

氷海水槽

泉山 耕*

Ice Model Basin

by

Koh IZUMIYAMA

1. まえがき

氷海水槽（ice model basin）は、氷の存在する海域「氷海」を一定の縮尺率で水槽内に再現し、そこにおいて各種の模型実験を行う研究施設である。世界で初めての氷海水槽は 1955 年にソビエト連邦の北極南極研究所（AARI）に建設された水槽（長さ 36.5m、幅 9m）であるが、当時の冷戦体制下においては、この水槽に関わる情報は限られていた。この意味において現在の氷海工学に通ずる草分け的存在の氷海水槽としては、1970 年とその翌年に、フィンランド Wartsila Arctic Research Center（WARC）とドイツ Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt（HSVA）にそれぞれ建造された水槽を挙げることであろう。その後、日本を含む各国に氷海水槽が建設された。カナダ Institute for Marine Dynamics（現在の Institute for Ocean Technology : IOT）には、長さ 90m の世界最長の氷海水槽が、フィンランド・Helsinki University of Technology（HUT）には、40m×40m の角氷海水槽が建設された。また、本年 5 月に韓国 Maritime & Ocean Engineering Research Institute（MOERI）に 42m×32m の水槽が完成し、本格的稼働に入ろうとしている。

氷海水槽における模型実験は、氷の存在しない「開水域」に対応した通常の曳航水槽における実験と同様に、縮尺した模型を用いた実験から実船・実機に関わる各種データを求めようとするものである。従って、やはり開水域用の模型実験同様に、水中模型実験においても尺度影響についての考慮が不可欠である。水中模型実験における尺度影響を考える上において最も重要な点は、実験に使用する氷の特性である。氷海水槽における模型実験に用いられる氷は、実験の目的に従って各種特性が調整された「模型氷」（model ice）と呼ばれる特殊な氷である。より良い特性を有する模型氷を求めて様々な氷が開発されてきており、現在、それぞれの水槽が異なる模型氷を用いていると言っても過言ではない。

海上技術安全研究所の氷海水槽は 1981 年に竣工し、以来 25 年以上にわたって様々な研究に利用されている。本文では、当所の氷海水槽について、その機能と模型氷について概説し、また、ここにおいて実施されてきた代表的試験の内容を紹介する。なお、本施設の正式名称は、「氷海船舶試験水槽」である。しかしながらここでは「氷海水槽」

* 流体部門

原稿受付 平成21年 8月 4日

審査済 平成21年 8月26日

という呼び名を使いたい。これは、これが本施設についての最も一般的に使用される名称であることに加え、以降に述べるように、「船舶試験水槽」としての枠を超えた利用をしていることによる。

2. 氷海水槽の概要

2.1 構造と機能

当所の氷海水槽は、長さ 35m、幅 6m、水深 1.8m の試験水槽を冷凍室内に封設した施設である。図 1 に水槽及び冷凍室の断面図を示す。水槽上部が冷凍室であり、付属の冷凍設備により室内を -20°C に冷却することにより、水槽に氷を成長させる。冷却は天井に設置されたクーラーにより行う。冷却効率を上げるために送風装置を使用して室内の空気に強制対流を起こす施設もあるが、これは反面、氷の厚さ・機械的特性等の均一性を失わせるものともなる。このため当所氷海水槽においては、自然対流による製氷方式を採っている。ただし、後述する tempering のために室壁に温風の吹き出し・吸い込み口が設けられている。また、水槽北端には幅 1.6m のトリミングタンクが接続している。トリミングタンク室の気温は 2°C であり、水槽に製氷を行うときには冷凍室との間の断熱扉を閉鎖する。

水槽底部には地下空間が設けられている。このような地下室を設けた理由は、一つには、水槽の側部及び底部に設けられた観測窓を通じて実験を水中から観測することにある。例えば船舶の砕氷実験の場合、船首で砕氷された氷片の船体周り挙動は重要な情報であり、これらの観測窓を通じて VTR あるいは写真撮影が行われる。一方、この地下室は、外部の地盤と水槽の間の断熱層としての役割も持ち、この室温を常時 2°C に保つことにより、地盤から水槽への熱の直接的流入を妨げる。このようないわば魔法瓶的な二重構造により、水槽に製氷される氷板の均一性が実現される。

