

模型氷の機械的特性について

MECHANICAL PROPERTIES OF MODEL ICE

泉山 耕¹・宇都正太郎²・金田成雄³・下田春人³

Koh IZUMIYAMA, Shotaro UTO, Shigeo KANADA and Haruhito SHIMODA

¹正会員 工修 運輸省船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

²工博 運輸省船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

³運輸省船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

Model testing at an ice tank is an indispensable tool for the design of offshore structures or ships to be used in ice. Model ice is used to represent sea ice at model scale. Mechanical properties of model ice should be properly scaled down from those of sea ice so that results of model testing in ice are of significance. This paper discusses mechanical properties of model ice based on data obtained at the ice tank of Ship Research Institute.

Key Words : Model ice, ice tank, mechanical property

1. はじめに

氷に覆われた海域、氷海域における資源開発あるいは海上輸送には、氷の存在に起因する様々な問題に対処するための技術の開発が不可欠である。例えば、海底資源開発のためのプラットフォーム等は、周囲の氷から受ける強大な力に十分に耐える形式・構造を必要とし、また、氷海域を航行する船舶には、氷中を安全かつ効率的に航行することのできる構造・船型が求められる。このような氷海域における工学的諸問題に関わる技術開発のための最も有効なツールが氷海水槽における模型実験である。氷海水槽は、実験水槽を外部とは断熱された冷凍室内に封設した施設であり、室内を冷却することにより氷板を製氷し、この中において各種の模型実験を行う。

氷海水槽において実験に使用される氷は、実現象と模型実験との間の力学的相似性を満たすように各種機械的特性を調整した特殊な氷、模型氷である。模型氷の特性は、氷海水槽における模型実験の成否を決定するものであり、このため、より良い模型氷を求めるための研究が各国の氷海水槽において続けられている¹⁾。運輸省船舶技術研究所においても、1981年の氷海水槽の建設以来、船舶及び海洋構造物

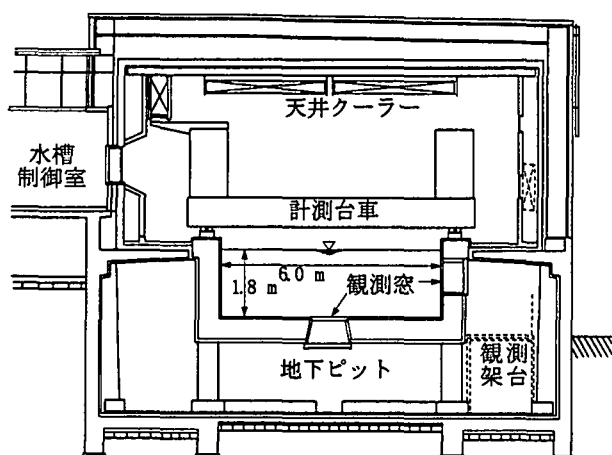
と氷との干渉に関わる各種の実験的研究を実施してきたが、これと同時に、これらの模型実験に対する基礎研究として、模型氷についての研究を行ってきた。本論文では、船舶技術研究所における研究により得られた、模型氷の各種特性について述べる。

2. 氷海水槽及び模型氷

船舶技術研究所の氷海水槽は、長さ 35 m 幅 6 m、水深 1.8 m の試験水槽である。試験水槽部の断面図を図・1に示す。水槽上部の水槽室内は、附設の冷凍施設により室温を-35℃にまで冷却することができる。一方、水槽下部は地下室構造となっている。この地下室は常時 2℃の室温に保たれ、これにより地盤から水槽への熱の流入を妨げる構造となっている。また、地下室の水槽側面及び底面には観測窓が設けられ、これを通じて実験時の観察が可能である。

氷海水槽における模型実験が工学的に有意なものとなるためには、そこにおいて用いられる模型氷と実海氷との間に、幾何学的・力学的相似性が成り立っていないなければならない。このため、これまでに様々な種類の模型氷が開発されてきた。この中には、パ

