

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560974

研究課題名(和文) 氷海船舶の氷片密集水路航行時性能評価手法の確立

研究課題名(英文) Investigation of evaluation method for ship navigation in brash ice channels

研究代表者

金野 祥久 (Konno, Akihisa)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：60322070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は水槽試験において氷片の形状分布と密接度を定量的に把握する方法を開発し、また水路状態の船体抵抗に対する影響を評価し、水路抵抗の評価プロトコルを提案する。研究成果として、水路内ボイド率とせん断強度の計測手法を提案し、その妥当性を示した。また数値解析の氷片挙動を実験と一致させるには流れ場の与え方が重要であること、球形氷片を用いた数値解析で水路抵抗を定量的に評価できるが立方体氷片の割合が多いと過大評価すること、船速が低い場合に数値解析結果が実験結果とよく一致し実用面では有用だが、船速が大きいと数値解析は水路抵抗を過大評価することが分かった。

研究成果の概要(英文)：This study develops the method of estimating quantitatively a shape ratio and void fraction of the brash ice channel in a model experiment, evaluates their effects on channel resistance, and proposes the evaluation protocol of a channel resistance. As a result, the measurement methods of the void fraction and the shearing strength of a brash ice channel in model experiment were proposed, and the validity was discussed. In addition, the importance of the flow field for the numerical analysis is shown to obtain appropriate behavior of ice pieces. Numerical-analysis estimates the resistance appropriately when the channel is constructed with spherical ice pieces, while it overestimates the resistance when the channel contains cubic pieces. Because numerical-analysis results are well in agreement with experimental results when ship velocities are low, it is useful in respect of practical use. However, if a ship velocity is large, a channel resistance is overestimated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：極地工学 氷海船舶 小氷片密集水路 水路抵抗 数値解析 水槽試験

1. 研究開始当初の背景

北極海やバルト海では、砕氷船が先行して形成した水路を商船が航行することが頻繁に行われる。この場合、水路中に砕氷片が密集した小氷片密集水路 (brash ice channel) が形成される。この水路を航行するときの抵抗は、平坦水中砕氷抵抗の約 80%にまで至ることもある。代表的な氷海航行船舶認証規則 (アイスクラス) である Finnish-Swedish Ice Class Rules (FSICR) では、brash ice channel を航行する際の抵抗と必要機関動力の評価を義務づけている。認証を受けるにはこれらを規則に定められた数式 (ルール式) または「より正確な計算または模型実験に基づく値」により評価し、それ従った機関を搭載する必要がある。一般に模型試験により求められる必要動力はルール式による動力より小さいため、多くの新造船舶では模型実験を用いて認証を取得している。

これまでの報告 (研究代表者の報告を含む) から、チャンネル内での船体抵抗は氷片の形状や分布、密接度 (詰まり具合) によって、大きく変化することが分かっている。しかし brash ice channel は再現性に乏しく、かつその評価手法が確立していないので、氷海試験水槽として FSICR のような規則要求試験を行う際に信頼性を定量的に示せない問題がある。たとえば模型実験に際して FSICR のガイドラインに従った水路を作成しても、実験結果は場合によって異なる。極言すれば、実験条件を操作して低いチャンネル中抵抗を得ることもできることになる。多くの新造船舶が模型実験により認証を取得している現状を考えると、この問題は早急に解決しなければならない。

この恣意性を排し、チャンネル内航行抵抗を模型実験や数値解析で適切に見積もるためには、チャンネル中の氷片サイズの形状や密接度を適切にルール化する必要がある。模型実験において単純に「実海域を縮小したチャンネルを作る」のは実現不可能なので、適切なモデル化が必要だが、そのためには以下の課題を解決する必要がある。

1. チャンネルの状態の定量的把握が不十分。brash ice channel は再現性に乏しく、かつその評価手法が確立していないので、氷海試験水槽として FSICR のような規則要求試験を行う際に信頼性を定量的に示せない問題がある。

