氷片膜モデルによる水中抵抗の推定法

正会員 安 齋 圭 祐* 正会員 山 内 豊*
正会員 水 野 滋 也*

The Calculation Method of Ice Resistance in Level Ice by the Ice-Covered Hull Model

by Keisuke Anzai, *Member* Yutaka Yamauchi, *Member*
Shigeya Mizuno, *Member*

Summary

In order to estimate an ice resistance in level ice considering the underwater hull geometry, the calculation method was developed. This method uses the Ice-Covered hull Model (ICHM) which estimates ice pieces distribution on hull surface considering that ice pieces' rotation (around water line), concentration and clearing. In this method, an ice resistance due to bending failure is calculated based on Ionov's method. In addition, an ice resistance due to ice pieces is calculated on the basis of ice pieces distribution and movement in ICHM. As the results of comparing with ice tank tests, this method was able to estimate the ice resistance well.

記 号

a_x, a_y, a_z	t_{e1} の X, Y, Z 方向成分
B	船幅
B_{oc}	開水路幅
b_x, b_y, b_z	t_{e2} の X, Y, Z 方向成分
C_{apd}	船尾付加物影響係数
C_h	氷厚影響係数
C_{ip}	氷片の2次破壊影響係数
$C_{rvo(j)}$	基準排水係数
$C_{rv(j)}$	排水係数
$C_v(X), C_{v(j)}$	氷片群の密接率
c_x, c_y, c_z	n_e の X, Y, Z 方向成分
$D_c(X)$	カスプ破壊深さ
d	喫水
$d_{X(j)}$	断面 j の X 軸方向の幅
$dh_{(j)}$	氷板及び水面近傍で回転する氷片によって押し込まれる氷片のずれ量
E	氷板の弾性率
g	重力加速度
h	氷厚

i	ガス方向のカウンタ
j	フレーム断面のカウンタ
$k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}, k_{31}, k_{32}$	抵抗計算のための無次元係数
L	船の水線長
$L_{g(j)}$	氷片に覆われる範囲のガス長
L_{go}	氷片群の密接率と排水を考慮しない氷片に覆われる範囲のガス長
l_c	氷板の特性長
m	船速に対する抵抗の感度を表す係数
R_1	純砕氷抵抗
R_2	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_i	砕氷抵抗($R_1 + R_2 + R_3$)
R_t	全抵抗 ($R_i + R_w$)
R_w	水による抵抗
t_{e1}, t_{e2}, n_e	局所座標系の単位ベクトル
V	船速
V_{irc}	排水限界船速
$X_{(j)}$	断面 j の長手方向中心における X 座標
X_{cc}	曲げ破壊発生領域
X, Y, Z	全体座標系
$Y_w(X), Y_{w(i)}$	X 及び $X_{(j)}$ における半船幅
$\alpha(X)$	水線の開き角
$\beta'(X)$	法線方向のフレア角
$\beta_{(i,j)}$	フレームライン傾斜角
β_c	氷片移動の限界傾斜角

* ジャパン マリンユナイテッド株式会社

$\Delta\beta_c$	氷片離脱の限界傾斜角変化量
$\beta_w(X), \beta_{w(i)}$	喫水線上のフレームライン傾斜角
μ_k	船体と氷の動摩擦係数
ν	氷のポアソン比
ρ_i	氷の密度
ρ_w	水の密度
σ_f	氷の曲げ強度

1. 緒 言

氷海域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船体と氷の接触による抵抗(以下：砕氷抵抗)を受ける。水中航行を行う際、船体の周りでは、氷板の破壊が発生するとともに船体と氷、水が相互に干渉するという複雑な現象が発生している。氷板の破壊を対象とした FEM をベースとした解析¹⁾や氷片の流れを対象とした物理ベースモデリングによる解析²⁾など、それぞれの抵抗発生要因に着目した数値計算の研究が行われているが、それらの要因を統合した数値計算による水中航行の再現と砕氷抵抗の推定は極めて難しい課題となっている。

本論文では、船舶が平坦水中を連続砕氷する際に受ける砕氷抵抗を対象とした抵抗推定法について述べる。平坦水中の砕氷抵抗は水に起因する抵抗に比べて氷に起因する抵抗が大きく、特に水面付近の船体形状が支配的な要素となるため、Lindqvist³⁾や Ionov⁴⁾等によって水面付近の船型パラメータを利用した経験的な要素を含む砕氷抵抗の計算法が考案され、広く用いられている。これらの推定法では没水部の詳細な船体形状を考慮せず、氷板を破壊した後の氷片の押沈や押し分けなどの没水部の船体形状が関与する抵抗については、水面近傍の船型パラメータから没水部の抵抗を類推している。しかし、没水部の船体形状によって氷片の流れは変化するため、精度良く砕氷抵抗を推定するためには没水部全体の船体形状による影響を無視することはできない。

没水部の船体形状を考慮した平坦水中の砕氷抵抗の推定法としては、Park⁵⁾によって理論計算を拡張した計算法が開発されている。ただし、この計算法では船幅に等しいだけの氷片が没水部に接触しているという仮定で計算を行っており、氷片の排除影響などは考慮されていない。これらの影響を考慮して抵抗の推定を行うため、船体表面を膜状に覆う氷片(氷片膜)の分布をモデル化し、氷片の動きを考慮した氷片膜モデル(Ice-Covered Hull Model)によって砕氷抵抗を求める抵抗推定法(以下：ICHM 法)を開発した。

2. ICHM 法

2.1 平坦水中航行時の砕氷現象

氷海船舶が平坦水中を連続砕氷する際の砕氷現象の概念

図を Fig. 1 に示す。

船体が氷板と接触すると、局所的な破壊とともに氷板を撓ませ、曲げ破壊によって円弧上に氷板が破壊される。曲げ破壊によって生成された氷片は、船体が進むにつれて喫水線付近で回転しながら船体に沿って水面下へ押し沈められる。連続砕氷を行う際はこれらの現象が連続的に繰り返され、没水部の船体表面は押し沈められた氷片によって覆われる。また、水面下へ押し沈められた氷片は船体との干渉によってさらに細かく砕かれる。この2次的な破壊現象によって、船尾側の氷片は船首側に比べて小さくなる。

船首部では氷片が水面から逐次供給されるため、氷片どうしは密接しているが、船尾へ向かうにつれて氷片の間隔は広がり、没水部の船体表面を覆う氷片群の密接率は低下していく。また、一部の氷片は船底傾斜等の影響によって船体から排除される。これは排水と呼ばれ、船体周りの氷片分布や推進機と氷片の干渉を考える際に重要となる。

Fig. 1 Ice breaking phenomena in level ice.

