

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2017

課題番号：15KK0206

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（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Ice management supporting system for ships and offshore structures in sea ice (Fostering Joint International Research)

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） 9,700,000円

渡航期間：9ヶ月

研究成果の概要（和文）：数値計算技術を援用した安全かつ効率良い氷海底掘削技術の確立に必要な数値計算モデルの構築を行った。また、数値計算モデルの実用化のため（実用化には実測データによる数値モデルの検証が必要）、氷海工学において先行した実績と研究設備を有するノルウェーで実施された氷海での実測データ収集に同行した。本研究によって、実用計算に耐える実氷海に近い氷況下での船舶の航行シミュレーションが可能になった。一方、実氷海データの収集は、氷況や船舶の耐氷能力に大きく左右され、本研究期間内において有用なデータを得ることはできなかった。しかし、日本の研究組織内での海水野計測を実施するための計測技術を習得することができた。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study develops the ice management supporting system for the safe and efficient ship and offshore structure drilling in an ice sea field. Ice management simulator was developed to estimate strategy of icebreakers deploy for ice management. Principal investigator attended the filed measurement of sea ice strength and sea ice trial for investigation of the ship maneuver in real ice sea, which were conducted in Van Mijen Fjord, Svalbard and North-West Barents Sea. The numerical model can obtain the ice force and the ice floes distribution in the quasi- sea ice conditions. Those data can be used to decide the safe and efficient operation in ship drilling. The measurement of the real sea ice data significantly depended on the sea ice conditions and ship ice performance. The data obtained in those measurement cannot be used in the numerical model directly. Principal investigator, however, acquired the skills to conduct the real sea measurements.

研究分野：氷海工学，船体構造設計

キーワード：氷海船舶 アイスマネジメント 氷荷重 氷板破壊 氷海性能 数値計算

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の影響により極海域の海水が減少している。海水面の減少により船舶の航行や海洋構造物の運用が容易になり、北極海では、気候変動解明のための海洋環境調査や新たな資源および航路の開発が活発化しており、氷海域での船舶の運航が年々増加している。北極海を利用した北極海航路の活用は、ヨーロッパからの原油など資源の安定供給を可能とし、日本にとって重要な課題と言える。

環境調査や資源開発において重要な作業は掘削船による海底掘削である。日本は世界最高クラスの掘削能力を有する地球深部探査船「ちきゅう」を所有する。この、「ちきゅう」による氷海域での大深度掘削は、地球環境解明にとって貴重な情報が得られることが期待される。しかしながら、氷海域で操業する構造物は氷荷重という通常海域とは大きく異なる(厳しい)荷重環境下に置かれ、氷海中での掘削技術は確立されていない。

氷海工学は海水と構造物との相互作用が複雑になることから、実験(経験)則に依存する部分が多い。近年、数値計算技術の向上により、氷海域での船舶の諸問題の解明および運用に数値計算が導入されつつある。日本は氷海船舶分野において先行した計算技術を有している。しかし、実験設備(氷海水槽や氷海船舶)と実験経験(屋内外での氷海域実験)の不足により、数値モデルの導入に欠かせない実験(実測)データが不足している。

2. 研究の目的

大小様々な海水が浮遊する氷海中において安全かつ効率良い海底掘削を実現するには、掘削船が海水に衝突する際に発生する氷荷重を軽減するアイスマネジメント技術(掘削船の運用の障害となる大きな海水を砕氷船により小さくする作業)の確立と、氷荷重下にある船舶の氷荷重推定および氷荷重下での船舶の運動制御技術の向上が必要になる。

本研究は、上記のために開発した数値モデルの実用化を目指し、氷海工学において先行した実績と充実した研究設備を有するノルウェーにおいて、日本国内での実施や取得が困難な氷海域での実測データの収集を行い、これを用いて計算モデルの開発および改良を行う事が目的である。

3. 研究の方法

通常、氷海中の掘削船による掘削は2,3隻の砕氷支援船を伴って行われる。砕氷支援船は掘削海域を砕氷航行によって氷海面上に開放水面(アイスチャンネル)を作る。掘削作業を行う掘削船は砕氷支援船により作られたアイスチャンネル中において、大きな氷

板との衝突(過度の氷荷重が働く事)を回避しながら定位置に留まる必要がある。したがって、氷海底掘削作業の計算モデルの構築には、1) 砕氷船による氷排除作業(アイスマネジメント)によって作られたアイスチャンネルの分布の予測、2) その氷海面上での船舶が受ける氷荷重の推定、そして、3) 氷荷重データを用いた船体構造および船体運動の計算を実施し、船舶の操船条件を明かにする必要がある。研究代表者は、これまでに、上記の数値計算モデル(アイスマネジメント、氷荷重計算、構造応答計算)の開発を行い、開発した計算モデルの検証のため模型船実験を行ってきた。

