

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15219

研究課題名（和文）流力弾塑性手法を用いた波浪中の船体の動的逐次崩壊挙動および応答の解明

研究課題名（英文）Investigation into dynamic progressive collapse behavior of hull girders in waves using hydro-elastoplastic approaches

研究代表者

辰巳 晃（Tatsmi, Akira）

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：60736487

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：極限海象中において波浪荷重が船体の縦曲げ最終強度を超過した場合、船体は縦曲げ崩壊に至る。縦曲げ崩壊のリスク評価を行うためには、作用荷重が強度を超過した場合の崩壊後の挙動・応答を考慮できる流力弾塑性解析法が必要である。本研究では、スミス法と梁有限要素法およびストリップ法を組み合わせることで、波浪中における船体の動的逐次崩壊挙動を解析できる実用的な手法を開発した。模型船を用いた水槽試験および詳細シミュレーションとの比較を通じて提案法の妥当性を検証した。そして、提案法を実船に適用し、波浪中動的逐次崩壊挙動に関する重要な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スミス法に従って船体断面の逐次崩壊を考慮しつつ、波浪中における船体全体の動的崩壊応答を解析できる流力弾塑性手法を開発した点で新規性が高い。また、提案手法は汎用のPCであっても数分程度で波浪中の動的逐次崩壊の解析を行うことができ、実用性も高いと考える。提案手法は、作用荷重が船体の縦曲げ最終強度を超過した場合のリスク評価を行うにあたって、非常に有用な解析ツールとなるであろう。

研究成果の概要（英文）：When wave load exceeds hull-girder ultimate strength in extreme sea states, hull-girder bending collapse is occurred. To perform a risk assessment for the hull-girder collapse, a hydro-elastoplastic analysis which can consider fluid-structure interaction in post-collapse regime is needed. Therefore, a practical method to analyze dynamic progressive collapse behaviors/response of the hull girder have been developed. In the proposed method, Smith's method is incorporated with beam finite element method while hydro-dynamic load is estimated based on strip theory. The proposed method has been validated through comparisons with an experiment of a scale model ship in a towing tank and more detailed numerical simulation. After the validation work, the proposed method was applied to a real ship, and important findings about the dynamic progressive collapse response of the hull girder in waves have been obtained.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：流力弾塑性 縦曲げ崩壊 崩壊後挙動 FE/Smith法 弾性相似模型 リスク評価

1. 研究開始当初の背景

船体は一生の中で受ける最大の荷重よりも高い強度を有するように設計されなければならない。なかでも縦曲げ最終強度は最も基本的かつ重要な強度要件である。縦曲げ最終強度の解析には Smith 法と呼ばれる逐次崩壊解析法や非線形 FEM が一般に用いられる。船体の縦曲げ崩壊は準静的な現象であると仮定し、座屈や降伏の影響を考慮しつつ縦曲げモーメント - 曲げ変位の関係を計算する。得られた関係において縦曲げモーメントの最大値が縦曲げ最終強度である。もし、作用荷重が縦曲げ最終強度を超過した場合、船体は折損する。これを縦曲げ崩壊という。

過去には複数の縦曲げ崩壊の事故が発生しているが、その大半が沈没に至り、船体の崩壊に至るまでの過程、崩壊後の応答や挙動は解明されていない。特に作用荷重と縦曲げ崩壊の関係については明らかでない。2013 年の MOL COMFORT 号の事故調査[1]では、slamming (船首部船底が波面に叩きつけられる現象) 衝撃力により誘発される whipping 応答 (船体梁の固有振動応答) が波浪曲げモーメントに重畳し、過大な縦曲げモーメントが船体に作用した可能性が指摘された。一方、whipping 応答は短周期の振動応答であり、たとえ荷重が縦曲げ最終強度を超過しても変形が進まない可能性がある。逆に、縦曲げ最終強度を超過したにも関わらず部分的な破損にとどまり、縦曲げ崩壊の危険性が見過ごされる可能性もある。

