

## 小型砕氷巡視船の氷中航行性能に関する研究

氷海技術部 小山鴻一、吉田三雄、泉山耕、宇都正太郎、  
田村兼吉、金田成雄、下田春人、若生大輔  
推進性能部 猿田俊彦、柳原健、菅井信夫、長谷川純、  
藤沢純一、飯島尚也

### Study on Performance of a Small Patrol Icebreaker in Ice - Covered Waters

by

K.Koyama, M.Yoshida, K.Izumiyama, S.Uto, K.Tamura, S.Kanada, H.Shimoda, D.Wako,  
T.Saruta, T.Yanagihara, N.Sugai, J.Hasegawa, J.Fujisawa, N.Iijima

#### ABSTRACT

This report is a summary of SRI research project entitled "Study on Performance of a Small Patrol Icebreaker in Ice - covered Waters". All parts of the report are quotation of the original papers which have already been published.

One of the purpose of the study was to provide useful data for the technology of design and operation of patrol icebreakers from the viewpoint of performance in ice - covered waters. Another purpose was to evaluate and develop the technology of ice tank test method for performance of icebreakers.

Model tests of the patrol icebreaker "TESHIO" including basic experiments were carried out in the ice model basin in SRI. Series of model test were carried out both in ice and ice - free water. Results of the model tests were compared with the trials and evaluation and development of the model test method were performed. Full-scale trials of the icebreaker "TESHIO" in ice were conducted at the Sea of Okhotsk. In the trials continuous ice-breaking, ramming and stopping performance, turning capability and zigzag course manoeuvrability, and coordinated ice - breaking operation together with the patrol icebreaker "SOYA" were performed. Measurements of thrust and torque of the propeller using strain gauges attached on the propeller shaft were carried out. Measurements of sea ice conditions including ice thickness and concentration were also performed.

Results of the study are as follows. Useful data for design and operation of a patrol icebreaker were obtained from the model test and the full - scale test. Quantitative correlation between the model test and the full - scale test was shown. A model test procedure with new concept of the ice effect factor was developed.

## 目次

1. はじめに	70	3.4.1.2 平坦水中直進航行試験	93
2. 模型試験による研究	71	3.4.1.3 平坦水中停止惰力試験	93
2.1 単純船首模型による砕氷抵抗の研究	72	3.4.1.4 ラミング性能試験	93
2.1.1 平坦水中定速航行時の抵抗成分	72	3.4.1.5 平坦水中旋回試験	94
2.1.1.1 船体抵抗の平均値と船型依存係数	72	3.4.1.6 平坦水中Z操舵試験	94
2.1.1.2 氷板を破壊することによる抵抗成分 $R_B$	72	3.4.1.7 協調砕氷航行試験	94
2.1.1.2.1 空中片持ち梁(長さL)の集中荷重 $F_{v1}$ の場合	72	3.4.2 模型実験による実船馬力の推定	95
2.1.1.2.2 弾性床上の片持ち梁(長さL)の集中荷重 $F_{v1}$ の場合	72	3.4.2.1 推進係数	95
2.1.1.2.3 弾性床上の半無限梁の集中荷重 $F_{v1}$ の場合	73	3.4.2.2 有効馬力	95
2.1.1.3 氷片の浮力による抵抗成分 $R_S$	73	3.4.2.3 実船馬力の推定	95
2.1.1.4 氷片の運動による抵抗成分 $R_V$	73	3.4.3 実船抵抗の推定	96
2.1.2 単純船首模型の抵抗試験	73	3.4.3.1 実船実験による抵抗の推定法	96
2.1.2.1 実験状態等	73	3.4.3.2 実船抵抗の推定精度	96
2.1.2.2 実験結果	73	3.5 砕氷型巡視船「てしお」におけるプロペラと氷の干渉	97
2.1.2.2.1 Side Cut Ice 中の実験	74	3.5.1 実船試験概要	97
2.1.2.2.2 Presawn Ice 中の実験	78	3.5.2 計測方法	98
2.1.3 結言	78	3.5.2.1 軸トルク及びプロペラスラスト計測方法	98
2.2 模型試験による水中推進性能の研究	78	3.5.2.2 軸回転数計測方法	99
2.2.1 実験状態等	78	3.5.2.3 燃料消費量からの馬力計測	99
2.2.2 抵抗試験	78	3.5.3 計測結果及び考察	99
2.2.3 荷重度変更試験	79	3.5.3.1 計測波形と氷片かみこみ	99
2.2.4 推力減少係数	79	3.5.3.2 軸馬力の定常成分	99
2.2.5 伴流係数	80	3.5.3.3 氷片干渉による変動成分	100
2.2.6 結言	81	3.5.4 実船試験と模型実験との比較	101
2.3 水中推進性能新解析法の提案	82	3.5.4.1 干渉頻度	101
2.3.1 これ迄の解析法	82	3.5.4.2 トルクの変動成分	101
2.3.2 アイス影響係数を用いた新解析法	82	3.5.5 結言	102
2.3.3 結言	83	4. むすび	102
3. 実船試験による研究	84	参考文献	103
3.1 巡視船「そうや」によるオホーツク海水況観測	84		
3.1.1 計測法の概要	84		
3.1.1.1 計測原理	84		
3.1.1.2 計測精度	85		
3.1.2 計測結果及び考察	85		
3.1.3 結言	86		
3.2 砕氷型巡視船「てしお」の実船試験概要	88		
3.3 巡視船「てしお」によるオホーツク海水況観測	89		
3.3.1 計測方法	89		
3.3.2 計測結果及び考察	89		
3.3.2.1 試験海域及び氷況の分類	89		
3.3.2.2 実験海域の氷厚	91		
3.3.2.2.1 計測結果及び計測手法の比較	91		
3.3.2.2.2 氷厚分布の確率密度	91		
3.3.2.2.3 実験海域の海水曲げ強度	92		
3.3.3 結言	92		
3.4 砕氷型巡視船「てしお」の水中航行性能	93		
3.4.1 実船実験結果	93		
3.4.1.1 概要	93		

## 1. はじめに

本報告は、平成5年度から平成7年度にかけて氷海技術部を中心に実施した指定研究「小型砕氷巡視船の水中航行性能に関する研究」の研究成果を紹介するものである。

さて、北海道北東部沿岸海域は冬季流水等に覆われ、船舶の航行が阻害され、海難事故の危険もあるが、商船、漁船の活動さらに最近では流氷観光船の活動が伝えられている。このため、砕氷型巡視船が配属され、アイスパトロールや救難活動が実施されている。昭和53年から砕氷型巡視船「そうや」がその任務に当たっているが、平成7年からはさらに砕氷型巡視船「てしお」が加わった。氷海域における諸問題の解決に、氷海技術の研究成果が活用されなければならないことは言うまでもないことであるが、それが十分であるとは言い難い面もある。ここで我々が取り上げるのは、氷海域を航行する船舶の航行性能に関する問題であるが、この場合も例外ではない。船舶性能の開発技術の伝統的なやり方は、実船試験と模型試験を併用した方法であり、氷の無い海域の場合においては、その方法は基本

的に確立されていると言ってよい。しかしながら、氷海域における船舶の航行性能の場合は、確立された方法があるとは言い難い。その原因の一つは、技術開発に役立つ実船性能データの不足であり、特に我が国においては、氷海域に恵まれないこともあって、極めて少ない。

この様な状況の中で、船舶技術研究所においては、平成5年度～平成7年度、指定研究「小型砕氷巡視船の水中航行性能に関する研究」を計画し、北海道北東部沿岸海域で運航する小型砕氷巡視船に焦点を当て、砕氷型巡視船の建造・運航に供する基礎資料を作成することを目的として、実氷況データの収集、模型試験、実船試験を行うこととした。

氷海域航行船舶の建造・運航の技術発展に寄与できることは、船舶技術研究所の研究として重要な意味を持つことは言うまでもない。しかし同時にまた、実在船を対象とすることにより実船試験の貴重なデータを得ることができ、そのフィードバックにより逆に、模型試験技術の評価を行い、その向上を図ることができる。このことは、一船舶の開発以上に重要な意味を持つと考えられる。

この様な研究は、船舶技術研究所のみで実施することは不可能なことであり、同船の運航者である海上保安庁と、また同船の建造所である日本鋼管(株)と共同研究という形で協体制をとった。

研究経過の概要を示すと以下の通りである(図-1-1)。

本研究を遂行するにあたり、砕氷特性の研究、推進性能の研究、模型と実船の相関の研究、着氷問題の調査研究という4つのテーマを立てて研究を進めた。初年度は砕氷航行の基礎的な研究を、2年度は砕氷型巡視船の模型試験を、最終年度は同船の実船試験を中心として3年間の研究を遂行した。

初年度は基礎的な研究として最も重要と考えられる船首形状と砕氷抵抗の関係を定量的に明らかにするために、単純船首模型を作成し、水中抵抗試験を行った。この実験では船首形状が単純化されているため、砕氷現象の各イベントに対応した時系列の水力データが得られた。その分析により砕氷抵抗各成分の特性を検討し、砕氷抵抗推定式の評価を行った[3]。

2年度は小型砕氷巡視船の実船船型が具体化したので、実船対応模型船の平水中及び水中の一連の水槽試験を行い、その性能を推定した。水中においては抵抗試験、荷重量変更試験、ラミング性能試験を行った。また、砕氷航行時の推進性能を調べた[5]。氷の無い平水中においては、抵抗試験、自航試験、荷重量変更試験を実施した。

また、1、2年度においては巡視船「そうや」によるオホーツク氷海域実船試験を実施し、主としてオホーツク海の氷況水質調査を行った[1][2]。2年度においては、新たに船体着氷に関する調査を加えると共に、操縦性能試験におけるZ試験の実施や、氷況データベースの試作等、新たな観点から計測項目の追加、充実を図った[4][6][17]。

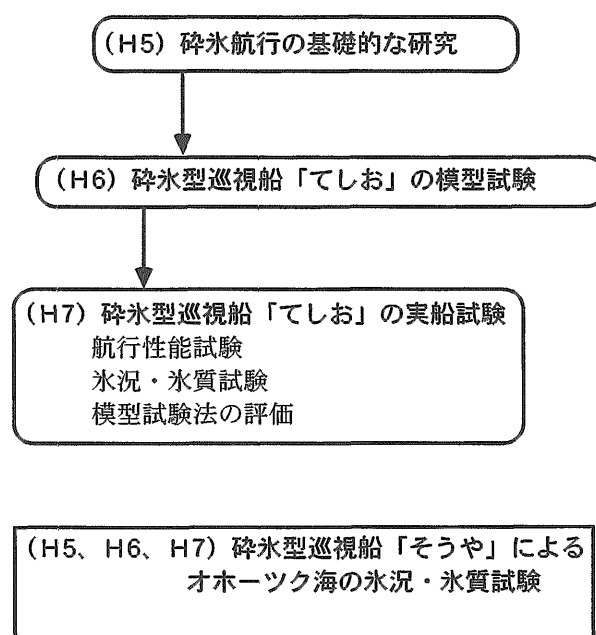


図-1-1 研究経過

最終年度においては、砕氷型巡視船「てしお」の平水中及び水中の実船試験を行い、そのデータの解析から水中航行性能を調べた。水中実験においては、平坦水中直進航行試験、平坦水中停止惰力試験、平坦水中旋回試験、平坦水中Z操縦試験、平坦水中ラミング試験、協調砕氷航行試験を行った[11][12][13][14][17]。同時に氷況・水質試験を行った[7][8]。また、模型試験結果と比較することによって、模型試験法の評価を行った[9][10][15][16]。

本報告は、指定研究「小型砕氷巡視船の水中航行性能に関する研究」の研究成果として、既に発表されたものを総合的にまとめたものである。原論文は参考文献に示された通りである。以下、第2章においては模型実験を中心とした研究として、単純船首模型による砕氷抵抗の研究、模型試験による水中推進性能の研究、水中推進性能新解析法の提案、について紹介する。第3章においては実船試験を中心とした研究として、巡視船「そうや」によるオホーツク海氷況観測、砕氷型巡視船「てしお」の実船試験概要、巡視船「てしお」によるオホーツク海氷況観測、砕氷型巡視船「てしお」の水中航行性能の研究、砕氷型巡視船「てしお」におけるプロペラと氷の干渉の研究、について紹介する。

## 2. 模型試験による研究

本章においては船舶技術研究所の氷海船舶試験水槽における模型試験をベースとした研究を紹介する。水中航行性能の基本として推進性能が最も重要となる。まず、模型実

験による砕氷抵抗の研究を紹介する。次に、水中推進性能について従来法を用いた場合の自航要素等の分析と問題点の指摘を示す。最後に、水中推進性能の解析法として、前章にみられた従来法適用の欠陥を改良した新しい解析法を提案する。

2.1 単純船首模型による砕氷抵抗の研究 [3]

氷海域を航行する船舶の問題を扱う場合、平坦氷中を定速航行するときの船体抵抗値を推定する事は重要であるが、その方法は完全に確立されたとは言い難い。その推定法を確立するためには、物理的特性の正しい把握にうらづけられた抵抗推定式の研究が必要と考えられる。著者らは先に Presawn Ice 中の模型船抵抗試験を行い、砕氷抵抗の成分を分離した形で実験値と推定式の対応を調べた [22]。今回は船首形状を単純化した模型を使った水中実験を行った。その模型では砕氷現象が単純となり、抵抗計測値として砕氷イベントに対応した時系列データが得られる。このため、現象と推定式の対応が明確となり、推定式の評価が可能となる。

2.1.1 平坦氷中定速航行時の抵抗成分

船舶による平坦氷の砕氷の過程を考えると、まず船首における砕氷現象から始まり、割れた氷片は船底に流れ込み、船尾で流れ去る。砕氷現象が周期的に行われるので、船体が周期的な運動をする。これらを考えて抵抗成分は次のように構成されるとする。

$$R_T = R_B + R_V + R_S + R_M + R_W \dots\dots\dots(1)$$

- R<sub>T</sub> : 全抵抗
- R<sub>B</sub> : 氷片を破壊することによる抵抗成分
- R<sub>V</sub> : 氷片を運動させることによる抵抗成分
- R<sub>S</sub> : 氷片の浮力による抵抗成分
- R<sub>M</sub> : 船体運動による抵抗成分
- R<sub>W</sub> : 平水中の抵抗成分

ただし、摩擦抵抗の成分は船体と氷の接触部における接線方向成分で与えられるが、上記の各成分に含めて考える。また、本文においては R<sub>M</sub> に関しては言及しないこととする。

2.1.1.1 船体抵抗の平均値と船型依存係数

船体抵抗は氷から受ける力の中の水平方向成分による。一方氷板を破壊または運動させる力は主として垂直方向成分による。これらの関係を先ず明確にしておく必要がある。砕氷抵抗にみあった推進力で船体が押し進められると、船首は浮き上がり、そのために垂直力を氷板に与え、氷板が破壊される。この間の力の関係は全く船首の幾何形状に依存する。この事を式で書くと、抵抗 R、氷片の船長方向長さ L、水平方向力 F<sub>X</sub>、垂直方向力 F<sub>V</sub> とすると、抵抗の平均値 R<sub>m</sub> は

$$R_m = (1/L) \int R dx = (1/L) (F_x / F_v) \int F_v dz = (1/L) C \epsilon \dots\dots(2)$$

ここに

$$C = F_x / F_v \dots\dots\dots(3)$$

$$\epsilon = \int F_v dz \doteq (1/2) F_{v1} \delta_1 \dots\dots\dots(4)$$

で、ε は氷板破壊（氷片運動）エネルギーである。F<sub>v1</sub>、δ<sub>1</sub> は垂直力と垂直方向変位の最大値である。すなわち、抵抗のピーク値 R<sub>p</sub> と抵抗の平均値 R<sub>m</sub> は

$$R_p = C \cdot F_{v1} \dots\dots\dots(5)$$

$$R_m = C \cdot (1/L)(1/2) F_{v1} \delta_1 \dots\dots\dots(6)$$

次に水平力と垂直力の関係について述べておく。船体が氷から受ける力を F とし、その船体表面の法線方向成分（船体内側）を F<sub>N</sub>、接線方向成分（氷片の流れる方向）を F<sub>T</sub>、各々の単位ベクトルを n、t とすると、その力の水平船長方向成分 F<sub>X</sub>（その単位ベクトル i）と垂直上方向成分 F<sub>V</sub>（その単位ベクトル k）は

$$F_x = F_N(n \cdot i) + F_T(t \cdot i) \dots\dots\dots(7)$$

$$F_v = F_N(n \cdot k) + F_T(t \cdot k) \dots\dots\dots(8)$$

μ を摩擦係数とすると

$$F_T = \mu F_N \dots\dots\dots(9)$$

ここで F<sub>X</sub> は船体抵抗となり、一方 F<sub>V</sub> は氷板を破壊（運動）させる力となる。

$$R = F_x = (F_x / F_v) \cdot F_v = C \cdot F_v \dots\dots\dots(10)$$

ここで

$$C = F_x / F_v = ((n \cdot i) + \mu(t \cdot i)) / ((n \cdot k) + \mu(t \cdot k)) \dots\dots(11)$$

は船体抵抗と砕氷力との間をつなぐ係数であり、船型依存係数と呼ぶことにする。船型開発の研究はこの C 値を小さくすることを一つの目標としている。

さて特に後述の単純船首形状の場合は

$$(t \cdot i) = \cos \alpha, \mu = \tan \gamma \dots\dots\dots(12)$$

として（α は船首角）

$$C = \tan(\alpha + \gamma) \dots\dots\dots(13)$$

2.1.1.2 氷板を破壊することによる抵抗成分 R<sub>B</sub>

氷板を破壊する力あるいはエネルギーを明らかにする必要があるが、破壊のパターンをモデル化して考えることが一般的である。幾つかの表示式を下に示す [23]。

2.1.1.2.1 空中片持ち梁（長さ L）の集中荷重 F<sub>v1</sub> の場合

最大曲げ応力 σ、最大撓み δ<sub>1</sub>、弾性係数 E、氷厚 h、氷幅 B として

$$R_p / C = F_{v1} = \sigma (B h^2) / (6L) \dots\dots\dots(14)$$

$$R_m / C = (1/2) (1/L) \cdot F_{v1} \delta_1 = (1/18) (\sigma/E) \cdot \sigma B h \dots\dots(15)$$

2.1.1.2.2 弾性床上的片持ち梁（長さ L）の集中荷重 F<sub>v1</sub> の場合

$$R_p / C = F_{v1} = \sigma (B h^2/6) \lambda (Cosh^2 \lambda L + cos^2 \lambda L) / (Sinh \lambda L cos \lambda L + Cosh \lambda L sin \lambda L) \dots\dots\dots(16)$$

$$R_m / C = (1/2) (1/L) \cdot F_{v1} \delta_1 = (1/24) (\sigma/E) \sigma B h (1/\lambda L) (Cosh^2 \lambda L + cos^2 \lambda L) (Sinh 2 \lambda L - sin 2 \lambda L) / (Sinh \lambda L cos \lambda L + Cosh \lambda L sin \lambda L)^2 \dots\dots(17)$$

ここに

$$\lambda = ((3 \rho_w g) / (E h^3))^{1/4} \dots\dots\dots(18)$$

ρ<sub>w</sub> : 水の密度

g : 重力加速度

2.1.1.2.3 弾性床上の半無限梁の集中荷重Fv1の場合

$$L = (\pi/4) (1/\lambda) \dots\dots\dots(19)$$

$$R_p / C = F_{v1} = \sigma (B h^2/6) \lambda \sqrt{2} e^{\pi/4} \dots\dots\dots(20)$$

$$R_m / C = (1/2) (1/L) \cdot F_{v1} \delta_1 = (\sigma/E) \sigma B h (2/3\pi) e^{\pi/2} \dots\dots\dots(21)$$

2.1.1.3 氷片の浮力による抵抗成分R<sub>S</sub>

平坦氷が破壊された後、氷片が船体に沿って流れるが、その氷片の挙動に対応した2つの抵抗成分がある。1つは、氷片の位置エネルギーの変化に対応する抵抗成分R<sub>S</sub>、1つは、氷片の運動エネルギーに対応する抵抗成分R<sub>V</sub>である。まずR<sub>S</sub>成分について述べる。

長さLの氷片の浮力は、氷片の密度をρ<sub>i</sub>として、

$$f_b = (\rho_w - \rho_i) g B h L \dots\dots\dots(22)$$

この氷片が船底まで並ぶものとする、この浮力は、喫水をdとして(船首角αを一定と仮定すると)

$$F_b = (\rho_w - \rho_i) g B h d / \sin \alpha \dots\dots\dots(23)$$

この力により船体を受ける垂直方向力F<sub>V</sub>は

$$F_v = F_b (k \cdot n) ((n \cdot k) + \mu (t \cdot k)) \dots\dots\dots(24)$$

$$= (\rho_w - \rho_i) g B h d \cdot \cos \alpha (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) / \sin \alpha \dots\dots\dots(25)$$

抵抗値はこれに船型依存係数Cをかけて

$$R = C \cdot F_v \dots\dots\dots(26)$$

2.1.1.4 氷片の運動による抵抗成分R<sub>V</sub>

氷片の運動エネルギーに基づく抵抗成分R<sub>V</sub>について述べる。船速をU、船首角をαとすると、氷片の垂直運動速度Vおよび回転角速度ωは

$$V = U \cdot \tan \alpha \dots\dots\dots(27)$$

$$\omega = \alpha / (L/U) \dots\dots\dots(28)$$

これらを用いると氷片の運動エネルギーは

$$(1/2) (M + M_a) V^2 + (2/2) (I + I_a) \omega^2 \dots\dots\dots(29)$$

第2項の分子の2は、水平氷片に回転を与えるエネルギーと回転された氷片を船体表面で止めるエネルギーの和を表す。この運動が平均的垂直力F<sub>V</sub>によってなされる。

$$F_v = ((1/2) (M + M_a) V^2 + (2/2) (I + I_a) \omega^2) / L \dots\dots\dots(30)$$

これに対応した船体抵抗は

$$R_v = C \cdot F_v \dots\dots\dots(31)$$

ここにM、Iは氷片の質量及び慣性モーメントである。M<sub>a</sub>、I<sub>a</sub>は付加質量及び付加慣性モーメントであり、2次元ポテンシャル流理論式で近似することとすると [22]

$$M = \rho_i h b L$$

$$I = \rho_i h b L^3 \cdot \sin^2 \beta / 12$$

$$M_a = \rho_w \pi (L \cdot \sin \beta / 2)^2 \cdot (b / \sin \beta)$$

$$I_a = (1/8) \rho_w \pi (L \cdot \sin \beta / 2)^4 \cdot (b / \sin \beta) \dots\dots\dots(32)$$

α、βは喫水線におけるバトックライン及びウオータラインの傾き角である。これらを代入すると

$$F_v = (U^2/2) \rho_i h B ((1+(\rho_w/\rho_i)) (\pi/4) (L \sin \beta / h)) \tan^2 \alpha + (1+(\rho_w/\rho_i)) (3\pi/32) (L \sin \beta / h) (\sin^2 \beta / 4) \alpha^2 \dots\dots\dots(33)$$

