

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289316

研究課題名(和文) 氷海域における掘削技術の確立のための掘削船および掘削装置の制御システムの開発

研究課題名(英文) Study on the Control System for Ship Drilling in Ice Sea

研究代表者

澤村 淳司 (Sawamura, Junji)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90359670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、氷海域での掘削船を用いた掘削技術の一つである掘削船の位置保持のための制御システムの開発に関する研究である。本研究では、1) 船舶が氷海中を航行するときの氷板の衝突や破壊の現象の解明と数値モデルの確立を試み、2) 数値モデルを用いて流氷中での掘削船とそれをサポートする砕氷船に作用する氷荷重推定を行った。そして、3) 氷荷重下での船舶の運動および構造応答の計測と計算を実施し、氷荷重下での船舶の制御プログラムを構築した。これらの研究結果を統合することによって、氷海中という通常海域に比べて過酷な環境下において海底掘削を行う掘削船の安全運行のための制御システムの構築が可能となる。

研究成果の概要(英文)：This research studies on the development of the control system for a drillship in an ice sea. The drillship keeps her position under the ice load during the ice sea drilling. The icebreaker breaks the ice around the drillship to reduce the ice load acting on the drillship. In order to develop a control system, the ice load induced by the ice breaking and ice collisions during the ship-ice interactions have to be estimated. In this research, the numerical model to calculate the ship-ice interactions when a ship is advancing into an ice sea was developed. The ice load acting on the ship can be obtained by the developed numerical model. The ship motion and structural response under ice load was estimated. The numerical simulations with a control algorithm when a ship advances into an ice sea was developed. The control system for safe navigations of a drillship and icebreaker in an ice sea can be established using the numerical models and theories developed in this research.

研究分野：船舶海洋工学，氷海工学

キーワード：氷海 砕氷船 掘削 アイスマネージメント 氷荷重 模擬氷 構造応答

1. 研究開始当初の背景

(1) 北極海の利用：地球温暖化の影響により海水域の氷が減少している。北極海では海水面の減退に伴い環境調査や資源開発による船舶や海洋構造物の運用が増加している。このような北極海での活動は北極海周辺諸国のみならず EU 諸国や中国、韓国も積極的に行っている。日本においても、北極海での活動は環境保護、資源開発、物資輸送において非常に重要である。

(2) 氷海底掘削：海底資源の開発には海底掘削が必須となる。氷海中の船舶は氷荷重という通常海域とは異なる厳しい荷重環境下に置かれる。荷重環境下の船と氷の間の物理現象は未解明な部分が多い。このため、掘削船による氷海底掘削技術は確立されておらず、実験的な海底掘削が試行錯誤的に行われているのが現状である。本研究は掘削船による氷海底掘削を安全かつ確実に遂行するための重要な技術の一つである掘削船の位置保持システム構築のための研究である。

2. 研究の目的

(1) 氷海底掘削船の位置保持システム：氷海中で掘削作業を行う掘削船は、風や潮流によって移動する氷から力を受けながら、船体を制御し定位置に留まる必要がある。氷海海底掘削作業を安全かつ確実に実施するには、ア) 長・短期の氷海の氷況予測と、イ) 氷況に応じた掘削船に作用する氷荷重を推定と氷荷重下の掘削船の制御 (位置保持) が必要となる。近年、北極海の海水予測に関する研究は活発に行われ、大きな成果を収めつつある。一方、氷海中の掘削船に関する研究は多くなく、掘削船と氷の相互作用に伴う物理現象の殆どは解明されていない。本研究は氷海中の掘削船の位置保持システムに関わる掘削船と氷の間に起こる物理現象を理論的に解明する。

(2) 氷荷重下での掘削船の応答と制御：氷海底掘削作業時の掘削船の位置保持システムを構築するための、掘削船と氷の相互作用に伴う物理現象の理論的な解明と計算モデルの提案を行う。具体的には、ア) 船と氷の衝突による氷の破壊挙動の解明と氷破壊荷重の推定、イ) 掘削作業時の掘削船に作用する氷荷重の推定、ウ) 氷荷重下での掘削船の運動と構造応答の計算を行い、エ) 掘削船の制御システムの構築に繋げる。