平坦水中を連続砕氷する際に発生する抵抗を全抵抗 R_t とする。全抵抗 R_t を砕氷抵抗 R_i と水による抵抗 R_w に分離して考えると、連続砕氷時は船速が遅く、氷板の影響で造波が抑制されるため、水による抵抗 R_w は砕氷抵抗 R_i に比べて小さくなり、全抵抗 R_t は砕氷抵抗 R_i が支配的となる。

ICHM 法は砕氷抵抗 R_i を推定することを目的として開発した。また、ICHM 法では砕氷抵抗 R_i を抵抗の発生要因から以下の3成分に分離して考える。

- ・純砕氷抵抗 R_1 ：氷板の曲げ破壊に起因する抵抗であり、船速の影響は小さく、氷板の氷厚、曲げ強度と水面付近の船型が支配的となる。
- ・氷片の押沈/回転による抵抗 R_2 ：氷片の浮力による抵抗であり、この抵抗成分は船体没水部の船体形状と船体周りの氷片分布が大きく寄与する。この成分も純砕氷抵抗 R_1 と同様に船速の影響は小さい。

- ・氷片の押し分けによる抵抗 R_3 ：船体によって氷片が押し分けられる際の慣性力と氷片が動く際に受ける流体力による抵抗であり、こちらも船体没水部の船体形状と船体周りの氷片分布が大きく寄与する。また、この成分は船速の影響が顕著に表れる。

式(1)にこれらの成分分離をまとめたものを示す。

$$\begin{aligned} R_t &= R_i + R_w \\ &= R_1 + R_2 + R_3 + R_w \end{aligned} \quad (1)$$

砕氷現象は氷板の破壊を伴うために不連続な現象であるが、ICHM 法では幾何学的な条件によって船体と氷の干渉を簡略化して求め、平均的な砕氷抵抗を推定する。

2.2 船体表面パネルと座標系

ICHM 法では船体のフレームラインをガース方向に等分割して船体表面パネルを生成する(Fig. 2)。この際、各フレームラインの分割数は同じとする。また、本論文では船首から j 番目のフレーム断面を断面 j とし、断面 j の水面から船底に向かって i 番目のパネル(パネル(i, j))におけるパラメータを添え字 (i, j)で表す。

Fig. 2 Panel arrangement.

ICHM 法における座標系を Fig. 3 に示す。図の左側は全体座標系を、右側はパネルごとの局所座標系を示している。全体座標系における局所座標系の各軸方向の単位ベクトルを式(2)~(4)で表す。

Fig. 3 Coordinate systems of the ICHM.

$$t_{e1} = (a_x, a_y, a_z) \quad (2)$$

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

$$n_e = (c_x, c_y, c_z) \quad (4)$$

2.3 船体と氷の接触範囲のモデル化

2.3.1 接触範囲の推定法

砕氷抵抗は船体と氷の接触によって生ずるため、砕氷抵抗

を精度良く推定するためには船体と氷の接触範囲の適切な評価が重要となる。

ICHM 法では Kotras のカスプモデル⁶⁾に基づいた曲げ破壊が発生する領域の推定と、水面近傍における氷片の回転、氷片群の密接率、排水を考慮して開発した氷片膜モデルによって船体と氷の接触範囲を推定する。計算の流れを以下に、その概念図を Fig. 4 に示す。

- 1) Kotras のカスプモデルによって曲げ破壊によって生ずるカスプ破壊深さ $D_c(X)$ を算出し、そこから曲げ破壊発生領域 X_{cc} と開水路幅 B_{oc} を求める。この領域において、ICHM 法では時間領域での氷板破壊の追跡は行わず、純砕氷抵抗 R_1 の分布を平均的に取り扱って簡易化しており、破壊前の氷板は船体のこの領域の喫水線に一樣に接触していると仮定している。
- 2) 船の前進により、各断面の幅に相当する量の氷片が水面下の船体表面に沿って沈み込む。各断面における氷片の回転状況を判定し、氷板及び水面近傍で回転する氷片によって押し込まれる氷片のずれ量 $dh_{(j)}$ と氷片群の密接率と排水を考慮しない氷片に覆われる範囲のガース長 $L_{go(j)}$ を求める。
- 3) 氷片群の密接率と排水を考慮しない氷片に覆われる範囲のガース長 $L_{go(j)}$ に対して氷片群の密接率、排水影響を考慮した修正を加え、最終的な氷片に覆われる範囲のガース長 $L_{g(j)}$ を求める。

Fig. 4 Model of ice covered hull area.

なお、実際の砕氷現象では、氷片はいくつかのフレーム断面に跨って存在するが、氷片膜モデルではこれを考慮せず、フレーム断面ごとに独立して船体と氷の接触範囲を評価する。

2.3.2 曲げ破壊発生領域の推定

砕氷船が平坦氷中を航行する際、氷板は円弧状の破壊パターンで曲げ破壊されていき、カスプを形成する(Fig. 5)。氷板を曲げ破壊する際、船体と氷板の接触点からカスプ破壊深さ $D_c(X)$ だけ離れた点でクラックが生ずるため、船首からある範囲より後方では氷板の曲げ破壊は起こらなくなる。この曲げ破壊発生領域を X_{cc} とする。

純砕氷抵抗 R_1 は氷板の曲げ破壊に起因する抵抗であり、 $0 \leq X \leq X_{cc}$ の範囲で発生すると考えられるため、純砕氷抵抗 R_1 を精度良く推定するためには曲げ破壊発生領域 X_{cc} を適切に求める必要がある。

曲げ破壊発生領域 X_{cc} を求めるためには、曲げ破壊による氷板の破壊パターンの推定が必要であり、Ettema⁷⁾による実験的な解析や、Sawamura¹⁾、Kotras⁶⁾、Nevel⁸⁾、Sandro⁹⁾等によって様々な推定法の研究が行われている。ICHM法では船速の影響を考慮し、喫水線上の船型パラメータから容易に計算が可能である Kotras のカスプモデル⁶⁾を使用した。Kotras のカスプモデルの概略図を Fig. 5 に、Kotras のカスプモデルにおけるカスプ破壊深さ $D_c(X)$ の推定式を式(5)に、 $D_c(X)$ を求めるために必要な氷板の特性長 l_c を求める式を式(6)に示す。

Fig. 5 Kotras's cusp model.

