布を明確化するためには、実運航での多くのデータを集めることが不可欠であり、企業・船級協会との協働体制が望ましい。

表 5.3.1 信頼性評価研究課題のランク付け

項目	重要度	優先度	実施機関
(1) 信頼性解析手法	A	A	U, R
(2) 荷重・強度の確率モデル	B	B	SP, SY, CS, U, R
(3) 信頼性評価	B	B	U, R

U: 大学、R:研究機関、SY: 造船、SP:海運、CS : 船級

5.4 モニタリングと収集データの安全対策への適用

(1) 荷重・応答モニタリング技術

過去の実船計測についての研究は単発の船に多くのセンサーを配置して行われたものが多い一方、少数の縦曲げ応力センサーと船首上下加速度を中心とする簡便なセットの実用システムも存在する。今後目指すべき方向としては、船体各部が受ける荷重をできる限り収集できる最小限のセンサー配置仕様である。そのため、積み付け荷重と波浪荷重を計測するためのセンサー配置、全体応答と局部応答を分離して捉えるためのセンサー配置を検討する。

たとえば、静水縦曲げモーメント分布や HOLD 内コンテナ荷重分布を明らかにするセンサー配置、(2)に述べる海象データ推定を精度よく行うためのセンサー配置、縦強度関連応力を分離するための横断面 4 隅に設置するセンサーや縦曲げ応力と二重底曲げ応力、さらにはロンジ曲げ応力を分離するためのセンサー配置などの検討が必要である。縦強度関連応力を分離するセンサー配置は古くは新田らの 1,441TEU コンテナ船の実船計測[1]で行われており、近年でも Storhaug ら[4.4 節 5]、Heggelund ら[4.4 節 15]の実船計測で同様の事例がみられる。センサー配置例を Fig. 5.4.1 に示す。二重底部において縦曲げ応力と二重底曲げ応力、ロンジ曲げ応力を分離するためには、たとえば Fig. 5.4.2 に示すようなセンサー配置が考えられる。

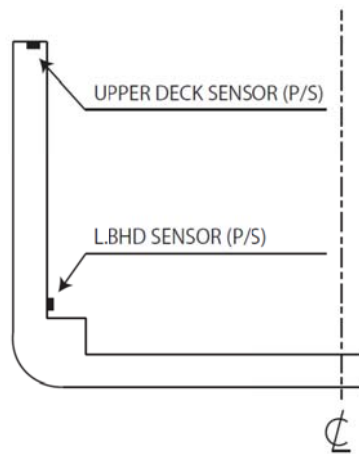


Fig. 5.4.1 Arrangement of longitudinal stress sensors.

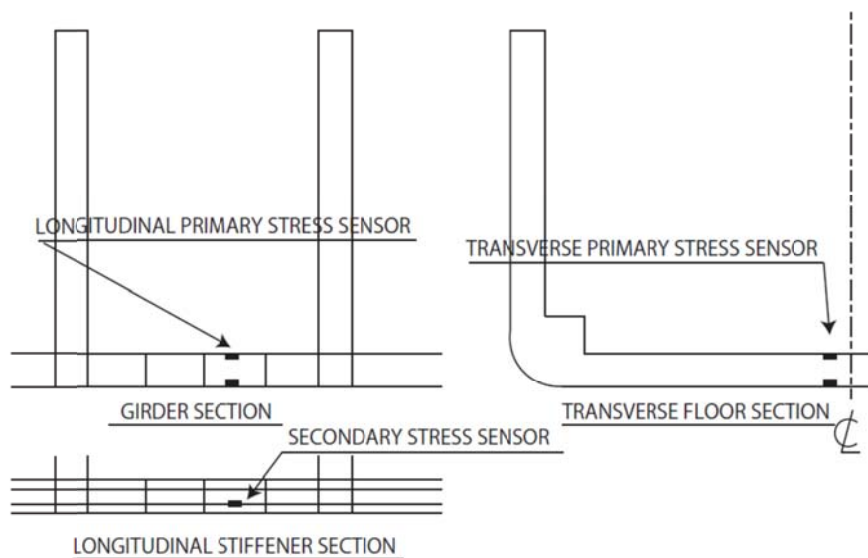


Fig. 5.4.1 Arrangement of double bottom stress sensors.

