

砕氷船の性能評価を目的とした 船体周り氷片拳動シミュレータの開発

正員 金野祥久*1 水城 崇*2
 山本敬介*3 安木正樹*4
 若生大輔*5 正員 瀧本忠教*5
 金田成雄*5 下田春人*5
 正員 泉山 耕*5

Development of motion simulator of ice pieces around ship hull for evaluation of icebreaker performance

by Akihisa Konno, *Member* Takashi Mizuki
 Keisuke Yamamoto Naoki Yasuki
 Daisuke Wako Tadanori Takimoto, *Member*
 Shigeo Kanada Haruhito Shimoda
 Koh Izumiyama, *Member*

Summary

To estimate the performance and risk of an icebreaker, we are developing a numerical simulator for icebreaker performance under conditions that many ice pieces colliding and scraping against the icebreaker hull. Open Dynamics Engine (ODE) is incorporated into our simulator to allow the use of physically based modeling to illustrate these mutual interactions. We carry out pre-sawn ice test in the ice model basin of National Maritime Research Institute, and compare its result with simulation results to verify the numerical method. In the simulation, virtual fluid force acts on each ice piece to reproduce ship advance. Buoyancy with static pressure is also considered. Coefficient of restitution is set to zero and friction coefficient between ice pieces is set to 1.35. Ice motion in the simulation generally agrees with the experimental results. Appropriate relaxation parameter for virtual fluid force is investigated.

1. 緒言

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、日本で稼働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。特に、小氷片密集水路 (brash ice channel) 中の航行性能の評価に関しては、著者らが調査した範囲では数値解析手法の研究がほとんど行われていないのが現状である。氷片密集水路中であっても、全密接氷域に近い状況での抵抗は平坦水中砕氷抵抗の約80%となる場合があることが知られており¹⁾、Finnish-Swedish Ice Class Rules²⁾では brash ice channel での機関動力の評価が義務づけられている。

*1 工学院大学工学部

*2 工学院大学工学部 (現所属: いすゞ自動車 (株))

*3 工学院大学工学部 (現所属: 日産ディーゼル工業 (株))

*4 工学院大学工学部 (現所属: (株) 日本テクニード)

*5 独立行政法人海上技術安全研究所

著者のグループは brash ice channel 中の船舶航行性能を数値解析により評価する方法を提供することを最終的な目的とし、これまで特に船体周りの氷片運動の解析に関する研究に取り組んできている。

本論文ではこの研究の現段階までの成果として、船体周りを流れる氷片の、船体や氷片同士の衝突と摩擦を含む運動を解析する手法について報告する。この解析手法を検証するために模型実験を行い、特に氷片挙動に着目して比較、検討する。氷片挙動に着目している理由は、この挙動を数値解析で再現できることが brash ice channel 中での船体水荷重や砕氷抵抗を数値解析するための必要条件だからである。

本報告に先行する著者らの研究では、2006年の論文^{3,4)}で物理ベースモデリングを用いた解析手法について報告している。2007年の論文^{5,6)}では本論文で報告する解析と同じ模型実験の再現を試みている。本論文との違いとして、これらの論文当時の数値解析では摩擦係数の検討が不十分であったために恣意的に摩擦係数を設定していたこと、模型実験では存在している氷片を上流から押す壁を配置せず流体力のみで氷を下流に動かしていたことが挙げられる。他のグループによる複数氷片の運動を取り扱った研究としては、Matsuzawa らが2次元の個別要素法を流氷運動の解析に適用している⁷⁾。また、Lau らは個別要素法を砕氷現象に適用して砕氷船の操船性能を解析した例⁸⁾を報告している。この例は主に砕氷現象を解析対象としており、砕氷後の氷片挙動に焦点を当てたものではない。ただし Lau らの解析は DECICE というペナルティ法ベースの個別要素法ソフトウェアを用いており、著者らと同様の条件での解析が可能と思われる。

2. 解析手法および解析条件

2.1 模型実験

本研究では数値解析の検証を目的とし、pre-sawn ice test を実施している。説明の都合上、はじめにこの検証実験について述べ、その後に数値解析について説明する。

pre-sawn ice test は氷板を砕氷片を模した形状に切り出して配置し、密接度 100% の水路を作成し、そこに模型船を曳航する試験である。この試験の本来の目的は砕氷船の抵抗から砕氷による抵抗成分を取り除いたものを知ることだが、今回は数値解析の検証を目的として行う。

本実験は Izumiyama and Uto⁹⁾に述べられた pre-sawn ice test の実験手順に従って行う。本実験は数値解析の検証を目的とした実験なので明確な縮尺は定めていないが、実海域のおおよそ 25 分の 1 のスケールを想定して実験条件を決めている。

模型船としては独立行政法人海上技術安全研究所の模型船型 B-063 を用いる。これは砕氷実験用の単純形状模型で、Fig. 1 に示すように六角錐台形状をしている。船体は透明なアクリル樹脂製で、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、今回の実験では船首 α を用いる。(水線角 30° 、開き角 45° 、船首傾斜角 30°)

実験は海上技術安全研究所の氷海船舶試験水槽(長さ 35 m、幅 6 m、深さ 1.8 m)にて行う。この水槽に厚さ 40 mm を目標として氷板を作成する。なお、実験後に実際の氷厚と氷密度を測定する。模型氷には微小気泡を水中に取り込んだ CD (Controllable Density) 氷¹⁰⁾を用いることで氷板の強度と視認性の向上を図る。氷板の強度とヤング率は計測しない。

