

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420830

研究課題名(和文) 氷海域で構造物と干渉する氷片群に作用する流体力の把握とモデル構築

研究課題名(英文) Investigation and modelling of fluid force affecting on ice pieces interacting with arctic structures

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は氷片群中の個々の氷片に作用する流体力モデルを構築し、船舶等に作用する氷荷重の評価手法構築を目標とする。船体と単独氷片との衝突の模型実験を数値解析で再現でき、数値解析で流体力を評価できる見通しを得た。この解析を実船スケールに適用し、船舶・氷塊衝突時の氷荷重推定方法を提案した。氷片群中の単独氷片に作用する流体力を模型実験で計測し、他氷片の下流にある氷片の流体力は単独氷片の場合より小さいこと、また流体力が流速の1乗に比例する成分が主の場合と、2乗が主になる場合があることを示した。流体力のモデル化において氷片配置を考慮する必要性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：This study builds the fluid force model acting on each ice piece in an ice group and proposes the evaluation method of the ice load on an ocean structure. A numerical analysis successfully estimates fluid force since it simulated the model test of the collision with a ship and the independent ice piece. This analysis was applied to the real ship scale, and the ice load estimation method at the ship collision with a floating ice was proposed. The fluid force acting on the ice piece in the group of floating ice pieces was measured by the model test. It was shown that the fluid force on the ice piece which is downstream from another ice is smaller than the case of the independent ice piece. It was also shown that in some cases the fluid force is proportional to the flow velocity, and in other cases, it is proportional to the square of the velocity. This suggests the necessity of taking the arrangement of ice pieces into consideration in the modeling of fluid force.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：流体力 氷片群 氷荷重 衝突

1. 研究開始当初の背景

北極海の航路としての利用や海底資源開発が本格化している。結氷している航路では通常は砕氷船が先行して氷を割り、氷片が浮かぶ水路を商船が航行する。また海底資源開発では、アイスマネジメント（砕氷船により氷を予め砕いておくこと）された氷海での掘削船による掘削が想定される。これらの状況では、船舶または海洋構造物と多数の氷片が衝突・相互干渉する状況で、構造物が受ける荷重（氷荷重）を適切に見積もることが重要である。

氷片が密集している状況の数値解析では、氷荷重が模型実験よりも過大になることが報告されている。他研究者はこの差異は氷片の破壊や変形等に起因すると結論づけており、数値解析に氷の破壊や変形の物理（アイスマカニクス）を組み込むことによる解決を図っているが、本研究の研究代表者は氷荷重の過大評価が氷片に作用する流体力の取り扱いに起因している可能性が高く、これを適切に行うことで解析精度を向上できると推測している。この根拠として次の点が挙げられる。(1)研究代表者の研究では、模型実験と数値解析とでは船速に対する傾向が異なり、模型実験ではおおそ線型に増加するが、数値解析では2次関数的に増加する。研究代表者も含め多くの研究では、氷片に作用する流体力を流速の2乗に比例する式で与えていることから、流体力モデルの影響が考えられる。(2)過去の数値実験から、特に流体力の取り扱いが氷荷重に大きく影響し、一方で氷片間摩擦などの影響は相対的に小さいことが分かっている。アイスマカニクスの考慮による差異も小さいと予想される。

しかし氷片が密集している状態で、各氷片に作用する流体力を精度よく評価する方法は確立していない。評価のためには以下の課題を解決する必要がある。

1. 氷片数は 10^4 以上のオーダーで、その隙間や周囲の流体から氷片が受ける力を求めたいが、この状況を数値流体解析で直接解くのは事実上不可能である。
2. 氷片に作用する流体力は、接触力と比べて相対的に小さいと考えられてきた経緯があり、研究が進んでいない。何らかのモデル化を行うことになるが、適切な検証が必要である。
3. 構造物と氷片群との干渉を扱うには、複数氷片の接触点を介した相互干渉は直接取り扱い、周囲流体から受ける力のみを適切にモデル化する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、以下の3項目を達成することにより、氷片群中の氷片に作用する流体力のモデルを構築し、氷海構造物に作用する氷荷重の評価手法を確立することを目標とする。

- (1) 模擬氷が水面上に密集している状況で、個々の氷片に作用する流体力を計測す

る。また、周囲氷片との位置関係や、氷片の分布および密接度（氷の詰まり具合）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定量的評価。上記と同様に氷が水面上にある状況で、氷片に作用する流体力を数値解析により調査する。
- (3) 上記2項目を統合することにより、氷群中の単一氷片に作用する流体力のモデルを構築する。これにより、氷海構造物に作用する氷荷重の精度良い推定を可能とする。