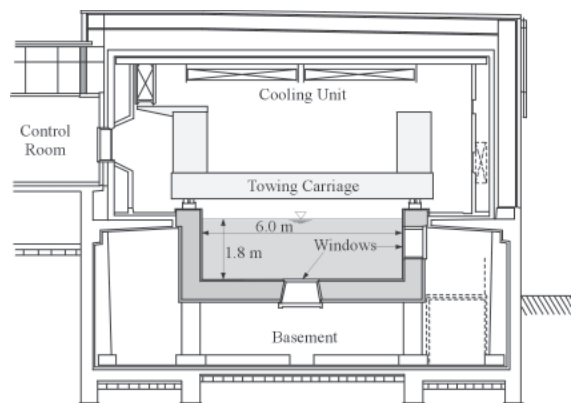


図 1 氷海水槽断面図

冷凍室等の冷却のための冷凍機械システムが、水槽本体と同一の建屋（13号館）の中に備えられている。冷凍システムは、水槽を冷却し製氷を行うための低温系と、地下室及びトリミングタンク室を 2°C に保つための高温系の二系統がある。両者ともに一次冷媒としてフロン22を、これと熱交換を行って各所を冷却する二次冷媒としてメチレンクロライドを使用している。なお、地下室及びトリミングタンク室は水槽稼働期間を通してほぼ 2°C に保たれるのに対し、水槽本体は製氷時の -20°C から実験時の -2°C までという温度環境下に曝される。このような環境下においては、水槽躯体のコンクリートへの凍結融解作用によるクラックの発生と進展が懸念される。このため本水槽では、コンクリートに通常の3倍の鉄筋を配するとともに、スティールファイバーも混入されている。

水槽には計測台車と2台の作業用台車が備えられている。計測台車はボックス構造を有し、 0.1 から 2.0 m/s の範囲の速度で走行が可能である。レールへの氷の付着によるスリップの影響を避けるため、通常のレール・車輪に加えラック・ピニオンにより計測台車の駆動が行われる。作業台車は電動型と手押し型の2台があり、氷質計測・氷の成形などの各種作業に用いられる。

2.2 模型氷

前述のように、実験に用いる模型氷の特性は氷海水槽における実験の結果に大きく影響する重要な因子である。相似則によれば、氷海水槽での模型実験に用いる氷の強度は、長さに関する縮尺率により縮尺されなければならない。具体的には、海氷の曲げ強度は一般に 300 から 500 kPa 程度であるから、模型実験に使用する氷には 15 から 30 kPa 程度の強度が要求される。このような低強度氷を得るために、氷海水槽においては淡水ではなく何らかの溶質を水に溶解させた水溶液を水槽水として用いる。これは、例えば海氷と淡水氷を比較すると前者が後者に比べて低強度であることと同じ原理による。氷の分子構造は極めて排他的であり、数種類の例外的な物質を除いて、水分子以外がその中に取り込まれることはない。従って、海氷が形成される場合には不純物である塩分を排出しながら凍結が進む。しかし固液界面における塩分濃度の上昇とともに、濃縮された塩分が氷の中の微細な空隙に取り込まれるようになる。このような空隙は氷を材料として見た場合は欠陥であり、強度の低下を招く。水溶液を凍結させた模型氷も同様に淡水氷に比べて低強度の氷となる。この他、氷の強度は温度に依存することから、氷温を上げることも氷の低強度化につながる。

