

4.2 ラミング性能試験<sup>8)</sup>

4.2.1 試験手順

ラミング砕氷とは船体を加速して氷盤に突入させ、船体の慣性力を利用して氷盤の突破を図る砕氷船独特の航法である。今回の実船実験では下記の手順に従ってラミング性能試験を実施した。

- (1) 船体停止状態で諸量の零点を計測する。
- (2) 主機関の出力を最大出力の3/4あるいは4/4になるように翼角を設定する。
- (3) 開水路中を約2船長(約100m)加速・前進させて氷縁に突入する(写真-4.1)。
- (4) 船体が氷盤に対して停止するまで、軸回転数及び翼角を一定に保つ(ただし、4.2.2節で述べるように主機保護のため翼角減少の制御がかかる場合もある)。
- (5) 停船後、氷縁からの進出距離を計測する。
- (6) 約2船長後進する。

氷盤を突破するまで以上の手順を繰り返し行う。通常のラミング砕氷では状況に応じて、主機関出力及び助走距離を柔軟に設定する。今回の試験では試験条件を揃えるために、これらを予め規定した。

4.2.2 推進・運動計測結果

ラミング試験時の船体運動、加速度、船速及び軸出力計測結果(軸回転数、圧縮歪み及びねじり歪み)の計測例を図-4.2に示す。また機関状態監視装置の出力を図-4.3に示す。

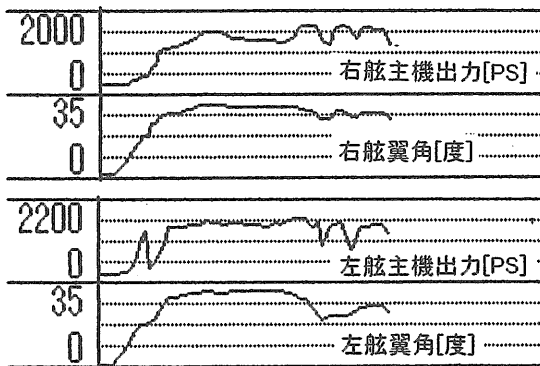


図-4.3 機関状態監視装置からの計測例  
(実験番号2604、主機出力4/4)