2. チャンネル状態の、船体抵抗に対する影響が未解明。研究代表者の過去の研究から、たとえば氷片同士の摩擦の影響は相対的に小さいことなどが分かっているが、氷片の形状分布や 3 次元的な密接度が船体抵抗に与える影響の評価は定量的データが乏しく、まだ十分とは言えない。

2. 研究の目的

本研究では、上記の 2 つの課題に対応した以下の 3 項目を達成することにより、船舶の brash ice channel 航行時の抵抗評価手法を

確立することを目標とする。

- ① 模型実験において、氷片の形状分布および密接度 (氷の詰まり具合) に着目し、これを定量的に把握する方法を開発する。
- ② チャンネル内氷片分布の船体抵抗に対する影響の評価。特に氷片の形状分布と密接度に着目し、模型実験では行えない氷片形状分布を含めた条件で系統的に探求する。主として数値解析によって評価するが、実験値および文献値と突き合わせることでより信頼性を確保する。
- ③ チャンネル内抵抗を評価するプロトコルの確立。上記 2 項目を統合することにより、brash ice channel を航行する船舶の抵抗評価のための適切な実験・解析プロトコルを提案する。

3. 研究の方法

本研究で用いた数値解析手法について、はじめに説明する。氷片運動および氷荷重の解析のためには、氷片と船体、および氷片同士の衝突、摩擦を取り扱う必要がある。特に brash ice channel の解析を行うことを考えると、氷片の大きさは船幅の 1/10~1/100 のオーダーでありこれが水路中に密集しているので、多数の小物体同士の衝突、摩擦を伴った運動を取り扱う手法が必要である。本研究では物理ベースモデリング (Physically Based Modeling) と呼ばれる手法を氷片運動の解析に適用している。物理ベースモデリングとは、物体の衝突、摩擦を含めた運動を解くための手法の一つである。本研究では、主として物理ベースモデリングのライブラリである Open Dynamics Engine (ODE) バージョン 0.11.1 および 0.12 を改造し多数氷片を扱えるようにしたものを利用して氷片運動を解析するプログラムを作成し、解析に供する。

(1) 数値解析の妥当性の確認を目的とし、水槽試験を海上技術安全研究所氷海試験水槽において実施している。この実験ではポリプロピレン製の模擬氷を配した水路を作成し、この水路に模型船舶を曳航して、作用する水路中抵抗を解析するとともに、模擬氷の挙動を撮影し観察した。これに対応する数値解析を実施し、その結果を比較して解析の妥当性を評価する。

実験における模擬氷は直径 0.040 m の球形で、密度は実測で 840~850 kg/m³であった。氷片数は 7000 個である。氷片の初期配置の一例を図 1 に示す。模型船型には、海上技術安全研究所で用いられている単純形状船型模型 B-063 (図 2) を用いた。

数値解析では水槽試験に合わせて、すべて球形氷片で直径 0.040 m の球形、密度は 800 kg/m³ および 840 kg/m³ の条件で解析した。また、流れ場の与え方として、オープンソース流れ場解析ソフトウェア OpenFOAM を用いて船体周りの流れ場 (開水中の流れ場であ

り氷片は考慮していない) を与えた場合と、静水場を考慮した場合との2種類の解析を実施した。このほか、水路周囲壁面と氷片との摩擦係数が不明だったため、これもパラメータとして複数解析した。

(2) 複数の船首角度で数値解析を実施し、その結果の妥当性を検証する。FSICRのルール式は船首形状等を入力パラメータとし、比較的簡単な数式で抵抗を評価する。本報告時点では、より精度の高い計算方法として確立されたものがなく、また模型実験はルール式よりも低い抵抗を示すことが多いことから、実船の認証プロセスではこのルール式を使うことはほとんど無い。しかし単純形状船型模型を用いた場合の抵抗値、および船首形状を変化させたときの抵抗変化の傾向は数値解析と一致することが期待できると考え、ルール式と数値解析結果との比較を試みる。

