

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01553

研究課題名（和文）極点航路航行を想定した氷海船舶のパフォーマンスモデルの高度化

研究課題名（英文）Sophistication of performance model for ship navigation in ice assuming transpolar sea route

研究代表者

金野 祥久（Konno, Akihisa）

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：60322070

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では北極海航行において船舶は開水面もある浮氷群中を航行すると想定し、このとき氷片に作用する流体力モデルを構築し精度を検証することを目的とする。密集浮氷群下流氷片に作用する流体力が、水槽試験では氷の列数の増加に伴い減少するが、数値解析では増加した。数値解析結果において上流氷群の配置によって剥離領域の大きさが変わることから、差異の要因として数値解析における氷片形状や配置の再現性が剥離の再現性に影響していることが示唆された。実海域では氷群が多数存在し形状も一定しないため、剥離は本研究での解析より複雑に発生すると予想され、水槽試験における密集浮氷群下流での流体力が実現象に近いと推測される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶周りの氷片運動を伴う航行において、流体力の影響は相対的に小さいため、これまで詳細に検討されておらず、たとえば船体抵抗への流体力の寄与は開水中抵抗と等しいとされることが多い。実際には周囲氷片の影響により流体力は減衰すると考えられるがどの程度減衰するかは不明である。本研究は流体力の傾向を示したこと、また数値解析における氷片形状や配置の再現性が重要であることを示したことなどに学術的意義があると考えられる。これにより氷海中航行における船体抵抗の推定精度を向上させる見通しを得たことは、船舶の航行性能や燃費推定に寄与する。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to develop and validate a fluid force model acting on ice floes for ship navigation in the Arctic Ocean, where ships navigate through open water areas within clusters of ice floes. The fluid force acting on downstream ice floes within dense ice clusters decreases with an increasing number of ice floe rows in tank tests, whereas it increases in numerical simulations. The numerical simulation results suggest that the size of the separation region changes with the arrangement of upstream ice floes. This indicates that the reproducibility of ice floe shapes and configurations in numerical simulations affects the reproducibility of separation. In actual sea areas, where numerous ice floes exist and their shapes are not uniform, separation is expected to occur more complexly than in our analysis. Therefore, the fluid force on downstream ice floes within dense ice clusters in tank tests is presumed to be closer to real-world phenomena.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：氷海工学 耐氷船 流体力 氷荷重 数値流体力学 水槽試験

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

北極海の航路としての利用は活発化しており、ばら積み船だけでなくコンテナ船の運航も始まっており、我が国への寄港例もあった。また北極海の海水減少が続き、将来は夏季には法的規制がなければ通常船舶でも航行できると予測される。しかしコンテナ船の定期運航のためには冬季の航行も求められる。またロシア北東航路ではなく、ヨーロッパとベーリング海峡を最短距離で結ぶ航路（極点航路）の利用も見込まれる。ヨーロッパ-アジア間物流は北極航路経由の方がスエズ運河経由よりも大幅に有利になると考えられる。一方で氷がさらに破壊、拡散されるため、氷況の空間的バラツキが増大する。このため適切な航路選定ができれば、砕氷船の支援を受けずに航行できると予測される。また航行船舶数が増加し支援砕氷船数が不足するとも予測されていた。従って船舶は単独で、氷が比較的少ない航路、すなわち開水面もある浮氷群中を選択して航行する可能性が高い。

このような状況下で北極海航行のコストや安全性を評価するためには、海水の状況の適切な把握と提供、すなわちアイスチャートの作成と、その氷況における船舶の可航性と性能の推定（パフォーマンス・モデル）が必要とされた。海水状況の把握や予測に関しては気象・海洋科学的な研究が進んでいたため、本申請は船舶のパフォーマンス・モデルを研究対象とした。

