

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06968

研究課題名(和文) 海水減退期に適した新しい北極海航路航行安全性評価手法の構築

研究課題名(英文) Development of novel assessment method for the safety of Arctic sea route for decreasing sea ice condition

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は夏季の北極海航路で単独氷塊との衝突を想定した航行安全性評価方法の提案を目指す。模型実験で衝突前後の氷塊の運動エネルギー変化を調べるとともに数値解析技術を構築してこれを實現する。水槽試験において船体と模擬氷塊とを衝突させ氷塊運動を調査した結果、衝突後の模擬氷は並進の運動エネルギーがほとんどの割合を占め、回転のエネルギーは非常に小さい。また円柱型に比べ立方体型では回転エネルギーが急増加後、速やかに減少する。数値流体解析ソフトウェアによる衝突の数値解析と、エネルギー消費量から船体氷荷重を見積もる手法とを組み合わせることにより、限定された条件ではあるが船舶の安全航行速度を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷海航行時の安全性評価の歴史は長いが、歴史的な経緯から結氷した海で砕氷船が平坦氷を割り進むような氷の多い状況を想定した研究が多く、極海コードの安全性評価もこれに基づいている。近年急速に進んだ海水減少に対応しているとは言い難く、特に夏期の氷が少ない海域の航行は想定していない。本研究は目視や船舶レーダーでの発見が困難な冰山片と船舶との衝突を視野に、この状況の現象解明を試みており、北極航路の現状に一石を投じるものである。また船舶と氷塊との衝突時に並進運動成分が卓越することは報告例が乏しく、回転の減衰を数値解析に取り入れる手法が議論となっていたので、この意味でも意義がある。

研究成果の概要(英文)：This research aims at the proposal of the navigation safety assessment method which assumed the collision of a ship with an independent ice piece (such as a bergy bit) in the Arctic Sea Route in summer. This is realized by investigation of the time history of the kinetic energy of the ice piece before and after the collision with model tests and by building a numerical analysis method.

When the model ship and an artificial ice piece were made to collide in a model basin, the kinetic energy of the translational motion dominated the total energy and the rotation energy was negligible. In the case of the cubic ice piece, the rotational energy increases immediately after the collision but decreases promptly after that with that of the cylindrical ice. By combining the numerical analysis of the collision and an estimation method of the ice load from consumed energy, the safe navigation velocities in the potential collision with an ice piece were evaluated under limited conditions.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：氷荷重 耐氷船 衝突 流体力 冰山片 氷塊

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

北極海の航路利用や資源開発が本格化し、我が国でも航路利用等の事例がある。ヤマル半島のガス田が本格生産する 2020 年以降は多くの利用が見込まれる。氷の減少により、夏季の北極海航路では多くの海域に氷がほぼ無いため、開水域と同様に航行できるとの期待がある。アイスクラス（耐氷能力の認証）未取得の船舶による北極海航路利用も報告されている。

ただし、目視やレーダーでは発見できない氷塊に船舶が開水中航行速度で衝突するリスクを考慮する必要がある。氷の総量は減ったが、氷河の離脱が増え、また極点付近の多年氷が漂流しやすくなるため、固い多年氷の氷塊が航路上に増加しているからである。船舶レーダーでは直径 20 メートル以下の氷山片は発見しづらい。衝突事故も既に報道されている。氷塊を見落とすリスクがあるからには、衝突の可能性はあるとの前提で安全性を評価すべきである。

船舶と氷との衝突における船体に作用する氷荷重の評価には、Popov らの古典的な評価方法（1967 年出版）またはこれを拡張したものが用いられ、極海コードのアイスクラス評価もこれに基づいている。この評価方法では、船舶または海洋構造物と氷との衝突において、一方が衝突後も動かない（運動量が変化しない）ことを仮定する。船舶の場合は、非常に広い氷盤との衝突を前提としていることになる。その上で、まず衝突時に氷の破壊や船殻の変形・破壊に消費されるエネルギー量を推定し、そこから氷荷重を求める。消費エネルギー量は、船舶の氷への乗り上げ等の剛体運動を推定することで運動に費されるエネルギーを計算し、衝突前の運動エネルギーから差し引くことで求める。この仮定は氷山片のような直径 10~20 メートルの氷塊との衝突には当てはまらず、現在の北極海航路の航行安全性評価には適当でないと研究代表者は考えている。なお消費エネルギーから氷荷重を推定する方法は、近年の研究成果や数値解析技術により改善されている（文献 2 ほか）。

