The Society of Naval Architects of Japan

砕氷抵抗に及ぼす船首形状の影響に関する研究

(第一報　砕氷パターンと砕氷抵抗)

学生員　鈴木礼人*　　学生員　上村　治*
正員　山口　一*　　正員　泉山　耕**
正員　加藤洋治*

A Study on Effect of Bow Shape on Icebreaking Resistance
(1st Report : Relationship between Crack Pattern and Icebreaking Resistance)

by Yukihito Suzuki, *Student Member*　　Osamu Uemura, *Student Member*
Hajime Yamaguchi, *Member*　　Koh Izumiyama, *Member*
Hiroharu Kato, *Member*

Summary

A ship, advancing in a level ice field with continuous icebreaking mode, is subject to several components of ice resistance such as resistance due to breaking of ice, ice buoyancy, removing ice and ship motion. Although the third and forth components increase with ship speed, the first component, i. e. icebreaking resistance, is the most significant. This paper studies the icebreaking resistance at low ship speed.

The results of model experiments on icebreaking resistance were analyzed in detail for three different bows. They were a conventional wedge-shaped bow, spoon bow and concave bow. The following results were obtained.

(1) Independently of the bow shape, icebreaking resistance is in proportion to the total crack length, ice flexural strength and ice thickness squared.

(2) Decreasing hull stem angle at ice contact point raises the width of broken ice piece, resulting in shorter crack length. The icebreaking resistance nondimensionalized by the ice flexural strength and ice thickness is determined by the tangent of hull stem angle at the contact point.

(3) Since the spoon bow has smaller stem angle and larger waterline angle, the total crack length becomes shorter compared to the other bows. This is the reason why the spoon bow gives the lowest ice resistance.

記　　号

B：模型船の船幅
b：チャンネル幅
d：模型船の喫水
E：模型氷の弾性率
g：重力加速度
h：模型氷の氷厚
L：模型船の船長
l_b：砕氷片の幅
l_{bx}：砕氷片の進行方向の幅
l_{cr}：単位長さ当たりのクラック総延長
R_T：Level Ice 中抵抗試験の抵抗
R_{PS}：Pre-sawn Ice 中抵抗試験の抵抗
R_b：Level Ice 中抵抗のうちの氷板破壊抵抗
R_z：模型船が氷板から受ける抵抗の鉛直成分
V：模型船の船速
α：水線角
ϕ：船体の傾斜角の進行方向成分
ν：模型氷のポアソン比
ρ_i：模型氷の密度
ρ_w：氷海水槽水の密度

* 東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻
** 運輸省船舶技術研究所氷海技術部

原稿受理　平成8年7月10日
秋季講演会において講演　平成8年11月14, 15日

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

σ_f：模型氷板の曲げ強度

1. 緒　　言

国際流通経済の拡大や輸送効率の向上の見地から，北米，日本とヨーロッパ間の国際商業航路としてロシアの強力砕氷船を中核とした北方海上航路が再び注目されてきた。パナマやスエズを通る従来の航路に比べて3,500～4,000海里ほど距離が短くなるからである。しかし，北極圏における海上輸送は，北極海沿岸地方での地下資源や各種物資の輸送の主要な位置を占めるが，冬期には海氷に阻まれるため著しく制限をうける。

カナダ側面の北西航路啓開の試みを含め，北極海を通る航路啓開の努力が，それぞれの時代での造船技術や航法上の進歩を契機として，繰り返し行なわれてきた。現在北極圏関係国の協力の下，北東航路のロシア沿い部分を対象として国際北極海航路開発研究計画（International Northern Sea Route Programme: INSROP）が着手されている。

INSROPは，日本，ロシア，ノルウェー3国の国際協力で運用されている共同研究である。一方，関連する日本独自の研究プログラムの一つとして，北極海航路最適船型に関する実験的研究が行なわれている[1),2)]。これは，種々の模型船を船舶技術研究所，三菱重工業長崎，日本鋼管津の3氷海試験水槽で持ち回り試験するもので，1994年度は船首3種，船尾2種の分割模型船が用いられた。本研究はこれらの莫大なデータのうち船舶技術研究所（SRI）での実験結果をもとに，船首形状と砕氷抵抗の関わりについて考察を行なった。

砕氷抵抗はいくつかの抵抗成分に分けられる。氷中航行では，その中で氷を破壊するための氷板破壊抵抗が支配的となる。そこで，まず，平坦氷中抵抗試験と，あらかじめ一定の形に氷板を切ったPre-sawn Ice中での抵抗試験との2つの結果から氷板破壊抵抗を抽出した。この抵抗が，船首形状の違いによってどのように異なるかを，砕氷パターンから説明することを試みた。

2. 抵抗成分の分解

砕氷抵抗は，一砕氷サイクル間に船体に作用する氷荷重の進行方向成分の時間平均値と考えられる。これを定量的に評価するためには船首が氷板にどのような荷重を与え，破壊に導いているのかというメカニズムを把握することが重要である。

2.1 平坦氷中の砕氷抵抗の分解

平坦氷中を進む船にかかる抵抗は，船体にかかる様々な力に起因している。その解析では，抵抗をいくつかの成分に分けて考えるのが一般的である。これまでも，Kashteljan[3)]，Enkvist[4)]，Milano[5)]などによって砕氷抵抗の分解が試みられてきた。

本研究では，連続砕氷モードの砕氷プロセスについて，Kotras等[6)]が示した（Fig. 1）ように次のような過程を周期的に繰り返すと考えた。

1. 船首部と氷板が接触する。
2. 氷板の先端で圧砕が起こる。
3. 氷板がたわみ，歪みエネルギーが蓄えられる（内部応力が発生）。
4. 氷板の曲げ応力が一定値に達すると，曲げ破壊が起こる。
5. 氷片と残りの氷板との結合部がhingeとなって回転する。
6. 氷片が船首部と平行になるまで回転を続ける。
7. 氷片は後部の氷板に押されて船底へと流されていく。
8. 氷板の自由端が船首と接触し，新しい砕氷過程が始まる。