氷海船舶の性能解析は砕氷船の平坦氷中の航行性能が主対象であったため、砕氷船を想定した氷荷重推定法、たとえば Popov の氷荷重モデルや KPR モデル（引用文献①、②）がよく使われ、IMO の極海コードも Popov のモデルに基づいている。また、近年は耐氷船の小氷片密集水路（brash ice channel）中航行性能評価が主な研究対象であったが、これは砕氷船が形成した水路を複数の商船が航行することを想定していた。しかし、近未来の北極海航路利用を想定するならば、耐氷船が開水面もある浮氷群中を航行する場合のパフォーマンス・モデルが必要である。小氷片密集水路とは氷片個数、寸法ともに大きく異なるため、同じ知見は適用できない。

しかし、上記に想定した状況での研究は十分とはいえず、特に耐氷船（船首形状は通常船舶と類似。砕氷船とは異なる）を対象とした研究は非常に限られており、パフォーマンス・モデルの構築にはまったく不十分であった。類似の状況には、掘削船のマネージドアイス（掘削船に衝突する氷を支援砕氷船が予め砕いた）状況下での位置保持がある。この状況の研究は氷海水槽実験と数値解析の両面から行われていたが、氷の状況が異なり、また氷の方が流体力を受けて船舶に近づいてくるなど力学も異なるため、知見をそのまま船舶航行に適用できるか疑問であり、少なくとも検証を要する。一方で、申請者は氷海中航行船舶シミュレータを開発し検証を重ねていたが、これは耐氷船が浮氷群中を航行する状況での氷荷重等を解析可能であり、氷片の運動や氷荷重の妥当性の検証も進んでいたため、他の研究に先行していた。

申請者の過去の研究から、氷片がさほど密集していない（密接度が低い）状況で模型船に作用する氷荷重を解析するとよく一致する。このとき氷片に作用する流体力として、高レイノルズ数域で使われる抗力係数を用いた式を用いている。このとき氷片は多くの場合水面上を移動するか水面上で回転するのみで、水面に沈み込むような動きは限定されている。なお耐氷船の形状は通常船舶と同様なので、砕氷船のように船首で氷片を水中に押し下げる効果はほとんどない。

一方、申請者・研究分担者が共同で行った過去の研究から、密接度が高い状況では流体力は小さく、また流速に対し線型に増加する傾向を示している。これらの結果から、氷片に作用する流体力は密接度が低い場合には抗力係数を用いた式で精度良く推定できるが、密接度が高くなるにつれて周囲氷片の影響を受けて流体力が減少し、また線型に近づくと考えられる。

2. 研究の目的

本研究は開水面もある浮氷群中を航行する耐氷型船舶のパフォーマンス・モデルを提供することを目指し、氷片群中の 1 氷片に作用する流体力を数値解析と水槽試験により評価し、その傾向を解析する。これにより周囲氷片の状況を勘案した流体力減衰モデルを構築する。

3. 研究の方法

本研究では、以下の 3 項目を達成することにより想定氷況下での流体力減衰モデルを構築し、それを組み込んだ氷海船舶のパフォーマンス・モデルを提供する。

- (1) 複数の氷片が水面上に浮遊している状況で、氷片に作用する流体力を水槽試験により計測する（図 1）。具体的には、単独氷片、縦列 2 氷片、複数列氷片群（図 1、2）での周囲氷片との位置関係や、氷片の分布および密接度と流体力との関係性を評価する。
- (2) 氷片に作用する流体力の数値解析による評価。上記と同様に複数の氷片が浮遊している状況で、氷片に作用する流体力を数値解析により調査する（図 2、3）。流れの数値解析には汎用熱流体解析ソフトウェア STAR-CCM+および OpenFOAM を用いる。
- (3) 上記 2 項目を比較検討し、周囲氷片の影響による流体力減衰を調査する。それにより氷片に作用する流体力モデルを構築する。

