

次世代砕氷型巡視船の設計手法の高度化に関する研究

小山 鴻一*、成田 秀明*、北村 茂*、泉山 耕*、
吉田 三雄*、宇都正太郎*、田村 兼吉*、金田 成雄*、
下田 春人*、瀧本 忠教*、若生 大輔*
宮本 武**、岡 修二**、中村 卓司**、山田 安平**
猿田 俊彦***、長谷川 純***

Study on Advanced Design Technology for the New Patrol Icebreaker

by

Koichi KOYAMA, Shumei NARITA, Shigeru KITAMURA, Koh IZUMIYAMA,
Mitsuo YOSHIDA, Shotaro UTO, Kenkichi TAMURA, Shigeo KANADA,
Haruhito SHIMODA, Tadanori TAKIMOTO, Daisuke WAKO,
Takeshi MIYAMOTO, Shuji OKA, Takuji NAKAMURA, Yasuhira YAMADA,
Toshihiko SARUTA, and Jun HASEGAWA

Abstract

This report is a summary of SRI research project entitled "Study on Advanced Design Technology for the New Patrol Icebreaker". In order to provide basic data for the advanced design technology for the new patrol icebreaker, the study was carried out from 1996 to 1998.

The study consists of construction of data base for sea ice condition in the Sea of Okhotsk, measurement of propeller shaft forces of the icebreaker, and measurement of response of hull to the ice load. Sea trials of the patrol icebreaker were conducted for the above study in the Sea of Okhotsk.

Sea ice observation using ship-born systems such as video camera and Laser altimeter and direct measurement by drill-hole in ice supplied valuable information on ice and snow thickness, strength of ice, and surface profile of deformed ice. The information was added to the data base.

Shaft thrust and torque were measured using strain gauges attached to the propeller shaft. Accuracy of the thrust measurement was discussed.

Hull strain resulting from ice loads was measured using strain gauges located around the bow. Using the strain values and FEM calculation of simple structure model, the ice load on the hull was estimated.

* 氷海技術部

** 構造強度部

*** 推進性能部

原稿受付 平成12年 7月11日

審査済 平成12年11月15日

目 次

1. はじめに
2. オホーツク海の氷況
 - 2.1 船上からの氷況計測
 - 2.1.1 氷況計測法
 - 2.1.2 氷厚及び積雪深
 - 2.1.3 変形氷
 - 2.2 海水データベース
 - 2.2.1 データ構成
 - 2.2.2 データベースの形式
3. 連続砕氷航行時の軸系出力
 - 3.1 実船実験概要
 - 3.1.1 供試船と氷況
 - 3.1.2 スラスト計測法
 - 3.2 計測結果
 - 3.2.1 スラスト計測結果
 - 3.2.2 計測精度
 - 3.2.3 計測結果の評価
4. ラミング砕氷航行時の構造応答
 - 4.1 実船実験概要
 - 4.1.1 供試船
 - 4.1.2 氷況
 - 4.2 ラミング性能試験
 - 4.2.1 試験手順
 - 4.2.2 推進・運動計測結果
 - 4.2.3 ラミング進出距離
 - 4.3 構造応答計測と氷荷重の推定
 - 4.3.1 計測法
 - 4.3.2 計測結果
 - 4.3.3 極値の統計的性質
 - 4.3.4 連続砕氷時の計測結果との比較
 - 4.3.5 最大歪みとその発生要因
 - 4.3.6 氷荷重の推定
5. おわりに
 - 参考文献

1. はじめに

北海道北東岸のオホーツク海は冬季に流氷に覆われ海上交通が阻害される。南部オホーツク海域における航行安全を守るために現在2隻の海上保安庁の砕氷型巡視船が就役している。巡視船「そうや」は全長98.6メートルで1978年の建造、巡視船「てしお」は全長55メートルで1995年の建造である。極東ロシア地域との経済交流の活発化に伴って、この海域を哨戒し流氷海難救助に従事する砕氷型巡視船の重要性が今後一層拡大するものと思われる。

かかる砕氷型船舶の建造及び運航のために活用さ

れる基礎資料を整えるべく、船舶技術研究所においては海上保安庁と共同で砕氷型巡視船の水中航行性能の研究を行っている。その中で、1993年から1995年にかけて指定研究「小型砕氷巡視船の水中航行性能に関する研究」を行った。この研究は丁度巡視船「てしお」の建造に位相を合わせて研究が遂行された。更に、近い将来において次の世代の巡視船が建造されるものと考え、その準備をすべく本指定研究「次世代砕氷型巡視船の設計手法の高度化に関する研究」を1996年から1998年（平成8年から平成10年）にかけて行った。

本報告は、「次世代砕氷型巡視船の設計手法の高度化に関する研究」における研究成果の概要を報告するものである。研究の詳細は原論文を参照いただきたい。

「小型砕氷巡視船の水中航行性能に関する研究」においては、実船試験により得られた実船の水中性能と氷海船舶試験水槽における模型試験により得られた推定結果との対応を明らかにした¹⁾。本研究「次世代砕氷型巡視船の設計手法の高度化に関する研究」においては、次の世代の砕氷型巡視船の設計へ踏み込むことを目標とし、冬季オホーツク海における実船実験を中心に研究を遂行し、合理的な船型設計及び船体構造設計を行うための基礎資料の整備を計った。特徴的なこととして、砕氷航行時の実船プロペラスラストの計測を試みたことと、氷荷重による構造応答の計測に踏み込んだことがあげられる。また、過去のデータ集積をも取り込んで氷況データベースを構築したことも本研究で得られた重要な成果である。

