

船体を覆う氷片を考慮した氷中抵抗の推定法

The Calculation Method of Resistance in Level Ice Considering Ice Pieces Covering the Hull



| 統研研究所 | 水海研究 G | |
|-------|--------|--|
| | | |

| 女齋 | 主佦 | ANZAI Keisuke | |
|----|----|-----------------|--|
| 山内 | 豊 | YAMAUCHI Yutaka | |
| 水野 | 滋也 | MIZUNO Shigeya | |

概要

船体没水部の3次元的な形状を考慮して氷中抵抗を推定するため、氷片膜モデルを用いた氷中抵抗推 定法(ICHM)を開発した。本推定法では Ionov の抵抗推定法を使用して純砕氷抵抗を求め、氷片膜モデ ルによって推定した氷片分布から船体各部にかかる氷片の押沈、回転、押し分けによる抵抗を求める。 氷片膜モデルは押し沈められた氷片が船体表面を覆う様子を再現したものであり、喫水付近の氷片の回 転、氷片の排除及び充填率を考慮している。この推定法で氷中抵抗を推定した結果、氷海水槽試験の結 果とよく一致した解が得られた。

Summary

The calculation method of resistance in level ice was developed. This method used Ice-Covered Hull Model (ICHM) which simulates a distribution of breaking ice on a hull surface to consider under water hull geometry. Ionov's calculation method was used to calculate ice breaking resistance. Moreover, resistance due to buoyancy and clearing of broken ice pieces were calculated based on estimating ice-covered area. As a result of calculation, the calculated resistance agreed well with experimental results.

1. 緒 言

氷海を航行する砕氷船は通常の船舶では見られない 氷板の破壊や摩擦による抵抗(以下:砕氷抵抗)を受け る。この抵抗を船型から推定するため、Lindqvist¹⁾や Ionov²⁾等によって理論的、経験的な砕氷抵抗推定法 が開発され、よく用いられているが、これらの推定法 は喫水線上の船型パラメータのみを使用して砕氷抵抗 を計算するために、没水部の形状影響を考慮できない という問題がある。そこで、パネルによって船体形状 を表現し、氷片膜モデル(Ice-Covered Hull Model)を 用いて氷片の分布を推定することで砕氷抵抗を求める 抵抗推定法(以下、ICHM)を開発した³。

2. ICHM の概要

ICHM では全氷中抵抗を 4 つの成分に分解し、船体と氷との接触に起因する抵抗を計算する。ICHM における成分の分離法を式(1)に示す。

$$R_t = R_i + R_w = R_1 + R_2 + R_3 + R_w$$
(1)

R_t:全氷中抵抗, R_i:砕氷抵抗,

R₁:純砕氷抵抗, R₂:氷片の押沈/回転による抵抗,

*R*₃: 氷片の押し分けによる抵抗, *R_w*: 水の抵抗

純砕氷抵抗成分であるR₁項は喫水線付近の形状に 依存するため、Ionovの抵抗推定法の考え方を基に純 砕氷抵抗に相当する式を導入した。R₂, R₃項につい ては船体表面をパネル化し、各パネルと氷片の干渉を モデル化して抵抗を算出した。

JMU テクニカル・レピュー No.7 (2020 年 1 月)

-1-



3. 座標系

3.1 船体及びパネルの座標系

ICHM における座標系を図 1 に示す。図の左側は 船体座標系、右側は船体表面を表すパネルに着目した 局部座標系である。局部座標系の t_{e1} はパネルの前後 の辺の中点を通るようにとる。また、 n_e はパネルの 法線方向であり、 t_{e2} は t_{e1} と n_e に直交する。局部座標 系における各軸の単位ベクトルを式(2),(3),(4)に示す。





$$t_{e1} = \left(a_x, a_y, a_z\right) \tag{2}$$

$$t_{e2} = (b_x, b_y, b_z) \tag{3}$$

$$n_e = (c_x, c_y, c_z) \tag{4}$$

3.2 船体のパネル分割法

ICHM ではフレームラインを等分して船体パネル を生成する。この際、各フレームラインのガース方向 の分割数は同じとし、氷厚以下の幅で分割する。

また、本稿では水線面から船底に向かって *i* = 1, 2, 3, ...、船首から船尾に向かって *j* = 1, 2, 3, ...とし て各パネルを(*i*,*j*)と表す。