センサー技術そのものについてのいくつかの課題がある。船体構造に働く応力(ひずみ)を計測するには、現在、電気式のいわゆるひずみゲージを用いるのが一般的である。しかしながら、実船に装着して長期間計測する、という点については、以下のような問題がある。

- ひずみゲージは、通常、船体に接着剤を用いて貼付し、それに何らかのコーティングを施すことになるが、接着剤がどのくらい長期間持つのか、船体内の水分が多く湿度の高い環境で耐腐食性がどの程度であるか、様々な電気ノイズが発生した場合に有意な SN 比が確保できるか、温度変化等に起因するデータのドリフトをどのように補償するか、などを解決する必要がある。
- どの方向のひずみを計測するのか (1 軸か 3 軸か)、計測時間をどの程度にするか (数分間隔か、数時間間隔か、連続計測か)、ノイズの除去とドリフトの補正をどの段階で

実施するか、によって異なるが、どのくらいのデータをどのように収録するかを検討する必要がある。

一方、最近では電気式のひずみゲージに代わって、光学式の光ファイバーを用いたひずみセンサーが開発されてきている。メーカーによっても若干異なるが、代表的なセンサーでは、

- センシング部に給電が不要であるため電気ノイズの影響を受けず、落雷しても壊れない、引火性の高い場所にも設置可能で、いわゆる耐電磁波性、耐雷性、防爆性、非引火性に優れている。
- 耐食性と長期信頼性に優れ、ケーブルは 30km まで延長可能で、1 ポートに 80 点のセンサーを設置することができる。最大 16 ポートを搭載している Interrogator (いわゆるアンプ) を用いれば、分岐接続をしない場合で 1280 点の計測がアンプ一台で可能となる。
- 光温度センサーや温度補償技術を併用することによって、温度補償が簡単にできる。
- NIST (National Institute of Standards and Technology) Traceable が搭載されている機種では、絶対波長計測が可能となるので、温度補償を併用することによってドリフトのないデータを計測できる。
- プリテンションを適切に付加することによって圧縮方向のひずみを正確に測定できる。
- 計測スピードは 1Hz~5kHz の間で適宜設定することができる。

などの特性を有しており、電気式ひずみゲージに代わる有力なセンサーとして期待ができる。

たわみ・変形の計測という意味では、GPS の援用も考慮の対象となり得る。2Hz 以下、1~2cm 程度の変位が計測可能とされており、ホイッピング応答計測に応用することも可能であり、光ファイバーセンサー等との相補性が期待できる。

(2) 海象データ・船体各部負荷の推定

センサーから得られるひずみ、加速度、圧力等の情報から、船体に作用する全体および局部荷重を精度よく計算することは、乗員に対する的確な情報を生成するためにも、また設計や規則へのフィードバックのためにも重要な意味がある。

そのための基礎となる技術が、船舶が遭遇しているまさにその海象を精度よく推定する技術である。今日では波浪レーダー、衛星観測データや波浪追算等を駆使して、海象を把握する技術は進歩しているが、船舶がまさに遭遇しているその海象を精度よく把握するには至っていない。そこで、船体応答を用いた海象（方向波スペクトル）の推定技術の確立が重要である。基礎的な研究はこれまでも多数行われているが、これを実際に適用し、船上での操船判断、設計時に想定された設計条件と実際に作用する荷重との比較検証による設計精度向上、モニタリング対象としてセンサーを設置した箇所以外の応力履歴に把握など、様々な目的に活用していくことが重要である。

(3) ビッグデータの活用

先に述べたように実船計測はこれまで個別に単発的に行われ、それぞれのデータ解析結果がまとめられているが、積み付けや操船方法まで含めた荷重のばらつきについて論じることができるだけの材料はまだ提供されていないと考えられる。今後系統的かつ大掛かりな長期にわたるモニタリングによるビッグデータの取得と、それを活用した運航・メンテナンス・設計の合理化・高精度化を目指した研究が必要である。

(4) DSS への活用

モニタリングを安全運航に役立てるための一つの有力な方策として、船上での操船判断支援に計測結果をリアルタイムで利用するための DSS (Decision Support System) の構築が挙げられる。DSS の研究は緒についたばかりであり、今後、より合理的な強度計算法・信頼性解析法とリンクした操船判断手法の確立、操船判断の効果の船上シミュレーション、有効な表示内容・表示方法の検討、そのために必要なリアルタイムデータ処理システムなど、研究を深めていくことが必要である。

(5) まとめ

以上の研究課題(1)~(4)について、表 5.4.1 に重要度と優先度をまとめる。大規模なモニタリングの実施は企業の協力なくしては不可能であり、業界を挙げて取り組み、安全運航に資する有益なモニタリングシステムを構築していくことが望まれる。

表 5.4.1 モニタリング研究課題のランク付け

項目	重要度	優先度	実施機関
(1) 荷重・応答モニタリング技術	A	A	SP, SY, CS, R, U
(2) 海象データ・船体各部負荷の推定	A	A	U, R, SP, SY, CS
(3) ビッグデータの活用	B	B	SP, CS, SY, U, R
(4) DSS への活用	B	B	SP, CS, SY, U, R