これらの砕氷サイクルを考慮することより，砕氷抵抗に関して小山ら[7)]の示したように次のように分解できると考えられる。

$$R_T = R_b + R_v + R_q + R_m + R_w \qquad (1)$$

R_T：全抵抗

R_b：氷板の破壊抵抗

R_v：氷片を運動させることによる抵抗

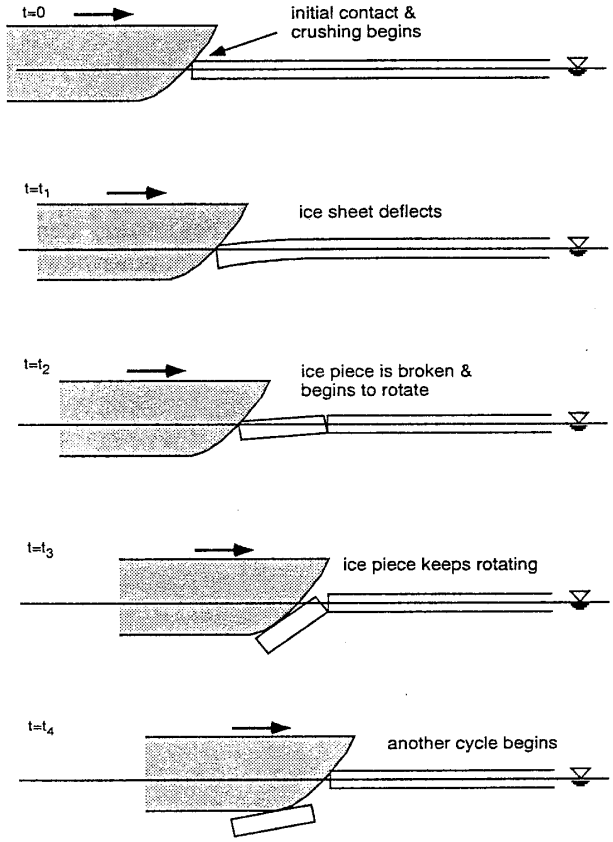
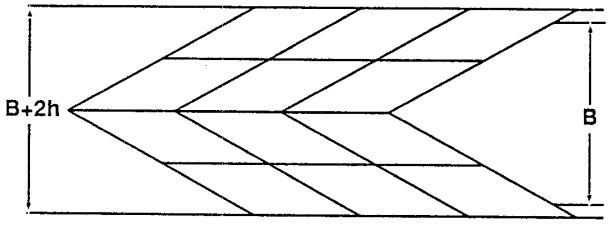


Fig. 1 Typical one cycle of icebreaking in continuous mode

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan



B : model width h : ice thickness

Fig. 2 Pre-sawn pattern

R_q：氷片の浮力による抵抗

R_m：船体運動による抵抗

R_w：平水中における流体摩擦抵抗

この研究では上に示す各抵抗成分の中で特に支配的と思われる氷板の破壊抵抗 R_b についての解析を行なう。

2.2 pre-sawn ice 中での抵抗試験

pre-sawn ice 中の抵抗試験[8]は，あらかじめ Fig. 2 のように切った氷の中で行なう試験で，全抵抗から氷板破壊抵抗を分離する実験的方法である。泉山ら[8]の考察によれば，pre-sawn ice 中の抵抗 R_{ps} は次式で与えられる。

$$\frac{R_{ps}}{\rho_i g B h^2} = A_1 + A_2 F_r \qquad (2)$$

ここで A_1 と A_2 は定数で F_r は Froude 数 $F_r = V/\sqrt{gh}$ である。また泉山ら[8]によれば，R_{ps} は船首形状の影響をあまり受けないとされている。

本研究では，砕氷抵抗の成分分解を，pre-sawn ice 中の抵抗試験の結果を用いて行なうことにした。

2.3 氷板破壊抵抗のパラメータについて

従来，砕氷現象に関して冠水の影響は考慮されなかったが，実際の模型実験では冠水があることが確認できる。宇佐美[9]によれば，半無限梁について，冠水がある(Fig. 3 下図）ときの静的な破壊抵抗 R_b は，

$$R_b \propto \sqrt{\sigma_f B^2 h^3 g(\rho_w - \rho_i)} \qquad (3)$$

非冠水状態の場合（ventilation，Fig. 3 上図）には

$$R_b \propto \sigma_f h^2 \qquad (4)$$

となる。

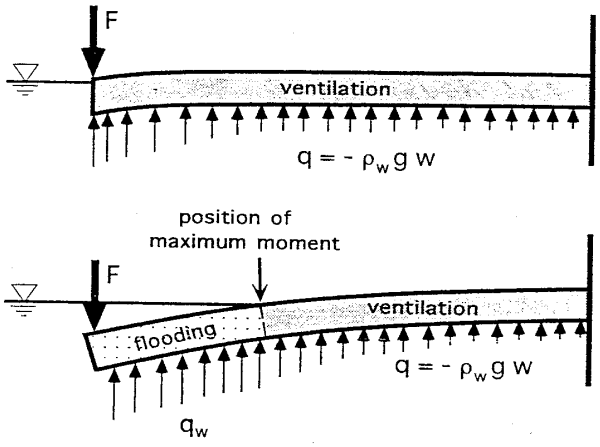
3. 実験方法と実験装置

本研究は，国内共同研究プロジェクトの，北極海航路開発調査研究[1]で，1994 年度に行なわれた模型船実験のデータのうち，運輸省船舶技術研究所の氷海水槽[10]で行なわれた実験データの一部を再解析した。その実験の概要を，平成 5 年度および 6 年度の「北極海航路開発調査研究事業報告書」をもとに記す。