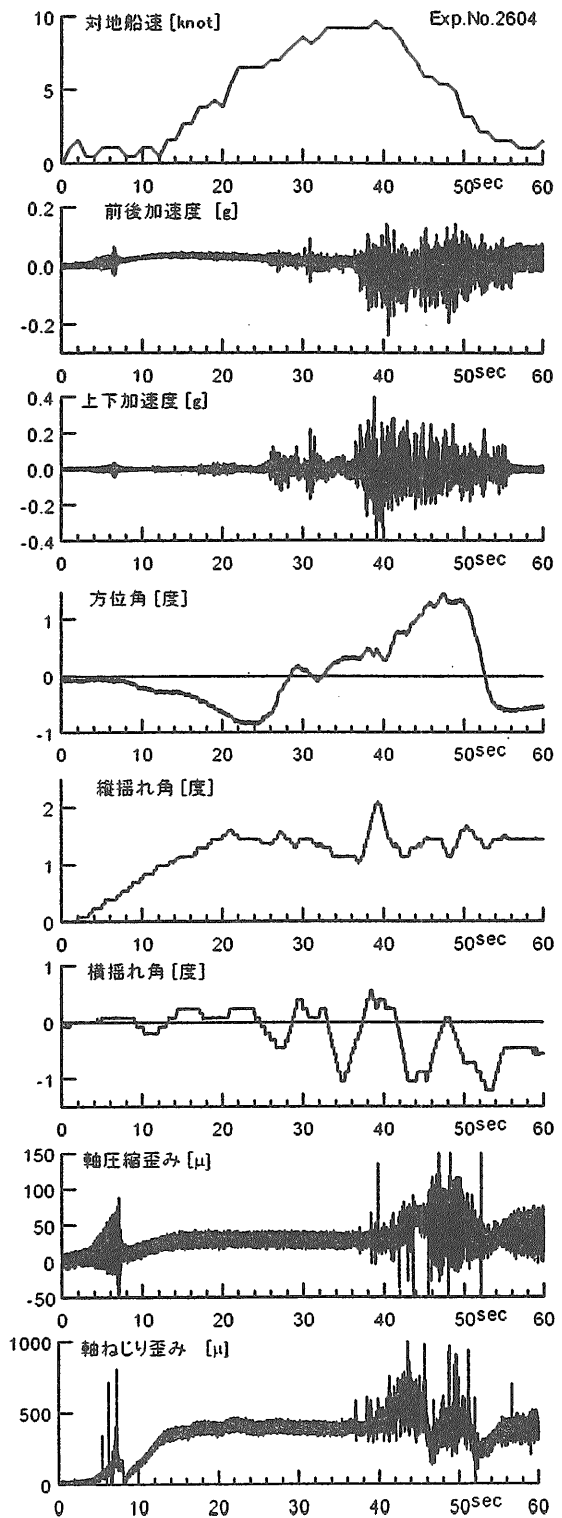


図-4.2 船体運動・加速度・船速及び軸出力計測例  
(実験番号2604、主機出力4/4)

前進開始発令とともに、翼角が0度から所定の値に変更され、約20秒後にトルク、スラストが整定する。助走区間中に船体は加速され、氷縁との衝突時(39秒後)の船速は9knotに達する。衝突時に大きな縦揺れと前後・上下加速度が生じ、その後船速は急激に低下する。しかし、回転数と翼角は保たれているので、スラスト、トルクが増加する。

この瞬間に主機の過負荷状態が生じるとオーバーロード・プロテクタ (OLP) が作動し、翼角低下の制御がかかる。このためスラスト、トルクが減少する。過負荷状態が緩和されると翼角が回復するが、本例では約10秒間にOLPが2回作動していることが分かる。

4.2.3 ラミング進出距離

ラミング進出距離と氷厚の関係を図-4.4に示す。縦軸はラミング一回あたりの進出距離を船長で無次元化したもの、横軸の氷厚は船上から目視観測した結果の平均値である。また主機出力は4/4である。

一般に氷厚が増加するに連れて進出距離が低下する傾向が認められる。例えば最大積雪深20cm以下の場合、氷厚60cmでは約2船長の進出距離が得られたが、氷厚85cmでは1/2船長程度まで低下した。

ところが氷厚60cmでも最大積雪深が30cmの場合は進出距離が1/4船長以下にとどまっている。氷盤上の積雪は緩衝材となって船の運動エネルギーを吸収し、ラミング性能を低下させる大きな要因となると考えられる。進出距離と最大積雪深の関係を図-4.5に示す。平均氷厚が比較的小さい2点を除くと、最大積雪深の増加に対して進出距離は減少する傾向があることが分かる。特に最大積雪深30cmの場合、氷厚63~90cmの範囲で進出距離は氷厚によらずほぼ一定である。