U: 大学、R:研究機関、SY: 造船、SP:海運、CS : 船級

5.5 提言のポイントのまとめ

以上、大型コンテナ船の縦曲げ最終強度評価の合理化・高精度化とモニタリングを活用した設計・運航技術の確立のために今後取り上げるべき研究課題を提示した。

提言の主なポイントは、以下の通りである。

- ① 「海象・運航条件と荷重」、「縦曲げ逐次崩壊挙動と最終強度」という荷重、強度の本質部分について、実験、解析等を通じて理解を深化させることが、まず重要である。同時に、荷重および強度の高精度詳細解析法と実用的な簡易法のそれぞれについて、解析ツールを開発する。このようなツールを長期的に維持・改良することは、一企業等では不可能であり、人材の育成を含めて、大学、船級等を中心に長期的にメンテナンスできる体制を構築する。
- ② 構造安全性の評価においては、荷重および強度の不確実性を考慮するため、信頼性解析を導入する。ここでは、かつて造船研究協会で検討された新船体構造設計法 (ADvanced Design by Analysis, ADDA)で提唱された信頼性評価法を適用することになる。ホイッピングや横荷重影響を考慮したコンテナ船の縦曲げ崩壊の信頼性解析は、国外でも検討例はなく、内容は先進性を有する。
- ③ モニタリングにおいては、縦曲げモーメントや二重底の局部断面力など、コンテナ船の縦曲げ最終強度に直結する構造応答（荷重）をいかに的確に抽出できるかが鍵であり、そのためのセンサーの構成・配置を明らかにする。これらの構造応答と、海象、船体運動、圧力等の外力情報から解析によって予測される応答との相関性が検証できて始めて、実用に供し得るシステムとなる。
- ④ モニタリングから求められた作用荷重はリアルタイムに可視化し、乗組員が船体の実荷重を確認、管理できるシステムを構築する。この際の船上での操船判断支援の手段として、Nielsen ら[4.4 節 7]が提唱する、リスクベース DSS(Decision Support System)の概念を、破損確率を閾値として適用する。DSS 構築には、Nielsen ら自身が述べるように、計算時間を始めとして解決すべき課題は多く、まだ基礎研究のレベルではあるが、将来の差別化技術として着目する。
- ⑤ モニタリングにより収集されたビッグデータは、荷重および強度の確率モデルの更新ならびに強度基準の改善に活かす。

6. あとがき

本委員会の最大の意義は、大学、研究機関、造船会社、海運会社、船級協会が一同に会し、コンテナ船の縦曲げ最終強度に関わる技術の現状および動向と、今後の研究・開発課題について、忌憚のない意見交換ならびに情報共有を行うことができた点である。

議論を通じて、運動・荷重解析コードの開発・整備など、学術的には高いレベルにありながら実用面で世界に主導権を握られている分野、信頼性に基づく構造安全性評価や操船判断支援技術のように、技術力・経験ともに不足している分野、構造モニタリング技術のもつ大きな可能性と同時に、構造応答状態を的確に把握し予測につなげるためには、荷重・強度・評価を含む多様な基礎研究を平行して実施する必要があること、などが明らかになった。これらはいずれも、一大学、一企業のレベルを超える研究課題であり、総合的・継続的な研究開発体制が必要である。特に、構造モニタリングの設計・運航への活用は、設計、建造、運航、基準が横断的に関係することから、ビジネスモデルそのものまで踏み込んだ戦略が必要である。残念ながら、本委員会は、このような戦略議論までには至っておらず、本報告書を参照いただきつつ、今後の各方面での議論を期待するものである。

また、議論を通じて、運航者が設計基準の背景をどこまで把握しているか、造船者が運航条件や操船の実態をどこまで把握しているか、といった造船側と運航側の相互理解がまだまだ不足していると感じられた。日本の海事産業が世界に対抗するためには、チームジャパンとしてのより強い連携が重要と考えられる。本報告書が、そのような議論のきっかけにもなれば幸甚である。

