

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2022
課題番号：20K14960
研究課題名（和文）モニタリングデータを援用した信頼性解析による船体縦曲げ最終強度評価に関する研究

研究課題名（英文）Evaluation of Hull Girder Ultimate Strength by Reliability Analysis Using Monitoring Data

研究代表者
藤 公博（Toh, Kimihiro）
九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：80790716
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：2015年7月より発効された国際船級協会連合（IACS）が規定するタンカーとばら積み貨物船に関する調和共通構造規則（H-CSR）では、部分安全係数を導入することで一律かつ確定論的に船体縦曲げ最終強度を評価している。これに代わって確率論的に船体全体の強度を論じるために、本研究では初期不整や腐食による板厚減耗などが船体縦曲げ最終強度にどのように影響を及ぼすかについて信頼性解析に基づいて検討した。併せて、より現実に即した強度評価を今後行うための実測データの取得に向けて実船計測を試行するとともに効率的な計測手法の検討や機器の選定を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、船体構造強度評価に関して、現行の確定論的な規則に代わる確率論を用いた検討を実施した。その結果の一例として、初期不整や板厚減耗による構造強度の経年変化を示した。これらは船舶のメンテナンスなどに資する情報となるため、適切かつ有効に利活用できれば船舶の長寿命化に繋がり得る。また本研究で得られた知見を追検討を通じてさらに深めることで、より合理的なアプローチに基づく船体構造強度の評価手法の確立が望まれる。

研究成果の概要（英文）：Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers (CSR BC & OT) published by the International Association of Classification Societies (IACS), which came into force in July 2015, evaluates the hull girder ultimate strength uniformly and deterministically by introducing a partial safety factor. In contrast to this evaluation procedure by CSR BC & OT, to discuss the structural strength of ship hulls probabilistically, the effect of the initial imperfection and the plate thickness reduction due to corrosion on the hull girder ultimate strength was investigated based on the reliability analysis in this study. Also, to acquire actual measurement data for conducting more realistic strength evaluations in the future, some trial measurements on actual ship hulls as well as examination of efficient measurement methods or equipment were performed.

研究分野：構造強度

キーワード：船体縦曲げ最終強度 信頼性解析 構造モニタリング スミス法 モンテカルロ法

1. 研究開始当初の背景

船体縦曲げ最終強度の主な計算手法として、Smith 法、非線形 FE 解析に基づく方法、理想化構造要素を用いた方法 (ISUM) 等が挙げられ、国際船級協会連合 (IACS) が規定するタンカーとばら積み貨物船に関する調和共通構造規則 (H-CSR) では、利便性の観点から Smith 法を用いた評価手法が採用されている。Smith 法では、断面を構成する部材をパネル付き補強材要素、あるいは、パネル要素などの構造部材の集合と仮定し、材料の降伏や部材の座屈などを考慮した各要素の軸応力～軸ひずみ関係を事前に準備しておく。そのうえで、縦曲げモーメントによって断面に生じる曲げ曲率を漸増させながら、要素の降伏や座屈に伴う剛性変化によって曲げの中立軸が移動することを考慮しつつ、対象とする横断面の耐え得る最大モーメント、いわゆる、縦曲げ最終強度を増分法により評価する。

ここで、H-CSR では、船体横断面を構成する各要素の崩壊モードを補強材の横座屈、振り座屈、ウェブの局部座屈、あるいは、パネルの座屈に分類し、それぞれの崩壊モードに対する軸応力～軸ひずみ関係を数式の形 (H-CSR 算式) で表現しているものの、軸応力～軸ひずみ関係に及ぼす初期不整 (初期たわみおよび溶接残留応力) の影響などについては陰な形で考慮されている。そのため、初期たわみのモード形状やたわみ量、ならびに、溶接残留応力の大きさや分布形状については不明な点が多く、どの程度の初期不整を想定しているのかは不明確である。

また、H-CSR では、上記の Smith 法で求めた船体縦曲げ最終強度に対して、船体外板に作用する水圧や船倉内の貨物による横圧の影響を二重底補正係数で、寸法・材料・初期不整・モデル化などの強度評価に係る不確実性および静水中縦曲げモーメントや波浪中縦曲げモーメント等の荷重評価に係る不確実性に対してはそれぞれ部分安全係数を導入することで、船体縦曲げ最終強度評価における安全性を担保している。このような部分安全係数を用いた評価手法に代わる確率論的な評価手法についても検討する必要がある。