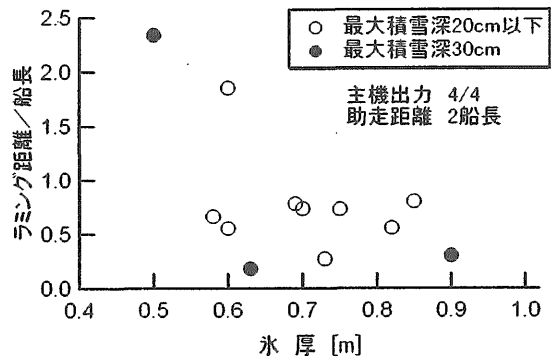


図-4.4 ラミング進出距離と氷厚の関係

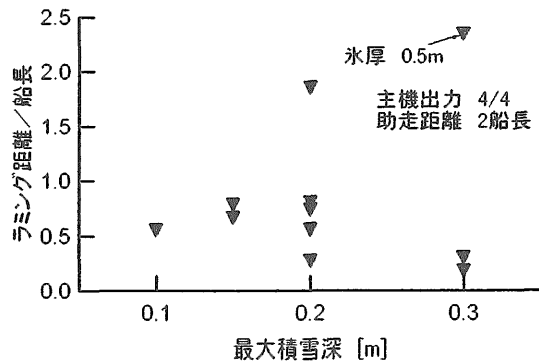


図-4.5 ラミング進出距離と積雪深の関係

4.3 構造応答計測と氷荷重の推定<sup>9),11)</sup>

4.3.1 計測法

本研究では氷荷重の作用範囲と圧力のオーダーを把握することを目的として、歪みゲージを次に示す様に配置し、氷荷重による構造応答を計測した。

船首部 (Section1~3)、船首肩部 (Section4) 及び船底部 (Section5) で、肋骨及び船体外板の65ヶ所に歪みゲージを設置した。各Sectionの位置を図-4.1に、Section2~4に設置した歪みゲージの位置を図-4.6に示す。常備状態における喫水線下方 (D) 250mm及び400mmのレベルに、船首尾方向 (x) 及び肋骨方向 (y) の歪み検出用のゲージを設置した。計測は船首部及び船底部のゲージを中心に、目的に応じて53ヶ所を選択して実施した。

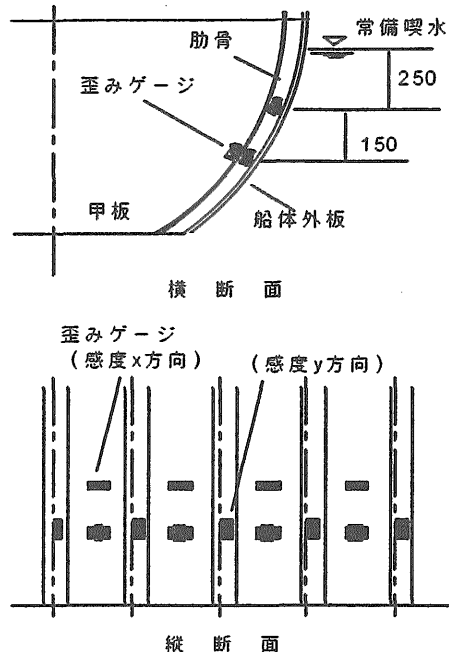


図-4.6 歪みゲージ配置位置 (Section-2~4)

### 4.3.2 計測結果

構造応答及び船体運動の時系列データの例を図-4.7に示す。計測開始後36.5秒後に氷縁に衝突した。58.5秒で船体は氷盤に対して静止し、この間の進出距離は33mであった。船上からの目視観測によると氷厚は最大90cm、平均58cmであった(第2.1節参照)。船首部上下加速度の最大値は約0.8Gを記録した。また前後加速度の最大値は約0.4G、縦揺れ及び横揺れ角は約2度であった(図-4.2)。これらはいずれも両振幅の値である。氷荷重による構造応答は急峻なパルス状の波形を持ち、典型的な歪み波形の持続時間は0.2秒程度である(図-4.7)。

### 4.3.3 極値の統計的性質

時系列波形に表れた個々のピークを独立したイベントと見なし、その極値をZero-up cross法を用いて解析した。ただし、本研究では極値をイベントの全振幅で定義した。

Section-2の外板歪み(D=250mm, x方向)について極値の超過確率分布をワイブル確率紙上にプロットした。結果を図-4.8に示す。この例を含み、ほとんどの計測箇所歪み極値の超過確率(F)は、次式の二変数ワイブル分布を用いて非常に良く近似できることが分かった。