【参考文献】

4.1 荷重

- [1] I.R. Young, S. Zieger, V. Vinoth, A.V. Babann: Global trends in extreme wind speed and wave height, Proceedings of OMAE2012, OMAE2012-83562.
- [2] E Vanem, Elzbieta B. Bitner-Gregersen: Modelling long-term trend in significant wave height and its potential impacts on ship structural loads, Proceedings of OMAE2013, OMAE2013-10023.
- [3] A.R. Osborne: Advances in nonlinear waves with emphasis on aspects for ship design and wave forensics, Proceedings of OMAE2013, OMAE2013-10873.
- [4] J. Hennig, J. Shcarneke, C. Swan, O Hagen, K. Ewanns, P. Tromans and G. Forristal: Effect of short-crestedness on extreme wave impact — a summary of findings from the joint industry project 'SHORTCREST.', OMAE2015, OMAE2015-41167.
- [5] U. D. Nielsen, I. M. V. Andersen and J. Koning: Comparisons of Means for Estimating Sea States, PRADS2013, pp.250-258.
- [6] A. S. Olsen, C. Schrøter & J. J. Jensen: Wave height distribution observed by ships in the North Atlantic, Ships and Offshore Structures, Vol. 1: 1-12, 2006.
- [7] R.E.D.Bishop and W.G.Price: Hydroelasticity of Ships, Cambridge University Press, 1980.
- [8] J.H. Kim, K.H. Kim, D.Y. Lee, B.H. Jung, Y.H. Kim: Fully coupled BEM-FEM analysis on ship structural hydroelasticity and experimental validation, Proceedings of PRADS2013, pp. 603-611, 2013.
- [9] 三宅 竜二, 松本 俊之, 朱 庭耀, 阿部 憲和: 超大型コンテナ船のスプリングングによる流力弾性応答に関する実験的研究 (第一報), 日本船舶海洋工学会論文集 Vol.6: 185-195, 2008.
- [10] H. Kobayakawa, H. Kusumoto, T. Nagashima, Isao Neki: Hydroelastoc response analysis using unsteady time domain analysis of ship motions, Proceedings of Hydroelasticity2012, pp. 247-256.
- [11] A.Graefe, O. Moctar, J. Oberhagemann and V. Shigunov: Linear and nonlinear sectional loads with potential and field methods, JOMAE2014, pp.1057-
- [12] V. Shigunov, A. Graefe and O. Moctar: Calculation of horizontal sectional loads and torsional moment, JOMAE2015, 1069-.
- [13] T.E. Schellin and O. Moctar: Numerical Prediction of Impact-Related Wave Loads on Ships, J. Offshore Mech. Arct. Eng 129(1), 39-47, 2007.
- [14] H. Rathje, A. Kahl, T.E. Schellin: High-frequency ship response assessment of large containership, IJOPE, Vol 22(2): 115-122, 2012.
- [15] G Storhaug: Which sea states are dimensioning for container vessels when whipping is included?, Proceedings of OMAE2014, OMAE2014-24398, 2014.

- [16] Y. Ogawa and K. Takagi: A study for the effect of operation on hydroelasticity of hull, Proceedings of Hydroelasticity in Marine Technology 2012, pp.257-266, 2012.
- [17] 河邊 寛: 最悪短期海象に基づく波浪荷重の長期分布の推定手法, 独立行政法人海上技術安全研究所研究発表会講演集 (1), 81-86, 2001-06-28.
- [18] I. Drummen, G. Storhaug, T. Moan: Experimental and numerical investigation of fatigue damage due to wave-induced vibrations in a containership in head seas, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 13: 317-327, 2008.
- [19] I. Drummen, M.K. Wu, T. Moan: Experimental and numerical study of containership responses in severe head, Marine Structures, Vol. 22: 1720-193, 2009.
- [20] K. Iijima, O.A. Hermundstad, S. Zhu and T. Moan: Symmetric and antisymmetric vibrations of a hydroelastically scaled model, Proceedings of Hydroelasticity in Marine Technology 2009, 173-182, 2009.
- [21] Suji Zhu and T. Moan: A comparative study of the influence of bow shape on hull girder vibrations through two backbone models, Proceedings of Hydroelasticity in Marine Technology 2012, 153-162, 2012.
- [22] E. Tiphine, F. Bigot, J. De-Lauzon, F.X. Sireta, Y.S. Chung, S. Malenica: Comparisons of experimental and numerical results for global hydroelastic, Proceedings of ISOPE, pp. 764-773, 2012.
- [23] 三宅 竜二, 松本 俊之, 朱 庭耀, 阿部 憲和: 超大型コンテナ船のスプリングングによる流力弾性応答に関する実験的研究(第一報), 日本船舶海洋工学会論文集 Vol. 6: 185-195, 2008.
- [24] M. Oka, S. Oka and Y. Ogawa: An experimental study on wave loads of a large container ship and its hydroelastic vibration, Proceedings of Hydroelasticity in Marine Technology 2012, pp. 183-192, 2012.
- [25] Y. Takaoka, A. Murakami, T. Yoshida, R. Miyake, N. Yamamoto, K. Terai and K. Toyoda: An experimental study on the whipping response of large container carriers, Proceedings of Hydroelasticity in Marine Technology 2012, pp. 145-152, 2012.
- [26] S. Zhu and T. Moan: Nonlinear effects from wave-induced maximum vertical bending moment on a flexible ultra-large containership model in severe head and oblique seas, Marine Structures, Vol. 35:1-25, 2014.
- [27] D.H. Kim, A. H. Eagle, A. W. Troesch: Estimates of long-term combined wave bending and whipping for two alternative hull forms, Transactions of SNAME, Vol. 119: 137-166, 2011.
- [28] M. Ćorak, J. Parunov and C.G. Soares: Long-term prediction of combined wave and whipping bending moments of container ships, Ships and Offshore Structures, Vol. 10: 4-19, 2015.
- [29] W. Huang: Simplified combination of still water and wave loads with the emphasis in

