

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00803

研究課題名（和文）損傷船体の縦曲げ最終強度と波浪中安全性評価に関する研究

研究課題名（英文）Ultimate longitudinal bending strength and safety assessment of a damaged ship in waves

研究代表者

藤久保 昌彦（Fujikubo, Masahiko）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：30156848

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 28,200,000 円

研究成果の概要（和文）：船舶が衝突や座礁により損傷した場合、折損や沈没に至るかどうかが、あるいは至る場合にそれが生じるまでの時間を、海象を考慮して即時に判断する必要がある。そこで、損傷船体の縦曲げ最終強度に関する解析と模型実験、および損傷とそれによる浸水が波浪中応答に及ぼす影響に関する解析を行い、損傷影響を調べた。次に、緊急時の安全性評価に資する高速計算法として、船体を一本の梁にモデル化する波浪中崩壊挙動の時間領域解析法を開発した。これを用いて崩壊挙動を推定することにより、緊急時の安全性評価を支援するシステム構築のための基盤技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

損傷船体の横断面の縦曲げ最終強度については、これまでに多くの研究が行われているが、損傷後の船体全体の波浪中崩壊挙動を、浸水とそれによる傾斜影響まで考慮しながら時間領域で明らかにするのは初めてである。さらに船体を一次元梁モデルに単純化して取り扱うことにより、緊急時の安全性評価に有用な高速計算法の開発を目的としており、海上輸送の安全性向上に資する研究である。

研究成果の概要（英文）：In an emergency of ships after suffering from damages due to collision or grounding, it is necessary to immediately evaluate the possibility of leading to catastrophic events such as hull breaking or sinking under encountered sea states including the required time to events. The damage effects on the ultimate hull girder collapse behavior in waves were investigated through numerical and experimental studies on the hull girder strength and the numerical studies on the wave responses including the effect of flooded water. A time-domain high-speed analysis method for structural safety assessment of ships was developed idealizing a whole ship as one-dimensional beam. These achievements form the basis of a rational and efficient system for the structural safety assessment of damaged ships in waves.

研究分野：船体構造強度

キーワード：船体構造 縦曲げ最終強度 損傷後強度 波浪中応答 船体浸水 水槽試験 崩壊試験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 縦曲げ最終強度は、船体を1本の梁と見なした時の折損限界強度を意味し、船体の構造安全上、最も基本的かつ重要な強度である。船舶が他船または構造物と衝突した場合、あるいは座礁により船底が損傷した場合、船体の剛性と強度は極端に低下する。また、浸水が生じると、船体傾斜および沈下が生じ、縦曲げ応答が変化する。さらに、船体内に侵入した水は、船体動揺に伴って非線形な流体挙動を示し、これが再び船体運動に影響する。しかしこのような船体傾斜や内部水の影響まで考慮した損傷船の縦曲げ崩壊挙動についての研究は、行われていない。

(2) 衝突、座礁の緊急時における船体の安全性を評価し、適切な危険回避策を講ずるためには、遭遇海象下での崩壊挙動を迅速に予測できることが必要である。そのためには、損傷部の強度低下、船体傾斜、波浪応答、さらには強度上最も危険度が高い入力波モデルを高速に推定できる手法が必要である。しかし、現状そのような方法は未確立である。

2. 研究の目的

(1) 損傷船体の縦曲げ最終強度を、傾斜状態で鉛直・水平の二軸曲げを受ける場合を含めて、数値シミュレーションと実験により明らかにする。

(2) 損傷船体の波浪中運動・荷重応答、および浸水時の内部水の挙動とその船体運動への影響を数値シミュレーションにより明らかにする。

(3) 損傷船体の縦曲げ崩壊挙動を、流体・構造連成影響を考慮して1次元梁モデルにより高速に計算できる手法を開発する。さらに、崩壊危険度の点で確率的に卓越する波浪モデル時系列を生成し、損傷船体の波浪中崩壊挙動を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 船側損傷を有するダブルハルタンカーを対象として、鉛直・水平の二軸縦曲げモーメント下の船体横断面の逐次崩壊挙動をSmith法により解析し、損傷が縦曲げ最終強度に及ぼす影響を明らかにする。