研究代表者は上記の推定法を改善するため、運動量保存則より衝突前後の速度変化を求め、そこから衝突時の消費エネルギーを算出する方法を提案していた。この方法では船舶と氷塊との衝突前の流体を介した干渉を数値解析によりモデル化し、これによって衝突前の運動量を求める。そして、運動量保存則を援用して速度変化を算出し、そこから衝突前後の運動エネルギーの変化を求める。その差を衝突時の消費エネルギー量だとしている。しかし研究代表者の提案する方法は申請時点で以下の課題があり、旧来の方法を置き換えるにはこれらへの対応が必要だった。

(1) 衝突直前の氷塊運動量の推定 衝突の直前には船の波が氷塊の運動を誘起するので、衝突直前の氷塊運動量はゼロではなく推定を要する。研究代表者らは数値流体解析結果に基づく簡易な推定式を構築していたが、妥当性の検証が不十分である。

(2) 衝突後の氷塊の運動エネルギー推定 Popov らの算定手法では氷の運動を無視するが、船舶の衝突後の運動を考慮し、衝突前の運動エネルギーの一部のみが衝突時に消費されるとする。研究代表者の提案手法では衝突前後のエネルギー差を単純に衝突時の消費エネルギーとしており、氷塊の回転等による運動エネルギー消費を無視しているが、妥当性に疑問があり検証を要する。

(3) 数値解析手法、およびその妥当性の検証 上記 1. と 2. は信頼できる流体・固体相関解析手法があれば解決できる。現在の汎用数値流体解析ソフトの多数は衝突現象への対応を謳うが、実際には物体同士が近づくと運動量交換が始まるモデルを採用しており、接触を計算しない。従って衝突前までの解析は信頼性が高いが、衝突中・衝突後の解析結果の利用には慎重でなければならない。一方、研究代表者らは船舶と多数の氷塊との衝突、接触を含む運動の解析技術を開発しており、この分野で世界トップクラスと認知されているが、流体力をモデル式で与えており、現状では衝突の解析において汎用ソフトを置き換えるには至らない。

これらの課題を解決し衝突時消費エネルギー量の適切な評価手法を開発するには、大規模な実験よりは実験室レベルの小規模な実験で、氷塊の運動を系統的に調査するとともに、固体の衝突を含む流体・固体相関解析を可能にすることが求められると研究代表者は考えた。

### 2. 研究の目的

本研究は船舶と氷塊の衝突前後での消費エネルギー評価手法を構築し、これをエネルギー消費量から衝突時荷重を評価する既存手法とを組み合わせることにより、北極海航路の航行安全性の評価手法を提案することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 模型実験により、船舶と浮遊物体とが衝突する際の浮遊物体の運動を詳細に計測した。東京大学生産技術研究所が所有する小型造波曳航回流水槽（5000 mm×1000 mm×500 mm）を用いて実験を行った。船舶模型は、船長 300 mm、船幅 90 mm、内部は木材で作成し、表面を厚さ 0.5 mm のステンレス板で覆った。模擬氷は低分子量ポレオレフィン樹脂を溶融して型に流し入れ、円柱型（φ100 mm×50 mm）と立方体型（100 mm×100 mm×100 mm）の 2 種類を用意した。模型船は曳引台車に固定し、曳引台車を動かすことにより模型船を走らせ、模擬氷と衝突させた。実験映像を 3 次元ビデオ動作解析システム Frame-DIAS V により解析し、模擬氷の変位、速度、角速度、運動エネルギー、位置エネルギー、回転エネルギーを解析した。

(2) 衝突中・衝突後の氷塊運動解析に適した数値解析手法の構築。当初計画では研究代表者が有している船舶と氷塊が衝突、接触する状況の解析技術および粒子法を用いた流体解析技術を統合し、氷塊運動の解析に活用する予定であったが、解析が不安定であり実用的な解析を実

