

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04938

研究課題名(和文) 波浪と氷板の相互影響下にある氷海船舶の氷荷重発生原因の実験的解明

研究課題名(英文) Experimental study on the wave-ice-structure interaction for ice-going ship

研究代表者

澤村 淳司 (Sawamura, Junji)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90359670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、海水域での船舶の安全航行において近年問題となっている波浪域での氷荷重推定の発生原因を実験的に解明することであり、この課題に対して以下の成果を得た。1) 模擬氷を用いた波浪-氷片 構造物の氷片運動計測実験を実施し、構造物の存在が波浪中にある氷板の運動に与える影響を明らかにした。2) 塩分氷を用いた氷板の曲げ破壊強度計測実験を実施し、氷微視構造と曲げ強度の関係を明らかにした。また、氷板の曲げ破壊が模擬できる模擬氷を開発した。3) 模擬氷を用いた波浪中での氷板の運動・変形の計測実験と波浪中での船体氷荷重計測実験から、波浪中の氷荷重の発生原因の一因を導いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波浪と海水の相互影響に関する研究は古くからあったが、構造物と波浪および海水の相互影響を考えた研究は殆どなく、波浪 海水 船体の相互影響の解明を試みる本研究課題は学術的意義がある。また、海水域で稼働する構造物と海水との間に発生する様々な現象の解明や評価には、氷海水槽を用いた実験が欠かせない。しかし、世界にある氷海水槽の数は僅か(20施設ほど)、氷海水槽の利用には大きな制限がある。本研究課題の氷海水槽を必要としない模擬氷を用いた波浪中の氷海実験の確立は学術的および社会的意義が大きい。さらに、本研究課題の成果は氷海域での船舶の安全航行の実現に大きく貢献でき、さらには、氷海域の環境保全の一助となる。

研究成果の概要(英文)：This research investigated the ship-ice-wave interaction for the safe navigation of ice-going ships. 1) The 2D experiment using synthetic ice was conducted to measure the motion of the ice pieces in the regular wave and the fixed structure interaction in order to understand the effect of the regular wave on the ice motion near the structure. 2) The bending strength of the saline ice was measured when the cantilever plate ice was bended. The relationship between the ice micro structure and the ice bending strength was obtained. Additionally, the synthetic ice which can present the ice bending failure was developed. 3) The synthetic plate ice was used in the experiment of wave-plate ice interaction and the plate ice motion and deformation were measured. The model ship test was conducted to measure the ice force in the regular wave. The relationship between regular wave and ice force in the ship advancing into the ice was obtained.

研究分野：氷海工学

キーワード：氷海船舶 氷荷重 波浪影響 海水微視構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

北極海での海洋開発および物資輸送による船舶の航行の急増に伴い、氷環境下にある船舶の安全性評価の強化が急務になっている。氷海船舶の安全航行は、船舶と海水との衝突によって引き起こされる氷荷重を正確に推定し、氷荷重下にある船舶の効率よい航行条件の検討や構造損傷を防ぐ船殻の設計などによって実現することができる。そして、近年の地球温暖化の影響による海水水面の減退が海水運動を増加させ、それが（海水運動が）船体に作用する氷荷重を増幅させていると言われている。この波浪と海水の相互影響下にある氷海船舶の氷荷重推定が新たな問題となっている。しかし、波浪影響が加わる事で海水と船体の間の物理現象が複雑化することから、波浪影響がないこれまでの氷荷重推定法を用いることはできない。そこで、本研究課題は、模擬氷を用いた船舶の海水実験を実施し、波浪-氷板-船体間の氷荷重の発生原因の実験的な解明を試みる。

2. 研究の目的

海水面積が十分にある氷海域の波浪は小さく、船体氷荷重が波浪から受ける影響は小さい。このため、船体氷荷重の発生要因の大部分が船体と氷板との衝突によって発生する衝突荷重になる。一方、海水面積が小さい氷海域での波浪は大きくなり、海水は波浪によって大きく運動する。よって、海水面積が小さい氷海域での船体氷荷重は、船と海水との衝突荷重に加え、波浪によって誘起された海水運動を考慮する必要がある。北極海は地球温暖化により年々海水面積が減退しており、波浪も増加傾向にある。このため、近年の北極海を航行する船舶には、波浪影響を考えた船体氷荷重の推定が必要になる。これは、地球温暖化がもたらした新しい問題であり、波浪-氷板-船体の相互影響下の問題は殆ど解明されていない。そこで、本研究課題では、模擬氷を用いた氷海船舶に関わる実験（模型船実験、波浪中の海水運動実験など）を実施し、波浪-氷板-船体間の氷荷重の発生原因を実験的に解明することを目的とする。

