

1. ま え が き

砕氷船を設計するときに明らかにすべき技術的課題は数多くあるが、平坦水中を一定船速で航行するときの推進性能を合理的に評価することは第一義的に重要な課題である。水中航行時の推進性能を合理的に評価するためには、水中航行時の砕氷船の受ける抵抗、砕氷抵抗と呼ぶ、を的確に推定できる手法の確立が必要である。

これまでに数多くの理論的、実験的砕氷抵抗推定法(式)が提案されているが、それらはすべてほぼ同じ骨組を持っている。著者らはその骨組み自体に長年疑問を持っていた。具体的には、砕氷抵抗を氷板を破壊するのに必要な成分(破壊成分と呼ぶ)と破壊された氷片を移動させるのに必要な成分(サブマージョン成分と呼ぶ)に分離したときに、破壊成分が速度(船速)には依存しないとしている点に疑問を抱いていた。本研究では、その疑問に実験的に応えるために、新しい砕氷抵抗分離試験(TBI試験と呼んでいる)を考案し、それを用いて破壊成分の速度依存性の有無を調査し、破壊成分が船速に依存する可能性が高いことを示す。

本論文では、まず第2章においていくつかの在来の実験的砕氷抵抗推定式を紹介し、それらに対する著者らの持つ疑問の根拠を述べる。第3章では破壊成分の速度依存性の有無を明らかにするための方法論を述べる。第4章では新たに考案した砕氷抵抗分離試験-TBI試験の方法とそれを用いた試験及び試験結果に関して論述する。第5章では試験結果を基に破壊成分の速度依存性の有無を示し、検討を加える。

2. 在来の実験的砕氷抵抗推定式に対する疑問

これまでに数多くの理論的砕氷抵抗推定式が提案されている(例えば、Milano¹⁾, Kotras et al.²⁾, Carter³⁾) が、ここで紹介するには複雑すぎるので、以下に著名な実験的砕氷抵抗推定式を紹介することにする。理論的砕氷抵抗推定式も基本的には同様の骨組みを持っていると理解しても良い。

1) Lewis & Edwards⁴⁾ の式

Lewis & Edwards は次の実験的砕氷抵抗推定式を提案している。

$$R = a\sigma_f h^2 + b\rho_i g h^2 B + c\rho_i v^2 B h \quad (1)$$

ここに、 R ：砕氷抵抗

B ：船幅

ρ_i ：氷の密度

h ：氷厚

σ_f ：氷板の曲げ強度

v ：船速

g ：重力加速度

係数 a, b, c は船型(摩擦係数を含む)によって定まる実験定数である。すなわち、一連の模型試験あるいは実船試験

の結果を用いて係数を定めることにより試験に供した船の砕氷抵抗を推定できるとしている。

2) Tatinclaux⁵⁾ らの式

Tatinclaux らはカナダ沿岸警備隊の R-class の砕氷船模型を用いた ITTC の比較試験の結果を次の3種の式で整理することを試みた。

$$R_n = a + bF_n + cF_n^2 + dC_n \quad (2)$$

$$R_n = a + bF_n + dC_n \quad (3)$$

$$R_n = a + cF_n^2 + dC_n \quad (4)$$

ここで、 $R_n = R/(\rho_w g B h^2)$

$$F_n = v/(gh)^{1/2}$$

$$C_n = \sigma_f/(\rho_w gh)$$

$\rho_w g$ ：水(海水)の単位体積重量

係数 a, b, c, d は前項と同様である。

いずれの式も基本的骨組みは同様で、破壊成分(上記の式で曲げ強度が掛かっている項)は船速とは独立である。

加藤ら⁶⁾は傾斜した円柱構造物を対象とした、氷海水槽における模型実験を行い、Fig.1 に示された結果を得た。同図で縦軸は実験で得た氷荷重を、氷質の多少の相違を考慮するために、試験氷板の曲げ破壊パラメータ $\sigma_f h^2$ で正規化した量である。横軸は氷板の進行速度(実験では曳引車の進行速度)である。氷荷重はこの場合氷板の曲げ破壊荷重(破壊成分)と破壊された氷片を移動させるのに必要な力の和として与えられるから、この図からすぐに破壊成分が速度に依存すると結論できないが、少なくとも破壊成分が速度に依存しないと断定するには疑問符を付けざるを得ない結果である。