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{k}\right)^h\right\}$$

ただしtは各イベントの全振幅を、h及びkはそれぞれワイブル分布の形状パラメーター及び尺度パラメーターを表す。

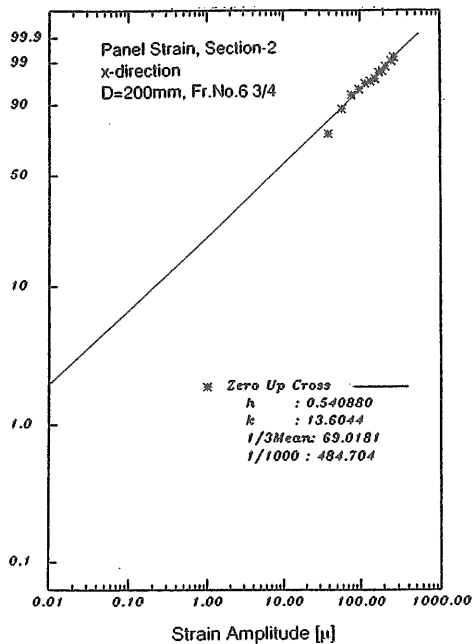


図-4.8 歪み振幅の超過確率分布

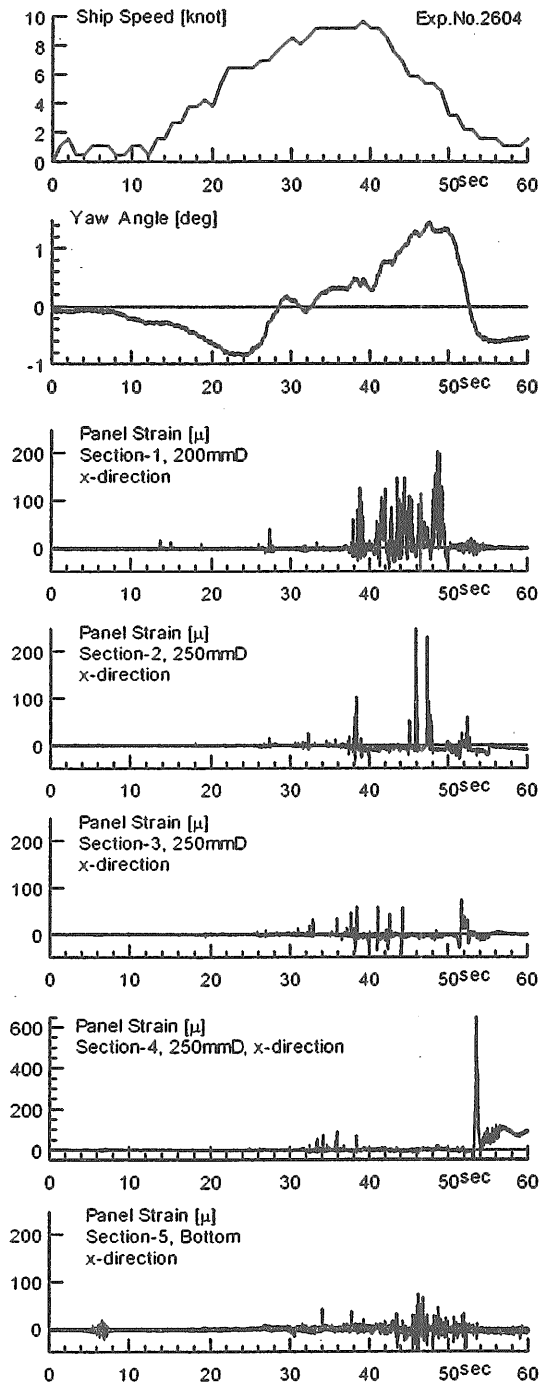


図-4.7 構造応答及び船体運動計測例

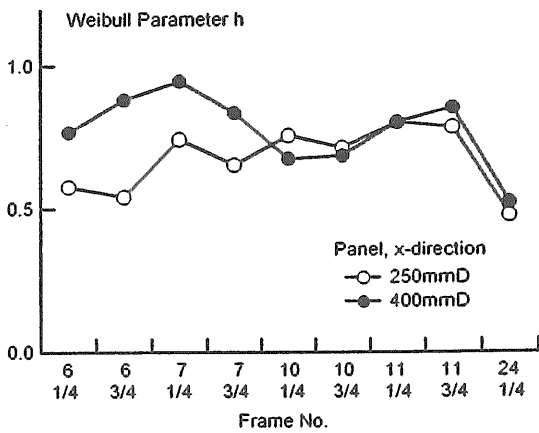


図-4.9 ワイブル形状パラメータh

hとフレーム位置の関係を図-4.9に示す。ただし、Section-2~4の外板歪み (D=250mm及び400mm, x方向) についてプロットした。hは概ね1以下であり、歪み極値は指数分布的な性状を有することが分かる。とりわけ船首肩部 (Fr.No.24 1/4) のhは小さく、極値分布の裾野は広い。船首肩部における極値分布の性質は次節以降で記述する。

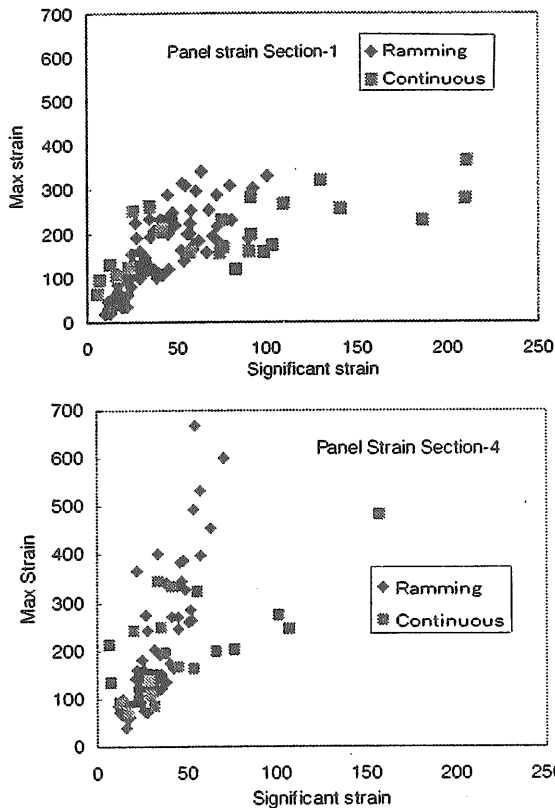


図-4.10 ラミング砕氷時と連続砕氷時の構造応答の統計的性質の比較