$$D_c(X) = \bar{\eta}_3 \cdot l_c \left[1.7153 + 4.2653 \frac{\sin \alpha(X)}{\tan \beta'(X)} \cdot \frac{V}{\sqrt{g \cdot l_c}} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$l_c = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{\rho_w g \cdot 12(1-\nu^2)}} \quad (6)$$

ここで、 E は氷板の弾性率、 h は氷厚、 ν は氷のポアソン比、 ρ_w は水の密度、 V は船速、 g は重力加速度、 $\alpha(X)$ は X における水線の開き角、 $\beta'(X)$ は X における法線方向のフレア角、 $\bar{\eta}_3$ は船首から 40% エントランス長までの間における喫水線上の船体の法線と Z 軸のなす角の平均の余弦である。

$\bar{\eta}_3$ の平均を求める範囲について、Kotras の論文では F.P. から船長の 20%とされていたが、この方法では船首形状が同一の船型であっても船長に応じて曲げ破壊発生領域 X_{cc} の評価が変わってしまうため、エントランス長が基準となるよ

うに範囲を変更した。また、 $\bar{\eta}_3$ の取る範囲は Kotras のカスプモデルの開発に供された船型の範囲に合わせて制限を設け、 $0.57 \leq \bar{\eta}_3 \leq 0.65$ とした。

Kotras のカスプモデルでは、開水路幅 B_{oc} は船幅 B と特性長 l_c から式(7)の様に求められる。

$$B_{oc} = B/2 + 0.2l_c \quad (7)$$

カスプ破壊深さ $D_c(X)$ と開水路幅 B_{oc} の関係から、式(8)を満たす点を曲げ破壊発生領域 X_{cc} とした。

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

ここで、 $Y_w(X_{cc})$ は X_{cc} における半船幅である。

2.3.3 氷片膜モデル

氷片から受ける抵抗を精度良く推定するためには、氷片に覆われる船体表面の範囲を求める必要がある。そこで、水面近傍での氷片の回転、氷片群の密接率、排水を考慮して氷片との接触範囲を求める氷片膜モデルを開発した。

氷片膜モデルでは氷片の分布をフレーム断面ごとに評価し、氷片との接触範囲をガース長として考える。

初めに、 $X = X_{cc}$ におけるカスプ破壊深さ $D_c(X_{cc})$ と開水路幅 B_{oc} 、各断面の半船幅 $Y_{w(j)}$ の関係から氷片の回転状況求め、氷板及び水面近傍で回転する氷片によって押し込まれる氷片のずれ量 $dh(j)$ と、氷片群の密接率と排水を考慮しない氷片に覆われる範囲のガース長 $L_{go(j)}$ を求める。

次に、氷片群の密接率、排水を考慮した係数を算出し、先に求めたガース長 $L_{go(j)}$ に修正を加えることで最終的な氷片に覆われる範囲のガース長 $L_{g(j)}$ を求める。

[氷片の回転と氷片に覆われる範囲]

水面近傍における氷片の回転状況は、氷片の大きさ、船体と氷板の間隔によって場合分けできる。ここでは、それぞれの関係から、5つのケースに場合分けを行う。各ケースはそれぞれ以下の通りである。

Case 1: 曲げ破壊発生領域の中にあり、氷板の縁が船体に接触している状態

Case 2-a: 氷片が水面近傍で回転した状態

Case 2-b: 氷片の回転が終了し、船体に接している状態

Case 2-c: 氷片が氷板の下に潜り込んだ状態

Case 3: 船体後半部で氷片が再び浮き上がってきた状態

各ケースを図示したものを Fig. 6 に、長手方向に各ケースが取り得る範囲を図示したものを Fig. 7 に示す。ここで、 $X_{(j)}$ は断面 j の長手方向中心における X 座標、 $\beta_{w(j)}$ は喫水線上のフレームライン傾斜角、 $d_{c(j)}$ は水面における氷板端部と船体の間隔である。ここで、 $d_{c(j)}$ は開水路幅 B_{oc} を利用して $d_{c(j)} = B_{oc} - Y_{w(j)}$ と求められる。

Fig. 6 Divided cases of rotation.

Fig. 7 Divisions of each area of rotation cases.

各ケースにおける $dh_{(j)}$, $L_{go(j)}$ の算出法を以下に示す.

Case 1) $X_{(j)} \leq X_{cc}$

断面 j が曲げ破壊発生領域に含まれる場合、氷板の縁と船体が接触し、氷片は氷板の下に潜り込むと考える。この時、 $dh_{(j)}$ は氷厚に相当する距離だけ沈み込む。また、水面下に押し沈められた氷片は船体中央から氷板の縁までの間にあったものに相当するため、 $L_{go(j)}$ は断面 j における半船幅 $Y_w(j)$ と等しくなる。 $dh_{(j)}$, $L_{go(j)}$ を求める式をそれぞれ式(9), (10)に示す.

$$dh_{(j)} = h / \cos \beta_{w(j)} \quad (9)$$

$$L_{go(j)} = Y_w(j) \quad (10)$$

Case 2) $X_{(j)} > X_{cc}$

断面 j が曲げ破壊発生領域よりも後方にある場合、氷板端部と船体の間隔 $d_{c(j)}$ と氷厚 h の関係から場合分けを行う。

Case 2-a) $d_{c(j)} > h$

$d_{c(j)}$ が h より大きい場合、水面近傍の氷片は氷板の端部と船体に挟まれて斜めに回転する。この時、氷片はクラックの上端を中心に回転するとして Fig. 8 の様に考える。ここで、図中の②は氷厚の影響で生じる間隔であり、その長さは氷片の角の圧壊(図中の斜線部)によって変動する。

②に対する氷厚の影響を表す係数を氷厚影響係数 C_h として、 $dh_{(j)}$ と $L_{go(j)}$ をそれぞれ式(11), (12)で求める。

Fig. 8 Rotated ice piece around water line (Case 2-a)

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

$$+ \frac{C_h \cdot h \cdot d_{c(j)} \cdot \cos \beta_{w(j)}}{D_c(X_{cc})} \quad (11)$$

$$L_{go(j)} = Y_w(X_{cc}) \quad (12)$$

式(11)の第1項、第2項は Fig. 8 の①に、第3項は②に相当する。また、氷厚影響係数 C_h は0から1の間を取り、 $C_h = 0$ の時、氷片の角は全て圧壊して②=0となる。