破壊成分はある境界条件の基における弾性支承上の半無限弾性板の曲げ破壊荷重であると考えられることができる。静的に考えた場合、前記の(1)式等に示されているように $\sigma_f h^2$ にある境界条件に見合った定数を乗じたものとなる。すなわち、静的に考えた場合には破壊成分を規定する因子

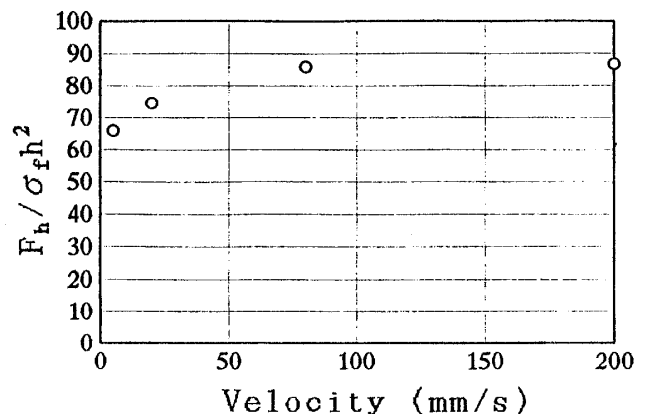


Fig. 1 Relationship between velocity and normalized ice force obtained from experiments on inclined pile structure

は曲げ強度、氷厚そして境界条件（船型）だけである。しかし動的に考えた場合、すなわち慣性力を考慮した場合に事情が異なって来るのではないかと予想される。また、船体の前進により氷板下の水圧が変化すると、弾性支承の強さ、すなわちバネ定数が変化し、その結果曲げ破壊荷重が変化することも予想される。

慣性力の影響に関しては、Sorensen⁷⁾が弾性支承上の半無限弾性板の自由縁に一定速度を持つ荷重が作用したときの曲げ破壊荷重に関する理論解を導いている。彼の解析によると、モーメント耐荷力を一定とした場合、荷重の速度が大きくなればなるほど曲げ破壊荷重は大きくなる。すなわち、荷重の速度が大きいということは船速が大きいことに対応するから、船速が大きくなればなるほど破壊成分が大きくなるのが彼の理論解析から予想される。

船体の前進による氷板下の水圧変化の影響に関しては、俵と堀水⁸⁾が砕氷船の前進による氷板下の水圧変動の曲げ破壊荷重に及ぼす影響を研究している。彼らは2次元流場計算により船体の前進による氷板下の水圧変化を求め、船速が大きいほど氷板下の水圧増加が大きいことを示した。彼らは弾性支承上の梁理論における反力増加として、その水圧増加を加えて解析し、弾性支承上の片持梁の最大荷重（破壊荷重）を求めた。その結果、載荷点から見た曲げモーメントが最大となる点（破断点）までの距離は船速が大きくなると小さくなるという結果を得た。これは砕氷片が船速と共に小さくなることを示し、実船及び模型船での観測結果と一致する傾向である。また、モーメント耐荷力を一定としたときに、破壊荷重は船速が大きくなると大きくなり、それは船速の二乗に比例するという計算結果を得ている。

氷板の曲げ破壊荷重が船速といかなる関数関係を持つかはさておき、少なくとも船速増加による荷重速度の増大に由来する動的効果、及び氷板下の水圧の増大による反力増加により、砕氷抵抗の破壊成分は船速に依存する（船速と共に増加する）と考えるべきではないかと思われる。

さらに考慮すべき破壊成分の速度依存性として、モーメント耐荷力自体の速度依存性が考えられる。これに関しては相矛盾する試験結果が提出されており、定説は無いが、近似的にはモーメント耐荷力は速度依存しないとする説が多く、本論ではとりあえずそれに従うことにする。しかしながら、それを完全に肯定したわけではなく、砕氷抵抗の破壊成分の速度依存性を考える上で今後明確にしなければならない課題であると考えられる。

3. 実験的に破壊成分の速度依存性を検証するための方針

いま、ある氷厚 $h = h_m$ 、曲げ強度 $\sigma_f = \sigma_{fm}$ 、速度 $v = v_m$ で行った平坦水中の砕氷抵抗試験から得た砕氷抵抗を R_i とし、それが氷板を破壊するのに必要な成分（破壊成分） R_b 、