上記のR<sub>V</sub> = C · F<sub>V</sub>は平均値であるのでこれからピーク値を求める式を示しておく。(5)、(6)式から

$$R_m = (1/L) (1/2) R_p \delta_1 \dots\dots\dots(34)$$

ここでδ<sub>1</sub> = L · sin αとすると

$$R_p = R_m \cdot 2 / \sin \alpha = C \cdot F_v \cdot 2 / \sin \alpha \dots\dots\dots(35)$$

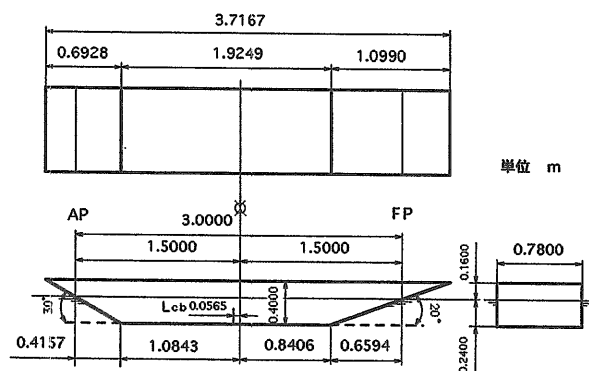


図2-1-1 単純船首模型

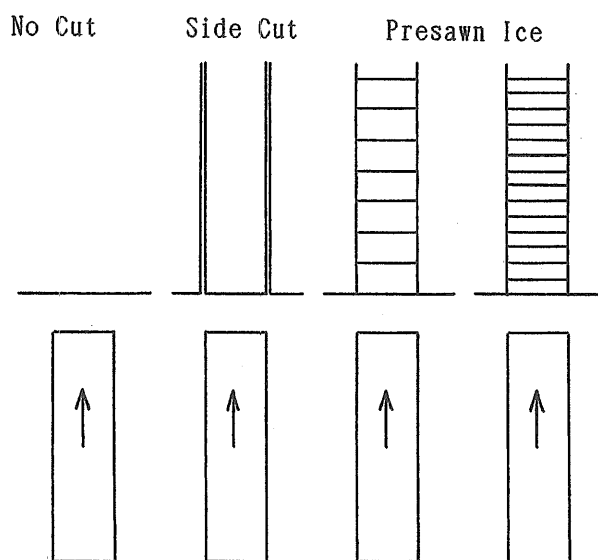


図2-1-2 氷板

2.1.2 単純船首模型の抵抗試験

2.1.2.1 実験状態等

図2-1-1に示す様な単純船首模型を製作して実験した。図に見る通りの側面が台形で幅方向に様な形状である。船首角α = 20°と30°の船首部を前後につなぎ合わせた形になっており、前後方向を変える事により2種類の船首角の実験ができる。実験状態は氷厚h = 40mm、曲げ強度σ<sub>f</sub> = 50kPa、弾性係数E<sub>f</sub> = 10MPa、船速U = 0.08, 0.16, 0.32, 0.72m/sである。また氷板にはカットを入れないNo Cut、船の幅に合わせて走行方向にカットを入れたSide Cut、更に推定砕氷片に合わせて氷片長さL = 40, 20cmのカットを入れたPresawn Iceの中で実験を行った(図2-1-2)。但し本文ではNo Cutの実験については殆ど触れない。また、Heave Freeの状態ですべての実験を行ったが、Side Cutの実験においてはHeave Fixの状態でも実験を行った。

2.1.2.2 実験結果

実験の計測結果の一例を図2-1-3に示す(Exp. No. 94110, α = 30°, Side Cut, U = 0.16m/s)。図2-1-3 (a)は抵抗値、

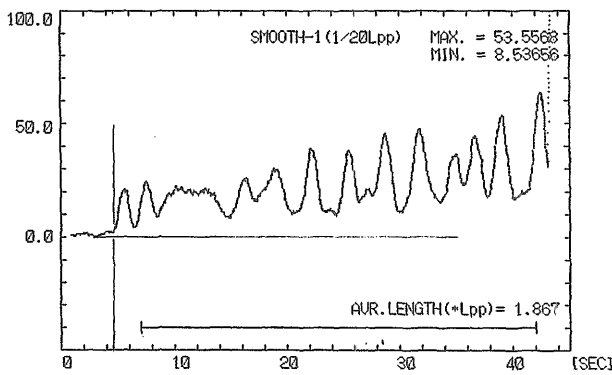


図2-1-3 (a) 抵抗

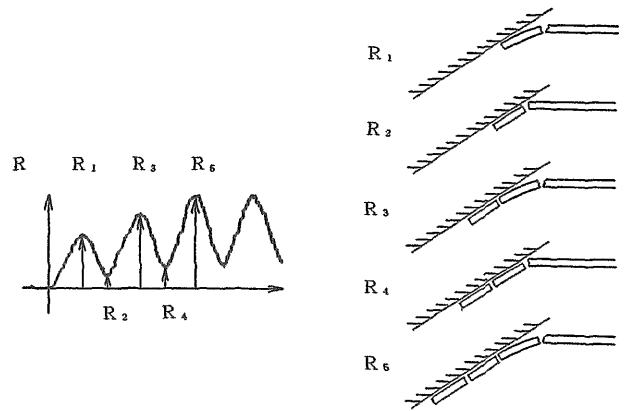


図2-1-4 抵抗計測波形と砕氷現象の対応

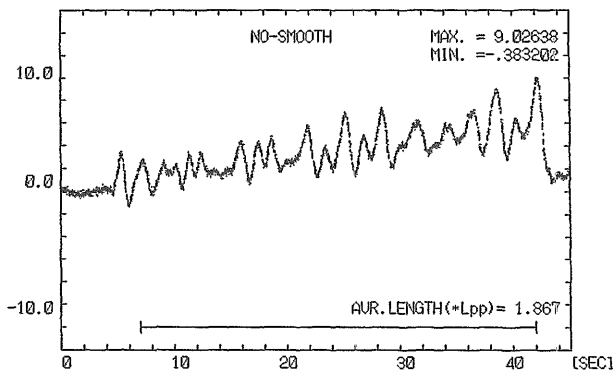


図2-1-3 (b) 浮心位置のヒューヴ

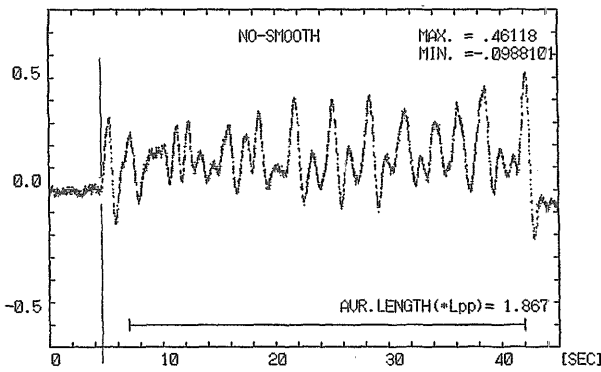


図2-1-3 (c) ピッチ

図2-1-3 (b) は浮心位置における上下揺れ、図2-1-3 (c) はピッチング角度である。通常船型の抵抗試験の場合と異なり、砕氷現象の各イベントに対応して抵抗値と船体運動がとらえられている。抵抗計測波形と砕氷現象の対応を図式で描くと図2-1-4の様に表される。各実験毎にその波形の山谷 $R_1, R_2, R_3, R_4, \dots$ と周期を解析した。推定計算に用いた(13)式による船型依存係数 $C$ の値を表2-1-1に示した。以下の計算においては表中の $\mu = 0.1$ の値を用いている。また推定計算は $R_S$ は(26)式、 $R_V$ は(35)式、 $R_B$ は(14)(16)(20)式で行った。

表2-1-1 船型依存係数 $C$

$\mu = \tan \gamma$	$C = F_x / F_v = \tan (\alpha + \gamma)$	
	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
0.00	0.364	0.577
0.05	0.422	0.647
0.10	0.481	0.719
0.15	0.543	0.795
0.20	0.608	0.879

表2-1-2 氷片の船長方向長さ $L$  (m)

Angle of Bow	Ship Speed U(m/s)	Side Cut Heave Free		Side Cut Heave Fix		No Cut Heave Free	
		(DM)	(WM)	(DM)	(WM)	(DM)	(WM)
		$\alpha = 20^\circ$	0.08	0.391	0.356	0.422	0.441
	0.16	0.361	0.359	0.421	0.450	0.246	0.207
	0.32	0.384	0.487	0.465	0.286	0.143	---
	0.72	0.193	0.397	0.236	0.221	0.124	0.808
$\alpha = 30^\circ$	0.08	0.335	0.400	0.333	0.316	0.136	0.121
	0.16	0.417	0.455	0.293	0.329	0.130	0.165
	0.32	0.334	0.454	0.273	0.376	0.136	0.153
	0.72	0.195	0.184	0.120	0.145	0.116	0.930

2.1.2.2.1 Side Cut Ice 中の実験

まず、実験時の氷片の長さ $L$ の値を調べた結果を表2-1-2に示した。走行後直接氷片寸法を計測した値 (DM) と、抵抗計測波形から推定した値 (WM) を示しているが、両者はほぼよく一致している。弾性床上の半無限梁理論による $L$ の値を (19) 式で計算すると $L = 0.3017\text{m}$ である。実

Estimation

- $R_B+R_V+R_S$   $R_B=12.5N$  (Simple Cantilever Beam)
- ▲  $R_B+R_V+R_S$   $R_B=18.1N$  (Semi-infinite Beam on Elastic Foundation)
- $R_B+R_V+R_S$   $R_B=40.4N$  (Cantilever Beam on Elastic Foundation)
- ▲  $R_S$

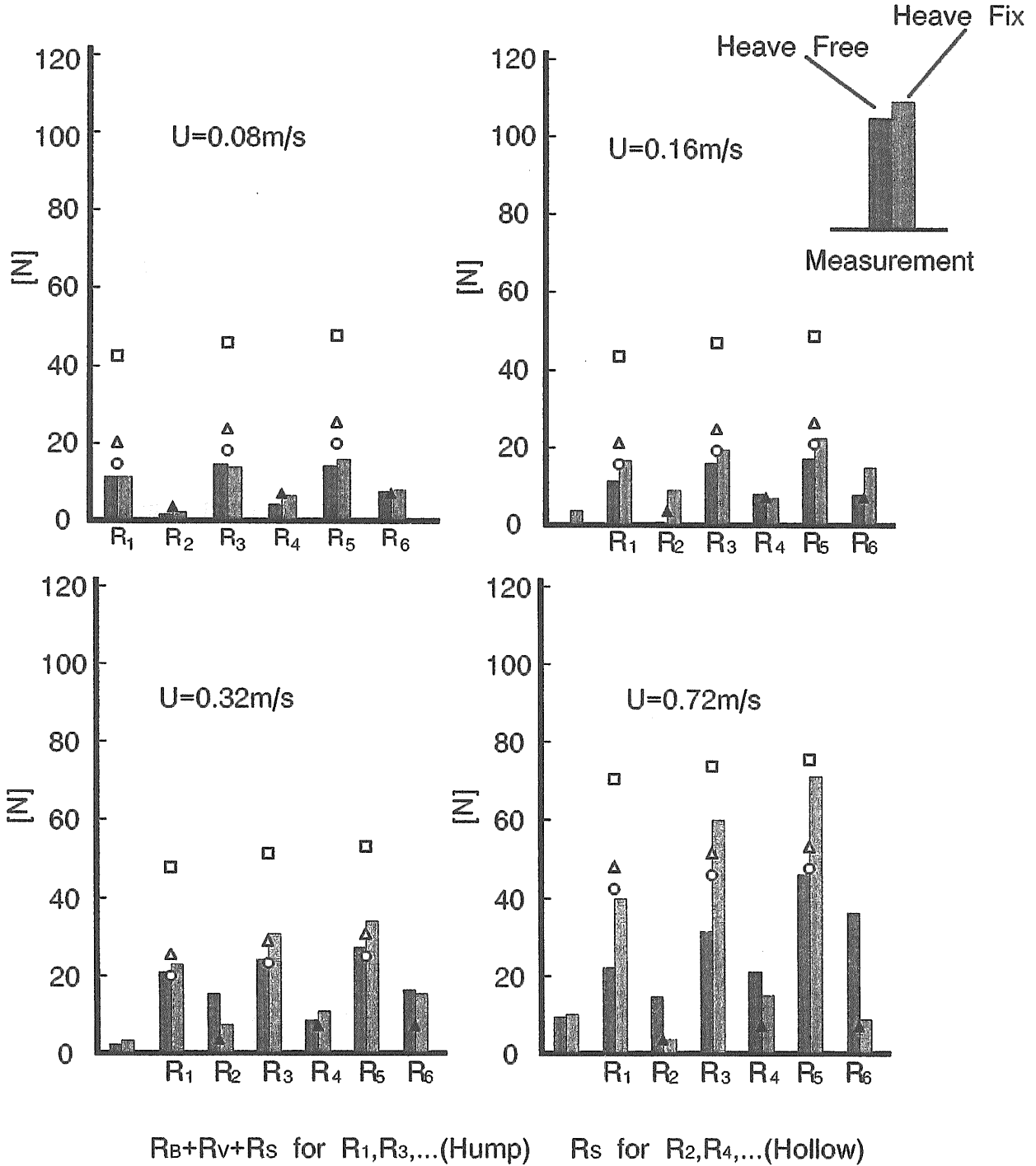
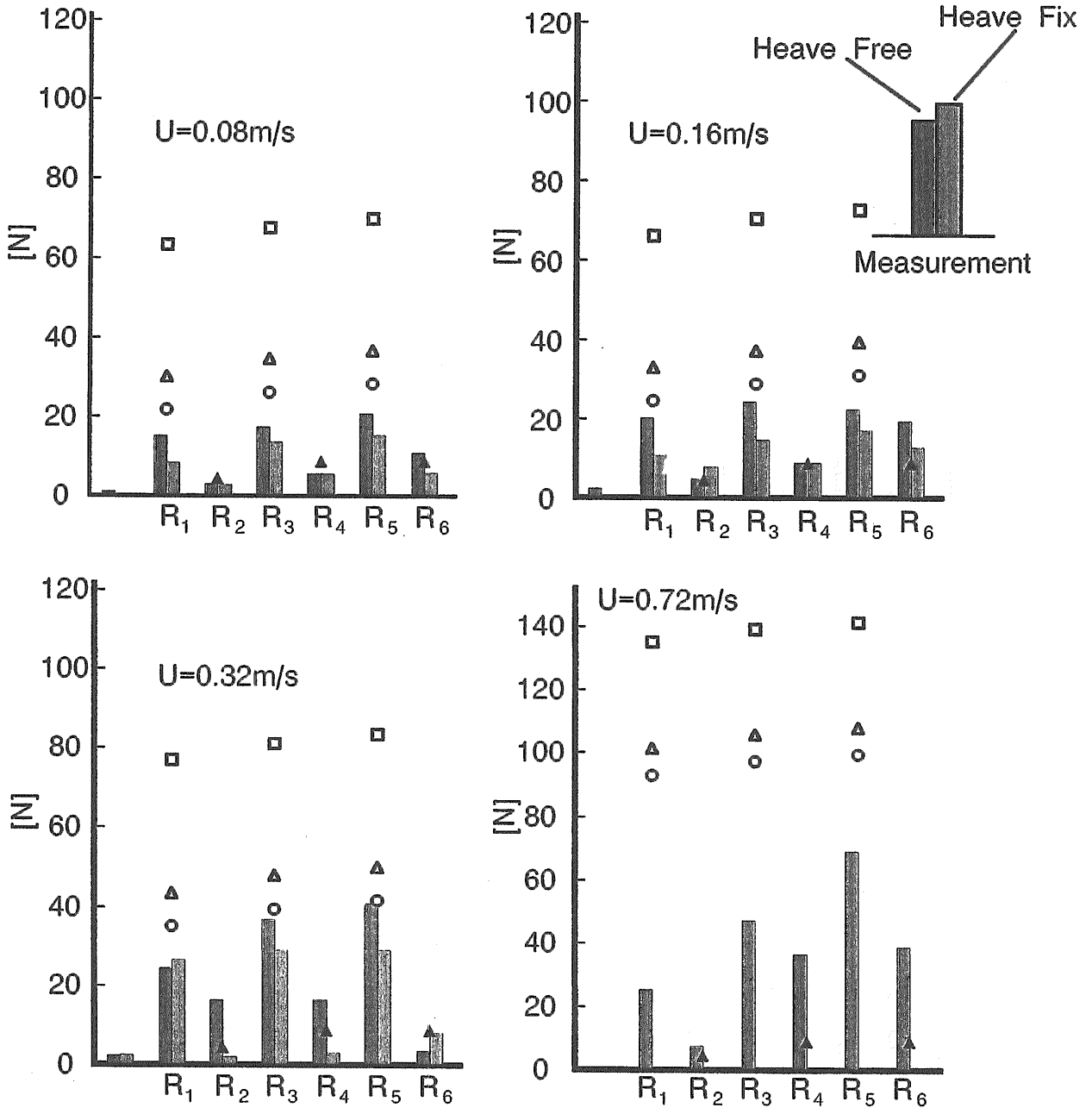


図2-15 抵抗瞬間値の計測値と推定値 ( $\alpha = 20^\circ$  模型、Side Cut Ice)

Estimation

- RB+RV+RS RB=18.7N (Simple Cantilever Beam)
- △ RB+RV+RS RB=27.1N (Semi-infinite Beam on Elastic Foundation)
- RB+RV+RS RB=60.4N (Cantilever Beam on Elastic Foundation)
- ▲  $R_s$



RB+RV+RS for R<sub>1</sub>,R<sub>3</sub>,...(Hump)      R<sub>s</sub> for R<sub>2</sub>,R<sub>4</sub>,...(Hollow)

図2-1-6 抵抗瞬間値の計測値と推定値 (α = 30° 模型、Side Cut Ice)



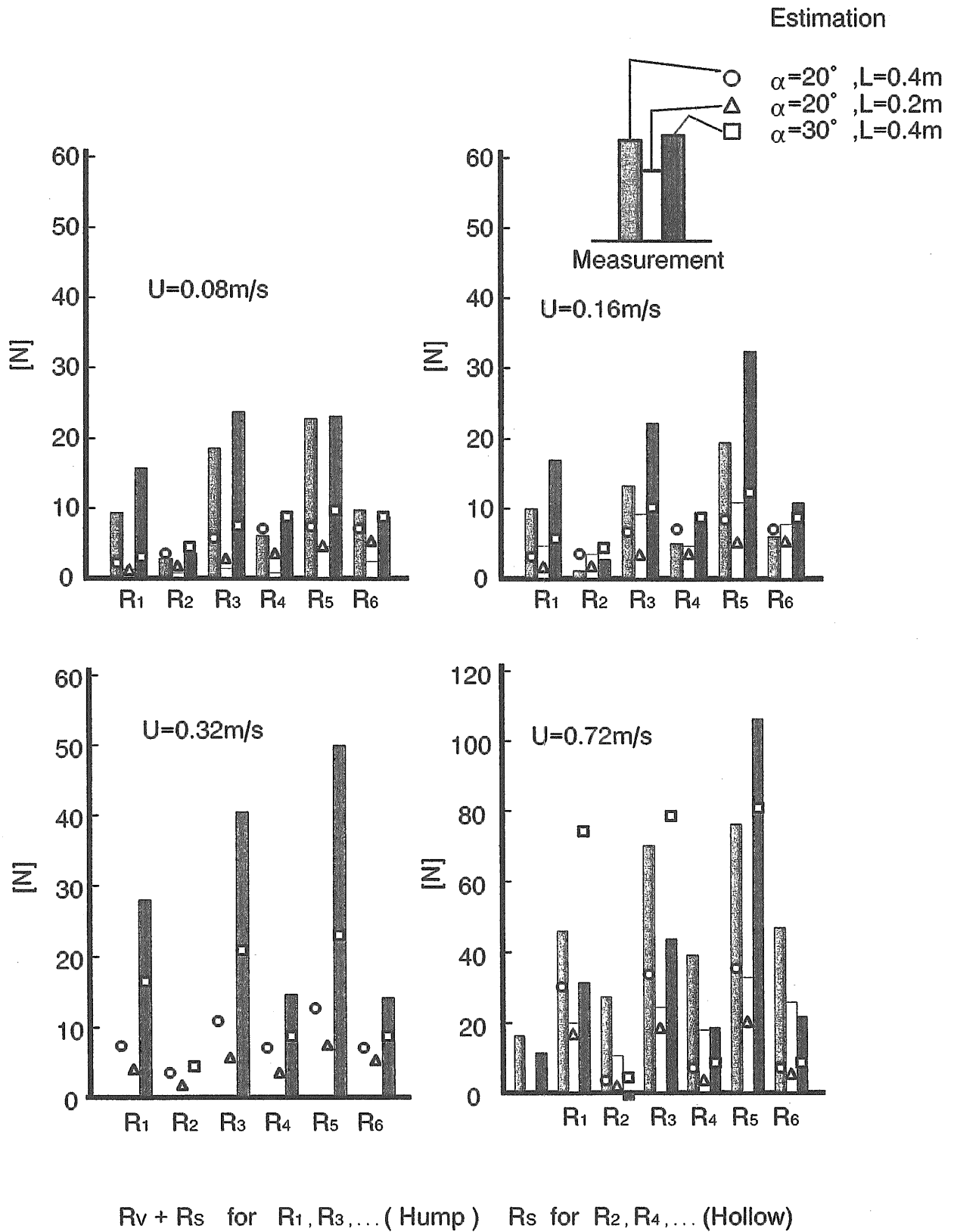


図2-1-7 抵抗瞬間値の計測値と推定値 (Presawn Ice)

験値はほぼこの値に近い値を示しているが、船速  $U = 0.08 - 0.32\text{m/s}$  で若干大きめである。 $U = 0.72\text{m/s}$  の場合の実験値はかなり小さな値を示した。

船首角  $\alpha = 20^\circ$  と  $30^\circ$  の各々について、 $R_1, R_2, R_3, R_4, \dots$  の実験値と推定式による計算値を比較してそれぞれ図2-1-5、図2-1-6に示した。波形の谷にあたる  $R_2, R_4, \dots$  に対しては計算値  $R_S$  を示し、山にあたる  $R_1, R_3, \dots$  に対しては計算値  $R_B + R_V + R_S$  (ピーク値) を示した。

砕氷抵抗  $R_B$  のピーク値  $R_P$  を3種類の梁理論の式(14)(16)(20)で計算し、実験値  $R_1, R_3, \dots$  と比べているが、空中片持ち梁理論の値が最も実験値に近い値を示している。弾性床上的の片持ち梁理論の値はやや大きめで、また弾性床上的の半無限梁理論の値は更に過大である。このギャップは弾性床上的の半無限梁理論の氷片長  $L$  の値が実験値より小さめであった事と関連しているものと考えられる。また弾性床上的の梁理論の値が実験値より大きめの傾向を示した事は、実験の状態が、弾性床の仮定を満たしていない事に因ると考えられる。

