

機関番号：32613

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21760671

研究課題名 (和文) 氷海船舶の小氷片密集水路航行時抵抗評価手法の開発

研究課題名 (英文) Development of resistance evaluation method of ship navigating in brash ice channel

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

研究成果の概要 (和文)：小氷片密集水路を航行する船舶の抵抗評価手法を開発し、これを用いて流れ場の影響、水路の初期状態の影響等を評価した。その結果、流れ場の影響は顕著ではないこと、水路氷片を整列させた場合と乱雑に配置した場合では違いがあるものの、その違いは氷片の大きさに依存するため関係が明確でないことを見いだした。また氷片形状の影響を、球形及び立方体氷片の比率を変えることで調査し、その影響は顕著であるため実海域航行の評価に利用するためには適切な比率を与える必要がある。

研究成果の概要 (英文)：Numerical estimation method for ship navigation in a brash ice channel which is filled with small ice pieces is developed. The effects of flow field around the ship hull and the initial ice conditions against the ship resistance are investigated using the estimation method. As a result, it is observed that the effect of the flow field around the hull against the ship resistance is small. The effect of ice arrangements against the ship resistance is not negligible, and is not a simple relationship and depends on the size of ice pieces. The effect of shape ratio of spherical and cubic ice pieces is significant so that the appropriate ratio to represent the real brash ice channel should be investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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、推進・運動性能

1. 研究開始当初の背景

近年の原油価格の高騰を契機として、氷海域でのエネルギー資源開発が再評価されている。我が国近郊でも、1999年にオホーツク海北部のサハリン沖で石油・天然ガスの商業生産がはじまっている。これらのエネルギー資源を輸送する目的で、砕氷型あるいは耐氷型船舶への関心が高まっており、アイスクラスを保有する船舶も年々増加している。

砕氷船または耐氷型海洋構造物を設計するに際してその砕氷・耐氷性能を予測するためには、現時点では氷海試験水槽での模型試験がもっとも有効で現実的な方法だと考えられる。特に設計の最終段階では、船型模型を作成して実験し、その設計の有効性を確認する必要がある。しかし設計の初期の段階で、多くの設計パラメタに対して最適な値を見つけようとするときには、氷海試験水槽で

の模型試験は安易に実施できる方法ではない。現在、日本で稼動している氷海試験水槽は独立行政法人海上技術安全研究所が所有する水槽など数機関に限定される。また氷海水槽の実験では氷を張る必要があり、1枚の氷に対して実施可能な実験内容は限定されるなどの理由から、多数の実験を行うには時間的・予算的な制約を受ける。

開水中を航行する船舶の抵抗等の評価では数値解析が利用されるようになってきている。氷海を航行する船舶では上記のような実験上の制約があることから、数値解析による抵抗等の評価は開水中船舶以上に意義があると考えられる。しかし実際には氷海を航行する船舶の性能解析手法は、開水中での解析ほどに信頼できるとは言い難い。

このような数値解析による性能評価が求められている状況のひとつに、水路中に砕氷片が密集した小氷片密集水路 (brash ice channel) を航行する船舶の性能解析が挙げられる。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 (必ずしも砕氷船型ではない) が航行することが頻繁にある。brash ice channel 中を航行するときの抵抗は平坦氷中砕氷抵抗の約 80% となる場合があることが知られている。バルト海航行船舶の認証規則 (Finnish-Swedish Ice Class Rules、以下 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。

このルールでは数値解析での評価により認証を受けることも可能であるが、brash ice channel 中の抵抗評価手法の研究はほとんど行われていないのが現状である。これは brash ice channel 中の航行では、多数の氷片が周囲の氷片、氷板や船体および流体と相互干渉しながら並進・回転する現象が本質なので、これまで研究されてきた開水中での船体抵抗評価手法、または平坦氷砕氷時の評価手法が応用できないことが大きな要因である。著者は 2003 年から、船体周りの氷片運動の解析手法を研究・開発してきた。物理ベースモデリングと呼ばれる解析手法を適用し、船体まわりでの複数氷片の衝突と摩擦を伴う運動の解析を可能とした。これまでの成果として、単純形状船型模型を用いた模型実験との比較によりその正当性を確認しているほか、この解析手法に基づく船体抵抗の評価にも取り組み一定の成果を挙げている。