破壊された氷片を移動させるのに必要な成分（サブマージョン成分） R_s と水による抵抗 R_w の和、すなわち次式で表現されると仮定する。

$$R_i = R_b + R_s + R_w \quad (5)$$

同時に、同じ氷厚、速度で破壊成分を除去した砕氷抵抗分離試験を行ったとすると、その試験で得た抵抗 R' は次式であると考えることができる。

$$R' = R_s + R_w \quad (6)$$

故に、氷厚 $h = h_m$ 、曲げ強度 $\sigma_f = \sigma_{fm}$ 、速度 $v = v_m$ で行った平坦水中の砕氷抵抗試験における破壊成分は、次式より求めることができる。

$$R_b = R_i - R' \quad (7)$$

次に、氷板の破壊荷重が次式のような形で記述できると仮定する。この仮定は、モーメント耐荷力を一定とすると、氷板の破壊荷重に関するこれまでの研究（例えば、Nevel⁹⁾）から、十分に合理的であると考えられる。

$$F_b = R_b = \alpha \sigma_f h^2 \quad (8)$$

ここに、 F_b ：氷板の破壊荷重

α ：境界条件によって定まる定数

一方、サブマージョン成分は次式のような形で記述できることを仮定する。サブマージョン成分は氷片の受ける浮力に強く関係するから、この仮定も合理的であると考えられる。

$$F_s = R_s = \beta (\rho_w g - \rho_i g) h \quad (9)$$

ここに、 F_s ：氷片の移動に必要な力

$\rho_i g$ ：氷の単位体積重量

β ：境界条件によって定まる定数

水と氷の単位体積重量は一定値と見なせるから、砕氷抵抗分離試験によって得られた抵抗 R' は次式のように記述できる。

$$R' = \beta' h + R_w \quad (10)$$

もし、ある速度で行った一連の平坦水中の砕氷抵抗試験、砕氷抵抗分離試験から得られた R_b 、 R' がそれぞれ(8)式、(10)式を満足したとしたら、比例定数 α 及び β' の速度依存性を調査することにより、破壊成分、サブマージョン成分の速度依存性を調査することができる。そして、その結果破壊成分が船速と共に増大するとしたら、第2章で述べた動的効果による慣性力の影響、氷板下の水圧増加の影響による破壊成分の速度依存性が存在することを間接的ではあるが証明できる。

4. 模型試験

4.1 TBI試験

前章で述べた方法論は、砕氷抵抗が破壊成分とサブマージョン成分+水の抵抗に分離できることを前提としている。すなわち、適切な砕氷抵抗分離試験が行われることを前提としている。最も良く行われる砕氷抵抗分離試験はPre-sawn試験である。この試験はあらかじめ氷板をある

パターンで切っておくことにより、破壊成分を無くそうとのアイデアの試験である。しかしながら、実際の試験における砕氷パターンを Pre-sawn によって作り出すのは非常に困難である。Pre-sawn のパターンの多少差異が得られる抵抗に及ぼす影響は少ないと言う研究はあるが、やはり実際の砕氷パターンと異なると言うことは気になることである。

ある船型では、砕氷船としては好ましいことではないかも知れないが、破壊された氷片が周囲の健全な氷板下に排出されず、多少の乱れは生じるがほぼそのまま航跡に浮かび上がってくる。すなわち、平坦水中の試験によって生じた砕氷パターンがほぼ完全な形で保存されている。このほぼ完全に残された砕氷パターンを使用できれば理想的な砕氷抵抗分離試験ができるのではないかと考え、Pre-sawn 試験に代わる砕氷抵抗分離試験として以下に述べる試験法を考案した。

平坦水中の試験が終了した後に、試験開始位置まで後進することによって航跡に残されていた氷片は航跡から排除されてしまう。それ故、基本的な要請は平坦水中の試験によってできた砕氷パターンを残すにはどうしたら良いかと言うことである。平坦水中の試験によって航跡に残された砕氷片は後進により航跡から排除されてしまうのだから、水中を後進しないようにすれば航跡に残された砕氷片は乱されることはない。よって、平坦水中の試験が終了した位置で模型船を空中に釣り上げ、その状態で後進すれば良い。

このことを多少の試行錯誤はあったが、最終的に可能とすることができた。砕氷パターンは後進終了後の簡単な調整によりほぼ完全な形で保存でき、次に行う抵抗試験に供することができた。著者らはこの試験を、砕氷パターンがほぼ完全に使用できることから、少し大げさではあるが True Broken Ice (TBI) 試験と銘名している。しかし、この TBI 試験は、氷片が航跡に残されると言う砕氷船としては好ましくない船型の模型船の試験にしか行えないことは明かであり、汎用的な試験法とは言えない。TBI 試験は汎用的試験法ではないが、本研究の目的である破壊成分の速度依存性を検証するための方法論 (第3章) に対してはふさわしい試験法であると考えられる。