#### 4.3.4 連続砕氷時の計測結果との比較

ラミング砕氷時と連続砕氷時の歪みの統計的性質を比較した。特徴的なSection-1及び4の外板歪みについて最大値と有義値 (上位1/3イベントの平均振幅) の関係を図-4.10に示す。

船首部に最も近いSection-1では、有義値は連続砕氷時の方がラミング砕氷時より大きくなっているが、最大値は同じレベルである。一方、船首肩部のSection-4ではラミング試験結果の方が有義値の分布範囲は狭いにも拘わらず、最大値は大きい。

連続砕氷時の有義値が大きい要因としては、一様性の高い氷盤を、ほぼ一定の速力で砕氷航行するため、比較的均質な歪みが発生するためと考えられる。船首肩部では平均的な歪みレベルは低いものの、時々特異な大歪みが発生することを示している。

#### 4.3.5 最大歪みとその発生要因

今実験中の最大歪みは停船直前の53.5秒付近に、船首肩部 (Section-4) の左舷側外板 (Fr.No.24 1/4) で計測された (図-4.7参照)。感度はx方向で、D=250mmの位置である。歪みのピーク値は約640 $\mu$ であった。またイベントの持続時間は約0.8秒であり、典型的な値に比べると長い。図-4.7の方位角データを見ると、この時に「てしお」は左舷側に船首を振られていた。これらの結果から船首肩部での最大歪みの発生メカニズムとして以下のシナリオが考えられる。