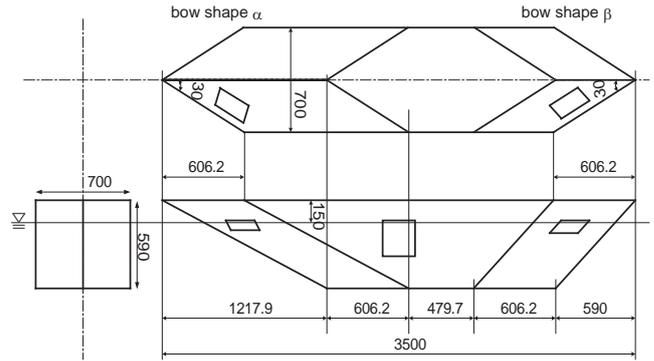


Fig. 1 Structure of model ship B-063

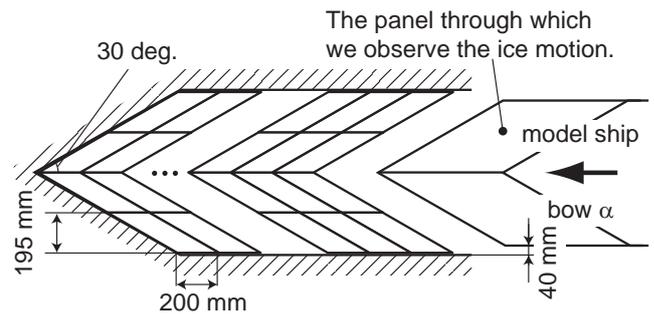


Fig. 2 Schematic of presawn ice test. 45×4 parallelepiped ice pieces are placed in the channel.

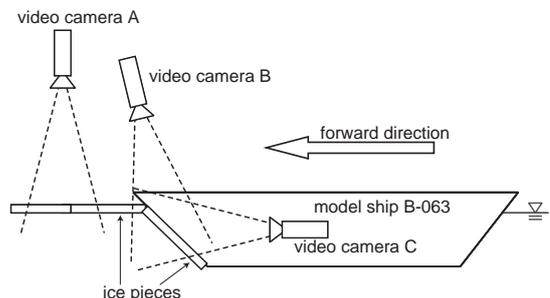


Fig. 3 Schematic of positions and angles of video cameras in model experiment

この氷板に、Fig. 2 に示す平行四辺形の氷片ができるように切れ目を入れる。これは、模型船の平行部に左右舷それぞれ氷片 1 枚分のすきまが空くような幅(船幅 + $2 \times$ 氷厚 = 780 mm)の水路を作るためである。平行四辺形の鋭角の角度は、模型船の水線角 30° に合わせる。氷片は排除せずに切り出した位置に止めることで、密接度 100% の状態を作る。

氷片の配置後、模型船 B-063 を曳航して氷片の運動を観察、記録する。模型船の曳航速度は 0.304 m/s とする。

本研究では氷片挙動の比較によって解析を検証するので、ビデオカメラを用いて氷片の挙動を撮影する。Fig. 3 に示すように 3 台のビデオカメラを配置しているが、今回の実験では氷片全体の挙動の観察にはカメラ B を、氷片の位置測定にはカメラ C を用い、船体内部から氷片運動を観察する。カメラ C で観察された映像の例を Fig. 4 に示す。

このような映像から船首部のアクリル板の位置に対する氷片位置を計測し、ここから氷片位置を求める。具体的には、ビデオ

映像から船首右舷のアクリル板 (Fig. 2 中に示す。以降「船首パネル」と呼ぶ) 上の位置を特定し、その映像から Fig. 5 に示すような座標変換関数を、画面に映る氷片の辺々の長さの誤差を最小にするように最小 2 乗法を用いて定める。この変換関数を用いて画面上の位置から船首パネル上の位置を算出している。本来は映像上にスケールを写し込み、それを元に変換を行うべきであるが、実験の不備からこれを行わなかったために、上記のような手法で作成している。したがって変換結果にある程度の誤差があることは避けられない。特に、長さが合うように係数を決定しているため、絶対座標に誤差が入ると考えられる。

2.2 数値解析手法—物理ベースモデリング

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。また砕氷片は三日月状またはそれがさらに割れた形状¹⁾、船体も介在するので、任意形状の複数物体同士の衝突、摩擦を伴った運動を取り扱う手法に依らなければならない。

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^{11, 12)}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 (主に剛体) 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。

物理ベースモデリングでは物体を剛体、または剛体を何らかの拘束で結合したものとして取り扱う。その基本的な考え方は、以下の計算を繰り返し適用することで、多数の物体の相互干渉を含めた運動を計算することにある。

1. 物体同士の接触 (衝突を含む) を判定し、接触点を割り出す。
2. 接触を含む拘束条件を解き、拘束力を求める。衝突であれば衝突点に作用する力積を、接触であれば垂直応力と摩擦力とを求める。
3. 上記の拘束力と外力 (重力、流体力など) を含めた運動方程式を積分し、物体の運動を求める。

上記の項目 1 (衝突判定)、2 (拘束力計算) のいずれも異なる研究グループによって研究が進められており、有力なアルゴリズムが開発されている。この手法はコンピュータグラフィックスやゲームプログラミングの分野で、映像の本物らしさを向上させることを目的として研究されてきた。近年、工学領域のシミュレーションにも使われるようになったこともあり、研究が急速に発展している分野の一つである。