4.2 模型試験

本研究に用いた模型船は中型砕氷船の 1/20 の模型である。本船の主要目を Table.1 に示した。

模型氷は、0.75%重量濃度の尿素水溶液を、wet seeding の技法を用いて初期氷板を生成し、所定の厚さまで結水させた、いわゆる尿素水である。1回の試験の手順は次の通りである。すなわち、1) 曲げ強度の測定、2) 平坦水中の試験、3) TBI 試験、4) 氷厚の測定の順である。曲げ強度の測定は片持梁法によって行った。通常3回の測定を行い、それらの単純平均値をその試験における曲げ強度とした。一般にそれらのばらつきは変動係数で5~10%の間であつ

Table.1 Principal particular of modeled ship

喫水線長 (m)	50.0
全幅 (m)	9.0
深さ (m)	4.6
喫水 (m)	3.0
排水量 (ton)	750

た。また、載荷方向は片持梁供試体を押し下げる方向を用いた。氷厚は航跡に沿って1mごとに氷片を採取し、それをノギスにより直接測定し、すべての測定値の単純平均値をその試験における氷厚とした。氷厚のばらつきは変動係数で3%以内であった。

模型船の拘束条件は、ヒープ及びピッチが自由で、他は拘束されている。

船速は 115 mm/s, 230 mm/s, 345 mm/s の3種を用いた。これらは相似則 (例えば, Nevel¹⁰⁾) によれば、実船相当でそれぞれ1, 2, 3ノットである。ある船速に対して6~7回の試験を行った。氷質は第3章の(8)式, (10)式を意識して、なるべくプロットが広い範囲にあるように調整したが、時間的制約から氷厚に関しては 22.5 mm と 30 mm 付近が多い。

抵抗 R_i と R' は、それぞれの試験において、模型船が1船長分氷板に貫入してから、曳引車が減速する直前までの模型船進行方向に作用する力の時刻歴の平均値と定義した。

Fig.2~Fig.4 にそれぞれの船速に対する R_b と σ_h^2 のプロットを示した。Fig.5~Fig.7 には R' と h のプロットを示した。

R_b と σ_h^2 のプロット上に描かれている直線は、原点を通るという拘束条件を付けて線型回帰解析を施して求めた近似直線である。少なからぬばらつきはあるが、(8)式の関係が満足されていると結論しても良いと思われる。

R' と h のプロット上の直線は、同模型船を用いて計測した平水中の抵抗値が $h=0$ の R' となるような拘束条件を付け、なおかつかけ離れている点を除外して行った線型回帰解析により得た近似直線である。この近似直線の近似度は高いものとは言えないが、定性的には(10)式の関係が満足されていると考えても良いように思われる。