ラフィン等の人工氷 (synthetic ice)、樹脂等を混入した複合氷 (hybrid ice) といった例もあるが、ほとんどの場合、何らかの水溶液を凍結させた氷が用いられている。このような模型氷では、水溶液の溶質 (dopant) によりその特性が変化する。また、製氷方法にも、水槽室内を低温に保つことにより、氷板を自然に成長させる方法と、後述の seeding 作業を長時間継続することにより氷板を形成する方法の2種類の方法がある。前者の方法による氷は、鉛直方向に成長した柱状の結晶構造を有する氷 (columnar-structured ice) となるのに対し、後者では、細かな粒状の結晶構造を有する氷が製氷される (fine-grained ice)。



図・1 氷海水槽断面図

船舶技術研究所氷海水槽では、自然結氷による柱状構造を有する模型氷を使用しているが、各国における模型氷の開発研究の成果、研究プロジェクトの特性等を勘案しながら、水槽水に添加する溶質を変化させてきている。水槽使用開始当所は各国氷海水槽において伝統的に使用されてきた、食塩水を水槽水とする模型氷 (塩氷水) を用いたが、その後、溶質を尿素に切り換えた (尿素氷)。一方 1986 年、Timco は、エチレングリコール (EG)、界面活性剤 (AD) 及び砂糖 (S) の水溶液を凍結させた模型氷を開発した³⁾。この氷は、各種の機械的特性が優れていることから、当水槽でも尿素氷に代わりこの模型氷を採用した。ただし、当水槽では、添加量が少なく、模型氷の機械的特性への寄与が比較的小さい砂糖は用いず、エチレングリコール及び界面活性剤のみの添加とした (EG/AD 氷)⁴⁾。また近年は、模型氷の中に微細気泡を混入させることにより氷の比重を制御することのできる模型氷の開発を行った⁵⁾。

船舶技術研究所氷海水槽における模型氷の製氷手順の概要は以下の通りである。

1. 水槽内に残された氷片を除去する。

2. 水槽室内を冷却する。

3. 水槽室内に水を噴霧する (wet seeding)。

4. 水槽室温を-20℃に保ち氷板を成長させる。

模型氷の製氷方法は、模型氷の種類、各水槽における設備等により様々であるが、上記手順は、柱状構造の模型氷の製氷手法としては一般的なものと言える。上記作業中の wet seeding は、氷の成長の核となる氷核を人為的に水槽水表面に散布することにより、模型氷の結晶構造の微細化を図る手法である。

3. 模型氷の試験法

氷海水槽における模型実験の歴史は浅く、実験方法等についても思考錯誤の段階にある部分も少なくない。模型氷の機械的特性の試験法についても計測手法の標準化等には至っていないが、主要な項目については各水槽にほぼ共通して用いられている方法が認められる。以下、船舶技術研究所において採用している模型氷の試験法について述べる。

(1) 曲げ強度

模型氷の強度特性は、模型試験結果を評価する上で重要である。他の材料同様、模型氷の場合にも様々なモードにおける強度特性の把握が求められるが、船舶による砕氷現象、傾斜型海洋構造物と氷板との干渉、といった場面では氷の曲げ破壊が卓越することから、模型氷の強度は曲げ強度により評価される場合が多い。模型氷の曲げ強度は、一般に、氷板内に切り出した片持ち梁の曲げ試験により計測される。試験では片持ち梁の先端を押し下げ、あるいは引き上げにより梁を破壊することに要する荷重から、氷の曲げ強度 σ_F を次式により計算する。

$$\sigma_F = \frac{6LP_F}{Bh^2} \quad (1)$$

ここに、L、B、h は、それぞれ、荷重点から破壊線までの距離、片持ち張りの幅及び厚さであり、 P_F は氷の破壊荷重である。各種材料の曲げ試験においては、梁状に整形した材料を3点あるいは4点曲げに供することが一般的であるが、模型氷の場合、強度が低く、整形の過程で資料にダメージを与える可能性がある、自重の影響がある、等の理由により、このように水槽内において試験が行われる。また、同様の曲げ試験を実氷板内において実施することにより水槽試験との直接的な比較が可能であることも本試験法の特徴である。