なお同様の解析手法に多体力学 (Multibody Dynamics) と呼ばれる手法がある¹³⁾。こちらの手法は主に機構設計の分野で用いられており、ADAMS, DADS など著名なパッケージソフトウェアが開発され広く利用されている。この手法の基本的な考え方は、運動方程式に拘束条件を組み込んで新たな方程式系を作り、それを解くことで物体の運動を捉えることである。このためたとえばヒンジやジョイントのような、多体力学用語で言う「滑らかな拘束」を得意としている。一方、物理ベースモデリングの手法は衝突や摩擦など緩やかな拘束を得意としている。本研究で対象とする砕氷現象では衝突や摩擦が支配的なので、物理ベースモデリングの手法が適していると判断し、この手法を採用する。

2.3 数値解析条件

本研究の数値解析では上記解析手法で 2.1 で述べた模型実験を再現する。具体的には、物理ベースモデリングのライブラリである Open Dynamics Engine (ODE)¹⁴⁾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。

解析条件は模型実験の条件に合わせる。氷片はすべて同一形状で、Fig. 2 に示す形状の平行四辺形柱とする。初期配置も Fig. 2 に示すとおりである。船体は模型船型 B-063 に合わせる。模型実験と数値計算との差異は以下の点である。

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。
なお、後で述べるように実験では一部の氷片に割れが見られるものの、このような例は限られることから、数値解析で氷片を剛体として取り扱い実験と比較することは問題ないと判断している。
2. 数値解析では水路幅を模型実験より広く 800 mm としている。また初期状態では氷片間の隙間が 4 mm になるように配置している。これは数値計算の安定のためである。
3. 模型船は固定し、船体の運動は考慮しない。そして氷片に外力として以下の式で示される力 (これ以降「仮想流体力」と呼ぶ) を与えて運動させる。

$$\mathbf{F}_v = -\alpha_r \cdot \frac{m}{\Delta t} (\mathbf{v} - \mathbf{v}_f).$$

ここに m は氷片の質量、 Δt は数値解析の時間刻み、 \mathbf{v} は氷片の移動速度、 \mathbf{v}_f は想定する仮想流速ベクトルである。 α_r は緩和係数で、 $\alpha_r = 1$ のときは数値計算上 1 タイムステップで氷片の流速を \mathbf{v}_f に修正するように仮想流体力を作用させることを意味する。実際の数値計算では $0 < \alpha_r < 1$ の範囲で与え、氷片運動の安定性を調整する。

4. 浮力は静水圧のみ考慮する。(流れによる静圧の変動を考慮していない。)
5. 母氷板 (水路左右および氷片の前方 (模型船から遠い方向) の固定氷板) を、4 つの直方体氷板で模擬する。これらは氷片と同じ初速度で下流方向に移動させる。これは水路を構成する氷板が氷片に与える影響を実験に合わせることを意図している。なおこれら氷板は一定速度で動かし、氷片の衝突に起因する外力による運動や変形は考慮しない。

本論文で報告する数値解析では、仮想流速 \mathbf{v}_f は模型実験に合わせ、計算領域内のすべての点で模型船の進行方向と逆向きに $\mathbf{v}_f = 0.304 \text{ m/s}$ と与える。氷片の初速度も同じ値を与える。弾性係数はゼロとする。また時間刻み $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ とする。氷厚および氷密度は、実験時の計測結果に基づきそれぞれ 38.7 mm、 914 kg/m^3 とする。

緩和係数 α_r は 0.2, 0.02, 0.002 の 3 通りの計算を行い比較する。時間刻みを $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ としていることから、上記の緩和係数はそれぞれ時間 0.05 s, 0.5 s, 5 s の間同じ力がかかり続けた場合に氷片の移動速度が仮想流速と等しい速度になるような仮想流体力を与えることを意味する。 $\alpha_r = 0.2, 0.02, 0.002$ の計算条件をそれぞれ Case A, B, C と呼ぶことにする。

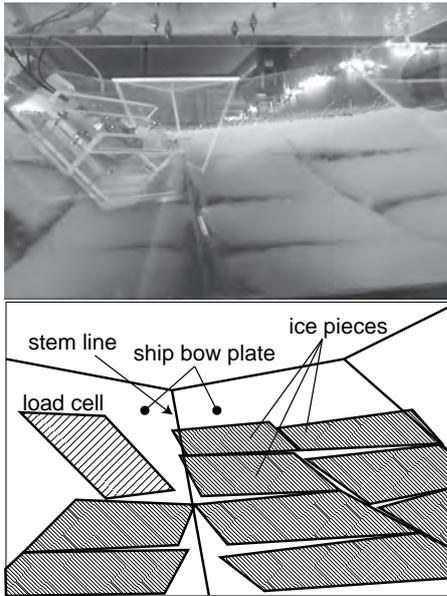


Fig. 4 An example of video image of experiment and its illustration. This image is taken by the video camera C shown in Fig. 3. The load cell shown in this figure is not used in the experiment.

