

5. 試験法と計測技術の研究

黒部 雄三

Development of Instrumentation and Measurement in Experimental Tanks

By

Yuzo KUROBE

Abstract

This paper describes our recent activities on instrumentation and measurement techniques during past ten years. In these days, measurement techniques have been rapidly developed and promoted by the progress in electronics, laser optics, image processor, microcomputer and others.

First of all, this paper reviews our development of measurement techniques in towing tanks; propeller load varying test on conventional ships, resistance and propulsion test for high-speed vessels in still water and in waves and test for contrarotating propellers.

About ten years ago Laser Doppler Velocimeter (LDV) was introduced and some efforts have been made for the development of LDV measurement techniques. The second part of this paper presents a few examples of LDV measurements.

Finally, recent developments are described on instrumentation and measurement in the SRI propeller and cavitation research; pressure measurement on model and full scale propellers, cavity shape measurement on a rotating propeller blades, hydrodynamic characteristics of a propeller in transient condition.

1 序

試験水槽の目的の1つは船体やプロペラの性能を模型試験から推定したり、性能を向上させる為の実験的研究を行うことである。近年、数値流体力学(CFD)の発展はめざましいが、まだ色々な面で発展の必要があり、実験的方法を用いて船体やプロペラに関する種々の問題を解決する必要がある。また、理論の有効性を確かめ、改良する為にも実験の役割は大きく、その基礎となる試験法および計測技術の果たす役割は大きい。

70年代後半から80年代にかけてマイクロエレクトロニクス応用技術の飛躍的な発展があり、推進性能部においてもセンサー、LDV、画像処理装置、データ処理装置等の道具を用い、計測装置を実験者が一から設計するのではなく、計測対象に適した計測システムを組めるようになった。そしてほとんどの実験の一次解析が現場で行われる様になった¹⁾。その結果、実験が省力化され、効率的になると共に、計測内容の高度化、多様化がはかられた。また、新しい対象も計測することが試みられた。

船型試験に関しては、荷重変更試験と高速艇試験に関連した計測技術の開発がある。高速艇では波浪中の性能も重要であり、それに関する計測システムも改良された。また、プロペラ面を含む船尾近傍の流場を詳細に把握することは推進性能の改善、プロペラ起振力の推定、プロペラ理論の改良等の上から求められており、流れを乱さないLDVによる計測が有力な手段となっている。この他、今まで技術上の困難さから見送られてきた計測対象の中で、プロペラ翼面圧力、プロペラ近傍の流速分布、プロペラ・キャビティ形状およびプロペラ過渡特性等の計測がなされた。それらについて述べる。

なお、本章は推進性能部内の下記の人の協力により執筆した。

まとめ：黒部 雄三

2章：上田 隆康、長谷川 純、堀 利文、

小久保芳男、竹子 春弥

3章：角川 明

4章：工藤 達郎

2 船型試験に関する試験法と計測技術の研究

2.1 荷重変更試験法

従来の模型船の自航試験は、実船の馬力推定を主眼とする為に、模型船そのものの自航特性や流体力学現象を調べることはあまり重要視されていなかった。1980年代前半にプロペラ荷重変更法による自航試験システムを開発し、模型船の自航性能評価法を開発した^{2)・3)}。

以下に、本試験法の概要と活用例について示す。

2.1.1 荷重変更試験法の概要

本試験法は、プロペラのスラスト T を $T=0$ から模型自航点となるまで広い範囲にわたって変化させ、自航特性、即ち船体、プロペラ及び舵相互間の干渉特性^{4)・5)}をプロペラ荷重度の関数としてとらえ、実験計測値を理論計算と対比させつつ自航特性を表現するものである。

回転数一定のプロペラによって速度 U_0 で進行する自航試験時の模型船を想定する。この時の模型船の全抵抗 R を、Fig.1に示すようにスラスト T と船体曳航力 R_M が0となるまで変化させる。

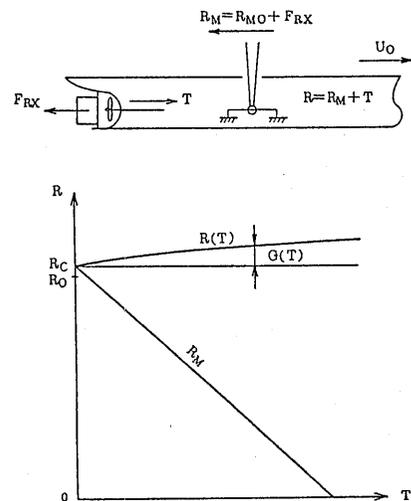


Fig.1 Propeller Load Varying Test

この時、荷重度変化の影響を受ける舵抗力の計測、プロペラによる造波抵抗等の変化を調べるための波形計測、荷重度変化による船尾流場の情報を得るための、船体表面圧力分布なども計測する⁶⁾。

本試験法を説明する為、舵無し状態の自航船を考える。舵無し状態の R_M を R_{M0} 、 $T=0$ における R_{M0} を R_C とすると、舵無し船のプロペラ作用による自航時全抵抗増加量 $G(T)$ と推力減少係数 t_T は次のように示される。

$$G(T) = R(T) - R(T=0) = R(T) - R_C \quad (1)$$

$$t_T = G(T)/T = (F_{PH} + F_{PW})/T \quad (2)$$

F_{PH} は船体とプロペラの干渉力、 F_{PW} はプロペラによる造波抵抗増加量であり、これらはプロペラの吸い込み強さ Γ_0 を用いて次のように示される。

$$F_{PH} = \rho \cdot B_0 \cdot \Gamma_0, \quad F_{PW} = \rho \cdot D_0 \cdot \Gamma_0^2 \quad (3)$$