氷海水槽試験と比較したところ、エントランス長の長い砕氷に特化した船型では $C_h = 0.5$ 、平行部の長い貨物船などでは $C_h = 1.0$ とした時に良い対応が得られた。

Case 2-b) $d_{c(j)} = h$

$d_{c(j)}$ が h と等しくなる場合、水面近傍の氷片は立ち上がって船体に沿うようになり、船体没水部は水面から氷片に覆われる。この時、 $dh_{(j)}$ と $L_{go(j)}$ をそれぞれ式(13), (14)で求める。

$$dh_{(j)} = 0 \quad (13)$$

$$L_{go(j)} = B_{oc} \quad (14)$$

Case 2-c) $d_{c(j)} < h$

Case 1と同様に氷片は氷板の下に潜り込むと考える。この時、 $dh_{(j)}$ を1)と同様に式(9)で求める。また、 $L_{go(j)}$ は断面 j における半船幅 $Y_w(j)$ ではなく、開水路幅 B_{oc} だけの氷片が船体没水部へ供給されることから、式(14)で求める。

Case 3) $Y_{w(j)} < Y_w(X_{cc})$: 船体後半部

船体後半部では水中へ押し沈められた氷片が再び水面へ浮かんでくる。この時、船体没水部は水面まで船体に沿った氷に覆われるとして $dh_{(j)}$ を式(13)で求める。また、断面 j における半船幅 $Y_{w(j)}$ と等しいだけの氷片が水中に残ると考え、 $L_{go(j)}$ を式(10)で求める。

[氷片群の密接率]

船体表面を覆う氷片群の密接率を考える。船首部で押し沈められた氷片は、後方へ流れていくにしたがって互いに分離し、離れていくことにより、密接率が低下していく。この影響を再現するために、氷海水槽試験による氷片の観察結果から、座標 X のフレーム断面を覆う氷片群の密接率 $C_v(X)$ を X の関数として与える。ここで、 $C_v(X)$ は氷片が隙間なく密集した状態を 1 として、0~1 までの値を取るものとする。また、 $X = X_{(j)}$ における $C_v(X)$ を $C_{v(j)}$ と表す。

[排水の影響]

Fig. 1 及び Fig. 4 で示したように、水中に沈みこんだ氷片のうちいくつかの氷片は、船体表面から離れて外側へ排水される。排水の影響を考慮すると、先に求めた $L_{go(j)}$ に対して実際に氷片に覆われる範囲は小さくなるため、その影響を考慮した修正を考える。

排水の発生要因は没水部の船体形状と船速が支配的であり、船底から船側にかけてのビルジ部において、船体表面の曲率が大きく変化が大きい船型であるほど排水が発生しやすい傾向がある。そこで、ICHM 法では Fig. 9 に示すフレームライン傾斜角 $\beta_{(i,j)}$ とその変化量 $\Delta\beta_{(i,j)}$ をパラメータとして排水の発生を判定し、船速を考慮しない排水影響に関する修正係数(基準排水係数 $C_{rv0(j)}$)を求め、これに船速の影響を加えることで、最終的な排水影響に関する修正係数(排水係数 $C_{rv(j)}$)を算出する。

Fig. 9 Outline of the $\Delta\beta_{(i,j)}$ and $\beta_{(i,j)}$.

排水の発生について、船首から船尾へ向けて順番に判定を行う。その概略図を Fig. 10 に示す。ここで、①の実線は排水を考慮しない氷片に覆われる範囲の下面、②の領域はその断面で排水される氷片、③の領域はその断面に至る前に排水された氷片、④の点線は排水を考慮した氷片に覆われる範囲

の下面、⑤の矢印は排水判定を行う範囲を示している。

船首から順番に排水の発生判定を行い、排水される氷片量を積算していくことで、排水による影響を求めていく。

Fig. 10 Outline of the clearing estimation.

排水の判定と排水される氷片量、排水係数の算出について、具体的な計算法を以下に示す。

1) 排水判定のためのパラメータ算出

初めに、断面 j における排水を考慮しない氷片に覆われる範囲のガース長はその点における半船長 $Y_{w(j)}$ と等しいとして、排水判定を行う範囲のガース長 $L'_{g(j)}$ を式(15)から求める。

$$L'_{g(j)} = (Y_{w(j)} - Y_{rs(j-1)}) / C_{v(j)} \quad (15)$$

ここで、 $Y_{rs(j-1)}$ は船首から断面 $j-1$ までの間に排水された氷片量に相当するガース長である。また、氷片群の密接率が減少すると、氷片量に対して船体が覆われる範囲は広くなるため、その影響を考慮して $C_{v(j)}$ で除算している。

水面から $L'_{g(j)}$ までの範囲におけるフレームライン傾斜角の変化量 $\Delta\beta_{(i,j)}$ の最大値 $\Delta\beta_{m(j)}$ と、その点におけるフレームライン傾斜角 $\beta_{m(j)}$ を求める。フレームライン傾斜角の変化量 $\Delta\beta_{(i,j)}$ は式(16)で求められる。

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

2) 排水の発生判定

$\Delta\beta_{m(j)}$ と $\beta_{m(j)}$ を用いて排水の発生判定を行う。フレームライン傾斜角の変化量が小さいと、隣り合う氷片によって氷片の運動が抑制されるために排水が発生しなくなる。また、フレームライン傾斜角が大きくなるにつれてパネルが水平に近づくため、氷片は動かなくなる。そこで、それぞれの閾値を氷片離脱の限界傾斜角変化量 $\Delta\beta_c$ 、氷片移動の限界傾斜角 β_c として、式(17)の条件を満たすときに排水されると判定する。

$$\Delta\beta_{m(j)} > \Delta\beta_c \quad \text{and} \quad \beta_{m(j)} < \beta_c \quad (17)$$

3) 排水された氷片量の計算

断面 j において排水が発生すると判定された場合、その氷片量に相当するガース長 $y_{rs(j)}$ だけ、船体が氷片に覆われる範囲は短くなる。排水は氷片単位で発生するため、各断面で

排水される氷片量は氷片サイズに比例すると考えられる。ここでは平均的な氷片サイズとして曲げ破壊発生領域の midpoint $X_{cc}/2$ におけるカスプ破壊深さ $D_c(X_{cc}/2)$ を用い、氷片の 2 次的な破壊を考慮した係数 C_{ip} と各フレーム断面の間隔を考慮した係数 $C_{dx(j)}$ による修正を加えて $y_{rs(j)}$ を求めた。 $y_{rs(j)}$ と $C_{dx(j)}$ を求める式をそれぞれ式(18), (19)に示す。

$$y_{rs(j)} = D_c(X_{cc}/2) \cdot C_{ip} \cdot C_{dx(j)} \quad (18)$$

$$C_{dx(j)} = d_{x(j)} / (0.25 l_c) \quad (19)$$

ここで、 $d_{x(j)}$ は断面 j の長手方向の幅、 $C_{dx(j)}$ は $d_{x(j)}$ と長手方向の氷片サイズの比である。氷海水槽試験の実績から、長手方向の氷片サイズを $0.25 l_c$ とした。