2. 研究の目的

2015 年 7 月より発効された H-CSR では、上述のとおり部分安全係数を導入することで一律かつ確定論的に船体縦曲げ最終強度を評価している。また、近年ではデジタル化の風潮を受け、船舶海洋分野においても船体の構造ヘルスマニタリング (SHM) に向けた本格的なデータ取得が始まっており、これらの実測データを援用した信頼性解析に基づく評価が可能となれば、船体縦曲げ最終強度に関する定量的な推定精度の向上が見込まれる。そこで本研究では、初期不整や腐食による板厚減耗、さらには、就航航路などが船体縦曲げ最終強度にどのように影響を及ぼすかについて、実測データを反映させた信頼性解析を通じて評価し、現行の確定論的な規則に代わる確率論を用いたより合理的なアプローチに基づく評価手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

1) 船体横断面を構成する主な部材として、パネル付き補強材 (縦方向に補強された部材)、あるいは、パネル (横方向に補強された部材) を想定し、初期不整 (初期たわみおよび溶接残留応力) や腐食による板厚減耗などの不確定因子によってこれらの構造部材の耐荷力、すなわち、軸応力～軸ひずみ関係がどのように変化するかを検討した。その際、モンテカルロシミュレーションに基づいてばらつきを与えた不確定因子を考慮し、汎用有限要素解析ソフト MSC Marc による非線形 FE 解析のシリーズ計算を実施した。

2) 船体縦曲げ最終強度に関して、実船における初期不整のばらつき、部材寸法・板厚のばらつき、腐食による板厚減耗の影響、降伏応力やヤング率の材料に係るばらつき等を評価し、これらのばらつきが船体横断面の縦曲げ最終強度 (耐荷力) に及ぼす影響を評価した。また、in-house コードの Smith 法に基づく船体縦曲げ最終強度解析プログラムに上記 1) を考慮した新たな H-CSR 算式を取り込むことによって、不確定因子の値が船体縦曲げ最終強度に及ぼす影響を正確かつ効率的に評価することを試みた。

3) 船体縦曲げ最終強度に関する信頼性解析を実施し、腐食モデルやメンテナンスの有無によって最終強度がどのように経年変化するかを調査した。

4) SHM に向けた船体構造モニタリングの実用化が加速しており、大型船舶に関しても実測データの取得のためのシステムの実装が進みつつある。ただし、現在では主にひずみや加速度の取得のみに留まっており、変形を直接計測によって測る試みは限られている。そこで、より現実に即した構造強度評価を将来的に行うために、実船計測による変形情報の取得について試行した。

4. 研究成果

3-1) の検討結果の一例として、パネル付き補強材の平均応力～平均ひずみ関係を図 1 に示す。図中に示すパネル付き補強材寸法に関して言えば、FE 解析結果 (赤線) に対してオリジナルの H-CSR 算式 (青線) では最終強度および最終強度後の耐力低下の挙動に差異が見られた。そこで同様の検討を FE 解析を用いたシリーズ計算を通じて行い、その結果に基づいて初期不整や水圧の影響を陽な形で表現できるように修正した H-CSR 算式 (緑線) を考案した。修正後の H-