3. 研究の方法

(1) 船体と単独氷片との衝突現象を模型実験および数値解析により調査する。はじめに衝突直前の氷片の運動を調べることにより、数値解析の妥当性を確認する。その後、数値解析結果を用いて氷片に作用する流体力を調べる。実験のみでは氷片に作用する流体力とそれ以外の力の分離が困難なので、数値解析により流体力を調べるためである。

氷片同士および氷片と船体との衝突直前までの解析には汎用数値流体解析ソフトウェア STAR-CCM+バージョン8または9を用いた。船舶および氷片の運動を表すため、それぞれの周りに格子を張り水槽全体の格子と重ね合わせるオーバーセットメッシュ解析を実施した。模型実験には、東大生研が所有する小型造波曳航水槽に台車を設置したもの（図1）を用い、木製で表面をアルミニウム薄板で補強した模型船と、低分子量ポリオレフィンで製作した模擬氷を用いた。数値解析および模型実験のいずれも、模型船の船長は300 mm、船幅と吃水90 mmであり、模型氷は150 mm×150 mm×60 mmとした。

(2) (1)の解析結果を用いて、船舶と氷塊の衝突時の荷重評価方法を提案する。具体的には、衝突直前の氷片速度推定と運動量保存則から衝突後の氷片速度を推定し、力学エネルギー保存則から衝突に消費されるエネルギー量を求め、この結果と荷重推定手法とを組み合わせることにより氷荷重を推定する。船体が耐える最大氷荷重が分かれば、本評価手法により氷片衝突のリスクがある状況で安全に航行できる最大船速を推定できる。

(3) 複数氷片が水面に存在する状況の模型実験を実施し、氷片群中に存在する単独氷片に作用する流体力を計測する。(1)と同じ小型造波曳航水槽を用い、模擬氷にはポリプロピレン板を用いる。そして模擬氷が水面に浮いているのと同じ高さに並ぶように台車に固定し（図2）、これを曳航することにより、単独氷片に作用する流体力を検力計により測定する。模擬氷の密接度（水面に占める氷の面積比）と配置、曳航速度を換えて複数の実験を実施する。密接度、曳航速度と流体力との関係性を調べることにより、氷片群中にあ

る氷片に作用する流体力の、単独氷片との差異を検討するとともに、流体力モデルを構築する。流体力モデルは氷片群中航行船舶に作用する氷荷重解析の数値解析に用いるようなものを想定する。

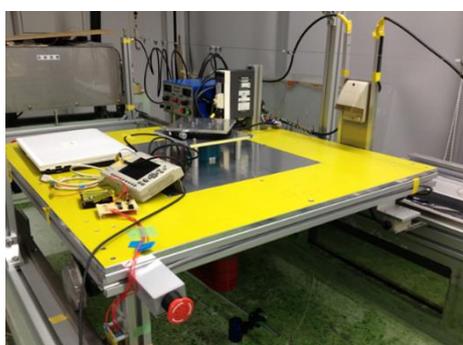


図 1 実験に用いた小型造波曳航水槽（上、東大生研）および設置した台車（下）

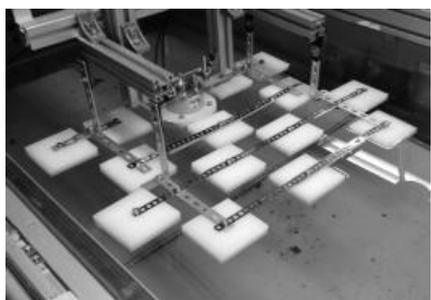
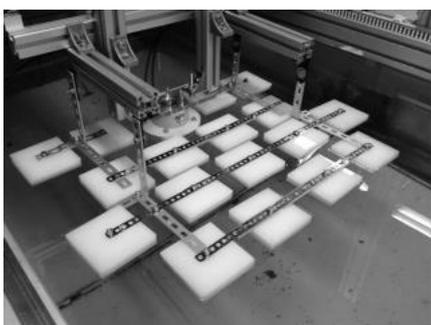


