

令和元年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：2015～2018

課題番号：15H02328

研究課題名(和文) 多軸応力影響と繰り返し载荷影響を考慮した船体桁の縦曲げ最終強度評価に関する研究

研究課題名(英文) Ultimate longitudinal bending strength of ship hull girder considering multi-axial stress and repeated loading effects

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) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：船体の二重底に面外荷重による曲げ変形が生じると、船底板に二軸圧縮場が生じてホギング最終強度に影響を与える。繰り返し波浪荷重下では、船底に座屈変形が累積して、縦曲げ最終強度が低下する可能性がある。本研究では、船底局部荷重を考慮したコンテナ船のホギング最終強度をFEMにより明らかにした。次に、連続防撓パネルに二軸繰り返し面内荷重が作用する場合の座屈・塑性崩壊挙動を実験と理論解析により調べた。さらに、波浪荷重下における船体桁の縦曲げ塑性変形挙動を簡易弾塑性解析と水槽試験により明らかにした。これらの結果を基に、多軸応力と繰り返し载荷が船体桁の縦曲げ最終強度に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンテナ船の縦曲げ崩壊事故調査から、二重底の曲げ変形による二軸圧縮場が船底の座屈を加速し、さらに波浪繰り返し荷重が座屈変形を累積させて最終崩壊に至らしめた可能性が指摘された。本研究では、船底局部荷重を考慮したコンテナ船の縦曲げ崩壊挙動に関する数値解析、および二軸繰り返し圧縮荷重下の防撓パネルの崩壊試験および解析より、船体桁の縦曲げ最終強度に対する多軸応力と繰り返し载荷の影響を調べた。

研究成果の概要(英文)：When a double bottom of ships is subjected to bending due to lateral loads, bi-axial compression is exerted in the bottom plate and they affect the ultimate longitudinal bending strength of ship hull girder in the hogging condition. Under repeated wave loads, buckling deformation of bottom plate may be accumulated and this may further decrease the ultimate hogging strength. In this study, the ultimate hogging strength of a hull girder of container ships was analyzed by nonlinear FEM considering the effect of bottom local loads. The buckling/plastic collapse behavior of a continuous stiffened panel under repeated bi-axial thrust is examined both experimentally and numerically. The cumulative collapse behavior of a hull girder under wave loads was investigated by simplified collapse analyses and wave tank test. Based on the results, the effect of multi-axial stress states and repeated loading on the ultimate longitudinal bending strength of a ship hull girder is investigated.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船体構造 座屈強度 縦曲げ最終強度 繰り返し荷重 多軸応力 コンテナ船

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 大型コンテナ船がホッピング状態で折損・沈没する事故が発生し、その原因調査において、姉妹船の船底外板に板の座屈変形に似た凹凸変形が認められた。この変形の累積過程として、2つの仮説が立てられた。1つは、ホッピング成分を含む縦曲げモーメントが船体桁の縦曲げ最終強度に達したが作用時間が短かったために船底外板には座屈変形が残ったものの、船体桁としては縦曲げ崩壊に至らなかったというものである。他の1つは、曲げモーメントは縦曲げ最終強度に達しなかったが、パネルの初期撓みのうち、座屈モード成分がホッピングを含む波浪中縦曲げモーメントに起因する繰り返し圧縮荷重により増幅されたというものである。

(2) コンテナ船の船体中央部は、浮力が構造・載荷重量を上回るため、上方に突き上げ荷重を受け、ホールド内二重底には、上方に凸の曲げ変形が生じる。これにより、船底外板には船の長さ・幅方向に二軸圧縮応力が作用する。このような多軸応力下でかつ縦曲げ応力が作用する場合の板の座屈・塑性崩壊挙動の研究は十分ではない。

2. 研究の目的

(1) 連続防撓パネルに二軸面内圧縮荷重が作用する場合、および繰り返し面内圧縮荷重が作用する場合について、座屈・塑性崩壊挙動を実験ならびに非線形 FEM 解析により調べる。

(2) 船体桁の縦曲げ逐次崩壊挙動の実用的解析法として、船体構造規則で使用される Smith 法を取り上げ、これを船底荷重による二重底の曲げ変形を考慮できるよう拡張する。また、Smith 法に基づく船体桁の波浪中崩壊挙動の動的解析システムを構築する。

