

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]。水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]。

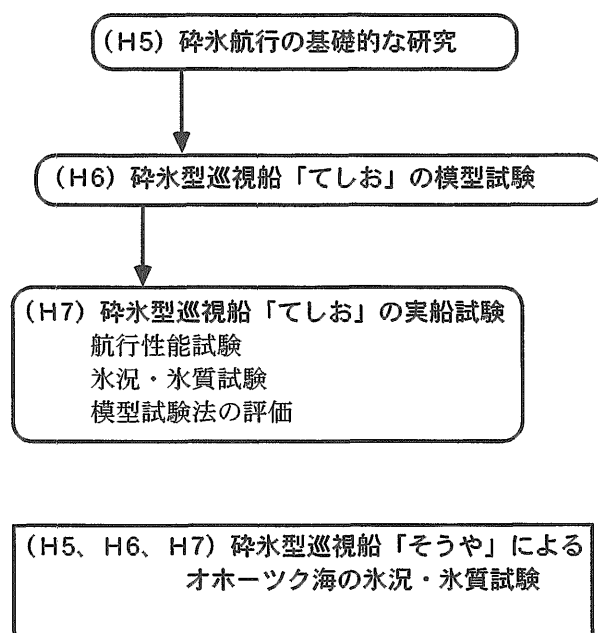


図-1-1 研究経過

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。

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

R_T : 全抵抗

R_B : 氷片を破壊することによる抵抗成分

R_V : 氷片を運動させることによる抵抗成分

R_S : 氷片の浮力による抵抗成分

R_M : 船体運動による抵抗成分

R_W : 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_M 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_x 、垂直方向力 F_v とすると、抵抗の平均値 R_m は

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

ここに

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

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

で、 ϵ は氷板破壊（氷片運動）エネルギーである。 F_{v1} 、 δ_1 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_p と抵抗の平均値 R_m は

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

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

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_N 、接線方向成分（氷片の流れる方向）を F_T 、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_x （その単位ベクトル i ）と垂直上方向成分 F_v （その単位ベクトル k ）は

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

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

μ を摩擦係数とすると

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

ここで F_x は船体抵抗となり、一方 F_v は氷板を破壊（運動）させる力となる。

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

ここで

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

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

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

として（ α は船首角）

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

2.1.1.2 氷板を破壊することによる抵抗成分 R_B

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_{v1} の場合

最大曲げ応力 σ 、最大撓み δ_1 、弾性係数 E 、氷厚 h 、氷幅 B として

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

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

2.1.1.2.2 弾性床上的片持ち梁（長さ L ）の集中荷重 F_{v1} の場合

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

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

ここに

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

ρ_w : 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_S

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_S、1つは、氷片の運動エネルギーに対応する抵抗成分R_Vである。まずR_S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_i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)

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

この力により船体が受ける垂直方向力F_V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_V

氷片の運動エネルギーに基づく抵抗成分R_V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_V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_a、I_a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_V = C · F_V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δ₁ = L · sin αとすると