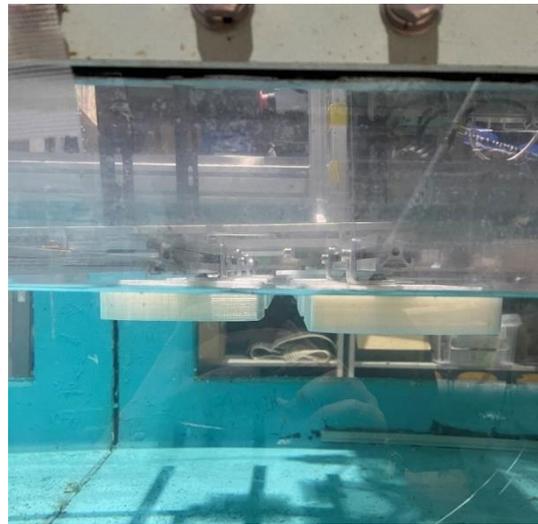


図1 水槽試験における氷片配置例および固定方法（上流1列氷片群）

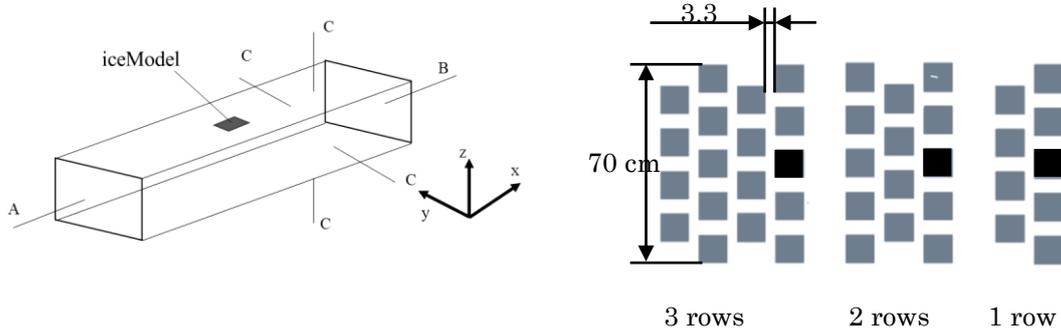


図2 数値解析における氷片位置（左）および複数列氷片群の解析における氷片配置（右）

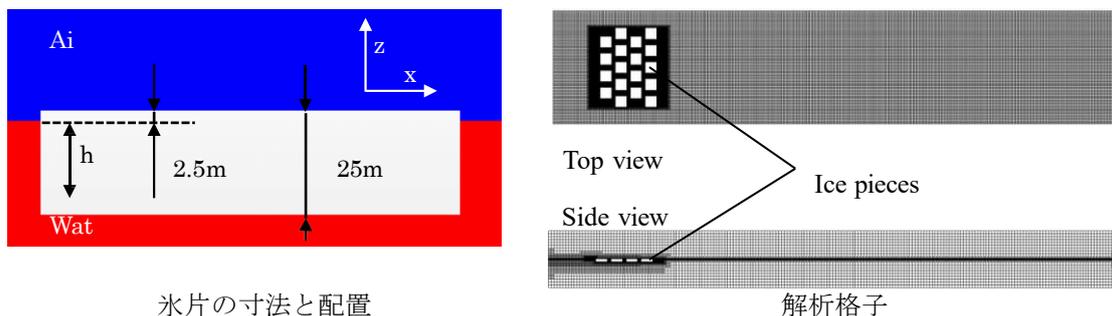


図3 数値解析における氷片寸法と配置（左）、および解析格子（右）

4. 研究成果

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 氷片に作用する流体力を水槽試験により計測したところ、単独の氷片に作用する流体力および氷片二つを縦列に配置した場合に下流側氷片に作用する流体力は、吉田らの過去の実験（引用文献③）と同様の傾向を再現した。（図4）
- (2) STAR-CCM+により自由表面を有する流れ場での非定常解析、および自由表面を滑りあり境界で置き換えた定常解析を実施した結果、特に上流2列および3列の氷片群での解析において、流体力の傾向は同様であった。またOpenFOAMを用いた解析では自由表面を滑りあり境界で置き換えた定常解析のみを実施したが、STAR-CCM+での解析結果と同様の傾向を示した。
- (3) 密集浮体群中の一氷片に作用する流体力を調べると、数値解析では氷の列数の増加に伴い流体力が増加する傾向が見取れる一方、水槽試験では列数の増加に伴い流体力が減少する傾向が見受けられ、互いに逆の傾向を示す結果となった（図5）。この結果は数値解析ソフトにSTAR-CCM+とOpenFOAMのいずれを利用した場合にも再現した。上流にある氷片群が下流の氷片に流入する流れを阻害することにより、流体力は減少すると推測されることか