(3) 実船と相似な縦曲げ崩壊強度を有するコンテナ船模型を製作して水槽試験ならびに理論解析を行い、変形挙動の基本的性質を調べる。また解析法の精度を検証する。

(4) 以上の結果を基に、船体の縦曲げ最終強度に対する多軸応力影響と繰り返し載荷影響、ならびに変形累積メカニズムについて検討する。

3. 研究の方法

(1) 一般的なコンテナ船の船底外板と類似の細長比およびアスペクト比を有する鋼製防撓パネル試験体を製作し、防撓材方向に繰り返し圧縮荷重を加える。防撓材と直角方向に無負荷の場合と、所定の圧縮応力を予め負荷する二軸圧縮の場合を取り上げる。初期たわみおよび溶接残留応力を計測する。これら初期不整を考慮した非線形シェル FEM による座屈・塑性崩壊解析を実施し、実験結果と比較する。一方、供試薄板材の圧縮・引張の繰り返し応力・ひずみ関係を取得するため、超小型ダンベル型試験片による材料試験を実施する。

(2) Smith 法では、船体横断面を防撓パネル要素に分割し、圧縮・引張の軸荷重下の平均軸応力-平均軸ひずみ関係を予め求めておき、これをあたかも材料の応力-ひずみ関係のように見なして船体横断面の曲げモーメント-曲率関係を計算する。この Smith 法を通常の梁有限要素に導入し、さらに二重底は平面格子にモデル化することにより、二重底の曲げ変形を考慮した拡張 Smith 法を開発する。さらに、この拡張 Smith 法を、波浪中での動的崩壊挙動を解析できるように拡張する。

(3) コンテナ船を中央断面で前後二分し、その間に実船の曲げモーメント-曲率関係を再現しうる回転崩壊機構を挿入する。この船体模型に波浪荷重を負荷して崩壊変形量を計測すると共に、解析結果と比較する。水槽試験では二重底の二軸応力場の再現や一定条件の荷重の繰り返し載荷は困難であることから、最終強度超過型の崩壊挙動の解明を主題として実施する。

4. 研究成果

(1) 繰り返し面内圧縮を受ける防撓パネルの座屈変形の累積過程を実験的、数値的に検討した。図 1 に試験体の写真を示す。中央スパンが試験対象範囲であり、板、防撓材とも公称板厚 3.2 mm の軟鋼板 (SPHC) である。1 矩形板の幅は 200mm、長さ 1,000mm である。防撓材および横桁材は、TIG 溶接により連続溶接した。試験は、海上技術安全研究所の複合荷重試験装置で行った。試験体の設置状況を図 2 に示す。試験体を水平に支持するとともに、全体座屈を回避するため、横桁位置で鉛直変位を拘束した。試験体端部は単純支持条件とした。荷重は、圧縮側片振りとした。一般に、コンテナ船の静水縦曲げモーメントは常にホッピング状態であるため、波浪縦曲げモーメントが作用してもサギング状態にはならないと考えられる。そのため、載荷条件は実応力状態と大きな乖離はないと考えられる。図 3 に、単調一軸圧縮試験で得られた荷重-ストローク関係 (Specimen UA2) と、繰り返し載荷試験後に単調一軸載荷を行った場合の結果 (Specimen UA1) を示す。繰り返し載荷試験では、油圧ジャッキのストロークを正弦波で制御し、ストローク振幅を平均応力範囲/降伏応力=0.2~0.65 の範囲で段階的に漸増させて、11 段階×各 1 万回の載荷を行った。その結果、中央パネルの横桁材に比較的近い箇所、板の曲げひずみの累積が認められた。しかし図 3 に示すように、累積座屈変形が最終強度に及ぼす