3. 研究の方法

本研究は、氷の破壊というミクロの現象から、船体の運動、構造応答というグローバルな現象までを研究対象としており、時間、空間スケールや物理現象の性質が大きく異なる広範囲な研究課題の複合問題である。本研究は掘削船の位置保持システムに関わる、船と氷の間の各々の物理現象を理論的に解明し、こ

れらを統合させる。

(1) 船舶による氷の破壊：氷海中には様々な種類の氷が存在する。氷海中で活動する船舶は、これら大きさや形が異なる氷との相互作用によって発生する氷荷重を受ける。船舶にとって重要な氷は板氷と流氷である。船と板氷の相互作用による荷重は氷板が破壊される時の破壊荷重となり、船と流氷の相互作用による荷重は船体と氷の衝突による衝突荷重となる。氷板破壊の解明には、FEM (Finite Element Method) による平板氷の曲げ現象の数値計算と、DEM (Discrete Element Method) による平板の衝突破壊の数値計算を用いる。これにより、平板氷の連続体から非連続体に至る複雑な動的破壊荷重の推定と破壊モードの検討ができる。船と流氷の衝突荷重の計算には、物理ベースのシミュレーション手法 (剛体運動、衝突判定、力積) を用いる。同時に、模擬氷を用いた模型船実験によって、船と氷の衝突荷重の実験的な検討を行う。

(2) 氷荷重の推定：通常、掘削船は耐氷 (小さい氷片中を進む) 能力はあるが、砕氷 (氷を割って進む) 能力はない。掘削船は、砕氷船が海水を割ってできた開放水面 (大小の砕氷片が浮遊する海面) 内で作業を行う (砕氷船による開放水面を作る作業をアイスマネジメントと呼ぶ)。掘削船に作用する氷荷重の推定には、砕氷船による開放水面内の氷片分布 (アイスチャンネルと呼ぶ) の予測と、風や潮流によって移動する氷片と船体との相互作用による氷荷重の推定が必要となる。アイスチャンネルの予測のために、流氷域内の平板氷を砕氷船が破壊または小片氷を排除しながら航行する時の氷荷重と砕氷片分布の数値計算モデルを開発する。数値計算モデルは、物理ベースモデリングによる剛体運動計算と衝突判定アルゴリズムによる船と氷の衝突計算、そして、FEM と DEM による平板の曲げと衝突破壊の計算を用いる。氷片と船体との相互作用による氷荷重の推定は、物理ベースのシミュレーション手法によって計算できる。同時に、模擬氷を用いた模型船実験を実施し、船舶の氷荷重分布の計測を行う。計測結果は、数値計算の検証データや氷荷重の発生メカニズムの解明に使用される。

(3) 氷荷重下での船の応答と制御：流氷中 (アイスチャンネル中) を航行する (又は氷が風や潮流によって押し寄せるときの) 船に作用する氷荷重の推定結果を用いることで、氷荷重下での掘削船や掘削管の運動計算や構造応答計算ができる。また、氷海中の船全体の構造応答に関しては、模擬氷と弾性模型船を用いた模型船実験による実験的な検討を行う。そして、掘削船の運動計算に制御アルゴリズムを組み込むことで、氷海中の船