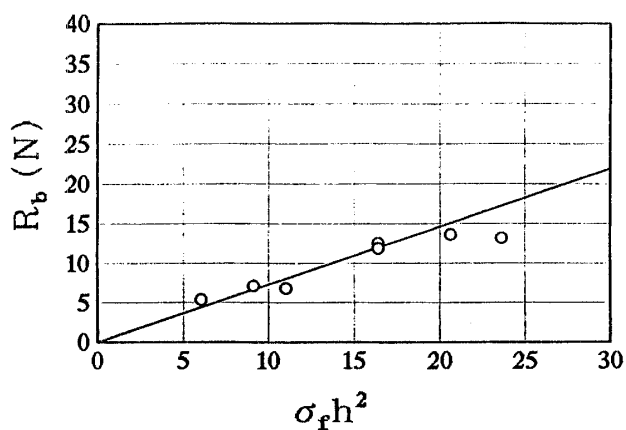


Fig. 2 Plots of R_b and $\sigma_f h^2$ for $v=115$ mm/s

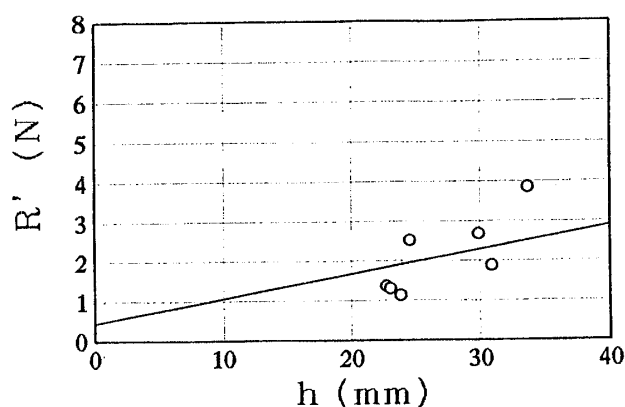


Fig. 5 Plots of R' and h for $v=115$ mm/s

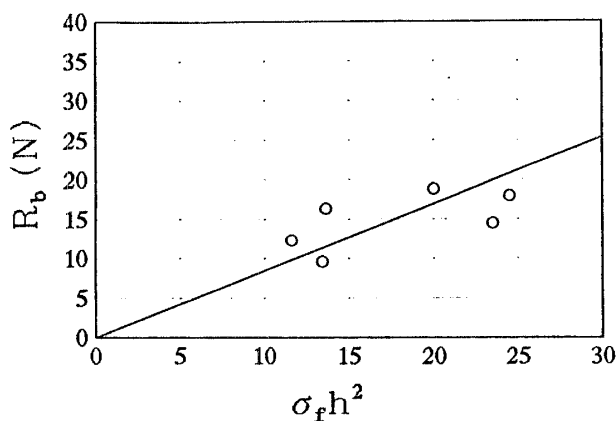


Fig. 3 Plots of R_b and $\sigma_f h^2$ for $v=230$ mm/s

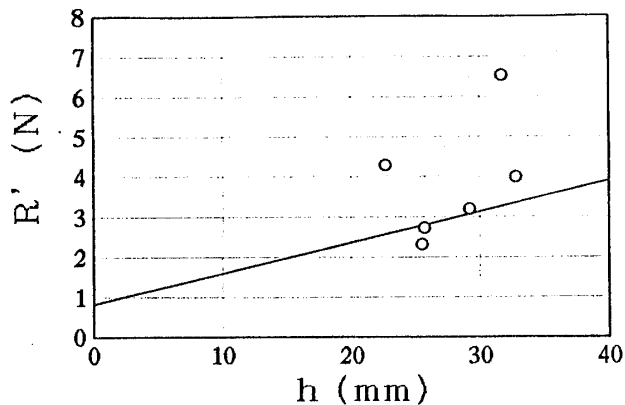


Fig. 6 Plots of R' and h for $v=230$ mm/s

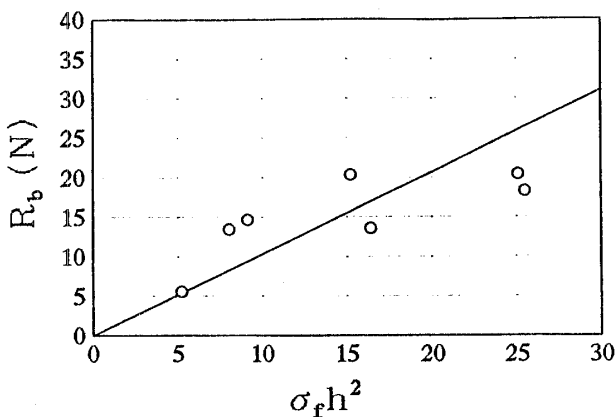


Fig. 4 Plots of R_b and $\sigma_f h^2$ for $v=345$ mm/s

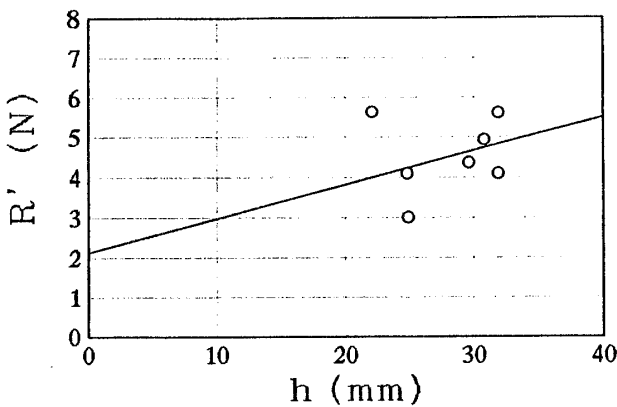


Fig. 7 Plots of R' and h for $v=345$ mm/s

5. 討 論

前章で示したように、完全とは言えないまでも、今回行った試験の結果は(8)式及び(10)式の関係を満たしている。それ故、第3章で述べた方法論に従えば Fig.2~Fig.4 及び Fig.5~Fig.7 に示された直線の傾きを船速に対して