図 2 複数氷片曳航実験における氷片の配置例、配置A（上、密接度 50%）およびB（下、同 40%）

4. 研究成果

(1) オーバーセットメッシュ解析を用いた数値解析により、船舶と氷片との衝突を再現した（図 3）。

衝突直前に、氷片が模型船の進行方向（模型船から遠ざかる方向）にわずかに動くことが模型実験および数値解析により示された。その移動量は模型実験と定量的に一致した（図 4）。このことから、オーバーセットメッシュを用いた数値解析により船舶と氷片との衝突直前における氷片運動を再現できることが分かり、数値解析により氷片に作用する流体力を評価できる見通しを得た。また氷片の運動が再現できるので、衝突直前の運動量と運動エネルギーも推定できるため、(2)で述べる衝突時最大氷荷重の推定に利用できる。

なお STAR-CCM+バージョン 9 は物体同士の衝突を含む解析ができるが、これは厳密には物体同士は接触せず、間にメッシュを数層挟んだ状態で運動量の交換が行われるモデルを採用している。本研究においては衝突直前までの氷片の運動を調べたいことから、衝突解析機能は用いずに流れ解析を実施し、模型船と氷片とが近づいて計算が破綻するまで解析した。この方法により船舶と氷片との衝突直前における氷片運動の再現を可能にした。

(2) (1)の研究成果を利用し、船舶と氷塊との衝突時の荷重を評価する新たな方法を提案した。

具体的には、まず衝突直前の氷片速度を上述べた数値流体解析と同様の解析により推定する。なおフルード数およびレイノルズ数は実船スケールに合わせる。これにより衝突直前の運動量が分かるので、完全非弾性衝突を仮定すると衝突後の氷片の運動量が計算できる。ここから力学エネルギーの減少量が分かるので、このエネルギーが衝突によって消費されたと仮定し、またエネルギーベース荷重推定法を用いることにより、衝突時に船体に作用する最大氷荷重を推定できる。

衝突対象に氷山片（代表長さ 20 メートル程度）を仮定した解析を実施し、氷片の衝突直前の速度を推定できること、これにより船舶が安全に航行できる最大船速を求められることを示した（図 5）。本研究課題終了時点では氷の強度パラメータや船体強度のパラメータに他の文献での参考値をそのまま用いており、また比較対象が乏しいため、提案手法の妥当性評価と検証は十分とは言えない。今後更なる検討が必要である。

(3) 複数氷片の曳航試験により、氷片群中の単独氷片に作用する流体力を計測した。

予備実験の結果に基づき、氷片間距離を氷片サイズの 1/4 程度に設定して配置し、氷の密接度が 40%の場合と 50%の場合を中心に実験した。その結果、図 2 の配置 A（密接度 50%）、配置 B（同 40%）のいずれの場合に

も、下流にある氷片に作用する流体力は単独氷片の場合より小さいこと、また配置 A では曳航速度の 2 乗に比例する成分が主であるのに対し、配置 B では速度に比例する成分が主となること分かった (図 6)。

密接度が高い場合の流体力が単独氷片の場合よりも下がることは予想されることだが、これを定量的に示した。一方、密接度が高い条件で模型船舶の曳航試験を実施すると抵抗が線形に近い傾向を示すことが報告されていることから、密接度が高いほど線形成分が増えることが予想されたが、上記の結果は予想に反する結果となった。この理由として、配置 A では計測対象氷片の前方 (上流側) に水空きがあるのに対し、配置 B では前方に氷片があり、この氷片の伴流の影響を受けたと考えられる。この結果から、密接度のみならず氷片配置の影響を考慮する必要があることが示唆される。

氷片運動を伴う現象の数値シミュレーションにおいて、氷片に作用する流体力を流速の 2 乗に比例する式で与えている研究が多い状況に対する問題意識が本研究着想のきっかけであるが、この状況は本研究課題終了時点でも変わっていない。本研究の結果から、安易に抗力式を用いるのは特に密接度が大きい場合において不適当であることが分かった。また流体力モデルを構築する上で考慮すべき条件が示された。

氷片配置の影響を考慮するためには複数の異なる配置条件での模型実験または数値解析が求められるが、本研究課題終了時点ではこれらを完了していないため、異なる氷片配置条件および密接度が 50% よりも高い条件をカバーした流体力モデルの構築には至らなかった。現在も検討を継続している。