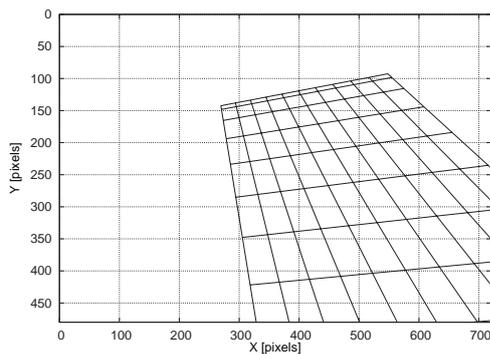


Fig. 5 Schematic of mapping function from the position on images to the position on the panel. The panel is divided into 10×10 parallelograms which are assumed to be congruent each other in the real scale.

2.4 摩擦係数の設定

本研究で数値解析に用いている ODE は、剛体同士の摩擦力として Coulomb 摩擦を与えることができるので、本研究でもこれを用いる。この節では摩擦係数の設定について検討する。

本研究では水路中氷片を対象としているが、砕氷片同士の摩擦係数を計測した例が著者らの調査の範囲では見つからなかったため、ridge keel の摩擦係数の計測結果を利用することにする。具体的には、Karulin and Karulina¹⁵⁾ および Matsuo et al¹⁶⁾ の報告を参照する。

Karulin and Karulina¹⁵⁾ は実験結果に基づき、Mohr-Coulomb 破壊基準の内部摩擦角を 54° と設定している。これは摩擦係数 1.38 に相当する。Matsuo et al の報告¹⁶⁾ では内部摩擦角が明確には報告されていないが、論文中的数据から読み取ると湿潤環境下での氷片同士の摩擦係数は 1.31 である。

これらの結果を参考にすると、摩擦係数には 1.3~1.4 の値を与えるのが適当だと考えられる。そこで本研究の解析では摩擦係数を 1.35 とする。

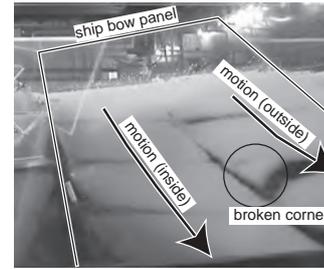


Fig. 7 An illustration of motion of ice pieces in experiment, on the basis of the image of Fig. 6, time = 20 s.

なお、本解析では pre-sawn ice test の数値解析による再現を目指しているため、Mohr-Coulomb 破壊基準の粘着力に相当する力は無視してよいと判断している。

船体と氷との間での摩擦係数は 0 とする。Finnish-Swedish Ice Class Rules の適用ガイドライン¹⁷⁾ では、模型実験での船体-氷間の摩擦係数として 0.05~0.1 が通常与えられるとしているが、本解析ではアクリル樹脂製の模型船を用いるので、より小さい値が適切だと考えたために上記の値を採用している。

3. 実験・解析結果および考察

3.1 模型実験結果

Fig. 6 に模型実験における氷片の映像を示す。この映像は Fig. 3 に示したカメラ B およびカメラ C の映像で、同時刻のものを左右に並べてある。

これらの映像から分かるように、氷片はほぼ同じパターンで動いている。具体的には、船首に衝突後にまず船首に接している辺が押し下げられ、氷片上面と船首前面とが接するまで回転する。その後、右舷側の氷片であれば反時計回り（船体内側から見て）に回転しつつ、Fig. 7 に示すように船首のパネルに沿って押し下げられながら徐々に船側方向に移動する。水路中央寄りの列の氷片と外側の列とでは氷片の軌跡が異なるが、それぞれの列では氷片の軌跡、回転の様子などはほぼ同じで、氷片の初期位置による差は明確には見られない。

また、特に外側の列の氷片では Fig. 7 に見られるように内側の鋭角の角が折れているのが散見される。それ以外の氷片の割れや変形は観測範囲内ではほとんど見られない。また、映像の範囲内では角が折れた氷片と折れていない氷片とでは挙動の差は見られない。氷片同士の接触点の移動、つまり滑りもほとんど観察されない。

3.2 数値解析における氷片挙動の観察と緩和係数の影響

Fig. 8 に数値解析による氷片の運動の例を示す。この例は Case A での氷片運動を表している。

氷片の挙動を観察すると、氷片は他の氷片と互いに干渉し合いながら運動し、船体と衝突してからは船首パネルに沿って移流する。氷片同士の滑りも観察されない。これらの挙動は前節に示した模型実験と定性的に一致している。このことから、解析手法や係数の設定などは妥当だと考えられる。（流体力の緩和係数については以下で議論する。）

模型実験では氷片挙動がそれぞれの列ごとでおおよそ等しいこと、および模型実験と数値解析とで氷片挙動が定性的に一致することから、氷片の代表点の軌跡を用いることで定量的な比