一方氷片浮力による抵抗成分  $R_S$  については、 $R_2, R_4, \dots$  で比較されるが、推定計算値と実験値の対応はほぼ良い。

Heave Free と Heave Fix の違いに関しては一般的な傾向は見られなかった。

#### 2.1.2.2.2 Presawn Ice 中の実験

Presawn Ice 中の実験の解析結果と推定計算の比較を図2-1-7に示した。波形の谷にあたる  $R_2, R_4, \dots$  に対しては計算値  $R_S$  を示し、山にあたる  $R_1, R_3, \dots$  に対しては計算値  $R_V + R_S$  (ピーク値) を示した。抵抗値は氷片長  $L$  が大きい程、又船首角  $\alpha$  が大きい程大きな値を示す事が、計算値と同様に実験値にも表れている。 $R_S$  の推定計算値(但し各氷片あたりの値)と計測波形の谷  $R_2, R_4, \dots$  を比べてみると、一致がよいが、 $R_V + R_S$  の推定計算値と計測波形の山  $R_1, R_3, \dots$  を比べると一致が悪い。 $R_S$  の推定計算法は良い結果を示しているが、 $R_V$  の計算法には課題が残されているものと思われる。

#### 2.1.3 結言

砕氷抵抗の特性を明らかにする事を目的として、その主要成分の特性を表す推定式を用いて、実験値との対応を調べた。実験には単純船首模型を用い、個々の砕氷現象に対応した時系列抵抗計測値を得た。得られた結論は次の通りである。

氷片の浮力による抵抗成分  $R_S$  に関しては推定計算値と実験値の対応はよい。

氷片の運動による抵抗成分  $R_V$  に関しては推定計算値と Presawn Ice 中の実験値との一致が悪い。

氷板を破壊する事による抵抗成分  $R_B$  に関しては、空中片持ち梁理論の値が最も実験値に近く、弾性床上的の梁理論の値は実験値より大きい値を示した。弾性床上的の半無限梁理論により求めた砕氷片長  $L$  の値は実験値に近いが、やや小さな値を示した。

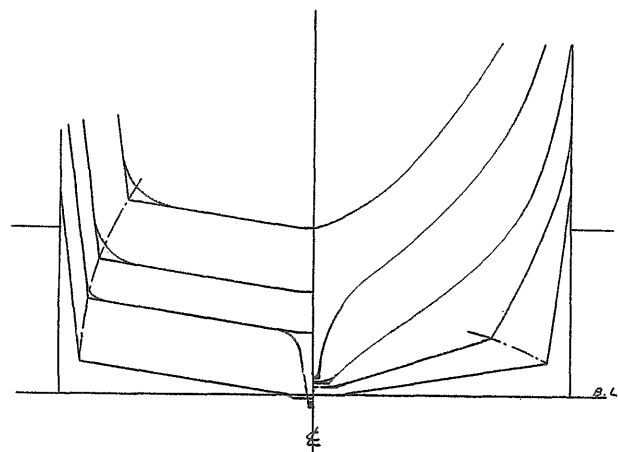


図2-2-1 BodyPlan

## 2.2 模型試験による水中推進性能の研究 [5]

本章においては、後に実船として建造され、「てしお」と命名されたオホーツク海就役の小型砕氷巡視船の模型試験について報告する。この船は本研究の中核をなすもので、後章の実船試験はこの船で行われた。ここでは、同船の水中推進性能の水槽試験に関して検討する。

さて、水中の模型試験は、現在まだ馬力推定用の試験法として確立したとは言い難い面がある。本文においては、平水中の合理的な船型試験法を活用して水中性能解析に発展させることを目的として、水中走航時の自航要素の推力減少係数と伴流係数に関して模型実験結果を検討した。

### 2.2.1. 実験状態等

供試船の要目等は第3.4章の表3-4-1及び第3.5章の表3-5-1に示してある。概形は第3.2章の図3-2-1に示されている。Body Planを本章図2-2-1に示した。推進器はダクト付可変ピッチプロペラ(実験はピッチ比0.900)で、2軸2舵(外回り)である。

実験は、平水中及び水中における抵抗試験及び荷重度変更試験を行い、推進性能を解析した。解析はプロペラとダクトが一体の推進器であるとみなして行った。推進器の単独性能は、共同研究者からデータを提供していただいた。

平水中の実験は三鷹第2船舶試験水槽において、水中の実験は氷海船舶試験水槽において行った。模型氷はプロピレングリコール約0.6%を水槽水に添加したPG氷であり柱状構造を有する模型氷である。氷板の曲げ強度の目標値は36kPa(実験時の値は27.6-47.7kPa)、平坦氷の厚さは28mm(26.3-27.7)及び51mm(48.0-49.9)であり、これらは実船換算で曲げ強度392kPa、氷厚30cm及び55cmに各々対応する。

### 2.2.2. 抵抗試験

抵抗試験は舵、シューピース及びビルジキールを装着した状態で行った。試験は平坦水中、流水中及び平水中で行った。流水中抵抗試験の流水状態は、平坦水中試験終了後

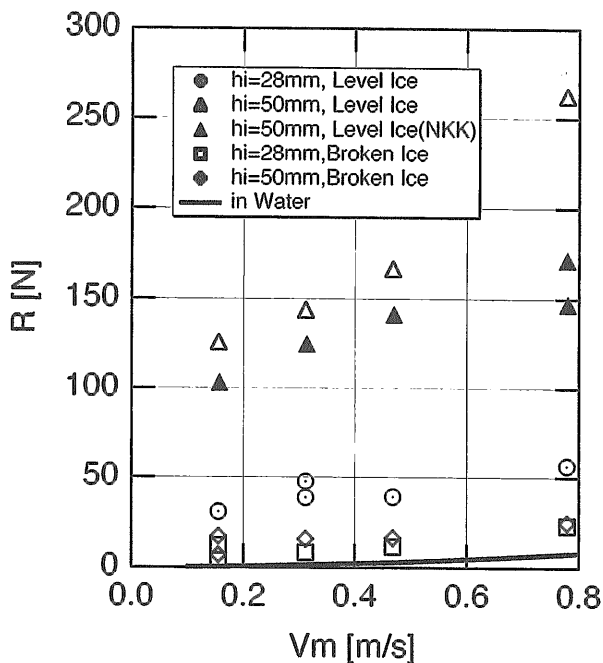


図2-2-2 抵抗試験結果

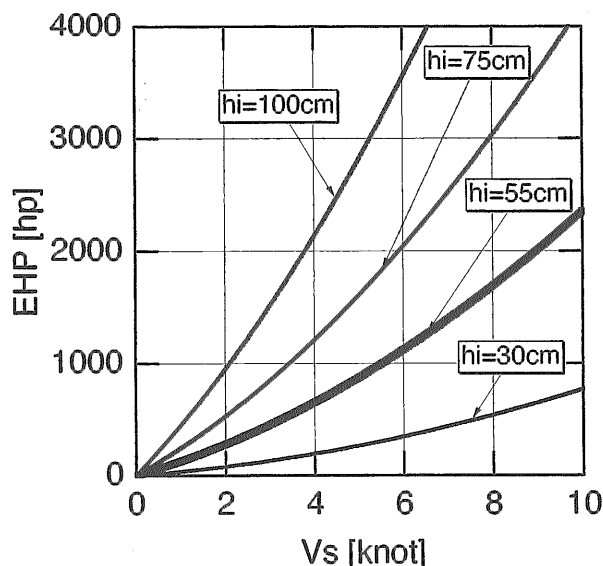


図2-2-3 平坦水中有効馬力

に残った平坦氷板部分を破壊することによって再現した。抵抗計測結果を図2-2-2に示した。抵抗計測値は有効馬力計算及び推力減少係数計算の基礎となる。計測値に基づいて平坦水中抵抗の回帰式を作り、実船の平坦水中の有効馬力を求めると図2-2-3の様になる。

### 2.2.3. 荷重度変更試験

推進性能の試験は、荷重度変更試験法に従って平坦水中及び平水中で行った。荷重度変更試験では、模型船は推進器を作動させるが、曳引車に設置された抵抗動力計により

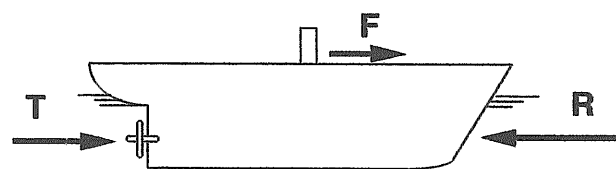


図2-2-4 荷重度変更試験 (過負荷試験)

拘束され定速で走行し、推進器のスラスト、トルクのみならず模型船の曳航力 (拘束力) も計測する (図2-2-4参照)。

平水中の過負荷試験は砕氷船の推進性能を調べるのに有益である。平水中の試験において、模型船を拘束して船速を一定に保ったまま、推進器の負荷を大きく上げ推進器負荷と拘束力を計測する。拘束力を砕氷抵抗に対応させると砕氷航走を模擬したことになる。この試験と水中抵抗試験の結果を用いると砕氷船の水中推進性能をほぼ推定することができる。荷重度変更試験法は基本的にこの過負荷試験と同じである。

荷重度変更試験において船が受ける力は、推進器による推力T、船体表面から受ける抵抗力R (平水中の場合は流体抵抗。水中の場合は流体抵抗と氷抵抗。Tとは逆向き)、及び曳引車の抵抗動力計から受ける力F (船が前方へ引っぱられる向きを正とする。従ってTと同じ向き) であり、釣合の式は

$$T = R - F \dots\dots\dots(1)$$

となる。TとFは直接計測され、Rは直接計測されない。Fが負の値の場合は、平水中の試験において氷板の抵抗を模擬した状態になっている。

### 2.2.4. 推力減少係数

(1)式はある船速ある外力ある推進器作動状態におけるR, F, Tを表わしている。その状態を保ったまま推進器の作動を止める (T=0) と船尾流場の変化によりRの値が変化しRoとなったとする。このときはじめの状態における推力減少係数は

$$1 - t = (R_0 - F) / (R - F) \dots\dots\dots(2)$$

と表わすことができる。ところで、RoはT=0のときのRであり (1) 式によりそれはT=0のときのFに等しい。

図2-2-5は計測されたFとTの関係を表わす線図である。この図において(2)式右辺の分母は横座標T (=R-F) を表わしている。また、分子はT=0におけるFの値からT=TにおけるFの値を引いた値F (T=0) - F (T=T) (=Ro - F) となっている。従って1-tはF-T線の傾きに対応している。図2-2-5には平水中及び水中の結果を示しているが、両者が相似の関係にあることが窺われる。

このようにして求めた1-tを示したものが図2-2-6である。横軸は荷重係数CT (=2T / (ρ ApVs<sup>2</sup>)) を用いている。平水中の実験においては、荷重度の高いところで1-tは一定値 (今の場合約0.9) に近づいて行く。また氷

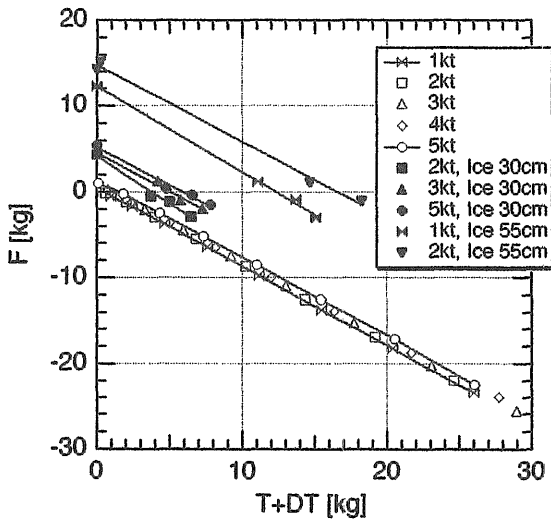


図2-2-5 F-T線図

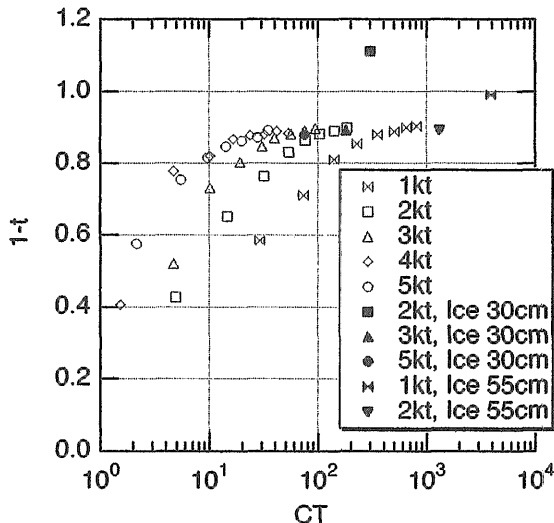


図2-2-6 推力減少係数

中実験においても、その一定値に近い値をとる場合が多い。これは相対的にRoが小さくなったことに対応し

$$1 - t = (-F) / (R - F) = 0.9 \dots\dots\dots(3)$$

この値が1.0でないことはRを無視できないことを示しており、この値の場合R/(-F) = 0.1となる。

2.2.5. 伴流係数

推進器に働くスラスト及びトルクを船速に対して示すと図2-2-7-1～図2-2-8-2の通りである。ここで横軸Jsは船速Vsベースの前進率でJs = Vs / (nD)である。スラスト係数KTはスラスト一致法で伴流係数1-wを求める基準となるので重要である。1-wの値を検討するときKTの値にたち返ってみると誤った解釈をする危険も少なくなる。まず、プロペラ単独試験POTの結果と平水中荷重量変更試験の結果を比べる。Jsの大きなところで後者の値が前者の値より大きく妥当な結果が得られている。Jsの小さなところで

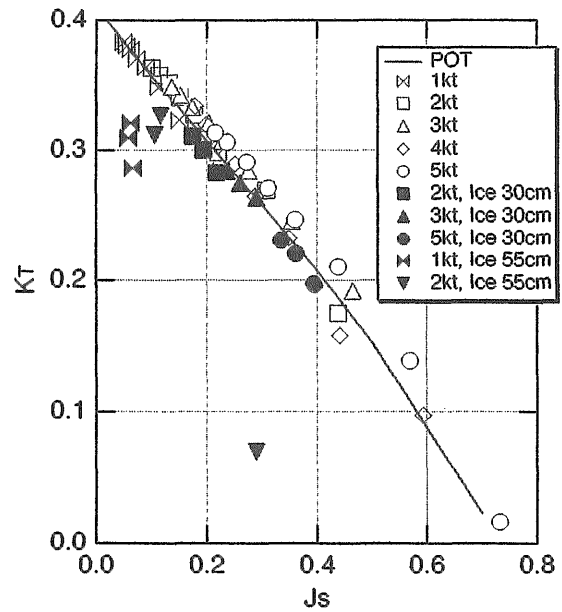


図2-2-7-1 スラスト係数、右舷

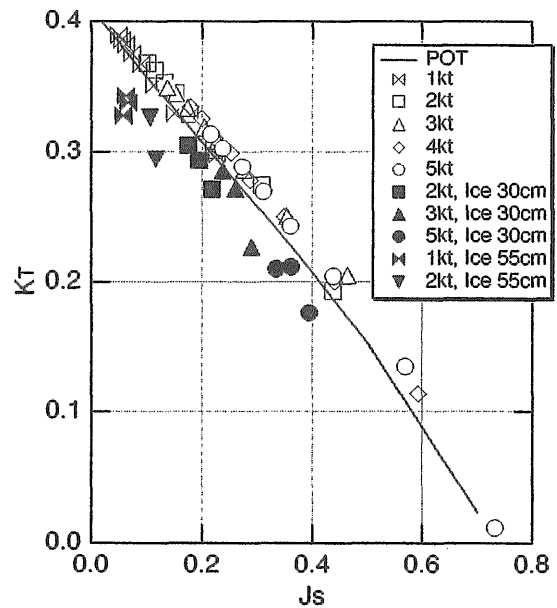


図2-2-7-2 スラスト係数、左舷

は両者の値が非常に近付き、Js = 0近傍に交差点が有りそうである。次に、水中の結果と平水中の結果を比べる。Jsの小さな所で前者の値が後者に比べてかなり小さい。これは氷片の影響によるものと考えられる。このことは、トルク係数KQにおいて対応点の水中の値が平水中の値に比べて大きいことから理解ができる。一方、Jsの大きな所のKTにおいても水中の値が平水中に比べて小さい傾向にある。これに対応したKQの値においても水中の値が平水中の値に比べて小さい傾向にある。このように今回の実験では水中でKT, KQともに小さくなるという結果が得られた。

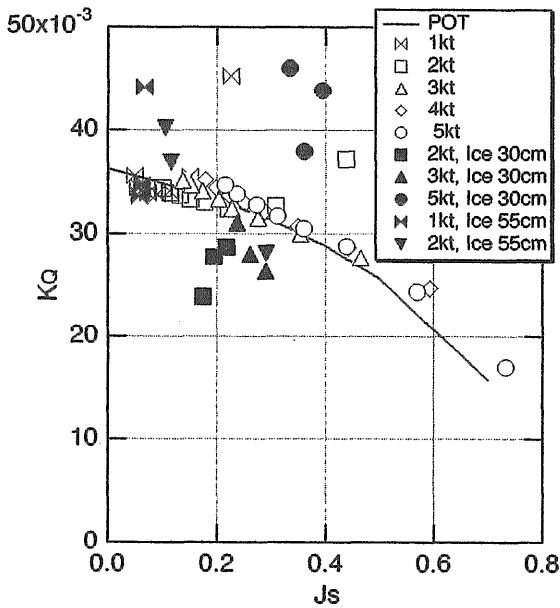


図2-2-8-1 トルク係数、右舷

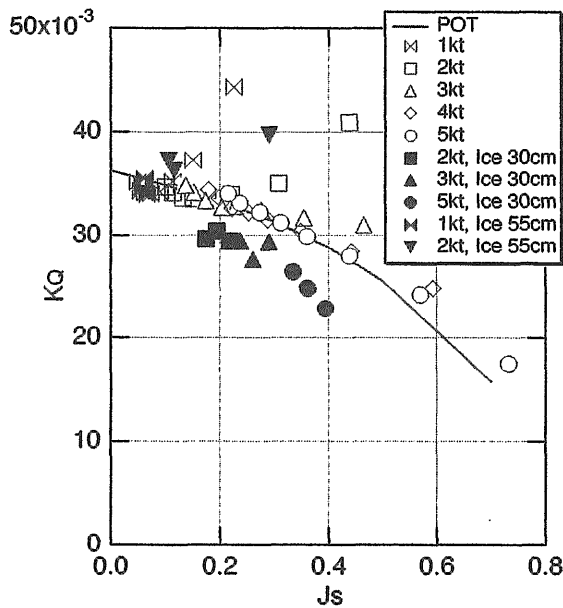


図2-2-8-2 トルク係数、左舷

さて、 $K_T$ 図をもとに伴流係数 $1-w$ を求めた結果は図2-2-9-1, 2の通りである。平水中での値は $J_s$ の大きな所では荷重度の小さな状態に対応して妥当な結果となっている。荷重度の増加にともない、すなわち $J_s$ が小さくなると、 $1-w$ は小さくなる傾向が見られる。次に、水中実験の結果であるが、 $J_s$ の小さなあたりで極端に $1-w$ が大きい。これは氷片との干渉により $K_T$ が減少したために現われたものであることを忘れてはならない。 $J_s$ の小さな所以外でも水中の $1-w$ が平水中より大きい傾向にある。このことは、氷中で $K_T$ が小さくなったことに対応している。今

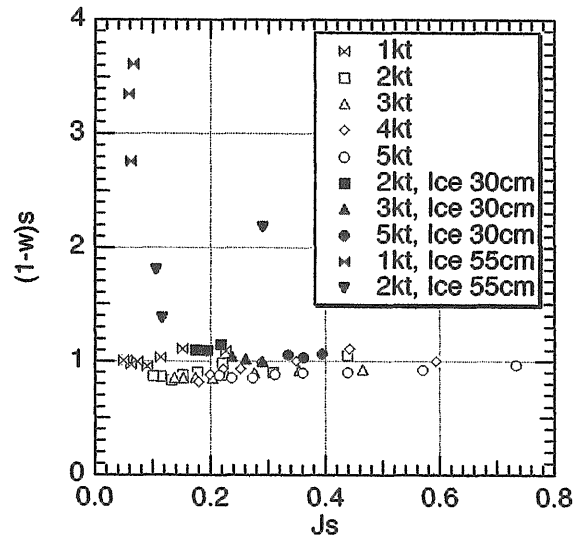


図2-2-9-1 伴流係数、右舷

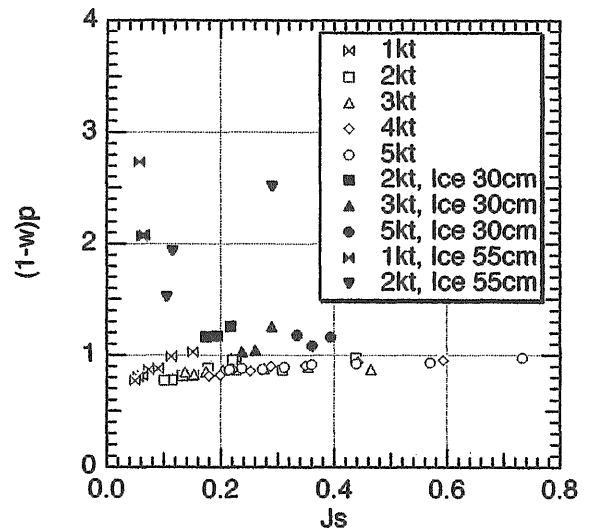


図2-2-9-2 伴流係数、左舷

の場合氷中で $K_T$ ,  $K_Q$ ともに小さくなっているので、氷中航行時の推進器流入速度が速くなったと考えなければならぬ。これに関してはまだ十分な検討を行っていないが、一つの原因として船体の姿勢の変化(氷中の場合トリムが大きい)が考えられる。

### 2.2.6. 結言

小型砕氷巡視船の模型実験を行い、氷中推進性能の推力減少係数と伴流係数について検討した。氷中のみならず平水中での荷重度変更試験を行い、比較解析することにより氷中推進性能の自航要素の特性をかなり明確にとらえることができた。

### 2.3. 水中推進性能新解析法の提案 [15]

船舶の推進性能の推定に船型試験法の技術を活用することは極めて重要である。水中航行船舶の場合も例外ではない。ただし、船体まわりの流れの現象は氷のある場合とならない場合では異なるので、何らかの修正が必要となることが考えられる。本章においては、氷海船舶試験水槽において行われた推進性能試験の解析に関し、前章 [5] にみた従来法の問題点を解決した新しい解析法を提案する。そこでは推進効率表示式の中にアイス影響係数という新しい係数を導入する。試験は自航試験でなく荷重変更試験を行う。解析には平坦水中の試験データのみならず氷のない通常の曳航水槽における試験データも必要とする。本節の解析に用いた模型試験のデータは、前章に示されたものと同じものである。

