

コンテナ運搬船安全対策検討委員会
最終報告書

平成 27 年（2015 年） 3 月

コンテナ運搬船安全対策検討委員会

目次

	ページ
前文	3
要約	4
1 事故に関する情報及び同型船の船底座屈変形	6
1.1 コンテナ運搬船 MOL COMFORT の概要	6
1.2 規則適合・検査状況	6
1.3 事故時の状況	6
1.4 同型船の安全点検結果等	8
2 シミュレーション計算による事故船の折損及び船底座屈変形の再現	9
2.1 シミュレーション計算の方法	9
2.2 事故船の船体折損の可能性の確認	10
2.3 船底座屈変形の再現	11
3 事故船とは異なる設計の大型コンテナ船の安全性	12
3.1 船底の安全点検	12
3.2 シミュレーション計算による船体強度と作用荷重の対比	12
4 シミュレーション計算結果の整理と規則に関する検討	14
4.1 船級規則について	14
4.2 船体強度	14
4.3 作用荷重	15
5 まとめ	17
別添1 委員名簿	18
別添2 船底二重底に作用する横荷重	19
別添3 船底座屈変形の再現	21
別添4 ホイッピング荷重の考慮	23
付録 用語の定義	27

前文

大型コンテナ運搬船「MOL COMFORT (バハマ船籍、8000TEU 級)」は、シンガポールからジェッダ (サウジアラビア) へ航行中の 2013 年 6 月 17 日にインド洋沖で船体中央部が折損し、船体前半分と後半部に分断・漂流の後に沈没した。事故時においては、付近を航行していた船舶やインド遭難救助当局の迅速な救助活動により、人命の損失は無く、救助に当たった関係者に謝意を表す。

国土交通省海事局は、同船の建造造船所、運航船社及び船級協会 (船体構造の検査等を行う第三者機関) が日本に所在し、緊密な情報交換に立脚した安全対策の検討が可能であることから、業界関係者や学識経験者及び研究機関を委員とする「コンテナ運搬船安全対策検討委員会」(Committee on Large Container Ship Safety) を設け、2013 年 12 月に中間報告書を作成・公表した。本最終報告書は、中間報告書で述べた課題への取り組み結果及びこの取り組み結果に立脚した安全対策を取りまとめたものである。

本最終報告書は、委員会が検討した安全対策の海事業界関係者への周知、安全対策の国際的実施に向けた検討促進を目的とするもので、このため英訳版を作成し、事故調査の任に当たる船籍国、船体構造規則の国際標準を担う国際船級協会連合及び国際海事機関に情報提供するものである。

要約

調査結果

事故船の船体折損は、船体中央部の船底外板が折損の起点と推定でき、また、事故後に実施した事故船の同型船に対する点検において、事故船の同型船の船底外板に高さ 20mm 程度の座屈変形を発見している。船体折損を再現するため、船体中央部をモデル化し船体強度（船体縦曲げ最終強度）をシミュレーション計算し、また、当時の気象・海象データから事故船に作用する荷重をシミュレーション計算して両者を対比した。

船体強度のシミュレーション計算では、現実の現象に最も近くなるよう縦曲げモーメントに船体の横方向にも作用する横荷重（面外荷重）を重畳させたところ、船体強度は、横荷重（面外荷重）を考慮しない場合より低下した。作用荷重のシミュレーション計算では、今まで規則において直接的には考慮されていなかったホイッピング荷重（船首スラミングに誘起される振動からの荷重）を加味した。作用荷重は、波高又は船速の増加に伴い増加した。また、コンテナ重量のばらつき（申告重量と実重量のギャップ）、実海域における海象条件の不確実性、さらに使用鋼材の強度のばらつきを考慮した。

その結果、事故当時の状況において事故船に折損（作用荷重>船体強度）の可能性があったこと、また、事故船の同型船の船底外板に見られた座屈変形が、船体強度より少し低い荷重で発生し得ること、また繰り返し負荷により変形量が増加し得ることがシミュレーション計算により判明した。

大型コンテナ船の安全性については、シミュレーション計算結果をもとに検討を行ったところ、船体強度（縦曲げ最終強度）の評価における横荷重（面外荷重）の影響を規則において考慮する必要があることが分かった。また、縦強度に関する規則において、ホイッピング応答の強度に対する影響を規則で扱うための知見の蓄積に基づき考慮する必要があることが分かった。更に、作用荷重が波高や船速によって変化することを踏まえ、縦強度に関する規則の技術背景（海象条件等）を参考情報とすることができるよう、その在り方を検討する必要があることが分かった。

事故船とは異なる設計の日本海事協会が検査した大型コンテナ船については、船底外板に変形が無いことを確認し、また、シミュレーション計算を行い、事故船の場合と比べて船体強度に十分な余裕があることを確認した。その他の大型コンテナ船について、船底外板の点検など同様の安全確認が有効であると考ええる。

大型コンテナ船（8000TEU 級以上）の規則に関する提言

安全対策を国際的に実施するため、日本海事協会の規則及び IACS の統一規則を含む大型コンテナ船の構造強度に関する船級規則に関し、以下の改正や検討を早期に行うこ

とを提言する。

- ・ 横荷重（面外荷重）による影響は船体縦曲げ最終強度に密接に関係しているため、船底構造における応力の 2 軸性を含む横荷重（面外荷重）の影響を考慮する船体縦曲げ最終強度の規則とすること。
- ・ ホイッピング応答の影響を直接的に考慮する縦曲げ強度の規則とすること。
- ・ 縦強度に関する規則の技術的背景（海象条件等）の提示の在り方を検討すること。

1 事故に関する情報及び同型船の船底座屈変形

1.1 コンテナ運搬船 MOL COMFORT の概要

バハマ船籍で商船三井運航のコンテナ運搬船「MOL COMFORT」は三菱重工業株式会社長崎造船所にて設計・建造され、2007年より引き渡しを開始された大型コンテナ運搬船シリーズの6番船である。本船はハッチコーミングにYP47鋼(降伏応力:460N/mm²)を用いることで、鋼板の厚板化による靱性低下の緩和が図られている。また、全ての燃料油タンクは二重船殻内に配置され、環境汚染に配慮した設計となっている。

主機関は電子制御となる三菱スルザー 11RT flex 96C を採用しており、航海速力は25.25ノットである。貨物倉は機関室前方に7区画、機関室後方に2区画が配されており、甲板上積み付けを含む計画最大コンテナ積載数は8110TEUである。

1.2 規則適合・検査状況

本船は建造時において、本船の旗国であるバハマ政府の代行権限を持つ日本海事協会への入級が申請され、本船の構造は日本海事協会の定める鋼船規則及び鋼船規則検査要領に基づく設計図面の承認、及び製造中登録検査の実施によってこれを満足することが確認されている。

なお、上記規則に基づく図面承認の一環として、船体横強度評価、曲げ捩り強度評価、疲労強度評価の為に直接強度計算が実施され、いずれも要件を満足する事が確認されている。また、上記規則への適合に合わせて、船体強度に関するIACSの統一規則(IACS Unified Requirement)への適合が確認されている。

1.3 事故時の状況

コンテナ運搬船「MOL COMFORT」(以下、事故船という)の運航船社の報告によれば、事故船は風力7の南西風有義波高5.5mのインド洋上を、シンガポールからサウジアラビアのジェッダ港に向けて、機関回転数79rpm、速力約17ノットで航行中の2013年6月17日07時45分(世界時+5時間)頃、船体中央部に亀裂を生じ、船艙内へ浸水、自力航行不能となった。乗組員26名は救命艇で自船を離れ救助されたが、船体は中央部で分断し漂流開始、その後公海上(水深3000~4000m)で沈没した。また、事故船上のVoyage Data Recorder、ログブック及びバラスト漲水履歴などの記録類を、沈没に伴い滅失した。

浸水警報の探知箇所は、まず、船底二重底部中心線付近のダクトキール内で浸水を探知し、その約2分後に船体中央部の船底二重底の上部に当たるNo.6 Cargo Holdで浸水を探知した。また、図1.3.1から亀裂の進展方向は、No.6 Cargo Holdの位置で船側において船底側から上部に向かっている。以上の情報から、船体折損の起点を、船体中央部No.6 Cargo Holdの下の船底二重底部の船底外板と推定した。