4. 氷との接触範囲のモデル化

4.1 カスプ破壊モデル

氷中を航行する際、砕氷船は氷板をカスプ状(扇状) に曲げ破壊しながら前進する。このとき、船首からあ る範囲の間で船幅以上の範囲の氷板が破壊されるため、 氷板の曲げ破壊は限られた範囲でのみ発生することに なる。そこで、この現象を考慮して、Kotras⁴⁰のカス プ破壊モデルを使用して破壊範囲を推定することにし た。Kotrasのカスプ破壊モデルの概略を図2に示す。





Kotras のカスプ破壊モデルにおいて、カスプ深さ *D_c(X)*は式(5),(6)で求められる。

$$D_{c}(X) = \cos \alpha_{ave} \cdot l_{c} \left[1.7153 + 4.2653 \frac{\sin \alpha(X)}{\tan \beta'(X)} \frac{v}{\sqrt{g \cdot l_{c}}} \right]^{-1} (5)$$

$$l_{c} = \sqrt[4]{\frac{Eh^{3}}{\rho_{w}g \cdot 12(1-\nu^{2})}}$$
(6)

E:弾性率, <math>h: 氷厚, v: 氷のポアソン比, $\rho_w: 水の密度, V:船速, <math>g: 重力加速度$ $\alpha(X): X$ における喫水線の傾斜角,

β (X): Xにおける喫水線の法線方向のフレア角, α_{ave} : 船首から 40%エントランス長までの α の平均 なお、Kotras の論文では α_{ave} は船首から船長の 20% までの α の平均と定義されているが、この定義では同 じ船首形状でも平行部の長さによってカスプ破壊パタ ーンが変化してしまうため、定義を変更した。

開水路半幅B_{oc}は水線面の船幅をB_{wl}として式(7)のようになる。

$$B_{oc} = B_{wl}/2 + 0.2l_c \tag{7}$$

開水路半幅 B_{oc} とカスプ深さ $D_c(X)$ の関係から、船首からカスプ破壊が発生する領域までの距離 X_{cc} は式(8)を満たすものとした。ここで、 $Y_w(X_{cc})$ は X_{cc} における水線面半幅である。

 $B_{oc} = Y_w(X_{cc}) + D_c(X_{cc}) \cdot \cos \alpha(X_{cc})$ (8)

4.2 氷片膜モデル

氷中を航行する際、砕氷船の船体はフレームライン に沿って沈み込んだ砕氷片の集まりによって覆われる (以下、この範囲を氷片膜とする)。この氷片による抵 抗を求めるため、氷片膜によって船体が覆われる範囲 を計算した。このモデルでは、船体を覆う砕氷片の供 給量は対象とする点の水線面半幅に相当すると考え、 これに喫水面付近での氷片の回転、氷片の排除、充填 率を考慮した修正を加えた。

4.2.1 氷片の干渉領域(氷片膜)の計算

断面 $j OX 座標中点を<math>X_{(j)}$ とし、その点における水 線面半幅を $Y_{w(j)}$ 、氷片膜を形成する氷片の充填率を $C_{v(j)}$ 、排氷率を $C_{rv(j)}$ とする。この時、氷片膜によっ て覆われるガース長 $L_{g(j)}$ は式(9)で求められる。

 $L_{g(j)} = Y_{w(j)} \cdot (1 - C_{rv(j)}) / C_{v(j)}$ (9)

ここで、*C_{v(j)}*は氷海水槽試験の観察結果から*X_(j)に*ついての関数として与えた。また、*C_{rv(j)}の算出法は* 4.3 で述べる。

4.2.2 水面付近での氷片の回転

氷板を破壊しながら航行する際、その水面近傍では 破壊された氷板が回転しながら沈み込んでいくため、 その間では船体と砕氷片が接触しない領域dh₍₁₎がで

JMU テクニカル・レピュー No.7 (2020 年 1 月)