「ラミング砕氷中に進行方向右舷側に強大な氷塊が存在したため、左舷側に針路を振られた。その結果、左舷側が氷縁に強く押しつけられた。船首部に比べて肩部近くの肋骨は氷盤に対する角度が大きい (直角に近い)。このために大きな圧縮荷重が作用した。」

船首肩部の同じ計測位置で400 $\mu$ 以上の歪みを記録したのは全16ケース中、5ケースであった。このうち同様のメカニズムによって大歪みが発生したと推定されるのは、4ケースであった。従って、ラミング砕氷時の強制的回頭運動が船首肩部における大歪みの主要な発生要因であると考えられる。

ラミング砕氷時に、船体肩部付近で大歪みが発生しうることは、砕氷船の構造設計を考える上で非常に重要な知見である。そこで次節では、FEM解析を行い、船首肩部での最大歪みに対応する水荷重の推定を試みた。

#### 4.3.6 水荷重の推定

本研究では解析結果を検証するための計測点数が限られているため、以下のように簡易的なFEM解析と歪み計測結果から水荷重を推定した。

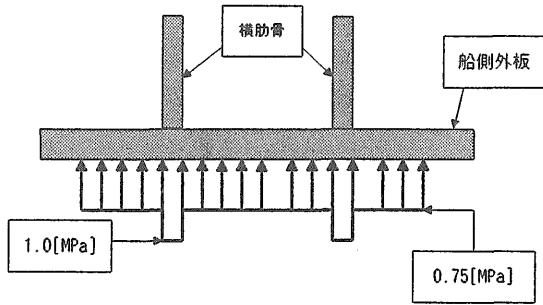


図-4.11 想定した荷重分布

まず、「てしお」の構造が日本海事協会 (NK) の耐氷構造基準NK Class 1Aに従うものと想定し、ルールで規定された荷重分布形状を与えた (図-4.11)。次に解析範囲は、最大歪みを生じたFr.No.24 1/4を含む、Fr.No.17~27の左舷部分 (船底から上甲板まで) をモデル化した。この範囲に含まれる船体構造部材のうち、船体外板、横肋骨、上・下甲板、中心線縦通隔壁、フロア板、船側縦通ガーダ及び横隔壁をモデル化した。節点数及び要素数は、それぞれ、2729節点及び2927要素である。

荷重中心高さH (常備喫水線からの鉛直方向距離) をパラメータとして、30mm間隔で90~300mmまで変化させた8ケースの解析を行った。

応力分布の解析例を図-4.12及び図-4.13に示す。ただしH=240mmで、それぞれx方向及びy方向の応力を示す。

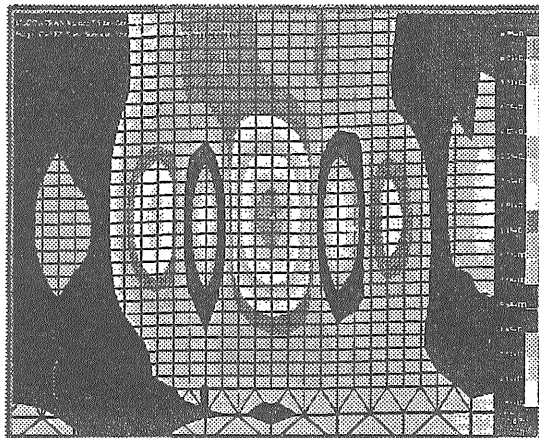


図-4.12 外板応力の解析結果 (D=180mm,  $\sigma_x$ )