3.1 模型氷

模型氷として，プロピレングリコールの 0.66 %水溶液を凍結させた模型氷（PG 氷）を用いた。

模型氷の製氷から模型実験までの過程は以下の通りである。



qw : constant buoyancy per unit length = - ($\rho_w - \rho_i$) gh
w : displacement

Fig. 3 Floating ice beam without flooded region (upper figure) and with fiooded region (lower figure) (Usami, 1995)

1. 水槽表面の氷片等を取り除き，−10 °C程度の室温下で，淡水噴霧器により水槽表面に氷核散布する（wet seeding）

2. 室温を 20 °Cに保ち，氷を成長速度毎時 2.5 mm で成長させる。

3. 所定の氷厚に達したら，室温を −2 °Cに上昇させ，氷板の強度低下を待つ（tempering あるいは warm up)。

4. 氷板の強度が所定の値に達した時点で実験を行なう。

3.2 模型船

模型船としては，縮尺 1/36 で 3 種類の船首を用いた。それぞれのフレームライン（Body Plan）を Fig. 4 に示す。

主要目は以下の通りである。

$$L_{WL} \times L_{PP} \times B_{WL} \times d$$
$$= 5.000\ \mathrm{m} \times 4.861\ \mathrm{m} \times 0.6667\ \mathrm{m} \times 0.222\ \mathrm{m}$$
$$\Delta = 0.5358\ \mathrm{m}^3$$

なお，北極海航路の特徴である厳しい喫水条件を考慮して従来型の船型と大きく異なった浅喫水型となっている。

3 種類の船首の特徴を以下に示す。

(a) 船首 A（くさび型）

フレームラインは比較的単純な V 型形状。

フレアー角は通常船舶に比べかなり大きい。

船首角約 25 度。喫水線下方 4 m 以深にフォアフートを設置。

参考船首形状：ロシア原子力砕氷船 Taymir 号。

(b) 船首 B（スプーン型）

スプーン・バウ船型。

船首端付近のウォーター・ライン形状が円弧状。

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

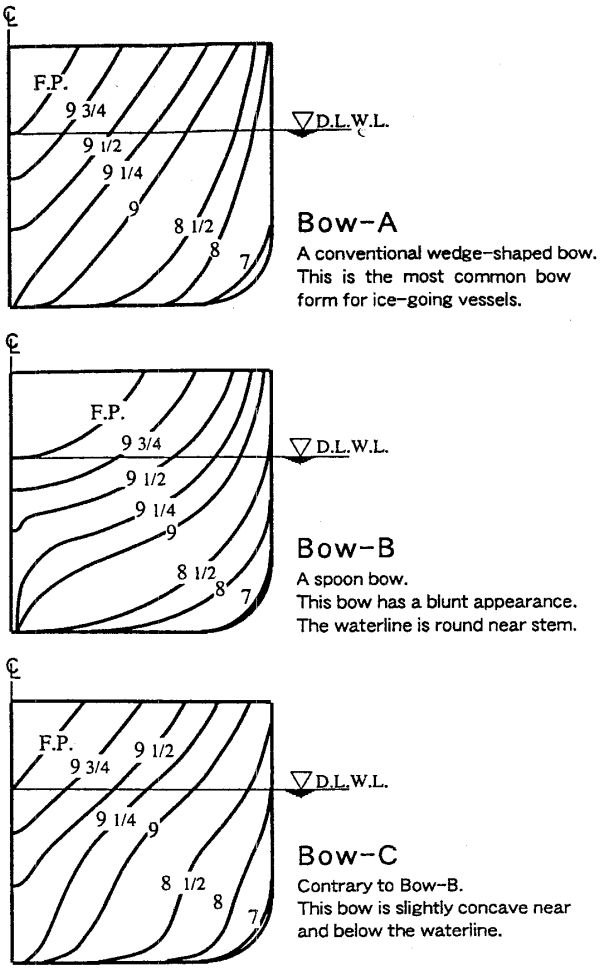


Fig. 4 Bow profile of models

フレームラインは下に凸型のゆったりと丸い形状。

船首端の喫水付近のフレアー角が特に大きい。

船首角約19度。

フォアフートは，喫水線下方2 m以深に設置。

(c) 船首 *C* (凹型)

船首部の喫水線付近で凹型のフレームライン形状。

フレア角は大で，船首部からショルダー終端部付近まで同一角。

参考船首形状：ドイツ砕氷型海洋調査船 Polarstern 号。

3.3 平坦氷中抵抗試験

抵抗試験では，模型の surge, yaw 及び sway を拘束した状態で，一定速度で模型を平坦氷の中を曳引した。実験配置図は，Fig. 5 に示す通りである。模型は曳引用ロッド及びガイドロッドにより曳引台車に連結する。曳引用ロッドでは，容量2000 N の検力計により模型に働く抵抗を計測するとともに，模型の heave の計測も行なう。後方のガイドロッドは，前後方向には運動が自由で，模型船の roll, heave 及び pitch の計測を行なう。模型船上4箇所において加速度の計測も行なった。一方，舵に働く力（直圧力，平行力及び舵軸モーメント）も検力計により計測した。計