図 1.3.1 事故時の事故船の状態（亀裂の進展方向（商船三井提供））

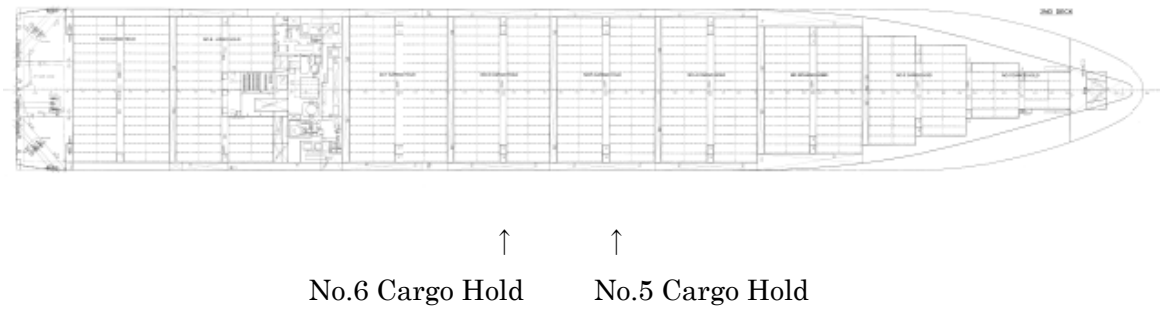


図 1.3.2 2nd Deck 平面図

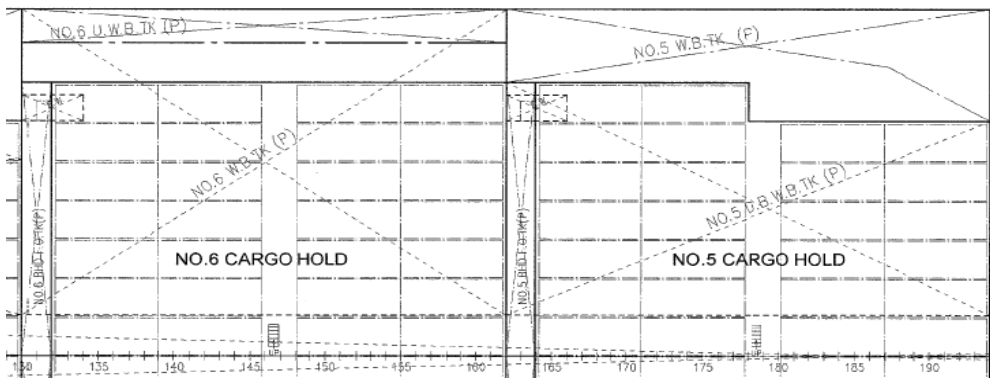


図 1.3.3 Tank Top Arrangement of No.5 & No.6 Cargo Holds (Port Side)

1.4 同型船の安全点検結果等

事故船が沈没して船体や貨物の検証ができず、船上の記録類も滅失したため、同型船の船底外板に関する安全点検等から何らかの情報を得られるか調査した。事故後に行われた同型船に関する安全点検結果等の聴取においては、船体中央部の二重底船底外板で船体横断面の中心線付近に高さ 20mm 程度の座屈変形（船底外板が船内側又は船外側に山形に変形）が船体横断面の中心線付近に見られるなどの情報を得た。なお、これらのコンテナ船は既に予防的な安全強化策として船体強度を大幅に引き上げる船体構造の強化工事などを実施している。なお、同型船は事故船の運航船社が運航している 6 隻及びその他の 4 隻について、安全対策の検討との委員会の目的から協力を得て調査したもので、いずれの同型船も日本籍ではなく、報告書に記載した以外の各同型船に関する情報は開示しない。このような二重底船底外板の変形は、その変形量と発生頻度には個船差があるが比較的軽微なものも含めると、事故船の運航船社が運航している 6 隻の内 2013 年就航の 1 隻を除く 5 隻及び他の 4 隻中の 1 隻の同型船に見られた。

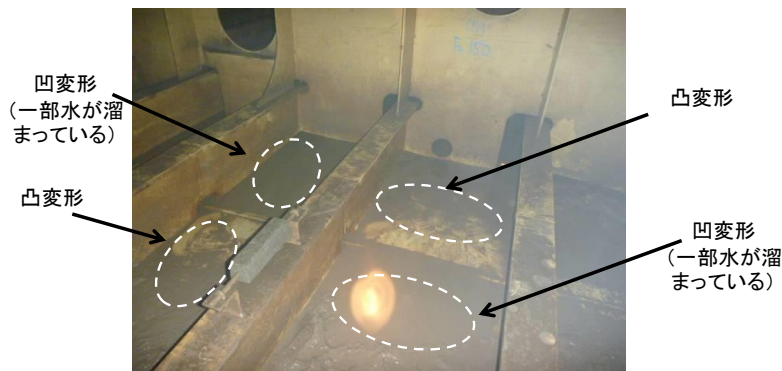


図 1.4.1 事故船の運航船社が運航している同型船で観察した船体中央部船倉二重底外板の座屈変形の一例（商船三井提供）

図 1.4.1 は事故船の運航船社が運航している同型船で観察された変形の一例で、船底外板の座屈変形は外板が船内側又は船外側に山形に変形していたもので、縦通肋骨の間の板材に見られ、縦通肋骨は変形していない。

事故船の船倉二重底部船底外板に変形があったか否かについては、事故船の安全管理

システムにおけるアフロート（停泊）状態の船体保守記録を調査した。調査の結果、船体折損の起点と推定した船体中央部 No.6 Cargo Hold の下の船底二重底部の船底外板に変形を観察した旨の記録は無かったが、より船首側の位置となる No.5 Cargo Hold の下の船底二重底部の船底外板の Fr.182 近傍のバット継手部付近の船底外板に座屈変形が右舷側及び左舷側とも 2010 年 1 月 4 日以降に複数回記録されている。なお、補修を行った記録が無いことから、事故時にも当該変形は存在していたと考えられる。また、船級による入渠時の検査においては、船底外板の座屈変形に関する記録は無い。

この節の詳細情報については、中間報告書 2.～4.参照。

2 シミュレーション計算による事故船の折損及び船底座屈変形の再現

2.1 シミュレーション計算の方法

事故船の折損をシミュレーション計算で再現するため、当時の気象・海象データから事故当時の海象を推定し、事故船に作用する荷重をシミュレーション計算より推定した。また、船体中央部を対象として弾塑性解析を実施し船体強度を推定した。作用荷重と船体強度を比較することで事故発生の可能性を検証した。

作用荷重のシミュレーション計算では、今まで規則において直接的には考慮されていなかったホイッピング荷重を考慮するとともに、荷重シミュレーションのベースとなった気象・海象データの誤差を考慮し事故当時の海象のばらつきを考慮した。さらに静水中縦曲げモーメントに対するコンテナ重量のばらつき（申告重量と実重量のギャップ）の影響を考慮した。シミュレーション計算による作用荷重は、船速や海象条件等により増減する[1]。

船体強度の推定は船体中央部を対象とした弾塑性解析を行った。解析においては縦曲げモーメントに加え、船底水圧やコンテナ荷重等の船底構造における応力の 2 軸性を含む面外荷重（横荷重）の影響を考慮した（別添 2 参照）。さらに船体構造に用いた鋼材の降伏点のばらつき影響や船底強度部材（ボトムロンジ）の溶接残留応力影響、事故船の同型船で発見された船底外板の座屈変形と類似の変形モードが事故船にも存在していた可能性を考えその影響を考慮した。シミュレーション計算による船体強度は、鋼材の降伏点等により増減する[2]。

[1]作用荷重のシミュレーション計算方法（NMRIW）は、各種流体力を時間ステップ毎に求めることにより波高に対する非線形性を考慮するもので、詳細は中間報告書 6.2.2 参照。

[2]船体強度のシミュレーション計算方法（LS-Dyna）及び考慮した不確実性要素については、NK 報告書第 3 章参照。

2.2 事故船の船体折損の可能性の確認

中間報告書においては、折損事故の原因を推定するに至っていないことから、荷重及び船体強度に関するシミュレーション計算において不確実性要素を考慮する必要があることを指摘していた。委員会委員の日本海事協会は、中間報告書を受けて不確実性要素を考慮した事故発生の可能性の検討を実施し、結果について、委員会に以下の報告を行った。

- ・折損事故発生の可能性について、鋼材降伏点や事故当時の海象条件、コンテナ申告重量と実重量の差といった不確実性要素のばらつきを考慮した荷重と強度の検討を行った。
- ・その結果、事故当時にあつて強度（縦曲げ最終強度）を荷重（縦曲げモーメント）が上回り事故が発生することが、非常に低い確率ではあるが現実として起こり得るという結論を得た。

事故発生の可能性を検証するため、気象・海象データの誤差による事故当時の海象のばらつきを考慮し、船速、波高（有義波高）及び平均波周期の条件を変更して作用荷重のシミュレーション計算を行い、船体強度のシミュレーション計算との対比を行った。船速及び海象条件（有義波高、平均波周期、波向き）の設定は、事故発生（折損）の可能性を指摘したNK報告書の条件が特異な結果を導くものではないことを確認するため、波向き以外の条件を変更して検討を行った。その結果、表 2.2.1 及び図 2.2.1 のとおり事故当時において荷重が強度を上回る船体折損の可能性があることを確認した。