作用荷重が縦曲げ最終強度を超過した場合、超過分の荷重は慣性力、減衰力ならびに静的・動的流体力に姿を変える。よって、船体の崩壊後の応答を正確に知るためには、崩壊過程における構造と流体の相互影響を考慮した非線形力学応答の解析が必要である。つまり、波浪中の船体の動的逐次崩壊挙動を解析するためには、船体の縦曲げ崩壊を対象とした流力弾塑性解析手法が必要となる。

2. 研究の目的

本研究課題では、波浪中における船体の動的逐次崩壊挙動を解析するための流力弾塑性手法を開発することを目的とした。流力弾塑性解析は CFD と FEM の連成解析により原理的には可能であるが、波浪中の船体の動的崩壊解析には膨大な計算コストが必要である。本研究課題では、流体構造連成影響を考慮した実用的な船体の動的逐次崩壊解析法の開発に主眼を置く。つまり、汎用の PC を用いて数分程度で計算を実行できるレベルを想定する。開発した手法は、実験あるいはより詳細な数値解析との比較を通じて、その妥当性の検証を行う。そして、whipping 応答の影響を含め、船体の波浪中における動的逐次崩壊挙動の現象を提案法により解析する。

3. 研究の方法

(1) 波浪中動的逐次崩壊解析手法の開発

船体断面の逐次崩壊解析手法である Smith 法と梁有限要素法を組み合わせ、船体の動的逐次崩壊挙動を解析することのできる FE/Smith 法を開発した。さらに、Strip 法に基づく流体力計算と組み合わせることで、波浪中における動的崩壊挙動を解析できるように解析手法の拡張を行った。この波浪中動的逐次崩壊解析手法を Hydrodynamic FE/Smith 法と名付け、以下 HFS 法と記述する。

(2) 詳細 FEM 解析との比較

上に述べた動的逐次崩壊解析手法は Smith 法に基づくため、その精度は部材 (防撓パネル) の軸圧縮荷重下での平均応力 - 平均ひずみ関係に大きく依存する。そこで、船体を模擬した箱桁モデルを対象に、規定した動的荷重下における逐次崩壊挙動を FE/Smith 法および詳細 FEM (シェルモデルを使用) を用いて解析を行った。得られた結果を比較することで、FE/Smith 法の検証を行った。

(3) 弾性相似模型船を用いた水槽試験

HFS 法の流体力計算の妥当性の検証を目的に、弾性相似模型船を製作し、大阪大学船舶海洋試験水槽において、波浪中における模型船の船体運動および弾性変形の計測を行った。

(4) HFS 法を用いた実船の波浪中動的逐次崩壊解析

上記の詳細 FEM および水槽試験との比較を通じて提案法の基本的な妥当性を担保したのち、実船 (5,250TEU クラスのコンテナ船) を対象に波浪中の動的逐次崩壊挙動を解析した。静水中荷重、whipping 応答、平均応力 - 平均ひずみ関係をパラメタとし、それぞれの崩壊後挙動への影響を調べた。本報告では whipping 応答の影響に関する成果を 4. (3) に示す。

4. 研究成果

(1) 詳細 FEM 解析との比較

図 1 に示す船体を模擬した箱桁モデルを対象に動的逐次崩壊挙動解析を行った。解析には提案する FE/Smith 法および詳細 FEM を用いた。詳細 FEM では、図 1 (b) に示すように中央部をシ

エル要素で、残りを梁要素でモデル化した。解析には汎用 FEM 解析ソフトである LS-DYNA を用いた。提案法では防撓パネル要素の平均応力 - 平均ひずみ関係として 2 つを用いた。1 つは船体の共通構造規則である IACS/CSR BC & OT で規定される陽な算式から得られる平均応力 - 平均ひずみ関係、いま 1 つは詳細 FEM 解析から取り出した平均応力 - 平均ひずみ関係である。荷重は図 2 に示すような分布荷重を与えた。外力は縦曲げ最終強度より 5%大きくなうように調整した。図 3 に各解析から得られた曲げモーメント - 曲率関係を示す。この比較を通じて、平均応力 - 平均ひずみ関係が正確であれば、提案法は詳細 FEM と同等の動的逐次崩壊挙動を推定できることを確認した（青色実線と緑色一点鎖線）。