氷海域で稼働する船舶は海洋構造物と海水との間に発生する様々な現象の解明や評価には、氷海水槽を用いた実験が欠かせない。しかし、世界にある氷海水槽の数は僅か（20施設ほど）、そのうち日本で稼働する氷海水槽は1施設のみとなっている。このため、氷海水槽の利用には大きな制限がある。そこで、本研究課題では、氷海水槽の利用を必要としない模擬氷を用いて、波浪中の氷海実験を実施する。

3. 研究の方法

波浪-氷板-船体の相互影響下における氷荷重を、模擬氷を用いた海水実験により実験的に解明する本研究課題は、以下の3つの研究課題に細分し実施した。

（1）波浪中の海水運動の実験的解明

海水サイズが小さいとき、海水は波浪や船体との衝突によって破壊されない。一方、海水サイズが大きいとき、海水は波浪および船体との衝突によって破壊される。北極海には様々な大きさの海水が存在しており、大小の海水（模擬氷）を用いた波浪中の氷板運動計測実験を実施し、波浪によって誘起される氷板の運動を実験的に解明する。実験で用いる波浪は規則波とし、定常波の条件（波高と波長）と氷板の運動の関係を明らかにする。

（2）海水強度と海水微視構造データの収集と模擬氷の開発

海水サイズが大きくなると、海水は波浪や船体との衝突によって破壊される。したがって、船体氷荷重の推定には海水の破壊強度の推定が重要になる。しかし、海水の破壊強度は海水が生成される条件（温度、塩分濃度）によって異なり、その詳細は明らかになっていない。そこで、低温室内において塩分氷の曲げ破壊試験を実施し海水（塩分氷）の破壊強度を計測する。これと同時に、海水微視構造データをMRI（Magnetic Resonance Imaging：磁気共鳴画像）を用いて取得し、海水強度の大小を決める一因と言われている海水微視構造（ブライン構造）と塩分氷強度の関係を調べる。これらのデータをもとに、海水の曲げ破壊特性が模擬できる模擬氷を新たに作成し、海水実験に使用する。

（3）波浪中の船体氷荷重の実験的解明

船体氷荷重は海水サイズや厚さなどの海水条件と波高や波長などの波浪条件、そして、船速度や船首形状などの船条件によって異なる。そこで、海水のサイズ、波浪条件、船速を変えた模型船実験を実施し、波浪中にある氷海域での船体氷荷重の波浪条件と氷荷重の関係を明らかにする。なお、実験で用いる波浪は規則波とし波高と波長を変化させる。上記の実験結果を実船に適用するために、実海データと実験データの定量的な関係を調べ、実氷海域中の波浪-氷板-船体の氷荷重推定を行う。

4. 研究成果

(1) 波浪中の海水運動の実験的解明

波浪中の海水運動の実験的に解明するため、1) 規則波中にある小氷片群の運動計測実験、2) 規則波中にある長方形氷板の運動計測実験、3) 規則波中にある小氷片群の固定構造物周辺の運動計測実験を実施し、定常波によって誘起される海水運動の詳細を調べた。これらの実験から規則波中にある海水運動についての以下の知見が得られた。

小氷片板の運動は、海水密度度（海面全体に占める氷面積の割合）の影響は小さく、定常波の波幅度（波形勾配）の影響が大きい。この結果から、氷密度度および氷サイズが大きくない場合でも、波長が短く波高の高い（波幅度の大きい）波浪中の氷板速度は、波長が長く波高の低い（波幅度の小さい）ときよりも大きくなり、船体氷荷重も大きくなる可能性がある。規則波中にある長方形氷板の運動（曲げ変形）の傾向は、波浪条件が異なっても同じとなる。この結果から、氷サイズがある大きさ以上になると、波浪条件による船体氷荷重の違いは小さくなることが分かった。規則波中にある小氷片群の固定構造物周辺の運動（上下変位）は、固定構造物がないときに比べて大きくなる（図1）。この結果から、波浪によって誘起される海水運動は船体付近で大きくなり、船体氷荷重も増加する可能性が示された。