解析には、単純形状船型模型 B-063 をベースに船首角を変え、4種類の船舶モデルを作成、使用する。船首角は 30°、45°、60°、75° の4種類とした。氷片のサイズおよび個数、球形氷片と立方体氷片の割合を変えて解析した。

(3) 実船船型模型を用いた水槽実験結果と数値解析結果とを比較する。これまでの解析では単純形状船型模型およびそれから派生した形状のみを用いてきたが、解析の妥当性を示すためには実船船型での解析と結果評価が不可欠である。

本研究の範囲内では実船船型を用いた水槽試験を実施できなかったため、Wang らが行った CCGS Terry Fox 模型による実験結果を比較対象とした。

(4) 模擬氷を用いた brash ice のボイド率および強度の測定を試みた。海上技術安全研究所の氷海水槽トリムタンクにおいて、図 3 に示すように堰で区切った水路を設定し、その中にポリプロピレン製の模擬氷を分布させることで brash ice を表現した。水路全面に模擬氷を1層敷き詰めた場合、その総数は1,300個である。

ボイド率(空隙率)の算出には模擬氷の水面下の体積が必要だが、これは水面下の層厚さを計測してそこから求める。水面下の層厚さは、浮力が若干ある板(170mm 四正方形)に鉛直にゲージを固定し、模擬氷の最下層に挿入してあらかじめ定めた基準点からの距離を計測するとともに、別途水面高さを計測してそれらの差分として算出した。

brash ice の剪断強度を計測する手法には様々なものがあるが、本研究では Punch Through Test を行った。その手順は次の通りである。

1. 円盤状のインデントアークが brash ice の上方より鉛直に下降する。インデントアークは等速を保って brash ice を水中に押し込み、

brash ice を突き抜ける。インデントアークの貫入速度はインデントアークの移動変位をレーザ速度計により計測し、データロガーに記録する。

2. 上記の間、ロードセルでインデントアークに働く鉛直方向の反力を記録する。インデントアーク貫入による反力はロードセル、アンプを介し、データロガーに記録する。

3. インデントアーク貫入部の状況を真下から水中ビデオカメラで撮影し、側面からは観測窓よりビデオ撮影する。

せん断強度 τ を求めるためには、まず模擬氷のない開水中での貫入試験を行い、インデントアークのみによる反力を計測する。次に brash ice 中での結果開水中反力を差し引くことにより、brash ice による影響のみを求める。

brash ice 強度を算出するにあたり計測すべきパラメータは、brash ice のボイド率、インデントアークの直径、インデントアークの貫入速度である。それぞれ数種類設定し、それらの組み合わせ毎に6回繰り返し貫入試験を行った。