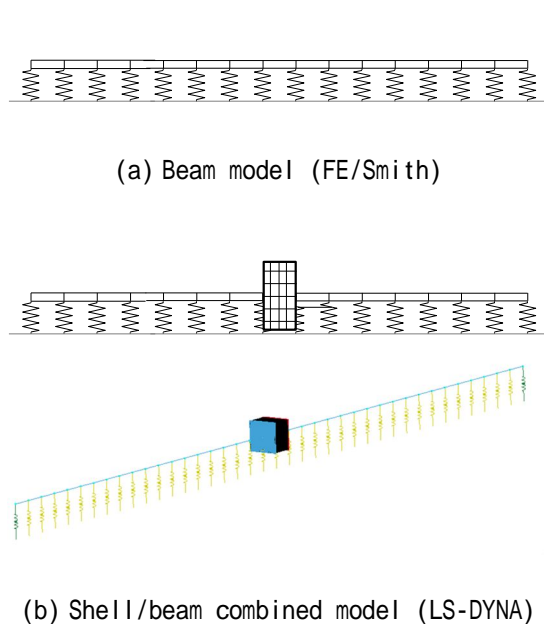


図 1 解析モデル

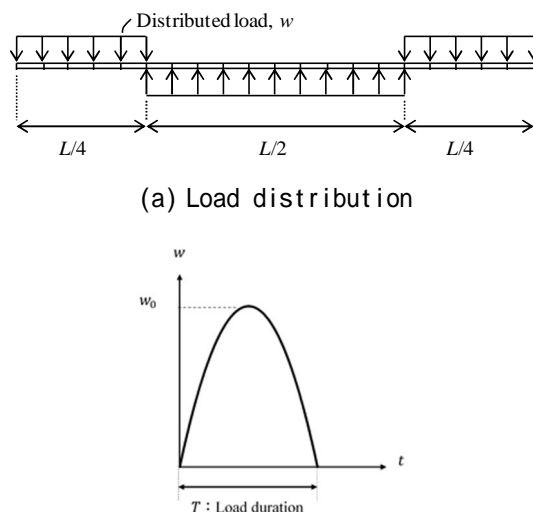


図 2 荷重条件

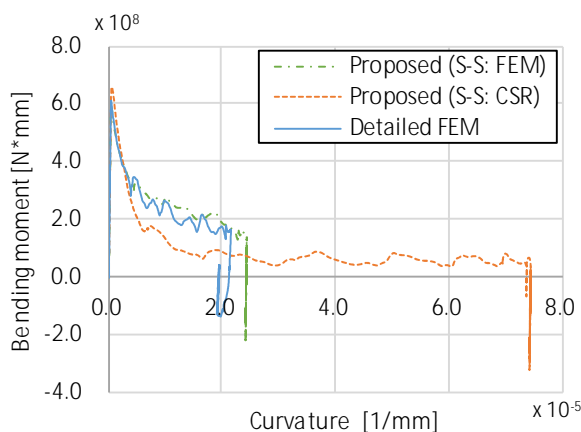


図 3 曲げモーメント - 曲率関係

(2) 弾性相似模型の水槽試験

HFS 法では波浪荷重を Strip 法の 1 種である NSM(New Strip method)に従って評価し、時間領域で船体の波浪中応答を計算する。HFS の波浪中船体応答の推定精度を検証するため、図 4 に示すバックボーン型の弾性相似模型船を用いた水槽試験を行った。模型は、長手方向に 9 個に分割されたウレタン製浮体と、それら連結するアルミニウムのチャンネル材（バックボーン）から成る。浮体の形状は数学関数で表される簡易的なものとした。図 5 に向かい波中での縦曲げモーメントの RAO を比較する。完全な一致は得られていないものの、HFS はおおむね波浪中における船体応答を推定できていると言える。

また、本研究の趣旨とは異なるものの、本水槽試験を通じて springing と思われる高次の同調振動が計測された。このような同調現象は Strip 法のようなポテンシャル理論に基づく解析手法では考慮することができない。一方、CFD と FEM を用いた連成解析を行うことで、本現象をシミュレートできることを示した[2]。