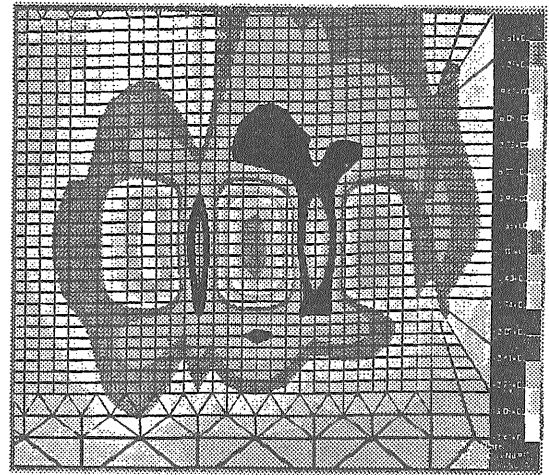


図-4.13 外板応力の解析結果 (D=180mm,  $\sigma_y$ )

次に計測位置 (D=250mm) における  $\sigma_x$  の計算結果を、荷重中心高さHに対してプロットした。結果を図-4.14に示す。当然ながら荷重の中心が計測位置とほぼ一致するH=240mmの場合に最大応力を与える。荷重中心が計測位置から離れると  $\sigma_x$  は減少する傾向を示した。

計測された最大応力値と単位圧力による計算値の比によって氷圧力を求めた。荷重中心高さHに対して氷圧力をプロットした結果を図-4.15に示す。氷圧力はH=240mmで最小となり、約2.1MPaである。荷重中心高さが喫水線付近であるとすると、3MPa以上となることが推定される。

想定した荷重分布が厳密ではないため、氷圧力を精度良く推定することは困難である。しかしながら本解析結果から、船首肩部で少なくとも、肋骨に2.1MPaの氷圧力が瞬時に作用したことが推定される。

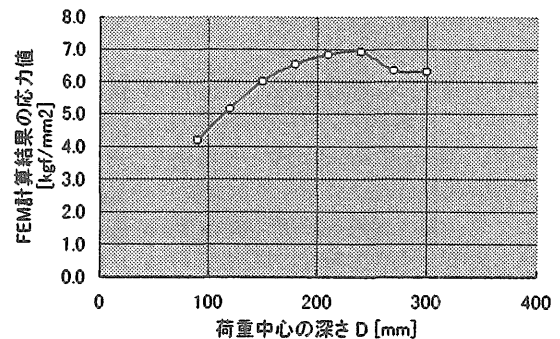


図-4.14 応力 (D=250mm,  $\sigma_x$ ) と荷重高さの関係

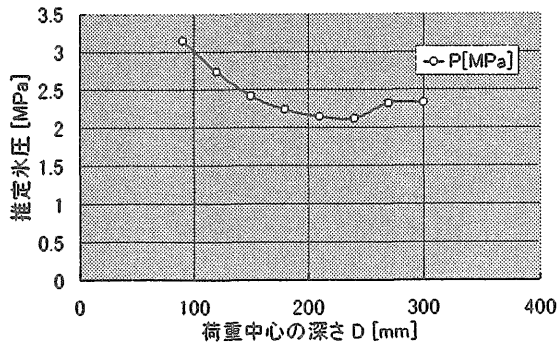


図-4.15 推定氷圧力と荷重高さの関係

## 5. おわりに

次世代砕氷型巡視船の合理的な船型設計及び船体構造設計を行うための基礎的な資料を充実させるために、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た。実船実験においては氷況観測、軸系出力計測、構造応答計測等を行った。実船実験によるデータ収集は経費・労力等の様々な面から困難を伴うものであり、更に氷海中の実験の場合、実験時の氷況という気象条件に成果が大きく影響される。このため我が国においては、水中実船実験のデータは極めて少ない。従って、今回の研究においては極めて貴重なデータが得られたと考える。これらは、砕氷型巡視船の設計・建造のための基礎資料として活用されるものと考えられる。また、今回の研究においては、主力を実船実験に向けたが、氷海船舶研究発展のためには、当所の氷海船舶試験水槽の模型試験による研究を欠くことができない。実船実験と模型試験は車の両輪のようにして研究の発展に貢献するものである。この意味から、今回の研究成果は、氷海船舶試験水槽の模型試験による研究の展開にも活用されるものと考えられる。