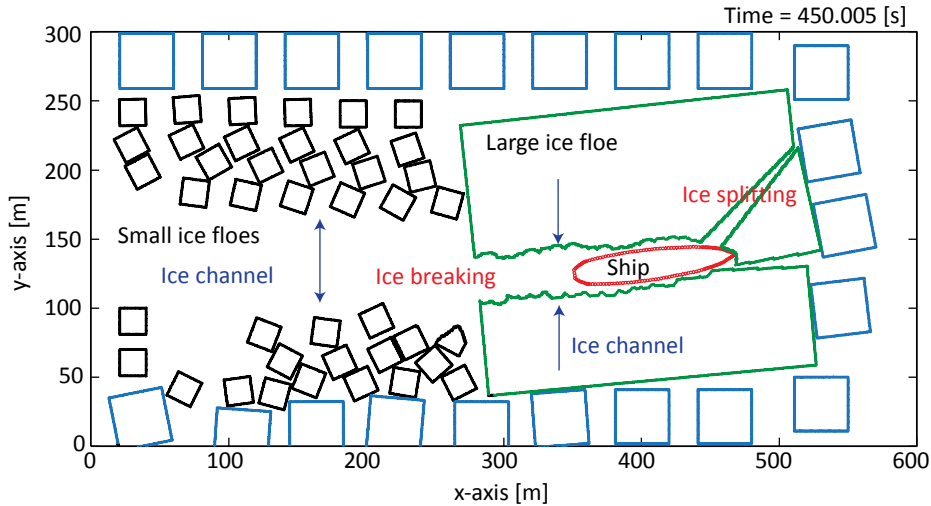


図1 氷海中を航行する船舶の氷の排除の様子。

の運動制御の計算が可能になる。

4. 研究成果

(1) 船舶が受ける氷荷重の計算：氷海中を航行する船舶は、浮遊する氷板の大きさにより、氷を排除又は砕氷しながら航行する。このような様々な氷況中を船舶が航行する時の氷荷重が計算できる数値計算モデルを開発した。図1は大小の流氷板が浮遊するような氷海中を航行する船舶の氷の排除（砕氷）の様子を示す。図2は図1の時の氷荷重の時系列分布を示す。開発した数値計算モデルにより、砕氷船のアイスマネジメントによって出来るアイスチャンネルの予測や、アイスチャンネル中で作業する掘削船の氷荷重の計算が可能になった。

本計算結果により船舶が受ける氷荷重の推定には、Split 破壊が重要であることが数値的に初めて明らかになった（本数値計算モデルは、氷の破壊モードとして氷板の曲げと Split による破壊を考えた。）。本計算モデルは風や潮流による氷片の移動が考慮されておらず、これは今度の課題となる。

本計算モデルのように、氷の衝突、排除、破壊が連続、もしくは同時に起こる現象が計算できる数値モデルはこれまでなく、本数値計算モデルが世界で初めての研究成果である。

(2) 模擬氷を用いた氷海中模型船実験の確立：氷海船舶の設計には氷海水槽を用いた氷海中模型船実験が必須となっている。氷海水槽とは、実際の氷海を一定の縮尺率で水槽内に作り出す施設であり、日本国内には僅か2施設しかない。氷海水槽は施設内を低温度に保つ必要があるなど維持管理費が高く、実験費用も高い。本研究は、模擬氷を用いる事で、常温水槽内での氷海中模型船実験の方法を確立した。模擬氷とは常温個体の材料を用い、氷の密度、摩擦、氷片の形状や大きさなど、海氷の性質を模擬したものである。本研究で

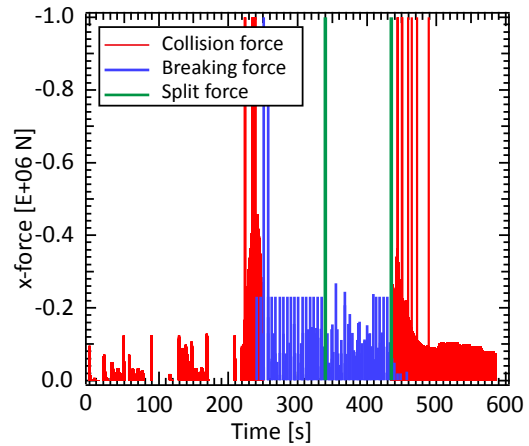


図2 氷荷重の時系列分布。

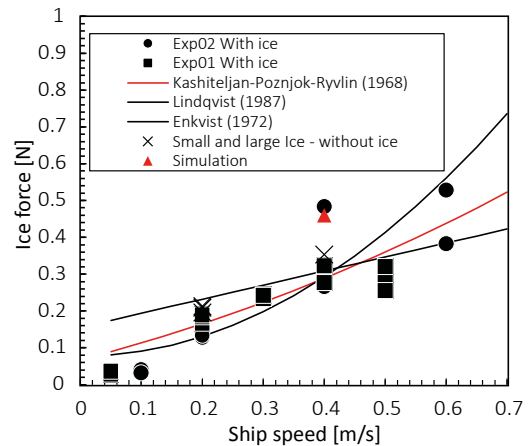
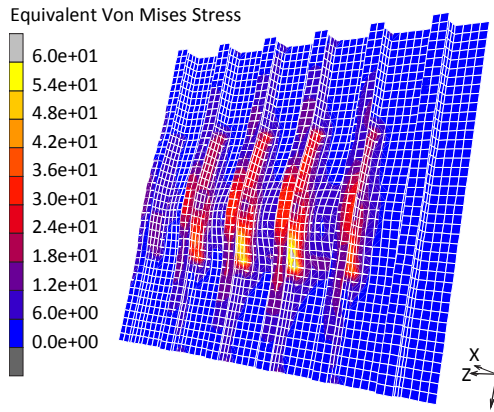
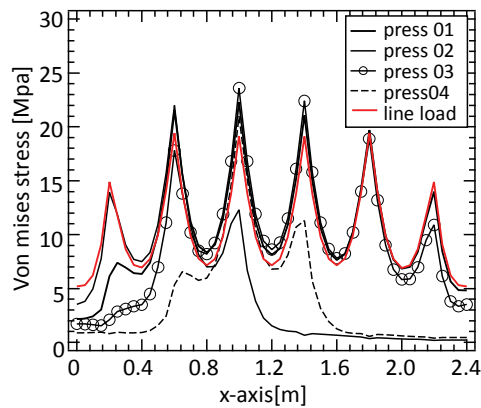