きる。この影響を考慮するため、図 3 に示す場合分 けを基に*dh*(*i*)を求めた。



図 3 除外範囲の場合分け Fig.3 Divided cases of the excluded area

カスプ破壊領域内: $X_{(j)} \leq X_{cc}$

カスプ破壊領域内では、船体の喫水付近には破壊前 の氷板が接し、氷片は氷板の下に潜り込むと考える。 この時、喫水面におけるフレームラインの傾斜角 $\beta_{w(i)}$ を考慮して $dh_{(i)}$ を式(10)で求める。

$$dh_{(i)} = h/\cos\beta_{w(i)} \tag{10}$$

カスプ破壊領域より船尾側: X_(j) > X_{cc}

この範囲では開水路半幅と水線面半幅のクリアラン ス $d_{c(j)}$ として氷厚hとの関係から場合分けをおこなっ た。ここで、 $d_{c(j)}$ は式(11)で求められる。

$$d_{c(j)} = B_{oc} - Y_{w(j)}$$
(11)

-a $d_{c(j)} > h$ の場合

喫水付近の氷片は破断部を支点に回転すると考える。
 氷厚hがdh_(j)に影響する割合をaとすると、dh_(j)は式
 (12)で求められる。

$$dh_{(j)} = -d_{c(j)} \cdot \sin \beta_{w(j)} + \sqrt{D_c(X_{cc})^2 - (d_{c(j)} \cdot \cos \beta_{w(j)})^2} + \frac{a \cdot h \cdot d_{c(j)} \cdot \cos \beta_{w(j)}}{D_c(X_{cc})}$$
(12)

また、この時の*L_{g(j)}*はヒンジ部の長さを考慮して 式(9)から式(13)に置き換えて求める。

$$L_{g(j)} = Y_w(X_{cc}) \cdot (1 - C_{rv(j)})/C_{v(j)}$$
(13)
-b $d_{c(j)} = h \mathcal{O}$ 場合

喫水付近の氷片が完全に立ち上がり、上端から氷片

膜に覆われるもの考える。この時、*dh*_(j), *L_{g(j)}*は式 (14),(15)で求められる。

$$dh_{(j)} = 0 \tag{14}$$

$$L_{g(j)} = B_{oc} \cdot (1 - C_{rv(j)}) / C_{v(j)}$$
(15)
- c $d_{c(j)} < h$ の場合

喫水付近の氷片は氷板から分離し、氷板下に潜り込むと考える。この時、 $dh_{(j)}$ はと同様に式(10)で、 $L_{g(j)}$ は破壊された氷片すべてを含むため、 -b と同様に式(15)で求める。

氷片が再浮上する領域: $Y_{w(j)} < Y_w(X_{cc})$ (船尾側) この範囲では一度沈んだ氷片が再び水面に浮上して くるため、 -b と同様に上端から氷片膜に覆われる ものとする。この時、 $dh_{(j)}$ を式(14)で、 $L_{g(j)}$ を式(9) で求める。

4.3 排氷モデル

水面下に沈みこんだ氷片は船体に沿って流れるが、 一部の氷片は船体から離脱して両側に排除される(以 下、排氷と呼ぶ)。排氷性能は船型によって大きく異 なり、R₂, R₃項の抵抗に影響を与える。そこで、R₂, R₃項の推定精度を向上させるため、船型パラメータ と船速から排氷性能を推定するモデルを導入した。

4.3.1 排氷率を求める船型パラメータ

排氷率を求めるための船型パラメータとして、各パ ネルにおける断面傾斜角 $\beta_{(i,j)}$ と傾斜角変化量 $\Delta\beta_{(i,j)}$ を 求める(図 4)。 $\Delta\beta_{(i,j)}$ の計算式を式(16)に示す。

$$\Delta \beta_{(i,j)} = \beta_{(i,j)} - \beta_{(i-1,j)}$$
(16)



図4 $\beta_{(i,j)}$ と $\Delta\beta_{(i,j)}$ の概略図 Fig.4 Outline of the $\beta_{(i,j)}$ and $\Delta\beta_{(i,j)}$

排氷の判定を行うために、氷海水槽試験の観察結果 から以下の基準値を設定した。

- β_c : 氷片移動の限界傾斜角
- $\Delta \beta_c$: 氷片離脱の限界傾斜角変化
- Virc : 排氷限界船速
- Cip : 氷片の二次破壊影響係数
- Capd:船尾付加物影響係数