(2) 弾性率

現在、模型氷の弾性率の計測には、平板法 (Plate

Method) と呼ばれる手法が一般に用いられる。この手法では、氷板内の 1 点に集中荷重を加え、この時の荷重点の撓みから、氷板を弾性床上の平板として、弾性率 E を次式により計算する。

$$E = \frac{12(1-\nu^2)\gamma l_c}{h^3} \quad (2)$$

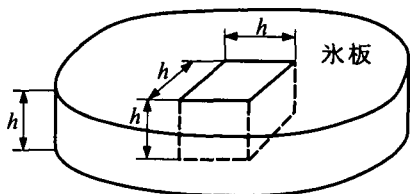
$$l_c = \sqrt{\frac{P}{8\gamma\delta}}$$

ここに、 ν 及び γ は、それぞれ氷のポアソン比及び水の単位堆積重量であり、 P 及び δ は、それぞれ氷板に加えた荷重及びこれに対する荷重点の変位である。また、 l_c は特性長と呼ばれる長さである。

平板法による弾性率の計測は、比較的近年開発された手法であり、従来は、曲げ試験時の荷重-変位曲線の傾きから弾性率を求める手法が用いられていた。船舶技術研究所氷海水槽においても、当初はこの手法を用い、後に平板法による手法に切り換えた。なお、当水槽における研究によると、側壁から特性長の 4 倍以内の距離の氷板に荷重した場合は、試験結果が側壁の影響を受けることが示されている⁶⁾。

(3) 圧縮強度

模型氷、特に柱状の結晶構造を有する模型氷の圧縮強度には異方性があるが、一般に、氷板の面内方向に圧縮された場合の強度が問題となる。また、ほとんどの場合、一軸圧縮試験が行われ、多軸応力下での試験の例は限られる。模型氷の圧縮試験に関しては、数種類の手法が提案されているが、船舶技術研究所では氷試料を切りだし、陸上の試験機により試験に供する。実海水の場合は氷厚方向に深さを変えて試料をとる場合があるが、模型氷の場合は氷板厚さが一般的に 50 mm 以内と薄いため、圧縮試験試料は全氷厚 h を含むように採取する (図・2)。また、模型氷は脆弱であり、細かな成形が困難であるため、各辺長が氷厚と同程度となるような立方体形の試料とする。



図・2 圧縮試験用試料の採取

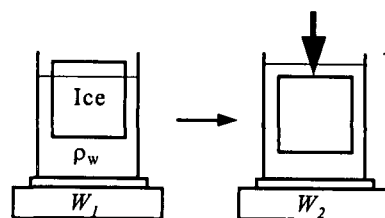
(4) 密度

模型氷の密度の計測手法としても数種類の手法が提案されているが、船舶技術研究所では図・3 に示す

手法により計測を行っている。この手法では、水槽水を入れた容器を荷重計の上に置き、この状態を規準として、水槽から切り出した氷試料を容器中に浮かべた時と没水させた時のそれぞれの荷重の増分 W_1 及び W_2 より氷の密度 ρ_i を次式により計算する。

$$\rho_i = \frac{W_1}{W_2} \rho_w \quad (3)$$

ここに、 ρ_w は容器中の水槽水の密度である。この手法は氷試料の体積を計測することなく氷密度を計測することができることから、多数の計測を連続して行う場合に有利である。しかしながら、氷試料の水槽からの取り出しから計測までに時間をかけすぎると、氷試料からのブラインの逸脱により、見かけ上低めの密度を与える場合があるので、迅速な計測が必要である。



図・3 氷密度計測法

4. 模型氷の機械的特性

(1) Tempering の効果

実海水の曲げ強度は、氷温・塩分濃度等により影響を受け、100 から 1,000 kPa 程度の値をとる⁷⁾。模型氷の強度は、模型の縮尺と同様の縮尺で低下させる必要がある。従って、模型氷は通常の氷と比較すると極めて低強度の氷であることが要求される。氷中模型実験の黎明期には、このような低強度の氷を作成する手法として、高濃度の塩水を凍結させる方法が用いられていた。しかしながらこの手法による氷は、実海水とは異なり弾性率が低く塑性に富んだ氷であった。このような氷の中で実験を行った場合、氷の破壊に要するエネルギーが増加することが問題点として指摘されていた。