図3 氷海域模型船実験の結果（氷抵抗式と数値計算との比較。）

は、プラスチック材とワックス材を模擬氷の材料として用いた。図3は模擬氷を用いた常温水槽内での模型船実験（氷抵抗試験）の結果を示す。図3の氷況はアイスチャンネル内に多数の小片氷が浮遊する流氷もしくは



上：船体外板構造の変形と応力。



下：外板表面の応力の水線面上分布

図4 氷荷重下での船体外板構造の構造応答計算結果。

は **Brash ice** となる。図3には、実氷海域中を航行する船舶の氷抵抗を算出する時に用いる氷抵抗式の結果（実線）と、本研究によって実施された数値計算結果（三角）が同時に示されている。模擬氷による模型船実験の結果は、氷抵抗式、数値計算結果と良い一致を示しており、模擬氷を用いた常温水槽内での模型船実験の妥当性が証明された。

模擬氷による模型船実験を用いて、船と氷の衝突荷重、流水中の船舶の氷荷重の計測（模型船の直進、斜行試験）を行った。計測結果は、数値計算の検証データや氷荷重の発生メカニズムの解明に使用された。模型船は掘削管を通すムーンプールが船体中央部に設置されており、ムーンプール内に入り込む氷片の進入量を調べた。風や潮流による海水の移動速度（低速度）では、ムーンプールへの氷片の進入は殆どなかった。この実験結果から、研究計画当初に想定していた、ムーンプール内に進入した海氷による掘削管の損傷の可能性は小さい事が明らかになった。しかしながら、模型船は実際の掘削船の船体形状とは異なることから、掘削船の縮尺模型を使用した氷海中模型船実験の実施が必要である。

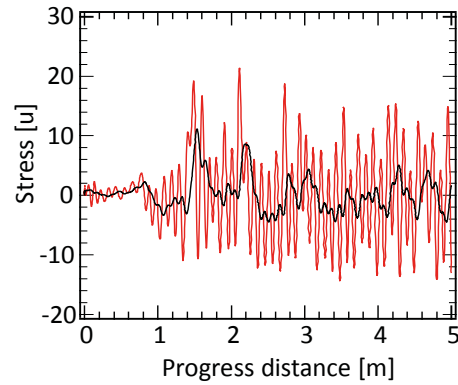


図5 氷荷重下の船体の縦曲げ弾性応答。

また、掘削船または氷の移動速度が大きいときや、海氷が掘削船の船側方向から流れてくるときには、ムーンプール内への海氷の進入量が増大する。したがって、実際の掘削船や掘削管の運用方針によっては、ムーンプール内への氷の進入を考慮する必要がある。

模擬氷を用いた氷海中模型船実験は、氷海水槽技術の発達に伴い衰退したが、模擬氷の使用可能性が再評価されつつあり、本研究成果は世界に先駆けて模擬氷の有効性を証明した。

（3）氷荷重下での船体構造応答の計算：数値計算モデルを用いて計算された氷荷重の分布を用いることで、氷荷重下での船体構造部材の構造応答計算法を確立した。図4は氷荷重下での船体外板構造の構造応答（上：船体外板構造の変形と応力，下：外板表面の応力の水線面上分布。）を示す。図4に示すように、ローカルな船体構造の氷荷重下での船体構造の応力状態を知る事ができ、氷荷重下での船体構造の損傷の判定が可能となった。また、全船モデルを用いた船体構造応答計算を実施することにより掘削船と掘削管の相互作用による掘削管の構造応答（さらには掘削装置の損傷判定）が行える。波浪中ではあるが、海洋構造物の構造応答計算や掘削管の疲労強度計算が行われており、この計算に外力として氷荷重を与える事で氷海中での掘削船と掘削管の構造評価が可能となる。