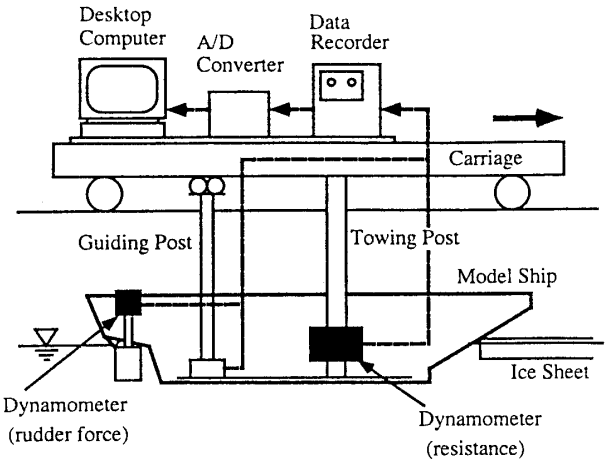


Fig. 5 Experimental setup

測データは，曳引台車上のデータレコーダーにより記録し，抵抗等の主要計測項目については，リアルタイムでデスクトップコンピュータにより一次解析を行なった。また，地下ピット観察窓からの VTR 並びに写真による映像記録の撮影を行なった。

3.4 Pre-sawn Ice 中抵抗試験

Pre-sawn Ice 中の抵抗試験は，Fig. 2 のようにあらかじめ切った氷を用いて，平坦氷中の抵抗試験と同様の実験を行なった。

3.5 実験条件

Level Ice 中の抵抗試験については，ロシア沿岸沿いの代表的な氷況を想定し，以下の実験条件を設定した。ただし，( ) 内は模型船相当値である。

1. 氷厚：h_i=0.8 m, 1.2 m, 1.8 m
   (25 mm, 33 mm, 50 mm)
2. 曲げ強度：σ_f=800 KPa(22 KPa)
3. 船速：1 knot, 3 knot, 5 knot
   (0.086 m/sec, 0.258 m/sec, 0.429 m/sec)

Pre-sawn Ice 中の抵抗試験については，氷厚は1.2 m についてのみ行なった。

尚，載荷状態は全て計画喫水8 m の Even Keel とした。

4. 結果と考察

4.1 氷板破壊抵抗の抽出

まず平坦氷中抵抗試験の全抵抗と，Pre-sawn Ice 中抵抗試験での抵抗から氷板破壊抵抗の抽出を行なう。

全砕氷抵抗のうち，Pre-sawn Ice 中の抵抗にあらわれない成分は，

1. 氷板をたわませ，氷を割るための抵抗成分
2. 高速時における船体上下動により増加する流体力による抵抗成分

である。

氷厚が33 mm のときの両者の抵抗を Froude 数 $V/\sqrt{gh}$

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

でまとめたものを Fig. 6 に示す。

4.1.1 Pre-sawn Ice 中抵抗値 R_{PS} の氷厚による補正

Pre-sawn Ice 中の抵抗 R_{PS} は，2.2 節で述べた式(2)からわかるように，h^2 に比例する[8]。そこで，R_{PS} を各砕氷抵抗試験の氷厚 h で補正し，計測される砕氷抵抗 R_T より補正後の Pre-sawn Ice 中の抵抗 R'_{PS} を引いたものを氷板破壊抵抗 R_b とした。

$$R'_{PS}=\frac{R_{PS}}{h_{PS}^2}\times h^2 \qquad (5)$$

$$R_b=R_T-R'_{PS} \qquad (6)$$

ここで，h_{PS} は Pre-sawn Ice 中の氷厚である。

4.1.2 氷板破壊抵抗の無次元化パラメータ

氷板破壊抵抗 R_b の無次元化パラメータを調べるために，R_b を $\sqrt{\sigma_f B^2 h^3 g(\rho_w-\rho_i)}$ と $\sigma_f h^2$ で無次元化し，それぞれ，Froude 数を $V/\sqrt{gh}$ と $V/\sqrt{gL}$ とでまとめ，直線で近似したときの相関について調べた。Table 1 にそのそれぞれの組合せでの相関係数を示す。その結果から以下のことがわかる。

1. R_b の無次元化パラメータとしては，$\sigma_f h^2$ を用いた方がよくまとまる。
2. 破壊抵抗は船速の影響を受ける。Froude 数には，$V/\sqrt{gL}$ を用いた方がまとまりがよい。

冠水が認められているにもかかわらず，ventilation を仮定した $\sigma_f h^2$ での無次元化の方が適している。冠水がある場合には，Fig. 3 の下図のように冠水部と非冠水部の境界でモーメントが最大となる。しかし，これはあくまでも梁を仮定した解析であり，実際の氷板とは条件が異なる。また，船体から氷板へ圧縮力が働くために，最大モーメントの位置が接触点側に移動することにより，水中のモーメント分布が浮力による等分布加重をもつ梁や板に近い状態になることも原因と考えられる。

また，Froude 数の代表長さを船長 L にした方がまとまりがよいことから，船速に伴う抵抗増加が流体動圧の影響によると予想される。

Fig. 7 は，船首形状による差を見るために，3 種の船首タイプについて $R_b/\sigma_f h^2$ と $V/\sqrt{gL}$ の関係を調べたものである。低速時には，船首 B，船首 C が，船首 A より，その氷板破壊抵抗が小さい。また，氷板破壊抵抗の速度影響は，船首 A，船首 Cが同程度で，それに比べて船首 B は小さい。氷板破壊抵抗は，船首 B が全船速範囲にわたって小さい。

4.1.3 氷板破壊抵抗の特徴

以上の議論により，抽出された氷板破壊抵抗の特徴をまとめると以下のようになる。

(1) 氷板破壊抵抗の無次元化は，$\sigma_f h^2$ によって行なうのが妥当である。また，氷板破壊抵抗の速度影響については，代表長さに船長を用いた $V/\sqrt{gL}$ を用いるとよい。