断面 j が船体平行部よりも後方にある場合、船体付加物の影響によって氷片の動きが阻害される。そこで、氷片の移動量に相当する $Y_{w(j-1)} - Y_{w(j)}$ と船体付加物の影響を考慮した係数 C_{apd} による修正項を加え、式(18)を式(20)に置き換える。

$$y_{rs(j)} = D_c(X_{cc}/2) \cdot C_{ip} \cdot C_{dx(j)} - (1.0 - C_{apd}) \cdot (Y_{w(j-1)} - Y_{w(j)}) \quad (20)$$

砕氷船では 2 軸、3 軸推進が採用されることも多く、対象によって船体付加物の形状は大きく異なるが、平均的な値として C_{apd} を用いる。

船首から断面 j までの間に排水された氷片量に相当するガース長 $Y_{rs(j)}$ は、式(21)に示す様に $Y_{rs(j-1)}$ に $y_{rs(j)}$ を加えたものとなる。

$$Y_{rs(j)} = Y_{rs(j-1)} + y_{rs(j)} \quad (21)$$

1) から 3) の計算を船首から逐次行っていくことで、各断面における $Y_{rs(j)}$ を求める。

4) 排水係数 $C_{rv(j)}$ の算出

初めに、船速の影響を考慮しない基準排水係数 $C_{rvo(j)}$ を式(22)で求める。 $C_{rvo(j)}$ は供給される氷片量と排水された氷片量の比である。

$$C_{rvo(j)} = Y_{rs(j)} / Y_{w(j)} \quad (22)$$

次に、この基準排水係数 $C_{rvo(j)}$ に船速の影響を加えることで、最終的な排水係数 $C_{rv(j)}$ を求める。高速で連続砕氷を行う場合、排水は発生せずに氷片は船尾へ流れて行ってしまう。そこで、排水が発生しなくなる船速を排水限界船速 V_{irc} として、式(23)を用いて $C_{rv(j)}$ を求める。

$$C_{rv(j)} = C_{rvo(j)} \cdot (V_{irc} - V) / V_{irc} \quad (23)$$

以上の計算から、最終的な氷片に覆われるガース長 $L_{g(j)}$ が密接率と排水を考慮しない氷片に覆われる範囲のガース長 $L_{go(j)}$ 、氷片群の密接率 $C_v(j)$ 、排水係数 $C_{rv(j)}$ を使用して式(24)で求められる。

$$L_{g(j)} = L_{go(j)} \cdot (1 - C_{rv(j)}) / C_v(j) \quad (24)$$

2.4 砕氷抵抗の計算

2.4.1 純砕氷抵抗 R_1

純砕氷抵抗 R_1 は氷板の曲げ破壊に起因する抵抗であり、水面付近の船型が支配的となるため、喫水線上の船型パラメータから R_1 を算出する。

ICHM 法では Ionov の抵抗推定法⁴⁾ を基にした計算によって純砕氷抵抗 R_1 を求める。式(25)に Ionov の抵抗推定法における純砕氷抵抗 R_1 の計算式を示す。式(25)の右辺第 1 項は氷板の曲げ破壊に対する反力による抵抗を、右辺第 2 項は船体と氷板の間で発生する摩擦力を表している。

$$R_1 = 2 \frac{\sigma_f h^2}{b} \left(k_{11} \cdot \int_0^{L/2} \frac{0.57(1.6 \cos \beta_w(X) + 0.11) \tan \alpha(X)}{\sin \beta_w(X)} dX + k_{12} \cdot \mu_k \cdot \int_0^{L/2} \frac{1}{\sin \beta_w(X)} dX \right) \quad (25)$$

ここで、 L は船長、 k_{11} と k_{12} は無次元係数、 σ_f は曲げ強度、 μ_k は船体と氷の動摩擦係数、 b は R_1 を力の次元に合わせるための長さの次元を持った単位パラメータである。

Ionov の抵抗推定法では半船長を積分範囲としているが、実際に曲げ破壊が発生する領域は 2.3.2 で述べたように船首の一部分に限られる。そこで、ICHM 法では Kotras のカスプモデル⁶⁾ で推定した曲げ破壊発生領域を積分範囲とする。また、船体表面上の抵抗分布を考えるために、以下の方法で抵抗を求める。

初めに、各断面 j に作用する純砕氷抵抗 $R_{1s(j)}$ を式(26), (27) で、 $R_{1s(j)}$ の総和を取って本研究における全体の純砕氷抵抗 R_1 を式(28)で求める。

$$R_{1s(j)} = \frac{\sigma_f h^2}{b} \left(k_{11} \cdot \int_{X_f}^{X_a} \frac{0.57(1.6 \cos \beta_w(X) + 0.11) \tan \alpha(X)}{\sin \beta_w(X)} dX + k_{12} \cdot \mu_k \cdot \int_{X_f}^{X_a} \frac{1}{\sin \beta_w(X)} dX \right) \quad (26)$$

$$X_f = X_{(j)} - d_{x(j)} / 2, X_a = \min(X_{(j)} + d_{x(j)} / 2, X_{cc}) \quad (27)$$

$$R_1 = 2 \sum_j R_{1s(j)} \quad (28)$$

ここで、曲げ破壊発生領域より後方では曲げ破壊が発生しないため、 $X_f \geq X_{cc}$ の時、 $R_{1s(j)} = 0$ とする。

次に、 $R_{1s(j)}$ をガース方向に分解して各パネルに作用する純砕氷抵抗 $R_{1p(i,j)}$ を求める。曲げ破壊による抵抗は氷板との接点にのみ作用するため、局所的かつ時間変動を伴うものであるが、平均的には水面から氷厚 h の深さまでの範囲 (Fig. 6, Case 1 の $dh_{(j)}$ に相当) に均一に作用するものとして、式(29)で求める。

$$R_{1p(i,j)} = R_{1s(j)} \cdot S_{LI(i,j)} / \sum_i S_{LI(i,j)} \quad (29)$$

ここで、 $S_{LI(i,j)}$ は水面から $h / \cos \beta_{w(j)}$ の範囲に含まれるパネル (i,j) の面積である。

2.4.2 氷片の押沈/回転による抵抗 R_2

氷片の押沈/回転による抵抗 R_2 は、氷片の浮力に起因する摩擦抵抗 R_{2f} と氷片を押し沈める際の抵抗 R_{2b} に分解して考える。

初めに、各パネルに作用する氷片の浮力 $f_{b(i,j)}$ を式(30)から

求める。

$$f_{b(i,j)} = hS_{P(i,j)}(\rho_w - \rho_i)g \cdot C_{v(i)} \cdot C_{c(i,j)} \quad (30)$$