図 1 模擬氷の初期配置例

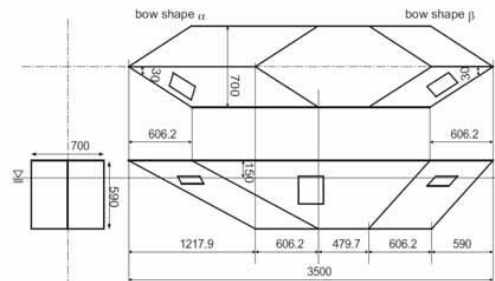


図 2 模型船B-063

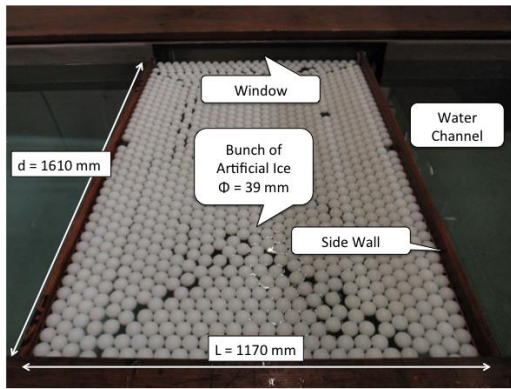


図 3 水路ボイド率および強度測定のための実験状況および模擬氷配置例

4. 研究成果

(1) 水槽試験および対応する数値解析における氷片 (PP 球) の挙動を図 4 に示す。いずれも船首付近で、船体模型内部からの視点で表示されている。

数値解析では、氷片と壁面との摩擦係数、流れ場の有無、浮力などのパラメタを振って解析した。その結果、OpenFOAM によって解析された流れ場を用い、密度 800 kg/m^3 、氷片一壁面間摩擦係数 1.0 とした解析結果の氷片挙動が最も実験と近かった。このことから、氷片挙動を実験と一致させるには流れ場の与え方が重要であることが分かった。

本研究では流れ場を開水中・乱流・定常解析で与えており、氷片の存在による流れの変化や、氷片まわりの流れ場の詳細な解析は行っていない。このことから、適切な流れ場を与えることにより氷片の挙動をある程度まで再現できることが示唆される。一方で氷片の挙動が得に問題になるような現象、例えばプロペラへの氷片の流れ込みや干渉を議論するためには、流れ場の詳細な解析方法が必要になると考えられる。

(2) 水路抵抗の解析結果を基に算出した実船スケールの抵抗値と FSICR ルール式より算出した抵抗値を図 5 (氷片数 10,000 個) および図 6 (同 80,000 個) にて比較している。氷片数が 10,000 個の場合は氷片割合が球形：立方体形 = 9 : 1 のときに抵抗値がルール式に最も近づいた。また氷片数 80,000 個の場合は氷片割合が 10 : 0 のときに最も近づいた。

FSICR ルール式は抵抗を過大評価する傾向があるため、ルール式と数値解析結果の値が一致したから妥当であるとは言えない。しかし今回用いている船型が単純形状船型であること、船首角を変えた解析でも同様の結果を得ていることから、球形氷片を用いた解析で、水路抵抗を定量的にも評価できていると予想される。

一方、立方体氷片の割合が多い場合には抵抗

を過大評価する。今回の解析に用いた氷片一氷片間摩擦係数は、氷片が密集して形成される ridge-keel の打ち抜き試験によって求められた摩擦係数を基にしている。この摩擦係数には、氷片間の引っかかりや付着による抵抗成分を含んでいると考えられる。従って立方体氷片を入れて解析すると、氷片間の引っかかりによる抵抗成分を二重に入れて解析していることになっており、このため抵抗を過大に評価していると考えられる。

(3) 実船船型模型を用いた水槽実験および、これに対応する数値解析により求めた水路抵抗を図 7 (氷片 1 層) および図 8 (氷片 2 層) に示す。船速が低い場合には、数値解析結果は実験結果とよく一致する。現実の brash ice channel 中航行船舶は低速で航行するため、上記の結果は実用面では重要な成果である。一方、船速が大きい場合には数値解析は水路抵抗を過大評価していることが分かる。

模型実験において、船速 0.71 m/s の条件では氷片 1 層と 2 層の結果がほぼ一致しており、傾向だけから判断すると船速がこれ以上速くなった場合に 1 層の水路抵抗が 2 層の抵抗を上回りそうであるが、それは物理的には不合理である。数値解析では 2 層の結果が 1 層の結果の約 2 倍であり、数値解析結果のほうが合理的だと言うこともできる。実験結果を文献値から引用しているため、実験結果の妥当性や、氷の初期配置の詳細、実験時の氷の挙動等は不明である。