- ら、水槽試験結果の傾向のほうが妥当だと考えられる。
- (4) 数値解析結果が上記の傾向を示す理由として、自由表面を有する数値解析において流れが氷片の上を越える現象が観察されるため、これが原因である可能性を調査した。具体的には氷厚さを増やすことにより越流を制限した。この結果、流体力への影響はほぼ見受けられなかった。
 - (5) 密集浮体群中の氷片群を固定させる解析と曳航させる解析において両者に流体力の相違は見られなかった。加えて計算時間の長さによる影響も同様にみられなかった。また乱流モデルとして RANS $k-\epsilon$ 、 $k-\omega$ モデルの比較検討を行った結果、流体力が上昇する過程で両者に違いが見て取れるが、安定時の流体力にはほぼ違いが見られなかった。
 - (6) 密集浮体群中の解析において氷にかかる圧力場とその周囲の速度場の関係を調べた結果、周囲の流速が高く、それにより計測対象氷片正面の圧力が高いことが観察された。これ自体は妥当な傾向であるため、水槽試験と数値解析において流体力の傾向が異なるのは、数値解析における流れ場の状況が水槽試験を再現できていないことが原因であることが示唆された。
 - (7) 氷片配置を千鳥状から碁盤の目状に変えて行った解析の結果から、氷片の配置方法により氷の隙間から抜けてくる流れや、最前列氷の角付近から生じる剥離が計測対象氷片に流入する流れに大きく干渉していることが分かった。
 - (8) 水槽試験との模擬氷形状の差異を調査するため、氷の面取りを行なった数値解析を実施した。その結果、数値解析結果が水槽試験の傾向に近づいた。したがって水槽試験で用いた氷片形状を数値解析において精度良く再現することで、解析結果の相違を改善出来る可能性が示唆された。
 - (9) 流れ解析結果の中央断面での流れ場を観察したところ、上流氷 2 列・3 列の場合のどちらにおいても、2 列前方氷片で流れの剥離が起きていることがわかる。この流れの剥離については、上流氷 2 列の場合のほうが大きい。また上流氷 2 列の場合において、解析対象氷片前方の流れは 3 列の場合と比較して下に向かう流れが多いことが観察された。このことから、本研究での定常解析において上流氷 2 列より上流氷 3 列のほうが圧力が大きくなったのは、上流氷 2 列の場合では 2 列前方氷片は最前列であるために流れが阻害されることなく流入するため、剥離が大きくなり解析対象氷片前方の流れが下方に流出し計測対象氷片が剥離行きに入っているためだと考えられる。一方で上流氷 3 列の場合では最前列によって 2 列前方氷片に流入する流れが阻害されるため、剥離が小さくなり解析対象氷片前方の流れの行き場が無くなりよどみが発生するためであると考えられる。
 - (10) 一方、水槽試験では数値解析とは異なる傾向を示すことから、水槽試験における流れ場は同様の変化をしていないと推測される。このような差異が発生する根本的な原因は不明だが、上に述べたように氷の面取りを行なった数値解析が水槽試験結果に近い傾向を示したことから、差異の原因として水槽試験に用いた模擬氷の作成精度および表面の加工精度、面取り加工、配置精度等に起因する数値解析との氷形状の差異が考えられる。
 - (11) 実海域では氷群が多数存在し形状も一定しないため、剥離は本研究での解析より複雑に発生すると予想され、水槽試験における密集浮体群下流での流体力が相対的に実現象に近いと推測される。