表 2.2.1 事故発生の可能性検討

	中間報告書	NK 報告書	今回シミュレーション
船速	17 ノット	17 ノット	15 ノット
波高（有義波高）	5.5 m	7.5 m	8 m
平均波周期	10.3 秒	15 秒	12.5 秒
波向き	左斜前	正面向波	正面向波
船体強度のばらつき	—	考慮した（NK 報告書 3.3 参照）	考慮した（NK 報告書 3.3 参照）
強度計算時の積み付け条件	事故時積み付け	事故時積み付け（NK 報告書 3 章）	1 Bay Empty
解析結果	折損しない	折損の可能性有り	折損の可能性有り

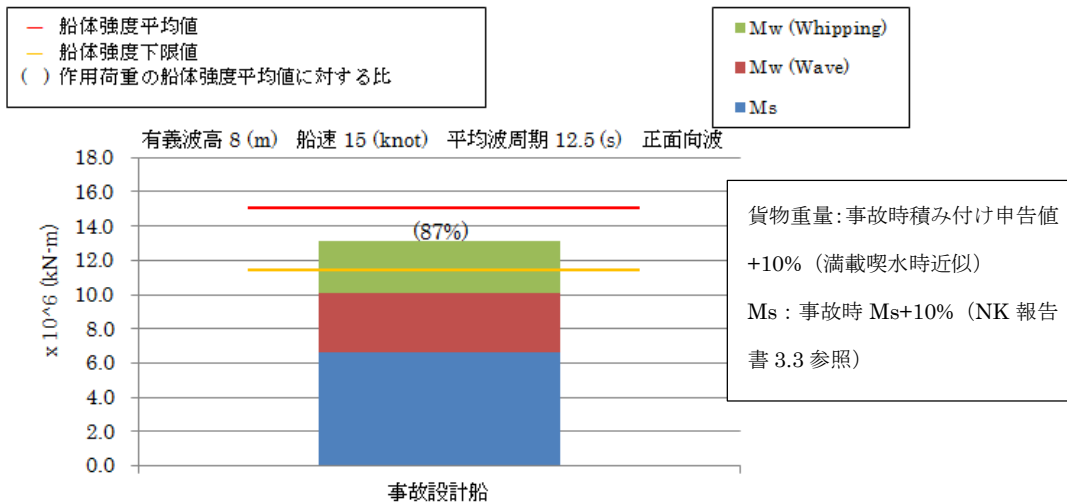


図 2.2.1 事故発生の可能性検討

2.3 船底座屈変形の再現

事故船の同型船の船底外板に高さ 20mm 程度の座屈変形を発見している。この現象を再現するため、事故船の船体強度のシミュレーションにおいて、船体強度平均値の計算条件で、かつ、船底外板に建造工作上有り得る微小な初期変形を与え、船体強度より少し低い荷重を与えた。その結果、船底外板の座屈変形が発生し得ること、また同じ荷重の繰り返し負荷により変形量が増加し得ることがシミュレーション計算により判明した。ここで言う作用荷重の繰り返しは、別添 3 の初期変形を与えた上で船体強度平均値 90% (別添 3 の初期変形を与えた場合の船体縦曲げ最終強度の 95.2%) の繰り返しの場合、まず船体強度平均値の 90% の作用荷重を加え一定時間保持した後、静水中曲げモーメント (Ms) まで除荷し、更に同様の手順で荷重の再負荷、除荷を繰り返すことである。船底座屈変形の再現は、除荷時の変形で確認したもので、繰り返し負荷においては変形が累積し、変形量が増加した。なお、変形量の算出値はシミュレーション計算で用いた解法の特徴から大きめの値を示す傾向があることに留意する必要がある。図 2.3.1 及び別添 3 を参照。

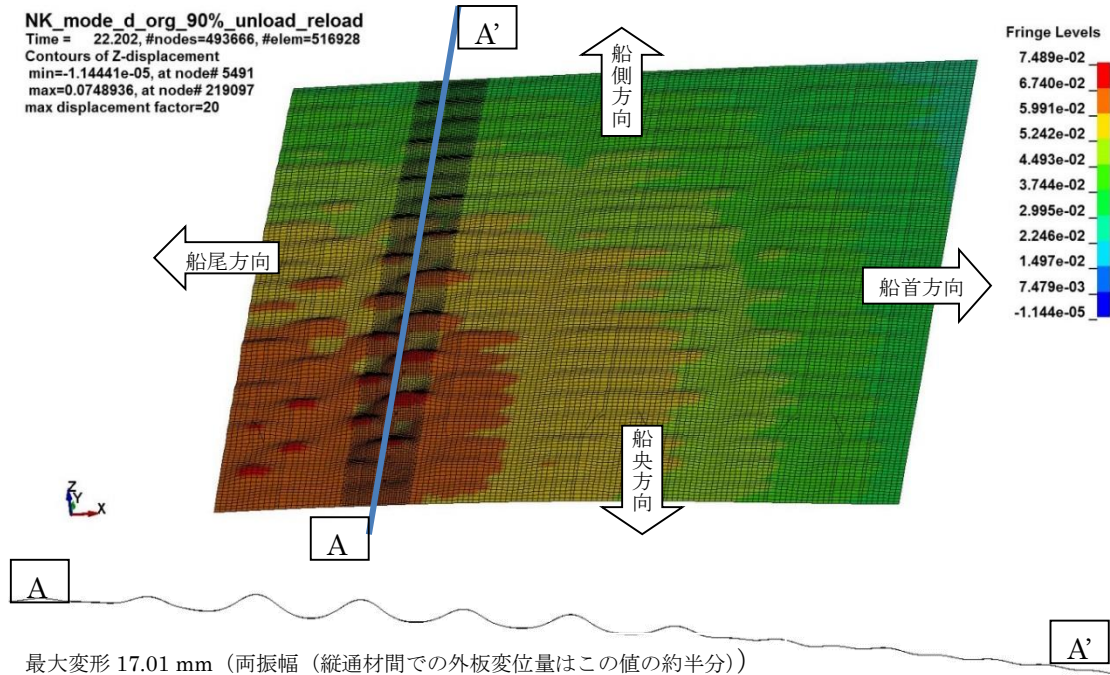


図 2.3.1 船底座屈変形のシミュレーション計算による再現図例

(船体強度平均値の 90% (別添 3 の初期変形を与えた場合の船体縦曲げ最終強度の 95.2%) を繰り返し、4 回目の除荷をした時点)

個々の事故船の同型船の船体強度には、2.1 で述べたようにばらつきがあり得るため、船底座屈変形を発生させた作用荷重の値については一概に言えないが、船体折損に至らないものの船底座屈変形が事故船の同型船に発生し得ることがシミュレーション計算から確認できた。

3 事故船とは異なる設計の大型コンテナ船の安全性

3.1 船底の安全点検

中間報告書 9. で提言した就航中の大型コンテナ船 (概ね船幅 45m 以上、8000TEU 積み程度以上) についての可能な範囲での船底外板の安全点検の結果、事故船とは異なる設計の大型コンテナ船について、船底座屈変形の報告は無かった。

3.2 シミュレーション計算による船体強度と作用荷重の対比

事故船とは異なる設計の大型コンテナ船の安全性を検討するため、これらの大型コンテナ船についても、船体中央部を対象とした弾塑性解析による縦曲げ最終強度の推定と船速及び海象条件を変化させた作用荷重シミュレーションを実施し、強度と荷重の比較検討を行った。なお、作用荷重のシミュレーションにおいては波向きは正面向波とし貨

物積付けを満載喫水に対応する積付けとした。事故船が 8000TEU 級であったことから強度と荷重の比較検討は 8000TEU 級を中心に行ったもので、対象とした大型コンテナ船を表 3.3.1 に示す。これらは安全点検の結果船底外板に変形が無かったことから、強度のシミュレーションにおいて船底外板の変形影響を考慮していない。

表 3.3.1 強度と荷重の比較検討に用いた大型コンテナ船

	(1)船 (事故船)	(2)船	(3)船	(4)船
積載コンテナ数	8110 TEU	8600 TEU	8100 TEU	6000 TEU
NK 報告書 図 4-3	A	C	D	—

対象船について事故船に関する図 2.2.1 と対応する強度と荷重の比較検討の結果を図 3.3.1 に示す。事故船以外の設計の大型コンテナ船は、事故船の場合 (図 2.2.1) と比べ船体強度に十分な余裕があることが確認できた。