研究開始当初においては、それ以前に実施した解析での氷片の大きさが船幅の 1/10 程度、氷片数は数 1000 個までであったが、実際の brash ice channel では氷片の大きさが船幅の 1/100 程度のオーダーであり、氷片数は数万～数 10 万個を想定しなければならない。衝突点数および接触力解析時間は氷片数増加に対して指数的に増大するので、研究開

始以前での解析手法および計算環境では、実海域の状況を現実的な時間内に解析できていなかった。また、数値解析で与えるべき初期条件が不明確で、たとえば水路長さは水路幅の何倍程度取って解析すればよいかは明らかではなかった。また FSICR の最大船級である 1A Super の認証では、brash ice channel の上部に氷片が結氷した層 (consolidated layer) が存在する状況での抵抗評価を求めているが、開発したシミュレータは、この層を模擬する機能を有していなかった。

2. 研究の目的

本研究は上記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 航行時の抵抗を数値解析により評価する手法を開発することを目指とする。(1) マルチコア並列計算技術を応用することにより、数 10 万個の氷片がある水路での解析を可能とする。(2) 適正な解析条件の系統的探求。(3) consolidated layer のモデル化。

3. 研究の方法

氷片運動の解析のためには、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。本研究では物理ベースモデリングのライブラリである Open Dynamics Engine (ODE) 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。

本研究の目的のひとつに、氷荷重に対する流れ場の影響を検討することがある。この影響を詳細に調査するためには、理想的には流れ場と氷片運動との相互作用を含めた解析を行いたい。しかし流れ場と氷片運動との相互作用を含めた解析は非常に困難であり著者はその技術を有していない。また流れ場の影響の大小を検討するためには、詳細な相互干渉まで解析する必要はないと考え、本研究ではまず氷片が存在しない開水中航行を仮定して流れ場を解き、次にその流れ場の影響を取り入れた氷片運動解析を行う、という手順で解析している。氷片の存在は流れの運動量を散逸する方向にはたらくと考えられることから、上記の方法は流れ場の氷荷重への影響を過大に評価する可能性があるが、この

点に留意しつつ定性的な検討は可能であると判断した。

流れ場の解析にはオープンソースの数値流体解析ライブラリ OpenFOAM が提供する非圧縮定常ソルバ simpleFoam を用いる。なお船体後流流れ場の影響を定性的に検討することが目的なので、船体まわりのおおよその流れ場が再現できれば十分であると考え、格子の品質や乱流モデルの選択など、解析精度の厳密な検討は省略している。

本研究の解析では、船型として(独)海上技術安全研究所で開発された単純形状模型船型 B-063 (図 1) を用い、模型実験スケールの現象を数値的に再現する。この船型は実験用の単純形状模型で、図 1 に示すように六角錐台形状をしている。垂線間長は 3.04m である。船体両端のいずれも船首として実験に供することができるが、本研究では船首(図 1 の上面図、側面図で左側)を用いる。

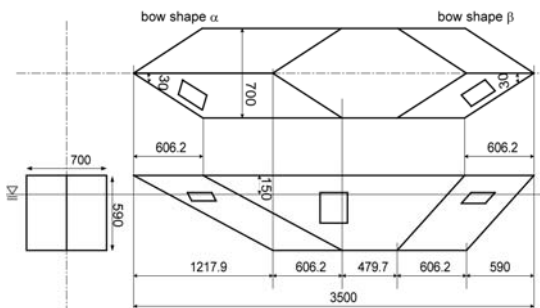


図 1 模型船 B-063 の形状

流れ場の解析では、格子数約 313 万の構造格子を用いて乱流・非圧縮・定常計算を行う。模型スケールを想定してレイノルズ数を 5×10^5 とし、乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いる。解析領域は(独)海上技術安全研究所の氷海船舶試験水槽に準じ、領域の幅を 6 m (ただし左右対称を仮定して 3 m のみ解析)、水深を 1.8 m としているほか、船体前方に 1 船長、後方に 2 船長 ($-3.5 \text{ m} < x < 10.5 \text{ m}$) の計算領域を取っている。なお、前述したように船体まわりのおおよその流れ場が再現できれば十分であると考え、格子の品質や乱流モデルの選択など、解析精度の厳密な検討は省略している。