CSR 算式においても最終強度後の挙動が FE 解析結果と異なるものの、最終強度の値とその際のひずみ値が FE 解析結果と良好に一致していることが確認できる。

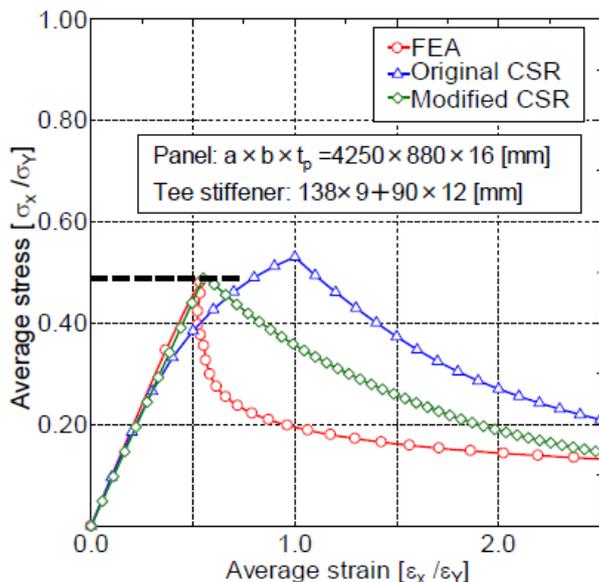


図 1 平均応力～平均ひずみ関係

3-2) の検討結果の一例として、あるバルクキャリアの縦曲げモーメント～曲率関係を図 2 に示す。なお、図中の縦曲げモーメントの最大値が縦曲げ最終強度となる。オリジナルの H-CSR 算式（赤線）と修正後の H-CSR 算式（青線）を用いて Smith 法で縦曲げモーメントを計算した結果、両者にわずかに差異が見られるが顕著ではないことがわかる。ただし、初期たわみを直接取り扱えることは、信頼性解析などを実施するうえで非常に重要である。併せて、水圧を考慮することも可能となっており、ボトム構造に作用する水圧の影響が懸念されるホギング時の縦曲げ最終強度などを詳細に検討する際にも有用と考えられる。

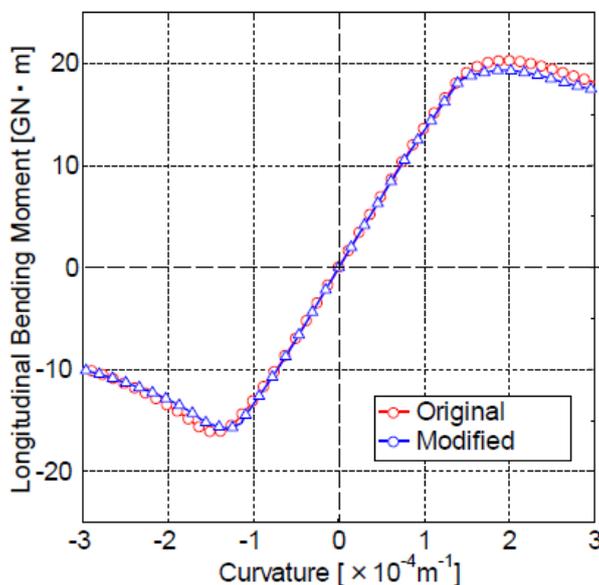


図 2 縦曲げモーメント～曲率関係（バルクキャリア）

3-3) の検討結果の一例として、あるバルクキャリアのホギング時の縦曲げ最終強度に関する信頼性解析を実施した結果を図 3 に示す。図中の横軸は運航年数を表しており、今回の結果に限れば、仮に修繕をせずとも（青線）30 年後においても H-CSR による設計値を満たしていることが確認できる。また修繕（赤線）によって縦曲げ最終強度が回復している様子が見られる。