#### 2.3.1 これ迄の解析法

通常の推進性能の解析は次式のように進められる。

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{EHP}{DHP} = \frac{RV}{2\pi nQ} \\ &= \frac{T_0 V_0}{2\pi n Q_0} \cdot \frac{T/T_0}{Q/Q_0} \cdot \frac{R/T}{V_0/V} \\ &= \eta_0 \cdot \eta_r \cdot \eta_h \\ \eta_0 &= \frac{T_0 V_0}{2\pi n_0 Q_0} \\ \eta_r &= \frac{T_L/T_0}{Q_L/Q_0} \\ \eta_h &= \frac{R/T}{V_0/V} = \frac{1-t}{1-w}\end{aligned}$$

ここに

- $\eta$  : 推進効率
- $\eta_0$  : プロペラ単独効率
- $\eta_r$  : 推進器効率比
- $\eta_h$  : 船殻効率
- EHP : 有効馬力
- DHP : 伝達馬力 (= EHP/ $\eta$ )
- R : 船体抵抗
- V : 速度
- T : プロペラ・スラスト
- Q : プロペラ・トルク
- n : プロペラ回転数
- t : 推力減少率
- w : 伴流率

添字Oはプロペラ単独試験POTに対応することを示している。推進効率のこの様な分解は船の流力特性の分解に対応する。例えば、船殻効率は船体とプロペラの干渉の影響を表している。

この式に基づく解析結果は前章に示された通りである。再記して問題点を整理すると次の通りである。

計測されたスラスト・トルクは図2-2-7-1～図2-2-8-2の通

りであった。水中試験に対するデータは平水中の場合に比べバラついている。Jsの小さなところで平水中に比べ水中試験の $K_T$ が小さく $K_Q=Q/(\rho n^2 D^5)$ が大きいことは、明らかに氷のプロペラへの影響を表している。

推力一致法により得られた伴流係数 $1-w$ は図2-2-9-1、図2-2-9-2の通りであった。平水中の試験に対する値が妥当な結果であるのに対し、水中での値は前進係数が小さくなるにつれて極端に大きくなる。その大きな値は、伴流係数 $1-w$ の物理的意味からして不合理な結果である。水中試験の解析法として合理的な方法が見出されなければならない。

#### 2.3.2 アイス影響係数を用いた新解析法

物理現象の正しい認識に基づいて、推進効率 $\eta$ を合理的に組み立てることは重要であり、それによって、模型試験から実船性能を推定するのに重要な尺度影響の様な修正係数を導入することが可能となる。

前節にみた伴流係数 $1-w$ の不当に大きな値は、氷中の状態の $K_T$ が、氷の影響によりPOTの値より小さくなる事によるためである。この場合、推力一致法は適切でないということになる。従って、われわれはここにice effect factor (アイス影響係数)を導入した新しい方法を提案する。その方法においては、水中試験と平水中過負荷試験の両方のデータを解析に用いる。新解析法においては、水中推進効率表示式は、従来法同様に水中荷重変更試験のデータとPOTデータを用いるが、更に、平水中荷重変更試験のデータもその中に挿入される。新解析法の表示式は次の通りである。

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{EHP}{DHP} = \frac{R_i V_i}{2\pi n_i Q_i} \\ &= \frac{T_0 V_0}{2\pi n_0 Q_0} \cdot \frac{T_L/T_0}{Q_L/Q_0} \cdot \frac{1}{n_i/n_0} \cdot \frac{R_L/T_L}{V_0/V_L} \cdot \frac{R_i/R_L}{Q_i/Q_L} \cdot \frac{V_i/V_L}{n_i/n_0} \\ &= \eta_0 \cdot \eta_r \cdot \eta_h \cdot \eta_i \\ \eta_0 &= \frac{T_0 V_0}{2\pi n_0 Q_0} \\ \eta_r &= \frac{T_L/T_0}{Q_L/Q_0} \cdot \frac{1}{n_i/n_0} = \frac{T_L/T_0}{Q_L/Q_0} \\ \eta_h &= \frac{R_L/T_L}{V_0/V_L} = \frac{(1-t)_L}{(1-w)_L} \\ \eta_i &= \frac{R_i/R_L}{Q_i/Q_L} \cdot \frac{V_i/V_L}{n_i/n_0} = \frac{1}{Q_i/Q_L} \cdot (R_i/R_L) \cdot (J_i/J_L)\end{aligned}$$

ここに、添字O, L, とIはそれぞれPOT状態、平水中過負荷試験状態、および氷中状態を示している。 $\eta_0$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_h$ は平水中過負荷試験の解析から求められる。唯一 $\eta_i$ のみが氷の影響に関連した係数となる。この係数がここで提案する新解析法の核である。この係数においては推力減少係数や伴流係数の概念は含まれない。Jは船速に基づく前進係数である。ここに、平水中過負荷試験のどの試験状態を対応試験状態として用いるかという問題がある。これに関しては次の選択がある。

$$J_I = J_L$$

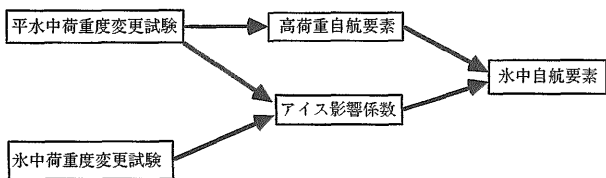


図2-3-1 アイス影響係数を用いた新解析法

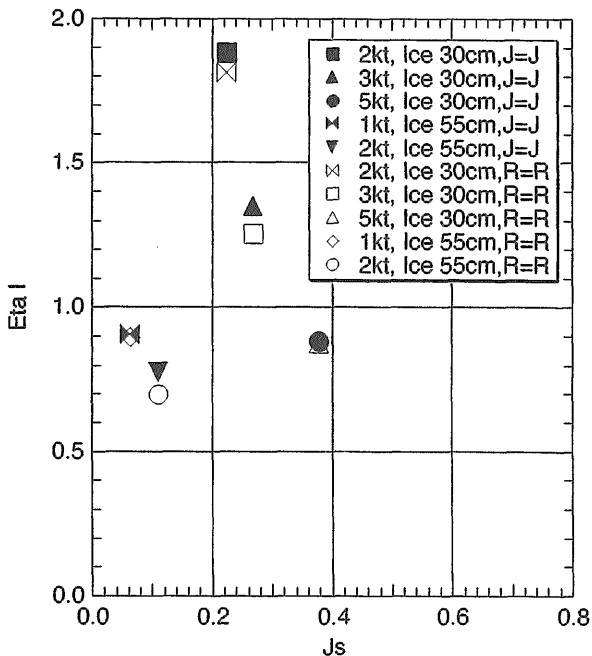


図2-3-2 アイス影響係数

あるいは

$$R_i = R_L$$

である。

この方法による解析結果を表2-3-1と図2-3-2,3,4に示した。上記のJ一致法とR一致法の両方の結果が示されている。図に見るとおり両者の差は大きくない。

図2-3-3にみられる通り伴流係数1-wに対して妥当な結果が得られている。即ち得られた値は1以下の値を示し、図2-2-9,1,2にみた不合理な結果を改善している。

アイス影響係数  $\eta_i$  の値を図2-3-2に示した。得られた中の3つの結果は値が1以下であり氷の影響として妥当な結果である。しかし、2つの結果は1以上であり不合理である。その2ケースにおいては氷の影響が小さくトルク比  $Q_i/Q_L$  は1以下である(表2-3-1)。これに関しては明確な説明はなく、実験精度の問題の可能性もある。

### 2.3.3 結言

氷海船舶試験水槽における推進性能模型試験の解析について、従来法の問題点を示し、アイス影響係数を用いた新しい推進性能解析法を提案した。新しい方法が基本的に合理的な結果を与えることを示した。その方法においては氷

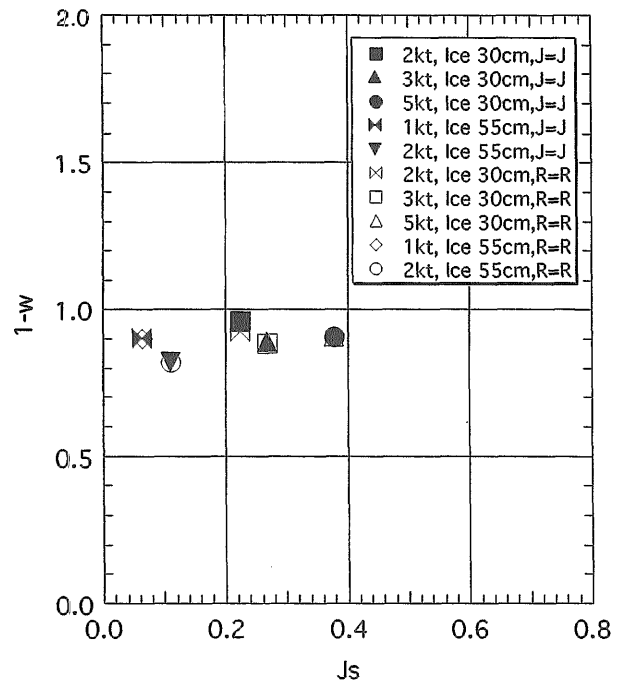


図2-3-3 伴流係数1-w

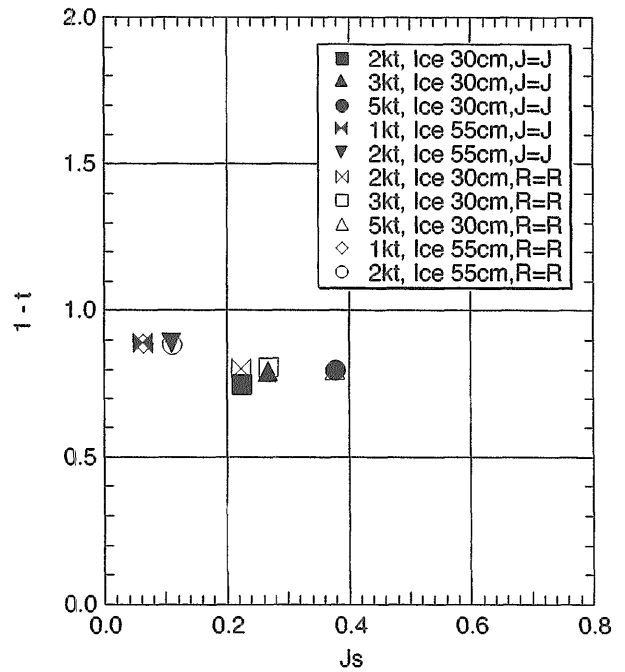


図2-3-4 推力減少係数1-t

中試験のみならず平水中過負荷試験が必要である。

表-2-3-1 新解析法による結果

J Identity Method							
Ice (cm)	ship (kt)	$\eta_h=$	1-t=	1-w=	$\eta_i=$	Qi/QI=	Ri/RI=
30	2	0.7815	0.7509	0.9608	1.8827	0.9008	1.6960
30	3	0.8923	0.7920	0.8876	1.3473	0.9012	1.2142
30	5	0.8811	0.8003	0.9082	0.8828	1.1109	0.9807
55	1	0.9843	0.8870	0.9012	0.9060	1.0949	0.9920
55	2	1.0866	0.8896	0.8187	0.7753	1.1290	0.8753

R Identity Method							
Ice (cm)	ship (kt)	$\eta_h=$	1-t=	1-w=	$\eta_i=$	Qi/QI=	Ji/JI=
30	2	0.8718	0.8049	0.9232	1.8132	0.6376	1.1561
30	3	0.9164	0.8089	0.8826	1.2523	0.7978	0.9991
30	5	0.8783	0.7979	0.9084	0.8766	1.1273	0.9882
55	1	0.9829	0.8868	0.9023	0.8965	1.1028	0.9887
55	2	1.0784	0.8857	0.8213	0.6967	1.2745	0.8880

### 3. 実船試験による研究

本章においては、実船試験による研究として、巡視船「そうや」によるオホーツク海水況観測、砕氷型巡視船「てしお」の実船試験概要、巡視船「てしお」によるオホーツク海水況観測、砕氷型巡視船「てしお」の水中航行性能、砕氷型巡視船「てしお」におけるプロペラと氷の干渉について紹介する。

#### 3.1 巡視船「そうや」によるオホーツク海水況観測 [6] [4]

船舶技術研究所では巡視船「そうや」により1990年より冬季オホーツク海における氷海域実験を実施してきた。その実験では水中航行性能の評価データとして航行海域の氷況データ、すなわち氷厚、氷盤密接度、海水塩分濃度、水温及び各種強度に関する計測を行った。

海水の厚さは密接度とともに、氷海域における船舶の航行性能を支配する最も重要な因子であるばかりではなく、氷海域の熱収支を考える上で必要不可欠な情報である。氷厚計測手法としては、

- (1)潜水艦あるいはブイ搭載のUpward Sonarによる氷盤 keel 深さの計測[24]
- (2)航空機搭載 Altimeter を用いた氷盤 sail 高さの計測
- (3)航空機搭載 Electro - Magnetic Sensor による氷盤 keel 深さ計測
- (4)上記(2)及び(3)の Sensor の組み合わせによる氷厚の計測 [25]
- (5)衛星搭載 Microwave Sensor (SAR) による氷厚推定[26] 等がある。一部は既に実用化されているが、衛星リモートセンシング技術の発達によって大量のデータが入手可能となった氷盤密接度に比べ情報の質、量ともに不足しているのが現状であろう。

(272)

そこで本研究では氷海域を航行する巡視船の船体まわりの砕氷現象を利用した簡便な手法を用いて1991年から1994年の4年間に得られたオホーツク南部海域の氷厚データを解析し、流水接岸前後の2月上旬における氷厚分布の特性について考察した。

#### 3.1.1 計測法の概要

##### 3.1.1.1 計測原理

砕氷船の船首形状は氷盤に鉛直下向きの力を効果的に与え、曲げによる氷盤破壊を起しやすいように設計されている。下向きの力を与えられ破壊された砕氷塊は船体側面に沿って回転運動を行うので、約90度回転したサンプルを選択すれば船上から破断面 (=氷厚面) を観察できる (図3-1-1)。そこで図3-1-2に示すように船側部上方にVTRカメラを設置し、スケールとともに砕氷塊の破断面を写し込むことによって氷厚を計測する。これが本計測法の原理である。

ただし本手法による計測は原理上、下記の様な条件サン

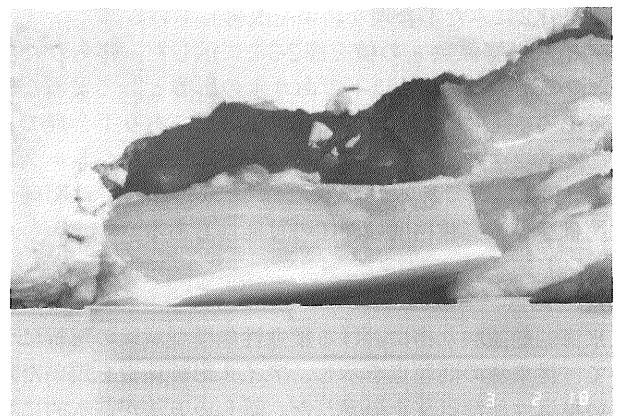


図3-1-1 船側砕氷片



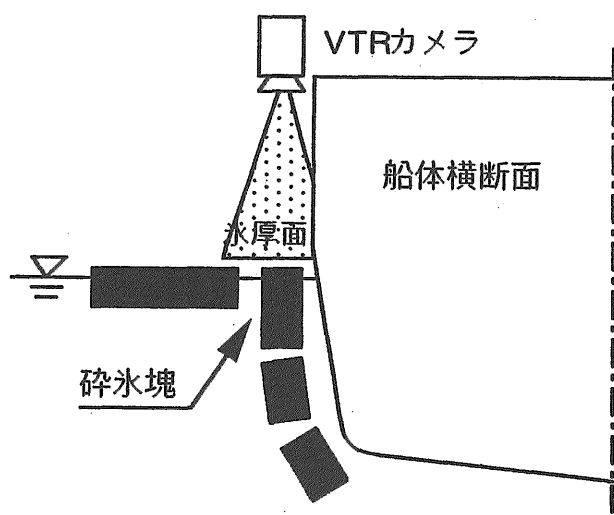


図3-1-2 VTRカメラ・セッティング

表3-1-1 95%包括度の上下限值

h [cm]	U+ [cm]	U- [cm]
10	2.05	2.13
20	2.34	2.63
30	2.76	3.30
40	3.26	4.05
50	3.89	5.82
60	4.49	6.86
70	5.11	7.92
80	5.74	8.99
90	6.38	10.06
100	7.03	11.14

プリングとならざるを得ない。すなわち氷盤密接度が十分に高くなければ、氷盤は専ら船体によって排除されるようになり、氷盤の破壊が起こる確率は低下する。また氷厚がある値よりも小さければ十分な力を与える以前に氷盤は破壊に至り、砕氷塊の回転は起こりにくくなる。すなわち本計測手法によるサンプリングレートは氷盤密接度と氷厚自体に強く依存する。

### 3.1.1.2 計測精度

計測結果について考察する前に、不確かさ解析手法を用いて本手法による氷厚計測精度について検討した。本計測手法に含まれる主要な誤差要因には、

- (1)モニター画面上長さの読みとり誤差
- (2)砕氷塊の回転角度の誤差 (90度からの偏差)
- (3)船体運動等による破断面とVTRカメラの位置変動による誤差
- (4)画像内の読みとり位置変動による誤差
- (5)モニター画面上長さを氷厚に換算する際のスケール誤差

が挙げられる。これらの誤差を不確かさ解析の手順に従って定量化した。求められた95%包括度の上下限值を表3-1-1に示す。95%包括度範囲は氷厚の増加に伴って単調に増加

し、氷厚20cmでは5cm程度、50cmでは10cm程度である。計測手法の簡便さを考えると比較的良好な精度であると言えよう。

なお、不確かさ解析に含まれない誤差要因として氷盤上の積雪の存在が挙げられる。比較的新しい積雪層がある場合、氷盤破壊とそれに伴う回転運動の際に剥落する場合と剥落しない場合の両方のケースが観察される。以下の解析結果ではこれらを区別していない。

### 3.1.2 計測結果及び考察

本計測は例年1月下旬から2月上旬に行われる海上保安庁所属の巡視船「そうや」流氷哨戒の機会を利用して実施した。この時期は流氷が接岸する時期にほぼ対応している。1991年から1994年にかけて、延べ14日間にわたり実施した計測結果のまとめを表3-1-2に示す。1995年にも同様の計測を計画したが、荒天が続き計測可能な氷況に遭遇でき

表3-1-2 計測結果まとめ

Data No.	Date	Measured Location	
		Latitude	Longitude
9101	2/13/91	44-27:44-51	143-41:143-56
9102	2/14/91	45-00:45-15	143-30:143-51
9201	2/6/92	44-55:45-00	142-42:143-10
9202	2/7/92	44-59:45-06	143-15:143-26
9301	2/5/93	45-12:45-18	143-04:143-21
9302	2/6/93	N/A	N/A
9303	2/10/93	N/A	N/A
9401	1/26/94	44-40:45-27	144-35:144-59
9402	1/28/94	44-17:44-25	143-18:144-08
9403	1/29/94	45-05:45-20	143-12:143-32
9404	1/30/94	N/A	N/A
9405	1/31/94	44-20:44-36	143-10:143-24
9406	2/1/94	46-21:47-09	144-38:145-45
9407	2/2/94	45-00:45-34	142-37:143-11

Data No.	Typical Ice Type	Concentration [%]	Data Size	Average Thick[cm]
9101	Ck,Cs,Br	80-90	363	32.6
9102	Ck,Cs,Br	60-80	300	25.8
9201	Ck,Cs	30-50	62	20.7
9202	Fs,Ck,Cs	50-70	595	25.8
9301	Fs,Ck,Cs	90-100	582	47.7
9302	N/A	N/A	242	37.0
9303	N/A	N/A	102	42.2
9401	Ck,Cs	70-100	80	33.0
9402	Fm,Fs,Ck	30-90	777	33.7
9403	Fs,Ck,Cs	90-100	634	35.8
9404	N/A	N/A	130	32.7
9405	N/A	N/A	42	41.2
9406	Fm,Fs,Ck	70-80	852	43.7
9407	Fm,Fs,Ck	40-100	942	42.1

なかった。

気象庁海水観測資料[27]によれば2月上旬のオホーツク海全体の海水面積は過去5年間では1991年が最小で、1994年を除いて年平均値をいずれも下回っている。計測海域は主に北緯45度以南の北海道沿岸海域であるが、1994年には北緯47度を越える海域のデータを取得した(9406)。氷況は直径20m以下の板氷(Ck,Cs)及び100m以下の小氷盤(Fs)が中心であった。また各データ毎の平均氷厚は20.7cmから47.7cmの範囲にある。

計測結果のヒストグラムを図3-1-3に示す。氷厚分布の最大頻度を与えるクラスは各データによって異なり、10-20cm(9101等)から40-50cm(9301等)の範囲に存在する。

次に1994年の全データについて、氷厚50cm以下の分布型に着目すると、20-30cmの範囲は流水接岸前(9401-9404)では顕著であるものの、流水接岸後の比較的高緯度地域を含む計測値(9405-9407)にはほとんど表れていないことがわかる。その一方で、後者のデータでは40-50cmの範囲の頻度が卓越するようになる。

そこで9402のデータを用いて氷厚と密接度の関係について考察した(図3-1-4)。ただし密接度は船上に設置したVTRカメラの画像を解析することにより計測し[2]、両データが1対1に対応するようにそれぞれ計測1分間の平均値をプロットした。この図から氷厚20-30cmの範囲は比較的密接度の低い氷縁海域で顕著に表れていることがわかる。

次にヒストグラムデータから求めた各年毎の氷厚分布の確率密度を図3-1-5に示す。ただし1994年のデータは前半(Y94\_1:9401~9404)と後半(Y94\_2:9405~9407)に分けて表示した。氷厚50cm以上の確率密度は氷厚に対してほぼ指数関数的に減少する傾向を示している。