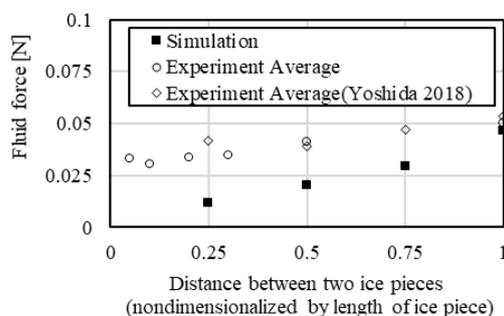


図 4 縦列 2 氷片での氷片間距離と下流氷片に作用する流体力との関係

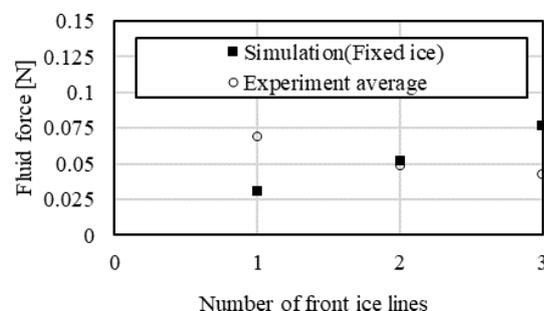
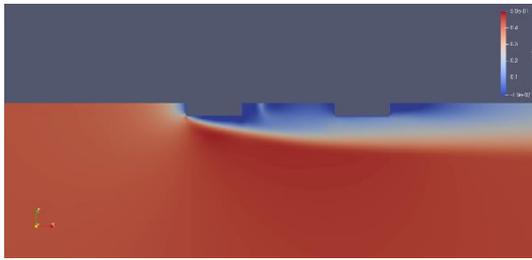
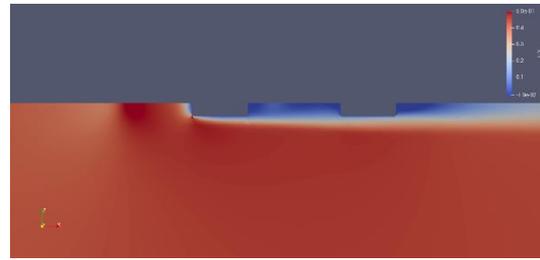


図 5 複数列氷片群における、最下流列中央氷片に作用する流体力



2 rows on upstream



3 rows on upstream

図6 複数列氷片群の数値解析における流れ場の速度コンター図（中央断面）

<引用文献>

- ① Popov, Y., Faddeyev, O., Kheisin, D. & Yalovlev, A., 1967. Strength of Ships Sailing in Ice. Sudostroenie Publishing House, Leningrad., 223 p
- ② Kashiteljan V.I., Ice Resistance to Motion of a Ship, Sudo-Stoenie, 1986.
- ③ 吉田 毅郎、菅野 聡太、北澤 大輔、金野 祥久、密集浮体群中の単独浮体に作用する流体力のモデル化、日本船舶海洋工学会論文集、27 巻、2018、9-14

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 林諒汰, 金野祥久
2. 発表標題 浮氷群下流の氷片に作用する流体力の数値解析による調査および実験との比較
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和4年春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林諒汰, 金野祥久, 周金コン, 北澤大輔
2. 発表標題 浮氷群下流の氷片に作用する流体力の数値解析による調査および実験との比較
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和4年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryota Hayashi, Akihisa Konno, Jinxin Zhou, Qiao Li, Shuchuang Dong and Daisuke Kitazawa
2. 発表標題 A comparative study on the experimental hydrodynamic force of an ice piece in model-scale brash ices
3. 学会等名 The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Hayashi, A. Konno, Z. Jinxin, D. Kitazawa
2. 発表標題 Investigation of Hydrodynamic Forces Acting on an Ice Piece Downstream of Floating Ice Pieces
3. 学会等名 Seventh International Symposium on Arctic Research (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryota Hayashi, Akihisa Konno, Jinxin Zhou, Qiao Li, Shuchuang Dong, Daisuke Kitazawa
2. 発表標題 Experimental and Numerical Analysis on the Hydrodynamic Force of an Ice Piece in Synthetic Brash Ices With Defined Distance
3. 学会等名 International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vol. 86861 (国際学会)
4. 発表年 2023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	北澤 大輔 (Kitazawa Daisuke) (30345128)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	

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