4.3.2 排氷率の計算

船首から順番に氷片が離脱するか否かを判定し、氷 片膜が縮小される影響を順次求めていった(図 5)。排 氷率の計算手順を以下に示す。

JMU テクニカル・レビュー No.7 (2020 年 1 月)

- 3 -





Fig.5 The model of removal ice pieces

排氷判定パラメータの算出

初めに、氷片離脱判定範囲 $L'_{g(j)}$ の範囲内における $\Delta\beta_{(i,j)}$ の最大値 $\Delta\beta_{m(j)}$ と、 $\Delta\beta_{m(j)}$ が発生するパネルの 傾斜角 $\beta_{m(j)}$ を求める。ここで、 $L'_{g(j)}$ は断面 *j*におけ る排氷長さを $Y_{rs(j)}$ として式(17)で求められる。

$$L'_{g(j)} = (Y_{w(j)} - Y_{rs(j-1)})/C_{v(j)}$$
 (17)
断面 jの氷片離脱判定

で求めたパラメータより、式(18)を満たす場合は 氷片が離脱するとして、氷片離脱判定を行う。

 $\Delta\beta_{m(j)} > \Delta\beta_c$ and $\beta_{m(j)} > \beta_c$ (18) 氷片が離脱すると判定された場合には、その氷片量に 相当する長さ $y_{rs(j)}$ だけ氷片供給量を減らし、氷片膜 を短くする。ここで、 $y_{rs(j)}$ はカスプ破壊発生範囲の 中点 $X_{cc}/2$ におけるカスプ深さ $D_c(X_{cc}/2)$ に、2 次破 壊の影響を考慮した係数 C_{ip} と断面幅の影響係数 $C_{dx(j)}$ を掛けたものとして、式(19),(20)で求める。

$$y_{rs(j)} = D_c(X_{cc}/2) \cdot C_{ip} \cdot C_{dx(j)}$$
(19)

$$C_{dx(j)} = (X_{(j)} - X_{(j-1)}) / (0.25 \cdot l_c)$$
(20)

また、平行部より後方では船尾付加物の影響を考慮し た修正を加え、y_{rs(i)}を式(21)で求める。

$$y_{rs(j)} = D_{c}(X_{cc}/2) \cdot C_{ip} \cdot C_{dx(j)} - (1.0 - C_{apd}) \cdot (Y_{w(j)-1} - Y_{w(j)})$$
(21)

 排氷長さY_{rs(j)}の算出 式(22)に示すように、船首から断面 jまでのy_{rs(i)}

を積算することで、断面 *j* における排氷長さ*Y_{rs(j)}を*求める。

$$Y_{rs(j)} = \sum_{k=1}^{j} y_{rs(k)}$$
(22)
排氷率 $C_{rv(j)}$ の計算

から を *j*= 1 から順次計算していくことで各断 面における*Y_{rs(j}*を算出し、式(23)によって断面 *j*にお ける基準排氷率*C_{rvo(j}*を求める。

$$C_{rvo(j)} = Y_{rs(j)} / Y_{w(j)} \tag{23}$$

このようにして求めた*C_{rvo(j}*に対して船速Vの影響 を考慮した係数を加え、最終的な排氷率*C_{rv(j}*を式 (24)で求める。

$$C_{rv(j)} = C_{rvo(j)} \times (V_{irc} - V) / V_{irc}$$
(24)

5. 氷中抵抗の計算

5.1 純碎氷抵抗成分(R₁項)

Xにおける喫水線の傾斜角 $\alpha(X)$ と水線面のフレー ムラインの傾斜角 $\beta_w(X)$ より、式(25)に示す Ionov の 抵抗推定法の R_1 項を使用して純砕氷抵抗を推定する。 右辺括弧内の第 1 項は氷板を曲げ破壊する際の直応 力による抵抗、第 2 項は氷板を曲げ破壊する際の直 応力によって生じる摩擦抵抗を示している。

$$R_{1} = 2 \frac{\sigma_{f} h^{2}}{b} \left(k_{11} \int_{0}^{X_{CC}} \frac{0.57(1.6 \cos \beta_{W}(X) + 0.11) \tan \alpha(X)}{\sin \beta_{W}(X)} dX + k_{12} \mu_{k} \int_{0}^{X_{CC}} \frac{1}{\sin \beta_{w}(X)} dX \right)$$
(25)

