

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630455

研究課題名(和文) 常温水槽を用いた氷海域模型船実験の確立

研究課題名(英文) Development of the model ship test in an ice sea using synthetic ice

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

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)：本研究課題は、高い維持管理コストと高度な実験技術が必要な氷海水槽に代わって、これらが必要としない常温水槽を用いた氷海域模型船実験手法の確立を目指した。海水と同等の密度を有するプラスチック板模擬氷を作成し、氷の破壊を伴わない流氷中模型船実験手法を確立した。氷破壊を伴う平坦氷中模型船実験手法の確立のため、ワックス模擬氷を作成した。ワックス模擬氷は海水と同等の密度を有し氷板の曲げ破壊が模擬できることを確認した。平坦氷中模型船実験手法の実現のために、ワックス模擬氷の氷破壊の定量的評価が検討課題として残った。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to develop the model ship test in an ice sea using synthetic ice and towing tank instead of using the refrigerated ice and ice tank. A synthetic ice made by a polypropylene (PP) plate with similar density of refrigerated ice are used in the ice resistance test in pack ice. The model test using PP ice was validated by the comparison with the ice resistance formula in pack ice. The synthetic ice made by a wax is developed for the model ship test in level ice. It was confirmed that the wax ice has a similar density and icebreaking of refrigerated ice. The icebreaking of the wax ice has to be validated quantitatively in order to accomplish the model test in level ice using synthetic ice and towing tank (future work).

研究分野：船舶海洋工学，氷海工学

キーワード：氷海船舶 模型船実験 模擬氷 氷海水槽

1. 研究開始当初の背景

氷海域での船舶や海洋構造物の安全および性能評価には氷海水槽での模型実験が欠かせない。氷海水槽は氷の海を試験水槽内で再現し、模型を使って氷海で活動する船舶や海洋構造物の運動や荷重など様々な物理量を計測する研究施設である。近年、地球温暖化の影響による氷海域での海水水面の減退が、氷海域での船舶や海洋構造物の運用を容易にし、その結果、北極海では資源開発、海洋調査、新航路を用いた物資輸送が活発化している。

氷海域で活動する船舶および海洋構造物の増加に伴い、氷海水槽による性能評価の需要も高まる。しかしながら、氷海水槽は一般の試験水槽（以降、常温水槽と呼ぶ）に比べて、多大な運用コストと高度な実験技術を要する。現在、日本国内において稼働している氷海水槽は僅か2施設しかなく、氷海中模型船実験の需要増加に対応できない。氷海水槽の新規建設は難しく、氷海水槽を必要としない新たな氷海域模型船実験を確立するほかない。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は氷海水槽を必要としない、新しい氷海域模型船実験手法を確立する事である。氷海水槽での模型実験に代わる方法として、模擬氷を用いた常温水槽での氷海中模型船試験が考えられる。模擬氷はプラスチックやワックスなど常温で固体の材料を用い、実験の目的に応じた氷の性質（密度、形状、剛性、破壊など）を模擬するものである。模擬氷を用いた常温水槽での模型実験を確立するためには、氷況に応じた（流水、平坦氷など）模擬氷の作成と、模擬氷を用いた常温水槽内での模型船実験の実行および精度検証を行う必要がある。

3. 研究の方法

氷海域は海水の大きさや分布状態により、流水域、平坦氷域、リッジ（氷脈氷）帯、氷山域に大別される。氷海船舶にとって必要な氷況は小さい平坦な浮遊氷（大きさ 20-30m 以下）が密集する流水域と、比較的薄い平坦な氷（氷厚が 1-2m 以下）が途切れることなく分布する平坦氷域である。本研究課題は、流水域と平坦氷域に対して、模擬氷を作成し、作成した模擬氷を用いて常温水槽内での模型船実験を実施する。そして、模型船に作用する荷重を計測し、計測データの精度検証を行う。