本文の構成は、主要部が3章にわたる。

第2章において、砕氷型巡視船の運航するオホーツク海の氷況に関する研究結果を示す。氷況データは、砕氷型巡視船の建造の境界条件を与えるものとして重要である。しかしながら南部オホーツク海の海水データは沿岸部の限られた地域を除いて、ほとんど報告された例はなかった。

第3章においては、砕氷航行時のプロペラスラストを計測した実船実験について報告する。プロペラスラストは、航行性能評価の基本となる重要なデータであるが、実船においてそれを計測するには高度な技術を要し、データが少ない。

第4章においては、実船実験により構造応答の計測を行い、氷荷重の推定を試みた研究について報告する。構造応答計測結果は、砕氷型巡視船設計時に重要な資料となるが、氷荷重による構造応答のデータが我が国においては極めて少ない。

2. オホーツク海の氷況

砕氷船の開発や氷海域の安全航行には、対象とする海水の状況、性質を把握することが必要である。本章においてはオホーツク海の氷況についての研究結果を報告する。はじめに船上観測による氷況計測に関する研究結果を、次に海水データベースに関する研究結果を報告する。

2.1 船上からの氷況計測^{8),12)}

船上観測による海水データは非常に少ない。この種のデータは衛星により得られたデータの検証という意味からも極めて貴重である。船舶技術研究所においてはオホーツク海における巡視船の実船実験による氷況計測を1991年¹⁷⁾以来継続し、データの集積に努めてきた^{5),6),7),10),14)}。本研究の遂行時にも1997年^{3),13),15)}、1998年^{8),9),12),16)}と実船計測を行った。

本節ではその中から、1998年2月に実施された砕氷型巡視船「てしお」の実船実験において行われた氷況計測について示すことにする。実船実験の概要は後節4.1に示してある。試験海域を図-2.1に示した。試験海域の氷密接度は90~100%であり、船は頻繁に変形氷に遭遇した。

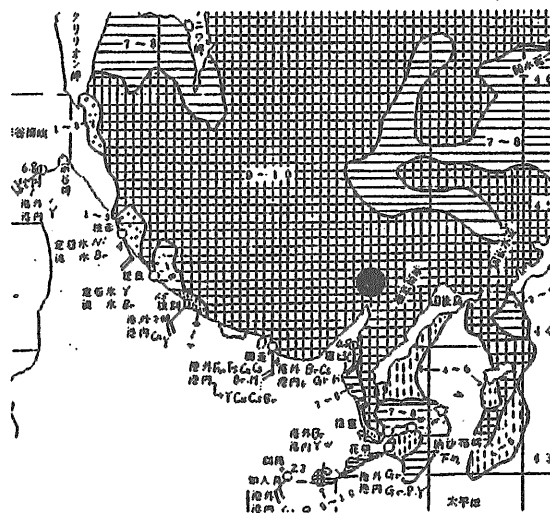


図-2.1 平成10年2月25日の流水状況及び実船実験の実施位置

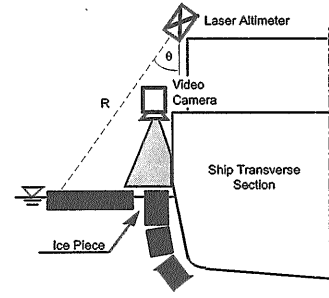


図-2.2 氷況計測法

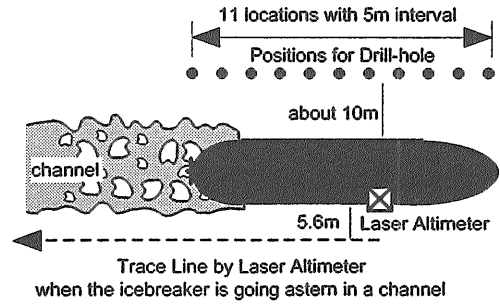


図-2.3 氷盤掘削位置

2.1.1 氷況計測法

氷況計測は3つの方法で行った。計測方法の説明を図-2.2及び図-2.3に示した。

第1の方法は、ビデオカメラを舷側に下向きに取り付け、砕氷され舷側で直立した砕氷片を撮影し氷片の厚さを求めた(図-2.2)。

第2の方法は、氷上においてドリルで氷に孔をあけ直接計る氷盤掘削の方法である。今回の測定位置を図-2.3に示した。

第3の方法はレーザ距離計を用いて、氷の表面までの距離を測る方法である(図-2.2)。

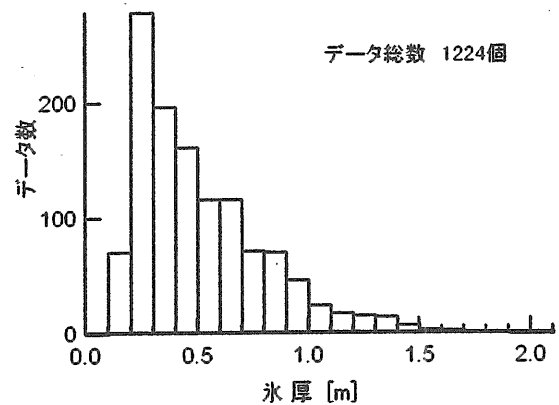


図-2.4 VTR観測による実験期間中の氷厚分布

2.1.2 氷厚及び積雪深

ビデオカメラ観測（第1の方法）による氷厚観測結果のヒストグラムを図-2.4に示す。ヒストグラムの最大値は0.2~0.3mにある。氷厚0.4m以下の氷盤は、概ね変形のない平坦氷（写真-2.1）であり、氷厚0.5m以上は氷丘氷や氷丘脈などの変形氷（写真-2.2、2.3）である。ただしビデオカメラ観測は平坦氷については氷厚を精度良く観測することができるものの、変形氷の観測には適していないとされている。そこでラミング試験終了後に氷丘化した氷盤において（第2の方法）、船側に沿って5m間隔で穿孔し、氷厚及び積雪深を実測した（図-2.3、写真-2.4）。計測結果を図-2.5に示す。厚さ約0.5mの平坦氷をベースにして変形氷が形成されていることが分かる。氷丘部の最大厚さは2.5m以上に達していた。