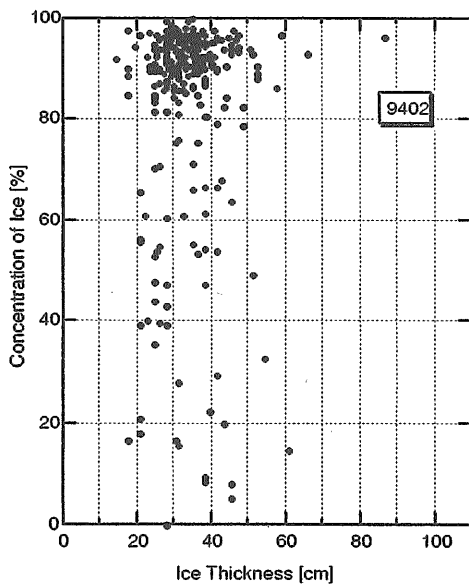


図3-1-4 氷厚と密接度

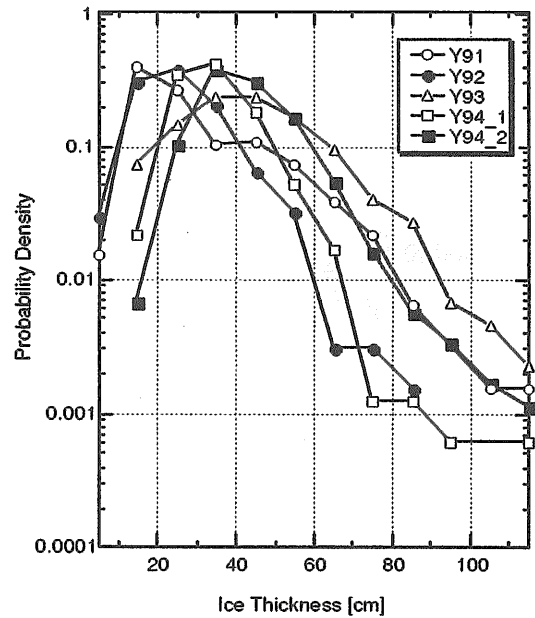


図3-1-5 確率密度

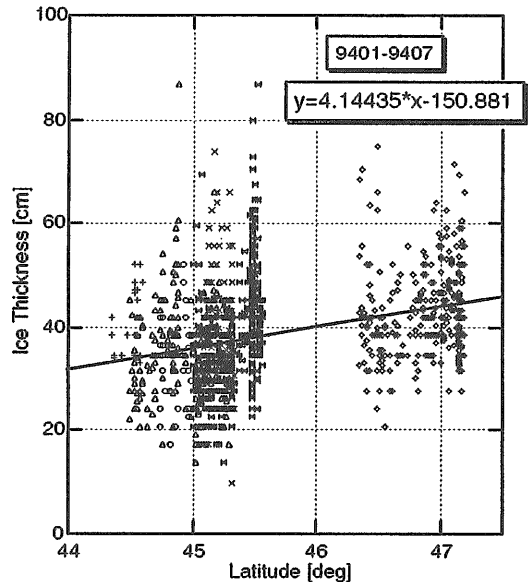


図3-1-6 氷厚と緯度の関係

最後に1994年の全データを用いて緯度と氷厚の関係を考察した。図3-1-6に示すように氷厚は緯度1度に対して約4cmずつ増加している。

### 3.1.3 結言

巡視船「そうや」の船上に設置したVTRカメラによりオホーツク海南部海域における氷厚分布の計測を行った。得られた結論は以下の通りである。

(1)本手法による氷厚計測の95%信頼度範囲は氷厚20cmで

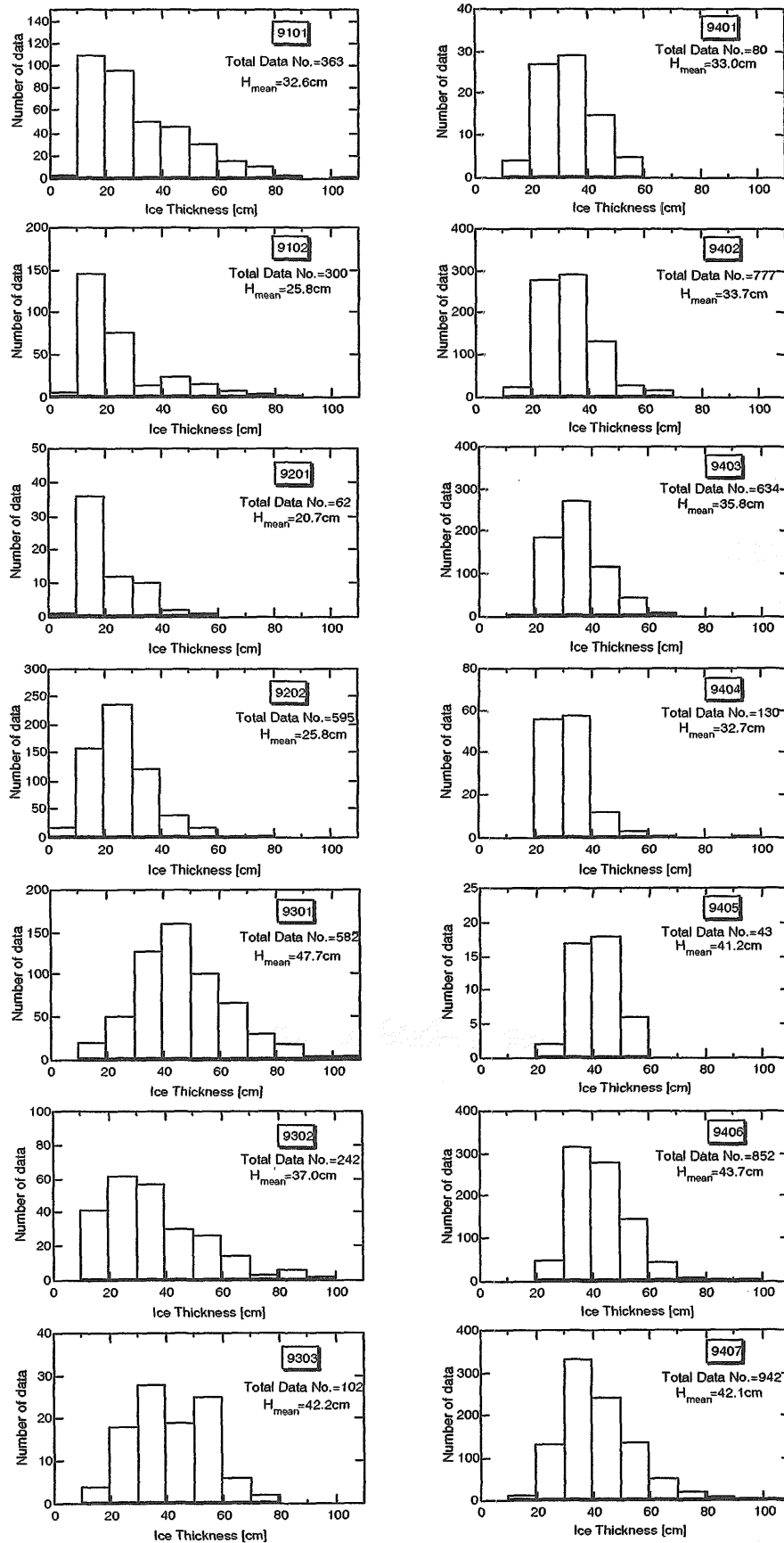


図3-1-3 氷厚ヒストグラム

- は5cm程度、50cmでは10cm程度である。
- (2)計測1日毎にまとめたデータの平均氷厚は20.7cmから47.7cmの範囲にある。
- (3)氷厚の薄い部分は低密接度の氷縁海域で顕著に認められる傾向がある。
- (4)氷厚50cm以上の氷厚分布の確率密度関数は、氷厚に対し指数関数的に減少する傾向がある。
- (5)氷厚は緯度1度あたり約4cm増加する。



写真3-2-1 実船試験光景

3.2 砕氷型巡視船「てしお」の実船試験概要 [11] [20] [21]

砕氷型巡視船「てしお」の他2隻の巡視船による氷海域実船試験は、本研究の最終年度平成8年2月22～3月1日、宗谷岬の東方40～80海里の海域において実施された。「てしお」の他、砕氷型巡視船「そうや」及び耐氷型巡視船「ゆうばり」を加え、第一管区海上保安本部長指揮の下に氷海域実船試験が実施された。この様な大規模な氷海域の実船試験は我が国では初めてのことであり、「そうや」は「てしお」と同じ砕氷型巡視船であり、「ゆうばり」は「てしお」と排水量がほぼ同じである。

実船試験の実施に当たっては、海上保安庁、船舶技術研究所、日本鋼管（株）が協力して行った。試験項目は表3-2-1の通りである。また、計測項目は、氷厚、氷質、対氷速力、進出距離、馬力、旋回角速度、トルク変動、船首部外板の歪み、加速度等である。実船試験の光景を写真3-2-1に示す。供試船「てしお」のプロファイルを図3-2-1に示す。長さ×幅×喫水は49.0×10.2×3.32m、排水量約870ton、主機関1,800ps×2である。船型は、ステム角30度の円筒状船首で、ビルジ部でチェーンを有し、船底勾配に沿った向きにのビルジキールを備え、ノズル付き可変ピッチプロペラの2軸2舵である。砕氷能力は、厚さ55cmの平坦氷を船速3knotにおいて連続砕氷、厚さ75cmの氷

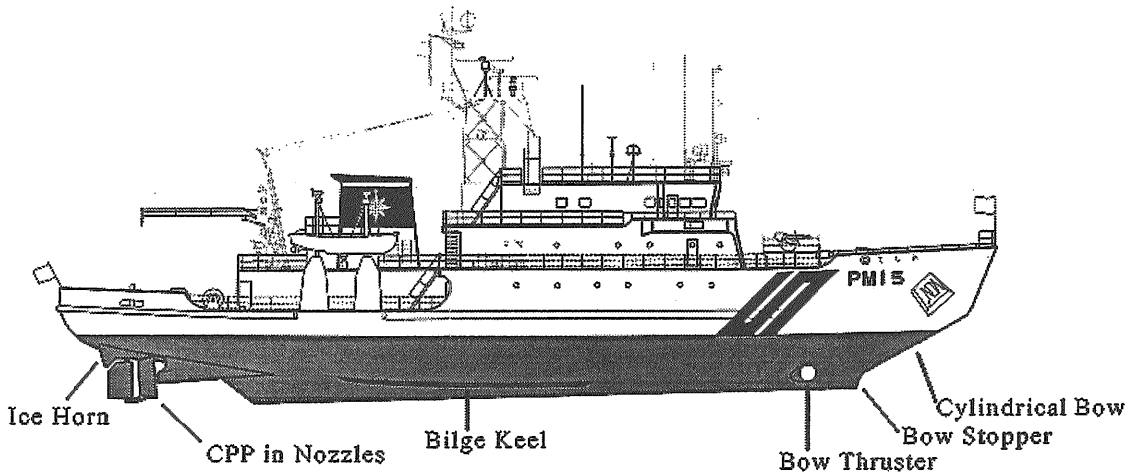


図3-2-1 砕氷型巡視船「てしお」

表3-2-1 試験項目

平坦氷中直進航行試験	目標氷厚55cm	「てしお」「そうや」「ゆうばり」
平坦氷中停止惰力試験	前進中、船体停止翼角発令	「てしお」「そうや」「ゆうばり」
平坦氷中旋回試験	舵角15度	「てしお」「そうや」「ゆうばり」
平坦氷中Z操縦試験	舵角10度	「てしお」「そうや」
平坦氷中ラミング試験	目標氷厚75cm	「てしお」「そうや」
協調砕氷航行試験	「てしお」を「そうや」の斜め後方に配置し協調砕氷航行させる	
氷況観測	「そうや」搭載機による試験水域の搜索、撮影 試験船による氷質調査	

盤をラミング砕氷により突破可能である。

以下に続く章において、試験結果の詳細を報告する。

第3.3章においては実船試験海域の氷況について報告する [14]。試験中に遭遇した氷況の分類を行うとともに、氷厚分布、海水曲げ強度について検討する。

第3.4章においては水中航行性能について報告する [12] [9]。実船試験を行った6つの試験項目について報告する。また、模型実験による実船馬力の推定、実船抵抗の推定について検討する。

第3.5章においてはプロペラと氷の干渉について報告する [13] [10]。プロペラと氷片の干渉計測結果をまとめるとともに、軸馬力の計測方法について述べる。干渉頻度及び軸トルク変動成分については、模型実験の結果と比較する。

### 3.3 巡視船「てしお」によるオホーツク海水況観測 [14]

オホーツク海実船試験時に下記の氷況観測を行った。(1)氷厚、(2)氷盤密接度、(3)積雪厚(以上、VTR及び目視)、(4)計測時船位(GPS)(5)氷温度、(6)氷塩分濃度(以上、氷塊採取後厚さ方向に5~10cm間隔で計測)(7)氷塊採取位置(GPS)。本論では、試験中に遭遇した氷況の分類を行うとともに氷厚分布の特性について考察した。また、海水の機械的特性として、曲げ強度の推定を行った。

#### 3.3.1 計測方法

氷厚及び氷密接度の計測手法は当所が過去の実験で用いたものと同様である(3.1.1節参照)。船上に設置したビデオカメラにより針路方向及び鉛直下向きの画像を撮影し、氷密接度及び氷厚をそれぞれ解析した。また、これと同時に船上からの目視観測を連続的に実施した。目視による氷厚観測では誤差を小さくするため、舷側より突き出したスケールを用いるとともに(写真3-3-3)、停船時に氷厚の直接計測を行うことによって、随時校正を行った。氷密接度は実質的に10/10であったので以下の記述では割愛する。

海水の曲げ強度は温度及び塩分濃度を計測し、以下の方法によって推定した。海水の温度並びに塩分濃度は、その鉛直断面内で一定でなく、一般に何らかの分布を示す。このため船上に引き上げた水サンプルの鉛直断面内に5あるいは10cm間隔で氷温度の計測を行った。この後、サンプルを同じく5あるいは10cm間隔の小サンプルに分割し、これらを融解させて氷の塩分濃度を計測した。このようにして得られた氷温度と塩分濃度よりそれぞれの位置における氷曲げ強度をTimco及びFrankenstein提案の式により推定し、これらの平均値をもって曲げ強度値の代表値とした。

#### 3.3.2 計測結果及び考察

##### 3.3.2.1 試験海域及び氷況の分類

試験海域及び2月25日の流水状況図を図3-3-1に示す。

試験期間中に当該海域の流水勢力は今冬でほぼ最大に達した。計測海域の氷況は大氷盤、巨氷盤と呼ばれる径500m以上、及び径数km以上の氷盤が中心であったが、厚さ、機械的特性の様な大氷盤の存在は希であり、各種の海水が混在するが多かった。実船試験中に観察された海水は、次の4種類に大別できる。

##### Type A

氷盤間の開水面が凍結して間もない成長の初期段階にある薄い板状軟氷。黒ずんだ外見を示し、代表的厚さは10から15cm程度。Type Aの氷の例を写真3-3-1に示す。

##### Type B

直径2から3mの大きさのはす葉氷状の小氷板。この小氷板が凍結し合い大氷盤を形成している例が見られた(写真3-3-2)。この大氷盤を上空から観察すると、表面には鱗状のパターンが見られる。小氷板同士の凍結は完全ではなく、砕氷航行時には氷板間の破壊が卓越する場合もある。

##### Type C

平坦な板状の氷。表面の凹凸は少なく、氷厚は25から45cm程度。断面の透明度は高く、断面内に2、3層の層状

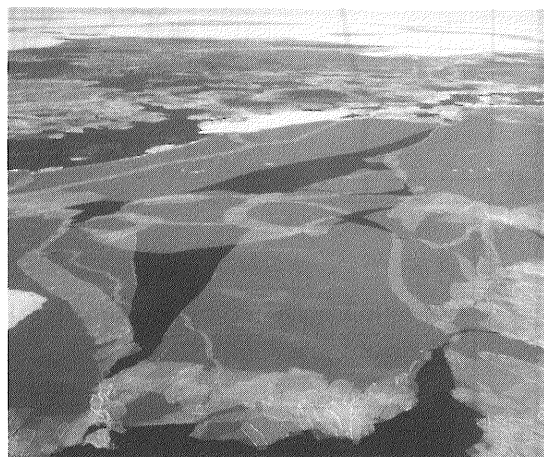


写真3-3-1 Type Aの氷の例

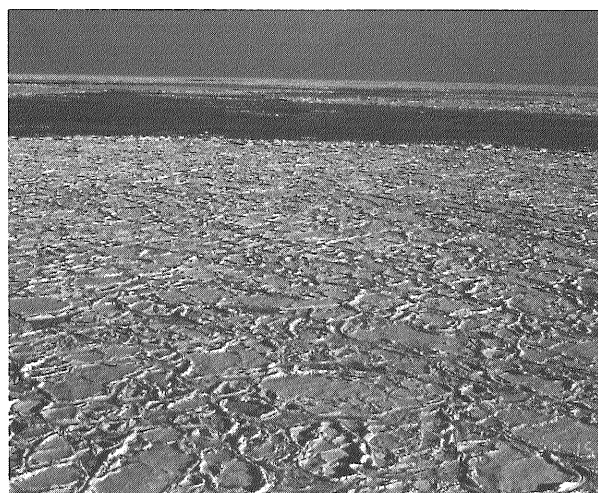


写真3-3-2 Type Bの氷により形成される氷盤

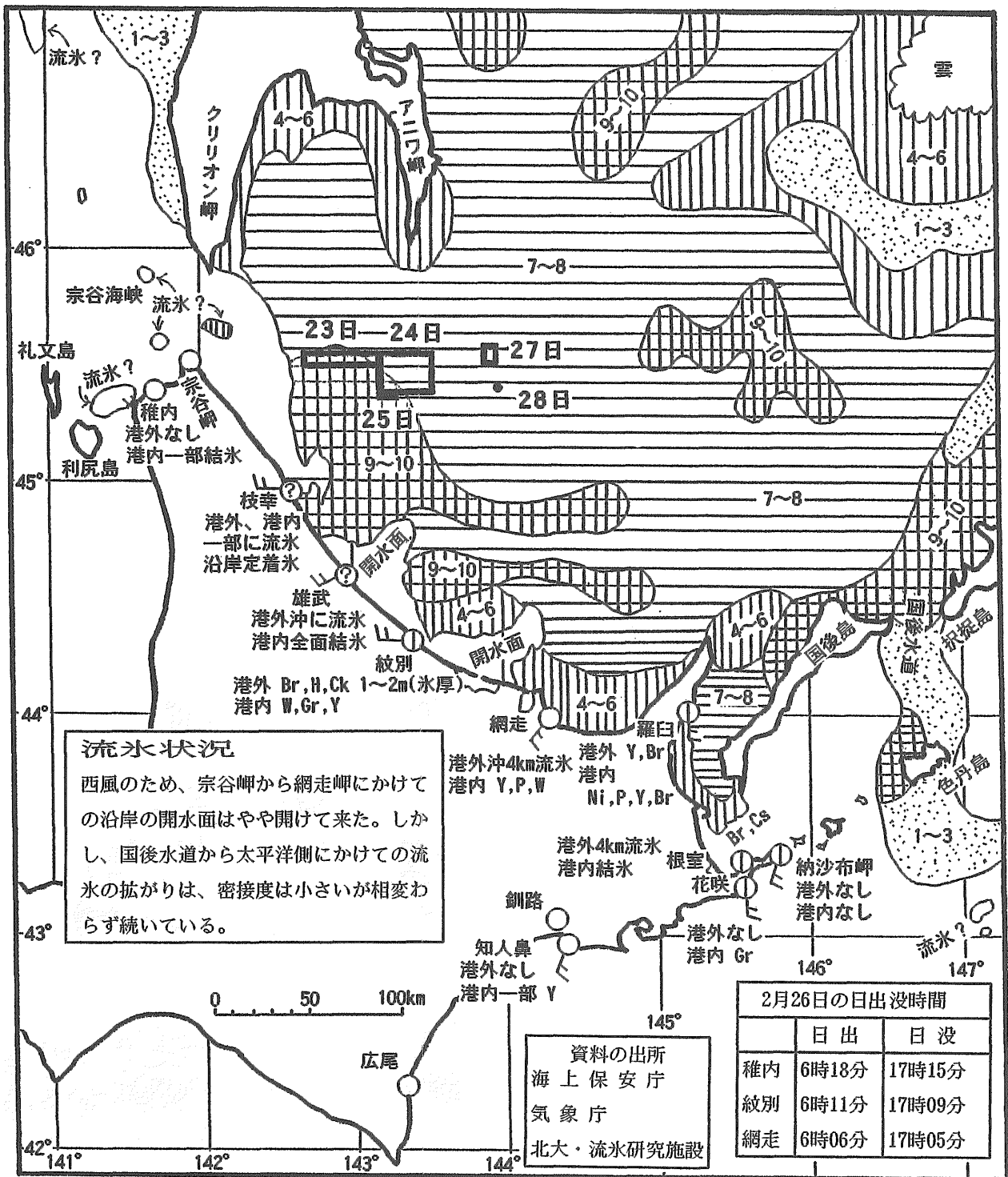


図3-3-1 流水状況図 (2月25日)  
 (第一管区海上保安本部流水情報センター提供)

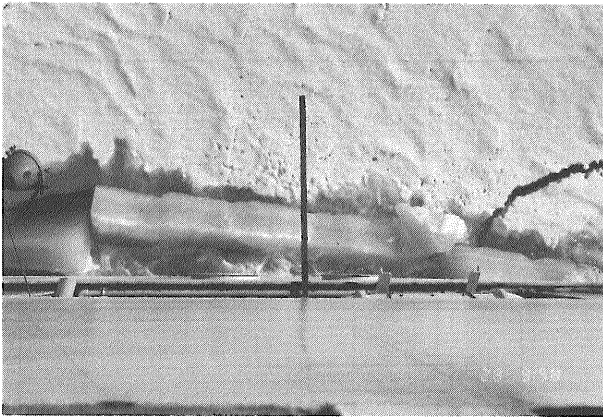


写真3-3-3 TypeCの氷の破断面



写真3-3-5 氷丘脈の例



写真3-3-4 Type Dの氷の例

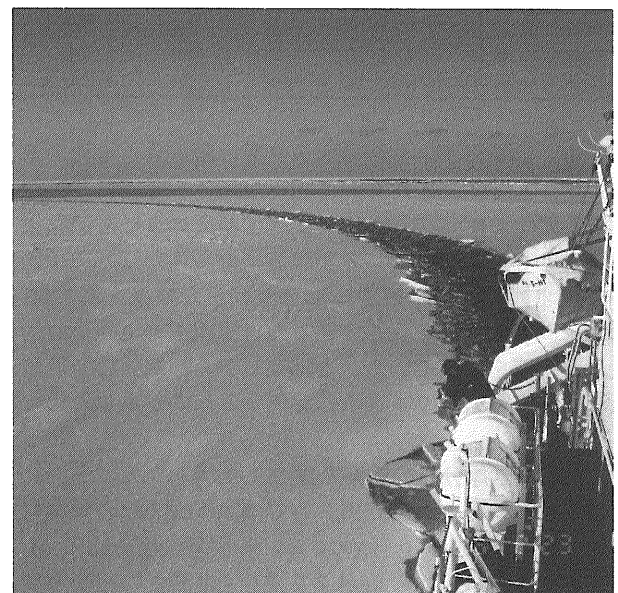


写真3-3-6 旋回試験航跡 (Type C)

構造が観察される場合もある。Type Cの氷の破断面の例を写真3-3-3に示す。

#### Type D

乱水域あるいは氷丘脈を船が通過する時に観察される、厚く、青白い断面を有する氷。氷厚はこの海域に存在する氷としては非常に厚く、時には1mを越えるものも見られる。多くの場合その底部あるいは断面内に、藻類 (ice algae) が付着し茶色に変色した部分が観察される。Type Dの氷の例を写真3-3-4に示す。