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

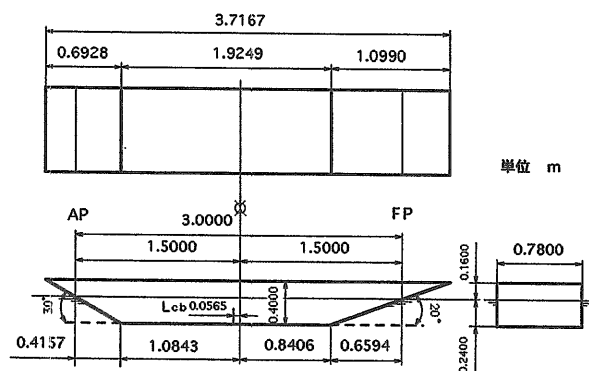


図2-1-1 単純船首模型

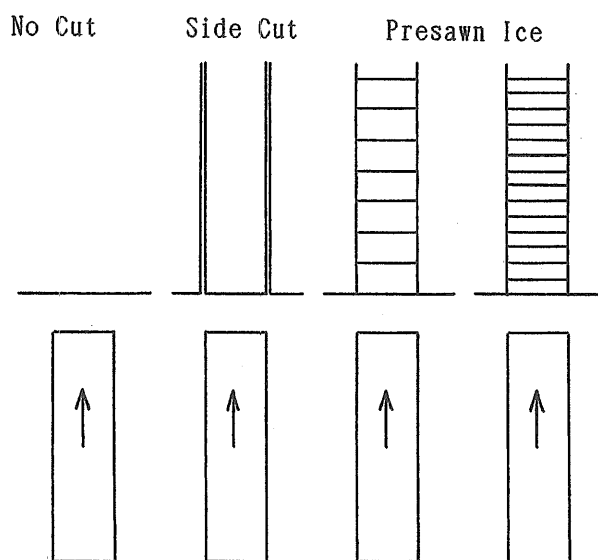


図2-1-2 氷板

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_f = 50kPa、弾性係数E_f = 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、