写真-2.3 氷丘化した氷盤

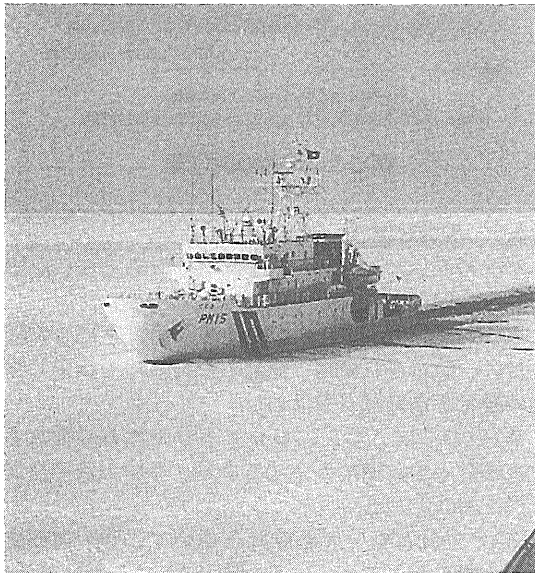


写真-2.1 平坦氷盤を連続碎氷航行する「てしお」



写真-2.4 氷盤上で氷厚及び積雪厚を計測

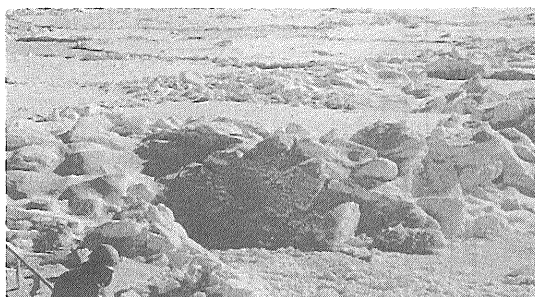


写真-2.2 ラミング碎氷後に氷丘脈に残された船首痕

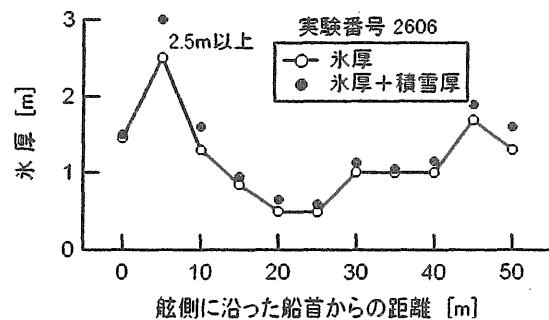


図-2.5 氷盤掘削による氷厚・積雪厚分布

また積雪は0.05~0.5mの範囲でばらつき、平均は約0.2mであった。図-2.6は積雪深を氷厚に対してプロットしたものであるが、積雪深の氷厚に対する比は平均で0.2程度である。

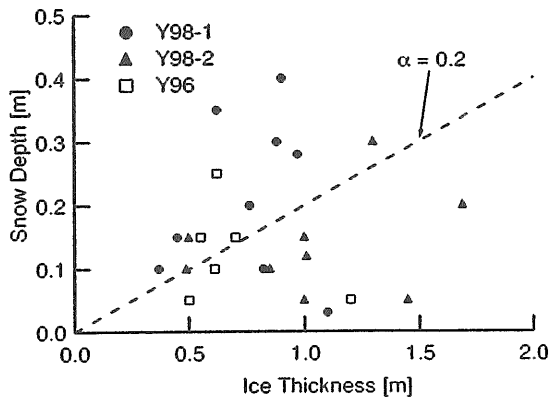


図-2.6 積雪深と氷厚

2.1.3 変形氷

第3の方法により計測した氷高を図-2.7に示した。表面の凹凸は船が通過した氷盤が変形氷であったことを物語っている。氷丘の高さと幅のヒストグラムを図-2.8に示した。図-2.9は氷丘高さに対して氷丘幅をプロットしたものであるが、今回の計測結果からは両者の特徴的な相関は得られなかった。