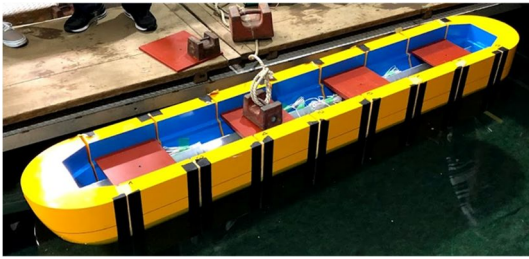


図4 弾性相似模型

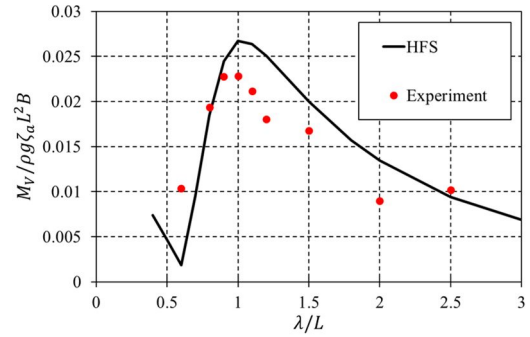


図5 RAOの比較

(3) 実船の波浪中動的逐次崩壊解析

(1)および(2)の結果から、HFSの基本的な妥当性を確認することができた。そこで、図6に示す5,250TEUコンテナ船のモデルを対象に波浪中での動的逐次崩壊挙動を解析した。崩壊解析を行うにあたって、断面に作用する縦曲げモーメント(VBM)が時刻 t_0 に q_0 となるような、設計不規則波をFORM[3]により導出した。HFSは船体形状の変化による荷重の非線形性を扱うことができるが、考慮する荷重は全て線形とした。これは、最終強度に対する荷重の超過率の調整を容易にするためである。FORMにおける波スペクトルはISSCスペクトルを用い、平均波周期を13秒とする。一例として、 $t_0 = 50$ [s]、 $q_0 = -1000$ [MN·m]とした設計不規則波と崩壊断面に作用するVBMの時刻歴を示す。設計不規則波は集中波のようなプロファイルを持つ。一方、whippingの崩壊応答への影響を考察するため、船首側の先端の節点に規定した衝撃荷重を与えた。意図したwhippingモーメントが得られるよう、規定する衝撃荷重の大きさおよびタイミングを調整した。

静水曲げモーメントと波浪曲げモーメントの和を M_{s+w} 、whippingモーメントを M_h 、静的条件下での縦曲げ最終強度を M_u とし、 $M_{s+w} + M_h = 1.05M_u$ となるように設計波の波振幅と衝撃荷重の大きさを調節した。 $M_{s+w} = 0.90M_u$ 、 $M_h = 0.15M_u$ とした場合をCase A、 $M_{s+w} = 1.00M_u$ 、 $M_h = 0.05M_u$ とした場合をCase Bとする。すなわち、Case Aの方が相対的にwhippingの寄与が大きい。それぞれの荷重条件にて得られた崩壊断面の曲げモーメント-曲率関係と部材ごとの平均応力-平均ひずみ関係を図8と9に示す。 M_{s+w} に対して M_h が大きいと、崩壊量が小さくなるのが分かる。これはwhipping応答に伴う荷重の作用時間が短いためであると考えられる。よって、縦曲げモーメントの最終強度に対する超過時間が短いほど崩壊量が小さくなると言える。ただし、Case Aの結果において、デッキ側部材とボトム側部材は最終強度に達している。つまり、whipping応答によって縦曲げモーメントが瞬間的にも最終強度を超過すると部材は最終強度に達している場合がある。もし、荷重が繰り返し作用すればバウシinger効果により塑性変形が蓄積し、結果として、船体全体の耐荷力低下に繋がる可能性があることを示唆している。