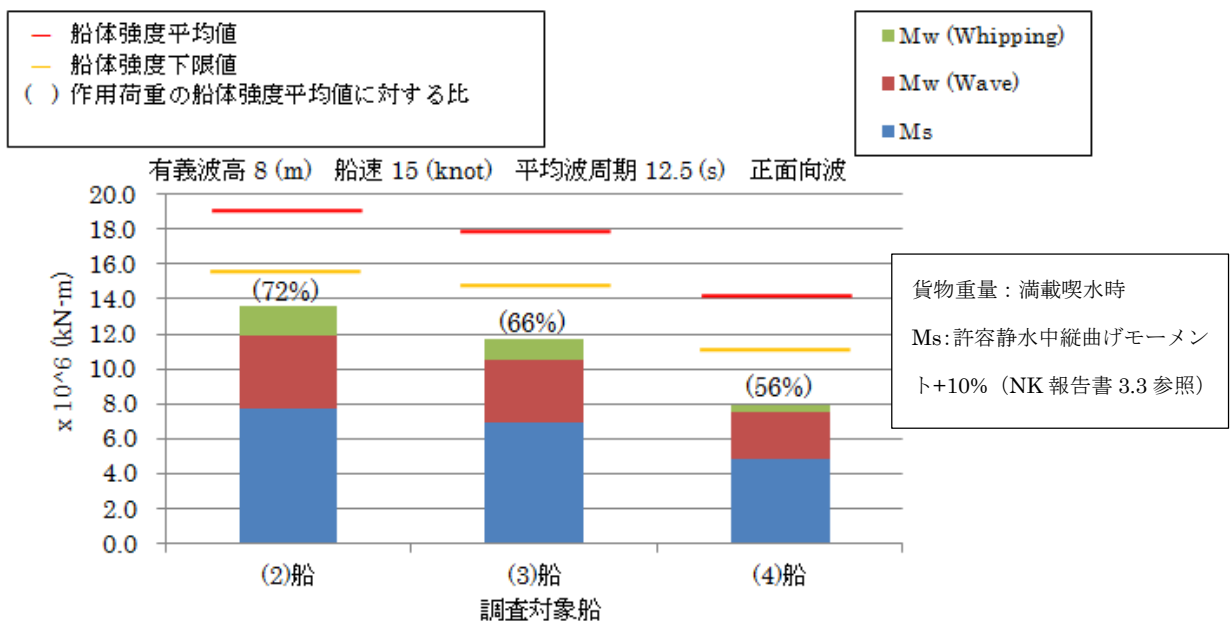


図 3.3.1 事故船以外の設計の大型コンテナ船の船体強度と作用荷重

事故船とは異なる設計の日本海事協会が検査した大型コンテナ船については、船底外板に変形が無いことを確認し、また、シミュレーション計算を行い、事故船の場合と比べて船体強度に十分な余裕があることを確認した。NK 報告書でも横荷重 (面外荷重) の影響を考慮した縦曲げ最終強度評価と船底外板防撓パネルの座屈崩壊強度評価を実施し、船体強度の余裕について評価している (NK 報告書 4.3.3)。その他の大型コンテナ船について、船底外板の点検など同様の安全確認が有効であると考えられる。

4 シミュレーション計算結果の整理と規則に関する検討

船速の速い大型コンテナ船の安全性について、作用荷重と船体強度のシミュレーション計算結果を、規則で考慮するに値するかの観点で 4.1 から 4.3 に検討した。

4.1 船級規則について

大型コンテナ船の構造については、海上人命安全条約第 II-1 章第 3-1 規則により、主管庁により認められた船級協会の構造要件に従い、設計され、建造されることとなっている。日本海事協会を含む主要な船級協会は IACS を構成し、そこで船体強度などに関する統一規則を策定しており、事故船（バハマ籍）に適用された船級規則である日本海事協会の規則は IACS の統一規則を満足している（中間報告書 2. 2）。従って、大型コンテナ船折損事故に関する船級規則の検討においては、日本海事協会の規則とともに IACS の統一規則（IACS Unified Requirement）の関連規則を対象とした。

4.2 船体強度

船体強度（船体縦曲げ最終強度）においては、船底構造における応力の 2 軸性を含む横荷重の影響により船体強度が低下することを考慮する必要がある。また、同型船の船底部で発見された局所的な座屈変形を防止するためにも、縦曲げ応力と横荷重影響双方を含む 2 軸圧縮応力が、防撓パネル座屈崩壊強度相関関係（NK 報告書図 4-6 参照）を超えることのないよう、適切な安全余裕を有する設計とする観点も上記の考慮において必要である。

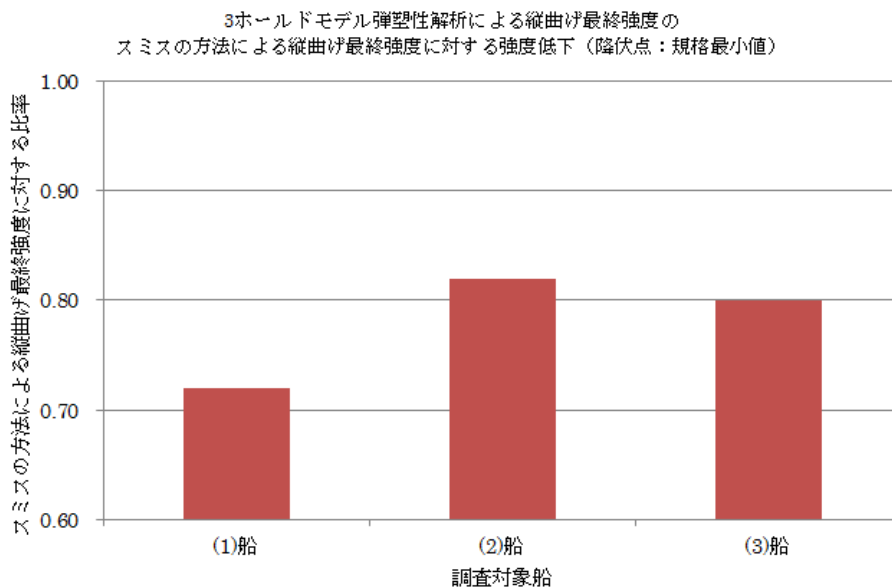


図 4.2.1 船体強度の横荷重影響による低下（NK 報告書図 4-4 より作成）

横荷重の船体強度（船体縦曲げ最終強度）への影響については、今回シミュレーション計算で用いた解析手法がより現実の現象に近く、船底水圧やコンテナ荷重といった横荷重（面外荷重）による船底二重底の横強度が船体強度（船体縦曲げ最終強度）に密接に関係している（NK 報告書 4.2.3）。

このため、船体強度（縦曲げ最終強度）において、船底構造における応力の 2 軸性を含む横荷重の影響を考慮する規則とする。

4.3 作用荷重

作用荷重においては、以下の諸点を考慮する必要がある。

.1 ホイッピング荷重

作用荷重のシミュレーション計算におけるホイッピング応答影響の一例を別添 4 に示す。ホイッピング応答影響により大きな作用荷重が発生する場合がある。このような現象は従来から認識されていたが、これまでの技術的知見の蓄積による規則では、国際的な規則においても、直接的には考慮されておらずホイッピング応答影響の定量的評価としては不十分であった。

作用荷重については、今まで規則において直接的には考慮されていなかったホイッピング応答影響を考慮する必要がある。現在の IACS の縦強度に関する規則（IACS Unified Requirement, S11: Longitudinal Strength Standard）でも、ホイッピング応答影響を直接的には考慮していない。

このため、ホイッピング荷重の構造強度に与える影響を規則で扱うための知見の蓄積に基づき縦強度に関する規則において直接的に考慮する規則とする必要がある。

.2 波高又は船速の増加に伴う作用荷重の増加

シミュレーション計算における作用荷重に対する波高影響の一例（船速一定）を図 4.3.1 に、作用荷重に対する船速影響の一例（波高一定）を図 4.3.2 に示す。

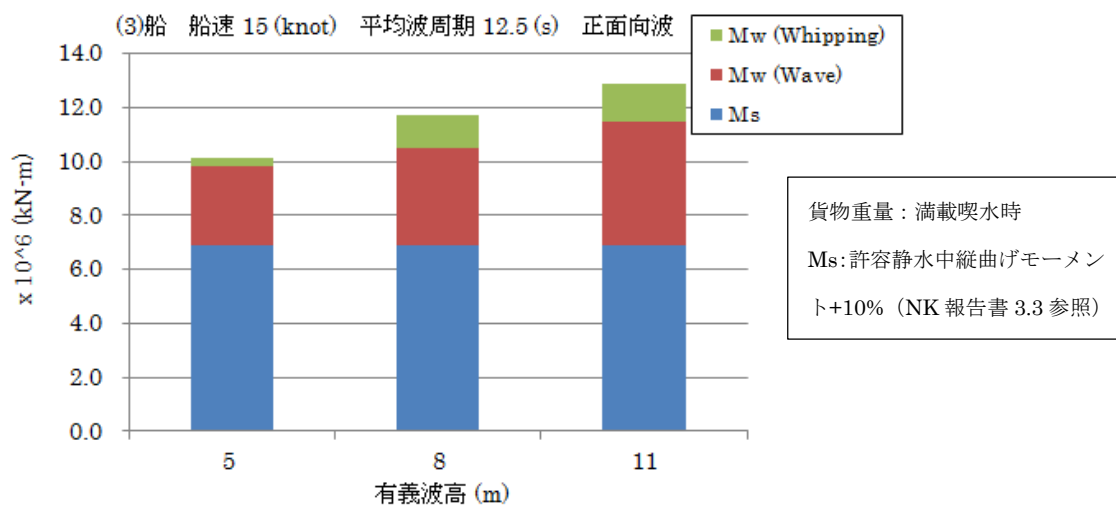


図 4.3.1 作用荷重に対する波高影響の一例 (船速一定)