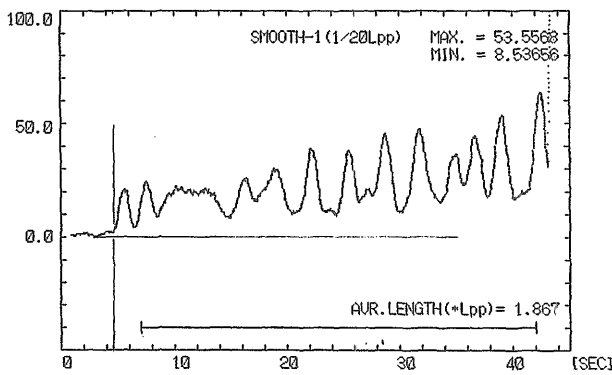


図2-1-3 (a) 抵抗

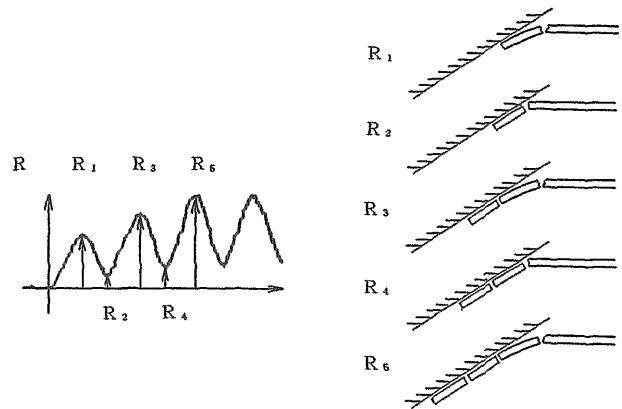


図2-1-4 抵抗計測波形と砕氷現象の対応

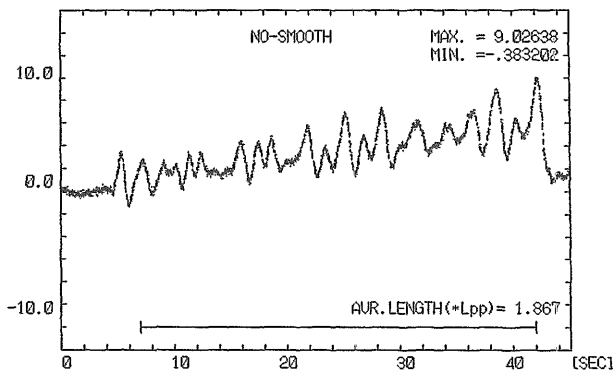


図2-1-3 (b) 浮心位置のヒーヴ