上記の結果から、波浪による海水運動の増加が船体氷荷重を増加させ、その大きさは波浪の波幅度（波形勾配）に依存する。しかし、氷板サイズが大きくなると船体氷荷重の波幅度の影響は小さくなるということが分かった。本実験のように、波浪中の海水運動（上下変位、水平方向速度、曲げ変形など）の詳細を実験的に明らかにした研究はなく、本実験結果は、波浪が存在する海水域を航行する船体氷荷重推定の精度向上のための基礎データとなる。さらには、氷と船体の衝突問題だけでなく、北極海の気候変動の研究などで用いられる研究海水分布予測の基礎データとしても利用できる。ただし、本実験は限られた実験条件下での結果であり、実験データの追加（波高、波長、氷厚、氷の大きさ、構造物周りの運動など）が必要になる。

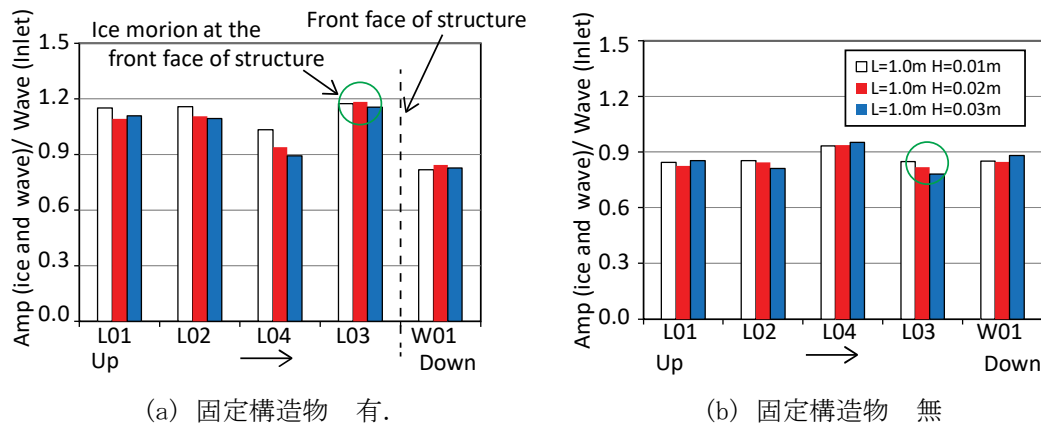


図1 固定構造物の有無による波浪中の小氷片の運動（上下変位）の違い。

(2) 海水強度と海水微視構造データの収集と模擬氷の開発

船体氷荷重の推定には海水の破壊強度の推定が重要になる。低温室内において塩分氷の曲げ破壊試験を実施し海水（塩分氷）の破壊強度を計測した。図2に平坦氷の塩分濃度とブライン含有量、および、海水曲げ強度の関係を示す。海水（平坦氷）のブライン含有量は塩分濃度の増加に従って増加する。これは、塩分濃度の増加に伴い、ブライン生成量が増加するためである。曲げ強度は、塩分濃度の増加に従って低下する。これは、海水強度に対して欠陥となるブラインチャンネル（微視構造）が増加することが原因である。また、平坦氷とブラッシュアイス（平坦氷が砕氷船により砕かれ、砕かれた砕氷片が再凍結してできた板氷）の曲げ強度を比較すると、ブラッシュアイスの曲げ強度の方が強くなる。これは、平坦氷とブラッシュアイスの微視構造の違い（ブラッシュアイスの微視構造の複雑性）が曲げ強度に強く影響することを示している。さらに、塩分氷作成時の Seeding（微細水滴を噴霧し結氷を促進させる作業）の有無による曲げ強度の違いを調べ、Seeding 有の方が曲げ強度が弱くなることが示された。これも、Seeding 有無による塩分氷の構造の違い（塩分氷の表層と中央部の構造様式の違い）が海水強度に影響することを示している。

曲げ強度の計測に用いた塩分氷の微視構造データ MRI を用いて取得し、海水微視構造（ブライン構造）と塩分氷強度の関係を調べた。図3に MRI より取得した平坦氷およびブラッシュアイスの微視構造と微視構造データから作成した構造計算（FEM）モデルを示す。平坦氷よりブラッシュアイスの構造の方が複雑であることがわかる。また、平坦氷とブラッシュアイスのブラインチャンネル（微視構造）の方向の違いを比較すると、平坦氷のブラインチャンネルには方向性が見られるが（海水の成長方向のブラインが多く存在する）、ブラッシュアイスには見られない。一方、ブラインチャンネルの幅およびチャンネル間距離に対して2つの間に大きな違いは見られない。以上のことから、海水の曲げ強度はブラインチャンネルの量（塩分濃度に依存）に依存し、さらには、ブラインチャンネルの構造の違い（チャンネルの方向）の影響を受ける