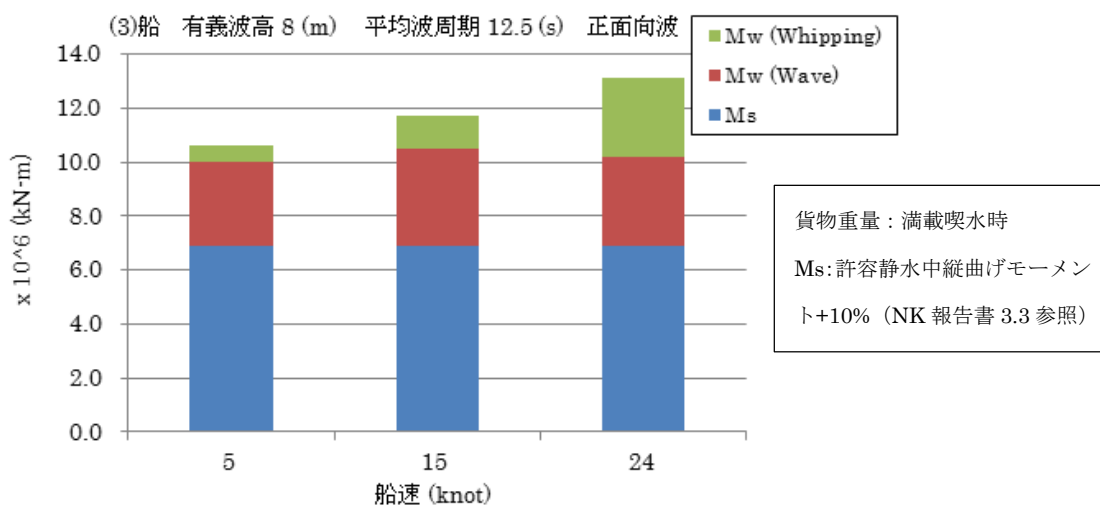


図 4.3.2 作用荷重に対する船速影響の一例 (波高一定)

作用荷重は海象条件及び船速により増減する。他方、IACS の縦強度に関する規則 (IACS Unified Requirement, S11: Longitudinal Strength Standard) の波浪曲げモーメントは、これまでの損傷経験等の就航実績を踏まえ、荒天回避などの操船影響を考慮した値であるが、対応する波高、波周期、船速は明示していない (図 4.3.3)。

このため、縦強度に関する規則の技術的背景である (海象条件等) を参考情報とすることができるよう、その提示の在り方を検討する必要がある。

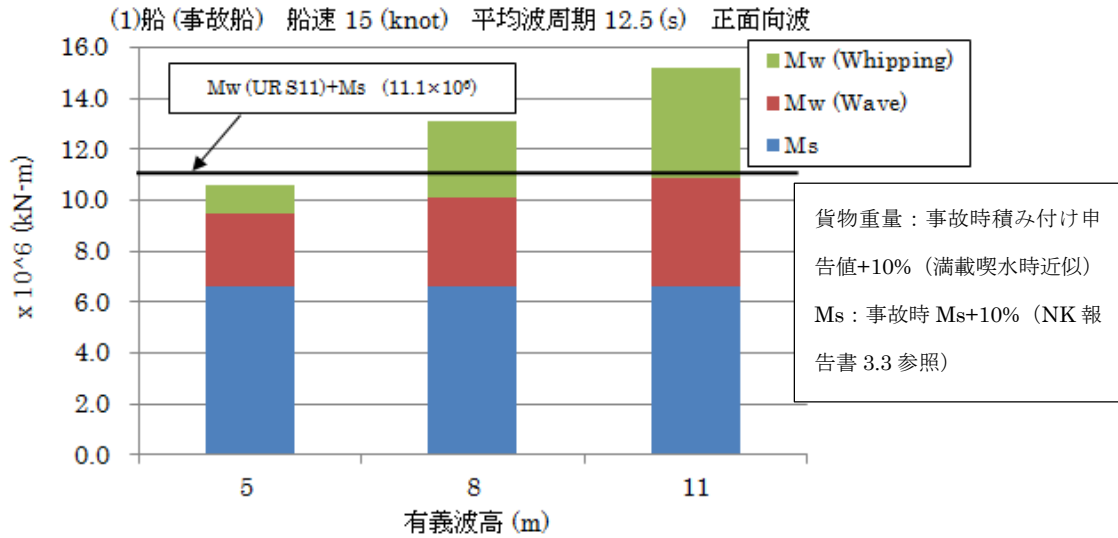


図 4.3.3 船級規則の作用荷重 (Mw(URS11)) との関係

5 まとめ

事故船とは異なる設計の日本海事協会が検査した大型コンテナ船については、船底外板に変形が無いことを確認し、また、シミュレーション計算を行い、事故船の場合と比べて船体強度に十分な余裕があることを確認した。その他の大型コンテナ船について、船底外板の点検など同様の安全確認が有効であると考ええる。(3 参照)

大型コンテナ船 (8000TEU 級以上) の規則に関する提言 (4 参照)

安全対策を国際的に実施するため、日本海事協会の規則及び IACS の統一規則を含む大型コンテナ船の構造強度に関する船級規則に関し、以下の改正や検討を早期に行うことを提言する。

- ・ 横荷重 (面外荷重) による影響は船体縦曲げ最終強度に密接に関係しているため、船底構造における応力の 2 軸性を含む横荷重 (面外荷重) の影響を考慮する船体縦曲げ最終強度の規則とすること。
- ・ ホイッピング応答の影響を直接的に考慮する縦曲げ強度の規則とすること。
- ・ 縦強度に関する規則の技術的背景 (海象条件等) の提示の在り方を検討すること。

別添1 委員名簿

【座長】（敬称略）

角 洋 一 横浜国立大学 名誉教授

【委員】（五十音順 敬称略）

岩 野 淳 一	日本郵船株式会社 技術グループ グループ長
上 田 直 樹	三菱重工業株式会社 交通・輸送ドメイン 船舶・海洋事業部 副事業部長
川 越 美 一	株式会社商船三井 執行役員
木戸川 充 彦	日本海事協会 業務執行委員 船体部長
小 林 一 也	川崎重工業株式会社 船舶海洋カンパニー 技術本部長
高 平 智 明	ジャパンマリンユナイテッド株式会社 商船事業本部 基本計画部長
田 村 兼 吉	独立行政法人 海上技術安全研究所 研究統括主幹
中 野 豊 久	川崎汽船株式会社 技術グループ グループ長
藤久保 昌 彦	大阪大学大学院工学研究科 教授
藤 田 均	今治造船株式会社 常務取締役 設計本部長

【事務局】

国土交通省海事局安全政策課

別添2 船底二重底に作用する横荷重（NK 報告書付録 9 に準拠）（2.1 関係）

コンテナ船の縦曲げは一般にホギング状態（船体全体が船首尾方向に山形に変形すること）が主であり、デッキ側には引張りの荷重が船底側には圧縮の荷重がほとんど常に作用している。この傾向は、特に機関室とデッキハウスがセミアフト配置である 10,000TEU クラス程度までのサイズのコンテナ船で顕著である。