considering a general Weibul characteristic of wave loads, Proceedings of OMAE2011, OMAE2010-20233, 2011.

[30] B Leira: Combination of multiple extreme bending moment components, Proceedings of OMAE2012, OMAE2012-083528, 2012.

[31] L. D. Ivanov: On the relationship between maximum still water shear forces, bending moments, and radii of gyration of the total ship's weight and buoyancy forces, Ships and Offshore Structures, Vol. 2(1):39-47, 2007.

[32] J. J. Jensen: Stochastic procedures for extreme wave load predictions – wave bending moment in ships, Marine Structures, Vol. 22: 194-208, 2009.

[33] I. Drummen, M.K. Wu, T. Moan: Experimental and numerical study of containership responses in severe head seas, Marine Structures, Vol. 22: 1720-193, 2009.

[34] 飯島 一博, 藤久保 昌彦, 堀田 裕樹, 中村 健人: 構造信頼性理論による非線形応答のための設計不規則波列の導出, 日本船舶海洋工学会論文集 Vol. 19: 101-110, 2014.

[35] I.Drummen, MK Wu and T. Moan: Numerical and experimental investigations into the application of response conditioned waves for long-term nonlinear analyses, Marine Structures, Vol.2 576-593, 2008.

[36] 福田淳一, 新開明二, 田中徳美: 波浪中の船体に誘起される非線形応力の長期予測: 大型油槽船縦強度部材の相当応力、日本造船学会論文集、Vol. 146, pp. 262-269, 1979.

[37] K. Iijima, Y. Suzaki and M. Fujikubo: Scaled model tests for the post-ultimate strength collapse behaviour of a ship's hull girder under whipping loads, Ships and Offshore Structures, Vol. 10: 31-38, 2015.

[38] W. Liu, K. Suzuki and K. Shibamura: A two-dimensional hydro-elastoplasticity method of a container ship in extreme waves, Journal of OMAE, Vol:137(2), 021101, 2015.

4.2 最終強度

[1] Hadi K.K. Amlashi and Torgeir Moan: Ultimate strength analysis of a bulk carrier hull girder under alternate hold loading condition – A case study: Part 1: Nonlinear finite element modelling and ultimate hull girder capacity, Marine Structures, Vol.21, pp. 327-352, 2008.

[2] Hadi K.K. Amlashi and Torgeir Moan: Ultimate strength analysis of a bulk carrier hull girder under alternate hold loading condition – A case study: Part 2: Stress distribution in the double bottom and simplified approaches, Marine Structures, Vol.22, pp. 522-544, 2009.

[3] J. Kippenes, G. Notaro, H. Amlashi and E. Steen: Ultimate Strength of Cape-Size Bulk Carrier Under Alternate Hold Loading, 11th PRADS, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

(2010), 1114-1122.

[4] Zhi Shu and Torgeir Moan: Ultimate strength of a capsized size bulk carrier in hogging and alternate hold loading condition, Proc. of the 29th OMAE, Shanghai, China, 2010.

[5] Zhi Shu and Torgeir Moan: Reliability analysis of a bulk carrier in ultimate limit state under combined global and local loads in the hogging and alternate hold loading condition, Marine Structures, Vol.24, pp. 1-22, 2011.

[6] 国土交通省コンテナ 運搬船安全対策検討委員会最終報告書, 2015年3月.

[7] 竹村健太郎, 石橋公也, 松本俊之, 重見利幸: 面外荷重影響を考慮した縦曲げ最終強度の簡易推定法に関する研究, 日本船舶海洋工学会平成 28 年春季講演会論文集, 2016.