施するに至らなかった。そこで本研究では汎用数値流体解析ソフトウェア STAR-CCM+ バージョン 8 を用いて過去に実施していた解析手法を再び利用し、実船スケールでの氷の衝突前後の運動を解析した。なお解析のスケールは図 3 左に示すように模型スケールに準じて行い、現象を実船スケールに合わせるためにレイノルズ数およびフルード数をそれぞれ  $4.7 \times 10^7$ 、 $0.145$  となるよう調整した。氷片形状は球形とし、直径は船幅  $B$  を基準として  $0.625B$  とした。これは船幅を 32 m (パナマックス)、氷片直径を船舶レーダーでは発見しづらいとされる 20 m と想定して決定した。従って模型実験とは氷片形状、氷片寸法ともに異なる。初期位置を図 3 右に示すように  $y = 0$  (船と正面衝突)、 $B/4$ 、 $B/2$  の 3 箇所にて解析した。

(3) 衝突時の消費エネルギー量推定手法の確立、および妥当性評価。衝突時に消費されるエネルギー量から氷荷重を推定する方法はいくつか提案されており実績がある。本研究では衝突時に消費されるエネルギー量を推定する方法を提案する。具体的には、衝突時の相対速度から運動エネルギー保存則および完全非弾性衝突を仮定してエネルギー消費量を算出する。ここで完全非弾性衝突を仮定したのは、この場合が衝突時に消費されるエネルギーが最大だからである。これにより衝突状態に対応した氷荷重が算出できるため、船殻の許容耐荷重を仮定できれば、船舶が安全に航行できる船速を推定することが可能となる。これにより北極航路の安全性評価が実施できる。

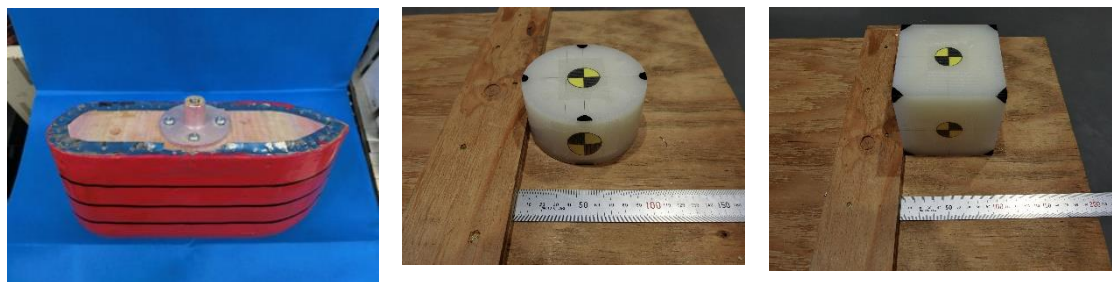


図 1 実験に供した模型船および模擬氷(円柱形、立方体形)