このため氷中模型実験の黎明期においては、高濃度の塩水を凍結させて融点近傍の温度環境下において実験を行うことにより模型氷の低強度化を図る方法が採られた。しかしながら、このような模型氷は、氷の弾性率が強度以上に低下し、実際の海氷とは異なって塑性的挙動が卓越する氷となるという問題が指摘された。この問題を解決するために HSVA において **tempering** と呼ばれる手法が開発された¹⁾。この手法では比較的低濃度の水溶液を用いてこれを凍結させる。氷が一定の厚さにまで成長した時点で水槽室内の気温を製氷温度から融点近傍の温度まで急上昇させる。この高温度環境下に氷板を置くことにより、氷の強度は時間とともに低下するが、このとき弾性率と強度の比はそれまでの模型氷に比べて高い値が保たれる。この手法はその後世界標準的な手法となり、当所氷海水槽においても **tempering** 手法が採用され、水槽室内の昇温のための温風システムが設置された。図2は **tempering** による氷の曲げ強度の時間変化の計測例である。実験計画の立案にあたっては、このような氷の強度変化特性から所要の強度となるのに必要な **tempering** 時間を求めておき、これに基づいて製氷のタイミングを決定する。

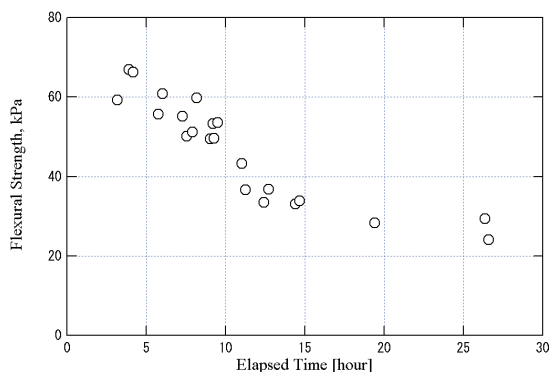


図2 **tempering** による氷の強度の時間変化

上記の **tempering** の他にも、模型氷作成にあたっては様々な工夫が必要となる。その一つは水槽水への溶質の選択である。初期の頃は海氷を模擬するものということからであろうが、塩水あるいは海水を凍結させた模型氷が各所で利用された。その後、カナダを中心により良い特性を有する新たな模型氷を開発する研究が進み、溶質として尿素を用いた模型氷が提案され、さらには、エチレングリコール(EG)、界面活性剤(AD)、砂糖(S)を溶質とする EG/AD/S 氷が開発された。各国の氷海水槽ではこのような研究を参考に模型氷の選定を行い、当所においても数種類の模型氷を使用しながら現在に至っている。

氷の結晶構造も模型氷の特性として重要である。氷の破壊は結晶界面において発生することから、氷の破壊パターン、例えば船首において形成される砕

氷片のサイズは、結晶構造の影響を受ける。海氷の基本的な結晶構造は、鉛直方向に延びた結晶が集まった柱状構造であり、その水平断面内におけるそれぞれの結晶の径は cm のオーダーとなる。これに対し模型氷では、この結晶構造をさらに微細化する必要があり、このために製氷開始時に **seeding** と呼ばれる噴霧作業を行う。噴霧された水滴は空中で冷却されて微小氷粒あるいは過冷却水滴となって水面に落下する。これは、氷の成長は何らかの粒子を核として開始されることを利用して、人為的にこのような核を与えることにより単位面積当たりの結晶数を増やして構造を微細化するための作業である。**Seeding** を施された氷の結晶径は数 mm 程度となる。写真1は当所氷海水槽において成長させた模型氷の鉛直断面の結晶構造の写真である。2mm 内外の直径を有する結晶による柱状構造が示されている。なお、長時間にわたって **seeding** を継続することにより氷の微小氷粒を水面に堆積させて氷板を形成する手法も開発されている。このような氷は FG 氷 (fine-grained ice) と呼ばれ、フィンランドなどの氷海水槽において採用されている。

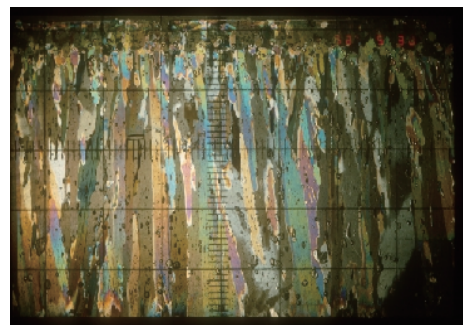


写真1 模型氷の結晶構造(上側が氷板上面)