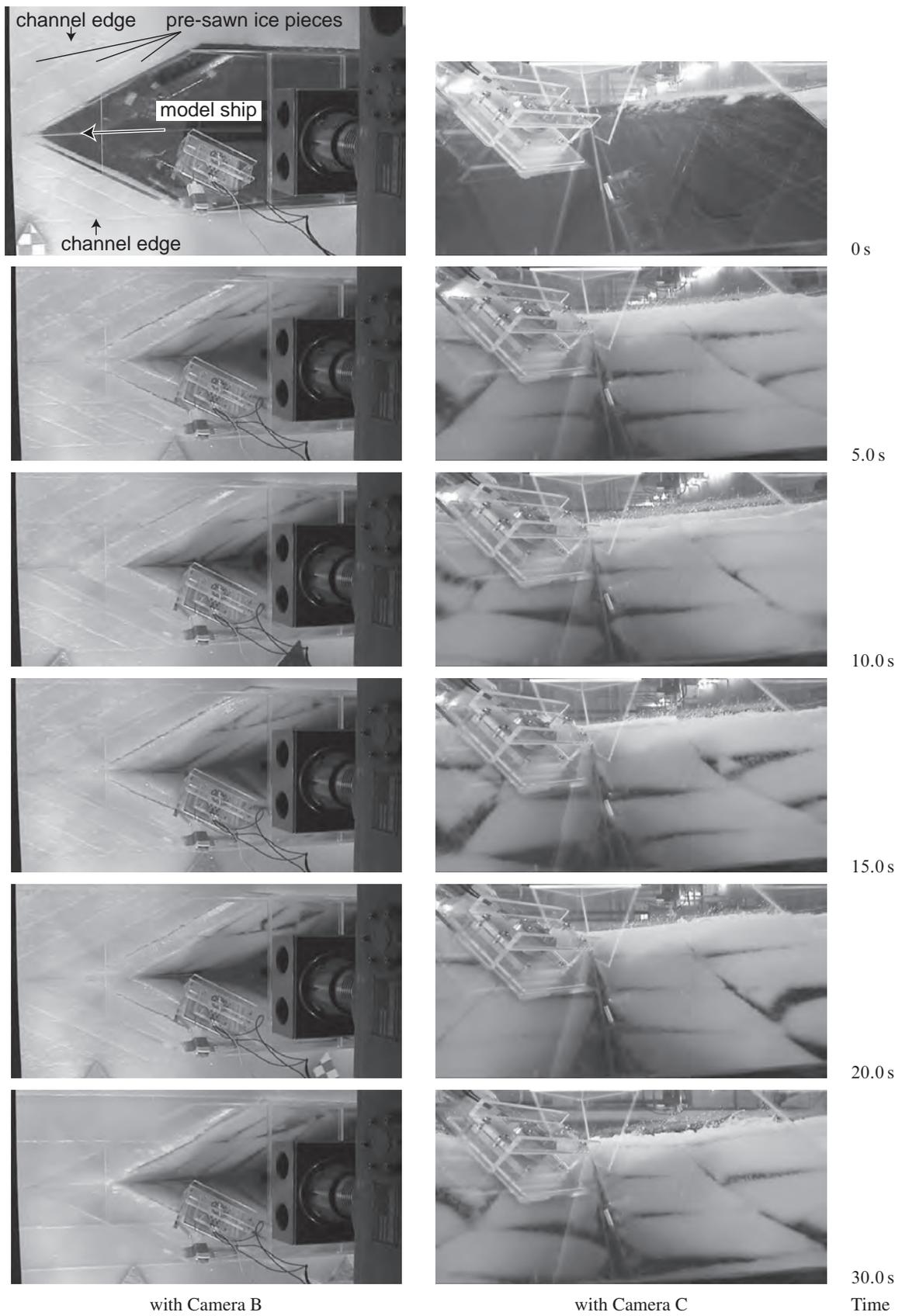


Fig. 6 Motion of ice pieces colliding against the model ship in experiment

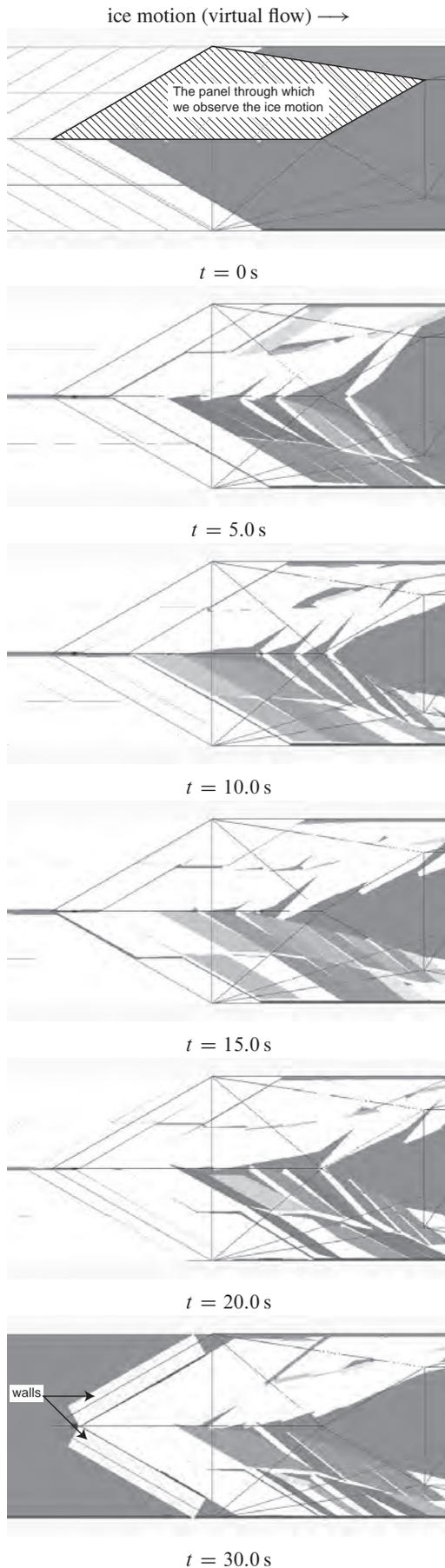


Fig. 8 Motion of ice pieces colliding against the model ship in numerical simulation. Case A. Top view