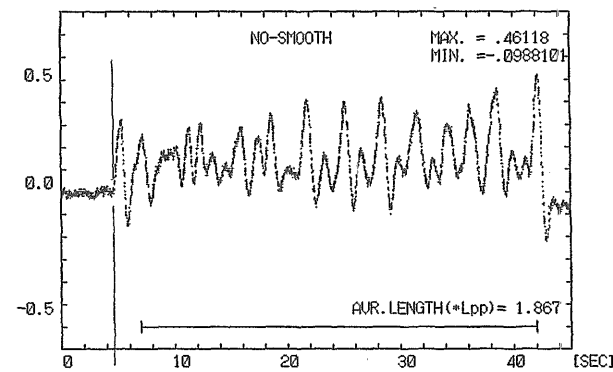


図2-1-3 (c) ピッチ

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

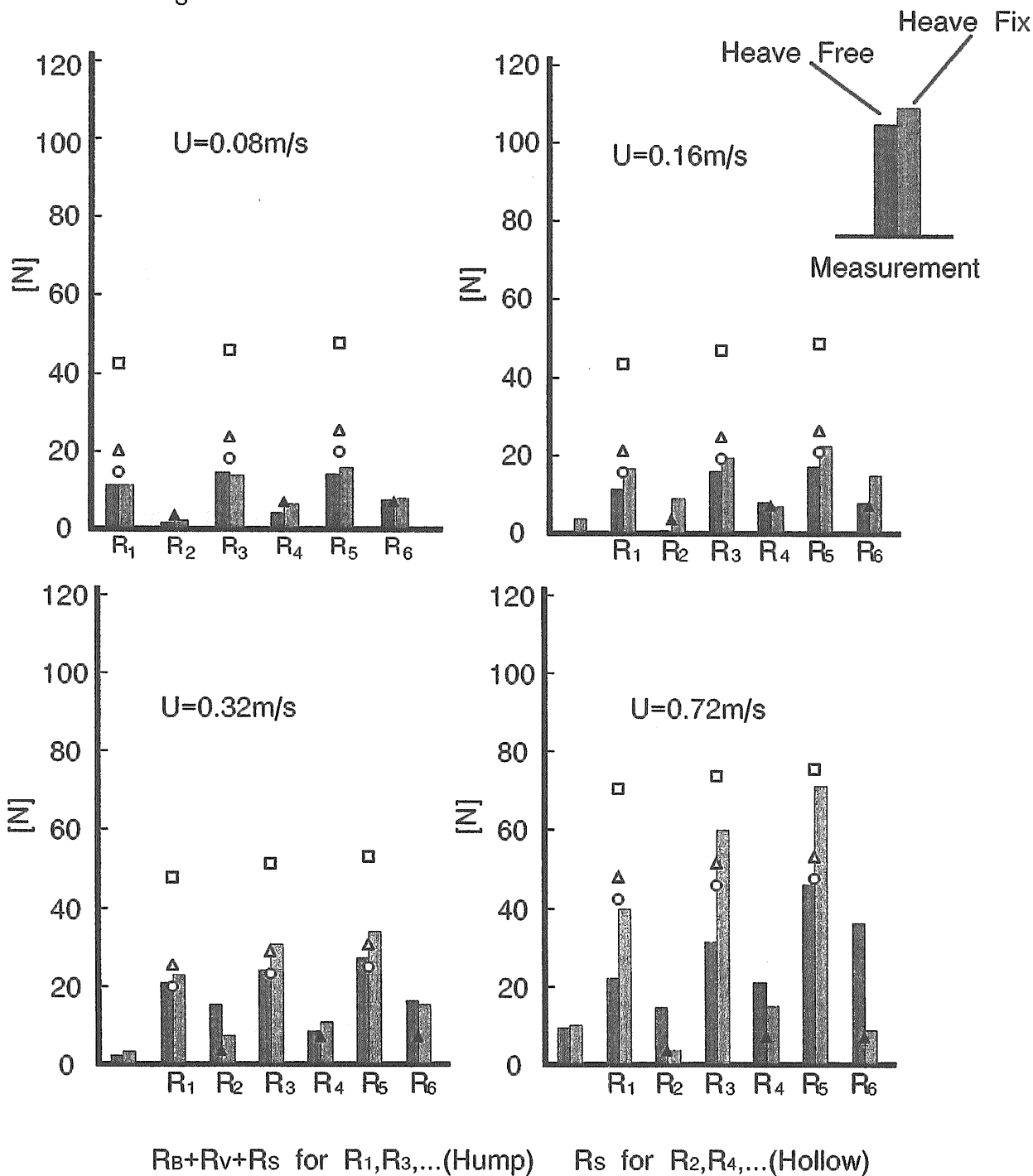
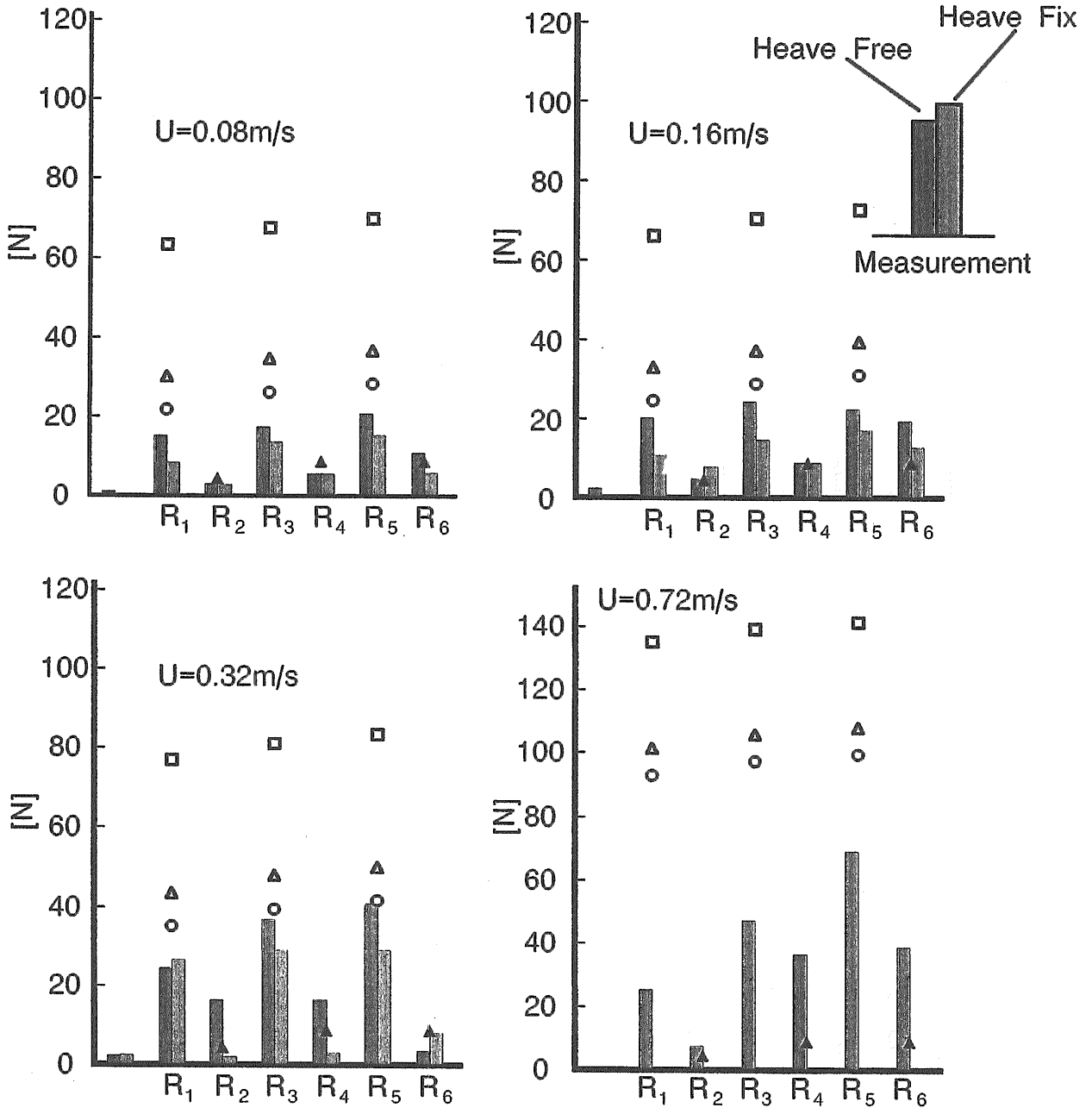