以上、船上からの氷況計測の研究においては、平坦氷の観測のみならず、変形氷の観測にまで観測範囲を広げている。

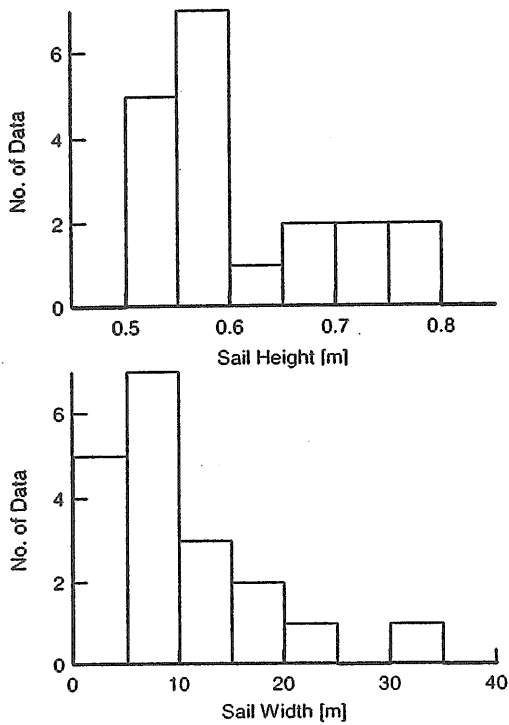


図-2.8 氷丘高さと氷丘幅のヒストグラム

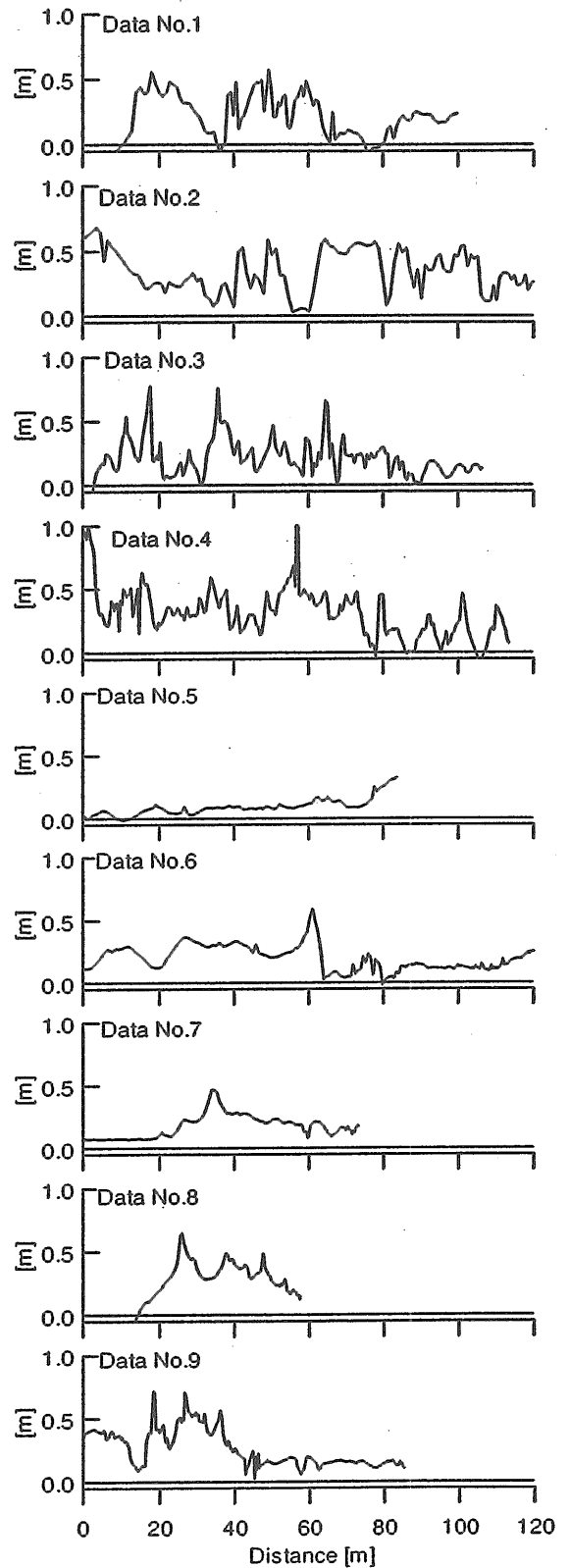


図-2.7 氷高分布

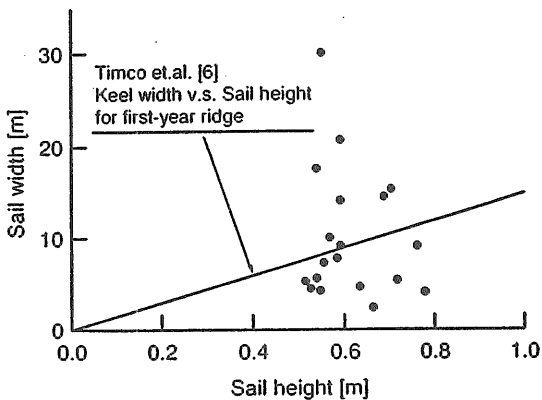


図-2.9 氷丘幅と氷丘高さ

2.2 海水データベース⁴⁾

砕氷船の開発や氷海域の安全航行に必要となる海水の状況・性質に関する情報は、利用し易い形に整備され、そのデータは逐次最新のものに更新されて行くことが望ましい。今回、オホーツク海の海水データについて、気象庁及び第一管区海上保安本部のデータ、また実船試験時に計測した氷厚データ等に基づいてデータベースを構築した。

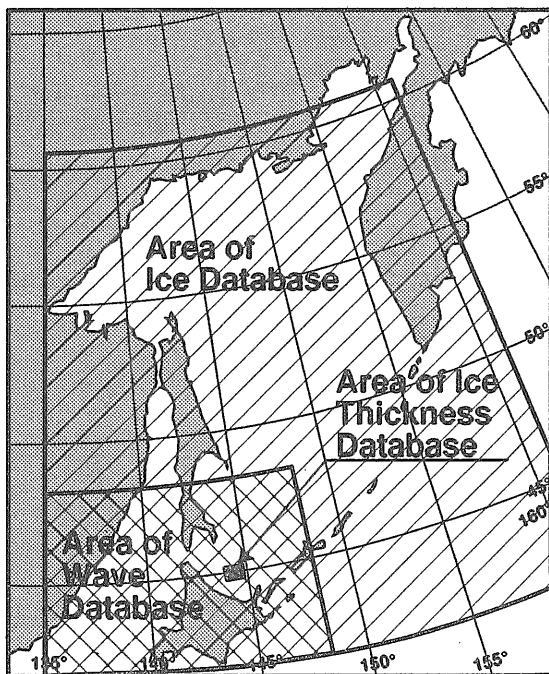


図-2.10 各データの地理的範囲

2.2.1 データ構成

本データベースは、海水データ、局所波浪データ、

船上観測海水データ（氷厚データ）の3種類のデータから構成される。図-2.10に3種類のデータがカバーする地理的な範囲を示す。図に見られるように、船上観測海水データは非常に狭い海域にとどまっている。なお、局所波浪データに関しては、砕氷航行と直接は関係しないが、船舶の航行安全の観点から、本データベースに含まれている。