自由表面の変形は無視し、流速の境界条件は水面を摩擦無し境界、流出は自由流出条件としている。圧力は水面で一定とし、それ以外の境界は対称境界を除いてゼロ勾配条件とする。

氷片挙動の数値解析は以下の仮定に基づいて行う。

1. 氷片と船体は剛体として取り扱う。その変形や破壊は考慮しない。
2. 模型船は定速で航行する。船体の動揺は考慮しない。また、水路を形成する左右の氷板は固定とする。氷片も初期状態

は静止とする。

3. 氷片には外力として重力と浮力に加え、単独氷片が高レイノルズ数領域で受ける流体力、すなわち抗力係数(定数) \times 前方投影面積 \times 動圧で表される流体力を与える。
4. 浮力は静水圧のみ考慮し、数値積分により求める。流れによる圧力の変動、および自由表面の変形による静水圧の変動は考慮しない。
5. 結氷層(consolidated layer)は存在しないものとする。物体同士は付着せず、接触時には摩擦(クーロン摩擦)および反力のみを考慮する。

氷片の抗力係数として、本研究では 0.4 を採用する。本研究で採用している氷片サイズ(実船スケールに換算すると約 1 m)と船速(実船スケールで約 5 ノット)を代表長さとするレイノルズ数は 10^6 のオーダーである。氷片の運動は船体の運動よりも遅いと考えられるので、レイノルズ数 $10^3 \sim 10^5$ の領域での球の抗力係数 0.4 を採用している。流れ場の解析では模型スケールを想定しているが、この場合でも球の抗力係数はほぼ変わらない。また前方投影面積 A は球の場合は適切な値を与えることができる。

立方体氷片については、抗力係数は球と同じ 0.4 とし、前方投影面積は、氷片の進行方向にかかわらず立方体の 1 面の面積とする。本研究の解析では氷片形状を球と立方体形状としているものの、実際の海域でこのような幾何学的な形状の氷片が多数あることは考えられない。したがって立方体の抗力係数や前方投影面積を正確に求めることで現実の状況をよりよく再現できるようになるわけではない。このため、流体力の代表値の意味で、球の抗力係数と立方体の面の面積とを採用している。

また本研究では流れ場の影響を調べるため、流れ場を考慮しない場合、および流れ場を考慮する場合の解析を行う。流れ場を考慮する場合には、動圧の計算時に前述した数値流体解析の結果から求めた局所流速ベクトルから船速を引いたベクトルを用いる。

解析に用いるパラメータとして、解析時間 20 s、時間刻み 0.01 s を選択する。水の密度は 1000 kg/m^3 、氷の密度は過去の研究と合わせて 950 kg/m^3 、反発係数は氷と氷、氷と船のいずれの衝突でもゼロとする。氷片同士の摩擦の摩擦係数は、過去の研究での検討に基づき 1.35 を与える。氷片と船体との摩擦係数は、Finnish Swedish Ice Class Rules の適用ガイドラインに従い、0.1 を与える。船速を $1 \text{ knot} = 0.514 \text{ m/s}$ とする。

また本研究では氷片を規則的に配置した条件と、本研究で開発した、氷片を不規則に配置した条件での解析を実施する。詳細な実

験条件は表1に示している。また水路幅はFSICRの適用ガイドラインでの模型実験条件を適用して1.394 mとする。なお解析プログラムを改良し、氷片数最大13万個程度までの解析を可能にしたことを付記する。

ケース	氷片	配置	個数	水路長さ
AR	大	規則	10000	12.095 m
AI	大	不規則	10000	12.069 m
BR	中	規則	80000	12.095 m
BI	中	不規則	80000	16.288 m
CR	小	規則	120000	5.644 m
CI	小	不規則	126000	5.251 m