氷海中を航行する船のグローバルな構造応答を、模擬氷と2Dの弾性模型船を用いて計測した。そして、氷の衝突に伴う船体全体のグローバルな構造応答が計測できた。図5に計測した船体の弾性応答の時刻歴分布の例を示す。計測結果は、氷荷重下での船体全体の構造応答の解明や、全船構造応答計算の検証データに使用できる。構造応答の詳細（実現に近い応答）を明らかにするには、本実験の3Dモデルへの拡張が必要である。

氷荷重下での船全体の構造応答は未解明で、本実験は氷海中の船全体の構造応答を模型船実験によって解明しようとする初めての

試みとなった。

(4) 氷荷重下での船の応答と制御：氷荷重推定のための数値計算モデルに制御アルゴリズムを組み込み、氷海中の船の運動制御の計算を行った。船の運動制御には一般的な制御理論であるPD制御とLOS (Line-of-Sight) アルゴリズムを用いた。表1に ITAE (The Integral of Time-weighted Absolute Error) index を用いた制御プログラムの性能評価の結果を示す。表1に示すように、一般的な制御アルゴリズムを用いた本研究の制御モデルは開放水面のときと比べると、氷海中での制御の性能は悪くなる。しかしながら、氷海域という厳しい外力環境下である事を考えると、許容できる範囲と言える。ただし、実海域で作業する掘削船の位置保持の要求される精度が高くなる、もしくは、氷況が厳しくなった場合には、より高性能の制御システムの組み込みが必要となることも考えられる。

また、波浪中ではあるが、掘削管の運動応答計算(過励振)が行われており、この計算に外力として氷荷重を与える事で氷海中での掘削管の運動応答が計算できる。

表1 船の制御プログラムの性能評価。

氷密節度	(ITAE index)	
	Course keeping	Course changing
0% (開放水面)	0	1.03E+06
5%	4.07E+05	2.67E+06
10%	4.98E+05	2.47E+06
15%	4.80E+05	2.38E+06
20%	5.47E+05	2.27E+06
25%	4.59E+05	2.24E+06
30%	3.98E+05	2.23E+06

*数値が高い=制御の性能が悪い。

(5) 掘削船の制御システム：上記の研究結果を統合することによって、氷海中において海底掘削を行う掘削船の制御システムの構築が可能となる。本研究は仮想的な氷海域の各種条件下での数値計算と屋内実験に留まっている。実際の掘削船の制御システムは、掘削船が作業を行う氷海域の氷況、掘削船や掘削管の仕様(馬力や航行性能など)、運用方針によって異なる。実氷海域で使用可能な掘削船の制御システムの構築には、実氷海域および実船条件下での検証が必要となる。

氷海工学に関する研究は氷海の不均一性を

主要原因とした極めて複雑な構造物と氷の相互作用による物理現象となる。このため、船と氷の間の物理現象の理論的解明は不十分で、実験的な研究が殆どであった。また、本研究は、氷の破壊から船体全体の応答までを扱う広範囲な研究課題の複合問題である。本研究は、数値計算と模型船実験を駆使することで、氷の間の物理現象の理論的解明を目指した国際的に初めての試みであり、これは、研究代表者、研究分担者がもつ研究技術を連携することにより初めて可能になった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 25 件)

① Junji Sawamura and Shinji Kioka, Numerical Modeling of Icebreaking and Ice-clearing for an Icebreaker Advancing in Sea ice, Proceeding of 23nd IAHR International Symposium on Ice, 査読有, 2016, 印刷中。

② Junji Sawamura, Hidetaka Senga, Kensuke Imaki, Keisuke Suga and Hoyoi Kim, Ice Resistance Test using Synthetic Ice for a Ship Advancing in Ice-covered Water, Proceeding of 23nd IAHR International Symposium on Ice, 査読有, 2016, 印刷中。

③ Junji Sawamura, Numerical simulation of local ice pressure distributions and structural response of ship hull for ship advancing in level ice, Proceeding of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 査読無, 2016, pp. 175-178.