図2-15 抵抗瞬間値の計測値と推定値 ($\alpha = 20^\circ$ 模型、Side Cut Ice)

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



$R_B+R_V+R_S$ for R_1, R_3, \dots (Hump) R_s for R_2, R_4, \dots (Hollow)

図2-1-6 抵抗瞬間値の計測値と推定値 ($\alpha = 30^\circ$ 模型、Side Cut Ice)

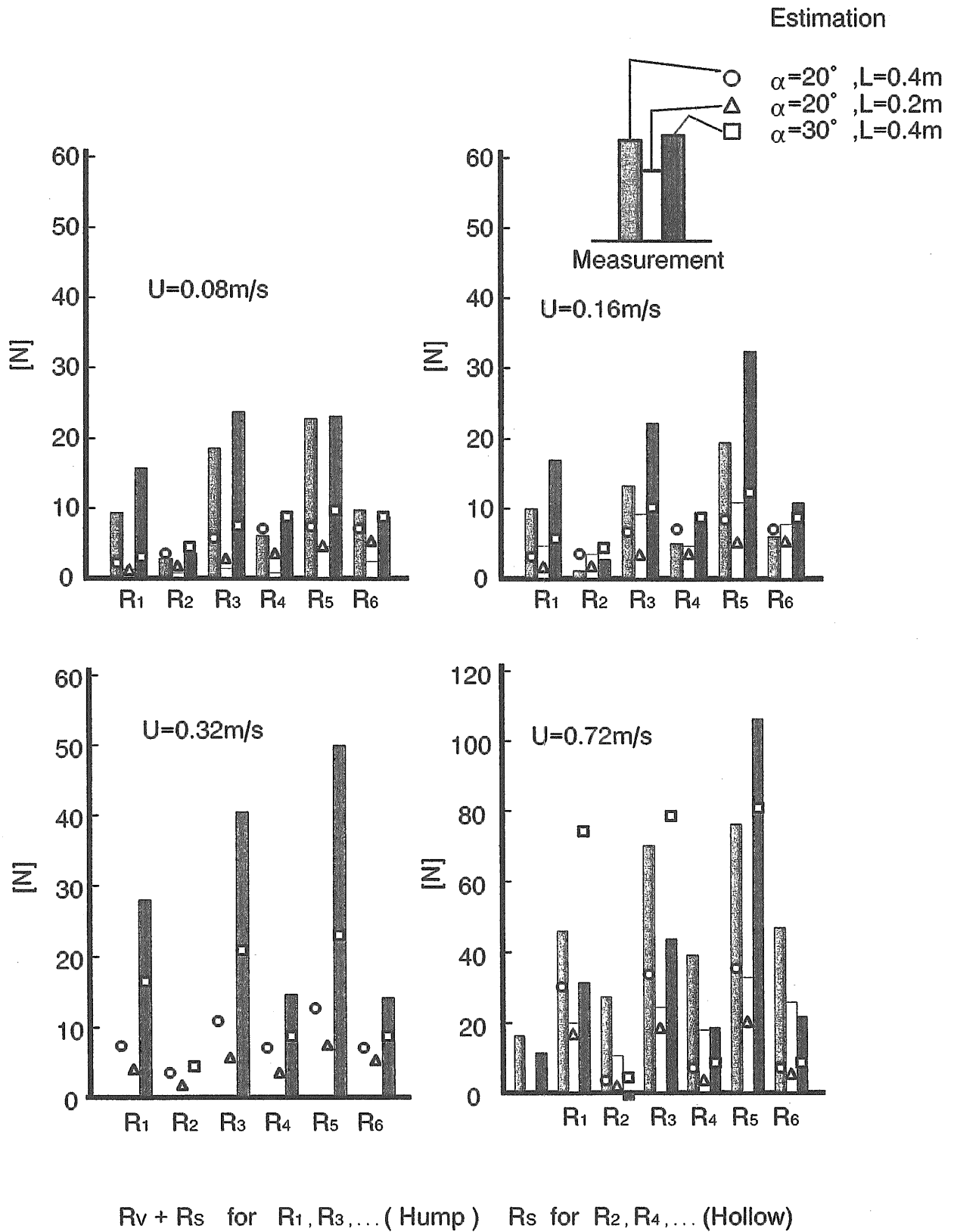


図2-1-7 抵抗瞬間値の計測値と推定値 (Presawn Ice)

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° 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 α 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。

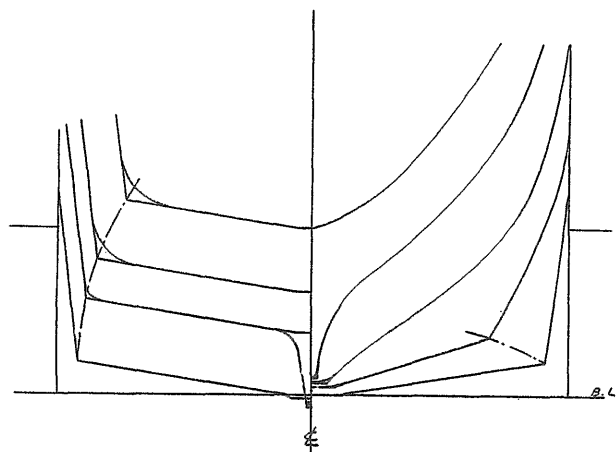


図2-2-1 BodyPlan

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