(4) 模擬氷を用いた brash ice のボイド率試験の結果、氷片 2 層の場合の計測精度が不十分であったためと考えられたため、氷片 1 層と 3 層の結果を中心に強度計測結果を議論する (図 9、図 10)。他の研究者らによる純氷を用いた Punch Through Test 結果では、インデント速度が 40 mm/s 以下ではせん断強度はほぼ一定であり、Mohr-Coulomb 則による近似が概ね妥当であると報告されているが、本試験も同様な傾向を示した。また、brash ice の組成 (模擬氷/純氷、サイズ及び厚さ) が異なるため単純な比較はできないが、値は $30 \sim 180 \text{ Pa}$ 程度であり、本試験結果とオーダー的に一致している。

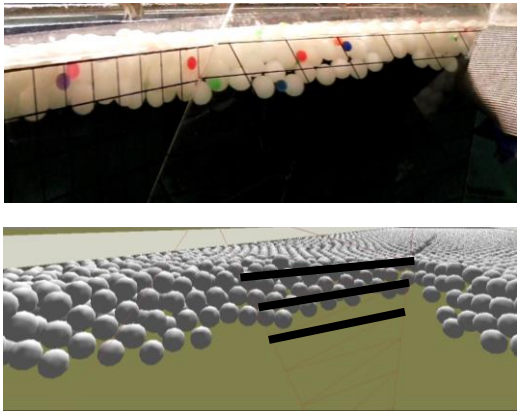


図 4 模擬氷の船首付近での挙動(上: 模型実験、
下: 数値解析)

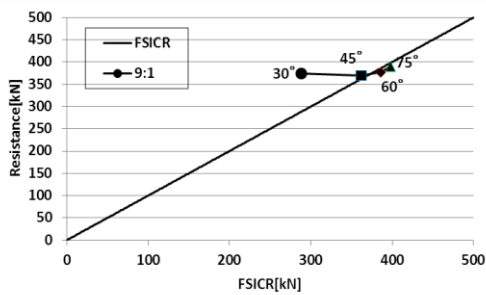


図 5 水路抵抗の数値計算結果とルール式との対応 (氷片数 10000)

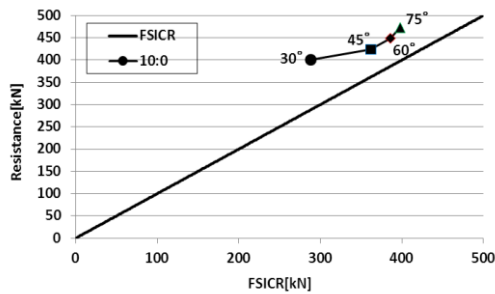


図 6 水路抵抗の数値計算結果とルール式との対応 (氷片数 80000)