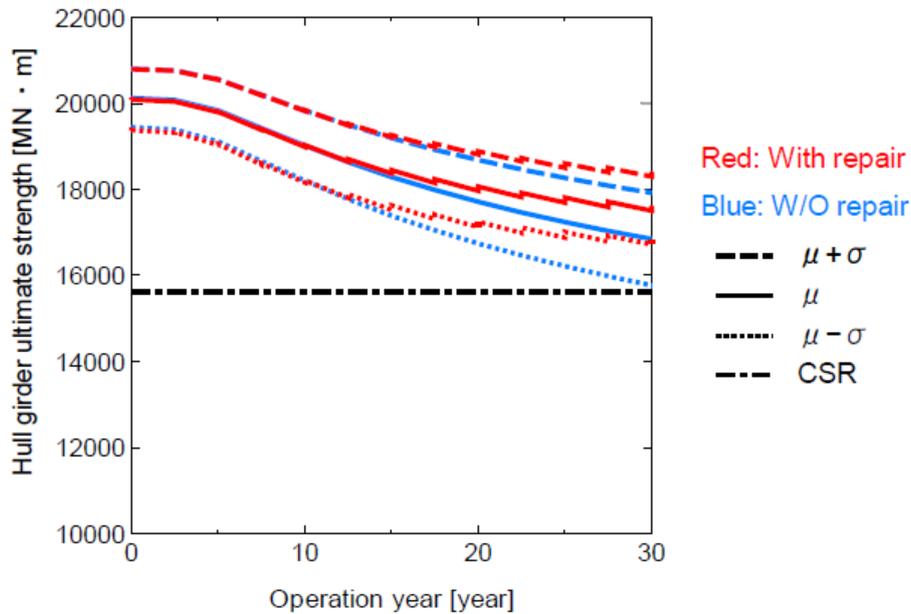


図3 縦曲げ最終強度～運航年数関係 (バルクキャリア, ホギング)

3-4) の検討結果の一例として, 全球測位衛星システム (GNSS) を用いてあるバルクキャリアの変形計測を実施した際の FE 解析結果との比較を図 4 に示す. GNSS (黒線) による計測結果が FE 解析結果 (赤線) とよく一致していることがわかる. 将来的には GNSS のような変形計測技術を用いて取得した情報も使用しながら強度評価を行うことが求められる.

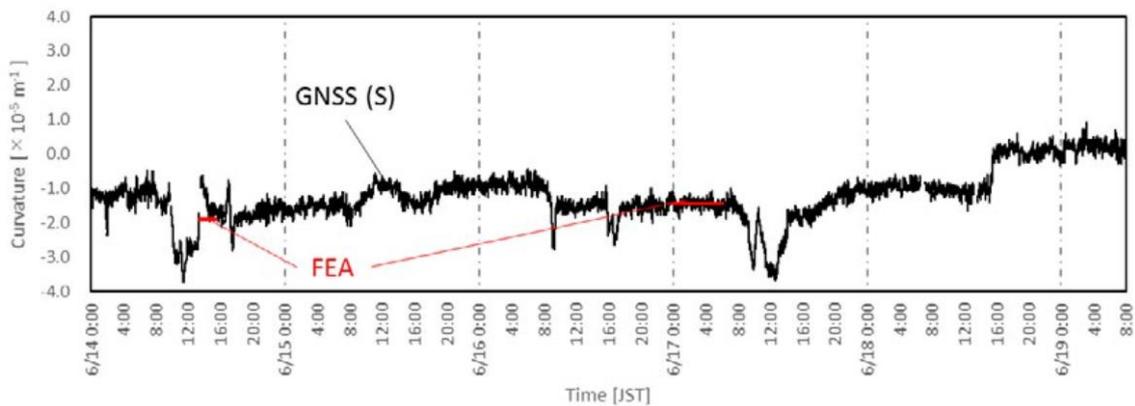


図4 曲率変化に関する GNSS と FEA の比較 (バルクキャリア)

最後に, 就航航路 (運航する海域) の違いや工作精度・メンテナンスの品質の違い等に起因して船舶の安全性に大きな差異が生じ得ることを示すことができれば規則改正などに繋がる可能性がある. そのため, 本研究で得られた知見に加えて追検討を進めることで, より合理的なアプローチに基づく船体構造強度の評価手法の確立が望まれる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kimihiro Toh, Yamato Kurisaki, Shinichi Hirakawa, Yoshitaka Kawajiri, Kotaro Furukawa, Hideaki Murayama, Daisuke Yanagihara	4. 巻 15
2. 論文標題 Fundamental Investigation on Measuring Procedure of Ship Motion and Hull Girder Deformation by Using Global Navigation Satellite System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures	6. 最初と最後の頁 427-435
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 栗崎弥麻登, 藤公博, 平川真一, 河尻義貴, 古川浩太郎, 三上航平, 村山英晶, 柳原大輔	4. 巻 35
2. 論文標題 全球測位衛星システムを用いた船体運動および変形計測のための基礎的検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 507-515
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kimihiro Toh
2. 発表標題 Fundamental Investigation on Measuring Procedure of Ship Motion and Hull Girder Deformation by Using Global Navigation Satellite System
3. 学会等名 15th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗崎弥麻登
2. 発表標題 全球測位衛星システムを用いた船体運動および変形計測のための基礎的検討
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 令和4年秋季講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------