影響はわずか (-1.4%) であった。累積変形は、試験体の不均一性に起因するパネル面内曲げの影響と推定される。図 4 は、非線形 FEM 解析で得られた荷重-ストローク関係である。解析には動的陽解法解析コード LS-DYNA を使用した。材料の応力-ひずみ関係は、単純引張試験結果を基に定め、等方硬化を仮定した。中央スパンパネル部の初期たわみおよび溶接残留応力を考慮して求めた最終強度 (-588 kN) は、防撓パネル試験体の一軸圧縮最終強度 (-595 kN) と良く一致することを確認した。繰り返し载荷後の一軸载荷の解析も実施した結果、図 4 に示すように単調载荷との最終強度の差は実験結果と同様にわずかであった。その他の実験および解析結果を含めて、1-(1) に述べた座屈モード成分増幅型の変形累積およびその最終強度に対する影響は小さいと判断される。板幅方向にも圧縮を加えた二軸圧縮試験では、横圧縮による長さ方向 1 半波の座屈が始めに生じるが、最終的に縦圧縮を加えた時の最終強度は、一軸圧縮の場合と大差なく、幅方向応力の影響も二次的であることが分かった。



図 1 防撓パネル試験体

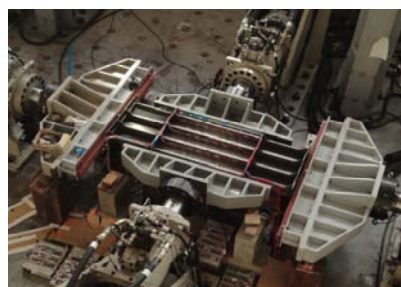


図 2 試験装置と試験体

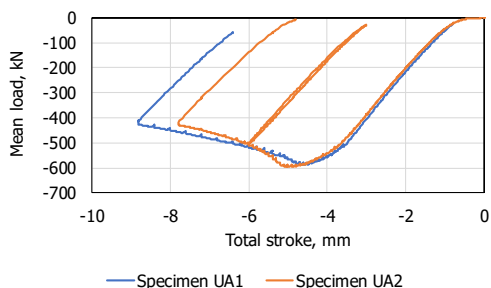


図 3 圧縮荷重-ストローク関係 (実験)

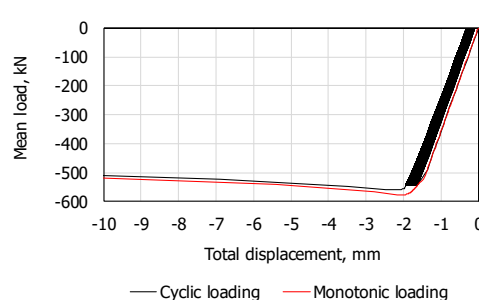


図 4 圧縮荷重-ストローク関係 (FEM)

(2) 繰り返し荷重下の構造部材の弾塑性挙動を推定するためには、鋼材の繰り返し硬化特性を材料試験により同定する必要がある。一方、供試試験体は、板厚 3.2mm の薄肉材である。そこで、試験片製作時の加工硬化と圧縮载荷時の座屈を可能な限り避けつつ材料特性を同定するため、図 5 のような試験部最小幅 3mm の超小型ダンベル型試験片を製作した。ひずみは表面に塗布した多数マーカから DIC (Digital Image Correction) により変位場を計測し求めた。他方、3 次元ソリッド要素による試験片の弾塑性 FEM 解析を行って、両者の比較から応力-ひずみ関係を同定した。結果の一例を図 6 に示す。得られた応力-ひずみ関係を用いた一連の解析より、変形累積およびその最終強度への影響は、柱座屈の場合は顕著であるが、周辺支持平板の場合は顕著ではなく、研究結果(1) に対する有意な影響はないことを確認した。