[8] 松井貞興, 村上睦尚, 有馬俊朗, 藤久保昌彦: ローカル荷重によって二重底構造に生じる応力の推定法, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 21 号, pp.419-422, 2015

[9] 辰巳晃, 藤久保昌彦, 松井貞興: 局部荷重の影響を考慮したコンテナ船の縦曲げ最終強度解析に関する研究 (第 1 報), 日本船舶海洋工学会平成 27 年秋季講演会論文集, 2015.

[10] 辰巳晃, 井崎卓哉, 藤久保昌彦: 局部荷重の影響を考慮したコンテナ船の縦曲げ最終強度解析に関する研究 (第 2 報), 日本船舶海洋工学会平成 28 年春季講演会論文集, 2016.

[11] 成瀬慶晃, 川村恭己, 岡田哲男: 2 軸圧縮下における船底防撓構造の崩壊挙動と有効幅の低下に関する一考察, 日本船舶海洋工学会平成 27 年秋季講演会論文集, 2015.

[12] Zhi Shu and Torgeir Moan: Nonlinear effects from wave-induced maximum vertical bending moment on a flexible ultra-large containership model in severe head and oblique seas, Marine Structures, Vol.35, pp. 1-25, 2014.

[13] J.K. Paik, A.K. Thayamballi, P. Terndrup Pedersen and Y.I. Park: Ultimate strength of ship hulls under torsion, Ocean Engineering, Vol. 28, pp. 1097-1133, 2001.

[14] E. Alfred Mohammed, S.D. Benson, S.E. Hirdaris and R.S. Dow: Design safety margin of a 10,000 TEU container ship through ultimate hull girder load combination analysis, Marine Structures, Vol.46, pp. 78-101, 2016.

[15] 田中義照, 橋爪豊, 小河寛明, 辰巳晃, 藤久保昌彦: 複合荷重下における船体梁の縦曲げ最終強度に関する研究—その 2 簡易解析手法の構築—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 20 号, pp.137-145, 2014.

[16] Y. Tanaka, H. Ogawa, A. Tatsumi and M. Fujikubo: Analysis method of ultimate hull girder strength under combined loads, Ships and Offshore Structures, Vol. 10, No. 5, 587-598, 2015.

[17] M. Gaiotti, M. Fujikubo, N. Grasso and C.M. Rizzo: Effect of shear stresses onto the hull girder ultimate strength of a containership, Int Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 26, No. 2, 2016, pp. 183-191.

[18] J.S. Park, K. Iijima and T. Yao: Estimation of buckling and collapse behaviours of stiffened curved plates, Proc. of the 18th Inter Offshore and Polar Engineering

Conference, Vancouver, Canada, 2008.

[19] J.S. Park, M.S. Chun and Y.S. Suh: Development of advanced designed formulation to estimate the buckling/ultimate strength of curved plates, *Advances in Marine Structures*, Guedes Soares & Fricke (eds), Taylor & Francis, London, 2011, pp. 203-211.

[20] K. Iijima, K. Kimura, W. Xu, M. Fujikubo: Hydro-elastoplasticity approach to predicting the post-ultimate strength behavior of a ship's hull girder in waves, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.16, 2011, pp.379-389.

[21] 堤成一郎, 植田一史, R. Fincato, 藤久保昌彦: 鋼板の繰返し座屈挙動に対する材料軟化の影響に関する基礎的検討, 日本船舶海洋工学会平成 27 年秋季講演会論文集, 2015.

4.3 安全性評価

[1] Peter Friis-Hansen, Ove Ditlevsen: A stochastic Stillwater response model, *Journal of Ship Research*, Vol.46, No.1, pp.16-30, 2002

[2] Moan T, Shu Z, Drummen I, Amlashi HHK. Comparative reliability analysis of ships – Considering different ship types and the effect of ship operations on loads. In: SNAME annual meeting, Ft. Lauderdale, FL, 2006.

[3] Gaute Storhaug, Torgeir Moan: Springing/whipping response of a large ocean-going vessel – investigated by an experimental method, *PRADS2007*, 2007.

[4] Yasunari Fujii, Hiroshi Kawabe, Kazuhiro Iijima, Tetsuya Yao: Comparison of safety levels of ship's hull girders in longitudinal bending designed by different criteria, *Proceedings of 17th ISOPE*, pp.3692-, 2007.

[5] 原田実、朱庭耀、山本規雄: 船体縦曲げ最終強度に対する構造信頼性解析、日本海事協会誌 286 号(2008 年)

[6] Lyuben D. Ivanov and Ge Wang, Probabilistic Presentation of the Still Water Loads: Which Way Ahead?, Paper No. OMAE2008-57011, pp. 5-17, ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2008

[7] Lyuben D. Ivanov, Assessment of the Total Ship's Hull Girder Bending Stresses When Unified Model of Sagging and Hogging Bending Moments is Used, Paper No. OMAE2009-79984, pp. 711-727; 17 pages, ASME 2009, 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2009

[8] Lyuben D. Ivanov: Challenges and possible solutions of the time-variant reliability of ship's hull girder, *Ships and Offshore Structures*, Vol. 4, No. 3, 2009, 215–228.