ここで、 $S_{P(i,j)}$ はパネル (i,j) の面積、 ρ_w は水の密度、 ρ_i は氷の密度、 $C_{c(i,j)}$ はパネル (i,j) が氷片に覆われる割合である($0 \leq C_{c(i,j)} \leq 1$)。また、対象とするパネルが回転した氷片と接触する場合(氷片の回転: Case 2-b)には、回転氷片の浮力を船体と氷板で半分ずつ支持するとして $f_{b(i,j)}$ を式(31)で求める。

$$f_{b(i,j)} = hS_{P(i,j)}(\rho_w - \rho_i)g \cdot C_{v(i)} \cdot C_{c(i,j)} + 0.5 \cdot hD_c(X_{cc})d_{X(j)}(\rho_w - \rho_i)g \quad (31)$$

次に、各パネルに作用する氷片の浮力 $f_{b(i,j)}$ を基に、各パネルにおける氷片の浮力に起因する摩擦抵抗 $R_{2f(i,j)}$ を式(32)で求める。ここで、摩擦力は各パネルの t_{e1} 方向に作用すると考え、 $R_{2f(i,j)}$ は $f_{b(i,j)}$ のパネル法線方向成分に動摩擦係数をかけたものとパネル (i,j) における t_{e1} ベクトルの X 方向成分 $a_{x(i,j)}$ の積とした。

$$R_{2f(i,j)} = \mu_k \cdot n_{e(i,j)} \cdot (0, 0, f_{b(i,j)})^T \cdot a_{x(i,j)} \quad (32)$$

最後に、各パネルにおける氷片を押し沈める際の抵抗 $R_{2b(i,j)}$ を求める。Fig. 11に示す様に、各断面間における氷片の沈下量 $s_{(j)}$ を求め、断面間の距離 $\Delta L_{(j)} (= X_{(j)} - X_{(j-1)})$ だけ船が進む間に $s_{(j)}$ だけ氷片が沈むとすると、その仕事量の関係から、 $R_{2b(i,j)}$ は式(33), (34)で求められる。

Fig. 11 Submerged depth of ice pieces $s_{(j)}$.

$$s_{(j)} = (dh_{(j)} + L_{g(j)}) - (dh_{(j-1)} + L_{g(j-1)}) \quad (33)$$

$$R_{2b(i,j)} = f_{b(i,j)} \cdot s_{(j)} \cdot \frac{b_{y(i,j)}}{\sqrt{b_{y(i,j)}^2 + b_{z(i,j)}^2}} \cdot \frac{1}{\Delta L_{(j)}} \quad (34)$$

ここで、 $b_{y(i,j)}$, $b_{z(i,j)}$ はそれぞれパネル (i,j) における t_{e2} ベクトルの Y, Z 方向成分である。また、 $s_{(j)} < 0$ の場合は氷片が浮上してきている状態であり、抵抗には寄与しなくなるため、 $R_{2b(i,j)} = 0$ とする。

氷片の押し沈め/回転による抵抗 R_2 は各パネルにおける $R_{2f(i,j)}$ と $R_{2b(i,j)}$ の総和であり、式(35)によって求められる。

$$R_2 = 2(\sum_i \sum_j k_{21} R_{2f(i,j)} + \sum_i \sum_j k_{22} R_{2b(i,j)}) \quad (35)$$

ここで、 k_{21} と k_{22} は無次元係数である。

2.4.3 氷片の押し分けによる抵抗 R_3

氷片の押し分けによる抵抗 R_3 は、氷片の慣性力と氷片が動く際に受ける流体力に相当する。そこで、氷片膜モデルによって推定した氷片分布から氷片の流れを追跡することで、

その移動速度を求め、それを基に抵抗を推定する。氷海水槽試験における氷片運動の観察結果から、氷片の前後方向の移動量はその他の方向に比べて相対的に小さいため、空間固定座標系の下では前後方向に移動しないものとした。

初めに、氷片の速度ベクトルを以下の手順で求める。

- 1) 氷片に接しているパネルの中心 $G_{(i,j)}$ と、 $G_{(i,j)}$ から氷片膜の最下端までの距離(ガース長) $L_{ge(i,j)}$ を求める。
- 2) $G_{(i,j)}$ 上にある氷片が後方の断面 $j+1$ 上に移動した際の座標 $P_{(i,j)}$ を求める。 $P_{(i,j)}$ は断面 $j+1$ における氷片膜の下端から、フレームラインに沿って $L_{ge(i,j)}$ だけ上った点とする(Fig. 12)。

Fig. 12 Ice tracking method.

- 3) $G_{(i,j)}$ と $P_{(i,j)}$ の全体座標系における各成分をそれぞれ式(36), (37)の様に表す。また、氷片は前後方向に移動しないという仮定に基づき、 $G_{(i,j)}$ から $P_{(i,j)}$ へ移動する間にかかる時間 $\Delta t_{(i,j)}$ を式(38)で求める。

$$G_{(i,j)} = (g_{x(i,j)}, g_{y(i,j)}, g_{z(i,j)}) \quad (36)$$

$$P_{(i,j)} = (p_{x(i,j)}, p_{y(i,j)}, p_{z(i,j)}) \quad (37)$$

$$\Delta t_{(i,j)} = (p_{x(i,j)} - g_{x(i,j)})/V \quad (38)$$

- 4) $G_{(i,j)}$ から $P_{(i,j)}$ へ移動する氷片の速度ベクトル $V_{y(i,j)}$, $V_{z(i,j)}$ を式(39), (40)によって求める。

$$V_{y(i,j)} = (p_{y(i,j)} - g_{y(i,j)})/\Delta t_{(i,j)} \quad (39)$$

$$V_{z(i,j)} = (p_{z(i,j)} - g_{z(i,j)})/\Delta t_{(i,j)} \quad (40)$$

上記の方法で求めた氷片の速度ベクトル $V_{y(i,j)}$, $V_{z(i,j)}$ を基に、各パネルに作用する氷片の押し分けによる力 $dF_{(i,j)}$ を式(41), (42)で求める。

$$dF_{(i,j)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.5 \cdot C_3 \rho_w V_{y(i,j)}^m S_{P(i,j)} C_{v(j)} C_{c(i,j)} \\ 0.5 \cdot C_3 \rho_w V_{z(i,j)}^m S_{P(i,j)} C_{v(j)} C_{c(i,j)} \end{pmatrix} \quad (41)$$

$$C_3 = -567.67 \left(\frac{h}{\sqrt{Bd}} \right)^3 - 872.81 \left(\frac{h}{\sqrt{Bd}} \right)^2 + 297.55 \frac{h}{\sqrt{Bd}} - 5.7218 \quad (42)$$