(2) 低速時には，船首 B，船首 C が，船首 A より，その氷板破壊抵抗が小さい。また，氷板破壊抵抗の速度影響は，船首 A，船首 C が同程度で，それに比べて船首 B は小さい。

(3) 氷板破壊抵抗は，船首 B が全船速範囲にわたって小さい。

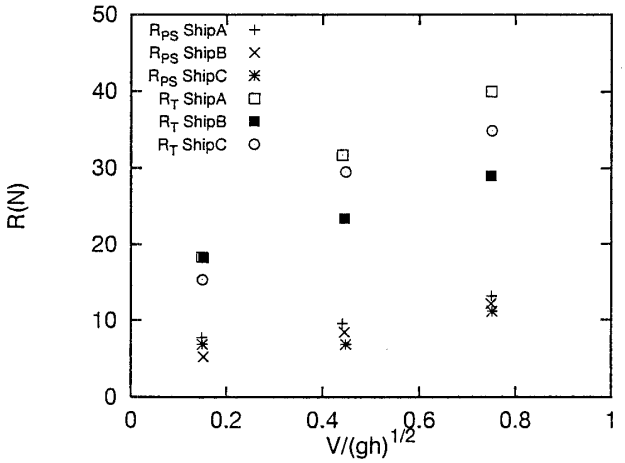


Fig. 6 Resistance in level ice, R_T, and resistance in pre-sawn ice, R_{PS}

Table. 1 Comparison of correlation coefficients between nondimensional R_b and Froude Number

Y axis and X axis	Ship A	Ship B	Ship C
R_b/R_{th} and $V/\sqrt{gh}$	0.625	0.434	0.593
R_b/R_{th} and $V/\sqrt{gL}$	0.802	0.648	0.772
$R_b/\sigma_f h^2$ and $V/\sqrt{gh}$	0.888	0.729	0.885
$R_b/\sigma_f h^2$ and $V/\sqrt{gL}$	0.949	0.829	0.962

$$R_{th}=\sqrt{\sigma_f B^2 h^3 g(\rho_w-\rho_i)}$$

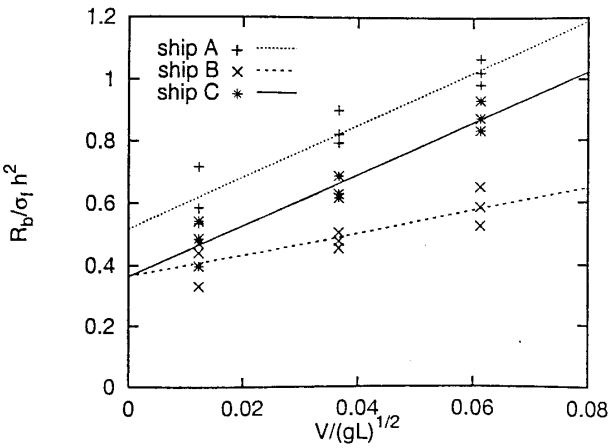


Fig. 7 Comparison of non-dimensional icebreaking resistance, $R_b/\sigma_f h^2$ for different bows

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

4.2 氷板破壊抵抗と砕氷パターン，船首形状の関係

一般に，船体と氷の接触点での破壊抵抗の鉛直成分を R_z とすると，船体と氷の摩擦の影響を考えなければ，破壊抵抗 R_b は荷重点での進行方向の船首傾斜角 ϕ（Fig. 8 参照）を用いて

$$R_b = R_z \tan\phi \qquad (7)$$

と表すことができる。

R_z が $\sigma_f h^2$ に比例することを考慮すると，

$$R_b \propto \sigma_f h^2 \tan\phi \qquad (8)$$

という関係が成り立つ。

一方，氷板の破壊が，全て曲げ破壊であると仮定すると，R_b は，進行方向に単位長さ当たりに入る総クラック延長に比例する。つまり，

$$R_b \propto \sigma_f h^2 l_{cr} \qquad (9)$$

という関係が成り立つ。この点について実際の現象ではどうなるかを検討する。

4.2.1 氷板破壊抵抗 R_b と船首傾斜角との関係

ビデオ観測より，船首 A,B,C に対してそれぞれ氷との接触点での ϕ を観測した。ϕ の値については船首 B で最も小さく，船首 A で最も大きくなった。ただし，高速になると，船首と氷との接触部分を完全には特定できず，特に船首 C では，接触部分の場所の違いによって $\tan\phi$ の値が，かなり違ってくることも考えられる。この ϕ を用いて $R_b/\sigma_f h^2 \tan\phi$ の値を求め，Froude 数との関係を調べた (Fig. 9)。

Fig. 9 を見ると，低速時の $R_b/\sigma_f h^2 \tan\phi$ の値の船首形状による差はほとんどなくなることがわかる。実際に低速時においては，氷の破壊時に氷と船体の接触点をビデオで観測して代表的な点を決め，その点での進行方向船体傾斜角 ϕ を調べて，R_b と $\sigma_f h^2 \tan\phi$ との関係を示すと Fig. 10 のようになる。つまり低速時には，式(8)が成り立つことが言え，船首傾斜角 ϕ と氷板破壊抵抗 R_b とは以下の関係式が成り立っている。

$$R_b = 1.002 \sigma_f h^2 \tan\phi \qquad (10)$$

一方，氷板破壊抵抗に対する速度影響の船首形状による差は埋まらない。これは，速度上昇によって生じる船体の運動に伴った，別の抵抗が生まれ，その抵抗が船首によって異なることが原因であると考えられる。この点については次報で報告する。