このような問題を解決するために開発された手法が tempering と呼ばれる技法である⁸⁾。この技法では、低濃度の水溶液を凍結させ、所用の厚さにまで成長した段階で、水槽室温を氷の融点近くまで急激に上昇させる。この温度環境に氷板を置くことにより、氷の弾性を保ったまま時間とともに氷の強度を低下させることが可能となる。本技法による模型氷の曲げ強度の時間変化の例を図・4 に示す。模型実験

の実施にあたっては、予め図-4のような強度特性の変化を計測しておき、実験実施時に所用強度となるように製氷時刻、tempering 時間等を設定する。

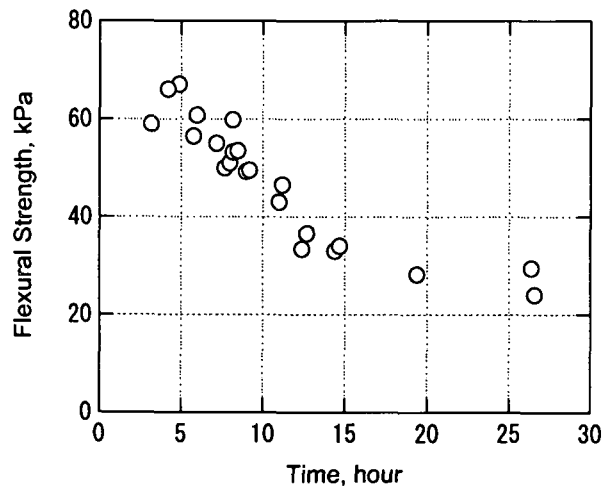


図-4 Tempering による曲げ強度の時間変化

(2) 曲げ強度と弾性率

前述のように、高濃度の水溶液を凍結させて得られる模型氷では、低強度化は実現されるものの、弾性率の低下が問題となった。この問題は tempering 技法の開発によりある程度解決されたが、一般に模型氷の弾性率は強度の低下に伴ってこれを上回る率で低下する。実海水の弾性率と曲げ強度との比は 2,000 から 5,000 程度とされ、この値を実現すべく様々な模型氷が開発されてきた。船舶技術研究所の氷海水槽で用いられた、塩水氷、尿素氷及び EG/AD 氷について、弾性率と曲げ強度との関係を図-5に示す。図より、一般に、模型氷の弾性率/強度比は強度が高いほど高まることが判る。また、模型氷の種類による影響については、塩水氷、尿素氷、EG/AD 氷の順にこの比が高まることが判る。

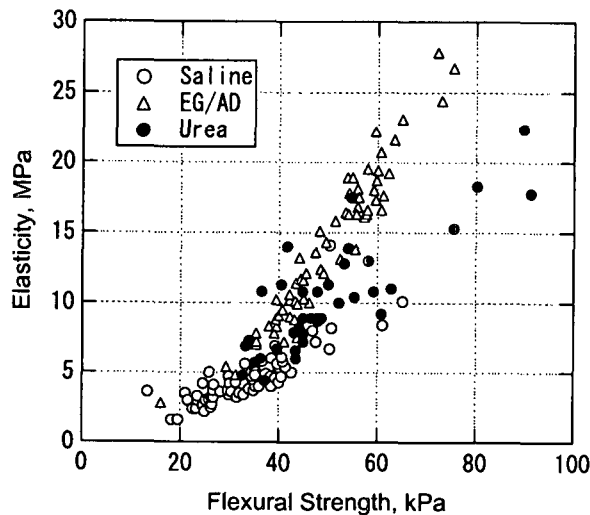


図-5 模型氷の弾性率と曲げ強度との関係

ただし、これらのデータが曲げ試験時の荷重・変位曲線から求められたものであることを記しておくたい。前述のように現在では模型氷の計測は平板法によるものが標準的であるが、これらのデータは当水槽においてこの手法を用いる以前のデータである。図-6に平板法による弾性率と曲げ試験から得た弾性率との相関を示す。図より、前者は後者の約6倍程度の値を与えることが判る。この結果を図-5に用いると、曲げ強度が 50 kPa 程度の場合、弾性率/曲げ強度比は、塩水氷、尿素氷、EG/AD 氷について、それぞれ、800、1000、1600 程度となる。