プロットすることによりそれぞれの成分の速度依存性を調査できる。それを実行したものが、(8)式の α に対しては Fig.8 に、(10)の β' に対しては Fig.9 に示されている。

これらの図では α 、 β' とも船速と共に大きくなるという関係が明瞭に示されている。近似直線の精度の悪さを割り引いたとしても、その関係は肯定的である。すなわち、砕

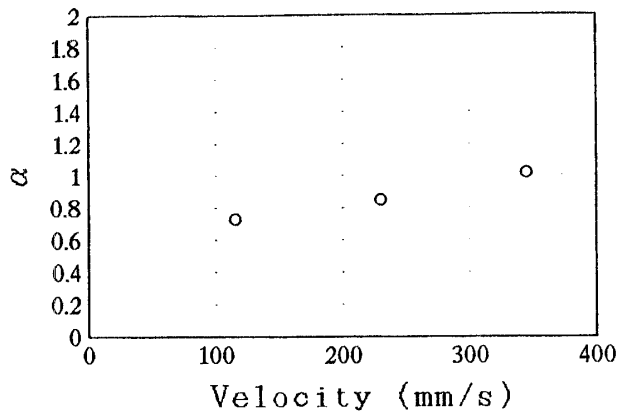


Fig. 8 Relationship between velocity and coefficient α in equation (8) indicating velocity dependence of breaking component

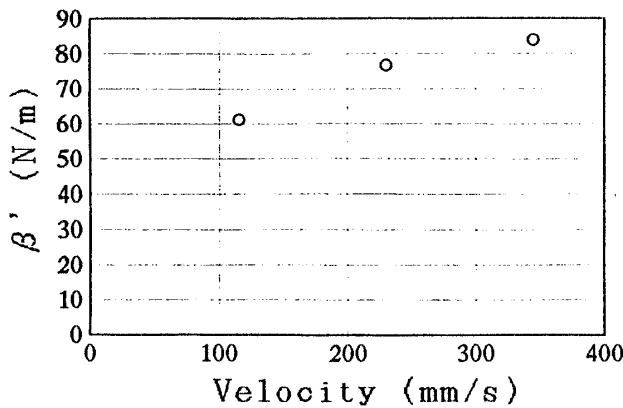


Fig. 9 Relationship between velocity and coefficient β' in equation (10) indicating velocity dependence of submersion component

氷抵抗の破壊成分、サブマージョン成分ともに速度依存性を持ち、船速と共に増大するという結論を実験的に得たと考える。サブマージョン成分に関しては氷片の慣性が関係するところから、従来より速度依存性は考慮されていたが、破壊成分に関しては第2章で述べたように考慮されている例をほとんど見ることができない。しかしながら、これも第2章で述べたが、理論的には速度依存性があり、船速と共に破壊成分が増大すると考えた方が自然である。本研究により得た実験的結論は定性的にはその予測と合致し、正当であるように思える。すなわち、実験的に船速と共に増大するという破壊成分の速度依存性が検証できたと考える。

Fig.8, Fig.9 に示された α, β' と船速の関係は線型的である。すなわち、破壊成分、サブマージョン成分は船速に対して線型的に増大する。水の抵抗の占める割合は小さいから、砕氷抵抗は船速に対しほぼ線型的に増大するという実験結果を得たことを意味している。しかしながら、そのよ

うに結論を下すのは早計であるように思える。第2章で述べた Sorensen の研究、俵と堀水の研究は破壊成分の速度依存性は線型であることを示唆しておらず、さらに高次の速度依存性を示唆している。本研究における模型試験は低速域でしか実施しておらず、そのために実験結果が線型的になったと考えた方がよいようである。この点に関しては今後の研究課題としたいと考えている。

著者らは破壊成分の速度依存性を支配する因子は、動的効果による慣性力と船体の前進による氷板下の水圧増加の影響であると考えているが、本研究では直接的に証明されていない。単にそれらの影響と考えられる破壊成分の増加が定性的に実験結果に現れているに過ぎない。それらの因子の影響を直接的に検証するためには、本研究で用いた縮尺模型ではなく、単純な形状の模型を用いた実験から出発する必要があると思われる。