詳細は参考文献⁴⁾に譲るとして、ここでは海水データの例を図-2.11に示す。分解能の限界から、東西に約20km、南北に約28kmのセル毎のデータとなる。このセル毎に、氷密接度を0、1~3、4~6、7~8、9~10の5段階に分けて表示を行っている。図-2.11はその表示例で、北海道沿岸をズームアップしたものである。

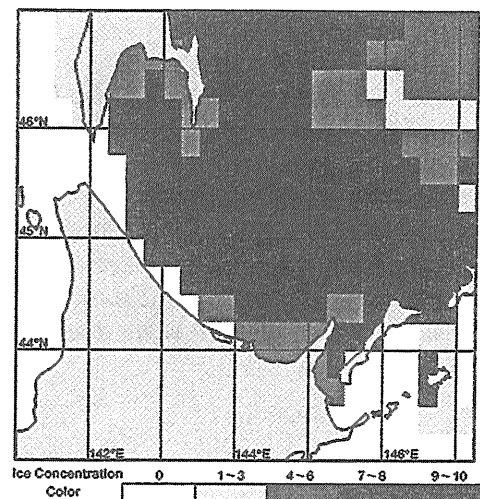


図-2.11 氷密接度データ表示例（平成8年2月25日）

2.2.2 データベースの形式

データベースの仕様の概略を示したフローチャートを図-2.12に示す。必要な入力データはボタンの選択やプルダウンメニュー等マウスのみで選択可能で、各ページ間の移動はリンク機能を使ってスムーズである。それぞれのデータの概説を以下に示す。

海水データを選択し、表示年月日を選択すると、データがロードされ、海図上に5段階別に色分けした氷密接度が表示される。プルダウンメニューから演算期間を選択すると、その期間での氷密接度の平均値を計算し、海図上に色分けにより表示する。ここで、海図上のセルをマウスでクリックすると、その点での氷密接度の時間変化がグラフで表示される。

局所波浪データの波高・波周期は基本的には海水データと同様である。風向・風速については矢印表示となる。

船上観測データを選択すると、計測一覧表と各計測域を示した海図が表示される。一覧表より観測番

号を選択することにより、氷密度と氷厚分布のグラフが表示される。

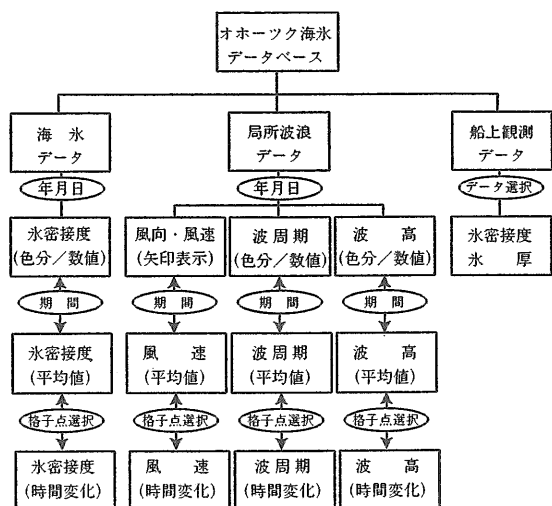


図-2.12 オホーツク海水データベースのフローチャート

3. 連続砕氷航行時の軸系出力^{2), 3), 13)}

推進器軸に働くスラスト・トルクの値はその船の航行性能を評価する上で極めて重要である。船体は氷盤等から大きな前進抵抗を受けるので、それにうち勝つ力をプロペラがスラストとして出す必要がある。スラストはプロペラの回転により発生するが、プロペラ回転は主機関から供給された軸トルクによっている。これらの力が分かれば船の推進性能が明らかになるが、トルク計測による軸馬力計測が行われる場合が多い。更にスラスト計測を加えることにより、より厳密に推進性能を説明できるのであるが、スラスト計測は計測が難しいということから計測例があまり多くない。本研究においては、砕氷航行時のスラスト計測に挑戦した。

3.1 実船実験概要

1997年2月に巡視船「そうや」のオホーツク氷海域実船実験を行い、スラスト等プロペラ軸の軸系出力計測等を行った。

3.1.1 供試船と氷況

巡視船「そうや」の外形と主要目を図-3.1と表-3.1に示す。本船は2軸1舵、主機7800馬力2機、4翼可変ピッチプロペラ (CPP) を装備し、氷厚1mの氷盤を船速3knotsで連続砕氷する公称能力を有している。

実船実験は1997年2月24日から27日まで紋別沖オホーツク海域で行われた。2月25日の流氷分布を図-3.2に示す。今回の実験では、平均氷厚が1m程度のハンモック化した大氷盤に遭遇したため、本船の連続砕氷性能限界に近い状況で計測を行うことができた。航路沿いの氷厚を目視及びビデオカメラによって観測した。また実験中適宜、海水のサンプルを採取して塩分濃度と氷温を計測し、それらの値を用いて氷の曲げ強度を推定した。