[9] Jensen JJ, Pedersen PT, Shi B, Wang S, Petricic M, Mansour A. Wave induced extreme hull girder loads on containerships. *Transactions of SNAME* 2009;116:128–51

[10] Minoru Harada, TingYao Zhu, Norio Yamamoto: Structural reliability analysis for the assessment of ultimate limit state of ship's hull, *Proceedings of 19th ISOPE*, pp.733-, 2009.

- [11] Minoru Harada, Tingyao Zhu, Norio Yamamoto: Structural reliability analysis for assessment of ultimate limit state of ship's hull – a case study, *IJOPE* 20:4, pp.306-312, 2010.
- [12] Masayoshi Oka, Yoshitaka Ogawa, Hajime Kawano: A study on fatigue strength of large container ship with taking the effect of hull girder vibration into account, *PRADS2010*, pp.1243-, 2010.
- [13] Gaute Storhaug, Sime Malenica, Byung-Ki Choi, Suji Zhu, Ole A. Hermundstad: Consequence of whipping and springing on fatigue and extreme loading for a 13000TEU container vessel based on model tests, *PRADS2010*, pp.1200-, 2010.
- [14] N. White, Z. Wang, Y. Lee: Guidance notes on whipping and springing assessment, *Proceedings of the 11th International Marine Design Conference (IMDC 2012)*, Glasgow, UK, 2012.
- [15] Yongwon Lee, Nigel White, Zhenhong Wang, Jun-Bum Park: Whipping response and whipping effects on design bending moments of a large container ships, *Hydroelasticity in Marine Technology* 2012, pp.51-62, 2012
- [16] Sopheak Seng and Jørgen Juncher Jensen: An Application of a Free Surface CFD Method in the Short-Term Extreme Response Analysis of Ships, *DTU, Proc. of PRADS2013*, Changwon, Korea, pp.747-754. (100-PRADS2013)
- [17] Lyuben D. Ivanov: Reliability estimation of ship's hull girder in probabilistic terms when ultimate strength is used as a failure mode, *Ships and Offshore Structures*, 2013, Vol. 8, No. 2, 141–153.
- [18] K.Chatzitolios: Influence of Hull Flexibility and Hull Girder Vibrations in the Design of Modern Ultra Large Container Ships, *Design & Operation of Container Ships 2014 Proceedings*
- [19] ABS: Guidance notes on whipping assessment for container carriers, 2014
- [20] LR: Guidance notes on the assessment of global design loads of large container ships and other ships prone to whipping and springing, 2014, Draft Version 1.5, June 2014
- [21] Ćorak, Maro; Parunov, Joško; Soares, C. Guedes, Probabilistic Load Combination Factors of Wave and Whipping Bending Moments, *JSR Volume 59*, Number 1, March 2015, pp. 11-30(20)
- [22] Jan Oberhagemann, Vladimir Shigunov, Maciej Radon, Holger Mumm, Sun-II Won: Hydrodynamic load analysis and ultimate strength check of an 18000 TEU containership, *7th International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology*, 2015
- [23] IACS: UR S11A Longitudinal strength standard for container ships, 2015
- [24] 大沢直樹、中村哲也、山本規雄、澤村淳司：曲げ振動疲労試験機を用いた高周波重畳波浪荷重を受ける溶接継手の疲労強度に関する研究、*日本船舶海洋工学会論文集第 22 号*、

pp.175-185, 2015

[25] 河邊寛、重見利幸、松本俊之、石橋公也、豊田賢作：大型コンテナ船のホイッピングによる波浪縦曲げモーメントへの定量的影響の推定、日本船舶海洋工学会講演会論文集第22号、pp.477-482, 2016