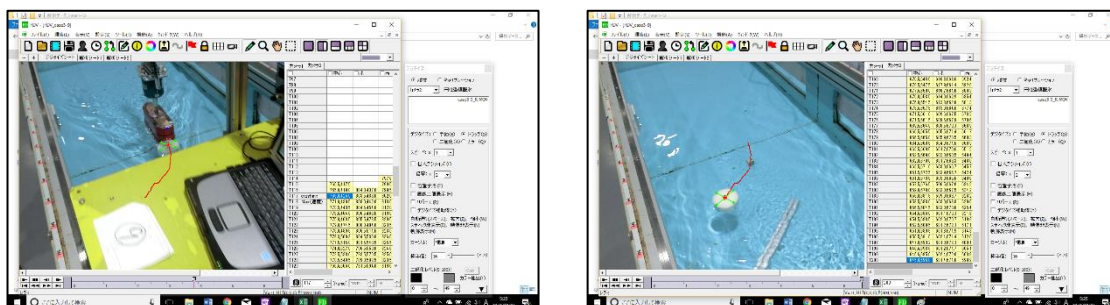


図 2 Frame-DIAS V による画像解析の実施例

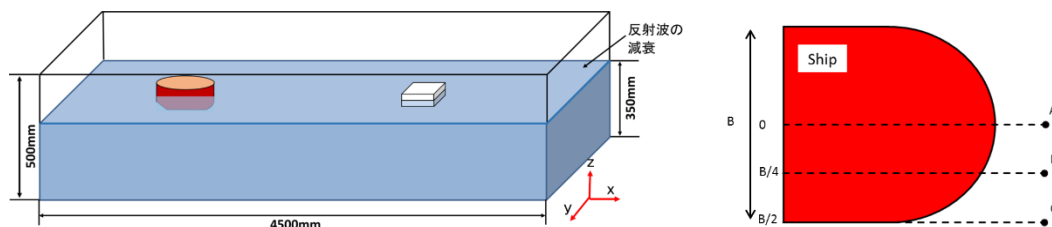


図 3 数値解析における解析領域と氷の初期位置

#### 4. 研究成果

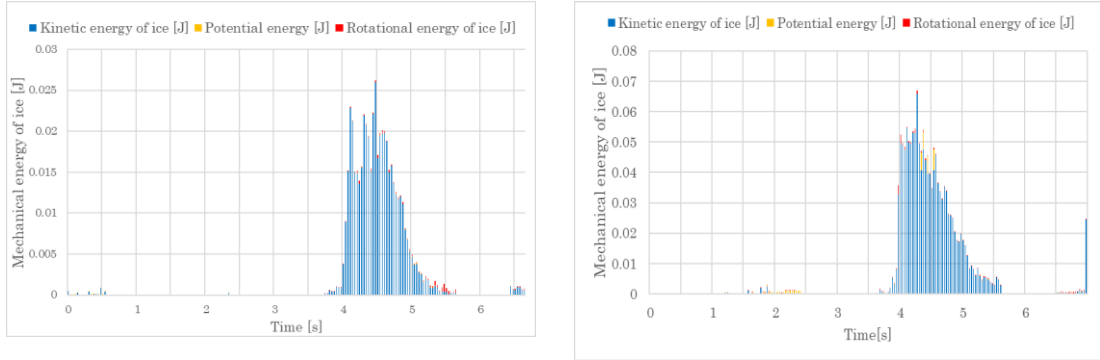
(1) 船速を 3 段階 ( $0.3 \text{ m/s} \sim 0.5 \text{ m/s}$ )、2 種類の模擬氷を用いた水槽試験により、いずれの場合にも衝突後の模擬氷のエネルギー変化は並進の運動エネルギーがほとんどの割合を占めることが分かった。それに対して、回転エネルギーは全体のエネルギーに比べ非常に小さく、無視できることも分かった。

一方で立方体形の模擬氷での実験では、円柱形に比べ回転エネルギーが衝突直後に急増し、その後速やかに減少している。これは立方体形の場合は角付近に模型船が衝突した場合に力を伝えやすく、これが模擬氷を回転させるトルクとして作用する一方で、回転に対する流体抵抗トルクも大きいため、減衰が速いと推測される。逆に円柱形の場合は模擬氷を回転させるトルクが小さいと推測される。この結果は定性的には容易に推測できるものだが、立方体形の模擬氷が衝突直後に大きく回転している場合であっても、上で述べたように回転エネルギーは全エネルギーに

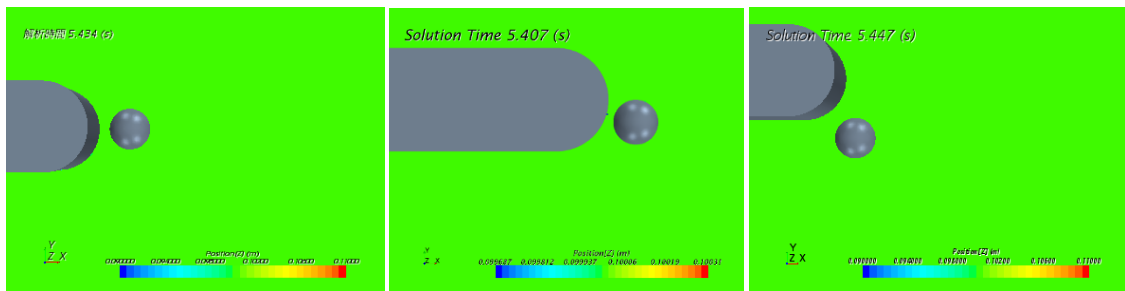
比べて非常に小さい。

(2) 数値解析結果から船舶と氷片との衝突速度を推定できる。この結果と、Daley and Kim (2010)で提案されているエネルギーベース氷荷重解析手法を用いて、衝突時の氷荷重を推定する。また同じく Daley and Kim (2010)の構造解析例より、船殻の許容変形量を 0.2 m とした場合の許容耐荷重 15.1 MN を本研究の許容耐荷重として採用して、衝突時の氷荷重がこれより小さくなる船速を航行可能船速と判定する。