表-3.1 「そうや」主要目

Length Overall	[m]	98.6
Length Waterline	[m]	90.0
Breadth Molded	[m]	15.6
Depth Molded	[m]	8.0
Draft Designed	[m]	5.2
Draft Max.	[m]	5.47
Gross Tonnage	[GT]	3136

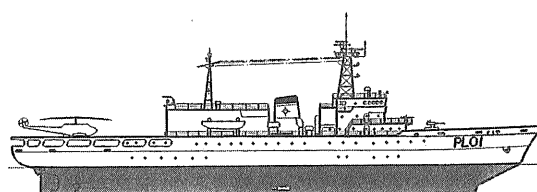


図-3.1 巡視船「そうや」

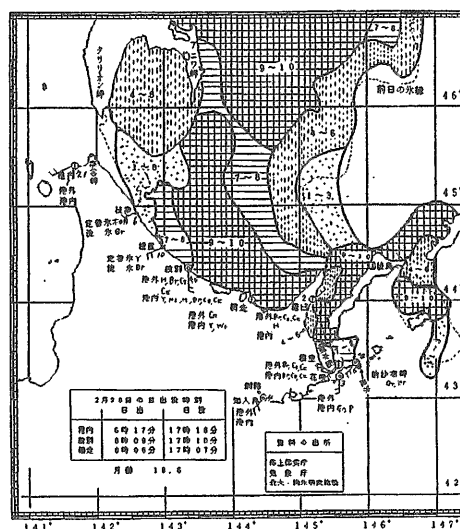


図-3.2 流氷状況 (海上保安庁水路部作成)

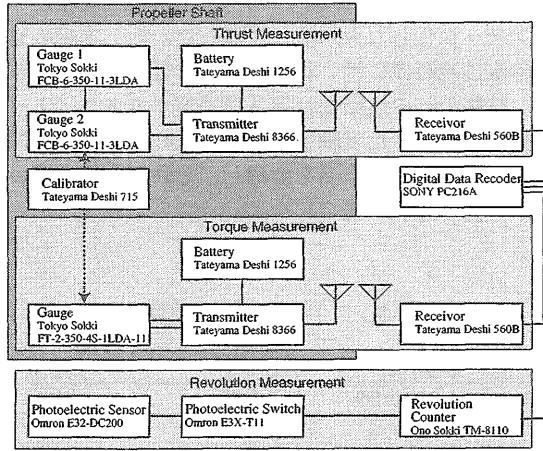


図-3.3 軸系計測システム

3.1.2 スラスト計測法

左舷側の中間軸に歪みゲージを装着し、テレメータ装置を介して軸スラスト及びトルク歪みを計測した(図-3.3)。またCPP翼角は本船指示計の読みとり、船速はGPSと投板の両方によりそれぞれ測定した。

実験は速力試験、停船性能試験及びボラードプル試験の3種類を1セットとして、繰り返し実施した(図-3.4)。はじめに針路及び翼角を一定に保ち、速力試験を実施した。ただし翼角は主機出力が最大出力の1/4から4/4までの4段階になるように調整した。速力試験後、翼角0度とし停船性能試験を行った。船体停止後、翼角を1度刻みで段階的に増加させて、船体発進までの間、ボラードプル試験を実施した。これらの実験では軸回転数を一定とした。

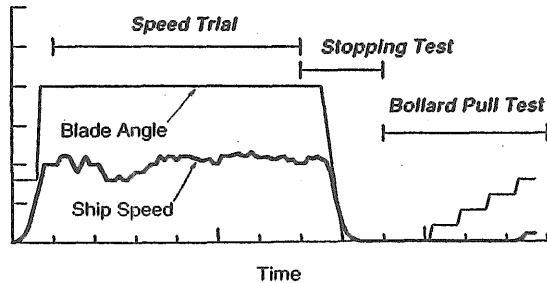


図-3.4 実験経過説明図

3.2 計測結果

3.2.1 スラスト計測結果

速力試験時の軸回転数、圧縮歪み及びねじり歪みの計測結果を図-3.5に示す。これは平均氷厚94cmの氷盤中を平均船速3.6knotsで航行した場合で、本船の連続砕氷性能の限界に近い。このためプロペラと氷塊の接触によると思われるイベントが頻繁に記録されている(例えば図中の破線位置)。

プロペラと氷塊が接触すると、瞬間的にねじり歪み波形が大きく立ち上がる。同時に圧縮歪み及び回転数が低下する。プロペラと氷の干渉による変動成分については参考文献¹⁹⁾に詳しい。本報告ではその定常成分に着目して解析を行った。