 $\sigma_f:曲げ強度, \mu_k: 氷と船体の動摩擦係数, <math>k_{11}, k_{12}: 氷海水槽試験との相関係数,$

b:次元を抵抗に合わせるための係数

5.2 氷片の押沈/回転による抵抗(R₂項)

*R*₂項を浮力による摩擦抵抗*R*_{2f}と氷片を押し沈める ための抵抗*R*_{2b}に分解し、式(26)に示すようにその総 和をとる。

$$R_{2} = 2\left(\sum_{i}\sum_{j}k_{21}R_{2f(i,j)} + \sum_{i}\sum_{j}k_{22}R_{2b(i,j)}\right)$$
(26)
 $k_{21}, k_{22}: 氷海水槽試験との相関係数$

氷片膜モデルによって求めた*dh*_(j), *L_{g(j)}*からパネ ルと氷片膜との接触範囲を求めて各部にかかる浮力を 算出し、これによってそれぞれのパネルにかかる抵抗 を求める。

5.2.1 各パネルに作用する氷片膜の浮力: f_{b(i,j)}

各パネルに作用する氷片膜の浮力*f_{b(i,j)}*を式(27)から求める。

$$f_{b(i,j)} = hS_{P(i,j)}(\rho_w - \rho_i)g \cdot C_{v(i)} \cdot C_{c(i,j)}$$
(27)

$$S_{P(i,j)} : パネル(i,j)の面積, \rho_i : 氷の密度,$$

 $C_{c(i,j)}$:パネル(i,j)の氷片膜接触率

ここで、 $C_{c(i,j)}$ は完全に接触しているパネルでは 1、 接触していないパネルでは 0、氷片膜の上端と下端で 接触するパネルでは $0 \le C_{c(i,j)} \le 1$ となる。また、対 象のパネルが喫水付近で回転した氷片と接触する場合、 その浮力影響を考慮して $f_{b(i,j)}$ を式(28)で求める。

$$f_{b(i,j)} = hS_{P(i,j)}(\rho_w - \rho_i)g \cdot C_{v(i)} \cdot C_{c(i,j)}$$

+ 0.5 \cdot hD_c(X_{cc})d_{X(j)}(\rho_w - \rho_i)g (28)
$$d_{X(i)}: 断面 j O X 軸方向の幅$$

5.2.2 各パネルの氷片浮力に起因する摩擦抵抗: R_{2f} パネル(i,j)に働く浮力ベクトルを $F_{b(i,j)} = (0, 0, f_{1,j})$ アとし、摩擦力は局部座標系の t_{i} 方向に掛かる

 $f_{b(i,j)}$ 」 とし、摩擦力は局部座標系の t_{e1} 方向に掛かるとして、パネル(i,j)にかかる摩擦抵抗 $R_{2f(i,j)}$ を式(29で求める。

JMU テクニカル・レビュー No.7 (2020 年 1 月)



(39)

 $R_{2f(i,j)} = \mu_k \cdot n_{e(i,j)} \cdot F_{b(i,j)} \cdot a_{x(i,j)}$ (29)5.2.3 浮力に逆らって氷片を押し沈めるための抵 抗:R_{2b}

船が前方にΔL_(i)進む間に、氷片膜がs_(i)だけフレー ムラインに沿って沈み込むとする。ここで、 $\Delta L_{(i)}$ と s_(i)はそれぞれ式(30),(31)で求められる。

$$\Delta L_{(j)} = X_{(j)} - X_{(j-1)} \tag{30}$$

 $s_{(i)} = \left(dh_{(i)} + L_{g(i)}\right) - \left(dh_{(i-1)} + L_{g(i-1)}\right) \quad (31)$ $\Delta L_{(i)}, s_{(i)}$ より、パネル(i, j)にかかる氷片の押し沈め による抵抗 $R_{2b(i,j)}$ を式(32)で求める。なお、 $s_{(j)} < 0$ の場合には、R_{2b(i,i)}=0とする。

$$R_{2b(i,j)} = f_{b(i,j)} \cdot s_{(j)} \cdot \frac{b_{z(i,j)}}{\sqrt{b_{y(i,j)}^2 + b_{z(i,j)}^2}} \cdot \frac{1}{\Delta L_{(j)}}$$
(32)