以上のように、Smith法の考えに従い波浪中における船体の逐次崩壊挙動を、その崩壊後の応答までを考慮して解析できる手法を開発したのは、筆者の知る限り世界で初めてである。提案手法が、作用荷重が船体の縦曲げ最終強度を超過した場合のリスク評価を行うにあたって、非常に有用な解析ツールになると考えている。

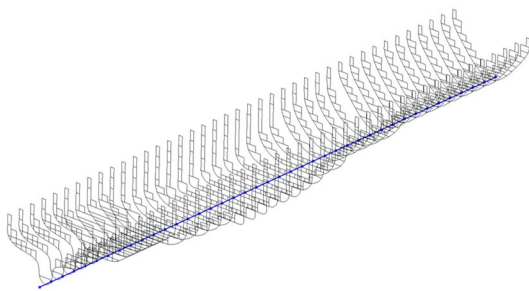


図6 コンテナ船の解析モデル

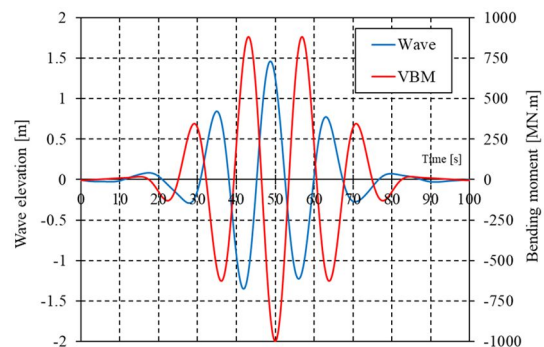
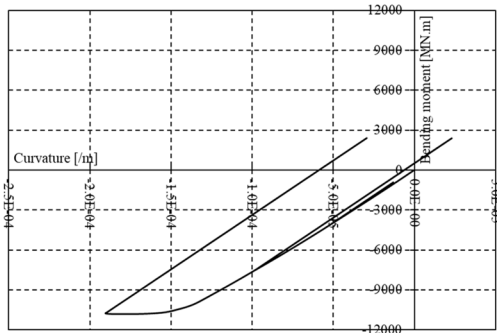
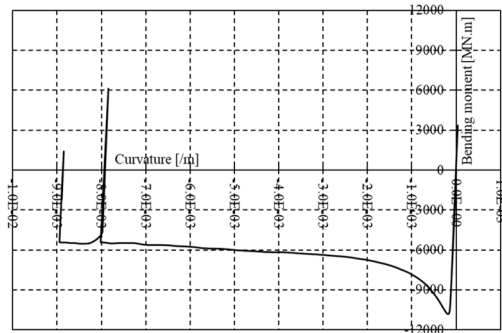


図7 設計不規則波(集中波)

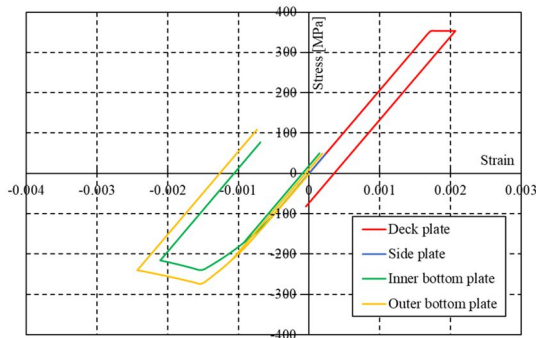


(a) Case A

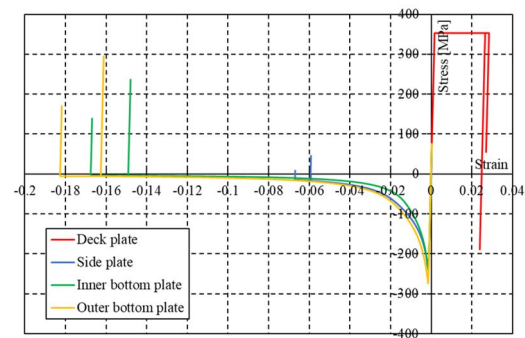


(b) Case B

図 8 曲げモーメント - 曲率関係(波浪中逐次崩壊解析)



(a) Case A



(b) Case B

図 9 平均応力 - 平均ひずみ関係(波浪中逐次崩壊解析)