ことが明らかになった。

海氷の曲げ破壊特性が模擬できる模擬氷を開発した。また、塩分氷と模擬氷の曲げ試験結果比較し、模擬氷が塩分氷の曲げ破壊の傾向（曲げ強度の値は異なるが破壊に至るまでの荷重—変位曲線）が同等であることを確認した。さらに、MRI を用いて取得した 3 次元の海氷微視構造データから、氷板の強度解析のための FEM 数値解析モデルを作成した（図 3）。開発した模擬氷は海氷の破壊を考慮した氷海実験に使用できる。海氷微視構造の数値モデルは海氷強度の詳細解析（ブライン構造の影響や海氷サイズの影響）に使用できる。

海氷微視構造は海氷強度に影響があることは以前から言われていたが、本研究により世界で初めて数値データを用いて明らかにした。また、海氷の曲げ破壊特性を考えた模擬氷の開発も世界初となる。今度は、大型の船舶試験水槽で使用可能な模擬氷の大型化（現在は長さ 1m まで）が課題になる。

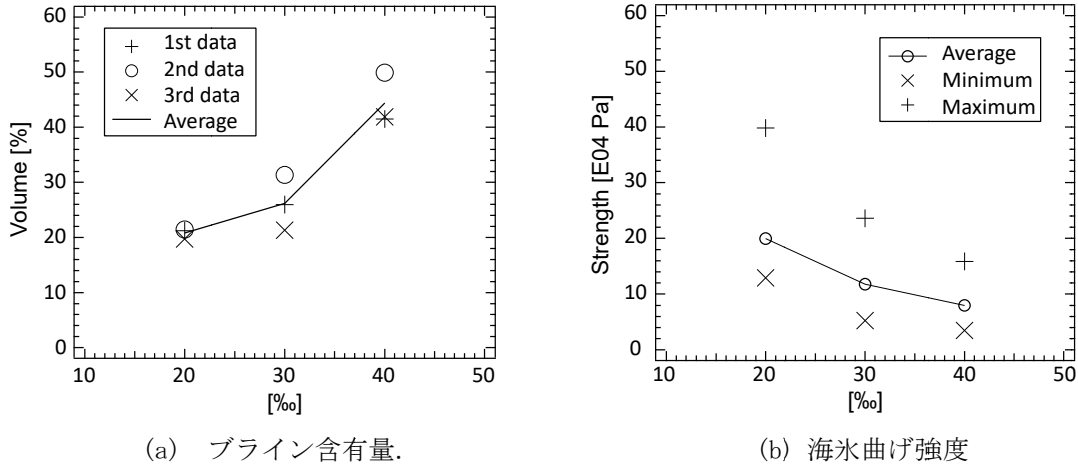


図 2 平坦氷の塩分濃度とブライン含有量，および，海氷曲げ強度の関係。

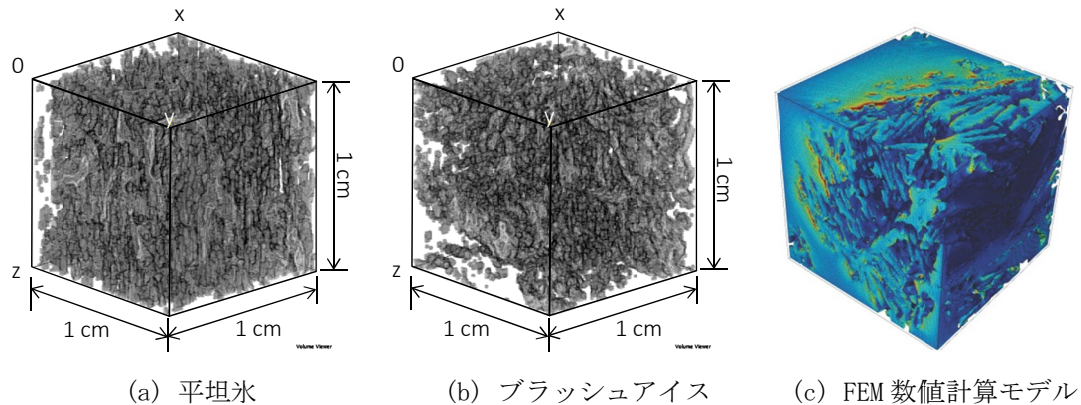


図 3 MRI より取得した海氷微視構造と海氷微視構想の構造計算 (FEM) モデル。

(3) 波浪中の船体氷荷重の実験的解明

2 次元および 3 次元の模型船を使用して海氷のサイズ，規則波，船速を変えた模型船実験を実施し，規則波にある氷海域での船体氷荷重の波浪条件と氷荷重の関係を調べた。2 次元模型船実験では氷荷重，船体縦曲げ応答の他に船首と海氷が衝突したときの衝突面の計測を行ったが，氷衝突荷重が小さく十分なデータを得ることができなかった（僅かな接触点のみが計測できた）。表 1 に 3 次元模型船実験により得られた規則波条件に対する船体氷荷重（ピーク値）を示す。模型船実験の結果から，波浪中の船体氷荷重は波浪が無いときよりも大きくなり，その大きさは規則波の波粗度（波形勾配）が大きくなると大きくなること分かった。これは，