3. 実験例

氷海水槽の基本的な機能は 400m 水槽などの曳航水槽と同様に船舶の推進性能の把握・評価にあり、当所の氷海水槽においても、船舶の氷中性能に関する各種試験が実施されている。一方、水槽の利用方法の多様化を図るため、近年は、氷中船舶の安全性、あるいは氷中流出油に関する問題などについての研究にも氷海水槽を利用して各種の実験を実施している。以下ではこれらの実験の代表的な例を紹介する。

3. 1 船舶の氷中性能に関わる実験

開水域における船舶の性能の評価にあたっては、曳航水槽における模型実験に加えて、数値計算による性能推定も有力なツールとなってきている。

しかしながら船舶の水中性能については、いくつかの試みはあるものの、数値計算による性能推定はまだ実用化のレベルにはない。これは、船舶の水中航行が氷の破壊を含む複雑な現象であり、これに対する確かなモデルが構築されていないことが最も大きな理由である。今日、船舶の水中性能推定において、氷海水槽における模型実験は必要不可欠なツールとなっている。

船舶の氷中における性能は、例えば「砕氷能力 1.5 m」などのように言い表されることが多い。これはその船が、最大厚さ 1.5 m までの平坦氷（一様の厚さを有する氷板）中を連続砕氷モード（停船することなく連続的に砕氷航行するモード）での航行が可能であることを示す。この時の連続砕氷船速は 3 ノット程度である。なお、連続砕氷ができない氷に遭遇した場合には、後進して氷へ再突入するラミング・モードの操船が為される。船の性能としてこのモードで突破可能な最大氷厚が連続砕氷モードに対する氷厚とともに与えられる場合もある。

氷海水槽における試験においても、平坦氷板中の連続砕氷モードでの試験が最も一般的な試験となる。**写真 2**はこのような試験の様子を水槽側壁の観測窓から撮影した写真である。傾斜した船首により氷板が押し下げられて曲げ破壊し、砕氷片が船体の周囲を覆うように船尾方向に流れて行く様子が示されている。砕氷パターンは、船型、特に船首形状によって変化するが、基本的には三日月形の砕氷片を形成しながら船舶は前進する。また、自航試験等プロペラを装備した実験では、砕氷片がプロペラ面内に流入して破砕される現象が観察されることもある。このプロペラ-氷干渉現象により、実船においては、時にはプロペラ翼あるいは軸系の損傷が発生することもある。また、このような事故に至らない場合であっても、氷の存在により船尾における流れ場が変化し推進性能にも影響を与える。

氷海水槽における船舶の性能評価においても、開水域用の試験と同様に抵抗試験・自航試験・過負荷試

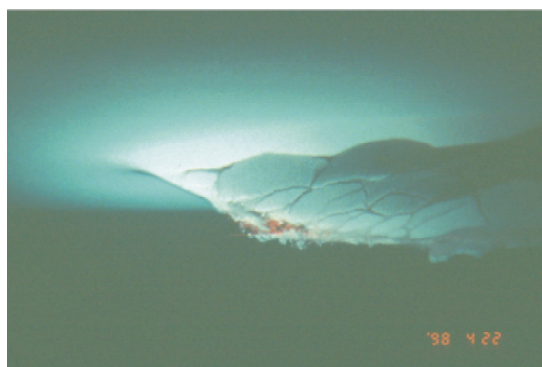


写真 2 平坦氷板中の実験（側壁の観測窓より）

験などが実施される。また、ラミングモードの航行状態に対する実験が行われる場合もある。ここでは平坦氷中における抵抗試験について紹介する。

図 3は、平坦氷板中において実施された抵抗試験の結果の例である。この実験では、長さ・幅・喫水が同一で船首形状の異なる 3 種類の模型船を用いたシリーズ実験が行われた²⁾。**図 3**より船首形状によって抵抗が大きく異なり、C 船型が最も抵抗が低いことが判る。なお、氷中における抵抗試験においては砕氷現象が周期的に起こることに伴って抵抗が変動するが、これを時間的に平均したものをもって抵抗とする。しかしながら、現実の氷海域には平坦氷板以外に様々な状態の氷が存在する。平坦氷板中において有利な船型がこのような他の氷の状況あるいは開水域においても有利な船型であるとは限らない。氷海船舶の船型は、当該船舶が就役する海域における氷の状態、氷海域と開水域における航行距離の比率など、様々な要因を勘案して決定されなければならない。