本研究は、研究代表者がこれまで開発した数値計算モデルの実用化のため、実氷海の海水強度、海水分布、氷海航行中の操船者の運行状況の情報収集を行い、これらをもとに、実氷海を想定した数値計算モデルへの改良を行う。

4. 研究成果

(1) 実氷海の海水強度計測と船舶の運航(氷況計測と操船条件)。

実氷海上で実施された氷板破壊荷重測定に参加し、野外での氷板強度計測法を習得した(引用文献)。University Centre in Svalbard (UNIS)の Aleksey Marchenko 教授が主導する研究プロジェクトが実施する実氷強度の野外計測に同行した。計測場所は Valunden, Svea, Van Mijen Fjord, Svalbard, 計測期間は2017年3月20日から31日、計測項目は、平板氷の曲げ、引張、圧縮、貫入試験であった。氷海航行中の船舶による氷破壊は動的荷重下(荷重速度が速い)となるが、今回実施した計測は静的荷重下(荷重速度が遅い)の氷強度であり、これを直接的に氷海船舶の数値計算モデルに用いる事はできないが、参考データとして使用した。

船上観測に同行し(Aleksey Marchenko 教授が主導する研究プロジェクト)、氷海航行中の氷況観測および操船方法などの情報収集を行った(引用文献)。計測場所は North-West Barents Sea, 航行期間は2017年4月22日から30日であった。海水面に浮遊する Rubble ice (Ridge ice) 上において、海水物性値(氷厚分布、塩分濃度など)と、小スケールの氷の曲げ、引張試験を実施した。今回乗船した船(Polarsysse)は砕氷能力(氷を破壊する力)が無く、Ice Class 1B(比較的穏やかな氷(氷厚=0.6m程度の流水帯)域が航行可能)を持つ耐氷船舶であった。このため、氷海域での航行は殆どなく(氷海域を避ける航路を選択)、氷海域(薄い氷片群中)での航行は、過度な氷荷重を避けるため減速航行(平均船速5kt以下)となった。通常の掘削船は耐氷船舶となり、海底掘削中の氷況は今回と同等となる。

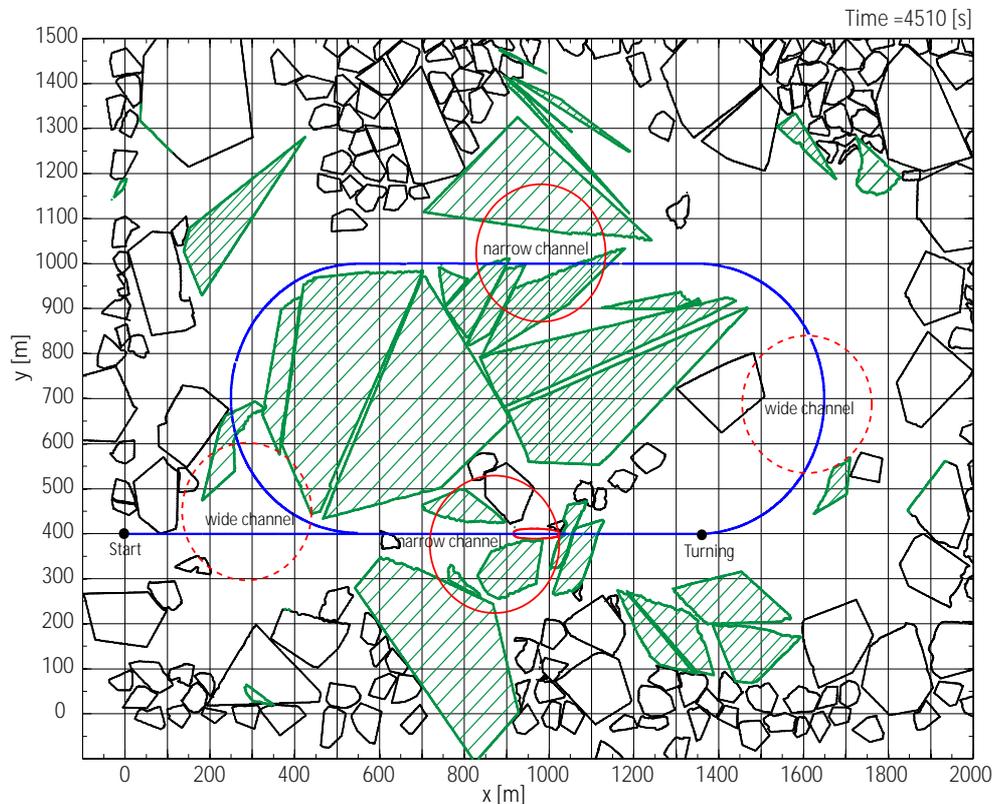


Fig. 1 Ice channel when an icebreaker advances into the ice-covered water with a race track.