ここで、 C_3 は著者らが行った氷海水槽試験の結果と $C_3 = 1$ とした時の計算結果の相関を氷厚と主要目によるパラメータ $h/\sqrt{Bd}$ によって整理して得られた氷片の抵抗係数、 m は抵抗

に対する船速の感度を表す係数である。

$dF_{(i,j)}$ とパネルの法線ベクトル $n_{e(i,j)}$ から、 $dF_{(i,j)}$ のパネルに対して垂直に働く成分 $dF_{3(i,j)}$ を式(43)で求める。

$$dF_{3(i,j)} = n_{e(i,j)} \cdot dF_{(i,j)} \quad (43)$$

各パネルに働く氷片の押し分けによる抵抗 $R_{3p(i,j)}$ は $dF_{3(i,j)}$ による摩擦力と $dF_{3(i,j)}$ の X 軸方向成分の和となる(式(44))。

$$R_{3p(i,j)} = k_{31}\mu_k dF_{3(i,j)} \frac{V}{\sqrt{V^2 + V_{y(i,j)}^2 + V_{z(i,j)}^2}} - k_{32} dF_{3(i,j)} c_{x(i,j)} \quad (44)$$

ここで、式(44)の第1項は $dF_{3(i,j)}$ による摩擦力に関する項であり、氷片の移動方向に摩擦力が働くとして、その長手方向成分を求めている。また、第2項は $dF_{3(i,j)}$ の X 軸方向成分である。各項にそれぞれかかっている k_{31} と k_{32} は無次元係数である。なお、船体後半部では氷片の押し分けによる抵抗は働かなくなるため、 $c_{x(i,j)} > 0$ の場合、 $R_{3p(i,j)} = 0$ とする。

最終的な氷片の押し分けによる抵抗 R_3 は $R_{3p(i,j)}$ の総和であり、式(45)で求められる。

$$R_3 = 2 \sum_i \sum_j R_{3p(i,j)} \quad (45)$$

3. ICHM 法の検証

3.1 氷海水槽試験

3.1.1 供試船型と実験条件

ICHM 法による砕氷抵抗の推定精度を検証するため、氷海水槽試験の結果と比較した。供試船型として、平行部を持たない純砕氷船型である Icebreaker 船型と、長い平行部を持つ砕氷商船の船型である Ice MV 船型を使用した。それぞれの要目を Table 1 に示す。この船型に対して、実船スケールで氷厚 $h = 1.5\text{m}$ 相当の平坦氷砕氷航行条件で実験を行った。

Table 1 Principal particulars.

name	L(m)	Entrance(m)	B(m)	d(m)
Icebreaker	126	63	27	9.1
Ice MV	178	29.3	26.6	11.5

3.1.2 Pre-Sawn Ice 試験

氷海水槽試験の結果を比較するにあたり、Pre-Sawn Ice 試験によって抵抗成分を分離した。Pre-Sawn Ice 試験とは、あらかじめ砕氷パターンを再現した切り込みを入れた氷板を使用して行う抵抗試験である(Fig. 13)。Pre-Sawn Ice 試験では切り込みによって氷板の破壊が発生しなくなるため、純砕氷抵抗 R_1 を除外することが出来る。そのため、平坦氷中抵抗と Pre-Sawn Ice 中抵抗の差分を取ることで、純砕氷抵抗 R_1 を求めることができる。また、残りの氷片の押し沈/回転による抵抗 R_2 と氷片の押し分けによる抵抗 R_3 について、 R_2 は船速 V の影響を殆ど受けないため、試験によって得られた抵抗の $V = 0$ 切片を R_2 とみなすことができる。これによって各抵

抗成分の分離が可能となる。Pre-Sawn Ice 試験における抵抗分離法をグラフで示したものを Fig. 14 に示す。

Fig. 13 Pre-Sawn Ice test (bottom view).

Fig. 14 Resistance component separation by Pre-Sawn Ice test.

3.2 計算条件

ICHM 法では氷片の分布や抵抗を求めるために様々な係数を用いている。この検証において使用した係数を Tables 2, 3 に、氷片群の密接率 $C_v(X)$ を Fig. 15 に示す。これらの係数は、供試船型に類似した複数の船型による氷海水槽試験の氷片流れの観察及び抵抗分析結果を基に定めたものである。3.1.1 で述べたように、Icebreaker 船型と Ice MV 船型は互いに異なる特徴を持っているが、ここでは C_h 以外同じ係数を用いて実験と同様の条件で計算を行い、その結果を比較した。

Table 2 Calculation parameters of ice pieces distribution.

Ice pieces rotation around a water line			
C_h	0.5 (Icebreaker), 1.0 (Ice MV)		
Parameters and coefficients of ice pieces clearing			
β_c	88°	C_{ip}	0.4
$\Delta\beta_c$	18°	C_{apd}	0.5
V_{irc}	8kt		

Table 3 Calculation parameters of ice resistance.

k_{11}, k_{12}	0.034	k_{21}, k_{22}	1.535
k_{31}, k_{32}	1.0	m	1.3

Fig. 15 Filling rate of ice pieces.