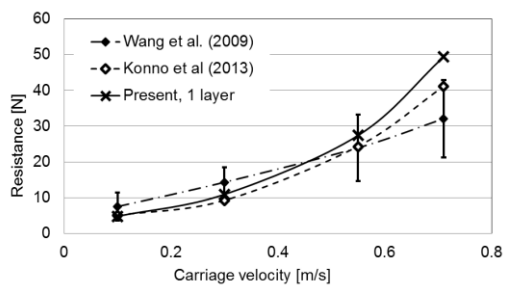


図 7 水路抵抗の模型実験結果と数値解析の比較・1層

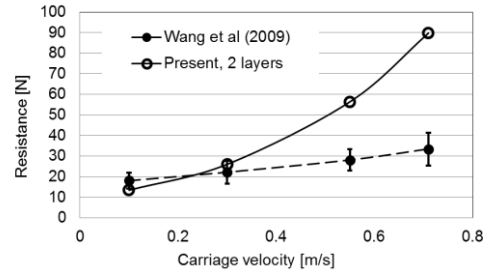


図 8 水路抵抗の模型実験結果と数値解析の比較・2層

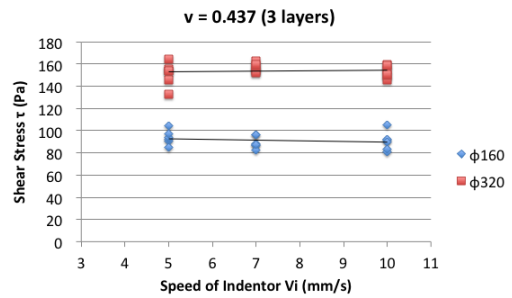
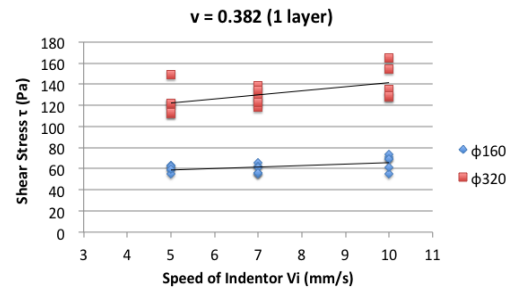


図 9 せん断強度解析結果 (速度依存性)

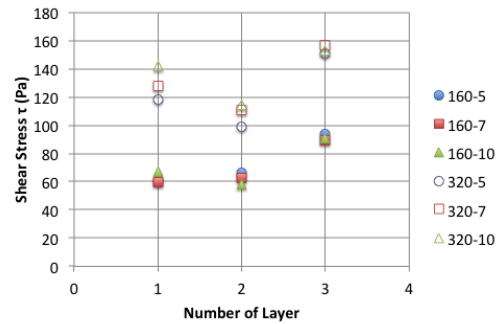


図 10 せん断強度解析結果 (層数依存性) (ただし、2層の結果は参考値)

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 1 件)

- ① 石橋 大輔、麻生 翔、佐野 翔太、佐野 元治、金野 祥久、船舶と氷塊との衝突に関する模型実験および数値解析手法の検討、寒地技術論文・報告集 29, 2013, 104-108.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Konno, A., Saitoh, O., Watanabe, Y., NUMERICAL INVESTIGATION OF EFFECT OF CHANNEL CONDITION AGAINST SHIP RESISTANCE IN BRASH ICE CHANNELS, 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC11), 2011.
- ② Ishibashi, D., Sano, S., Konno, A., Model-scale experiments of ship collision with a single ice floe, 28th Internatiolan Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2013, 137-140.
- ③ Asoh, S., Sano, M., Konno, A., Numerical simulation of ship collision with a single ice floe, 28th Internatiolan Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2013, 141-144.
- ④ Kanamori, S., Konno, A., Effect of ship shape representation for numerical estimation of channel resistance, 28th Internatiolan Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2013, 145-148.
- ⑤ Sato, K., Konno, A., Numerical investigation of effect of ship bow shape against channel resistance, 28th Internatiolan Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2013, 149-152.
- ⑥ Yamagishi, R., Konno, A., Level ice representation for physically-based simulation of ice-structure interaction, 28th Internatiolan Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2013, 153-156.
- ⑦ Konno, A., Nakane, A., Kanamori, S., VALIDATION OF NUMERICAL ESTIMATION OF BRASH ICE CHANNEL RESISTANCE WITH MODEL TEST, 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC13), 2013.
- ⑧ Shigihara, T., Konno, A., Numerical simulation of ship collision with a single ice floe, second report: simulation with overset method, 29th Internatiolan Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2013, 187-190.
- ⑨ Matsuzaki, M., Konno, A., Numerical estimation of channel resistance with CCGS Terry Fox, 29th Internatiolan Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2013, 191-194.

- ⑩ Ogawa, Y., Konno, A., Investigation of flow simulation method for ship interaction with ice pieces, 29th Internatiolan Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2013, 195-198.

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・准教授
研究者番号：60322070

(2)研究分担者

松澤 孝俊 (MATSUZAWA, Takatoshi)
独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開発系・主任研究員
研究者番号：00443242

宇都 正太郎 (UTO, Shotaro)

独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開発系・グループ長
研究者番号：40358396