4. 研究成果

まず図2に流れ場を考慮した場合としない場合との、氷荷重の差異を示す。

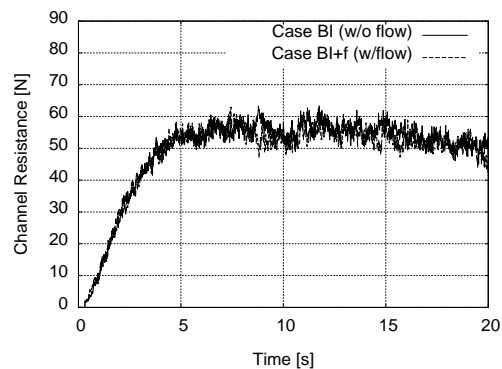
図から明らかなように、流れ場の考慮の有無によっては氷荷重はほぼまったく変化しないことが分かる。

氷片にはたらく流体力を与える式において、抗力係数を変化させると氷荷重が顕著に変化することが分かっている。具体的には抗力係数が大きいほど氷荷重は大きい。一方で今回の解析結果では、流れの影響が出やすいと考えられる流れ場と解析条件を用いたにも関わらず、氷荷重に明確な差異は観察されない。従って流体力の各氷片挙動への影響は大きいものの、流れ場を一様と与えるか、CFDで解析して与えるかによって氷荷重が変化するわけではないということが分かる。

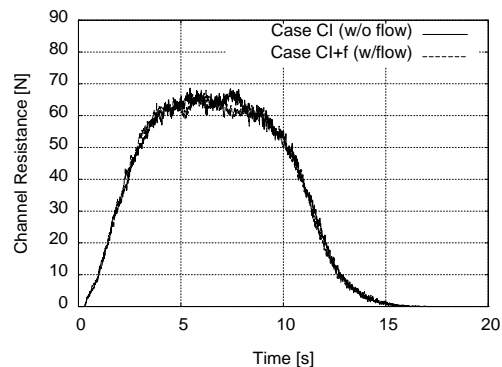
次に図3に、氷片配置の違いによる氷荷重の差異を示す。

この図から、氷片が大きい場合 (Case AR, AI) には氷荷重の違いは顕著であり、氷片を規則的に配置した方が氷荷重が大きいことが分かる。しかし Case BR と BI においてはその差は小さくなっており、また Case CR と CI においては力関係が逆転し、不規則配置のほうが規則的配置の場合よりもわずかながら氷荷重が大きいという結果となっている。この結果を得た原因を解明できていないが、氷片が十分に小さい場合には規則的配置と不規則配置との違いは小さいことが予想される。

図4に、水路遠方での氷片運動の拘束 (先詰まり) の有無による、氷荷重の差異を示す。先詰まりがある解析条件では、水路遠方に壁を設置し、氷片がその壁よりも遠方には移動できないようにすることで、先詰まりと同じ効果を実現している。またこの解析においては規則的氷片配置 (Case BR, CR) を用いて



With medium ice pieces



With small ice pieces

図2 流れ場の有無による抵抗の違い

図から明らかなように、拘束の有無による氷荷重の差異はほとんど観察されない。小さい氷片を用いた場合 (Case CR) の場合は時刻 11 s ~ 12 s のときに氷荷重が急上昇するが、これは船体が水路遠方の壁の近傍まで到達した場合である。それ以前、具体的には時刻 10 s までは氷荷重にほとんど差がない。このことから、Case CR の場合を除き、現在解析に用いている水路長さは氷荷重の評価に利用するためには十分に長く、先詰まりの有無による差が出ないと考えられる。

一方で図3、4から、氷荷重は解析開始から5秒程度でおおよそ最大に達し、その後わずかながら減少していることが分かる。他の解析ケースから、水路長さをこれよりも長くした場合にも最大値はほとんど変化しないことが分かっている。従って水路長は現在の解析で用いている長さ (船長の3倍程度) で十分であると考えられる。

図5に氷片の形状分布を変えた場合の氷荷重の差異を示す。解析には不規則配置 (Case AI, BI) を使い、それぞれの場合において球形氷片と立方体氷片の個数比を7:3、5:5、3:7と変えた場合の、それぞれの氷荷重を示している。

このように球形氷片と立方体氷片の個数を任意に設定できるのは、本研究において不規則配置を可能としたためである。規則的配

置では任意の個数比を設定することは難しいと考えられる。また特に立方体氷片の割合を増やした場合、氷片を規則的に整列させると氷が互いに面接触することになるのでますます非現実的になるであろう。