また**図 3**のそれぞれの船型についてのデータを見ると、水中抵抗が速度とともに増加するラインを描き、またそのラインが速度 0 において切片を有することが分かる。この切片の示す抵抗は、氷板を破壊するために必要な力及び破壊された氷片が水中に押し下げられることによって発生する浮力による抵抗成分であり、船速に依存しない。一方、船速増加に伴う抵抗の増加は、砕氷により形成された氷片が船体の前進に伴って水中へと押し下げられる現象に対する氷の慣性力並びにこれに働く流体力に起因する抵抗成分と理解される。なお水中抵抗の成分には開水域中の抵抗に相当する成分も含まれるが、船舶の水中性能を議論する場合の船速は、一般に 3 から 5 ノット程度と低く、この抵抗成分は氷に起因するものに比べて小さい。**図 3**に示した例では、開水域中の抵抗試験により得られる抵抗は、水中抵抗に比べて 3%以内に収まる。

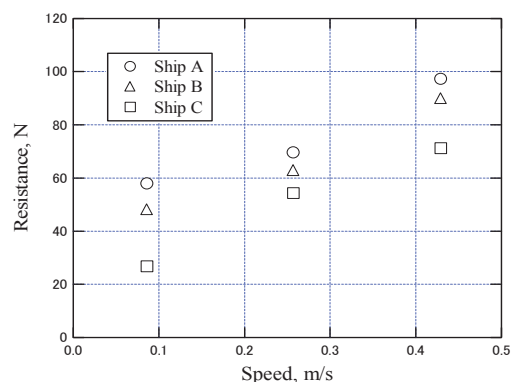


図 3 抵抗試験結果の例（氷厚 50 mm）

3. 2 船体氷荷重に関わる実験

船舶が水中を航行する際には、氷との接触による荷重が船体に発生する。この船体氷荷重を船体全体にわたって積分したものが砕氷抵抗であり、上述の船舶の氷中性能を支配する量となる。この一方、船体氷荷重は狭い領域に高い荷重が集中する特性を有する荷重であり、船舶の安全性の観点からも極めて重要である。従来、氷海水槽における模型実験は船舶の氷中性能を対象とし、安全性の観点からの船体氷荷重については、実船実験による研究が主流であった。しかしながら氷海域における実船実験はその機会が限られるとともに、船体の広い領域にわたって計測を行うことは技術的・経済的な困難さを伴うことから、限定された領域(時には1本のフレームのみ)において荷重に対する船体構造応答を計測して荷重を推定することとなる。このような計測からは、象に触れる盲人の寓話のように、氷荷重の全体像を把握できない惧れがある。

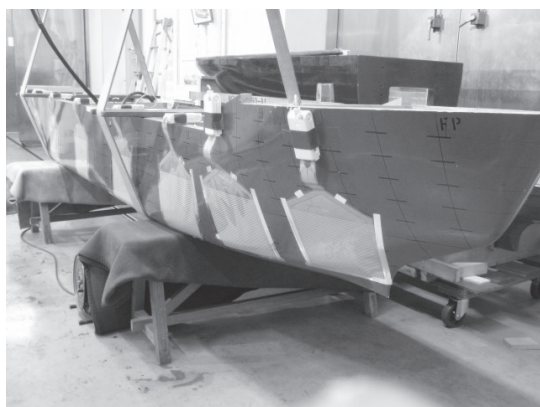


写真3 模型船への圧力センサーの設置

このため当所では、フィルム状の圧力センサーを用いることにより、氷海水槽における模型実験による船体氷荷重の研究を行っている³⁾。この実験では、写真3に示すように船首から船尾にかけて圧力センサーを配した模型船を氷海水槽で航走させ、そのときにそれぞれのセンサーに働く氷荷重を計測した。圧力センサーには44行×44列の格子状にセンシングポイントが配され、約5mmという高い空間分解能で氷荷重の計測が可能である。実験結果の一例を図4に示す。この図では、横軸に船体上の位置(右が船首)を取り、船体周りの氷荷重の分布を示してある。ここに荷重は、それぞれのセンサーによる計測結果から推定された実船における荷重であり、船長方向に単位長さの幅を持つ縦に長い船体領域(縦フレームにより支えられる領域)に加わる最大荷重として与えられている。