(1) の研究結果から得た船体氷荷重の発生原因の仮定を証明する結果であり，(1) と (3) の結果から，船体氷荷重は波浪により氷板運動（水平運動）が増加することによって大きくなるのが実験的に明らかになった。また，(2) の研究で開発した模擬氷を用いて規則波中の氷板運動と変形の計測実験を実施した。本実験で用いた（波浪装置が作成可能な）規則波条件下では氷板割れは発生せず，波浪中の船体氷荷重推定において波浪による氷板破壊を考慮する必要がないことが分かった。ただし，海氷の船体衝突と衝突後の船体底部への沈み込みによる氷板破壊の発生が考えられ，海氷と船体の相互作用に伴う氷板破壊の考慮が今後の課題となる。

上記の実験結果を実船に適用するための実氷海データの取得ができず（実海データは取得したが，検証に使用できるデータを得ることができなかった），中規模の海氷（塩分氷）を用いた

衝突実験を実施した。図4に平板への塩分氷衝突実験で得られた氷衝突荷重の時系列、氷衝突面（衝突圧力面）を示す。この実験結果と（2）の海水微視構造の数値計算モデルから推定される中規模塩分氷の氷強度、さらには、（3）の模型船実験で計測される海水と船体との衝突面を用いることにより、実氷海中の波浪－氷板－船体の氷荷重推定が可能となる。しかし、MRIにより得られる海水微視構造が小さいため（約1 cm四方）、有限要素法（FEM）による中規模塩分氷の数値計算を実行することができず、また、2D模型船実験で計測した海水と船体の衝突面データも十分でなく、実氷海の船体氷荷重を推定することはできなかつた。海水微視構造数値モデルを用いた海水巨視スケール（船体スケール）の計算と模型船実験による海水と船体の衝突面の計測が今後の課題となる。

表1 規則波の船体氷荷重

Wave condition [m]	Max. Force [N]
No wave	1.27
L=3.0, H=0.02	1.83
L=3.0, H=0.03	3.50
L=1.5, H=0.02	2.06