5.3 氷片の押し分けによる抵抗(R3項)

氷片膜モデルから対象の船体パネル上の氷片が 1 つ後方の断面でどこに移動するかを追跡し、その速度 ベクトルを基に氷片に作用する流体抵抗を計算する。

5.3.1 各パネルに位置する氷片の運動ベクトル

初めに、各パネル上の氷片の運動ベクトルを求める。 氷片と接触するパネル(i,j)について、パネルの重 心を $G_{(i,j)}=(g_{x(i,j)}, g_{y(i,j)}, g_{z(i,j)})、重心から氷片膜$ 下端までのガース長L_{ge(i,j)}とする。

1 つ船尾側の断面 j+1 において、氷片膜下端から フレームラインに沿ってL_{ge(i,j)}上に移動した点 $P_{(i,j)}=(p_{x(i,j)}, p_{y(i,j)}, p_{z(i,j)})$ を求める。パネル(i,j)に接する氷片はG_(i,i)からP_(i,j)に移動するものと考 える。

砕氷船が船速1/で移動するとき、押し分けられた氷 片のY, Z方向の速度ベクトルV_{y(i,j)}, V_{z(i,j)}と移動時 間Δt_(i,j)を式(33),(34),(35)で求める。なお、氷片は YZ面方向にのみ移動し、X軸方向には移動しない と仮定している。

$$V_{y(i,j)} = (p_{y(i,j)} - g_{y(i,j)}) / \Delta t_{(i,j)}$$
(33)

$$V_{z(i,j)} = (p_{z(i,j)} - g_{z(i,j)}) / \Delta t_{(i,j)}$$
(34)

$$\Delta t_{(i,j)} = \left(p_{x(i,j)} - g_{x(i,j)} \right) / V \tag{35}$$

5.3.2 氷片に働く流体力

5.3.1 で求めた氷片の速度ベクトルから、氷片に働 く流体力 $dF_{(i,j)} = (dF_{x(i,j)}, dF_{y(i,j)}, dF_{z(i,j)})^{T}$ を式(36), (37), (38)で求める。

$$dF_{x(i,j)} = 0 \tag{36}$$

$$dF_{y(i,j)} = 0.5 \cdot C_3 \rho_w V_{y(i,j)}^m S_{P(i,j)} C_{\nu(j)} C_{c(i,j)}$$
(37)

$$dF_{z(i,j)} = 0.5 \cdot C_3 \rho_w V_{z(i,j)}^m S_{P(i,j)} C_{\nu(j)} C_{c(i,j)}$$
(38)

C3: 抵抗係数, m: 船速に対する感度を表す係数 この力の船体パネル法線方向成分dF3(i,j)は式(39)のよ うになる。

 $dF_{3(i,j)} = n_{e(i,j)} \cdot dF_{(i,j)}$

5.3.3 氷片の押し分けに伴う抵抗

*dF*_{3(*i*,*j*)}より、パネル(*i*,*j*)における氷片の押し分け に伴う抵抗 $R_{3p(i,j)}$ を式(40)で求める。なお、 $c_{x(i,j)} \ge 0$ の場合には $R_{3p(i,j)} = 0$ とする。

$$R_{3p(i,j)} = k_{31} \mu_k dF_{3(i,j)} \frac{V_{x(i,j)}}{\sqrt{V_{x(i,j)}^2 + V_{y(i,j)}^2 + V_{z(i,j)}^2}} -k_{32} dF_{3(i,j)} c_{x(i,j)}$$
(40)