(2) 損傷および非損傷鋼製ボックスガーター試験体を作成し、崩壊挙動を調べるとともに、非線形FE解析との比較よりシミュレーションの精度および留意点を明らかにする。

(3) 損傷船体の波浪中運動・構造応答解析を実施し、傾斜状態を含めて、損傷船体の運動および内力応答を調べる。ここでは、質量付加法および浮力消失法のそれぞれにより損傷影響を考慮し、流体解析には線形ポテンシャル法を適用する。

(4) 浸水による内部水の挙動を粒子法の一つであるMPS法により解析し、内部水が損傷船体の運動に及ぼす影響を調べる。

(5) 損傷船体の波浪応答解析から得られる曲げモーメント応答と二軸曲げ最終強度相関関係から、損傷船体の縦曲げ最終強度安全性について調べる。

(6) 過去に鉛直曲げのみを考慮して開発された1次元梁モデル(FE/Smith法)を二軸曲げ挙動を解析できるよう拡張するとともに、損傷船体の崩壊挙動を調べる。また計算速度の点から、緊急時の安全性評価法としての実用性を検証する。

4. 研究成果

(1) 損傷断面の縦曲げ最終強度解析

図1のように船側損傷を生じたダブルハルタンカー(長さ235m, 幅44m, 深さ21m, 喫水12.4m)の縦曲げ最終強度を、損傷による断面中立軸の傾斜を考慮してSmith法により計算した。図2は、非損傷時、船側外板損傷時および船側外板と縦隔壁の両者損傷時のそれぞれの場合について求めた最終強度相関関係である。VBM, HBMは、鉛直曲げモーメントと水平曲げモーメントをそれぞれ表す。図2で、赤矢印付近では、損傷による強度低下が緑矢印付近よりも小さいのは、VBMとHBMが、縦曲げ応力が互いにキャンセルする向きに作用するため、損傷の影響が小さく現れることによる。デッキ側損傷のため、サギング側の強度低下がホギング側に比べて大である。

(2) ボックスガーターの4点曲げ崩壊試験および解析

図3のようにボックスガーターの4点曲げ試験を実施した。図4のように、片方の側面に損傷を模擬する楕円孔を設け、試験対象部が直立の場合と、浸水による傾斜状態を模擬して30deg傾けた場合のそれぞれを実施した。図5に、実験とFE解析で得られた荷重～荷重点変位関係を示す。FE解析で、支持点での摩擦影響を補正したinternal forceの結果は、実験結果とより良好に一致しており、解析の精度を確認した。また、横断面に座屈・降伏が広がることによる断面

中立軸の移動が、実験で確認された。さらに、FE 解析では、ガーダーの長手方向のモデル化範囲が解析結果に有意に影響し、短い場合は過度の拘束が働いて、断面強度を高めめに推定することがわかった。この点は、実船の解析においても留意が必要である。