較が可能だと考えられる。そこでこれ以降では、船首右舷側に衝突する氷片の中心（重心）位置を船首パネルに投影した点を調べ、この点の軌跡を比較、検討する。

模型実験との定量的な比較に先立ち、氷片挙動の緩和係数および初期氷片位置に対する依存性を調査する。Fig. 9～11に、それぞれ Case A, B, C における、船首右舷側に衝突する氷片の挙動を示す。図中の平行四辺形が船首パネルを、曲線が氷片中心の軌跡を表している。氷片は進行方向に 45 個配置しているので、中心線寄りの氷片に関しては 15 個ずつに分け、図中 (a)～(c) にそれぞれ表示した。なお外側の氷片については 45 個すべての軌跡を (a)～(c) に表示してある。

模型実験結果の解析と比較する都合から、氷片が船首パネルに衝突し、氷片の平行四辺形部の面と船首パネルの面とがおおよそ平行になった条件のみを抽出して表示する。具体的には、氷片の中心から船首パネルまでの距離が $1.4 \times T/2$ (T : 氷厚) となっているときの氷片位置のみを表示している。

これらの図から、緩和係数が Case A ($\alpha_r = 0.2$) と比べて Case B ($\alpha_r = 0.02$)、Case C ($\alpha_r = 0.002$) では氷片の横方向（図中では上方向）への移動が大きく、また氷片の軌跡のばらつきも大きくなっていることが分かる。図中の線の本数が Case B, C (特に Case B) で少なく、Case C ではパネルの途中で線が途切れているものが散見される。これは船首パネルに沿って流れない氷片が増えるためである。

前節で述べたように、模型実験での氷片の軌跡はおおよそ一定しておりばらつきは小さい（後に Fig. 12 にも示す）。また氷片は船首パネルに沿って流れるものがほとんどである。従って、本研究で解析した条件の中では Case A ($\alpha_r = 0.2$) が模型実験の条件をもっともよく再現していると考え、これ以降では Case A を模型実験と比較することにする。

本研究では密度 100% の状況を数値解析によって再現しているが、この条件下では氷片はほぼ常に他の氷片と接しており運動の制限を受けている。したがって氷片の運動はその形状や初期配置などの影響を強く受け、流体力の影響は相対的に小さいと考えられる。にもかかわらず緩和係数の違いによって氷片の軌跡にははっきりとした差が観察されることから、氷片の挙動解析に対する流れ場解析の重要性が示唆される。

Case A の (a)～(c) を比較すると、中心線寄りに配置された 45 個の氷片のうち、はじめに船体と衝突する 15 個、中間の 15 個、および最後の 15 個の間での軌跡の違いは、それぞれの氷片の軌跡のばらつきに比べて小さいことがわかる。

3.3 模型実験と数値解析での氷片挙動の比較

数値解析と模型実験それぞれで観察された氷片位置を Fig. 12 に示す。数値解析での氷片挙動は、Fig. 9 (b) に示した、Case A の中間 15 個の氷片の挙動を表示している。模型実験での氷片位置は、ビデオ映像から氷片の中心位置が特定できたもののみについてプロットしている。また模型実験での氷片位置が 1200 mm 以降で観察されないのは、映像にその位置までしか映っていないからである。

この結果から、以下のことが分かる。

1. 前節で述べたように氷片挙動の定性的な傾向は互いに一致している。衝突して下方（図中では右方向）に押し込まれつつ、徐々に右舷船側（図中では上方向）に移動していく様子がとらえられている。その傾きもよく一致している。

2. 数値解析での氷片は、模型実験の結果よりも約 250 mm 高い位置で（早く）船首パネルに接するよう見える。これは 2 つの理由が考えられる。ひとつは観察上の都合から、氷片が船首に接触しているか否かの判定が困難なので、確実に接していると思われる氷片のデータのみを抽出していることが挙げられる。もうひとつは、氷片が船首パネルと面接触するためには間にある水の排除を要するが、数値解析では排除される流体について考慮していないことが挙げられる。
3. 数値解析での氷片は、模型実験の結果よりも約 50 mm 内側に衝突している。これは主として模型実験結果の観測の誤差が原因だと考えられる。本研究では第 2.1 節で述べたように、ビデオ映像から 2 点間距離をなるべく正確に再現するように座標変換を構成している。このため絶対座標の測定に誤差があると考えられ、この誤差がずれの原因として挙げられる。
4. 模型実験と数値解析とのもうひとつの違いとして、3.1 で述べているように模型実験では平行四辺形氷片の鋭角な端部が欠けているのが観察されている。数値解析では氷片を剛体でモデル化しているため、角が欠ける現象を再現できない。

模型実験では、観察した映像の範囲内では角が折れた氷片と折れていない氷片とで挙動の差は見られない。従って氷片を剛体でモデル化していることによる解析結果への影響は小さいと考えられる。しかし厳密には、角が欠けるために模型実験では内側の列の氷片が船側方向にわずかが動きやすくなっているはずである。この点も模型実験結果と数値解析結果の差の原因として挙げられる。

上記の問題のうち、画像解析の精度が低いのは実験方法に依存する問題点であり、再実験によって結果の信頼性を向上させることが可能だと考えられる。また数値解析側の問題点は主に流体力の考慮の不備によるものと思われ、解析手法の拡張が今後の課題となる。