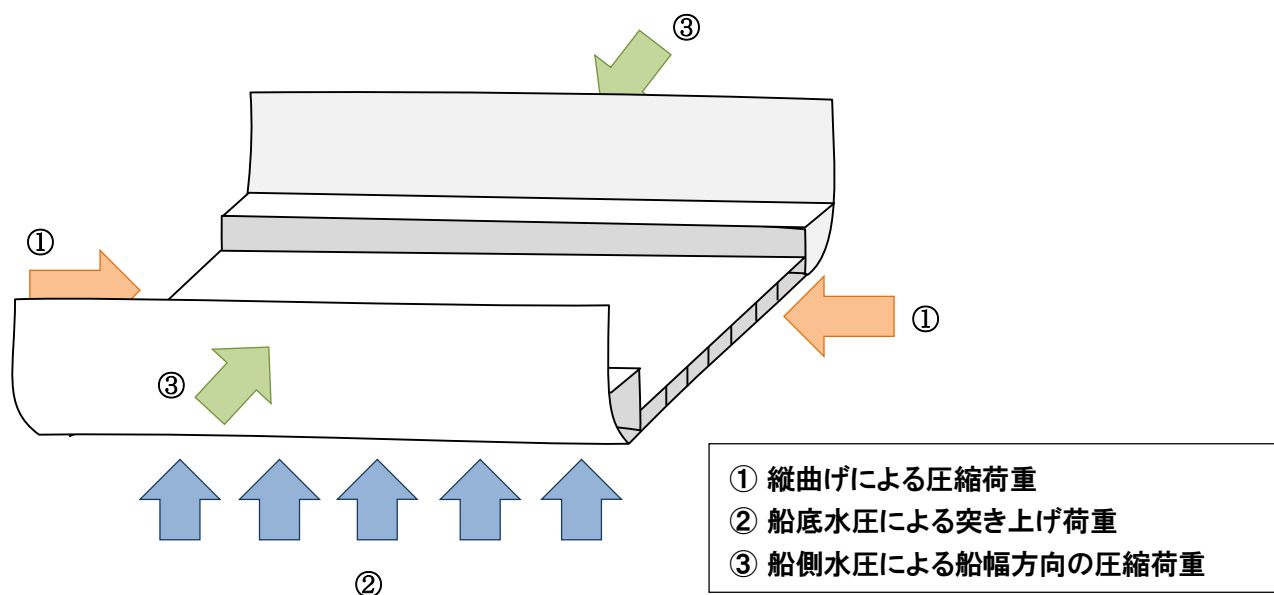
ホールド二重底に作用する荷重としては、船底水圧、コンテナ荷重、二重底に積載されるバラスト水の重量や燃料油の重量がある。喫水に比べ貨物重量が相対的に小さいため、ホールド二重底に作用する横荷重（面外荷重）としては船底水圧による下からの突き上げ荷重が支配的である。船底水圧は喫水に相当する静水圧と波浪変動圧からなる。二重底にバラスト水や燃料油が積載されている場合にはこれらによる荷重は下向きとなるため、船底水圧による上向きの荷重は緩和される。（比重の関係でこの影響はバラスト水の方が燃料油よりも大きい。）

また、船幅方向には船側に作用する水圧による圧縮荷重が作用している。

このように二重底には図別 2-1 に示すように、

- ① 縦曲げによる圧縮荷重
- ② 船底水圧による下からの突き上げ荷重
- ③ 船側水圧による船幅方向の圧縮荷重

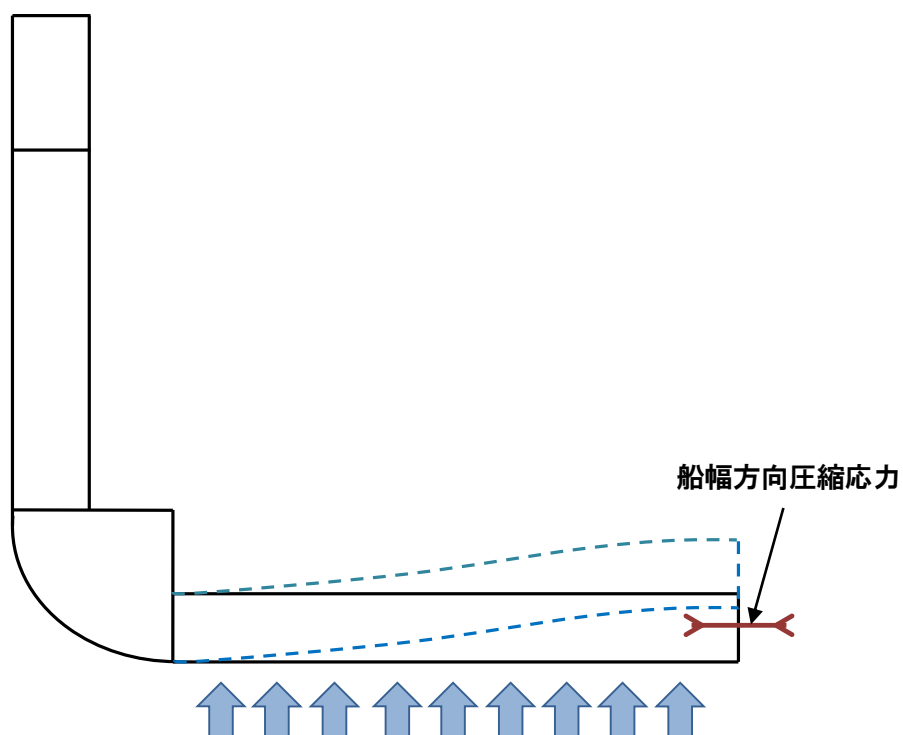
の 3 つが主な荷重としてほぼ常に作用していると言うことができる。



図別 2-1 コンテナ船の二重底に作用する荷重

①の縦曲げによる圧縮荷重により、船底外板には船長方向の圧縮応力が生じる。また③の船幅方向の圧縮荷重によって、船底外板には船幅方向の圧縮応力が生じる。

一方、②の船底水圧による下からの突き上げ荷重によって、ボトムロンジ付き船底外板、縦通肋骨付き内底板、ガーダーとフロアで構成される二重底パネルは、図別 2-2 のような上に凸の変形を生じる。これにより船体中心線近傍の船底外板では船幅方向の圧縮の応力が生じる。この二重底パネルの変形は、船長方向には部分隔壁近傍で最大となるため、この辺りで船底外板には船長方向の圧縮応力が生じる。



図別 2-2 船底水圧により船底外板に生じる応力

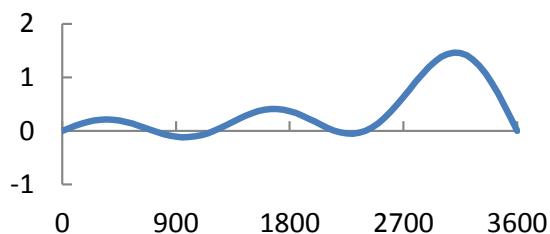
以上より、コンテナ船の二重底の船底外板はホールド中央部（船体中心線近傍、部分隔壁近傍）にあっては、船長方向には①（縦曲げによる圧縮荷重）による圧縮応力と、②（船底水圧による突き上げ荷重）による圧縮応力が重畳し、船幅方向には②（船底水圧による突き上げ荷重）による圧縮応力と③（船側水圧による圧縮荷重）による圧縮応力が重畳することになる。

別添3 船底座屈変形の再現 (2.3 関係)

シミュレーション計算については、2.1 の船体中央部を対象として弾塑性解析を用いた。ただし、積み付け状態を1ベイ・エンプティ状態（バラスト漲水無し）とした。

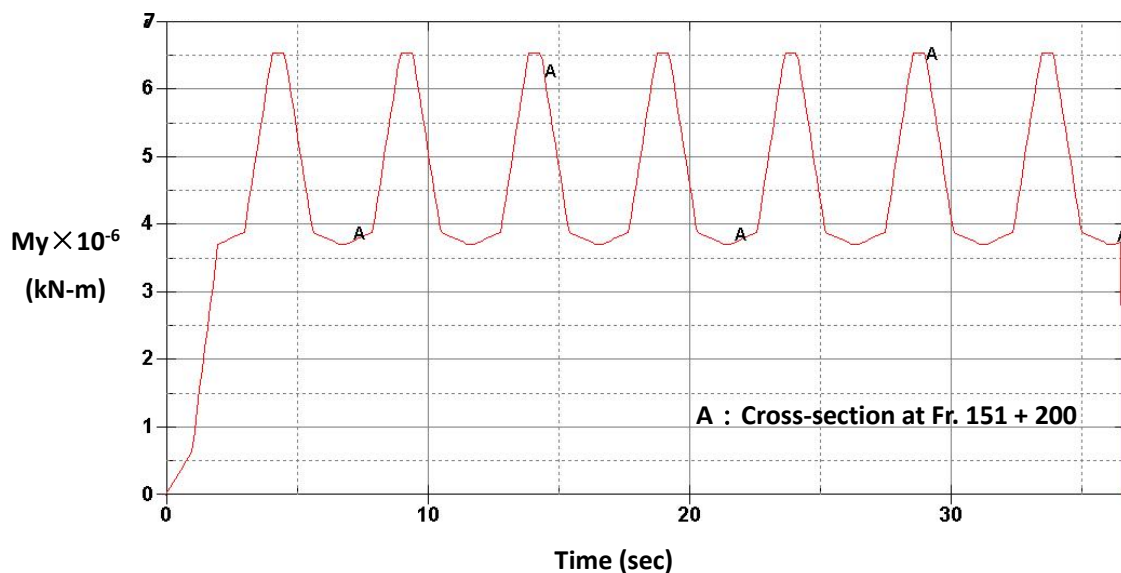
船底外板に与えた微小な初期変形

変形量：外板の長辺方向（3600mm）に、板厚の1/50の1半波から5半波の微小初期変形を重畳させる。二軸応力下では、応力比に応じて様々な半波数の座屈が生じ得るので、各モードを均一に加算したものである。微小初期変形の断面形状は、図別3-1となる。