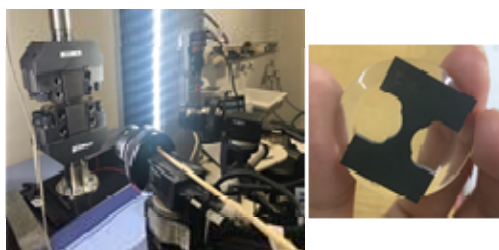


図 5 超小型ダンベル型試験片による材料試験

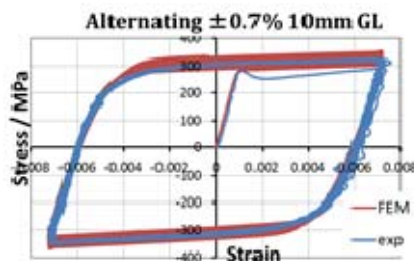


図 6 同定した応力-ひずみ曲線

(3) コンテナ船の縦曲げ崩壊挙動の解明と船底局部荷重の影響を考慮した縦曲げ最終強度の実用的推定法を開発した。まず図 7 に示すように、船底荷重により二重底に局部的な曲げ変形が生じた状態でホギングモーメントが作用する場合について非線形 FEM 解析を行い、崩壊挙動と縦曲げ最終強度を調べた。船底荷重が縦曲げ最終強度を低下させる主要因の 1 つは、二重底の局部曲げ変形により船底外板に付加される縦圧縮応力が外板の座屈崩壊を加速することである。第 2 の主要因は、船底外板の崩壊後に二重底の局部曲げ変形が急増し、曲げの引張側に位置する内底板の縦圧縮強度に対する有効性が低下することである。その結果、船底外板が最終強度に達した時点で直ちに縦曲げ最終強度に達する。また船底外板の船幅方向に生じる圧縮応力が縦曲げ最終強度に及ぼす影響は小さいことを明らかにした。

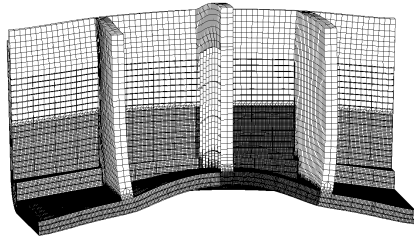


図7 船底荷重によるコンテナ船の二重底の変形

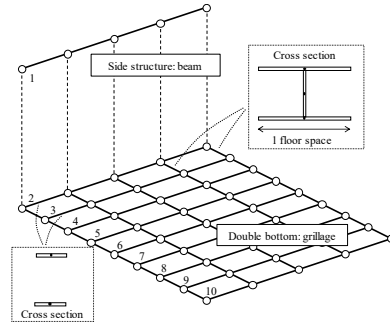


図8 拡張スミス法モデル

次に、船底局部荷重の影響を考慮できるコンテナ船の縦曲げ逐次崩壊挙動解析法(拡張 Smith 法)を開発した。図 8 のように二重底を平面格子で、船側部を 1 つの梁で表し、それぞれを横隔壁およびビルジ部に沿って結合した。Smith 法で用いられる平均軸応力-平均軸ひずみ関係を平均軸応力-平均塑性軸ひずみ関係に置換することで、一般的な FEM コードで擬似ひずみ硬化/軟化挙動として取り扱うことを可能にした。図 9 の▲印が示すように解析結果は、FEM 解析結果と良い相関を示す。FEM で 2-3 日を要する解析が提案法では数分で可能である。さらに、船底外板の破損が直ちに縦曲げ最終強度につながることを考慮して、船底局部荷重を考慮したコンテナ船の縦曲げ最終強度の簡易算式を開発し、FEM 解析との比較より、その精度の高い適用性を明らかにした。

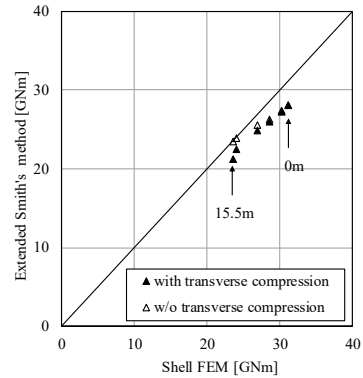


図9 縦曲げ最終強度と船底水圧の関係

(4) ホイッピング影響を含む動的波浪荷重下での船体の縦曲げ崩壊挙動や塑性変形の累積挙動を推定するためには、船体の弾塑性変形と流体力の相互影響まで考慮した動的弾塑性解析(流体力弾塑性解析)が必要である。そこで拡張 Smith 法を動的解析にさらに拡張し、図 10 に示すような崩壊挙動および残留変形の解析を可能にした。ただし、現時点では、波浪荷重ではなくインパルス荷重を与えているに過ぎず、前進速度はゼロであり、さらに繰り返し荷重に対する Smith 法の平均軸応力-平均軸ひずみ関係式も改善の余地があり、今後の課題としたい。