(1) 流水域中模型船実験

流水域中を航行するときの船舶は、船の前進により流水盤を押し分け、または、押し沈めることにより排除する。このときの流水盤は破壊されることなく、船の船側や船底と衝

突を繰り返す、これが氷荷重となり船体に作用する。従って、模擬氷は氷の強度（破壊）に関する物性値を模擬する必要はなく、氷と船の接触に関わる物性値である密度と摩擦係数を模擬すれば良い。氷と船の間の摩擦係数は氷と船の両方の表面状態により決まり、氷海水槽による模型船実験においても模型氷と模型船の両者を実際の海水と実船の摩擦係数と同一とすることは困難である。また、摩擦係数の違いは定性的な船と氷片の挙動への影響は小さい。そこで、流水域中の模型船実験においては、密度が実海水と同等の常温固体の材料を選定し、常温水槽において模型船実験を実施する。そして、模型船に作用する荷重と模擬氷の排除の様子を計測し、これと実氷海中の実船データまたは氷海水槽での実験データと比較することにより、模擬氷による模型船実験の精度検証を行う。

(2) 平坦氷中模型船実験

平坦氷は、船の前進と船首部での氷板の押し曲げにより小さな氷片板に破壊される。そして、破壊された氷片は船の前進により船側または船底に排除される。このとき、船は氷板の曲げ破壊と氷片の衝突による荷重を受ける。従って、模擬氷は氷の曲げ破壊（曲げ剛性とき裂進展）と氷と船の接触（密度と摩擦）に関わる物性値を模擬する必要がある。平坦氷中の模型船実験の確立は、以下の手順で行う。ア）過去の実測・実験データおよび数値計算結果から氷の破壊を含めた海水の材料パラメタの調査、イ）海水の破壊特性が模擬できる材料の選定と模擬氷の作成、ウ）模擬氷を用いた模型船実験を実施し精度検証を実施。

ア）の氷の破壊を含めた海水の材料パラメタの調査においては、簡略化のため海水の不均一性の要因となる塩分濃度や温度の空間分布を均一と考え、均質な塩分水の理論や均質材料とした FME 流体-構造連成計算（数値計算）を利用する。イ）の模擬氷の作成においては、氷板の曲げ破壊を表現するために、模擬氷の材料内部に空気バブルを混入する方法、機能性接着剤を用い小さい固体材料の集合体を接着させる方法などを考える。ウ）の模型船実験の実現には、常温水槽の水面を覆う大規模な模擬氷の作成（作業方法と費用）と、常温水槽の使用制限（実験終了後の模擬氷の回収方法や水槽内の水質の維持など）を考える必要がある。

4. 研究成果

(1) 2次元氷片中模型船実験

2D 常温水槽において、プラスチック板を材料とした模擬氷を作成し、2D 氷片中の模型船実験を実施した。模型船は矩形の模擬氷が敷き詰められた水面中を曳航台車によって一定速度で曳航される。模型船に作用する荷重と氷の移動の様子を計測した。そして、船

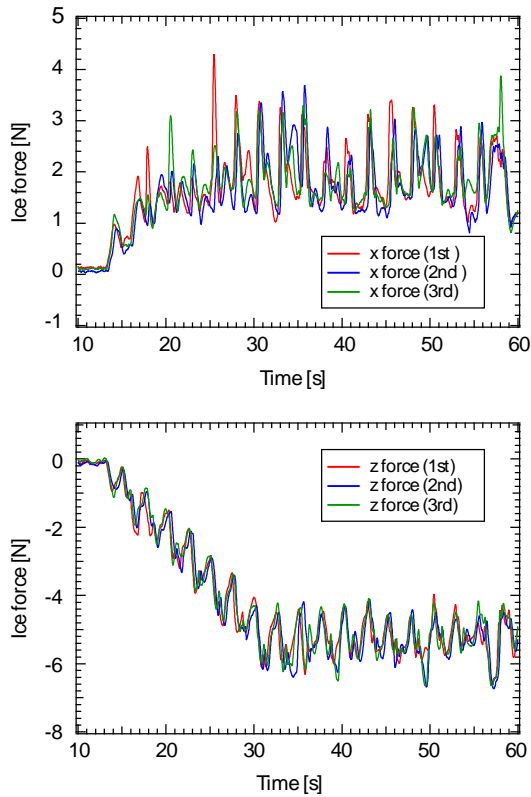


Fig.1 2D 氷片板中の氷荷重の時系列分布 (上：前後方向，下：上下方向)。

速や船首角度，氷板の厚さや大きさと氷荷重の関係調べた。模擬氷にはポリプロピレン (PP) 樹脂板を用いた。PP 樹脂の密度は 910kg/m^3 で，海氷の密度 (およそ 900kg/m^3) と同程度である。