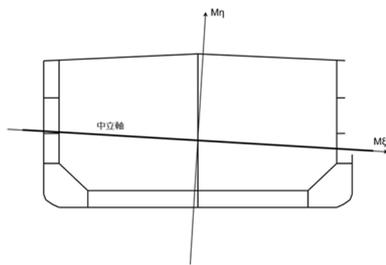


図 1 損傷断面

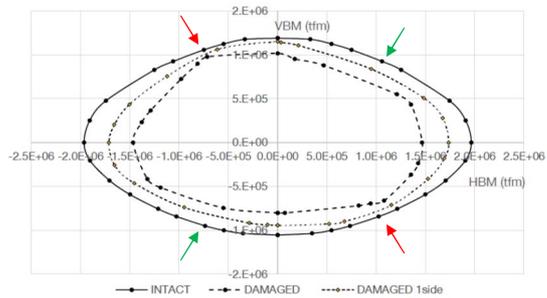


図 2 最終強度相関曲線

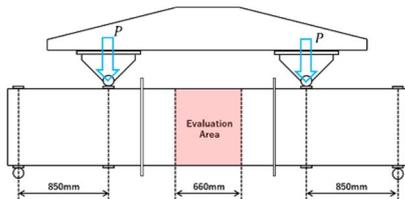


図 3 4点曲げ試験



図 4 直立および傾斜損傷ガーダー模型

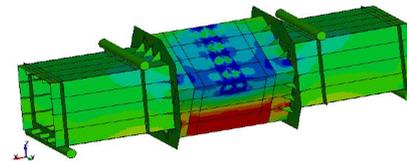
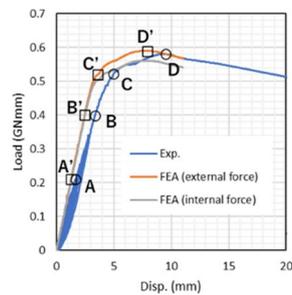


図 5 傾斜損傷ガーダー模型の荷重～荷重点変位関係（実験と FE 解析の比較）

(3) 損傷船体の波浪応答解析

船側損傷により区画浸水および傾斜を生じたダブルハルタンカーの波浪中応答解析を行い、損傷が運動および内力応答に及ぼす影響を調べた。浸水による沈下および傾斜の計算は船舶設計支援ソフト NAPA によった。基本的な場合として、波浪荷重は、線形特異点分布法により求めた。損傷影響の考慮法として、浸水による内部水を質量として扱う質量付加法と、浮力を減じ、圧力積分から浸水箇所分を減じる浮力消失法がある。計算によると、損傷および浸水量が小さい場合は両者の差は少ないが、損傷および浸水量が大きいほど有意差が生じることが判明した。本研究では付加質量法を使用した。応答解析より、傾斜時は両舷の浸水面の非対称性により、正面波中でも鉛直曲げに加えて水平曲げが作用すること、横波に近いほど水平曲げが増加することが判明した。したがって、損傷時縦強度は基本的に二軸曲げ問題として取り扱う必要がある。

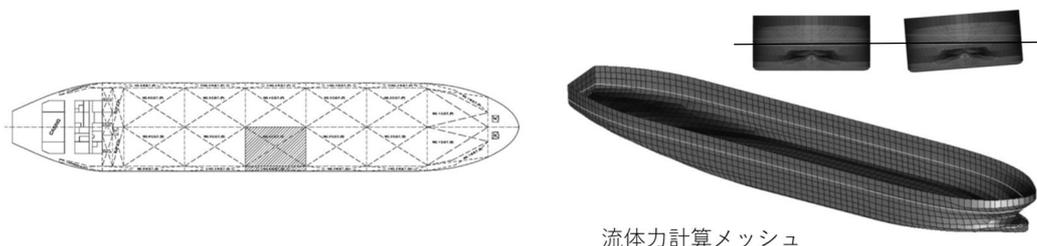


図 6 損傷により区画浸水したダブルハルタンカーの波浪中応答解析

(4) 損傷浸水時の船体運動

損傷浸水時の船体運動予測モデルとして MPS 陽解法とストリップ法の組み合わせ(図7)を考え、クルーズ船を対象に、動揺・操縦性試験および内部区画損傷浸水試験の結果と解析結果(図7)を比較した。計算法の高度化のため、MPS 陽解法で扱われる粒子間相互作用モデルの圧力勾配項の改良、および壁境界条件の処理の改良を行った。一連の解析より、損傷浸水時のロールや沈下に関しては、ビルジキールの影響が小さいこと、また内部区画の空気層や支柱の考慮が運動に有意に影響を与えることなどを明らかにした。これらの知見を含めて、浸水時の縦強度応答解析における課題を明確化した。