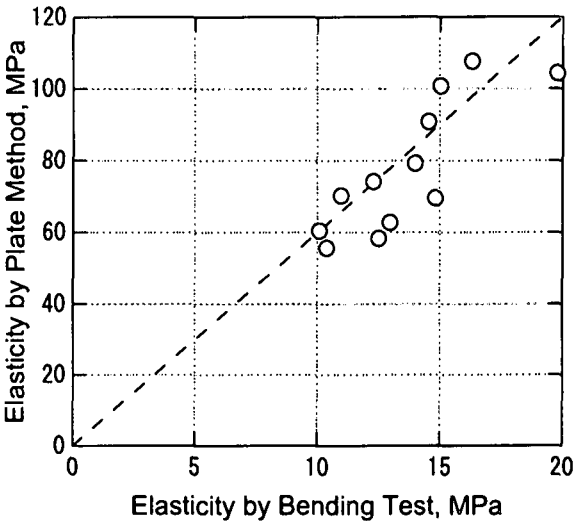


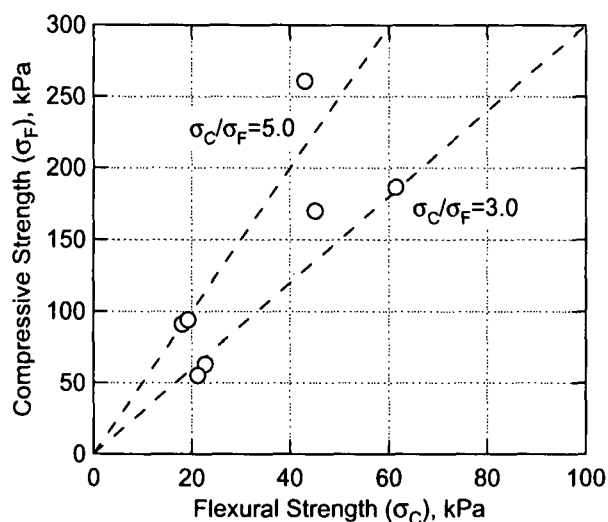
図-6 計測法による弾性率の違い

(3) 各種強度の関係

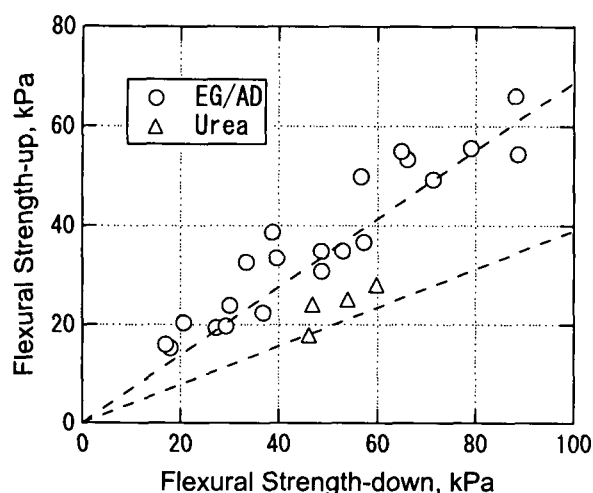
船舶あるいは海洋構造物と氷との干渉現象では、様々な氷の破壊モードが観測される。例えば、船舶による砕氷現象においては、一般には氷板の曲げ破壊が卓越的であるが、船型によっては船首部後縁の肩部において氷の圧縮破壊が観測される場合がある。従って、このような複合的な破壊モード下における現象を力学的に再現するためには、模型氷の曲げ強度と圧縮強度との関係は、実海水のそれに対応したものでなければならない。図-7に EG/AD 氷の圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。圧縮強度と曲げ強度の比は、3 から 5 程度であり、これは実海水における計測結果とほぼ一致している。

一方、模型氷の曲げ強度には、上向きあるいは下向きという载荷方向に対する依存性があることが知られている。図-8に载荷方向による曲げ強度の比較を示す。図の横軸は曲げ試験において試験片先端を押し下げたときに得られる曲げ強度であり、縦軸は引き上げたときの強度である。図より、押し下げた場合の方が引き上げた場合に比べて強度が高いことが判る。これは、模型氷の構造の有する二層性によるものと考えられる。一般に、水槽室内を冷却する