4. 結 言

本論文は、brash ice channel 中の船舶航行性能を数値解析により評価する方法を提供することを最終的な目的とする研究の現段階の成果として、pre-sawn ice test における船首部付近での氷片挙動の観察結果を用いた数値解析の検証について報告するものである。適当な摩擦係数を文献により調査し、また仮想流体力の緩和係数の設定について検討している。数値解析における氷片挙動は模型実験と定性的に一致する。定量的にもある程度まで一致しているが、詳細に評価すると氷片上面が船体に接する位置が実験よりも高いことや軌跡が実験よりも内側寄りになっていることが分かる。これは流体の挙動を数値解析で無視していることに加え、実験での氷片挙動の観察方法に不備があったことが原因として挙げられる。

将来的な課題として、流体力のより厳密な考慮、brash ice channel 中船体氷荷重および抵抗の評価などに今後取り組む予定である。

本研究の一部は造船学術研究推進機構・平成 18 年度の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

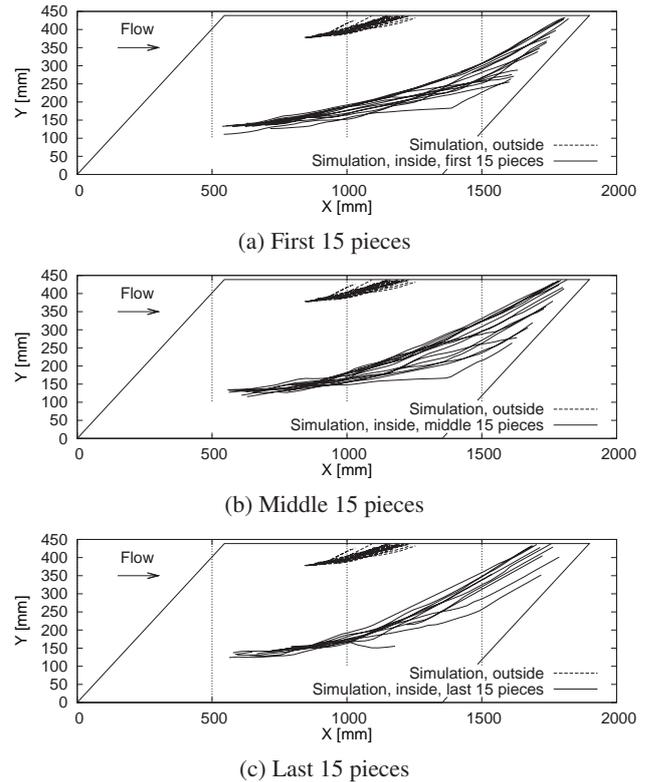


Fig. 9 Path of the center of ice pieces in simulation, projected on the panel of the ship bow that is shown in Fig. 2. Case A ($\alpha_r = 0.2$)

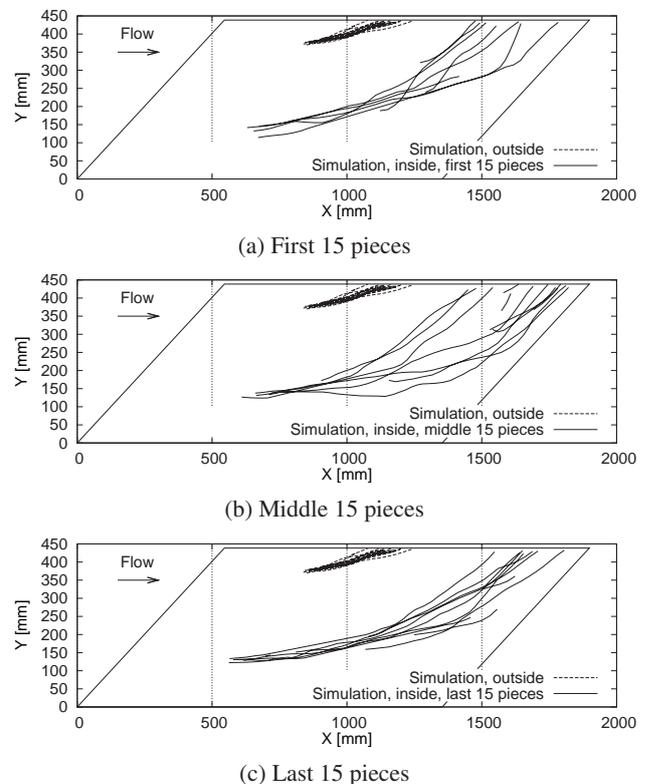


Fig. 10 Path of the center of ice pieces in simulation, projected on the panel of the ship bow that is shown in Fig. 2. Case B ($\alpha_r = 0.02$)