4.2.2 氷板破壊抵抗 R_b と砕氷パターン

次に，砕氷パターンと氷板破壊抵抗の関係を調べるために，砕氷の様子を水槽の下の観測窓から撮影したビデオの映像から砕氷パターンのスケッチを行なった。その大まかな様子を描いたものが Fig. 11 である。

亀裂の入る瞬間の，氷と船体の接触点から亀裂が生じたところまでの距離を砕氷片の幅 l_b として，その平均を計測した。また，船の進行方向単位長さ当たりに入るクラックの総延長 l_{cr} を計測した。

その結果から，l_b と l_{cr} の関係，R_b と $\sigma_f h^2 l_{cr}$ の関係を取

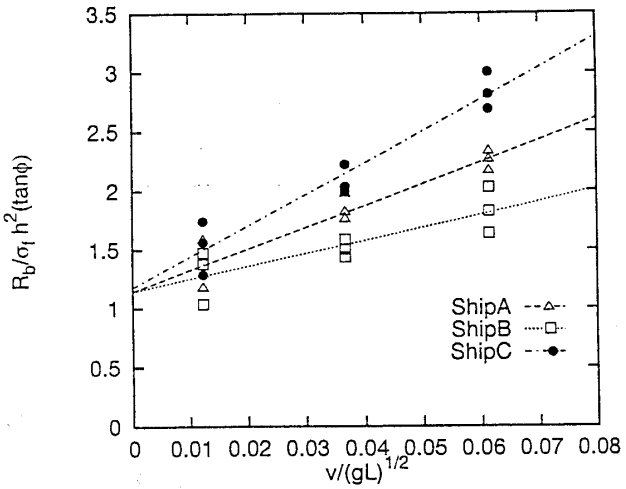


Fig. 9 Relationship between $R_b/\sigma_f h^2 \tan\phi$ and Froude Number $V/(gL)^{1/2}$.

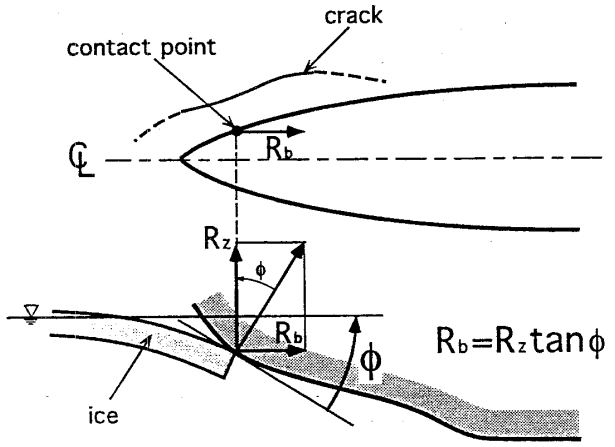


Fig. 8 Relationship between the stem angle at contact point, ϕ, and icebreaking resistance, R_b

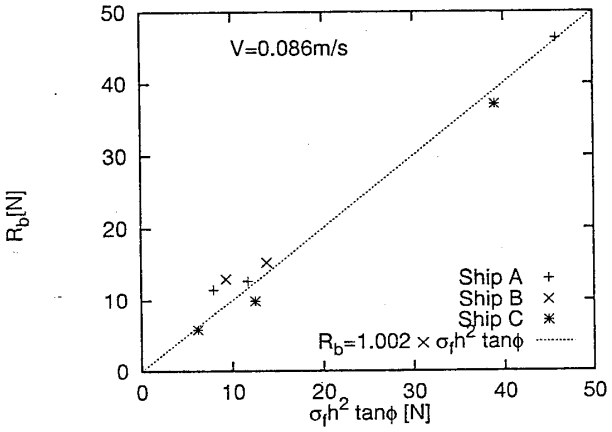


Fig. 10 Relationship between $R_b[N]$ and $\sigma_f h^2 \tan\phi[N]$ at low speed ($V=0.086$ m/s)

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

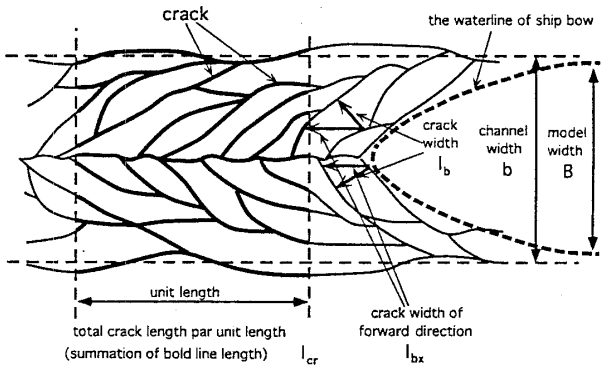


Fig. 11 Icebreaking pattern and broken ice piece size

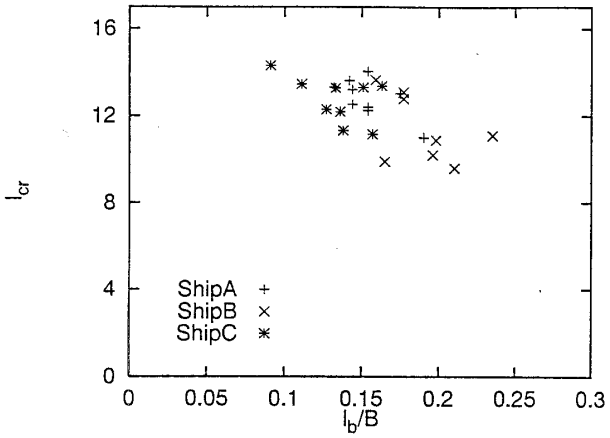


Fig. 12 Relationship between l_b/B and l_{cr}

り出すと Fig. 12, Fig. 13 のようになる。ただし，高速時には速度上昇による船体運動増加に伴う抵抗成分があると考えられるので，R_b と $\sigma_f h^2 l_{cr}$ の関係については低速時のみを示した。