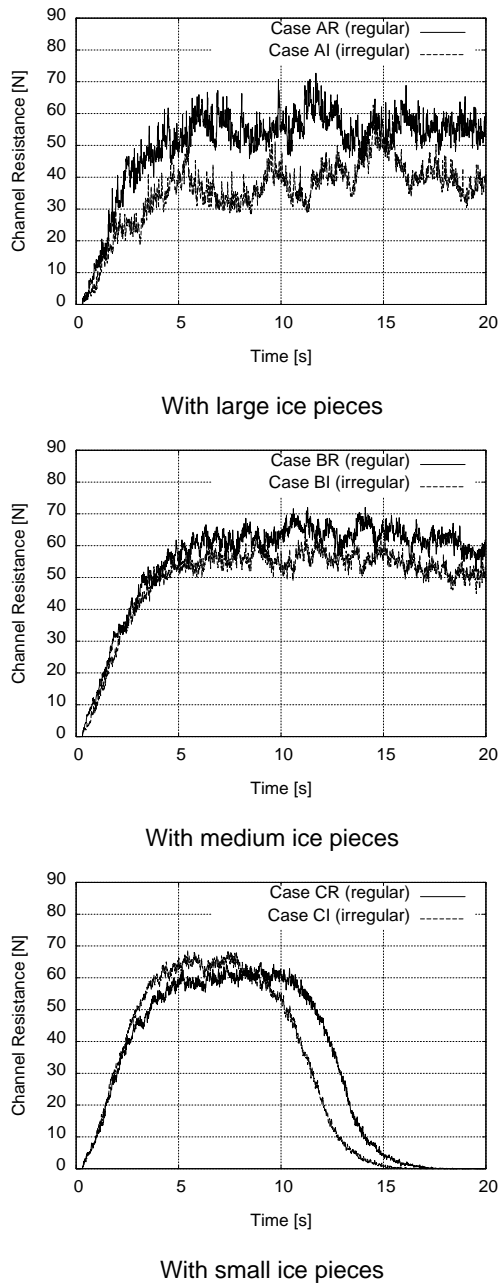


図3 氷片配置方法による抵抗の違い

図5から、氷片の形状分布（個数比）は氷荷重に大きく影響することが分かる。球形氷片が多い場合は氷荷重が大きく、立方体氷片が多いと氷荷重は小さい。Case AI, BI いずれの場合でも、球形氷片：立方体氷片の比が3:7の場合と7:3の場合とで2倍程度異なる。