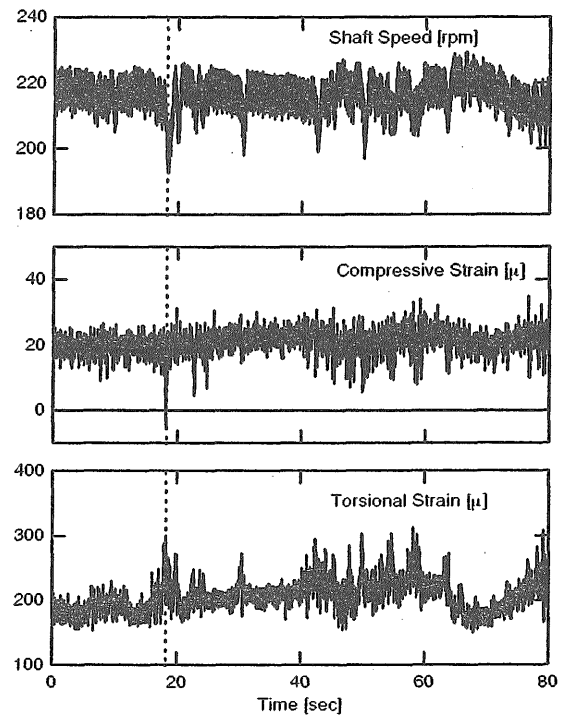


図-3.5 速力試験時の計測波形

3.2.2 計測精度

一般に歪みゲージを用いてスラスト計測を行う場合、ブリッジの構成法には通常法とヒラリデス法の2種類のいずれかが採用される。前者は温度歪みの影響を原理的に受けないこと、出力が後者の2倍である等の利点があるが、ねじり歪みの影響が計測値に含まれる欠点がある。本研究では通常法を採用し、計測値からねじり歪みの影響を定量的に推定し、修正することを試みた。

ねじり歪み影響は歪みゲージの軸への計装時の取り付け誤差及びゲージの工作誤差に起因し、時には

正味の圧縮歪みと同程度の見かけ歪みを与えることもある。この影響を軸ターニング試験結果を用いて修正する方法が提案されているので¹⁸⁾、それによって今回の場合を計算すると、ねじり歪み影響による圧縮歪み修正量の平均値は測定値の1.3%程度となった。

次にスラストの零点を以下のように設定した。スラストの零点としてターニング試験時のスラストの正逆転の平均値を用いることが多い。軸ターニング試験と本試験の時間間隔が大きくなると、温度ドリフトの影響が避けられない。そこで本研究では速力試験直後に行われた停船性能試験における翼角0度で船体停止時の計測値をスラストの零点とした。

今、プロペラ軸に一定の圧縮歪みが作用する場合を仮定し、要素誤差要因として以下の項目を取り上げ、不確かさ解析によりスラストの計測精度を検討した。

- (1) 歪みゲージ加工及び計装精度、(2) ゲージ率変化、(3) トランスミッタ及びレシーバの精度、(4) 量子化精度、(5) 材料定数、(6) 軸断面積、(7) 校正曲線のあてはめ、(8) 停船性能試験における翼角の設定精度

これらのうち、最も支配的な要素誤差は(1)であり、ねじり歪み影響を表すことが分かった。

ボラードブル試験における翼角とスラストの関係を図-3.6に示す。ただしこのときの船体は氷盤に対して静止している。計測値の95%包括度は約20kNであり、同一翼角に対するスラスト値のばらつきは、この範囲に納まっていることが分かる。

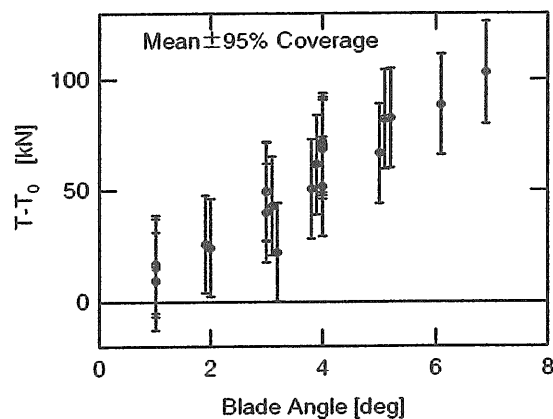


図-3.6 ボラードブル試験結果

3.2.3 計測結果の評価

速力試験時の解析結果を図-3.7に示す。図中の添え字は氷厚の平均値 (cm) であり、氷盤密接度はいずれも10/10である。95%包括度は氷厚90cm程度

のデータで平均値の±13%となった。図には氷海船舶試験水槽における模型試験結果による推定値²⁾も載せてある。

実験値には対応する氷厚及び船速に対して明らかに値が大きいデータが存在する。このうちの2点(図中黒三角印)は、氷厚分布に顕著な2つのピークがあり、2種類の異なった氷盤が混在した氷況である。残りの2点(図中黒四角印)は、燃料消費量から換算した馬力値も同様の傾向を示すため計測誤差とは考えられない。氷厚計測精度を含めて今後検討する必要がある。

以上の4点を除き、実験値と推定値の相関を図-3.8にプロットした。氷厚45cm以下の氷盤では推定値は過小評価となり、相関係数は約1.3でほぼ一定である。その原因の一つとして船体と氷の摩擦影響が考えられる。特に氷盤上に積雪があると摩擦係数が増加することが知られている。一方、氷厚約90cmの2点は非常によく一致した。これらは小さな氷塊が重なり合っただけでハンモック化した氷盤である。氷塊同士の凍着度が弱ければ、推定した曲げ強度よりも実質的な強度は低い可能性がある。この影響と前述した摩擦影響が相殺された結果、良い一致を得た可能性も否定できない。

このように水中抵抗推進性能における模型と実船の相関を把握する上で研究課題は山積しているが、ここで得られた実船実験データをベンチマークとして、今後の研究に役立てたい。