その特徴は，次の通りである。

（1） 船首 B は，l_b が他の船首に比べて大きい。

（2） l_b と l_{cr} の関係には，全体として負の相関がある (Fig. 12)。

（3） R_b と $\sigma_f h^2 l_{cr}$ の関係では，低速時には船首によらず，式(9)が成り立ち，以下の式であらわされる (Fig. 13)。

$$R_b = 0.0429 \sigma_f h^2 l_{cr} \qquad (11)$$

4.2.3 船首傾斜角と砕氷パターン

前の 2 節で，① $\tan\phi$ が増加すると R_b が増加，② l_b が減少すると R_b が増加，という関係が得られた。そこで，低速時における ϕ と l_b の関係を調べる。

氷板破壊時の氷と船体との接触点での船首角 ϕ は，砕氷片の進行方向の幅 l_{bx} と関係があることが予想される。Fig. 14 で見るように，ϕ が大きくなると氷板にかかる軸力が大きくなる。下向きの加重による曲げ変形にこの軸力を考え合わせると，軸力により進行方向の砕氷幅 l_{bx} が小さくなると考えられる。ϕ は，船首 B で小さく，船首 A, C で大きいので，進行方向の砕氷幅 l_{bx} は船首 B で大きく，

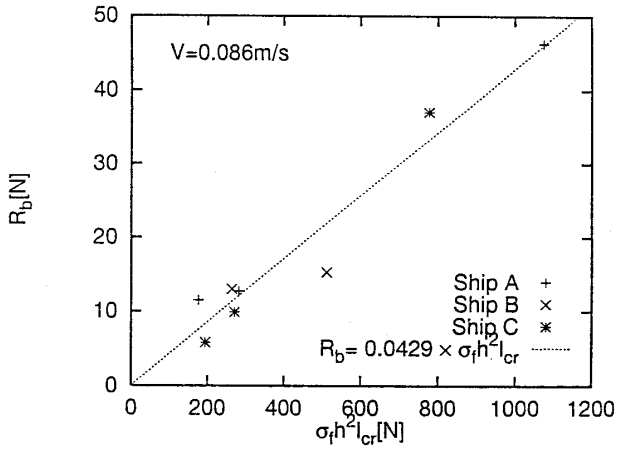


Fig. 13 Relationship between $R_b[N]$ and $\sigma_f h^2 l_{cr}[N]$ at low speed ($V=0.086$ m/s)

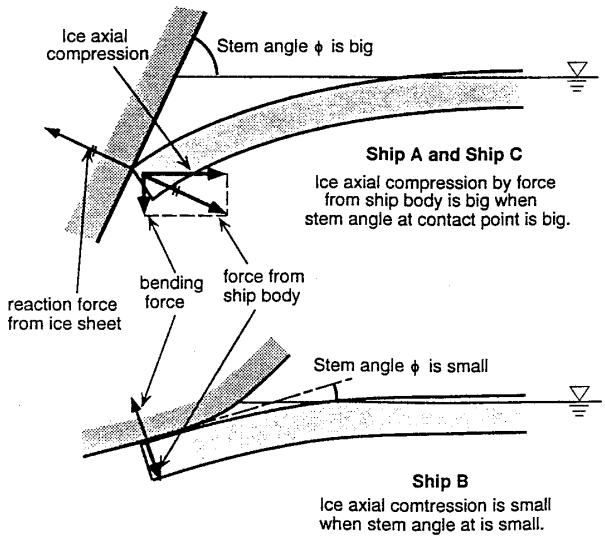


Fig. 14 Comparison of ice axial compression between Ship A, Ship C and Ship B

船首 A, C で小さいと予想できる。

l_{bx} は接触点での水線角 α と l_b を用いて，

$$l_{bx} = l_b / \sin\alpha \qquad (12)$$

と書ける (Fig. 16 参照)。計測した l_b と α から l_{bx} をもとめ，$\tan\phi$ で整理すると Fig. 15 になる。l_{bx} は，船首 B で大きく船首 A, Cで小さく，$\tan\phi$ と負の相関があることがわかる。

また，水線角 α は，船首 B で大きく，船首 A, Cで小さいことが観測される (Fig. 16)。したがって $\sin\alpha$ についても船首 B で大きく，船首 A, Cで小さい。つまり，船首 B は，氷破壊時の氷と船体の接触点で，船首角 ϕ が小さく，水線角 α が大きいために砕氷片の進行方向の幅 l_{bx} が大きくなり，砕氷片の幅 l_b が大きくなる。計測した l_b と $\tan\phi$ の関係を見ると Fig. 17 となっており，このことが確認できる。

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

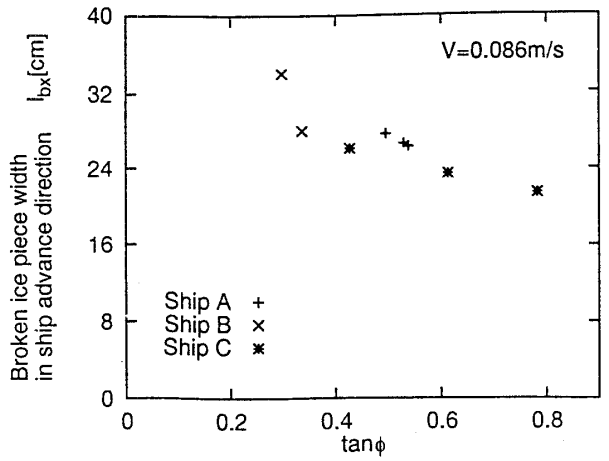


Fig. 15 Relationship between l_{bx}[cm] and tan ϕ at low speed ($V=0.086$ m/s)