(2) アイスマネジメント計算モデルの構築

氷海航行計算モデルの実氷海を想定した数値計算モデルへの改良を行った。小さな海水板の船底への沈み込み運動の考慮(簡易3Dモデルの導入)と、実氷海の氷板破壊を表現するための氷板破壊モデルの導入を行った。氷板破壊モデルは、Norwegian University of Science and Technology (NTNU)の Knut Vilhelm Hoyland 教授の研究グループが提案するモデル(線形弾性破壊力学, 引用文献)を導入した。そして、実氷海域を模した海水モデルを作製(Poisson-disk distributionによる母点配置とボロノイ分割を使用した海水分布モデルの作成(引用文献)と風、潮流による氷板移動を考慮)し、実用計算に耐える数値計算モデル(実氷海に近い氷況下での船舶の航行シミュレーション)の構築を行った。Fig. 1に砕氷船舶が海水中をアイスマネジメント航行をするときの海水分布(アイスチャンネル)の様子を示す。これにより、実現象に近い海水分布中のアイスマネジメントの計算が行える。

(3) 氷海航行制御モデルの構築

流氷中を航行する船舶の運動制御モデルの導入を行った。海底掘削中にある船舶がおかれる氷況を考え、小さい氷片が多数浮遊す

る流氷群中の船舶の運動制御を行った。運動制御には古典的なPI制御を用い、船の並進(Surge)速度と回転(Yaw)速度を制御した。Fig. 2に、運動制御された船舶が流氷群中を航行する様子を示す。Fig. 2に示すように、船は氷荷重により多少のふらつきが見られるが、自動制御により規定船速で流氷群中を旋回運動する。

(4) 波浪中の船体氷荷重計測

近年、海水の減退に伴う波高増加が流氷の運動を活発化させ、構造物の破壊を加速させるといわれている。船舶海洋試験水槽において模擬氷を用いた模型船実験を実施し、波浪が卓越した氷海域中を航行する船舶に作用する氷荷重を計測した。模擬氷を用いた氷海中模型船実験は、氷海水槽(水槽内の水面上に実氷海の相似則を満足した氷を作成し氷海に関する各種実験を行う施設で、維持・管理費が高く、高度な実験技術を必要とするため、国内外ともに研究施設は僅かしかない。)を用いることなく氷海関係の実験を可能とする技術で、研究代表者が実用化を推し進めている。Fig. 3に計測された荷重(上:波のみ, 下:波+氷)の時系列分布を示す。計測結果から、波浪中の全荷重(波浪荷重+氷荷重)は波浪がない時の氷荷重よりも大きくなるが、波浪中の氷荷重(全荷重-波浪荷重)は、波浪がない時の氷荷重よりも小さくなる事がわかった。