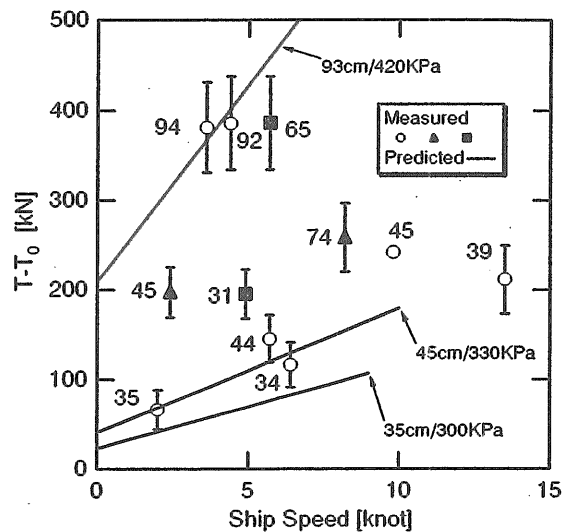


図-3.7 速力試験結果

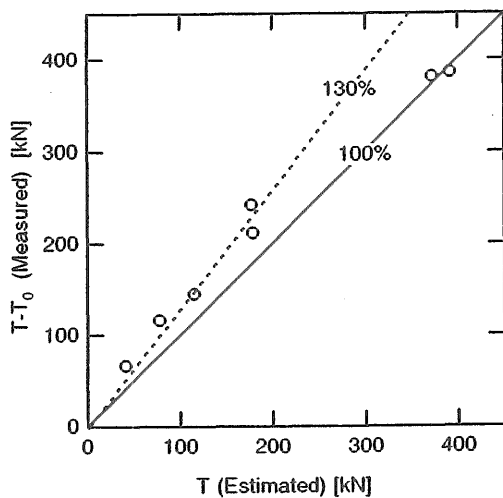


図-3.8 スラスト値の実船-模型相関

4. ラミング砕氷航行時の構造応答^{8),9)}

氷海域を航行する船舶に作用する氷荷重は、波浪荷重と並んで構造安全上の脅威となる環境外力である。船舶に作用する氷荷重の研究はフィンランド、カナダ等の北方圏諸国で盛んに行われ、研究成果は砕氷及び耐氷船舶の構造設計基準（Finnish-Swedish Ice Class Rule, ASPPR等）に反映されてきた。しかしながら我が国における本分野の研究は極めて限られており、南極観測艦「しらせ」等での船体歪み計測が行われたに過ぎない²⁰⁾。

船舶に作用する氷荷重は、対象海域における海水の条件や運航形態に強く依存する。そこで実船実験を実施し、連続砕氷航行及びラミング砕氷航行時に、氷荷重に対する構造応答を計測した。

以下に、ラミング試験時の構造応答計測について記述するとともに、有限要素法を用いた氷荷重の推定について報告する。ただし、構造応答の報告に入る前に、実船実験全体の概要とラミング試験について説明する。

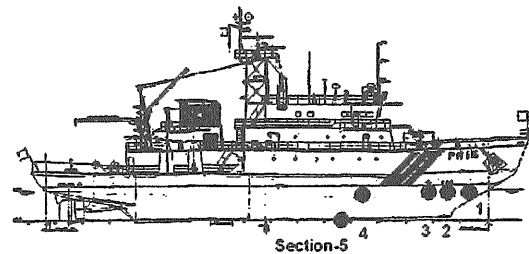
4.1 実船実験概要⁸⁾

1998年2月に砕氷型巡視船「てしお」のオホーツク氷海域実船実験を行い、氷荷重に対する構造応答計測等を行った。

4.1.1 供試船

実験の供試船である巡視船「てしお」は1995年秋に就役し、海上保安庁第一管区海上保安部羅臼保安署に所属する新鋭の砕氷型巡視船である。「てしお」は2軸ダクト付き可変ピッチプロペラ、2舵を装備し、1軸あたりの主機出力は1800馬力である。厚さ55cm

までの氷盤を3knotsの速力で連続的に砕氷できる公称能力を有する。「てしお」の外形及び要目を図-4.1に示す。



全長	55 m	最大幅	10.6 m
深さ	5.0 m	総トン数	550 ton
出力	3600 馬力		

図-4.1 巡視船「てしお」

4.1.2 氷況

実船実験は1998年2月24日から26日にかけて知床岬北方の海域で行われた。2月25日の流水状況（第一管区海上保安本部作成）は既に図-2.1に示されている。図中の黒丸印は今回の実船実験を実施した海域を示す。実験期間中に北海道沿岸の流水は、ほぼ最盛期を迎えた。試験海域ではラミング試験に適した氷丘脈（写真-2.2）及び氷丘氷（写真-2.3）に頻繁に遭遇した。このため限られた期間内にラミング性能試験を15回実施することができた。

実験時の計測項目の詳細は参考文献⁸⁾を参照いただきたい。また、氷況の詳細については既に第2.1節で説明した。ただし、氷盤の一軸圧縮強度に関しては、採取した海水サンプルの塩分濃度計測結果から、2.1~3.4MPaと推定した。

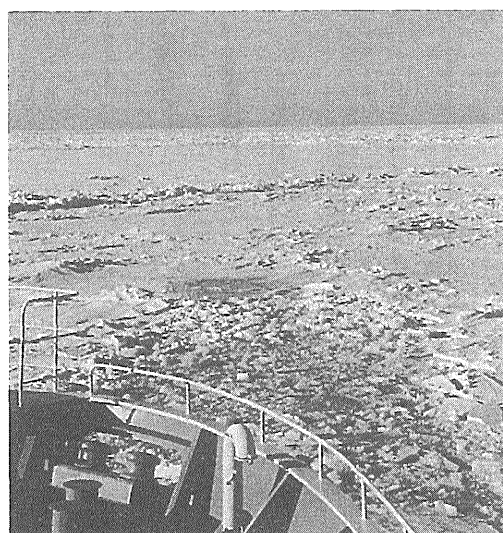


写真-4.1 ラミング砕氷を行う「てしお」