実験は自由航走状態において行った。図4には直進(破線)と旋回(実線)の両モードでのデータが

示されている。なお旋回モードのデータは、旋回の外側の船体における荷重分布を示している。直進状態での計測結果からは、船首部に荷重が卓越し、船首肩部近傍で最大値をとった後は船尾に向けて荷重が低減している様子が分かる。これに対し旋回状態では、船首部の荷重は直進状態と同様であるものの、船尾部にも高荷重が働いていることが示されている。氷板中を船舶が砕氷航行する場合、船首部において氷が曲げ割られることにより船体最大幅よりも10%程度広いチャンネルが形成される。図4に示された荷重分布は、直進状態では船首部には砕氷の反力としての荷重が発生するがこれ以後の船体領域はチャンネル内を通過するために荷重が低減するのに対し、旋回状態では旋回のための横力によりチャンネル縁に船尾部が押し付けられることによりここにも荷重が発生した結果であると解釈できる。事実、氷海水槽における船体荷重計測結果には、船尾部の氷荷重と旋回に要する横力との間には良い相関関係が示されている³⁾。

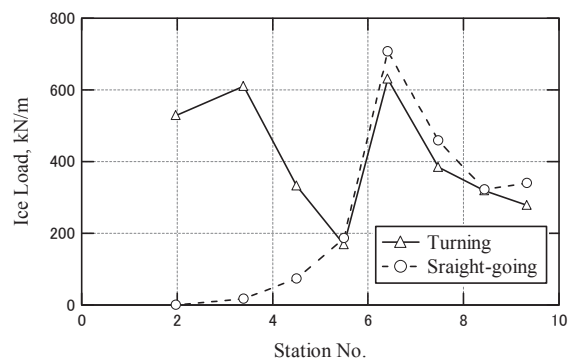


図4 船体氷荷重分布の計測例

このような船尾部の氷荷重については、これまでは研究・計測例に限られてきたが、ポッド型推進器の氷海船舶への採用が増える中、その強い旋回力に対応した船尾構造の補強が必要であり、このような船舶の設計あるいは構造規則等において今後さらに重要性を増す問題と見えよう。

3. 3 水中流出油回収装置の実験

船舶などからの油流出は、時に海の生態系及び当該地域の漁業・観光などの産業に甚大な被害をもたらす。このことは氷海域において特に顕著である。海域に流出した油は最終的には微生物によりより無害な物質へと分解されるが、低温海域ではこの微生物分解の速度が遅く、油汚染の影響は長期にわたる。アラスカで発生したエクソン・バルデス号の事故では、事故後10年以上経過した時点においても海岸の砂の中に当時の油が発見され

ている。このように氷海域は汚染に対して脆弱な環境を有する海域である。この一方、氷海域において油流出事故が発生した場合の汚染防除技術については、開水域におけるものと比較して大きく立ち遅れた状態にある。

このため当所では、氷中流出油の機械的回収を目的とした装置 NMRI-ORDICE (*Oil Recovery Device for Ice-covered Waters*) の開発研究を、氷海水槽における実験を中心として実施している⁴⁾。氷海域における流出油の回収においては、まず油と氷を分離した後に油を水から回収するという2段階を踏む必要があり、特に第一段階の手法が研究開発の主要な対象となる。NMRI-ORDICE では、気泡起因流れを利用してこれを行う。

NMRI-ORDICE による油回収原理を図5に示す。油回収にあたっては、まず、装置内の氷・油分離水路 (Oil-Ice Separation Channel) に氷と油を導く。次に水路底部に設けた気泡発生ユニット (Air-bubbling Unit) から気泡を発生させる。気泡は周囲の水を連行しながら上昇流れを作り、水面において水平流に変換される。氷と油はこの流れにより水路側方の油回収槽 (Oil Recovery Duct) 方向に流されるが、その前面にある格子構造により油は水路内に流入するが、氷は止められる。このようにして油と氷の分離を行い、油を回収する。