k31, k32: 氷海水槽試験との相関係数

以上の結果を受けて、船体にかかる押し分けた氷片 による抵抗R3を式(41)で求める。

$$R_3 = 2\sum_i \sum_j R_{3p(i,j)} \tag{41}$$

6. 氷海水槽試験との比較

ICHM の抵抗推定精度を検証するため、氷海水槽 試験で得られた砕氷抵抗との比較を行った。

6.1 供試模型

供試船型の要目を表 1 に示す。Icebreaker 船型は 平行部を持たない砕氷船型であり、Ice BC 船型は長 い平行部を持つ砕氷商船型の船型である。

表1 供試船型の主要目 Table 1 Principal particulars

| name | L(m) | エントランス(m) | B(m) | d(m) |
|------------|------|-----------|------|------|
| Icebreaker | 124 | 62 | 27 | 9.25 |
| Ice BC | 178 | 26.7 | 26.6 | 11.5 |

6.2 Pre-Sawn Ice 試験

氷海水槽試験では Pre-Sawn Ice 試験によって抵抗 の成分分離を行った。Pre-Sawn Ice 試験とは、あら かじめ砕氷パターンに沿って切り込みを入れた氷板を 使用して行う抵抗試験である(図6)。

Pre-Sawn Ice 試験では切り込みを入れることによ って曲げ破壊が発生しなくなるため、純砕氷抵抗R₁ を除外することが出来る。また、R2は船速の影響を 殆ど受けないため、抵抗の V= 0 切片をRっとするこ とで、各抵抗成分の成分分離が可能となる。



図6 プレソーンアイス試験(船底周りの観察) Fig.6 Pre-Sawn Ice test (bottom view)



6.3 計算と実験の比較

表 1 で示した船型に対する計算結果、及び抵抗試 験結果を図 7、図 8 に示す。ここで、図中の点は実験 結果を、実線は計算結果を表している。







抵抗成分の割合に差はあるが、ICHM による砕氷 抵抗 R_i は定性的にも定量的にも実験と良く一致して いる。 今回検証した例では、エントランス長が短い Ice BC 船型の方が Icebreaker 船型に比べて R_3 の氷片 の押し分け抵抗の成分割合が大きい傾向が見られた。

一例として Ice BC の船首周りにおける抵抗分布(単 位面積あたりにかかる抵抗)を図9に示す。



図 9 抵抗分布(Ice BC, h = 1.5m) Fig.9 Drug distribution (Ice BC, h = 1.5m)

図より、船首と肩部、フォアフットで抵抗が大きくな っている様子が確認できた。

7. 結 言

以下の特徴を持つ船体没水部の 3 次元形状を考慮 した氷中抵抗推定法(ICHM)を開発した。

- ・Ionov の抵抗推定法を用いて純砕氷抵抗を推定する。
- ・カスプ破壊が発生する領域の推定には Kotras のカ スプモデルを用いる。
- ・氷片膜モデルによって船体表面上の氷片分布を推定し、船体各部にかかる氷片の押沈、回転、押し分けによる抵抗を求める。
- ・ 喫水付近の氷片の回転、氷片の排除及び充填率を考 慮して氷片膜分布の計算を行う。

ICHM による計算結果を氷海水槽試験結果と比較 したところ、定性的にも定量的にもよく一致した砕氷 抵抗 R_i が得られた。また、今回検証した例では、エ ントランス長が短い Ice BC 船型の方が Icebreaker 船型に比べて氷片の押し分け抵抗 R_3 の成分割合が大 きい傾向が見られた。

船体没水部の形状を基に砕氷片の状態を推定して抵 抗計算に反映させることで、模型試験を行う前に詳細 な船型の検討が行えるようになるため、より高性能な 船型の開発が期待される。

参考文献

1) *G. Lindqvist* : A STRAIGHTFORWARD METHOD FOR CALCULATION OF ICE RESISTANCE OF SHIPS, POAC 89, pp.722-735, 1989.

2) *B. P. Ionov* : ICE RESISTANCE and its components, Arctic and Antarctic Research Institute, 1988. (in Russian)

 3) 安齋 圭祐,山内 豊,水野 滋也:氷片膜モデルによる氷中抵抗の推定法,日本船舶海洋工学会講演会論 文集,第29号,pp.529-533,2019.

4) *T. V. Kotras et. al.* : Predicting Ship Performance in Level Ice, SNAME Transactions, Vol. 91, pp.329-349, 1983.



- 6 -