さらに、今後取り組むべき課題として砕氷抵抗を構成する諸成分の細分がある。小山ら¹¹⁾は砕氷抵抗を下記に示すように5種の成分から構成されているとしている。

$$R_T = R_B + R_V + R_S + R_M + R_W \quad (11)$$

ここに、 R_T : 砕氷抵抗 (全抵抗)

R_B : 氷板を破壊することによる抵抗成分

R_V : 氷片を運動させることによる抵抗成分

R_S : 氷片の浮力による抵抗成分

R_M : 船体運動による抵抗成分

R_W : 平水中の抵抗成分

この小山らの砕氷抵抗を構成する諸成分と本研究で仮定した諸成分 ((5)式) を比較すると、TBI 試験では船体運動は非常に小さいので、次のようになると考えられる。

$$R_b = R_B + R_M \quad (12)$$

$$R_s = R_V + R_S \quad (13)$$

サブマージョン成分 R_s は砕氷抵抗分離試験 (小山らは Pre-sawn 試験を行っている) により測定されるものであり、本研究では分離して考えなかった。実験的にそれらを分離することは困難な課題であり、小山らが行ったようにエネルギー的考察から理論的にアプローチするのが本質的方法であると考えられる。理論的考察をより現実的なものにするためには、優れた砕氷抵抗分離試験を行う必要がある。そのために本研究では TBI 試験を考案し、実施したが、残念ながら Fig.5~Fig.7 に見られるようにならばつきが大きいのが現状である。今後は TBI 試験に改良を加え、ばらつきの少ない試験とすることにより、サブマージョン成分のより良い理解に取り組みたいと考えている。

我々が(7)式より算定した破壊成分 R_b は、平坦氷中の試験と TBI 試験での船体運動が大きく異なるので、小山らの考えている諸成分のうち船体運動による抵抗成分 R_M を含んでいると考えられる。そして小山らはこの成分が速度依存性を持つと考えている。我々の破壊成分の速度依存性はこのためかも知れない可能性はあるが、船体運動による

抵抗成分の構成比率は決して大きくはないから、やはり我々の実験結果は氷板を破壊するのに必要な成分 ((11)式の R_b) が速度依存することを示していると考えられる。しかしながら、破壊成分の速度依存性をさらに詳細に議論するためには、船体運動による抵抗成分の分離が不可欠であると考えられる。

蛇足であるかも知れないが、低速域であるという条件を付けると、本研究の結果から、すなわち、Fig.8及びFig.9に描かれている関係を数式化すると、次のような実験式が与えられる。

$$R_e = (0.57 + 1.275v)\sigma_c h^2 + (50 + 105v)h + R_w \quad (14)$$

ここで、それぞれの単位は N 及び m に立脚している。

この実験式の近似度を検証するために、(14)式にそれぞれの模型試験時の条件 (氷厚、曲げ強度、船速) を代入して算定した R_e とそれぞれの模型試験で測定された砕氷抵抗 R を比較したものが Fig.10 に示されている。ただし、平水中の抵抗 R_w は平水中の抵抗試験より得た値、すなわち Fig.9 の y 切辺の値、を用いた。この図より実験式は模型試験で測定された砕氷抵抗を近似できていると結論できる。

6. あとがき

著者らは長年、構造物に作用する氷荷重の研究に従事してきた。そこでは氷板の曲げ破壊荷重の速度依存性はいわば常識であり、第2章で紹介した Sorensen の解析がその理論的根拠として受け入れられてきた。砕氷船の砕氷抵抗の研究に着手した際に、氷板の曲げ破壊荷重に深く関係する砕氷抵抗の破壊成分が速度に依存しないと論ずる多くの文献に接し、納得の行かないものを感じていた。Sorensen の解析に加えて、俵と堀水の研究を知るに及んで、やはり

砕氷成分は速度に依存すべきではないかと考えるに至った。これが本研究の動機であり、偶然にも破壊された氷片がほぼそのまま航跡に残されると言う船型の模型船を入手でき、IHI の氷海水槽では困難であった砕氷抵抗分離試験を実施できることになったことが本研究の契機である。

著者らは、本研究により砕氷抵抗の破壊成分が速度に依存することを実験的に示し得たと考えているが、一方、一抹の不安もある。論理的には小山らが仮定したように砕氷抵抗の成分を5種に分ける方が合理的であり、我々の破壊成分には破壊成分以外の成分が含まれており、そしてそれが速度に依存すると予想される点である。その成分の砕氷抵抗全体における構成比率は大きくはないと予想されるものの、定量的には不明である。実験的には、本研究で得られた速度依存性が IHI 氷海水槽の特性、すなわち、模型氷の性質や計測システムに由来するものではないかと言う点である。