しかしながら、今回手がけた研究には残された課題も多い。氷海データベースの研究においては、船上観測による氷厚データのデータ数が極めて少なく、船上観測の続行によりデータを充実させる必要がある。また、軸スラスト計測、構造応答計測においても解析結果がすべて明瞭に説明されたわけではなく、実験法の確立には至っていない。これらの課題に関しては、次期の研究テーマにおいて引き続き研究を続ける必要がある。

本研究は海上保安庁装備技術部との共同研究によ

り行われた。研究遂行に御協力いただいた関係各位に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 小山鴻一他：小型砕氷巡視船の水中航行性能に関する研究、船舶技術研究所報告、第34巻、第5号（1997.9）
- 2) 宇都正太郎他：Experimental Study on the Propulsive Performance of Icebreaker PLH "SOYA"、関西造船協会誌、第229号（1998.3）
- 3) 宇都正太郎他：砕氷型巡視船「そうや」によるオホーツク海航行実験 第4報 軸系出力の計測、船舶技術研究所研究発表会、第70回（1997.12）
- 4) 田村兼吉他：オホーツク海氷データベースの概要、船舶技術研究所研究発表会、第70回（1997.12）
- 5) 下田春人他：船上観測による北海道沿岸オホーツク海域の氷況について（その2）、北方圏国際シンポジウム、第13回（1998.2）
- 6) 下田春人他：JERS-1 SAR画像を用いたオホーツク海の海水識別について、極域気水圏シンポジウム、第20回（1997.11）
- 7) 下田春人他：船舶に搭載したレーザ距離計によるオホーツク海の海水観測、極域気水圏シンポジウム、第21回（1998.11）
- 8) 宇都正太郎他：砕氷型巡視船「てしお」のラミング性能試験 その1概要、船舶技術研究所研究発表会、第72回（1998.12）
- 9) 岡修二他：砕氷型巡視船「てしお」のラミング性能試験 その2構造応答計測と氷荷重の推定、船舶技術研究所研究発表会、第72回（1998.12）
- 10) 宇都正太郎他：砕氷船によるオホーツク海海水観測の成果、オホーツク海ワークショップ（1998.11）
- 11) 岡修二他：巡視船「てしお」の氷荷重による構造応答の計測、寒地技術シンポジウム、第14回（1998.12）
- 12) 宇都正太郎他：Preliminary Study on Sea Ice Observation Using a Ship-born Laser Altimeter、北方圏国際シンポジウム、第14回（1999.2）
- 13) S.Uto, et al. : Consideration on Accuracy of the Full-scale Thrust Measurement in Ice by Strain Gauges、OMAE99（1999.8）
- 14) S.Uto, et al. : Ship-based Sea Ice Observation in the Southernmost Part of the Sea of Okhotsk、POAC99（1999.8）
- 15) 野口雅史他：砕氷巡視船に関する調査研究（そ

- の2) 第8報、船舶開発技報、第23号 (1997.9)
- 16) 野口雅史他：砕氷巡視船に関する調査研究 (その2) 第9報、船舶開発技報、第24号 (1998.11)
- 17) 下田春人他：巡視船「そうや」によるオホーツク海水況観測、船舶技術研究所研究発表会、第58回 (1991.12)
- 18) T.Suzuki et al. : Thrust Measurement Technique in Sea Trial Conditions : Assessment and New Development, PRADS'90 (1990)
- 19) K.Tamura et al. : Performance of the Patrol Icebreaker "TESHIO" in Ice covered Waters (Part2), Journal of SNAJ, Vol.180(1996)
- 20) 日本造船研究協会：第186部会報告書 (1988)