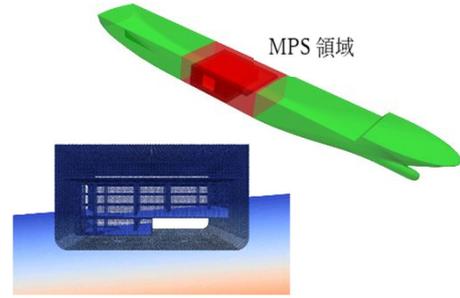


図7 MPS/ストリップ法 混合モデルによる区画浸水シミュレーション

(5) 損傷船体の波浪中縦曲げ最終強度安全性評価

図8に、前項(4)に述べた波浪応答解析法を用いて求めた規則波中の二軸曲げモーメントの軌跡を非損傷時、片舷損傷時のそれぞれについて示す。波長/船長比および波向きは図中に示す通りである。波高は16mである。軌跡の中心が、静水曲げモーメントを表す。正面波(180deg)では、非損傷時は、水平静水成分MHはゼロであるが、損傷時は船側荷重の非対称性により水平静水成分が生じている。また中央部浸水により鉛直静水成分MVが増加している。波浪変動成分は、MH, MVともに損傷時の方が大きい。最終強度相関曲線に最も近い点は、損傷時、非損傷時ともに点A(正面波)であり、縦曲げ最終強度の点からは、正面波中が損傷・非損傷に関わらず危険度が最も高いことが示されている。今後は確率論的な取り扱いへの展開が必要である。

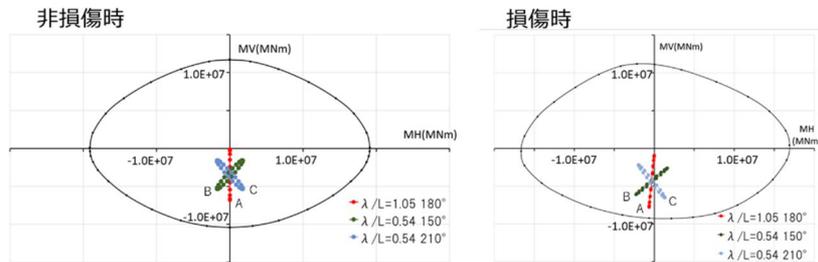
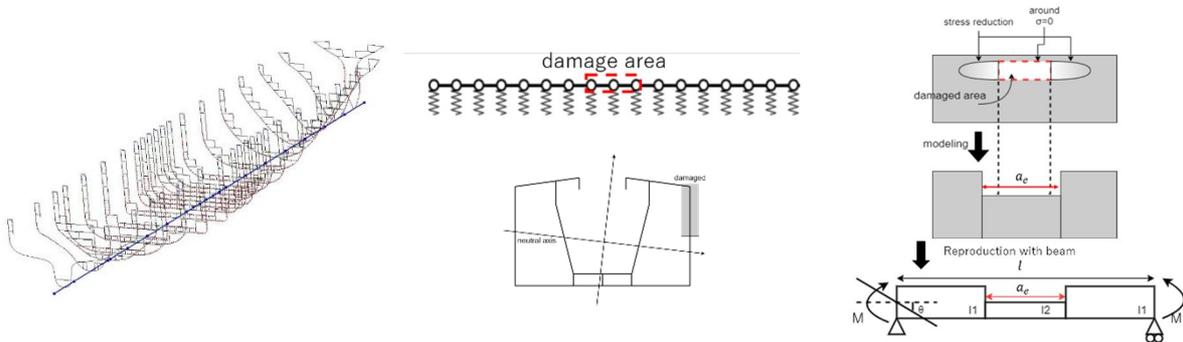