Fig.1 に計測された氷荷重の時系列分布の一例を示す。氷板の衝突毎にピーク荷重が発生し，また，氷板の船底への沈み込み量の増加に伴い氷荷重の総量が増加 (負方向) している事がわかる。この時系列分布は，氷板の衝突と沈み込みによる氷荷重の定性的傾向を模擬していると言える。Fig.2 に圧力センサーシートにより計測した船首斜面部の氷圧力分布 (氷と船の接触部分の面積と力の大きさ) を示す。不均一性の強い実海氷や氷海水槽内で作成した模型氷による計測では，Fig.2 にあるような明瞭な氷圧力分布を見る事は難しい。Fig.2 は，海氷を均質材料と簡略化した模擬氷を使用する事で，氷片板と船の衝突時の相互影響を明瞭に調べることが可能となった一例と言える。以上の結果から，PP 材を用いた模擬氷による模型船実験の妥当性および有用性を示すことができた。

(2) 流水中模型船実験

常温試験水槽において，PP 材を用いた模擬氷による流水中模型船実験を実施した。実験は円形板模擬氷を水面上に敷き詰め，模型船を曳航台車によって一定速度で曳航した。Fig.3 に実験の概略図を示す。計測項目は，

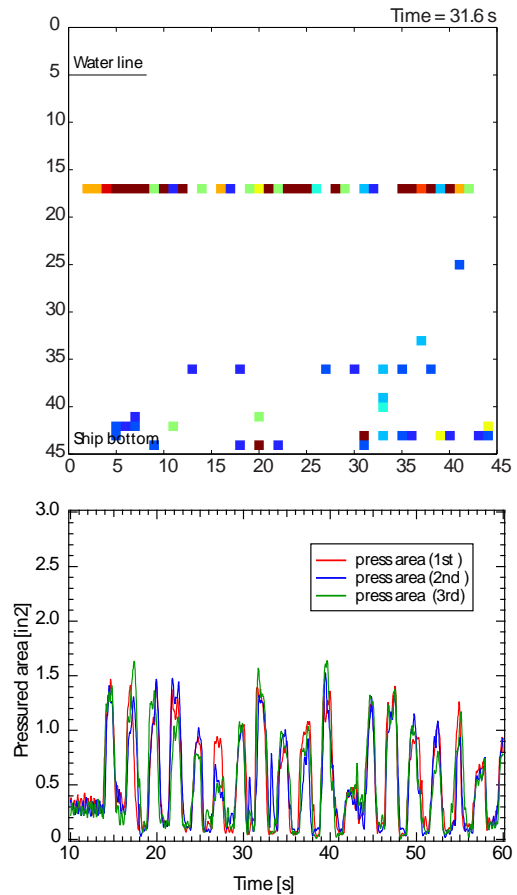


Fig.2 船と氷の衝突時の氷圧力 (上：氷圧力面積，下：氷圧力の時系列分布)。

模型船に作用する荷重と流氷板の移動 (排除) の様子である。

Fig.4 に計測された氷荷重分布の例を示す。Fig.4 の赤と黒の実線は，それぞれ，船が流氷中と開放水面中を進んだときの力を示し，青実線は曳航台車の速度を示す。Fig.4 では，曳航開始地点から約 5m の位置から流氷中の荷重分布が，開放水面 (氷がない水面) 中の荷重分布より大きくなっており，模型船はこの位置から流氷中に突入したことがわかる。そして，流氷中と開放水面中の力の差が氷荷重となる。

Fig.5 に曳航速度と氷荷重の時間平均 (抵抗値) の関係を示す。さらに，Fig.5 において，計測によって得られた抵抗値は実船実験および実験データなどを基に作成された氷荷重推定式と比較されている。図中の四角形と白丸は模擬氷を用いた氷海中模型船実験の結果を示す。直線および破線は氷荷重推定式の結果を示す。四角形と白丸の違いは模擬氷を敷設した水路幅と実験の実施日が異なる。四角形の水路幅は 3.0m，白丸の水路幅は 1.0m となる。その他の条件は同じである。実験の氷抵抗は氷抵抗推定式から算出した氷抵抗と良い一致を示す。また，実施日の異なる同一条件の実験結果は良い一致を示し，