(4) 波及効果と今後の課題

提案した HFS 法は短時間（汎用のノート PC を用いて数分程度）で船体の波浪中動的逐次崩壊挙動を解析できる．一方、その推定精度は流体および構造・強度のモデルに依存し、適用限界がある．特に軸圧縮下の部材（防撓パネル）の平均応力 - 平均ひずみ関係への依存度は大きい．繰り返し荷重下における塑性変形の累積、崩壊後の高ひずみ領域における損傷・破壊の発生、崩壊後の高ひずみ速度領域での材料強度への影響、座屈変形を含む構造の除荷時の挙動などを詳細に考慮し、平均応力 - 平均ひずみ関係としてモデル化することは難しいと考えられる．

筆者が考える HFS 法の実用方法は、まず既存の平均応力 - 平均ひずみ関係を用いて対象とする波浪中での船体の動的崩壊挙動を解析する．このとき平均応力 - 平均ひずみ関係で使用される変数（例えば、降伏応力やヤング率などの材料定数）および波浪荷重を変化させた複数の解析を行い、縦曲げ崩壊時に部材に働く変位履歴の範囲を整理する．その変位履歴をシェル要素やソリッド要素などで詳細にモデル化した防撓パネルの FEM モデルに与え、上述の複雑な非線形現象を解析する．これらの解析を通じて、波浪中における崩壊時の構造部材の挙動・応答について新たな知見が得られると考える．本研究課題終了後も引き続き関連する研究を継続する所存である．

< 参考文献 >

- [1] 国土交通省海事局: コンテナ運搬船安全対策検討委員会最終報告書, 2015.
- [2] Pal, S. K., Iijima, K., Tatsumi, A., Fujikubo, M., Takami, T.: Experimental and numerical investigation of high frequency vibrations in segmented ship model using one way coupling of CFD and FEM, In Developments in the Analysis and Design of Marine Structures: Proceedings of the 8th International Conference on Marine Structures (MARSTRUCT 2021, 7-9 June 2021, Trondheim, Norway) (p. 38). CRC Press
- [3] J. J. Jensen: Extreme value predictions and critical wave episodes for marine structures by FORM, Ships and Offshore Structures, Vol. 3, Issue 4, pp. 325-333, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 2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 司宮智洋, 辰巳晃, 飯島一博, 藤久保昌彦	4. 巻 32
2. 論文標題 流力弾塑性梁モデルを用いた船体桁の動的崩壊解析 - 第2報: 波浪中崩壊応答解析への拡張 -	5. 発行年 2021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 329-335
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 -

1. 著者名 Pal S. K., Iijima, K., Tatsumi A., Fujikubo M., Takami T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental and numerical investigation of high frequency vibrations in segmented ship model using one way coupling of CFD and FEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Developments in the Analysis and Design of Marine Structures: Proceedings of the 8th International Conference on Marine Structures	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1201/9781003230373	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 辰巳晃, 飯島一博, 藤久保昌彦	4. 巻 32
2. 論文標題 非線形梁有限要素法とアンサンブルカルマンフィルタを用いた船体の積載荷重の逆推定	5. 発行年 2021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 131-138
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 -

1. 著者名 Akira Tatsumi, Kazuhiro Iijima, Masahiko Fujikubo	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimation of still-water bending moment of ship hull girder using beam finite element model and ensemble Kalman filter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2022 41th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 Ko Han Htoo Htoo, Tatsumi Akira, Iijima Kazuhiro, Fujikubo Masahiko	4. 巻 Volume 2B
2. 論文標題 Collapse Analysis of Ship Hull Girder Using Hydro-Elastoplastic Beam Model: Part 2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/OMAE2020-19201	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 辰巳晃, 齋賀大和, Han Htoo Htoo Ko, 飯島一博, 藤久保昌彦	4. 巻 30
2. 論文標題 流力弾塑性梁モデルを用いた船体桁の動的崩壊解析—詳細FEMとの比較を通じた検証—	5. 発行年 2020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 -
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0件

〔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
---------	---------