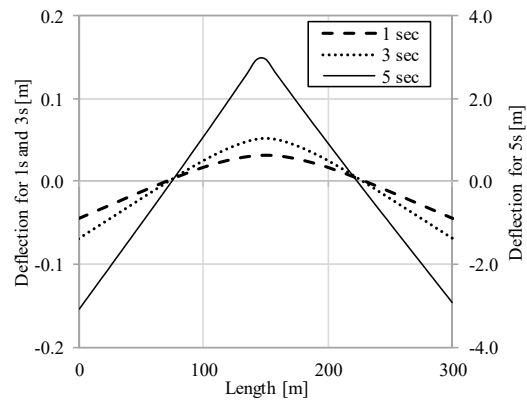
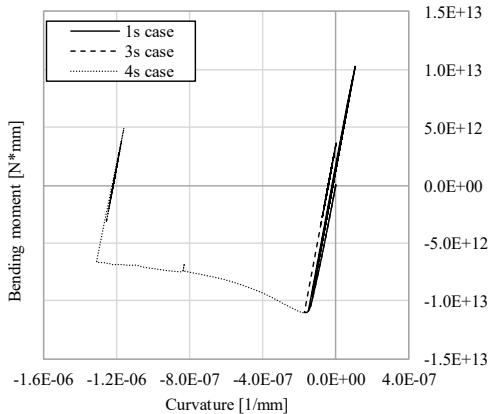


図10 除荷時応答を含む曲げモーメント-曲率関係 図11 異なる荷重作用時間での残留たわみ形状比較

(5) 研究成果(4)に述べたような船体の流体力弾塑性解析法(運動・構造崩壊一体解析法)の適用性の検証のため、図 12 に示すように、コンテナ船を中央断面で前後二分し、その間に実船の曲げモーメント-曲率関係を再現しうる回転崩壊機構を挿入した。水面落下による衝撃力の負荷、波浪荷重の負荷を行い、上記のような簡易動的解析モデルで、崩壊時応答を十分な精度で推定できることを確認した。最重要の知見は、図 11 のように、荷重の作用時間が短いほど、同じ曲げモーメント振幅でも縦曲げ崩壊変形量は小さいことである。

(6) 以上を総合すると、事故コンテナ船の姉妹船の船底に見られた凹凸変形は、防撓パネルなど部材レベルで座屈変形が漸増的に増幅されたというよりも、ホイッピング成分を含む縦曲げモーメントが船体桁の縦曲げ最終強度に達したものの、作用時間が短かったために、船底外板には座屈変形が残ったが船体桁としては縦曲げ崩壊に至らなかった可能性が高い。本研究により、現象を明確化できたと共に、崩壊挙動推定に必要な実用的解析法を開発することができた。

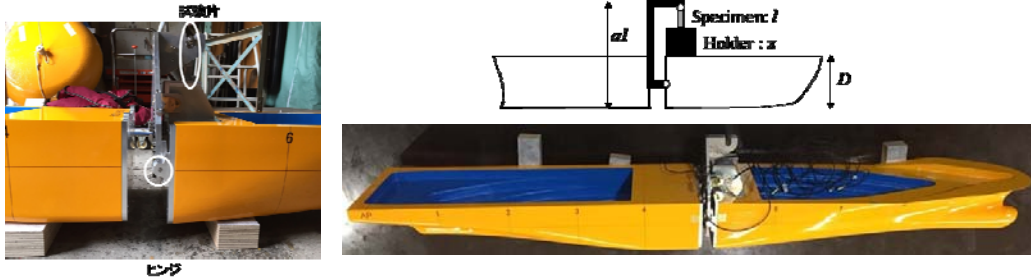


図 12 コンテナ船の曲げ強度相似水槽試験模型

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- ① 辰巳晃、藤久保昌彦、船底局部荷重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 3 報：縦曲げ最終強度簡易推定法の開発—、日本船舶海洋工学論文集、査読有、第 25 巻、2017、pp. 133-142, doi.org/10.2534/jjasnaoe.25.133.
- ② 辰巳晃、藤久保昌彦、松井貞興、船底局部荷重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：実用的逐次崩壊解析法の開発—、日本船舶海洋工学論文集、査読有、第 24 巻、2016、pp. 199-210, doi.org/10.2534/jjasnaoe.24.199.
- ③ 辰巳晃、藤久保昌彦、船底局部荷重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：非線形有限要素法による解析—、日本船舶海洋工学論文集、査読有、第 24 巻、2016、pp. 189-198, doi.org/10.2534/jjasnaoe.24.189.
- ④ K. Iijima and M. Fujikubo, Cumulative collapse of a ship hull girder under a series of extreme wave loads, *Journal of Marine Science and Technology*, 査読有, Vol.20, 2015, pp. 530-541, DOI 10.1007/s00773-015-0308-3.