上記4種類の氷のうち、Type CはType Aの氷板が、波浪等により破壊されることなく成長した結果と考えられる。成長の過程で外部からの擾乱により破壊が発生すると氷板は破壊され、小氷板を形成する。小氷板同士がぶつかりあうことにより氷板周辺が盛り上がり、はす葉状のType Bの氷盤が形成される。Type Dの氷はType Cの氷がさらに成長したもの、あるいは2枚以上の氷盤が重なり合って再凍結し一体化した氷であり、北方の海域で発生・成長した氷が南下したものも含まれると考えられる。

今回の実船試験において遭遇した氷況は、試験日及び海域により大きく変化した。2月23～25日の試験前半の氷況は、一般に氷厚も薄く穏やかであった。これに対し、2月27、28日の試験後半には、Type Dの「てしお」によって厳しい氷況が多く見受けられた。

#### 3.3.2.2 実験海域の氷厚

##### 3.3.2.2.1 計測結果及び計測手法の比較

実船試験において氷厚は重要な評価パラメーターであるが、大量のデータを効率よく、且つ精度よく計測することは困難である。そこで本実験ではビデオ及び目視観測の二種類の計測を行った。

ビデオ観測による氷厚分布計測は大量のデータを比較的精度良く計測できるという利点がある。従って氷厚の空間的な変動を捉えることが可能である。図3-3-2に平坦水中直進航行試験時の氷厚の時系列分布の一例を示す。供試氷盤は前述したType Cであり、局所的に存在するハンモック帯を通過したことがわかる。

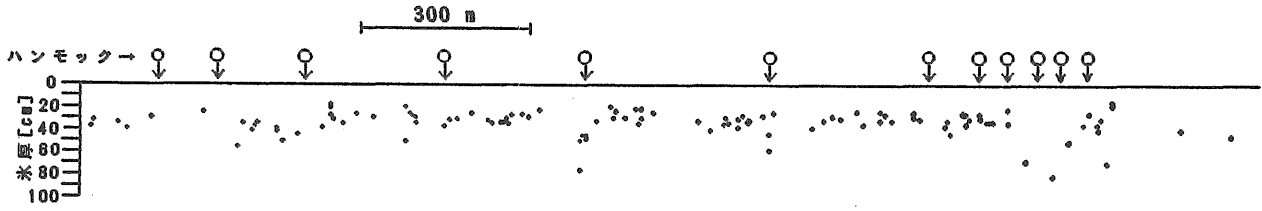


図3-3-2 直進航行試験時の氷厚時系列分布例

表3-3-1 採取海水の推定曲げ強度

採取日	時間	採取位置	氷厚[cm]	曲げ強度[kPa]	氷のタイプ
2月23日	12:25	45° 31' N, 142° 44' E	17	187	Type B
2月24日	10:15	45° 26' N, 143° 11' E	30	352	Type C
2月24日	16:58	45° 22' N, 143° 10' E	29	303	Type C
2月25日	10:15	45° 22' N, 143° 10' E	17	195	Type B
2月27日	10:20	45° 30' N, 144° 02' E	58	331	Type D
2月27日	17:40	45° 31' N, 142° 21' E	32	249	Type C
2月28日	08:20	45° 31' N, 142° 20' E	30	226	Type B

一方、目視による観測はデータ数は限られるものの準リアルタイムで結果が得られる利点があり、頻繁に校正を行うことによってビデオ計測に比べて精度の良い計測結果を得ることも可能である。各実験毎に得られた氷厚の平均値をビデオ観測と目視観測結果で比較した結果を図3-3-3に示す。両者はほぼ一致しているが目視観測の方が全般的に大きな氷厚を与えている。これはビデオ観測による計測が原理上、実際の氷厚を過小に評価する傾向があるためであろう[6]。

3.3.2.2.2 氷厚分布の確率密度

氷厚分布に関する研究例としては北極海の氷丘脈を対象とした研究が数多く行われている。Wadhamset.al.はBeaufort海の氷丘脈の keel 深さ及び sail 高さの確率密度が次式の指数分布に従うことを示した[24]。

$$p(h) \Delta h = \alpha \exp(-\beta h) \Delta h$$

今回の実験で得られた全ての氷厚データから求めた離散的確率密度分布を図3-3-4に示す。氷厚40cm以上の領域で近似的に上式の指数分布で与えられることがわかる。この範囲の氷況は前述の分類によればType Dであり、乱水域あるいは氷丘脈等の氷丘化した氷盤に相当する。結論は今後の検討を待つ必要があるが、北極海で発現する氷丘脈とは程度の差こそあれ、氷丘化した氷盤の氷厚分布が同様の傾向を示すことは極めて興味深い。

3.3.2.3 実験海域の海水曲げ強度

表3-3-1に氷サンプルの温度並びに塩分濃度の計測結果から推定された曲げ強度値を示す。今回の計測では、氷厚計測を優先させて計測を行ったため、氷サンプルの採取、計測は合計7回にとどまった。しかしながら、Type Aを除く氷についてそれぞれ曲げ強度の推定を行っているため、今回の実船試験の対象海域における氷の特性の概要を知ることができよう。

当所では、従来の「そうや」実船実験の機会に三点曲げ

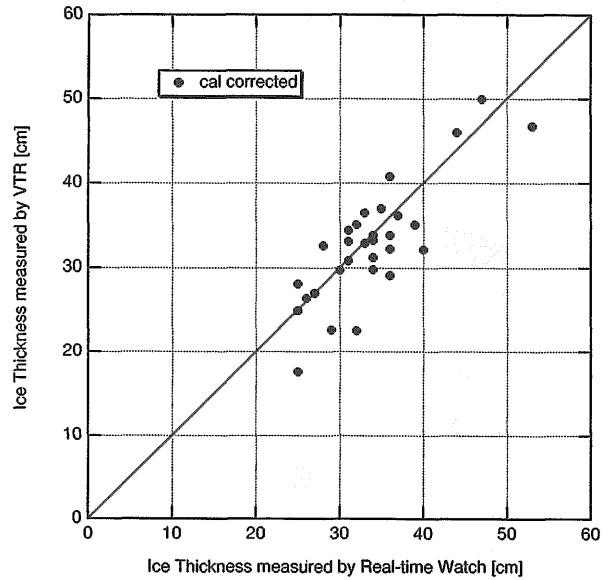


図3-3-3 目視観測とビデオ観測との比較

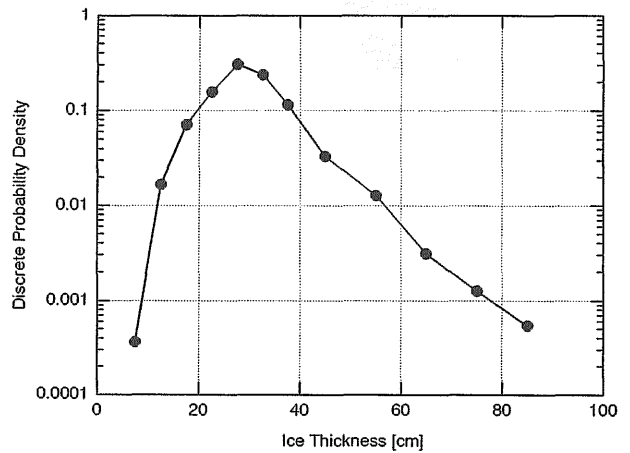


図3-3-4 氷厚の確率密度分布

試験による海水の曲げ強度計測を多数行っているが、これらの結果は今回推定した曲げ強度値と良く一致している(図3-3-5)。

3.3.3 結言

今回の実船試験は、これまでの「そうや」実船実験では得られなかった大きな氷盤、比較的一様な氷厚、機械的



性をもった恵まれた氷況で実施でき、砕氷船の基本的な水中性能を把握するためのベースデータとなった。

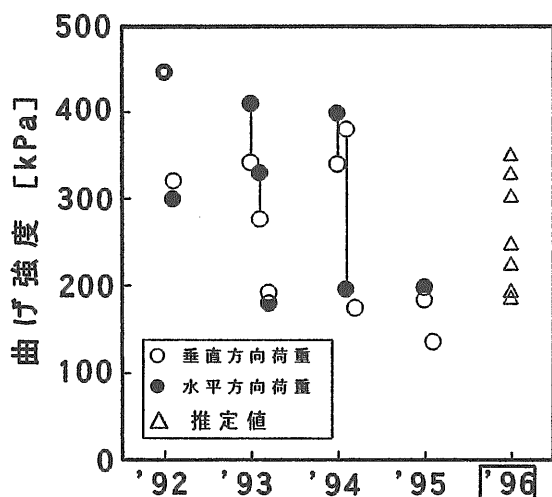


図3-3-5 5年間の海水曲げ強度

表3-4-1 「てしお」の主要目

Principal Dimensions		Ship	Model
Length on water line	m	49.0	4.500
Breadth mld.	m	10.6	0.973
Depth mld.	m	5.0	0.459
Draft	m	3.3	0.306
Gross tonnage	ton	550	
Output	PS	1800×2	
Propeller diameter	m	1.95	0.179
Number of blades		4	

### 3.4 砕氷型巡視船「てしお」の水中航行性能 [12]

本章においては砕氷型巡視船「てしお」の水中航行性能について実船試験を行った6つの試験項目について報告する。また、模型実験による実船馬力の推定、実船抵抗の推定について考察を加えた。砕氷型巡視船「てしお」の要目を表3-4-1に示す。そのプロフィールは図3-2-1に示されている。

#### 3.4.1 実船実験結果

##### 3.4.1.1 概要

北海道沿岸付近の流水は比較的小さな氷盤によって構成される場合が多いが、本実験期間中は径500m以上の大氷盤が中心で均質性が比較的高く、平坦氷板を用いた模型実験との比較検討の上で良質のデータとなった。実験海域の氷況及び氷質計測結果は第3.3章に記述された通りである。

本実船実験で行われた試験項目は以下の通りである。抵抗推進性能関係では平坦水中直進航行試験、平坦水中停止惰力試験及びラミング性能試験を、操縦性能関係の項目で

は平坦水中旋回試験及びZ操舵試験を、また運航関係の項目として協調砕氷航行試験を実施した。

##### 3.4.1.2 平坦水中直進航行試験

目標氷厚55cmの大氷盤中を約500m直進し、主機出力を最大出力(MCO)の1/4、2/4、3/4及び4/4の4段階に設定して速力、主機馬力の計測を実施した。出力の設定は4/4を除いて軸回転数を一定とし、CPPの翼角を調整して行われた。速力は投板とGPSによる計測を併用したが、本解析では投板による対氷速力を用いた。また主機馬力は燃料消費量を計測し平均所要馬力に換算する手法と、プロペラ軸に歪みゲージを貼り付けて軸トルクの計測を行い、これから馬力を求める手法の2種類を実施した。後者による計測結果は第3.5章に詳しい。本解析では前者による馬力推定値を用いたが、両手法による平均所要馬力は良い一致を示した。

計測結果から得られた「てしお」の連続砕氷性能を図3-4-1に示す。図の横軸は氷盤の平均氷厚を、また縦軸は平均船速をそれぞれ表し、実線は1/4、1/2MCOと常用出力(NSO = 85%MCO)における性能近似曲線である。これから「てしお」は建造仕様により求められた連続砕氷性能を満足していること、すなわち氷厚55cmの氷盤を3knotで連続砕氷航行できることがわかる。

##### 3.4.1.3 平坦水中停止惰力試験

平坦水中直進航行試験終了後、船体停止翼角を発令し、停船に至るまでの距離及び船速等を計測した。ただし停船距離は投板によって計測した。

停船距離と停止翼角発令時の船速の関係を図3-4-2に示す。ただし図中の数字は平均氷厚を表す。水中では水力による反回頭モーメントが卓越するため、通常海域での停止惰力試験結果とは異なり停止翼角発令後の針路はほぼ一定であった。実験結果から氷中の停船距離は氷厚が一定とすると初期船速の二次式で近似できることがわかった。

##### 3.4.1.4 ラミング性能試験

約2船長の助走距離を4段階の出力で直進した後に目標氷厚75cmの氷盤に衝突させ、船体停止までの進出距離、

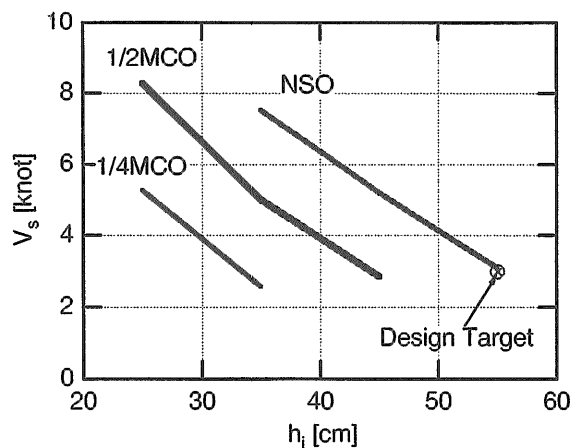


図3-4-1 連続砕氷性能

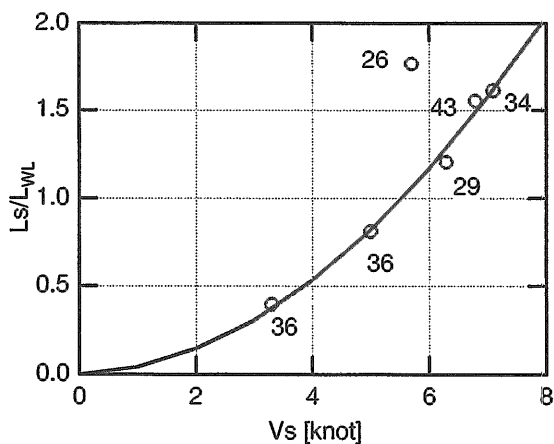


図3-4-2 平坦水中停船性能

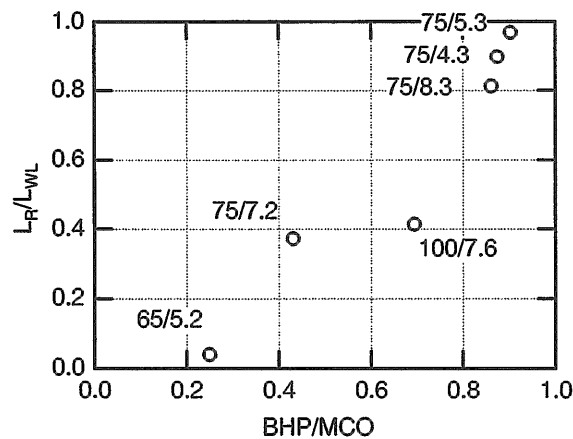


図3-4-3 ラミング性能

船速及び衝突前の馬力等を計測した。供試氷盤はほぼ一様な厚さと強度を有する平坦氷ではなく、小さな氷塊が重なり合ってハンモック化した起伏の大きい氷盤が大氷盤の中に局所的に存在した。

ラミングによる進出距離と氷盤衝突時の馬力の関係を図3-4-3に示す。ただし図中の数字は平均氷厚 (cm) 及び突入時船速 (knot) を表す。突入時の船速は4～8knotの範囲であった。図より本船がハンモック化した平均氷厚75cmの氷盤に主機最大出力で突入すると約一船長進出できることがわかった。

3.4.1.5 平坦水中旋回試験

大氷盤中を主機出力及び舵角一定で回頭運動させ、旋回航跡及び船速等を計測した。旋回航跡はGPSによって計測した。氷海中では舵の損傷を防ぐために緊急時を除いて大舵角操舵は行わない。そこで設定舵角は1ケースを除き両舷15度とした。

計測結果の一覧を表3-4-2に示す。氷厚が23～38cmの大氷盤中で舵角が15度の時にアドバンスは船長の約7倍、旋回圏は船長の約13倍となった。今回の計測結果からは旋回性能の氷厚依存性は顕著には認められなかった。この値を通常海域での実験結果と比較するとアドバンスが約1.4倍、旋回圏が約1.6倍になる。

3.4.1.6 平坦水中Z操舵試験

大氷盤中を主機出力一定でZigZag操舵させ、方位角、舵角及び船速等を計測した。ただし方位角及び舵角の計測は本船装備機器によって行った。舵角は1ケースを除き10度とし、いずれも面舵側から操舵した。

計測結果の一覧を表3-4-3に示す。10度Z試験で得られた操縦性指数K'は平均で0.69であり、通常海域での実験結果に比べて30%程度低下した。オーバーシュート角はいずれのケースでも比較的小さい。水中Z操舵試験は通常海域に比べて低船速域で行われるため船体の慣性力が氷力に較べて小さいことによると思われる。

3.4.1.7 協調砕氷航行試験

氷海域で比較的大型の船舶の誘導するために幅広の水路

啓開を行う場合に2隻の砕氷船を斜め前後に配置したオペレーションが行われることがある。図3-4-4に示すように「てしお」を「そうや」の斜め後方に配置し両船の位置関係を保持したまま直進砕氷航行を行い、2船の後方にできる開水路の状況及び「てしお」の馬力低減量を計測した。2船の相対位置はレーダーによって求めた。

試験結果をもとに氷厚46cmの大氷盤中に換算した主機馬力と船間距離の関係を求めると、船間距離を30mとした場合、同一船速で単独航した場合に比べて所要馬力は1/2以下となった[20]。しかしながら2船の後方に啓開された開水路は比較的大きな氷盤で覆われており、誘導用の航路啓開という観点からは2船の位置をさらに近づける必

表3-4-2 平坦水中旋回試験結果

Rudder [deg]	Ice Thick. [cm]	Advance /L <sub>WL</sub>	Tactical Dia./L <sub>WL</sub>
15S	32	6.5	12.9
15P	23	6.6	13.0
15S	27	8.7	12.0
15P	26	6.8	13.2
15S	31	7.1	13.2
15P	38	7.0	14.4
35S	30	6.2	9.7

表3-4-3 Z操舵試験結果

Rudder [deg]	Ice Thick. [cm]	K'	Overshoot Angle		
			1st	2nd	3rd
10S	33	0.65	3.0	0.5	N.A.
10S	33	0.68	0.5	1.0	1.0
10S	31	0.75	1.5	1.0	1.0
20S	31	0.76	5.5	2.0	5.5

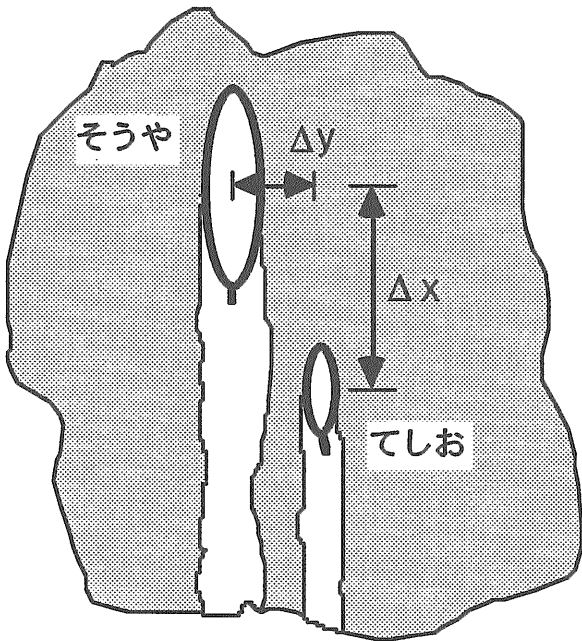


図3-4-4 協調砕氷航行試験

要がある。実際の流氷海難救助に対する本オペレーションの有効性を検証するためには今後実験データの蓄積が必要であると思われる。

3.4.2 模型実験による実船馬力の推定

3.4.2.1 推進係数

平坦水中を一定船速で直進航行する場合の推進係数 (h) を平坦水中抵抗自航試験、平水中過負荷試験及びプロペラ単独性能試験結果を用いて以下のように記述する。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{EHP}{DHP} = \frac{R_i V_i}{2\pi n Q_i} \\ &= \frac{T_o V_o}{2\pi n Q_o} \left( \frac{Q_o}{Q_{OL}} \frac{T_{OL}}{T_o} \right) \left( \frac{Q_{OL}}{Q_i} \frac{T_i}{T_{OL}} \frac{V_i}{V_{OL}} \right) (1-t_h) \\ &= \eta_o \frac{\eta_{R(OL/O)}}{(1-w)_{(OL/O)}} \frac{\eta_{R(i/OL)}}{(1-w)_{(i/OL)}} (1-t_h) \\ &= \eta_o \left[ \frac{\eta_{R(OL/O)}}{(1-w)_{(OL/O)}} \right] \left[ \frac{\eta_{R(i/OL)}}{(1-w)_{(i/OL)}} (1-t_h) \right] \dots (3.1) \end{aligned}$$

ただし、

$$R_i = (1-t_h) T_i \dots (3.2)$$

また添字 i、OL 及び O はそれぞれ水中試験、平水中過負荷試験及びプロペラ単独試験によって得られることを、また OL/O 等の表記は 2 種類の試験結果の比較参照によって定められることを意味する。

(3.1) 式右辺第 1 因子はプロペラ単独効率を、また第 2 因子は推進係数へのプロペラ荷重度の影響を表す。第 3 因子は平坦水中自航試験と平水中過負荷試験の差を表し、主として氷とプロペラ/ノズルの干渉の影響を表す。(3.1) 式をさらに変形すると、

$$\eta = \eta_o \left[ \frac{\eta_{R(OL/O)}}{(1-w)_{(OL/O)}} (1-t)_{OL} \right] \left[ \frac{\eta_{R(i/OL)}}{(1-w)_{(i/OL)}} \right]$$

$$\equiv \eta_{OL} \eta_{i/OL} \dots (3.3)$$

となる。ただし模型実験結果をもとに (3.1) 式中の自航要素を次式で与えた[9]。

$$(1-t)_i = (1-t)_{OL} = 0.888 \dots (3.4)$$

$$\begin{cases} 1-w_{OL/O} = 0.817 + 0.247 J_o \\ 1-w_{i/OL} = 1.149 + 5.925 \exp(-4.755 F_h) \end{cases} \dots (3.5)$$

$$\begin{cases} \eta_{ROL/O} = 1.000 \\ \eta_{Ri/OL} = 0.866 \end{cases} \dots (3.6)$$

(3.3) 式は水中航行時の推進係数はプロペラ荷重度の影響のみを含む推進係数 (hOL) に、推進器と氷の干渉による修正 (hi/OL) を行えばよいことを示している。

一般に水中模型実験では模型氷と実海水の氷質、特に浮力の差により氷とプロペラ/ノズルの干渉の影響を過大評価する傾向がある[13]。実船の推進係数は水中模型実験結果から得られた hi/OL 値を用いる場合と、hi/OL = 1 の中間にあるので、hi/OL は推進係数に対する尺度影響を含んだ氷干渉パラメータと見なすことができる。通常海域における推進係数の尺度影響はプロペラ単独効率及び伴流係数に含まれて扱われることが多い。ただし本問題では模型と実船の縮尺比が比較的小さいため、これらを無視した。