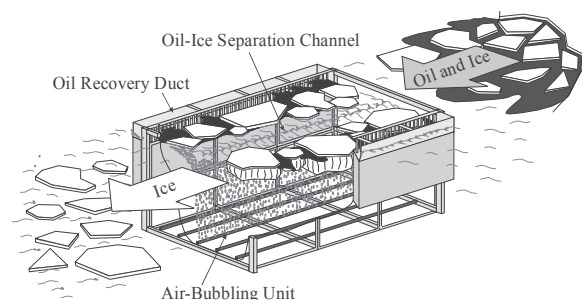


図5 NMRI-ORDICE による氷中流出油回収

NMRI-ORDICE の油回収性能の評価を目的として、氷海水槽における実験を行った。実験には、長さ 6.6 m、幅 5.0 m の模型を用いた。このような大型の模型を用いた理由は、対象が氷・油・水・空気という固・液・気体に関わる複雑な現象であり、小型模型による実験は実機の性能推定に適当ではないと考えられる点にある。また、NMRI-ORDICE はサハリン大陸棚開発の進展に伴うオホーツク海における油流出を念頭に開発された。冬季オホーツク海では大小様々の氷盤が存在する。実験では、このような氷盤を各種の直径を有する円盤型氷盤（最大直径は 2 m）で代表させた。なお、供試油としては、着色した機械用

潤滑油を使用した。

この実験の様子を写真4に示す。実験では、氷・油分離水路内に油と氷盤が混在した状態から 10 分間の油回収を行い、回収量により装置の性能を評価した。写真4には、装置左側から気泡を発生させて右側の油回収部へ油と氷を送っている状態が示されている。このような実験の結果、水路内の氷盤密接度（水路内に占める氷の面積率）が 50% 程度の場合、10 分間のオペレーションでほぼ 90% 以上の油が回収できることが示された。

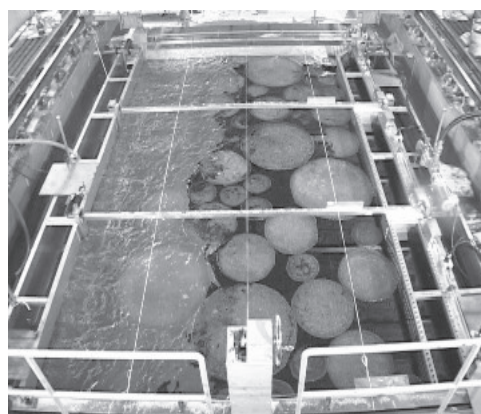


写真4 氷海水槽における油回収実験

3. おわりに

本文では、海上技術安全研究所の氷海水槽とそれを利用した各種の実験について紹介した。近年、北極域における豊富な資源の存在あるいは地球温暖化に伴う海氷量の低下、また日本に近いところではサハリン島における海底資源開発の本格化などを背景に、氷海域における資源開発あるいは航路としての利用などに対する関心が高まっている。とはいえ氷海技術及びそのベースとなる氷海水槽における模型実験は、一般にはまだ特殊なものであろう。本文の内容が氷海水槽とそこにおける実験について読者の理解の一助となるようであれば幸いである。

参考文献

- 1) Schwarz, J., 1977. New Developments in Modeling Ice Problems. Proc. of the 4th International Conference on Port and Harbor Engineering under Arctic Conditions (POAC'77).
- 2) Izumiyama, K. and Uto, S., 2005. Ice Resistance of Three Bow Forms for the NSR Cargo Ship. Northern Sea Route. Future and Perspective. pp. 459-467.

- 3) Matsuzawa, T., Wako, D. and Izumiyama, K., 2006. Local Ice Load on a Ship with Podded Propulsors. Proc. of the 18th IAHR International Symposium on Ice. Vol.2, pp. 33-40.
- 4) Izumiyama, K., Kanada, S., Shimoda, H., Wako, D. and Takimoto, T., 2008. R & D Study of an Oil Recovery Device for Ice-covered Waters., Proc. of the 19th International Symposium on Ice. Vol.2, pp. 1171-1185.