図8 縦曲げ最終強度相関関係と規則波中の鉛直・水平曲げモーメントの軌跡

(6) 損傷船体の波浪中縦曲げ崩壊挙動解析法の開発

図9(a)のように、船体を梁有限要素により長さ方向に分割し、同図(b)のように静的復原力を表す弾性支床上の変断面梁にモデル化する。各要素の曲げモーメント~曲率関係の計算には、船体横断面の縦曲げ最終強度解析(図2および図8)に使用されるSmith法を適用する。この方法は、FE/Smith法の名称で、研究代表者らにより過去に開発された。本研究では、従来鉛直曲げのみを考慮したFE/Smith法を、二軸曲げを考慮できるよう拡張した。また損傷による開口部では、図9(c)のように自由縁近傍で縦応力が低下し、曲げ剛性に寄与しない領域 a_e は実損傷範囲より広がる。この a_e を考慮して、損傷船体を図9(b)のようにモデル化した。本モデルを用いて荷重分布と作用時間を変えた動的崩壊解析を行い、荷重作用時間が短いほど崩壊変形は減じることなどの特性を明らかにした。さらに、崩壊危険度の点で確率的に卓越する波浪モデル時系列を生成し、崩壊挙動と損傷影響を調べた。なお、損傷部を3Dシェルでモデル化した場合、計算に20~30時間程度を要したのに対し、本解析法では2~3分程度であり、緊急時の安全性評価法としての実用性を確認した。



(a) 1次元梁へのモデル化 (b) 損傷を有する船体モデル (c) 開口による剛性低下範囲

図9 FE/Smith法による損傷船体の波浪中縦曲げ崩壊挙動解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tetsuhiro Yuura, Hiro tada Hashimoto and Akihiro Matsuda	4. 巻 8
2. 論文標題 Manoeuvrability of a Large Cruise Ship after Damage for Safe Return to Port	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 378-378
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/jmse8050378	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 小森山 祐輔, 田中 義照, 辰巳 晃, 藤久保 昌彦	4. 巻 29
2. 論文標題 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3 一次元有限要素法による振り解析への横隔壁及び船側構造影響の導入 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会論文集	6. 最初と最後の頁 65-76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2534/jjasnaoe.29.65	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 白石哲平、辰巳晃、藤久保昌彦	4. 巻 30
2. 論文標題 圧縮と面外圧を受けるバルクキャリア単船側パネルの荷重応答と最終強度に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会論文集	6. 最初と最後の頁 201-214
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2534/jjasnaoe.30.201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 辰巳晃、斎賀大和、Han Htoo Htoo Ko、飯島一博、藤久保昌彦
2. 発表標題 流力弾塑性梁モデルを用いた船体桁の動的崩壊解析
3. 学会等名 令和2年度日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 HAN Htoo Htoo KO, Akira TATSUMI, Kazuhiro IIJIMA, Masahiko FUJIKUBO
2. 発表標題 Collapse Analysis of Ship Hull Girder using Hydro-elastoplastic Beam Model
3. 学会等名 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辰巳晃, 小森山祐輔, 田中義照, 藤久保昌彦
2. 発表標題 3Dレーザースキャナによるボックスガーダー試験体の初期たわみ計測とその成分分析
3. 学会等名 令和3年度日本船舶海洋工学会春季講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 司宮智洋, 辰巳晃, 飯島一博, 藤久保昌彦
2. 発表標題 流弾塑性梁モデルを用いた船体桁の動的崩壊解析 - 第2 報: 波浪中崩壊応答解析への拡張 -
3. 学会等名 令和3年度日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 湯浦哲大, 橋本博公
2. 発表標題 MPS陽解法による船内浸水シミュレーションに関する研究
3. 学会等名 令和3年度日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小森山祐輔, 宝谷英貴, 沢田博史, 岡正義
2. 発表標題 FBG ひずみセンサを用いた波浪中船体構造応答の計測
3. 学会等名 令和3年度日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小森山祐輔, 田中義照, 安藤孝弘, 橋爪豊, 辰巳晃, 藤久保昌彦
2. 発表標題 傾斜した損傷船体構造の崩壊挙動 - 傾斜した開口有りボックスガーダーを用いた実験および有限要素解析による検討 -
3. 学会等名 令和4年度日本船舶海洋工学会春季講演会
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
研究分担者	飯島 一博 (Iijima Kazuhiro) (50302758)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	辰巳 晃 (Tatsumi Akira) (60736487)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	田中 義照 (Tanaka Yoshiteru) (40373419)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	小森山 祐輔 (Komoriyama Yusuke) (90805110)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	
研究分担者	橋本 博公 (Hashimoto Hirotada) (30397731)	大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授 (24403)	

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