図 6 に示すように、氷荷重は船舶と氷片が正面衝突した場合ではなく初期位置  $B/4$  の場合のほうが大きいことが分かった。これは直感と反する結果であるが、数値解析における氷片の運動を観察すると、正面衝突の場合は船が誘起する波に氷が押されて船と同方向に運動し、衝突時の相対速度が小さいのに対し、初期位置  $B/4$  の場合には氷片は船が誘起する波の影響を受けるものの船幅方向の運動が卓越し、衝突時の相対速度が正面衝突の場合より大きくなっている。これが原因で正面衝突時よりも初期位置  $B/4$  の場合のほうが氷荷重が大きくなる。一方、初期位置  $B/2$  の場合には衝突時の相対速度が小さく、氷荷重も小さい。



Cubic ice Cylindrical ice  
図 4 衝突前後の模擬氷の運動エネルギーとその比率



初期氷片位置： $y=0$  初期氷片位置： $y=B/4$  初期氷片位置： $y=B/2$

図 5 数値解析における衝突直前の氷片位置

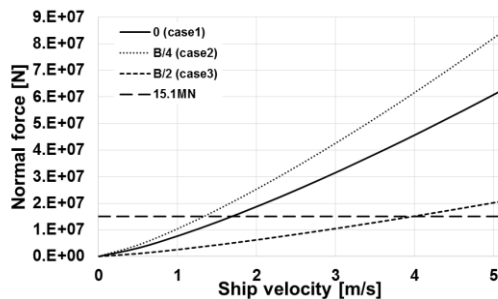


図 6 数値解析結果に基づく、安全航行可能船速の推定

(3) 以上のように、数値解析結果を用いて船舶が安全に航行するための最大船速を推定することが可能となった。したがって北極海航路の航行安全性の評価手法を提案するという目的は達成されたものと考えている。

本研究では既存研究で用いられている解析ケースを援用しているため、実際の海域の状況を反映できているとは言えない。また限られた条件での数値解析のみを実施しているため、氷荷重が最大となる初期位置や、氷の大きさが異なる場合の安全性評価には至っていない。本研究で利用している Daley and Kim (2010)の氷荷重解析手法は仮定する氷片の衝突位置形状と氷強度によ

って結果が大きく変わるため、妥当な解析パラメタを与える必要がある。これは数値解析や模型実験では調査できず、実海域での調査が必要だと考えられる。

また船舶が比較的大きな氷片に正面衝突に近い衝突を仮定すると、氷荷重が大きくなることは避けられず、安全航行可能船速は小さくなる。しかし極海コードでは船舶が氷と正面衝突することは想定されず、斜め衝突 (glancing impact) することを仮定してルールが定められている。したがって本研究での仮定は悲観的すぎる可能性があり、これも妥当な仮定を検討する必要がある。

また、数値解析手法は過去に正面衝突の場合について模型実験との対比により妥当性を確認しているが、今回実施した実験を含め正面衝突ではない場合の妥当性の評価は不十分である。これらは今後の課題として残されている。

#### <引用文献>

Popov, Y., Faddeev, O., Kheisin, D., & Yakovlev, A. (1967). Strength of ships sailing in ice. Sudostroenie Publishing House. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0684596>  
Daley, Claude & Kim, Hyunwook. (2010). Ice Collision Forces Considering Structural Deformation. 10.1115/OMAE2010-20657.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 吉田 毅郎, 菅野 聡太, 北澤 大輔, 金野 祥久	4. 巻 27
2. 論文標題 密集浮体群中の単独浮体に作用する流体力のモデル化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会論文集	6. 最初と最後の頁 9~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.27.9	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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)	
連 携 研 究 者	吉田 毅郎  (Yoshida Takeo)  (30771505)	東京大学・生産技術研究所・助教   (12601)	