著者らは、本論文を問題提起と考えている。本論文は定性的に破壊成分の速度依存性の存在を示したものに過ぎず、定量的には未解明の課題も多い。破壊成分の速度依存性の要因は、動的効果による慣性力の影響と船体の前進による氷板下の水圧増加であることは間違いないように思われるが、それらの内どちらが主かという課題に関しては全く未知である。実験的にはそれらの影響を分離するのは困難であり、理論的あるいは数値解析の手法を用いるべきではないかと考えている。

最後に、本論文を契機に、砕氷成分が速度依存性を持つという観点から、他の経験豊かな氷海水槽において追試験あるいは既存のデータの見直しが行われ、砕氷抵抗の諸成分の理解に向けた議論が巻き起こることを望む。

参考文献

- 1) Milano, V. R. (1973) : Ship Resistance to Continuous Motion in Ice, Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 81, (1973) pp. 274-299
- 2) Kotras, T. V., Baird, A. V. and Naeye, J. N. : Predicting Ship Performance in Level Ice, Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 91, (1983) pp. 329-342
- 3) Carter, D. : Ship Resistance to Continuous Motion in Level Ice, Report prepared for The Transport Canada Research and Development Centre, (1982) 95 pp.
- 4) Lewis, J. W. and Edwards, Jr., R. Y. (1970) : Methods for Predicting Icebreaking and Ice Resistance Characteristics of Icebreakers. Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 78,
- 5) Tatinclaux, J.-C., Alexseyev, J., Enkvist, E., Kitagawa, H. Narita, S. Schwarz, J., Takekuma, K. and Williams, F. M. : Comparative Model

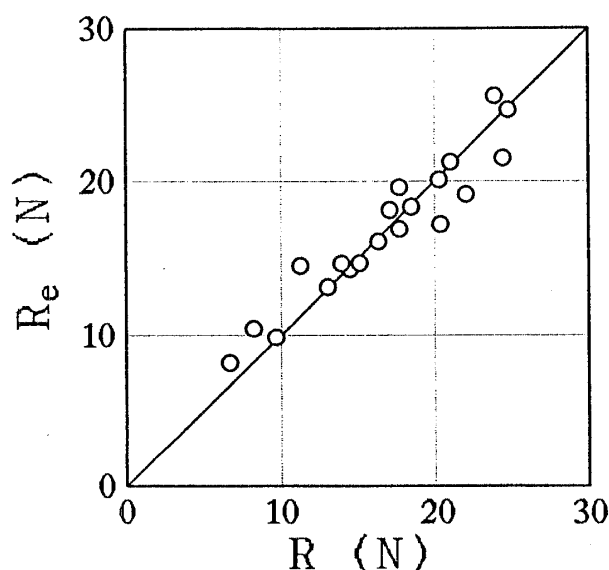


Fig. 10 Comparison between experimental ice resistance and ice resistance calculated from empirical equation (equation (11))

- Tests in Ice of a Canadian Coast Guard R-Class Icebreaker, Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 97, (1989) pp. 31-52
- 6) 加藤一行, 林口清次, 岸本弘晴: 傾斜した円柱構造物に作用する氷荷重, 第8回オホーツク海と海水に関する国際シンポジウム講演要旨集 (1993) pp. 112-116
 - 7) Sorensen, C.: Dynamic Response of a Semi-Infinite Plate Subjected to Steadily Increasing Boundary Force, ZAMM, Vol. 59, (1978) pp. 126-128
 - 8) 俵健太郎, 堀水 修: 氷板の曲げ破壊に対する流体力の影響, 東京大学工学部船舶海洋工学科卒業論文 (昭和63年2月提出) (1989) 102 pp.
 - 9) Nevel, D. E.: The Narrow Free Infinite Wedge on an Elastic Foundation, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Research Report 79 (1961) 50pp.
 - 10) Nevel, D. E. (1977): Ice breaker simulation, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report 77-16
 - 11) 小山鴻一, 門井弘行, 吉田三雄, 泉山 耕, 宇都正太郎, 金田成雄, 下田春人, 田淵浩文, 北川弘光: 船舶の氷中性能について (第7報) —抵抗成分の解析—, 平成元年度秋季 (第54回) 船舶技術研究所研究発表会講演集, (1989) pp. 1-6
-