3.3 氷片分布の比較

ICHM 法では船型の特徴を考慮して没水部の氷片分布を推定し、そこから氷片分布に起因する抵抗計算を行う。氷片分布推定法の有効性を検証するため、氷海水槽試験時の氷片流れの観測結果と ICHM 法で求められた氷片分布を比較した。Figs. 16, 17 に Icebreaker 船型と Ice MV 船型をそれぞれ船底から見た氷片分布の状態を示す。進行方向は右向きであり、この時の条件は氷厚 $h = 1.5\text{m}$ 、船速 $V = 3\text{kt}$ である。また、上側の図は氷片群の密接率と排水の影響を考慮して計算を行った結果であり、下側の図は氷片群の密接率と排水の影響を除外して、 $L_{g(j)} = L_{go(j)}$ として計算を行った結果である。

計算結果より、特に Icebreaker 船型の後半部では、上側の図の方がより実験結果に近い氷片分布となっており、氷片群の密接率と排水の影響を考慮することで、より精度良く氷片分布を推定できることが確認できた。

Fig. 16 Ice pieces distribution (Icebreaker).

Fig. 17 Ice pieces distribution (Ice MV).

3.4 砕氷抵抗と各抵抗成分の割合

供試船型に対する計算結果及び実験結果をそれぞれ Figs. 18, 19 に示す。ここで、図中の点は実験結果を、実線は ICHM 法による計算結果、破線は Ionov の抵抗推定法、一点鎖線は Lindqvist の抵抗推定法による計算結果を示している。

Figs. 18, 19 より各抵抗推定法の結果を比較すると、Ionov の抵抗推定法では Ice MV に対して、Lindqvist の抵抗推定法では Icebreaker 船型に対して砕氷抵抗 R_i を過大に評価しており、船型によって抵抗推定精度に大きな差が生じたが、ICHM 法ではどちらの船型に対しても大きく外れることなく抵抗を推定できた。また、ICHM 法によって得られた抵抗成分の割合は、実験結果に対して若干の差は見られるものの、良く一致した解が得られた。

Fig. 18 Calculation results (Icebreaker).

Fig. 19 Calculation results (Ice MV).

3.5 抵抗分布

3.5.1 純砕氷抵抗 R_i の分布

ICHM 法によって求めた $h = 1.5\text{m}$ 、 $V = 3\text{kt}$ における各船型の純砕氷抵抗 R_i の分布をそれぞれ Figs. 20, 21 に示す。両船型共に、船首端と肩部(曲げ破壊発生領域の後端)で抵抗が大きくなった。式(26)~(28)で示した様に、 R_i は喫水線上の α 、 β によって求められる。船首端では W.L. の開き角 α が大きくなり、肩部ではフレームラインの開き角 β が小さくなる傾向があるため、これに伴って曲げ破壊の抵抗が増加し、このような抵抗分布となった。特に肩部については曲げ破壊発生領域に応じて抵抗が大きく変化するため、ICHM 法では曲げ破壊発生領域の推定精度が重要となる。

Fig. 20 Resistance distribution of R_1 (Icebreaker). Fig. 21 Resistance distribution of R_1 (Ice MV).

3.5.2 氷片による抵抗(R_2+R_3)の分布

ICHM 法によって求めた $h = 1.5\text{m}$, $V = 3\text{kt}$ における各船型の氷片による抵抗(R_2+R_3)の分布をそれぞれ Figs. 22, 23 に示す。両船型共に、フォアフット上部の曲率が大きい領域(図中の矢印で示した領域)で抵抗が大きくなった。また, Ice MV 船型は Icebreaker 船型に比べてエントランスが短く, 船首部のフレームライン形状の変化が大きいため, この影響がより顕著となった。

Fig. 22 Resistance distribution of $R_2 + R_3$ (Icebreaker). Fig. 23 Resistance distribution of $R_2 + R_3$ (Ice MV).

4. 結言

船体没水部の 3 次元形状を厳密に反映して砕氷抵抗を推定する計算法(ICHM 法)を開発した。その特徴は以下のとおりである。

- ・純砕氷抵抗の推定には Ionov の抵抗推定法を用いる。
- ・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や動きを推定し, 船体各部に作用する氷片の押沈, 回転, 押し分けによる抵抗を求める。

- ・氷片膜モデルの計算では, 喫水付近における氷片の回転, 船体表面を覆う氷片群の密接率及び排水の影響を考慮し, 船体表面の氷片の分布や動きを推定する。

ICHM 法による計算結果を氷海水槽試験結果と比較したところ, 以下の結果が得られた。

- ・氷片群の密接率及び排水を考慮することで, 船体表面上の氷片分布をより精度良く推定できることが確認された。
- ・砕氷抵抗 R_i について実験と良く一致した解が得られた。
- ・Ionov の抵抗推定法, Lindqvist の抵抗推定法に比べて船型に対するロバスト性に優れていることが確認できた。
- ・ICHM 法では肩部で純砕氷抵抗 R_1 が増大する傾向があるため, 曲げ破壊発生領域の推定精度が重要となる。

ICHM 法では船型を厳密に反映して抵抗を推定することができるため, これを活用することで, 効率的な砕氷船型の開発や砕氷船型の最適化の実現が期待される。

参考文献

- 1) Sawamura, J., Yamauchi, Y., and Anzai, K.: Simulation of Ice Force and Breaking Pattern for Icebreaking Ship in Level Ice, Proceeding of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean and Arctic Engineering, OMAE2017-61583., 2017
- 2) Konno, A., Mizuno, S.: Numerical Estimation of Ice Clearing Performance of Ships and Its Validation with Model Tests, Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference, Vol. 1, 1679-1683, 2018
- 3) Lindqvist, G.: A STRAIGHTFORWARD METHOD FOR CALCULATION OF ICE RESISTANCE OF SHIPS, POAC 89, 10th Intl Conference, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC, 2, 722-735, 1989
- 4) Ionov, B. P.: ICE RESISTANCE and its components, Arctic and Antarctic Research Institute, Leningrad, 1988 (in Russian)
- 5) Park, K., Kum, M., Kim, H.: Calculation of ice clearing resistance using normal vector of hull form and direct calculation of buoyancy force under the hull, IJNAOE (2015), 699-707, 2015
- 6) Kotras, T. V., Baird, A. V., and Naegle, J. N.: Predicting Ship Performance in Level Ice, SNAME Transactions, Vol. 91, 329-349, 1983
- 7) Ettema, R., Stern, F., Lazaro, J.: DYNAMICS OF CONTINUOUS-MODE ICEBREAKING BY A POLAR-CLASS ICEBREAKER HULL, IIHR Report

No.314, 1987

- 8) Nevel, D. E.: The Narrow Free Infinite Wedge on an Elastic Foundation, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory - Corps of Engineers, 1961
- 9) Sandro, E., Sören E., Rüdiger, B. P., Bernt L.: A NUMERICAL MODEL TO INITIATE THE ICEBREAKING PATTERN IN LEVEL ICE, Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2014-23409, 2014