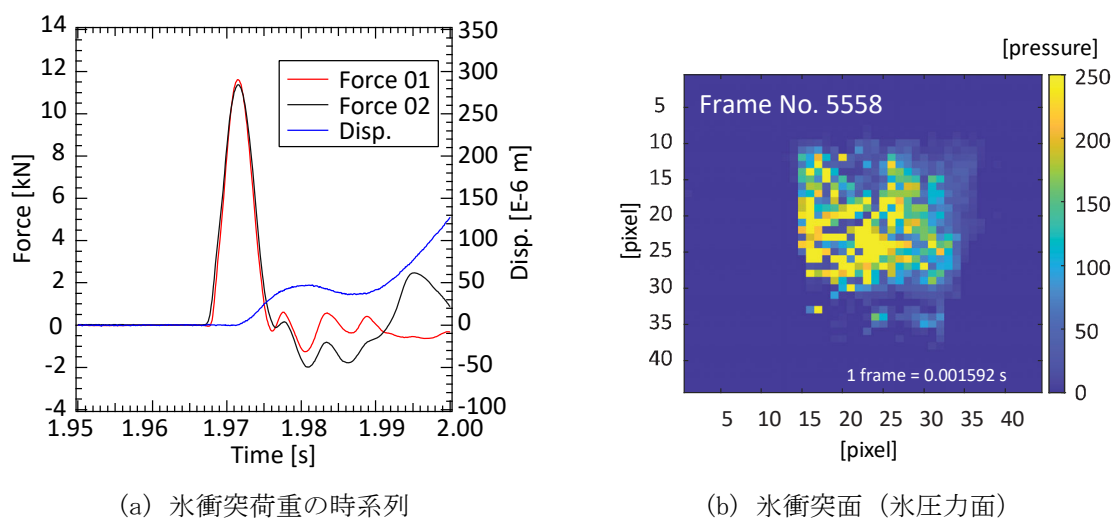


図4 平板への塩分氷衝突実験の氷衝突荷重の時系列と氷衝突面（氷圧力面）。

(4) まとめ（今後の展望）

本研究課題の目的である波浪－氷板－船体間の氷荷重推定に関する研究は、氷海水槽での実験の困難さから、基礎的な波浪－氷板－構造物の問題に限定されていた。本研究課題は、模擬氷を使用することで実験の困難さを回避し、波浪－氷板－船体間の関係の詳細を調べた世界に例のない研究である。また、模擬氷の利用は氷海域に関わる様々な実験に使用でき応用例は広い。さらに、本研究課題では、海水微視構造の数値データを用いて、海水微視構造と氷強度の関係を明らかにしたが、海水微視構造の数値データは、海水強度の簡易推定法の確立、亀裂進展の解明、海水の成長仮定の解明の研究にも使用できる。今後は、本研究課題（波浪－氷板－船体間の氷荷重推定）の高精度化と実氷海への適応、さらには、本研究課題で得られた結果の上記の問題（模擬氷を用いた様々な氷海実験の実施、海水微視構造の数値データの利用）への発展を考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 尾関俊浩, 折目啓輔, 安達聖, 澤村淳司	4. 巻 35
2. 論文標題 海水の微視構造と曲げ強度の関係 - 塩氷氷作成時のSeedingがブライン 分布と曲げ強度に与える影響の 実験的考察 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 船舶海洋工学会秋期講演会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 2022A-0S2-6
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 澤村淳司, 水島裕人	4. 巻 38
2. 論文標題 規則波中にある小氷片群の運動計測 - 規則波条件と氷密接度・氷板運動の関係	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第38回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集	6. 最初と最後の頁 CTC 22-1-011
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 布川大暉, 尾関俊浩, 安達聖, 澤村淳司	4. 巻 33
2. 論文標題 海水の微視構造と強度特性の関係 - 海水ブライン含有量と曲げ強度の関係の実験的考察 -	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 2021A-GS4-3
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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 折目啓輔, 尾関俊浩, 安達聖
2. 発表標題 塩氷氷の曲げ強度とブライン量および分布の関係性についての実験的研究 - 平坦氷作成時のSeedingの効果について -
3. 学会等名 雪氷研究大会(2022・札幌)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Sawamura, H. Mizushima, I. Hamamoto1 and M. Zen
2. 発表標題 Experimental Study on Wave-ice Interaction for Small Ice Floes and Plate Ice in Regular Wave
3. 学会等名 Seventh International Symposium on Arctic Research (ISAR7) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Junji SAWAMURA
2. 発表標題 Experimental study on the ice-wave interaction in the small ice floes and regular wave Relationship between ice concentration and ice vertical motion
3. 学会等名 第12回極域シンポジウム(国立極地研究所)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 布川大暉, 尾関俊浩, 安達聖
2. 発表標題 ラインチャンネルの三次元構造と海水の曲げ強度の関係に関する実験的研究
3. 学会等名 雪氷研究大会(2021・千葉-オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junji Sawamura
2. 発表標題 Calculation of Ship Maneuvering Control in Ice covered Water
3. 学会等名 Arctic Science Summit Week 2021, 19-26 March (国際学会)
4. 発表年 2021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	尾関 俊浩 (Ozeki Toshihiro) (20301947)	北海道教育大学・教育学部・教授 (10102)	
研究 分担者	木岡 信治 (Kioka Shinji) (20414154)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所(寒地土木研究所)・総括主任研究員 (82114)	

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
---------	---------