本章における実船馬力推定計算には本節の方法を用いた。本節の方法には、研究進捗時期の関係から、まだ、第 2.3 章の新解析法は使われていない。

3.4.2.2 有効馬力

平坦水中抵抗試験結果を用いて以下の回帰式を作成し、実船の抵抗 (有効馬力) を推定した。ただし実験結果の詳細は第 2.2 章に詳しい。

$$\begin{aligned} \frac{R_i}{\rho_w g B h_i^2} &= a_0 + a_1 F_h + a_2 C_n \\ F_h &= \frac{V_m}{\sqrt{g h_i}}, \quad C_n = \frac{\sigma_f}{\rho_w g h_i} \end{aligned} \dots (3.7)$$

ただし  $\rho_w$  は水の密度、g は重力加速度、B は船幅をそれぞれ表す。得られた回帰係数は  $a_0 = 6.3618$ ,  $a_1 = 2.5172$ ,  $a_2 = -0.0153$  である。氷板の曲げ強度の影響を表す右辺第 3 項の係数  $a_2$  が負になっているのは、母集団の曲げ強度値分布範囲が設定値 (実船換算 392kPa) 近傍に集中しているためである。

(3.7) 式に実船相当値を代入することによって実船抵抗推定値を求め、有効馬力を推定した。ただし氷盤曲げ強度は 392KPa とした。

3.4.2.3 実船馬力の推定

推進係数  $\eta_{i/OL}$  を水中自航試験結果から求めた場合と、 $\eta_{i/OL} = 1$  とした場合の 2 種類を仮定し、平坦水中を連続で直進航行する際の所要馬力の推定を行った。なお軸系の機械効率  $\eta_T$  は 0.95 とした。

図 3-4-5 は主機出力 1/2MCO における連続砕氷航行時の船速と氷厚の関係を示す。この図から  $\eta_{i/OL}$  を考慮した推

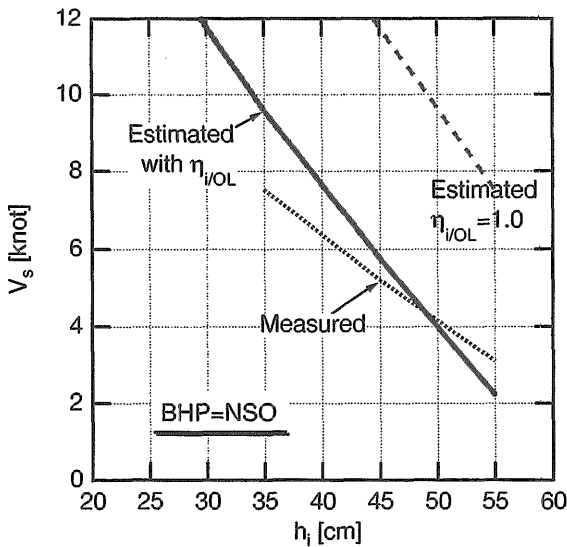


図3-4-5 模型実験による実船馬力推定

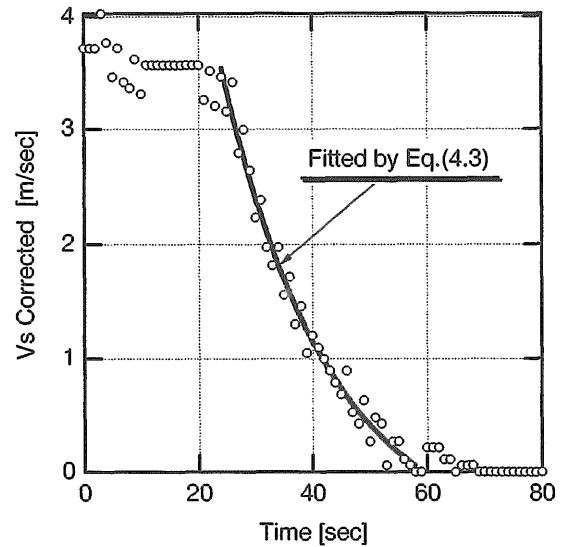


図3-4-6 船速減衰曲線

進係数を用いると実船の所要馬力を比較的良い精度で推定できることがわかる。一方  $\eta_{VOL} = 1$  とした場合には同一船速で砕氷航行できる氷厚値を大幅に過大推定することが示されている。ただし船速の氷厚に対する傾きは推定結果の方が大きい。これは模型実験による抵抗値の船速に対する依存性が低いことを反映している。

3.4.3 実船抵抗の推定

3.4.3.1 実船実験による抵抗の推定法

前節では推進係数に対する尺度影響について考察したが、有効馬力、すなわち水中抵抗の尺度影響も重要な研究課題である。現状の模型実験技術では実船状態に完全に対応した氷質や船体と氷の摩擦等の複雑な現象をシミュレートすることは極めて困難である。従って模型実験による実船の水中抵抗の推定精度を向上するためには、模型及び実船の水中抵抗計測を行い両者の相関を明らかにすることが重要である。

実船抵抗計測は水中曳航試験による直接計測や、軸スラスト計測による推定が行われているが計測機会や精度面に課題がある。そこで平坦水中停止惰力試験結果を利用して実船抵抗の推定を試みた。

模型実験結果を回帰した (3.7) 式からの類推によって実船水中抵抗は船速の一次式で与えられると仮定する。この時停止惰力試験における針路方向の運動方程式は次式で与えられる。

$$(m + m_x) \frac{dv}{dt} + (R_0 + R_1 v) = 0 \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} + A_0 + A_1 v = 0 \\ A_0 = -\frac{R_0}{m + m_x}, \quad A_1 = \frac{R_1}{m + m_x} \dots\dots\dots (4.2) \end{cases}$$

(4.2) 式を解くと船速は次式で与えられる。

(284)

$$v = (v_0 + \frac{A_0}{A_1}) \exp(-A_1 t) - \frac{A_0}{A_1} \dots\dots\dots (4.3)$$

停止惰力試験時に GPS によって計測した船速減衰曲線を図3-4-6に示す。供試氷盤の平均氷厚は34cmである。ただし今回用いたGPS装置の出力には平滑化フィルターが施されているので逆変換を行った。計測値にばらつきが見られるが、固定点での計測結果によれば本実験で用いたGPS装置の計測誤差のrms値は0.2m/sec程度である。

GPSによる船速は対地速力であり、供試氷盤の漂流速度が含まれる。当該海域の氷盤の漂流速度は風速に依存するが、過去の計測結果によれば平均で0.1m/sec、最大で0.3m/sec程度と報告された例がある[28]。そこで船体停止後に記録されたGPS船速と針路を用いて氷盤の漂流速度の修正を施した。修正された船速値は投板によって同時に計測された船速と良い一致を示した。

船速減衰曲線を (4.3) 式で回帰分析を行い、係数A0及びA1を求め、実船抵抗推定を算出した。ただし付加質量(mx)は船体質量の10%とし、回帰範囲は船体停止翼角発令時から船体停止時までとした。回帰結果を図3-4-6に示す。

3.4.3.2 実船抵抗の推定精度

平均氷厚34cmから39cmの3種類の氷盤に対する実船抵抗推定値 (Rss) を模型実験からの推定値 (Rsm) と比較した。結果を図3-4-7及び図3-4-8に示す。

図3-4-7より停止惰力試験結果から推定した抵抗値の速度依存性が模型実験からの推定値に比べて大きいことがわかる。氷抵抗の速度依存性は主として砕氷時の氷塊の回転及び沈下に起因する。実験中に観察される砕氷塊の大きさは模型実験の方が大きい、模型実験では破壊直前の氷盤上面に冠水が見られるのに対し、実船では観察されない。従っていわゆる Ventilation による速度依存性は実船状態の

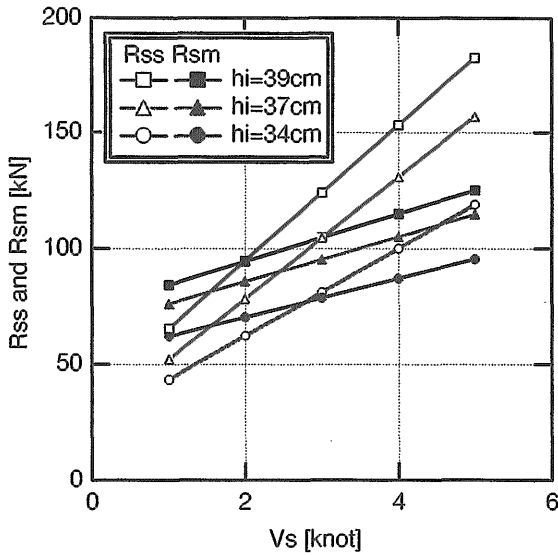


図3-4-7 実船抵抗推定値の比較-1

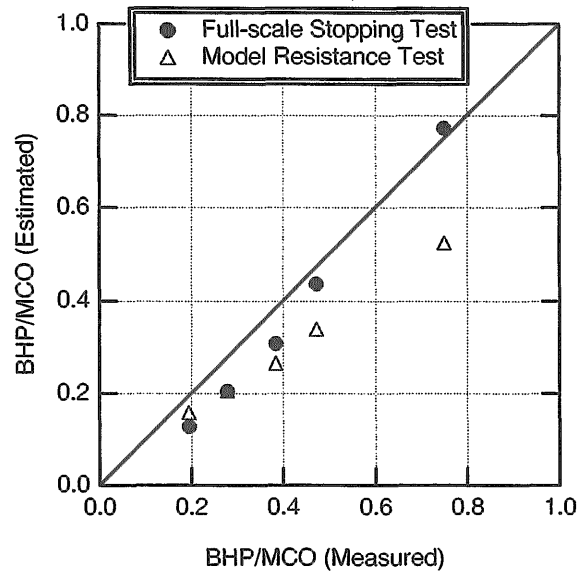


図3-4-9 2種類の抵抗推定値を用いた馬力推定結果の比較

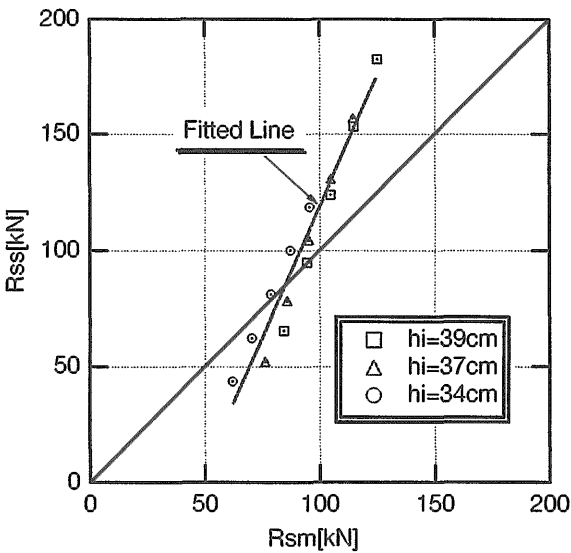


図3-4-8 実船抵抗推定値の比較-2

方が大きくなると予想される。

次に3.4.2章で記述した実船馬力推定スキームを使って停止惰力試験結果から求めた実船抵抗推定値の精度の検証を行った。氷厚35cmの水盤に対して2種類の実船抵抗値を用いて馬力を推定した結果を比較した(図3-4-9)。ただし推進係数は同一とし、 $\eta_{i/OL}$ を考慮した値を用いた。停止惰力試験結果から求めた実船抵抗推定値を用いた馬力推定結果は模型実験を用いた推定値に比べて実船実験結果と良く一致した。これは本手法による抵抗推定の有効性を示唆していると思われる。

しかしながら本手法による実船抵抗推定には精度面での課題は多い。例えば回帰範囲や氷盤の漂流速度の修正法の選択によって回帰係数の変動が大きく、抵抗推定値に大きな影響を与える。またGPS装置の計測誤差による影響も

無視できない誤差要因の一つである。本手法による抵抗推定精度を検証するためにはこれらの影響について定量的に考察するとともに、Differential GPSの利用を含めた計測の高精度化が必要であると思われる。

### 3.5 砕氷型巡視船「てしお」におけるプロペラと氷の干渉[13]

氷海域を航行する船舶では、船首部で砕氷した氷片がプロペラに衝突する現象は頻繁に発生し、効率の低下のほか、時としてプロペラ翼の破損や機関への障害などを引き起こす。氷片とプロペラの干渉は、水中抵抗と並んで、水中推進性能の中でも特に重要な問題となっているが、実船での干渉データは、公開されたものが非常に少ない。また、氷海用プロペラとしてノズルプロペラが採用される機会が多くなっているが、氷片によるノズル閉塞や氷との干渉についての研究が、オーブンプロペラに比べてさらに少なく、多くの課題が残されている。

海上保安庁の砕氷型巡視船「てしお」の氷海中実船試験時に、砕氷船用のプロペラ、軸系、エンジンキャパシティ等の設計のための基礎資料を集めることを目的の一つとして、ノズルプロペラと氷片との干渉計測を行うことができた。ここではその解析結果を示すと同時に、一部については、氷海水槽での模型実験結果との比較を示す。

#### 3.5.1 実船試験概要

「てしお」でのノズルプロペラと氷の干渉データの収集は、平坦水中直進航行試験(Continuous Test)、平坦水中旋回試験(Turning Test)、協調砕氷航行試験(Dual Line Ice Breaking Test)の3種類の試験項目において行われた。各試験の概要、「てしお」の主要目、一般配置図等については第3.2,3.4章を参照されたい。

表3-5-1 プロペラ主要目表

Propeller	
Type	CPP (2-shaft)
Diameter	1950.00 (mm)
Boss Diameter	680.00 (mm)
Number of Blades	4
Tip Thickness	19.00 (mm)
Angle of Rake	0°
Nozzle	
Inside Diameter	1980.00 (mm)
Outside Diameter	2411.30 (mm)
Tip Clearance	15.00 (mm)

表3-5-2 試験条件一覧

Exp. No.	Test Species	Ship Speed (knot)	Blade Angle (deg)	Engine Rev. (rpm)	Prop. Thick. (cm)
2402	2/4 Continuous	6.7	25	710	28
2404	3/4 Continuous	6.7	29	710	34
2406	4/4 Continuous	8.1	30	750	35
2408	1/4 Continuous	3.4	18	710	34
2409	3/4 Continuous	9.7	29	710	25
2501	1/4 S.S. Turning	-	18	710	31
2502	1/4 P.S. Turning	-	18	710	38
2503	1/4 Continuous	1.9	18	710	36
2504	2/4 Continuous	5.7	25	710	36
2505	3/4 Continuous	6.9	29	710	40
2701	2/4 Continuous	5.7	25	710	36
2702	2/4 Dual Line-IB	6.5	25	710	37
2703	2/4 Dual Line-IB	6.0	25	710	47
2704	3/4 Continuous	3.8	29	710	46
2706	2/4 S.S. Turning	-	25	710	30
2707	4/4 Continuous	4.3	30	750	53

表3-5-1に「てしお」のプロペラ・ノズル主要目表を示す。推進器は4翼の可変ピッチプロペラであり、翼荷重が大きいため、ボス比と翼厚が通常のプロペラに比べてやや大きい。

表3-5-2は、試験条件の一覧で、計測は全部で16ケース、試験項目の分数は実験時出力の主機最大出力（1軸で1800PS）に対する割合を示す。4/4出力以外では平水中でのパワーカーブに従って翼角を変えて出力調整をしており、主機回転数は710rpmであった。4/4出力では、翼角を30度とするとともに、回転数を750rpmとしている。試験中、翼角、回転数は左右で常同一となるよう調整された。すべての試験は氷密接度10/10、つまり海面が氷で全て覆われた状態で行った。

3.5.2 計測方法

図3-5-1に軸トルク・スラスト・回転数の計測に使用し

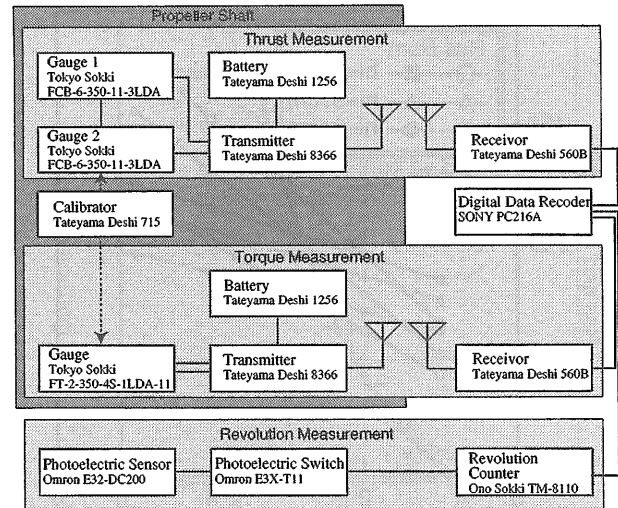


図3-5-1 計測システム図

た機器のシステム図を示す。軸トルク・スラストの計測は応答性と信頼性からプロペラ軸に歪ゲージを貼り、その出力をテレメータで取り出す方法を採用した。空間的な条件から計測は左舷軸のみであり、計測用の歪ゲージ及び軸回転数計測機器は、応力集中がなく平行部が長い左舷軸の給油軸表面に取り付けた。

3.5.2.1 軸トルク及びプロペラスラスト計測方法

歪ゲージはトルク計測用として4ゲージタイプを1枚、スラスト計測用として2ゲージタイプを互いに180度離して2枚使用した。実船における歪ゲージを用いたスラスト計測については、鈴木らが8ゲージとダミープレートを用いたHylarides型を使用して精度の高い計測を行っているが[29]、今回の計測では予備実験として、従来型の計測方法を採用した。歪ゲージからの信号は、テレメータのトランスミッターで変換されて軸回りに張られたアンテナ線から送信される。トランスミッター、バッテリー及びアンテナ支柱は、すべてユニバーサルバンドを用いて軸に固定されており、軸とともに回転する。受信側アンテナは送信側のアンテナの横に配置し、レーザーで電圧信号に変換した後、DAT型のデータレコーダで信号を記録した。毎日、計測開始時と終了時に歪ゲージのキャリブレーションを用いた調整、左右方向への軸のターニングによるゼロ点計測、軸温度の計測を行った。軸温度の変動は非常に小さく、各計測日とも開始時と終了時の差は0.2℃以内であった。氷海域という低温環境のため、機関、摩擦等による発熱と外部への放熱が釣り合っていたものと思われる。

歪からトルクへの変換では、給油軸の断面形状が軸対称でないため、極断面係数Zpを中実と中空との中間として計算した。給油軸の材質は炭素鋼鍛鋼のSF60であったため、E = 2.06x10<sup>11</sup>Pa (21000kgf/mm<sup>2</sup>)、ν = 0.3とした。歪からスラストへの変換での断面形状は実際のものを、縦弾性係数及びポアソン比の値はトルクと同じものを使用した。ノズルプロペラのスラストは、ノズルスラスト成分と

プロペラスラスト成分の和として定義されるが、今回の計測ではノズルスラストを計測していないため、プロペラスラスト成分のみが得られた。

### 3.5.2.2 軸回転数計測方法

軸回転数の計測は、軸上に1回転につき12パルスを出力するよう、白黒のストライプとなった反射テープを巻き付け、その反射光を光ファイバ型の光電スイッチによってピックアップして電気信号に変えて計測した。このシステムにより、細かな軸回転数の変動を計測することが可能となった。

### 3.5.2.3 燃料消費量からの馬力計測

歪ゲージによる軸馬力計測と比較するために、燃料消費率からの馬力計測を行った。各試験時に5分間の主機の燃料油消費量を機関室内の燃料流量計で計測員がその都度計測した。算定された燃料消費率をショップテストの燃料油に換算し、ショップテストの燃料消費率-馬力曲線より、平均所要主機馬力BHPを求めた。

## 3.5.3 計測結果及び考察

### 3.5.3.1 計測波形と氷片かみこみ

図3-5-2に計測波形の一例を示す。2/4協調砕氷試験時のもので、干渉頻度が高い試験条件である。トルク波形は、いったん大きく上昇した後、急速に下降するパターンを何度か繰り返す。「てしお」はプロペラ及び軸系保護のために、プロペラに過大な荷重がかかった場合に翼角を減少させる過負荷制限装置 (Over Load Protector : OLP) を装備している。この様な波形パターン時には、干渉により荷重が増加したため、OLPが作動して翼角が減少し、いったんトルクがOLP作動限界以下に下がったが、OLPが作動停止して指定翼角に復帰したところ、荷重上昇原因は解消しておらず、またOLPが作動するという状態を繰り返したものと考えられる。実際、この時、OLPが作動し、翼角が減少することが機関室内の翼角指示計により確認された。

ノズルプロペラにおけるこうした比較的長い時間の干渉現象としては、従来からノズルの閉塞が指摘されてきたが、後述するプロペラ単独氷片流し込み実験では、氷片のかみこみもその原因となることがわかってきた。図3-5-3に「ノズル閉塞」と「氷片のかみこみ」の概念図を示す。

ノズル閉塞は比較的大きな氷片が流れてきた場合、氷片によってノズル前面が塞がれたり、ノズル上部や支柱と船底との間に氷片が挟まることによって生じる。一方、氷片

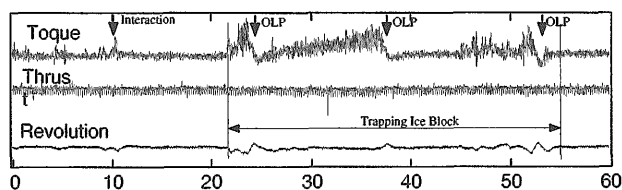


図3-5-2 計測波形例 (2/4DualLine-IcebreakingTest)

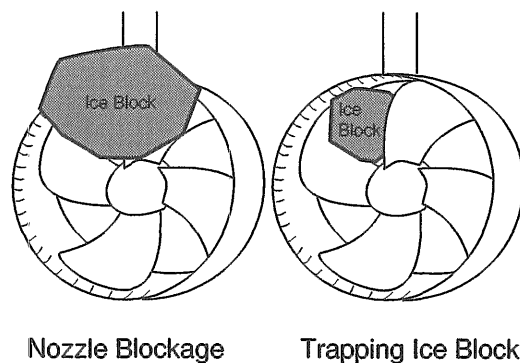


図3-5-3 「ノズル閉塞」と「氷片のかみこみ」

かみこみとは氷片がプロペラの翼と翼の間、または翼とノズルの間に挟まって、翼とともに回転する現象である。模型実験では、この様なかみこみが頻繁に起きることが確認されており、特に氷強度が大きい場合や翼角が大きい場合は翼での氷片切断が起きにくく、発生確率が高くなった。実船では、船の後流に浮き上がった氷片の観察ではノズル前面の閉塞が起きるほどの大きな砕氷片が視認できなかったこと、流体力学的な力により大きなトルク上昇が連続的に起きていること、機関室内での判断ではある程度の質量が翼とともに連れ回っている音がすることなどを、総合的に判断して氷片かみこみがトルク上昇の原因であると考えられる。

### 3.5.3.2 軸馬力の定常成分

図3-5-4は歪ゲージと燃料消費率の2種類の計測方法より求めた馬力を比較したものである。歪ゲージ計測による馬力は、干渉がない部分でのトルク計測値の平均から軸馬力SHPの定常成分値を求め、機械損失等による馬力増加を3%と仮定して主機馬力に換算した。両者は非常に良い一致を示している。燃料消費率による計測では、5分間の平