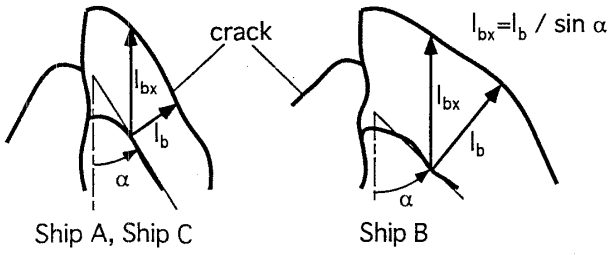


Fig. 16 Ice peice width l_b, waterline angle of ship body at contact point α and ice peice width in forward direction l_{bx}

5. 結　　言

以上の考察により以下のことが言える。

（1） 氷板破壊抵抗は，$\sigma_f h^2$ に比例する。実際に冠水が生じていることが観察されることから，氷は水中に入った後に，水中部で割れると思われる。

（2） 船速は，$V/\sqrt{gL}$（船長ベースの Froude 数）のように無次元化する方が，$V/\sqrt{gh}$（氷厚ベースの Froude 数）のように無次元化するよりも，抵抗との相関が高い。

（3） 低速時には，破壊抵抗は氷と接触する点の船体傾斜角 ϕ によって決まり，傾斜角が小さいほど破壊抵抗は小さい。氷板破壊抵抗は tan ϕ に比例する。

（4） 速度や船首に関係なく，砕氷片の幅とクラック総延長とには，負の相関がある。

（5） 低速時には，単位長さあたりクラック総延長 l_{cr} としたとき，船首形状にかかわらず，

$$R_b=0.0429\sigma_f h^2 l_{cr}$$

の関係がある。

（6） 氷板破壊時の氷板と船体の接触点における船首角が大きいと，砕氷片の幅 l_b が小さくなる。

（7） 船首 B では，低速時には氷板破壊時の氷板と船体の接触点における船首角 ϕ が小さく，水線角 α が大きいために，他の船首より砕氷片の幅が大きく，その長さは小さい。そのため進行方向に単位長さあたりに入るクラック総延長は短く，氷板破壊抵抗が小さい。

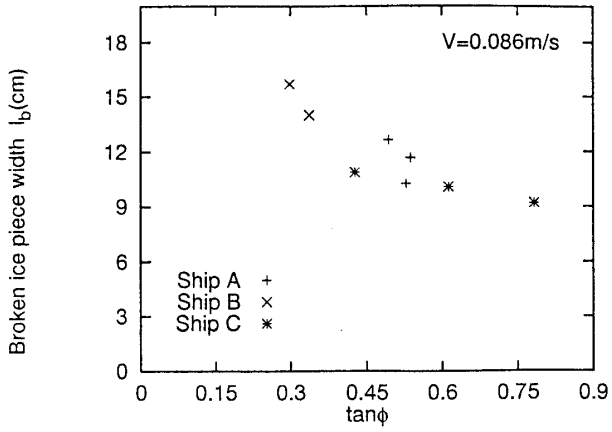


Fig. 17 Relationship between tan ϕ and l_b[cm] at low speed ($V=0.086$ m/s)

謝　辞

本研究にあたり，INSROP に関連して 1994 年に運輸省船舶技術研究所の氷海水槽で行なわれた実験のデータを解析した。関係各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

1) 平成5年度北極海航路開発調査研究事業報告書「北極海航路最適船の研究」，シップ・アンド・オーシャン財団，(1994).
2) 平成6年度北極海航路開発調査研究事業報告書「氷海航路航行用最適船の研究開発」，シップ・アンド・オーシャン財団，(1995).
3) Kashteljan, V. I., Poznjak, I. I., and Ryvlin, A. J.: Ice Resistance to Motion of a Ship, Sudostroenie, Leningrad (Translation from Russian Original), (1968).
4) Enkvist, E.: On the Ice Resistance Encouted by Ships Operating in the Continuous Mode of Icebreaking, The Swedish Academy of Engineering Sciences in Finland, Report No.24, (1972).
5) Milano, V. R.: Ship Resistance to Continuous Motion in Ice, SNAME Trans, Vol.81, (1973), pp. 274-306.
6) Kotras, T. V., Baird, A. V., and Naegle, J. N.: Predicting Ship Performance in Level Ice, SNAME Trans, Vol.91, (1983), pp. 329-349.
7) 小山鴻一，吉田三雄，泉山　耕，宇都正太郎，金田成雄，下田春人，若生大輔：単純船首模型を用いた実験による砕氷抵抗に関する考察，運輸省船舶技術研究所 平成6年度秋季（第64回）研究発表会講演集，(1994), pp. 99-104.
8) Izumiyama, K. and Uto, S.: Ice Resistance of Three Bow Forms for the NSR Cargo Ship,

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

Northern Sea Route ; Future & Perspective (The Proceedings of INSROP Symposium Tokyo '95), Ship and Ocean Foundation, (1996), pp. 459-467.
9) Usami, A., Kato, K., Adachi, M., Yamaguchi, H., Miyanaga, M.: A Study of Dynamic Effects on Icebreaking in 2 Dimension: Experiment, Northern Sea Route ; Future & Perspective(The Proceedings of INSROP Symposium Tokyo '95), Ship and Ocean Foundation, (1996), pp. 437-445.
10) 野澤和男：砕氷工学, 船舶技術協会, (1994) , p. 129.
11) 鈴木礼人, 上村　治：砕氷抵抗に及ぼす船首形状の影響について, 東京大学船舶海洋工学科卒業論文, (1996).

NII-Electronic Library Service