④ Tatsuya Shigihara, Akihisa Konno, Risk Assessment Method for Collision of Ship with an Ice Floe, Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 査読無, 2016, pp. 171-174.

⑤ Hidetaka Senga, Numerical Scheme for Predicting Vortex Induced Vibration of Slender Structures using Vortex Method, Proc. of 3rd International Conference on Violent Flows, 査読無, 2016, CD-ROM.

⑥ K. Iijima, M. Sakai and M. Fujikubo, Experimental Investigation into Hydro-elastoplastic Behavior of VLFS under Extreme Vertical Bending Moment, Proceedings of EASEC14, 査読無, 2016, CD-ROM.

⑦ 保海晃平, 井上朝哉, 藤久保昌彦, 飯島一博, ライザー掘削における掘削用ドリルパイプの疲労強度評価に関する研究, 第 25

回海洋工学シンポジウム論文集, 査読無,
2015, CD-ROM.

⑧ S.Kioka, T.Takeuchi and Y.Watanabe, Characteristics of Sea Ice floes Run-up caused by Tsunami Considering Ice Jams and Ice Pile-ups around Structures, Proc. of the 25th The International Offshore and Polar Engineering Conference, 査読有, 2015, Vol.3, pp.778-782.

⑨ Junji Sawamura, Shinji Kioka and Akihisa Konno, Experimental and numerical investigation on ice submerging for icebreaker with 2D model test using synthetic ice, Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 査読有, 2015, USB (POAC15-34).

⑩ Tatsuya Shigihara, Daisuke Ishibashi and Akihisa Konno, Experimental and Numerical Investigation of a Model-Scale Ship and Ice Floe (2nd report), Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 査読有, 2015, USB (POAC15-212).

⑪ 澤村淳司, 金野祥久, 木岡信治, 砕氷片の沈み込み運動による船体氷荷重推定のための模擬氷を用いた2次元模型船実験, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読無, 2015, Vol.20, pp.303-306.

⑫ Junji Sawamura and Egil Pedersen, On a Numerical Model for 2D Numerical Simulation of Ship-Ice Interaction for an Icebreaker Advancing in Ice-covered Water, Proceedings of the 30th International Symposium on OKHOTSK sea & sea ice, 査読無, 2015, pp. 151-154

⑬ Junji Sawamura, Numerical Study on Ice Force Distribution for Plate Ice Failure and Broken Ice Submerging For Ship Manoeuvre in Level Ice, Proceedings of the 22nd IAHR International Symposium on ICE, 査読有, 2014, pp. 171-178.

[学会発表] (計 11 件)

① Junji Sawamura, Numerical Modeling of Icebreaking and Ice-clearing for an Icebreaker Advancing in Sea ice, 23rd IAHR International Symposium on Ice, 2016年5月31日 - 6月3日, Ann Arbor, Michigan USA.

② Junji Sawamura, Ice Resistance Test using Synthetic Ice for a Ship Advancing in Ice-covered Water, 23rd IAHR International Symposium on Ice, 2016年5月31日 - 6月3日, Ann Arbor, Michigan USA.

④ Junji Sawamura, Numerical simulation of local ice pressure distributions and structural response of ship hull for ship advancing in level ice, 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2016年2月22 - 24日, 紋別市文化会館, 北海道, 紋別市.

⑤ 澤村淳司, 模擬氷を用いた模型船実験による砕氷船の流水中での氷荷重の計測, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2015年11月16 - 17日, 東京大学生産技術研究所, 東京都, 目黒区.

⑥ Junji Sawamura, Experimental and numerical investigation on ice submerging for icebreaker with 2D model test using synthetic ice, 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2015年6月15 - 18日, Trondheim, Norway.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤村 淳司 (SAWAMURA, Junji)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号: 90359670

(2) 研究分担者

木岡 信治 (KIOKA, Shinji)
国立研究開発法人土木研究所 (寒地土木研究所)・研究員
研究者番号: 50302758

金野 祥久 (KONNO, Akihisa)
工学院大学・工学部・教授
研究者番号: 60322070

飯島 一博 (IIJIMA, Kazuhiro)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 50302758

千賀 英敬 (SENGA, Hidetaka)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号: 60432522