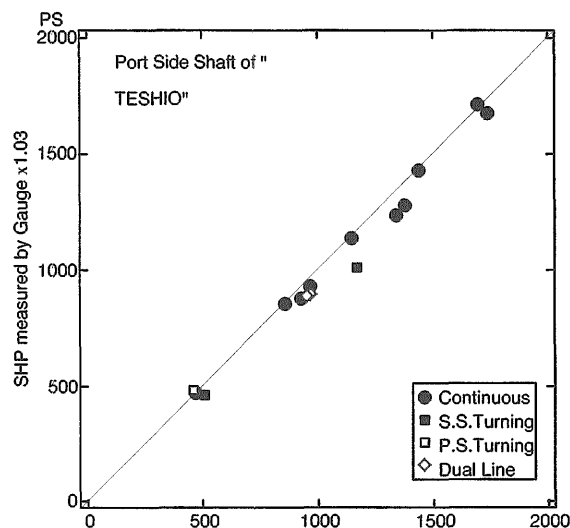


図3-5-4 軸馬力のゲージ計測と燃料消費量推定との比較

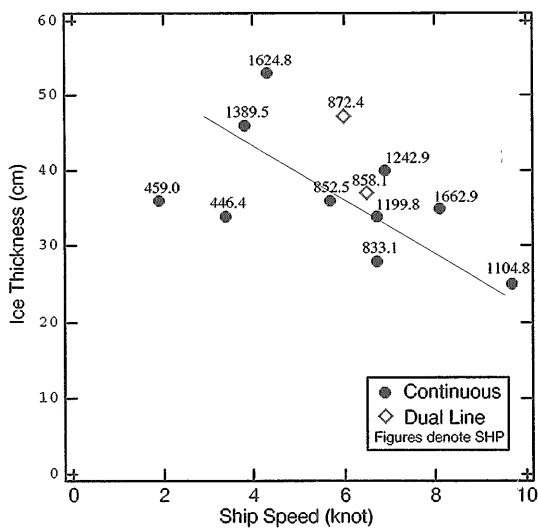


図3-5-5 左舷軸馬力の定常成分

均を取っているため変動成分が加算されており、右旋回試験と協調碎氷試験といった干渉頻度が比較的高い試験では若干高い値を示す。この図から歪ゲージによるトルク計測は、実用上十分な精度を持つことが確認できた。

図3-5-5は、横軸に船速、縦軸に氷厚をとり、歪ゲージで計測した左舷軸馬力の定常成分をパラメータとして表したもので、直進航行試験時の1000PSの等軸馬力を示す曲線を書き加えた。

3.5.3.3 氷片干渉による変動成分

図3-5-6は軸馬力の定常成分と変動成分の比較である。変動成分はピーク値の平均値として示した。定常成分が1600PSを超えた2点は4/4直進航行試験時の値で、OLPが頻繁に作動したために変動成分は実際より小さく表示されている。ばらつきは大きいものの、軸馬力の定常成分が増加すると変動成分も増加する傾向が見られる。定常成分が

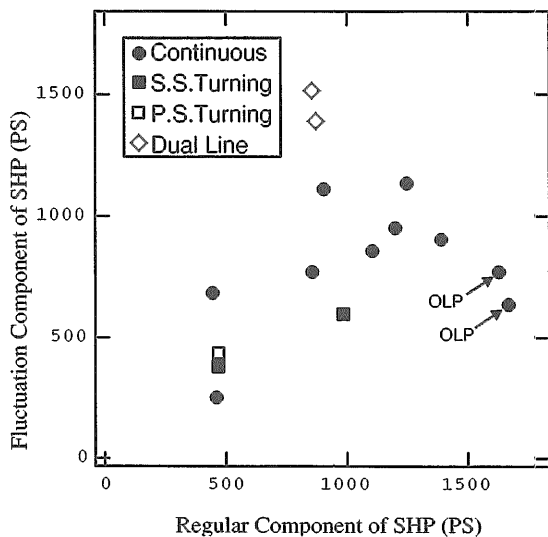


図3-5-6 軸馬力の定常成分と変動成分

大きい時には氷厚が大きく、氷片の径や質量も増加するため、干渉による変動成分も大きくなると考えられる。プロペラに流入する氷片の大きさは直接的に計測できなかったものの、船尾部のビデオによって後流に浮き上がってきた氷片の径を観察したところ、4/4直進航行試験時（実験番号2707）のように氷厚が大きい場合には、氷片の径も大きくなるという傾向は確認できた。氷との干渉によるトルク変動成分の大きさは、その最大値で定常成分と同程度であり、プロペラには氷との干渉時には瞬間的に定常分の約2倍の力がかかることがわかる。

協調碎氷航行試験においては、軸馬力の変動成分が非常に大きい。協調碎氷航行時には、同一軸馬力の直進航行試験時よりもかなり大きな船速、氷厚で航行したことによる。また先行船による碎氷片も加わるため、かみこみ現象等も多く観察されており、これが変動成分をさらに大きくしたと考えられる。

図3-5-7は、横軸が軸馬力の定常成分、縦軸が干渉頻度の大きさを表している。軸トルクの波形が、定常成分から大きくはずれてプラス方向へピークを持った場合を干渉とし、一定時間カウントした。さらに模型船や他船型との比較のために、1船長 $L_{pp}$ の距離を船が前進する間の干渉回数 $N_{LPP}$ に換算した。 $N_{LPP}$ は $L_{pp}$ を長さの単位として（長さ） $^{-1}$ のディメンションを持つ。ばらつきは大きいものの、軸馬力の定常成分が大きいほど干渉頻度は高くなる傾向が見られる。この理由として、一船長分前進する際の碎氷体積は氷厚に比例するため、定常成分が大きいほど氷片の体積は増加し、氷片のプロペラに流れ込む頻度も高くなることが考えられる。グラフの右上に突出した2点が、他点に比べて氷厚が大きいデータであることから、このことが裏付けられる。また、軸馬力の定常成分が大きいほど翼角は大きく、かみこみ現象等も多くなることが考えられる。かみこみ現象が起きると、カウントされる干渉回数は飛躍的に増加する。これら種々の要因の複合として、軸馬力の定常成分、変動成分、干渉頻度の関係はある程度説明でき

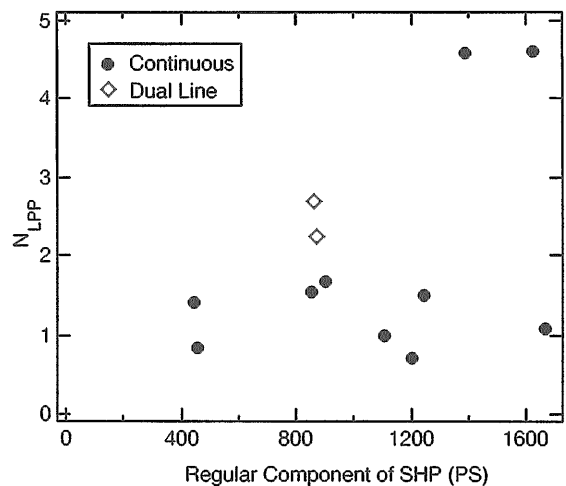


図3-5-7 実船での干渉頻度



るが、詳細な検討については干渉過程についてのさらに詳しい分析が必要である。

### 3.5.4 実船試験と模型実験との比較

#### 3.5.4.1 干渉頻度

当所の氷海船舶試験水槽で行った平坦水中自航試験の結果から、氷片とプロペラとの干渉頻度について考察する。模型実験の条件は表3-5-3に示す通りで、縮尺は1/10.889である。実験では荷重量変更式試験法を採用しており、抵抗動力計を介して模型船を一定船速で曳航し、曳航力Fをモニターしながらプロペラ回転数nを段階的に調整する。曳航速度を一定として、F=0となる自航点を求めた。なお軸回転数は、はじめに平坦水中抵抗試験結果を基にして、自航試験時の抵抗を推定し、この推定値から平水中抵抗を減じた値が、同一船速で実施した平水中過負荷試験時の曳航力に一致するように設定している。

この模型実験による軸トルク計測結果を基に、「てしお」の模型と実船でのプロペラと氷の干渉頻度の比較を試みた。模型実験の左舷側プロペラのトルクデータから、定常成分の平均値より標準偏差の3倍以上はずれたものを氷片

との干渉イベントとしてカウントし、模型と実船での干渉頻度を実船船速ベースで比較した結果を図3-5-8に示す。図中の添字は氷厚 (cm) を示し、模型での氷厚は縮尺比を用いて実船ベースに換算されている。模型実験結果では干渉頻度は船速に対してほぼ線形に増加し、氷厚が厚いほど干渉頻度が高くなる。一方、実船実験結果はばらつきが大きいものの、船速6knot以下のデータは模型実験結果と同様の傾向を示した。干渉の頻度は模型実験の方が2倍程度大きい。

模型水では水槽水に対する比重が実海水の海水に対する比重に比べて大きいことから、氷片の浮き上がりが相対的に遅くなり、プロペラ面に流入する氷片量が多くなる。このため、一般に水中模型実験では干渉の影響を過大に評価する傾向が指摘されている。今回の模型水の場合、浮力の作用は実海水の約半分である。氷片の浮上速度は水槽水との密度差に対してほぼ線形的に変化し、氷片体積が大きくなるほど浮上が遅くなるという研究結果 [30] を用いて、氷片の浮力、船速、氷厚を変数としてパイ数 $\pi$ の導出を試みた。浮力は氷片密度 $\rho_i$ を水槽水との密度差 $\Delta\rho$ で、船速 $V_s$ はフルード数にならって $g^{1/2}L_{pp}^{1/2}$ で、氷厚 $h_i$ は $L_{pp}$ で割って無次元化し、それぞれの無次元数の乗数について考察した。氷片と水槽水の密度差の干渉頻度への影響を線形的であると仮定した。また模型実験結果から干渉頻度は船速に比例し、かつ氷厚のほぼ2乗に比例することがわかる。これから、パラメーター $\pi$ は次式のように表すことができる。

$$\pi = \left(\frac{\rho_i}{\Delta\rho}\right)^1 \cdot \left(\frac{V_s}{\sqrt{gL_{pp}}}\right)^1 \cdot \left(\frac{h_i}{L_{pp}}\right)^2 = \frac{\rho_i V_s h_i^2}{\Delta\rho L_{pp}^{5/2} g^{1/2}}$$

この $\pi$ 数を用いて模型と実船の干渉頻度を整理した結果を図3-5-9に示す。実船と模型船で干渉のカウント方法が異なるものの、両者の結果はこの $\pi$ 数を用いることによって良くまとまり、線形的な関係を満足することがわかる。

#### 3.5.4.2 トルクの変動成分

干渉実験と同じ「てしお」模型プロペラをプロペラ単独

表3-5-3 模型実験の条件

Exp. No.	Ship Speed (m/s)	Pprop. Rev. (rps)	Blade Angle (deg)	Ice Thick. (mm)
204	0.312	8.98	22.26	27.4
210	0.156	14.03	22.26	48.8
213	0.779	12.03	22.26	26.6
216	0.312	16.50	22.26	49.4

Model Scale=1/10.889

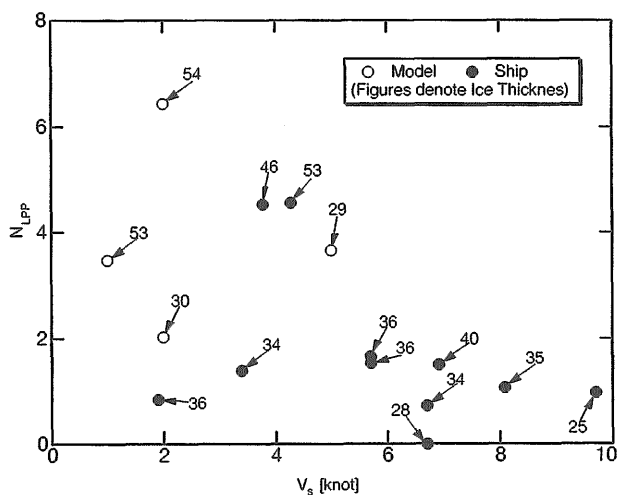


図3-5-8 模型と実船の干渉頻度

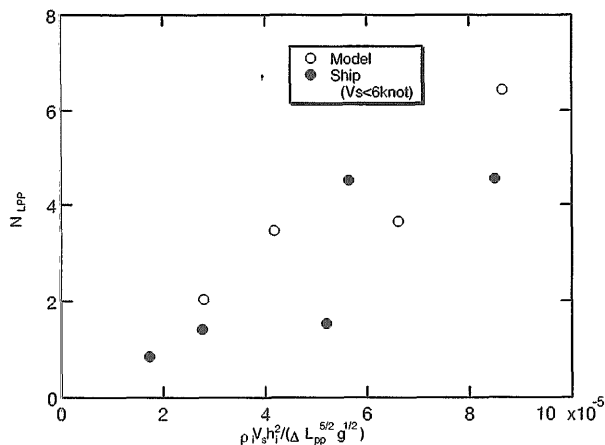


図3-5-9  $\pi$ 数による干渉頻度の比較

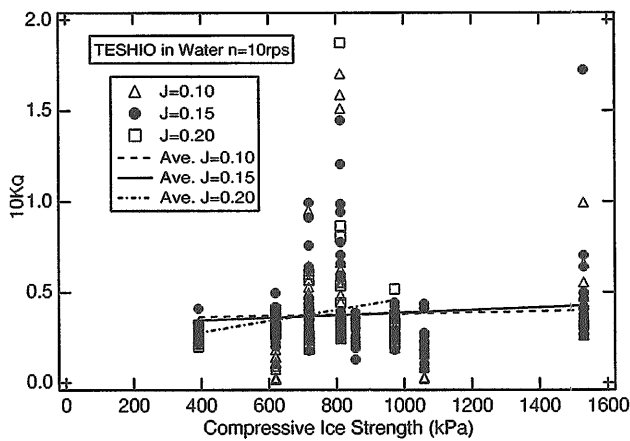


図3-5-10 氷圧縮強度によるトルク変動成分の変化

試験用動力計に取り付け、ここに模型氷を流し込んで、氷片干渉によるトルクの変動成分を計測した。プロペラ回転数は10rps、翼角は22.26°で、模型氷の寸法は厚さ1.5cm、縦横10cmの正方形とした。氷片の強度やプロペラ流入速度の影響を調べるために、圧縮強度を変え、前進係数Jも0.1、0.15、0.2の3種類行った。氷片は1個ずつ流し込み、これがプロペラに接触した瞬間のトルクの上昇分を計測、記録した。

図3-5-10は、その結果で、横軸は氷の圧縮強度、縦軸は上昇分を無次元化した。J=0.1~0.2付近でのプロペラ単独特性では、10KQは0.28程度であることから、変動成分はその倍以上と、実船と同様かなり大きいことがわかる。また、右上がりの平均値から、ばらつきは大きいものの氷強度が増すと変動成分も大きくなる傾向が見られる。

一方縦軸をK<sub>Q</sub>としたために、前進係数が大きくなるとK<sub>Q</sub>は小さくなるが、トルクの絶対値としては大きくなっている。干渉過程を幾何学的に考えれば、前進係数の上昇はプロペラ回転数上昇と同様の効果があり、このときにトルク変動成分が上昇するのは実船実験結果とも矛盾しない。トルク上昇分の絶対値の実船-模型比較方法は、今後の重要課題である [31]。

### 3.5.5 結言

本論文は、砕氷型巡視船「てしお」の実船試験により得ることのできた、ノズルプロペラと氷との干渉データの概要を示すとともに、その結果について模型試験からのデータも加え、考察した。得られた結論は以下の通りである。

- (1)歪ゲージをプロペラ軸に直接貼り付ける方法により、プロペラと氷との干渉による軸馬力の変動成分を計測することができた。
- (2)氷との干渉による軸馬力の変動成分は、最大で定常成分と同程度の大きさを持ち、干渉の頻度は軸馬力に対して比例の関係が認められる。
- (3)干渉の頻度に関する実船-模型実験との比較では、氷厚が大きいほど干渉頻度が高くなるという同一の傾向が確

認できた。相関パラメータを用いて干渉頻度を整理した結果、模型-実船結果が線形的な関係を満足することを示した。

- (4)トルク変動成分の模型実験では、氷強度、前進係数で実船と同様の傾向は見られたものの、絶対値の比較は今後の課題である。

## 4. むすび

船舶技術研究所の氷海船舶の性能の研究は、氷海船舶試験水槽における模型試験をベースに進められている。模型試験の技術は言うまでもなく実船への応用があって初めて活かされるものである。その意味から模型試験の結果と実船試験の結果の対応が満足のいくものであることは重要である。しかしながら、氷海域に恵まれないわが国にあっては、実氷海域における実船の性能データがわれわれ研究者の手元へ提供される機会は極めて少ない。今回、著者らが実氷海域における実船試験に参画できたことは極めて有意義なことであった。本文中に見るとおり、模型試験からの推定値と実船試験結果の対応を定量的に把握できたことは大きな成果と考えている。

勿論、模型・実船対応がこれで十分と言うことでは決していない。本文中随所に見られる通り、様々の問題点が浮かび上がって来、あるものは解決され、あるものは課題として残された。この前進が本研究の成果と考える。

具体例をあげるならば、水中推進性能試験法の枠組みが確立された事は重要な成果である。この試験法では、荷重量変更試験を採用する。これにより良質の自航要素値が得られる。この試験は氷中のみならず、平水中（氷の無い状態）においても行う。両試験の比較から推進効率の成分の中のアイス影響係数の値を決定する。これにより、合理的に水中推進効率表示式が求められる。アイス影響係数の内容については、氷とプロペラの干渉の研究を展開し理解を深めたが、実船馬力推定に活かすには更に研究が必要である。また氷中抵抗特性に関しては、基礎的な検討を行ったが、推進性能解析法の中に活かすまでには至らなかった。これも残された課題である。

また、実海域氷況データ等実船試験データを中心として得られた資料は砕氷型巡視船の氷海中運航に供する重要な基礎資料となった。これらは研究論文の形に表れない部分が多いが、重要な成果である。

本文中でも述べたように、このような研究は我々船舶技術研究所の研究者のみで遂行することは不可能である。共同研究者として御協力頂いた海上保安庁、日本鋼管（株）の関係各位に厚く御礼申し上げます。また、本研究のスタートにあたり御尽力下さった船舶技術研究所北川弘光元所長、上田隆康元部長、野村雅宣前部長に深く感謝致します。

参考文献 (本研究の成果発表論文)

- [1] 下田春人他「巡視船「そうや」によるオホーツク海航行実験 (第2報)」第62回船研研究発表会、1993.11
- [2] 下田春人他「巡視船「そうや」によるオホーツク海流水観測」第9回寒地技術シンポジウム、1993.12
- [3] 小山鴻一他「単純船首模型を用いた実験による砕氷抵抗に関する考察」第64回船研研究発表会、1994.12
- [4] 宇都正太郎他「巡視船「そうや」によるオホーツク海航行実験 (第3報)」第64回船研研究発表会、1994.12
- [5] 小山鴻一他「小型砕氷巡視船の模型実験—水中推進性能について」第66回船研研究発表会、1995.11
- [6] 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水況について—氷厚分布の計測—」第11回北方圏国際シンポジウム「オホーツク海&流水」、1996.2
- [7] 宇都正太郎「巡視船「てしお」によるオホーツク海水況観測結果について」オホーツク海水ワークショップ、1996.05.14
- [8] 下田春人他「巡視船による1996年2月のオホーツク海水況観測結果について」第19回極域気水圏シンポジウム、1996.07.11
- [9] 岸進他「砕氷型巡視船「てしお」の水中航行性能について (その1) 水中推進性能に関する実船実験と模型実験結果の比較」日本造船学会論文集1996.11.
- [10] 田村兼吉他「砕氷型巡視船「てしお」の水中航行性能について (その2) プロペラと氷の干渉に関する実船実験」日本造船学会論文集1996.11.
- [11] 小山鴻一他「砕氷型巡視船「てしお」の氷海域実船試験その1概要」第68回船研研究発表会、1996.12
- [12] 宇都正太郎他「砕氷型巡視船「てしお」の氷海域実船試験その2水中航行性能」第68回船研研究発表会、1996.12
- [13] 田村兼吉他「砕氷型巡視船「てしお」の氷海域実船試験その3プロペラと氷の干渉」第68回船研研究発表会、1996.12
- [14] 下田春人他「砕氷型巡視船「てしお」の氷海域実船試験その4実験海域の水況について」第68回船研研究発表会、1996.12
- [15] Koichi Koyama, Shotaro Uto, and Mitsuo Yoshida, "Ice Effect Factor of Propulsive Performance of a Ship in Ice - Covered Waters," The 12th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, 2 - 5 February 1997, Mombetsu, Hokkaido, Japan
- [16] S. Uto, H. Shimoda, and K. Izumiya, "Model - Ship Comparison of Propulsive Performance of Icebreaker

"PMTESHIO" in Continuous Ice breaking Mode," OMAE/POAC April 1997, Yokohama

- [17] H. Shimoda, S. Uto, M. Yoshida, and K. Koyama, "Measurement of Sea Ice Conditions and Manoeuvrability of Icebreaker "PLHSOYA" at the Sea of Okhotsk," OMAE/POAC April 1997, Yokohama
- [18] 海上保安庁装備技術部：平成5年度開発技報、1994
- [19] 海上保安庁装備技術部：平成6年度開発技報、1995
- [20] 海上保安庁装備技術部船舶課、氷海中実船試験結果報告書 (速報)、1996.3.25
- [21] 海上保安庁装備技術部：平成7年度開発技報、1996.10

参考文献 (本文中で参照した論文)

- [22] 小山鴻一他「船舶の水中性能について (第7報) —抵抗成分の解析—」第54回船研研究発表会、1989.11.
- [23] 野沢和男「砕氷工学」船舶技術協会
- [24] Wadhams P. et. al. : "An Analysis of Ice Profiles Obtained by Submarine Sonar in the Beaufort Sea". J. of Glaciology, Vol.25, No.93 (1980)
- [25] Prinsenberg S. J. et. al. : "Using Air - borne Electromagnetic Ice Thickness Sensor to validate Remotely Sensed Marginal Ice Zone Properties", POAC93 (1993)
- [26] Wakabayashi H. : "Sea Ice Observation Using SAR Data in the Okhotsk Sea", 第10回オホーツクシンポジウム (1995)
- [27] 気象庁：海水観測資料第9～12号 (1991～1994)
- [28] 小野：レーダーブイによる流水の動きの観測、低温科学 物理編第35号 (1977)
- [29] Toshio Suzukiet. al. , "Thrust Measurement Technique in Sea Trial Conditions : Assessment and New Development", PRADS90, (1990), pp.403 - 418.
- [30] Jones S. J. et. al. "The Effect of Density on the Trajectory of Ice Pieces around a Ship's Hull", Proceedings of IAHR Ice Symposium (1990), pp.661 - 673.
- [31] 田村兼吉他「氷片とプロペラの干渉に関する模型実験第2報」第68回船研研究発表会講演集1996.12.