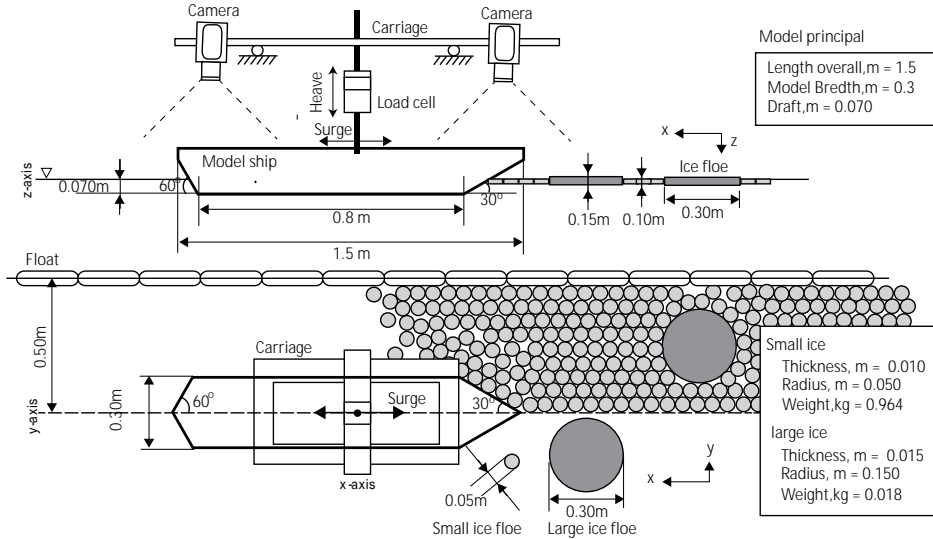


Fig.3 流水中模型船実験の概略図 .

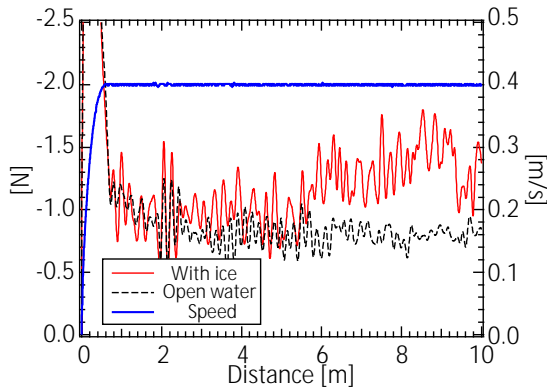


Fig.4 氷荷重の時系列分布 (赤：流水中, 黒：開放水面中, 青：曳航速度).

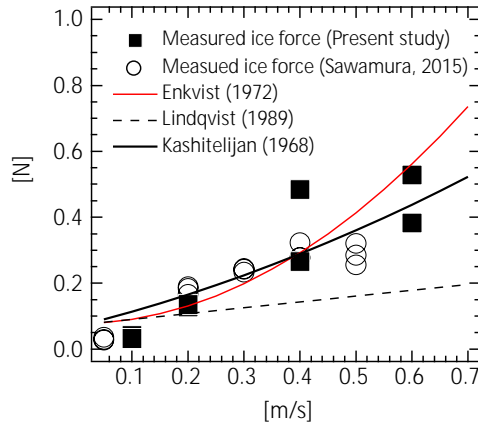


Fig.5 氷抵抗値と速度の関係 (丸, 四角：実験値, 実線：算定式).

本実験が再現性を持つことを示している. このように, 本実験手法の定量的評価と再現性の確認を行った結果, 模擬氷を用いた流水中での船舶の氷荷重計測実験の妥当性が示された. さらに, 流氷域中の斜め航行試験, 自由航行試験, 波浪抵抗試験を実施し, 流氷中での氷荷重の推定や船舶の性能評価を行った. 以上により, プラスチック板を模擬氷とした常温水槽での流氷中模型船実験手法は確立できたといえる.

(3) 破壊を伴う模擬氷の作成

文献調査により, 過去にワックス材模擬氷を用いた氷板の割れ破壊を伴う模型船実験の実施例が僅かではあるが存在することが分かった (過去の実験では実験手法の確立には至っていない). また, 大小様々な大きさの流氷域を航行するときの船舶の性能評価実験には, 氷片の衝突, 氷板の曲げ破壊の他に氷板の Split 破壊を考慮する必要があることがわかった. FME 流体-構造連成計算を用いた氷板曲げの数値計算結果を用いることで, 氷板の破壊パラメタ (破壊力, 破壊の範囲,

破壊に要する時間) を推定できることを確認した.