受賞歴：論文④に対して 2016 年度日本船舶海洋工学論文賞（受賞者：飯島一博）、論文②、③に対して 2017 年度日本船舶海洋工学奨励賞（受賞者：辰巳晃）、論文①～③に対して 2018 年度日本船舶海洋工学論文賞（受賞者：辰巳晃、藤久保昌彦）を受賞した。

〔学会発表〕(計 3 7 件)

- ① Han Htoo Htoo Ko, A. Tatsumi, K. Iijima and M. Fujikubo, Collapse analysis of ship hull girder using hydro-elastoplastic beam model, OMAE2018, 2018, June 17-22, Madrid, Spain.
- ② 田中義照、小森山祐輔、安藤孝弘、橋爪豊、森下晃次、藤本朋宏、辰巳晃、藤久保昌彦、繰り返し圧縮荷重を受ける防撓パネルの座屈変形累積について—第 2 報 FEM による詳細シミュレーション—、日本船舶海洋工学学会平成 29 年度秋季講演会論文集、2017、11/27-28、広島。
- ③ Y. Komoriyama, Y. Tanaka, T. Ando, Y. Hashizume, A. Tatsumi and M. Fujikubo, Effects of cumulative buckling deformation formed by cyclic loading on ultimate strength of stiffened panel, OMAE2018, 2018, June 17-22, Madrid, Spain.
- ④ 田中義照、安藤孝弘、橋爪豊、室尚仁、森下晃次、辰巳晃、藤久保昌彦、繰り返し圧縮荷重を受ける防撓パネルの座屈変形累積について、日本船舶海洋工学学会平成 29 年春季講演会論文集、2017、5/23-24、東京。
- ⑤ 小森山祐輔、柳原大輔、幅方向に支配的な 2 軸面内圧縮を受ける連続防撓パネルの最終強度推定、日本船舶海洋工学学会平成 29 年春季講演会論文集、2017、5/23-24、東京。
- ⑥ Y. Tanaka, T. Ando, Y. Hashizume, A. Tatsumi and M. Fujikubo, Experimental study on cumulative buckling deformation of stiffened panel subjected to cyclic loading, The 6th Int. Conf. on Marine Structures (MARSTRUCT2017), May 8-10, 2017 Lisbon, Portugal.
- ⑦ M. Fujikubo, Ultimate strength of ship hull girder under combined longitudinal bending and local loads, 2nd Int. Conf. on Safety and Reliability of Ships, Offshore and Subsea Structures (SAROSS2016), 2016, Aug 15-17, Glasgow, UK.
- ⑧ 堤成一郎、植田一史、F. Riccardo、藤久保昌彦、鋼板の繰り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、平成 27 年度日本船舶海洋工学学会秋季講演会論文集、11/16-17、2015、東京。

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：柳原 大輔

ローマ字氏名：(YANAGIHARA, daisuke)

所属研究機関名：九州大学

部局名：大学院工学研究院
職名：准教授
研究者番号（8桁）：10294539

研究分担者氏名：田中 智行
ローマ字氏名：(TANAKA, satoyuki)
所属研究機関名：広島大学
部局名：大学院工学研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：20452609

研究分担者氏名：山本 元道
ローマ字氏名：(YAMAMOTO, motomichi)
所属研究機関名：広島大学
部局名：大学院工学研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：30274111

研究分担者氏名：田中 義照
ローマ字氏名：(TANAKA, yoshiteru)
所属研究機関名：国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
部局名：海上技術安全研究所
職名：研究員
研究者番号（8桁）：40373419

研究分担者氏名：飯島 一博
ローマ字氏名：(IIJIMA, kazuhiko)
所属研究機関名：大阪大学
部局名：大学院工学研究科
職名：教授
研究者番号（8桁）：50302758

研究分担者氏名：辰巳 晃
ローマ字氏名：(TATSUMI, akira)
所属研究機関名：大阪大学
部局名：大学院工学研究科
職名：助教
研究者番号（8桁）：60736487

研究分担者氏名：堤 成一郎
ローマ字氏名：(TSUTSUMI, seiichiro)
所属研究機関名：大阪大学
部局名：接合科学研究所
職名：准教授
研究者番号（8桁）：70344702

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。