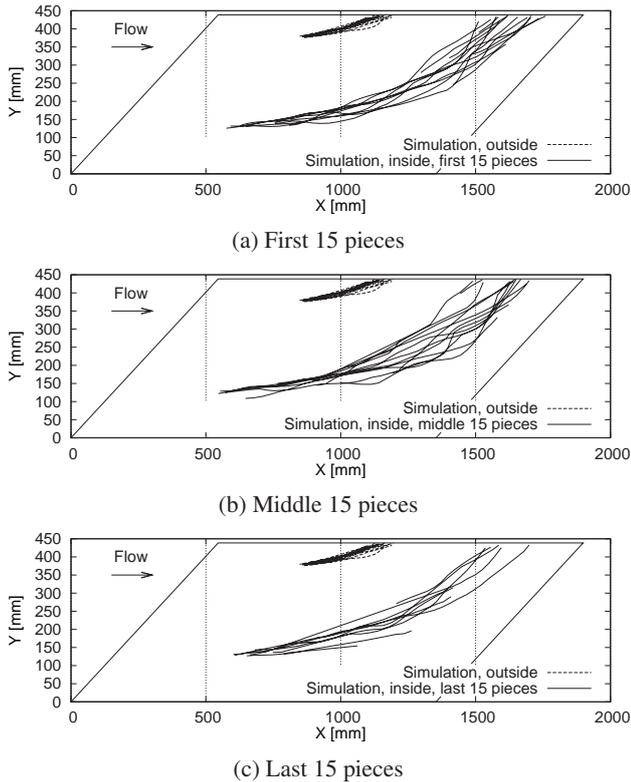


Fig. 11 Path of the center of ice pieces in simulation, projected on the panel of the ship bow that is shown in Fig. 2. Case C ($\alpha_r = 0.002$)

参考文献

- 1) 野澤和男：氷海工学—砕氷船・海洋構造物設計・氷海環境問題—，成山堂書店，初版（2006）。
- 2) Finnish Maritime Administration: Finnish-Swedish ice class rules, Finnish Maritime Administration Bulletin No. 13/1.10.2002 (2002).
- 3) A. Konno and T. Mizuki: On the numerical analysis of flow around ice piece moving near icebreaker hull. second report: application of physically-based modeling to simulation of ice movement, In Proceedings of the 21st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (2006), pp. 74–77.
- 4) A. Konno and T. Mizuki: Numerical simulation of pre-sawn ice test of model icebreaker using physically based modeling, In Proceedings of the 18th IAHR International Symposium on Ice, Vol. 2 (2006), pp. 17–23.
- 5) 金野祥久, 山本敬介, 安木正樹, 若生大輔, 瀧本忠教, 泉山耕：砕氷船の性能と安全性の評価を目的とした船体周りの氷片挙動シミュレータの開発とその模型実験による検証, 日本船舶海洋工学会講演会講演論文集, 第4巻 (2007), pp. 323–326.
- 6) 金野祥久, 若生大輔, 瀧本忠教, 泉山耕：砕氷船の性能と安全性の評価を目的とした船体周りの氷片挙動シミュレータの開発とその模型実験による検証 (第2報: pre-sawn ice testにおける船首部での氷片挙動の比較・検証), 日本船舶海洋工学会講演会講演論文集, 第5E巻 (2007), pp. 59–62.

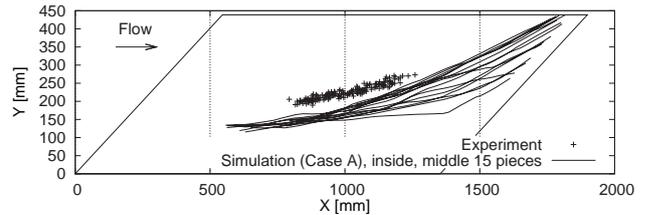


Fig. 12 Comparison of ice path between simulation and experiment

- 7) T. Matsuzawa, H. Yamaguchi, H. Kato, and T. Komura: Influence of floe rotation and tangential force between floes on local floe behavior: Investigation by discrete element model computations, In 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE99 (1999), CD-ROM (OMAE99-1110).
- 8) M. Lau: Discrete element modeling of ship manoeuvring in ice, In Proceedings of the 18th IAHR International Symposium on Ice, Vol. 2 (2006), pp. 25–32.
- 9) K. Izumiyama and S. Uto: Ice resistance of three bow forms for the nsr cargo ship, In Northern Sea Route: Future & Perspective. Proceedings of INSROP Symposium (1995), pp. 459–467.
- 10) 金田成雄, 泉山耕, 山口一：微小気泡 CD 模型氷の開発について, 寒地技術論文・報告集, 第14巻 (1998), pp. 415–421.
- 11) D. Baraff: Physically based modeling: Principles and practice; rigid body simulation I; unconstrained rigid body dynamics, Siggraph '97 Course notes (1997).
- 12) D. Baraff: Physically based modeling: Principles and practice; rigid body simulation II; nonpenetration constraints, Siggraph '97 Course notes (1997).
- 13) 日本機械学会：講習会「運動方程式の立て方七変化—3次元拘束力学系の運動方程式の立て方—」教材, 05–14, 日本機械学会 (2005).
- 14) R. Smith: Open Dynamics Engine v0.5 User Guide (2004), <http://www.ode.org/> (2008年7月6日確認).
- 15) E. B. Karulin and M. M. Karulina: Simulation of ridge keel behaviour in direct shear and punch tests by discrete element method, In Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice (2002), pp. 143–151.
- 16) Y. Matsuo, S. Kochkin, S. Yokoyama, H. Kondo, S. Kioka, and H. Saeki: Experimental study on the shear strength of the unconsolidated layer model of ice ridge, In Proceedings of The 18th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (2003), pp. 215–220.
- 17) Finnish Maritime Administration: Guidelines for the application of the Finnish-Swedish ice class rules, Finnish Maritime Administration Bulletin No. 14/20.12.2005 (2005).