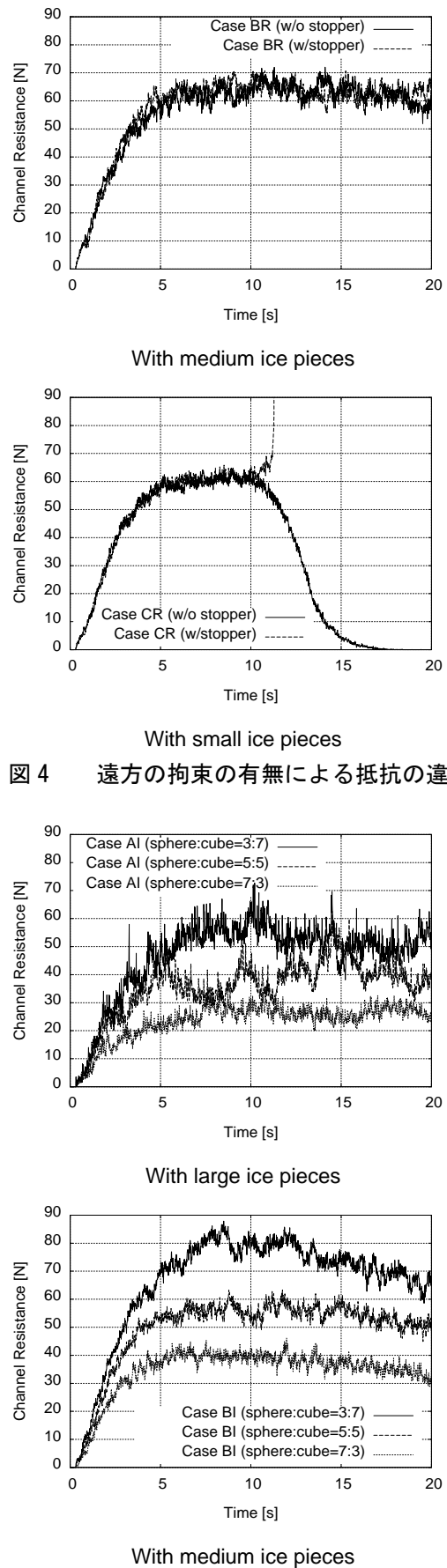


図4 遠方の拘束の有無による抵抗の違い

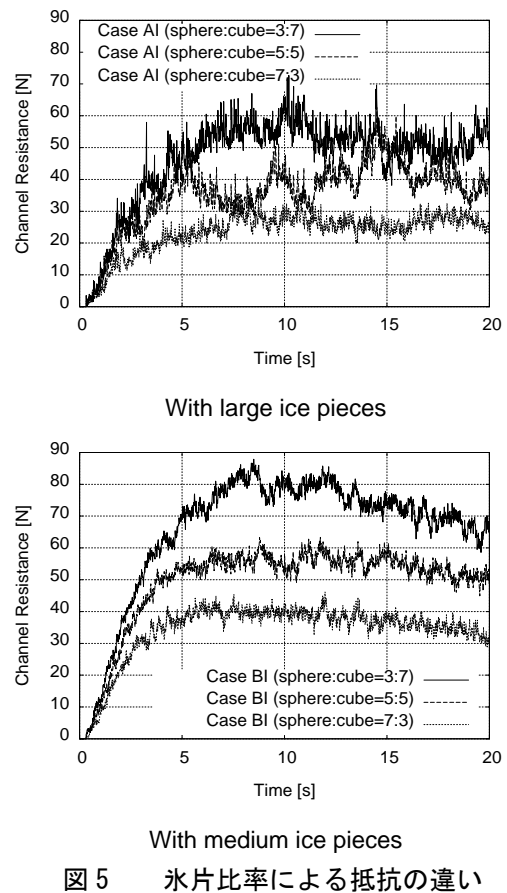


図5 氷片比率による抵抗の違い

著者らの解析は、規則的氷片配置で個数比が 5:5 の場合に氷荷重（チャンネル抵抗）を FSICR の評価式と比較して 2 倍程度過大評価することが過去の研究から分かっている。本研究の結果を敷衍すると、個数比を適切に調節することで、FSICR の評価式と同程度の解析精度を実現できる可能性がある。

本研究で残された課題として、まだ特定の船型のみでの解析しか行っておらず、今後の解析の積み上げが必要である。また氷片の形状分布や流れ場の解析精度の検討も十分ではない。加えて、研究当初は結氷層（consolidated layer）の数値解析への取り込みを計画していたが、十分なデータを得られず適切なモデルを設定できなかった。これらは今後の課題である。

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 3 件）

- ① 金野祥久、齋藤耕、船舶のチャンネル内氷片排除能力の数値シミュレーションによる推定（第 3 報：氷片排除能力に対する氷片配置と垂線間長の影響）寒地技術論文・報告集 Vol. 25, 2009, pp. 202-206
- ② 金野祥久、吉本和弘、物理ベースモデリングに基づく brash ice channel 航行船舶の抵抗評価手法の開発、日本船舶海洋工学会論文集 Vol. 10, 2009, pp. 49-56
- ③ 金野祥久、船舶のチャンネル内氷片排除能力の数値シミュレーションによる推定（第 4 報：氷片排除能力に対する船体周り流れ場の影響）、寒地技術論文・報告集 Vol. 25, 2010, pp. 202-206

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① Akihisa Konno, RESISTANCE EVALUATION OF SHIP NAVIGATION IN BRASH ICE CHANNELS WITH PHYSICALLY BASED MODELING, 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions 2009, CD-ROM
- ② Akihisa Konno and Osamu Saitoh, Preparation method of numerical ice channel and its evaluation for simulation of navigation in ice, Proceedings of The 25th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2010, pp. 154-159
- ③ Yuuki Watanabe and Akihisa Konno, Investigation of effect of flow and channel condition against brash ice channel resistance, Proceedings of the 26th International Symposium on

Okhotsk Sea & Sea Ice, 2011, pp. 103-109

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

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