4.4 実船計測・モニタリング

- [1] 日本造船研究協会：SR238 新しいフリートサポートシステムの研究 成果報告書、1999
- [2] 日本造船研究協会：SR240 新しいフリーとサポートシステムの開発 成果報告書、2002
- [3] Ulrik Dam Nielsen: Estimations of on-site directional wave spectra from measured ship responses, Marine Structures, Vol.19, pp. 33-69, 2006. (MAST-2006-1)
- [4] Tetsuo Okada, Yu Takeda, Tomoki Maeda: On board measurement of stresses and deflections of a Post-Panamax containership and its feedback to rational design, Marine Structures, Vol.19, pp. 141-172, 2006. (MAST-2006-2)
- [5] Gaute Storhaug, Erlend Moe: Measurements of wave induced vibrations onboard a large container vessel operating in harsh environment, PRADS2007, 2007.
- [6] 田村幸雄、吉田昭仁：GPS 技術を用いた構造物の変位応答モニタリング、計測と制御、第46巻第8号、pp.623-627, 2007
- [7] 豊田昌信、岡田哲男、中島喜之、前田朝樹、松本俊之：大型コンテナ船の応力と倉口変形量の実船計測、日本船舶海洋工学会論文集第8号、2008
- [8] Ulrik Dam Nielsen, Peter Friis-Hansen, Jorgen Juncher Jensen: A step towards risk-based decision support for ships - Evaluation of limit states using parallel system analysis, Marine Structures, Vol.22, pp. 209-224, 2009. (MAST-2009-3)
- [9] Elzbieta M. Bitner-Gregersen, Rolf Skjong: Concept for a risk based Navigation Decision Assistant, Marine Structures, Vol.22, pp. 275-286, 2009. (MAST-2009-4)
- [10] Yuichi Ito, Ulrik D. Nielsen, Jorgen J. Jensen: Estimation of fatigue damage from full-scale measurements of hull girder stress, PRADS2010, pp.1225-, 2010.
- [11] Oleg Gaidai, Gaute Storhaug, Arvid Naess: Extreme value statistics of whipping response for large ships, PRADS2010, pp.1210-, 2010.
- [12] Svein E. Heggelund, Gaute Storhaug, Narve Oma: Consequence of whipping and springing on fatigue and extreme for a LNG vessel based on onboard measurements, PRADS2010, pp.1173-, 2010.
- [13] Ulrik Dam Nielsen, Jørgen Juncher Jensen, Preben Terndrup Pedersen, Yuichi Ito: Onboard monitoring of fatigue damage rates in the hull girder, Marine Structures, Vol.24, pp. 182-206, 2011.
- [14] J.B. Koo, K.B. Jang, Y.S. Suh, Y.S. Kim, M.S. Kim, H. Yu, James S.C. Tai: Fatigue damage assessment based on full scale measurement data for a large container carrier, Proceedings of 21st ISOPE, pp.440-, 2011.

- [15] Svein Erling Heggelund, Gaute Storhaug, Byong-Ki Choi: Full scale measurement of fatigue and extreme loading including whipping on an 8600TEU post panama container vessel in the Asia to Europe trade, Paper No. OMAE2011-49378, pp.273-282, ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2011
- [16] Wengang Mao, Jonas W. Ringsberg, Zhiyuan Li and Igor Rychlik, Assessment of Full-Scale Measurements With Regard to Extreme Hogging and Sagging Condition of Container Ships, Paper No. OMAE2011-49456, pp. 325-333; 9 pages, ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2011
- [17] Helge Rathje, Adrian Kahl, Thomas E. Schellin: Semi-empirical assessment of long-term high-frequency hull girder response of containerships, Proceedings of 22nd ISOPE, pp.703-, 2012.
- [18] Helge Rathje, Adrian Kahl, Thomas E. Schellin: Semi-empirical assessment of long-term high-frequency hull girder response of containerships, IJOPE 23;4, pp.292-297, 2013.
- [19] Ingrid Marie Vincent Andersen, Jergen Juncher Jensen: Measurements in a container ship of wave-induced hull girder stresses in excess of design values, Marine Structures Vol.37, 2014
- [20] Adrian Kahl, Wolfgang Fricke, Hans Paetzold, Hubertus von Selle: Whipping investigations based on large-scale measurements and experimental fatigue testing, IJOPE 25;4, pp.247-254, 2015.
- [21] Hyeok-Geun Ki, Sung-Gun Park, In-Ho Jang: Full scale measurement of 14k TEU containership, Hydroelasticity in Marine Technology 2015, pp311-328, 2015

5.2 縦曲げ逐次崩壊挙動と最終強度

- [1] 日本造船学会海洋工学委員会構造部会：海洋構造物の信頼性設計指針、1993.
- [2] 村田和紀、辰巳晃、藤久保昌彦、飯島一博：スミス法を用いた船体桁の運動・構造崩壊一体解析に関する基礎的研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集第 21 号、pp.473-475, 2015

5.3 荷重・強度の不確実性と安全性評価

- [1] 日本造船研究協会：SR210 新世代造船システムに関する調査研究報告書、1989.

5.4 モニタリングと収集データの安全対策への適用

- [1] 新田顕、湯浅通史：コンテナ船縦強度の実船計測および長期予測、日本造船学会論文集第 141 号、pp.160-166, 1977