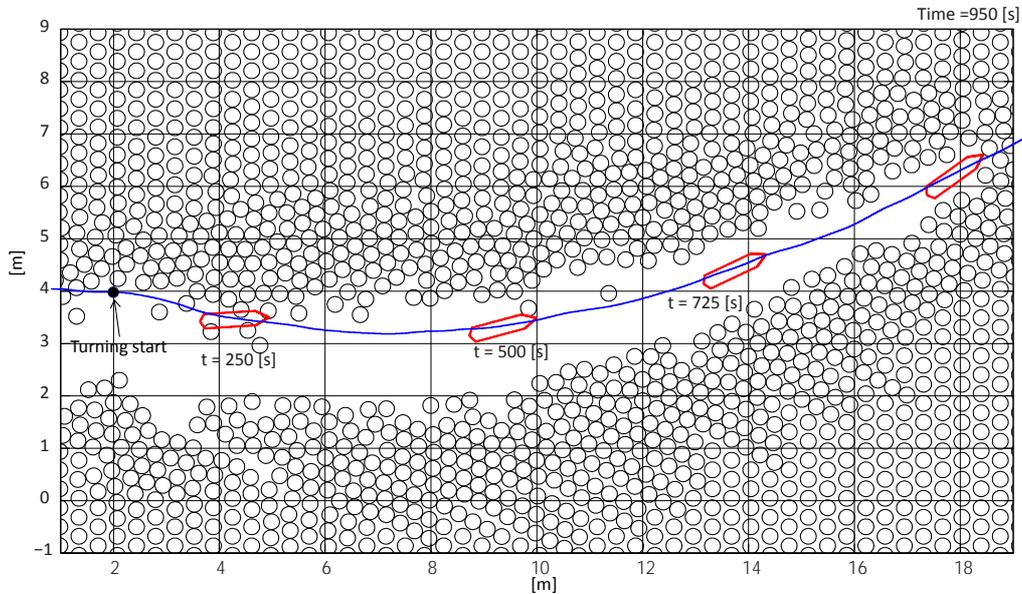


Fig. 2 Ship trajectory in pack ice with constant ice drifting speed.

(5) 船体構造疲労計算

氷海航行中の船舶の氷荷重推定モデルと構造計算を用いて氷海中の疲労強度計算を実施した。Table 1 に氷海中（上段：実船データ，中段：数値予測（平板氷），下段：数値予測（流氷））の船舶の疲労度を示す。実測値から予測した疲労度（上段）は様々な氷況（平坦氷，流氷，リッジ氷）中の疲労度が含まれる。一方，本研究の数値計算結果から予測した疲労度は，平坦氷中のものは実測値より高く，流氷中のものは実測値より低い。一般に，平坦氷，リッジアイス中の氷荷重は大きく，流氷域中の氷荷重は小さくなり，疲労度も氷荷重の大小に従う傾向がある。したがって，本研究の結果は妥当な結果を示していると言える。

Table 1. Comparison of Fatigue Damage in Sea ice.

Published by	Sea area	Ice condition	Fatigue damage
Suyuthi. A, et al. (2013)	Baltic Sea	Pack ice + level ice + Ridge ice	5.836×10^{-4}
Han and Sawamura, (2016)	Baltic Sea	Level ice	5.617×10^{-3}
Han and Sawamura, (2017)	Antarctic Sea (Worby et al., 2008)	Pack ice	1.788×10^{-4}

(6) まとめ（新たな知見，今後の展望など）

数値計算技術を援用した安全かつ効率良い氷海底掘削技術の確立に必要な数値計算モデルの構築を行った。数値計算モデルの実用化（数値モデルの検証に使用する実測データの収集など）ため，氷海工学において先行した実績と充実した研究設備を有するノルウェーにおいて実施された氷海実測データの収集に同行した。

野外での氷強度計測には，低温環境下に対応した特殊な装置と技術が要求され困難を極める。船上観測は氷況と船舶の耐氷（砕氷）能力に大きく左右される。さらに，これら氷海の実測データの収集は冬期の限られた期間になる。このため，本計測では，数値計算モデルに使用可能な実測データ（海水分布や動的荷重下での氷破壊など）を収集することはできなかった。良好な実測データの収集には，継続した氷況観測が必要となる。今後，習得した計測技術を用い，独自（日本研究組織）の海水上での野外計測の実施を考えている。

本実験で開発した実氷海を模した海水分布でのアイスマネジメント計算モデルと船舶の運動制御モデルを組み合わせることで，砕氷船によるアイスマネジメントの計算が可能になる。疲労強度予測に使用した氷荷重推定モデルや構造計算手法は，氷海中の操船条件の決定に使用できる。さらに，アイスマネジメントの数値計算モデルは氷海域操船シミュレータへの導入を考えている。数値計算モデルの検証データの収集が今後の課題となる。

海水の減退に伴う波高増加の氷海船舶への影響が新たな問題となっている。アイスマネジメント中の砕氷船，掘削作業中の掘削船においても，波浪影響の考慮が必要となる。そこで，模擬氷を用いた氷海中模型船実験を実施し，波浪が氷荷重に及ぼす影響を調べた。実験データは，波浪影響により氷荷重は減少することを示した。一般的に氷荷重は波浪影響により増加すると考えられており，本実験結果はこれとは逆の結果となった。この結果を実証するため，さらなる調査（実験・実測データの取得，および，新たな理論の構築）が必要となる。