海水の破壊特性が模擬できる材料の候補としてワックス材, PP 材, ガラスポリマーを考えた. PP 材は密度が海水と同等で流氷域での船と氷片との衝突荷重の計測実験には有効であるが, 氷板の曲げ破壊を模擬できず, 材料費も高い (氷海水槽において模型氷を作成する費用よりは格段に小さい). 氷の曲げ破壊を模擬するための材料内部に空気バブルを混入する方法, 機能性接着剤を用い固体材料を接着させる方法は, 氷板の破壊を厳密に模擬するには作業工程が複雑になり大規模な模擬氷の作成が困難となる. また, 水槽内の水質悪化の懸念がある. ダミーガラスポリマーは曲げ破壊の模擬には有効であるが, 密度が氷よりも大きく, 大量生産にも不向き (原材料費が高い) である. 一方, ワックスは配合成分により硬度 (強度) を変えることができ, これにより, 氷板の曲げ破壊を模擬できる. また, 原材料費はプラスチックやガラスポリマーよりも安く, 氷の破壊を伴う海

水中の模型船実験に関しては、ワックス模擬氷の使用が有効であることがわかった。しかしながら、氷破壊の定量的評価（破壊形状と破壊強度）と試験水槽内での模擬氷の作成方法（水面上の広範囲に板上の模擬氷を均質に作成する方法）が検討課題として残った。

氷板の曲げ破壊を模擬する模擬氷の作成に関しては、ア) 常温個体で不溶性の材料、イ) 密度、曲げ破壊などの海水の性質を模擬、ウ) 安価で加工が容易、などの常温水槽での模型船実験実施のための条件をすべて満たす材料の選定に困難を要し、研究期間内での、曲げ破壊を伴う平坦水中模型船実験の確立までには至らなかった。しかしながら、模擬氷として選定したワックス材は、安価で加工が容易、密度は海水と同等、配合成分により硬度（強度）を変えることができ（氷海水槽は1種類の塩氷のみ作成可能）、ワックス模擬氷の板氷としての破壊形態の妥当性が確認されれば、常温水槽において曲げ破壊を伴う平坦水中模型船実験が実現可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Hyoil Kim, Namkyun Im and Junji Sawamura, Experimental and Numerical Investigation of Ship-ice Interactions in Pack Ice, Proceedings of the 24nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 査読有, 2017, 印刷中。

澤村淳司, 今木研介, 千賀英敬, 模擬氷を用いた模型船実験による流水の斜め衝突時の船に働く氷荷重の計測, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読無, 2016, Vol. 23, pp. 275-280.

Junji Sawamura, Hidetaka Senga, Kensuke Imaki, Keisuke Suga and Hyoil 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, USB.

澤村淳司, 千賀 英敬, 模擬氷を用いた模型船実験による砕氷船の流氷中での氷荷重の計測, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読無, 2015, Vol. 21, pp.395-399.

Hyoil Kim and Junji Sawamura, A Study on the Collision Response between Icebreaker and Ice Floe based on the Model Test using Synthetic Ice, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 査読無, 2015, Vol. 21, pp.401-404.

Keisuke Suga, Junji Sawamura and Hyoil Kim, Ice resistance test using synthetic ice for ship advancing into ice covered water, Proceeding of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 査読無, 2016, pp.163-166.

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 23nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 査読有, 2015, No.34 (USB).

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, 2015, 査読無, Vol.20, pp.303-306

〔学会発表〕(計 8 件)

澤村淳司, 模擬氷を用いた模型船実験による流水の斜め衝突時の船に働く氷荷重の計測, 日本船舶海洋工学会講演会, 2016年11月21日-22日, 岡山コンベンションセンター, 岡山市, 北区。

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

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

Junji Sawamura, Experimental and numerical investigation on ice submerging for icebreaker with 2D model test using synthetic ice, 23nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2015年6月14-18日, Trondheim, Norway.

澤村淳司, 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, 2015年5月25-26日, 神戸国際会議場, 兵庫県, 神戸市。

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