ことにより水面に自然成長させた模型氷は、基本的には柱状の結晶構造を示すが、その上面には薄い強度の高い層 (top layer) があり、全体としては二層構造となる。模型氷の曲げ破壊は、曲げにより引っ張り側となる面の破壊により引き起こされるが、top layer の強度が氷板下面に対して卓越することから、図・8 に示したような曲げ強度の荷重方向依存性が現れるものと考えられる。模型氷の種類で比較すると、尿素氷の方が EG/AD 氷よりも荷重方向依存性が高い。図中の破線は Timco による試験結果であるが、本研究の結果と良く一致する。このような荷重依存性の現れ方の違いは、尿素氷の top layer が厚く、強度も高いことによるものであろう。一般に、海氷の場合はこのような荷重方向依存性が小さいとされることから³⁾、この意味において、EG/AD 氷の尿素氷に対する優位性が示されたものと言える。



図・7 圧縮強度と曲げ強度の関係

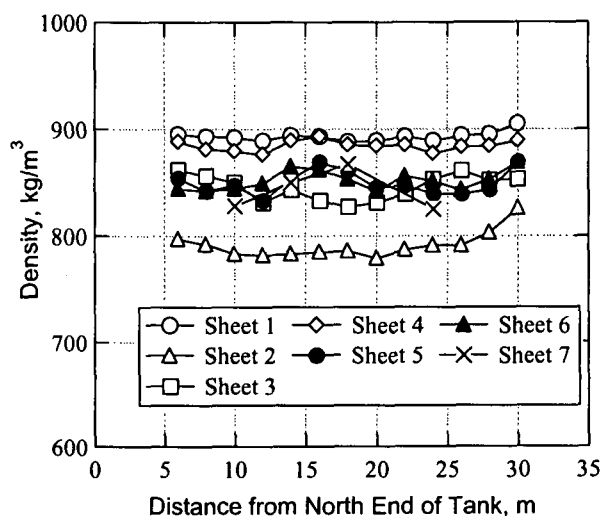


図・8 曲げ強度の荷重方向依存性

(4) CD 氷による密度の制御

海氷の密度は、温度、塩分濃度、気泡含有量等により変化するが、一般に 900 kg/m^3 内外の値を示す。これに対し模型氷は、融点近い温度環境下において、tempering の過程において氷の内部融解も進むことから、一般に、密度の高い氷となる。このため、水中において受ける浮力が小さく、これが模型実験結果に影響を及ぼす可能性が指摘されている。例えば、船舶の砕氷航行時には、船首部で形成された砕氷片が時には船尾のプロペラとの干渉を起こすことが知られているが、密度の高い模型氷において実験を行った場合、このプロペラと氷との干渉現象の発現頻度を過大に評価する可能性がある。

このような問題を解決するために、Spencer らは気泡を取り入れることにより、模型氷の低密度化を図った⁹⁾。この氷は、気泡の含有量により密度を制御できることから、Controllable Density Ice (以下、CD 氷) と呼ばれる。船舶技術研究所においても CD 氷の開発を試みた⁵⁾。ただし、Spencer らは、水槽底部に設置した配管に設けた小孔より空気を吹き出して水中に気泡を発生させたのに対し、当水槽では、空気を溶け込ませた加圧水を水槽水中に放出・減圧することにより気泡を発生させる方法を採用した。この手法により、Spencer らの手法によるものに比べて、非常に微細な気泡を模型氷内に導入することができる。