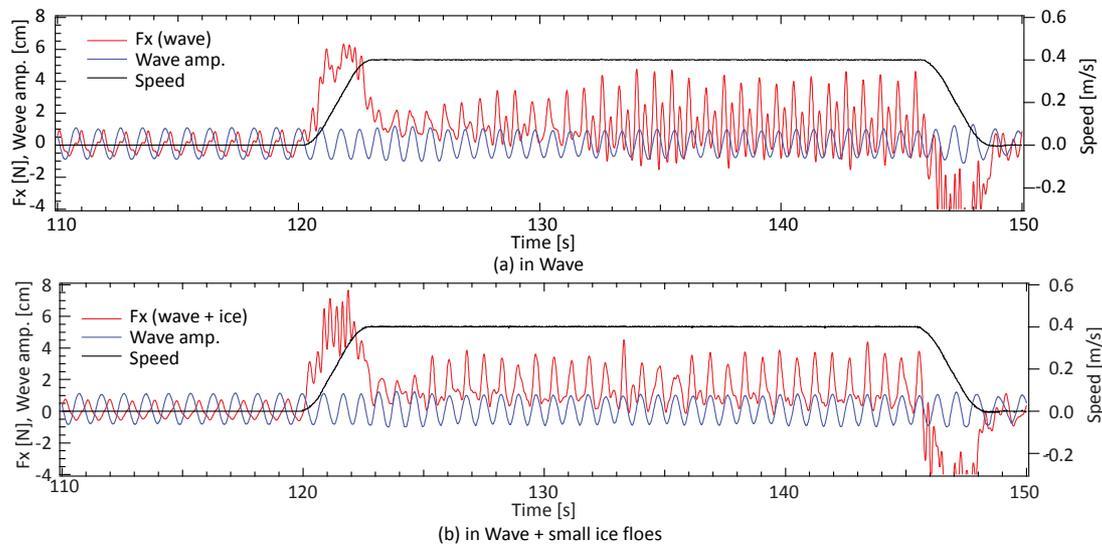


Fig. 3 Time history of the measured ice force (a) in the regular wave and (b) in the regular wave and small ice floes (wave height = 0.02 m, carriage speed = 0.4 m/s).

引用文献

Aleksey Marchenko et al., Flexural strength of ice reconstructed from field tests with cantilever beams and laboratory tests with beams and disks,

The proceedings of the 24rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2017, USB.
<http://www.poac.com>

Aleksey Marchenko et al., Field Observations and Preliminary Investigations of a Wave Event in Solid Drift Ice in the Barents Sea, The proceedings of the 24rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2017, USB.
<http://www.poac.com>

Lu W., Lubbad R., Løset S., In-plane fracture of an ice floe: A theoretical study on the splitting failure mode, Cold Regions Science and Technology, 2015, 110. pp. 77-101.

櫻井快勢, 宮田一乗, 地表に無造作に配置された岩石の生成手法, 芸術科学会論文誌, 2011, Vol.10(3), pp.98-106.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

Sawamura Junji, 2D numerical modeling of icebreaker advancing in ice-covered water, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 査読有, Vol.10, Issue 3, 2018, pp.385-392
 DOI : 10.1016/j.ijnaoe.2018.02.005

Junji SAWAMURA and Egil PEDERSEN, 2D Simulation of the Icebreaking Pattern for Sea Ice Management, The proceeding of 28th International Offshore and Polar Engineering Conference, 査読有, 2018, 印刷中

Junji Sawamura, Kensuke Imaki, Takaya Shiraishi and Hidetaka Senga, Ice Resistance test of a ship using synthetic ice in small pack ice floes and wave interaction, The proceeding of 28th International Offshore and Polar Engineering Conference, 査読有, 2018, 印刷中

Yue Han and Junji Sawamura, Calculation of Ship Hull Fatigue Damage caused by Local Ice Loads in Ridged Ice Fields, The proceeding of 28th International Offshore and Polar Engineering Conference, 査読有, 2018, 印刷中

[学会発表](計4件)

澤村 淳司, 2D Simulation of the Icebreaking Pattern for Sea Ice Management, The 28th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2018

澤村 淳司, Ice Resistance test of a ship using synthetic ice in small pack ice floes and wave, The 28th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2018

澤村 淳司, Preliminary Calculation of Ship Maneuvering Control in Pack Ice,

The 33rd International Symposium on
Okhotsk Sea & Sea Ice , 2018

澤村 淳司 , 2D Numerical Modeling of
Icebreaker Advancing in Ice-covered
Water , The 24th International Conference
on Port and Ocean Engineering under
Arctic Conditions , 2017

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) 研究協力者

[主たる渡航先の主たる海外共同研究者]

Pedersen Egil
UiT The Arctic University of Norway ·
Department of Engineering and Safety ·
教授

[その他の研究協力者]

Aleksey Marchenko
University Centre in Svalbard (UNIS) ·
教授

Knut Vilhelm Hoyland
Norwegian University of Science and
Technology (NTNU) · Department of Civil
and Environmental Engineering · 教授