図別 3-1 微小な初期変形の形状（断面、単位：mm）

作用荷重の繰り返しパターン



図別 3-2 作用荷重の繰り返しパターン（縦曲げモーメントは片舷分）

船底座屈変形の再現と変形量の増加

表別 3-1 船底座屈変形の発生と増加（海象条件等との関連を想定していないシミュレー

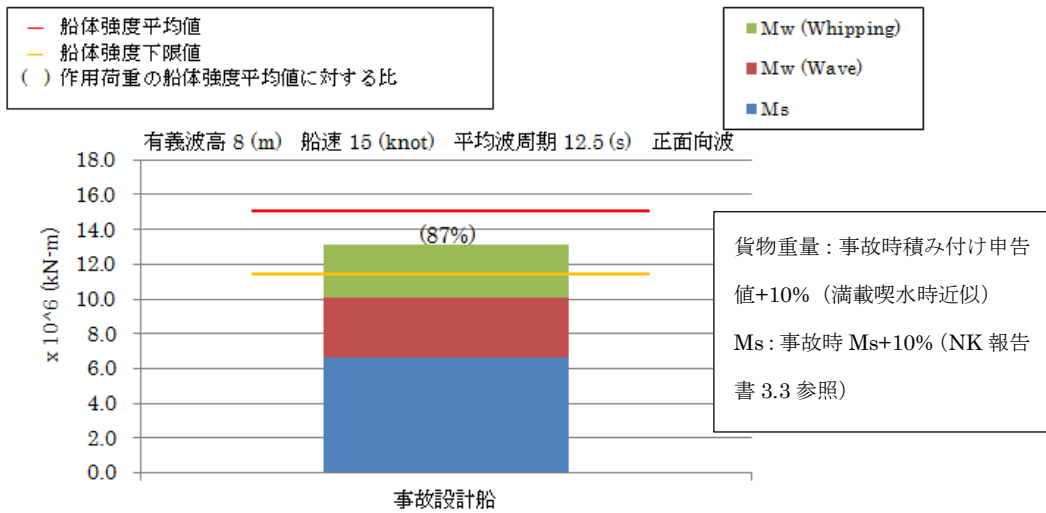
シヨンを実施する上での荷重の設定である。)

船体強度平均値に対する繰り返し負荷荷重	92.5%	91.5%	90.0%
図別 3-1 の初期変形を与えた場合の船体縦曲げ最終強度に対する繰り返し負荷荷重	97.8%	96.8%	95.2%
最大変形（両振幅）	21.2mm（1回目除荷）	17.3mm（1回目除荷）	14.6mm（1回目除荷）
変形量増加の過程	↑	18.7mm（2回目除荷）	17.0mm（4回目除荷）
20mm を超えた時点	↑	20.2mm（3回目除荷）	20.3mm（9回目除荷）

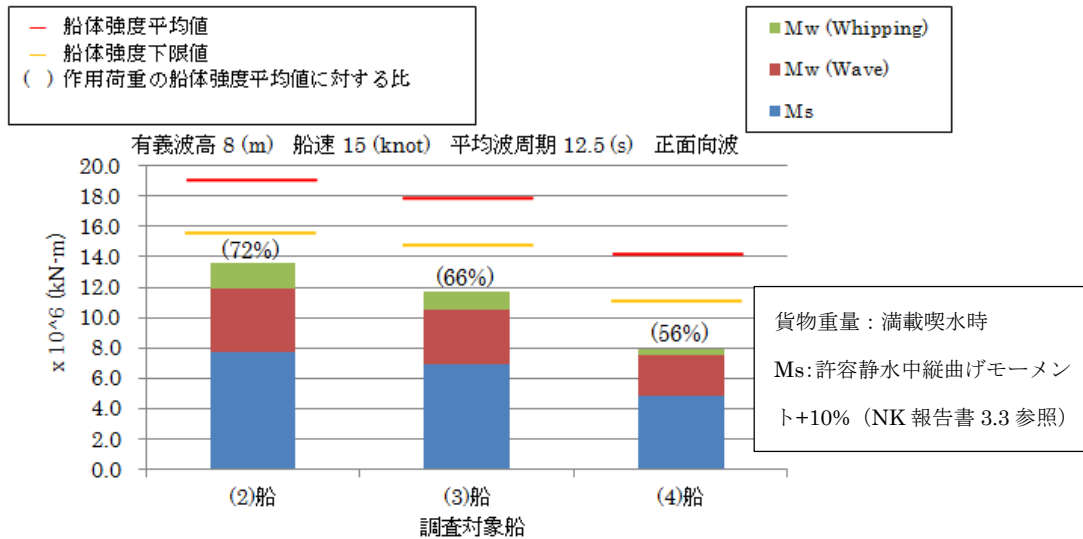
なお、変形量の算出値はシミュレーション計算で用いた解法（中間報告書付録 3 の陽解法）の特性から大きめの値を示す傾向があることに留意する必要がある。

別添4 ホイッピング荷重の考慮 (4.3.1 関係)

作用荷重のシミュレーション計算におけるホイッピング応答影響の一例を図別 4-1 及び図別 4-2 に示す。ホイッピング応答影響により大きな作用荷重が発生する場合がある。



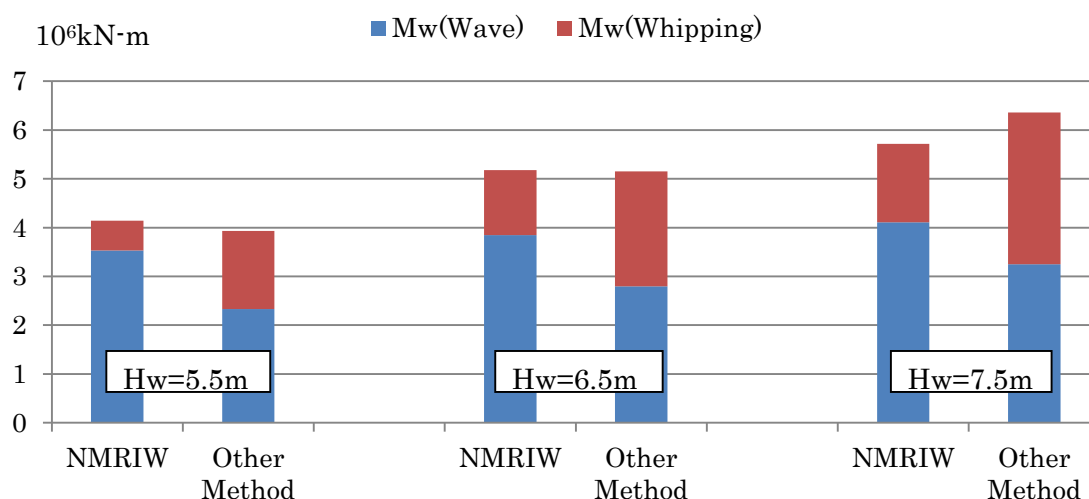
図別 4-1 本文図 2.2.1 の再掲



図別 4-2 本文図 3.3.1 の再掲

今まで規則において直接的には考慮されていなかったホイッピング荷重の考慮に関し、今回シミュレーション計算で用いた解析方法 (NMRIW) と他の解析方法の比較例を図別 4-

3に示す。比較例は、(1)船（事故船）の船速 17 ノット、正面向波、平均波周期 12.5 秒、事故時積付けの条件である。船速は同じであっても、波高（有義波高）の増加に伴い作用荷重を構成する波浪中縦曲げモーメント及びホイッピング荷重の合計が増加するが、解析方法によりホイッピング荷重の構成比及び絶対値に差異がある。



図別 4-3 ホイッピング荷重考慮の解析方法の比較例

((1)船（事故船）の船速 17 ノット、正面向波、平均波周期 12.5 秒、事故時積付けの条件)

作用荷重と船体強度の対比においては、今まで規則においてホイッピング荷重の影響は直接的には考慮していなかったもので、上記より、実船計測によるデータ収集の蓄積も技術情報として有益である。