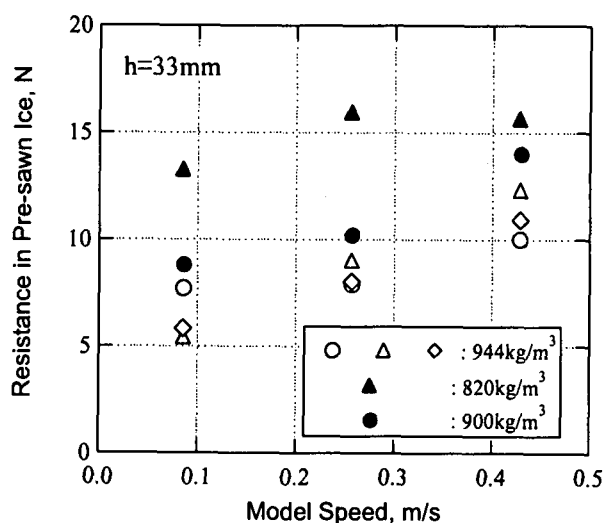


図・9 CD 氷の密度の分布

CD 氷の密度の分布の計測例を図・9 に示す。気泡を導入しない場合の模型氷の密度は 940 kg/m^3 であるが、CD 氷では、約 800 kg/m^3 という極めて低密度からこの値まで、任意の密度の氷を得ることができる。なお、図に示した模型氷の密度の分布には水槽内の位置による若干の変化が認められるが、これは気泡発生ノズルからの流出量の違いによるもので

ある。これについてはこの計測の後に流量を調整し、密度分布の更なる均一化が実現された。

このような模型氷の密度差は実験結果にも影響を与える。図・10に船舶の氷中抵抗に関する試験結果を示す。砕氷船の抵抗は、氷板を破壊するための抵抗成分と破壊された氷片を排除するための抵抗成分に分けて考えることができる。この試験では後者の成分だけを取り出す目的で、砕氷パターンに似せて予めカットを入れた氷板 (pre-sawn ice) 中における抵抗を計測した。抵抗計測結果は明らかに密度の違いの影響を受け、低密度氷ほど抵抗が高い。これは、船首部における氷片の水没に対する浮力及びこれに起因する船体と氷片との摩擦力等の差によるものと考えられる。



図・10 Pre-sawn Ice 中での抵抗試験結果

5. おわりに

本論文では、模型氷の機械的特性について、船舶技術研究所における研究結果に基づいて論じた。氷海水槽における模型実験の歴史は浅く、未発達な部分も少なくない。模型氷についても様々な種類のものが提案され、特性の改良が続けられているが、いまだに「決定版」的なものが開発されるには至って

いない。

サハリンあるいはロシア北極海西部海域等の氷海域における資源開発が本格化しはじめた現在、氷海域用海洋構造物あるいは砕氷船の設計・開発のツールとして、氷海水槽における模型実験の重要性は高まろう。このための基盤技術としての模型氷の改良並びにその特性の評価のための研究のさらなる発展を望みたい。

参考文献

- 1) Timco, G.W.: Second report of the IAHR working group on ice modelling materials, *Proc. of IAHR Ice Symposium 1992*, Vol. 3, pp. 1527-1536, Banff, Alberta, Canada, 1992.
- 2) 泉山 耕: 氷海水槽における砕氷船の模型実験. 日本造船学会誌, 第750号, p.p. 11-18, 1991.
- 3) Timco, G.W.: EG/AD/S: A new type of model ice for refrigerated towing tanks, *Cold Regions Science and Technology*, 12 (1986) pp. 175-195, 1986.
- 4) 下田春人、小山鴻一、泉山 耕、宇都正太郎、田淵浩文、金田成雄、北川弘光: エチレングリコール系模型氷の氷質試験. 昭和63年度秋季船舶技術研究所研究発表会講演集, p.p. 17-21, 1988.
- 5) 金田成雄、泉山 耕、山口 一: 微細気泡 CD 模型氷の開発について. 寒地技術論文・報告集, Vol. 14, p.p. 415-421, 1998.
- 6) 泉山 耕: 模型氷の非線形材料特性について. 寒地技術シンポジウム'91 講演論文集, p.p. 689-694, 1991.
- 7) Timco, G.W. and Sayed, M.: Overview of ice loads on Arctic structures, *Technical Report, Institute for Engineering in the Canadian Environment*, 1994.
- 8) Schwarz, J.: New developments in modeling ice problems, *Proc. of the 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, pp. 45-61, 1977.
- 9) Spencer, D.S. and Timco, G.W.: CD model ice - A process to produce correct density (CD) model ice, *Proc. of IAHR Ice Symposium*, Vol. 2, pp. 745-755, Espoo, Finland, 1990.