本研究の数値計算に、工学院大学情報科学研究教育センターが提供する STAR-CCM+バージョン 8 を用いた。

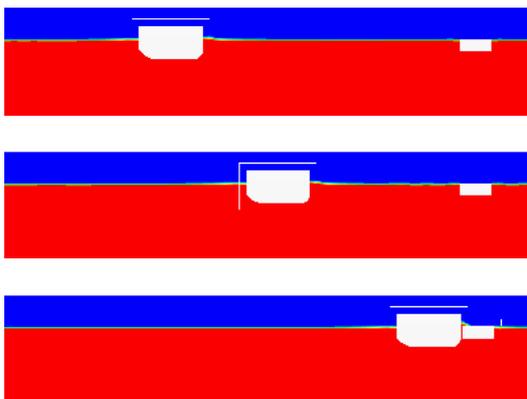


図 3 単独氷片衝突の数値解析における船体、氷片と自由表面の挙動 (中央断面)

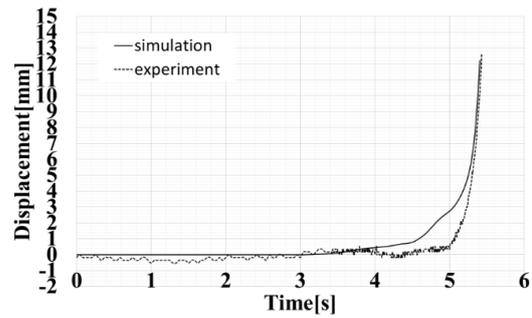


図 4 単独氷片衝突の数値解析と模型実験における氷片移動量の比較

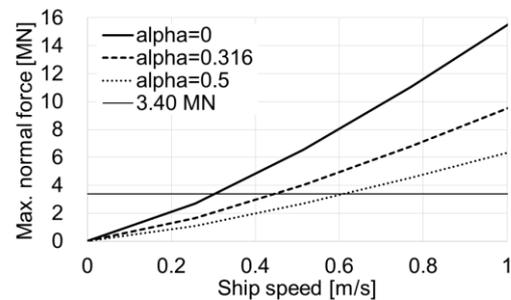


図 5 船舶と氷片との衝突時最大氷荷重に基づく、安全航行船速の試算例

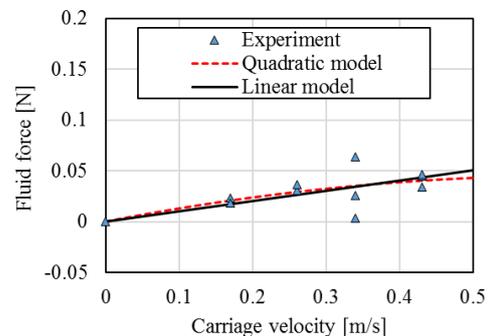
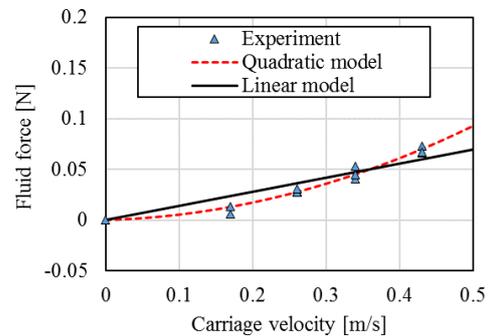


図 6 複数氷片を配した曳航試験における下流側氷片に作用する流体力と回帰分析結果・配置 A (上、密接度 50%) および B (下、同 40%)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 菅野聡太、吉田毅郎、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計測、日本船舶海洋工学会平成29年春季講演会、2017.
- ② Tatsuya SHIGIHARA, Akihisa KONNO, Risk Assessment Method for Collision of Ship with an Ice Floe, 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2016.
- ③ Akihisa KONNO, Toward the assessment of ship navigation in Arctic Sea Route under decreasing ice condition, ShipArc 2015, 2015.
- ④ 金野祥久、宇都正太郎、氷工学分野における水槽試験およびシミュレーション技術の動向、第25回海洋工学シンポジウム、2015.
- ⑤ Tatsuya SHIGIHARA, Daisuke ISHIBASHI, Akihisa KONNO, Experimental and Numerical Investigation of a Model-Scale Ship and Ice Floe (Second report), 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2015.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

北澤 大輔 (KITAZAWA, Daisuke)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：30345128

(3)連携研究者

藤野 正俊 (FUJINO, Masatoshi)

東京大学・生産技術研究所・助手

研究者番号：90242130

吉田 毅郎 (YOSHIDA, Takeo)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：30771505

(4)研究協力者

()