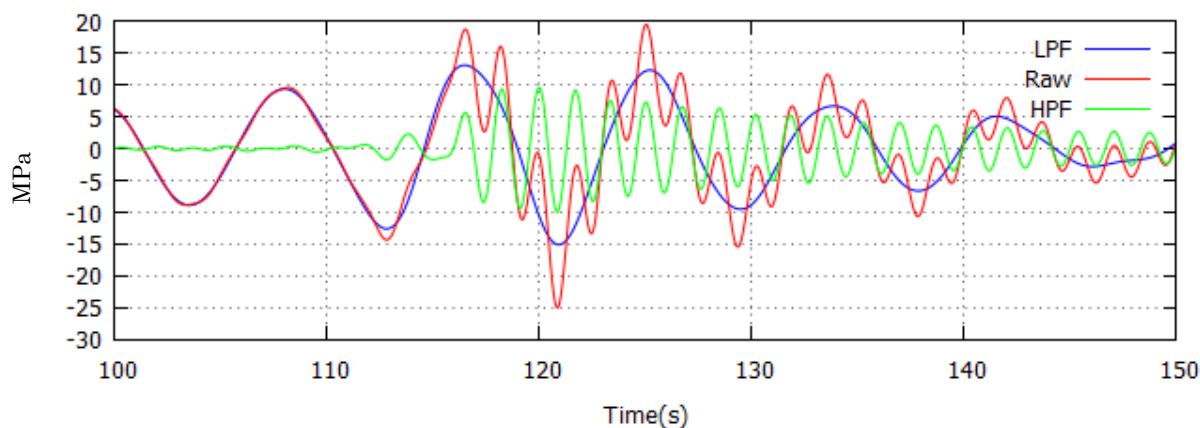
このため、委員において3隻の大型コンテナ船（8100TEU, 8200TEU, 9600TEU）を用いた実船計測を開始している。現在実施中の実船計測によるデータの一例を図別 4-4 及び 4-5 に示す。実船計測は通年の海象条件においてデータを収集する必要があることから、委員がこの実船計測の計測と解析を終了するのは 2015 年末から 2016 年になる。今後の実船計測データの解析においては、以下に焦点を当てるのが有益である。

- .1 波浪中におけるホイッピング荷重の構成比及び絶対値の把握
- .2 ホイッピング荷重の発生と海象条件及び船速の関係の把握
- .3 また、将来的な課題として、ホイッピング荷重の持つエネルギーが有限であることと船体崩壊挙動の関係に取り組むため（中間報告書 8. 3）[別 4-1]、時系列データ

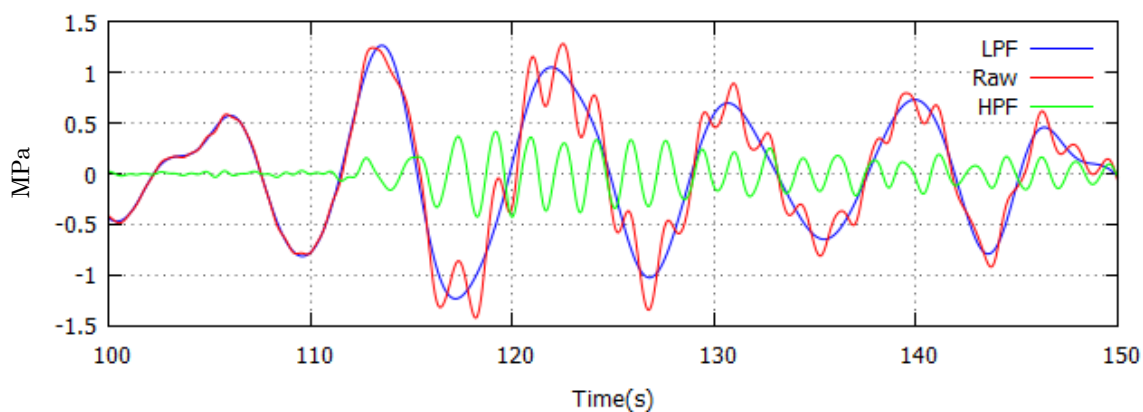
としても整理しておく

[別 4-1]作用荷重を構成するホイッピング荷重成分などには、図別 4-4 及び 4-5 のように成分毎の継続時間の差異を含む時系列での変動がある。この影響を船体崩壊挙動の関係において解析することは、船体構造安全の更なる検討に有意義であり、委員において基礎的な解析に着手している。

実船計測では、船底外板などに応力歪計や加速度計を設置してデータ収集を行っている。2014 年 5 月のデータから、船底外板の応力歪計（2 軸）による計測結果の 1 例を図別 4-4 及び 4-5 に示す。赤線の計測データから、振動数により、青線の Mw(Wave)の成分及び緑線のホイッピング荷重（Mw(Whipping)）の成分を分離したものである。



図別 4-4 船底外板船長方向応力



図別 4-5 船底外板船幅方向応力

参考：

シミュレーション計算においては、4.3.2 で記載のように大型コンテナ船がどのような海象にどのような船速で遭遇したかにより船体にかかる作用荷重が大きく異なる。また、荒天回避に関する国際的指針には追い波又は斜め追い波の際に復原性能を維持するための国際海事機関の指針（MSC.1/Circ.1228: Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions, 11 January 2007）があるが、これは作用荷重が大きくなる向波を対象としていない。参考情報として、大型コンテナ船の航行の一般的理解を以下にまとめた。

- ・大型コンテナ船は、省エネルギー運航や荒天に遭遇しないよう気象情報を活用した航路選定を一般に行っている。
- ・コンテナ船における荒天回避は、主としてコンテナ貨物の荷崩れや流出防止及び船首船底部露出等の防止が直接的な目的である。
- ・大型コンテナ船は主機出力が同サイズのタンカーやバルクキャリアーと比べてかなり大きいこともあり、荒天時の自然減速は生じにくい傾向にある。

付録 用語の定義

船級協会：船舶の検査を行う第三者機関。船体やその設備などを、船級協会の規則に基づいて検査し証明する。

日本海事協会：日本に本部を置く船級協会で、2014年11月時点で世界の商船総船腹量の約20%が日本海事協会に登録している。一般財団法人。略称 Class NK

IACS：国際船級協会連合（International Association of Classification Societies）。日本海事協会を含む国際的に主要な12の船級協会が構成する国際組織。ロンドンに常設事務局。

中間報告書：「コンテナ運搬船安全対策検討委員会 中間報告書」（国土交通省海事局、2013年12月）

日本語：http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji06_hh_000074.html

英語：http://www.mlit.go.jp/en/report/press/kaiji06_hh_000000.html

NK 報告書：「大型コンテナ船安全検討会 報告書」（日本海事協会、2014年9月）

日本語：(2014/09/30) of http://www.classnk.or.jp/hp/ja/press_release.aspx

英語：(2014/09/30) of http://www.classnk.or.jp/hp/en/press_release.aspx

有義波高 (H_w)：海洋波は、不規則な波高の連なりで構成されるので、ある地点で連続して波高を観測し、波高の高い方から順に全体の1/3の波高を選び、その平均値を有義波高と呼ぶ。目視で観測される波高は有義波高に近いので、一般に波高と言った場合は有義波高を指す。

作用荷重：本報告書において、船体中央断面に作用する縦曲げモーメントであり、以下の3成分より構成される。単位は[N·m]。

- **静水中縦曲げモーメント**：静水中において船体の自重、貨物重量、燃料、バラスト、浮力などにより生じる曲げモーメントである。本文中では **M_s** と記す。
- **波浪中縦曲げモーメント**：波浪中と静水中の水圧差及び慣性力により船体に生じる波浪の周期で変動する曲げモーメントであり、後述するホイッピング荷重の成分を含まないもの。本文中では、**M_w(Wave)**と記す。
- **ホイッピング荷重**：船体への波浪衝撃(スラミング)に誘起される船体振動(ホイッピング振動)により生じる曲げモーメントであり、ホイッピングモーメントとも呼ばれる。本文中では、**M_w(Whipping)**と記す。

縦強度統一規則の波浪曲げモーメント：IACS 統一規則の船体縦強度の規則（IACS

Unified Requirement, S11: Longitudinal Strength Standard) における波浪曲げモーメント。本文中図 4.3.3 で $M_w(\text{UR S11})$ と記す。

船体強度：この報告書において船体中央部縦曲げモーメントに対する強度で、代表値として以下の 2 つを考えている。単位は[N-m]。文脈により読み易いように船体強度（船体縦曲げ最終強度）と表現した箇所がある。

- **船体強度平均値**：使用鋼材の降伏点の平均値を計算上の降伏点として一律に採用し、そのばらつきや溶接残留応力影響などを無視した船体強度。NK 報告書付録 8 参照。
- **船体強度下限値**：建造に用いる鋼材の降伏点のばらつきの下限値（NK 規格最小値）を採用するとともに、溶接残留応力影響などを考慮した船体強度。更に事故船については、船底外板の変形による船体強度低下を最大 4%とした。NK 報告書 3.3 参照。

スラミング：荒天航行時、露出した船底あるいは船首フレア部が波面に没水する際に発生する衝撃現象。この衝撃によりその後、船体にホイッピング振動が発生することがある。