B_0 、 D_0 はともに比例係数であり、 Γ_0 は、

$$\bar{\Gamma}_0 = \Gamma_0 / U_0 = -\bar{U}_{a0} + \sqrt{U_{a0}^2 + C_T}$$

$$\bar{U}_{a0} = U_{a0} / U_0, \quad C_T = T / (1/2 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_0^2) \quad (4)$$

で表わされる。 ρ は水の密度、 U_{a0} は、 $T=0$ におけるプロペラ面の平均流速、 A_p はプロペラ全円面積である。(4)式は、プロペラを半無限渦円筒でモデル化した運動量方程式から導かれる。(1)式の R_C と舵無し船の曳航抵抗 R_0 とは、

$$R_C = R_0 + \Delta R_C \quad (5)$$

であり、 $T=0$ においてもプロペラは不均一流とピッチ分布との関係において ΔR_C の作用がある。

舵無し船の有効伴流係数 w_E は、 U_E を舵無し状態の有効速度とすると、

$$(1-w_E) = (1-w_N) + \bar{C}_0 \cdot \bar{\Gamma}_0, \quad (1-w_E) = U_E / U_0 \quad (6)$$

$\bar{C}_0 \cdot \bar{\Gamma}_0$ は、船尾境界層に与えるプロペラ作用の影響を示す項である。

次に舵付き船について考える⁷⁾。舵抗力を F_{RX} とすると、舵付き自航船(Fig.1)では

$$R(T) = R_M(T) + T = R_{M0}(T) + F_{RX}(T) + T \quad (7)$$

の状態である。上式において $F_{RX}(T=0) = F_{RX}(0)$ と示すと、 $G(T)$ と t_T は、

$$G(T) = R(T) - R(T=0) = R(T) - R_C - F_{RX}(0)$$

$$= F_{PH} + F_{PW} + F_{RH} + F_{PR}$$

$$t_T = G(T)/T \quad (8)$$

F_{RH} と F_{PR} はそれぞれ舵と船体、舵とプロペラの干渉力であり、次のように示す。

$$F_{RH} = \rho \cdot E_0 \cdot \Gamma_0, \quad F_{PR} = F_{RX}(T) - F_{RX}(0) \quad (9)$$

F_{PR} は別途プロペラと舵の相互干渉問題を解くことにより得られる。有効伴流係数に対する舵影響は、係数 ϵ 、 \bar{F}_0 を使って次式で修正を行う。

$$1 - W'_E = 1 - W_E + \Delta V_A / U_0$$

$$\Delta V_A / U_0 = \epsilon \cdot \bar{U}_{a0} \cdot \bar{F}_0 \quad (10)$$

以上が荷重度変更試験法の概略であり、これをFig.2に示すような一つのシステムとして取り扱っている。本図は、プロペラ荷重度変更試験法の主流およびその構成要素を示すほか、関連した情報を得るための計測項目も点線で囲って併せて示した。

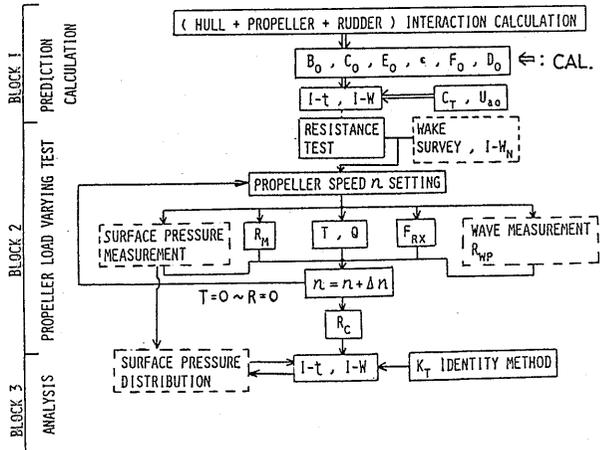


Fig.2 System of Propeller Load Varying Test

2. 1. 2 プロペラ荷重度変更試験法の活用例

(1) 平水中自航試験における自航特性を、プロペラ荷重度ベースに、精密に分析する場合に、本試験法の活用が適している。また、自航要素の実験値を、本試験法システムに含まれる計算プログラムによる予測値と比較検討することも可能である。

船体とプロペラの干渉力を表わす場合に用いる係数 B_0 は、船尾形状と推力減少係数を関係づけているので、この B_0 によって船尾形状の評価、つまり、船尾形状の改良を可能とする⁹⁾。

また、プロペラ荷重度変更試験法を回流水槽に導入することによって、小型模型船による自航試験を可能にした。回流水槽における流れには、わずかながら不均一性、勾配などがあり、この流れの中で小型模型船をプロペラの回転制御によって定速度自航状態を精密に実現することは困難である。本試験法は、模型船を Fig.1に示す様に検力計で固定しているので、上記の精密な制御は不要であるため、試験の実施が容易となり、しかも、本システムの解析を行えば信頼すべき自航要素が得られる。

(2) プロペラ荷重度の変化する航行状態、即ち、波浪中抵抗増加、船体表面の抵抗変化（汚損による抵抗増加、特殊処理による抵抗減少）、曳航・曳網抵抗増加、補助推進装置によるスラスト変化（機帆船、空中プロペラ船など）などが起きる航行性能を模型試験によって求める場合に、本試験法の採用が適している。例えば、 $C_B=0.82$ のバルクキャリアの $L=4.5m$ 模型船の波浪中荷重度変更試験²⁾の一例をFig.3,4に示す。Fig.3のR-T線図では、波長・船長比 $\lambda/L=1.0$ 、波高6cmの波浪中における抵抗増加量 R_{WA} をスラスト変化の関係で示している。図中の T_A は波浪のためのスラスト増加量である。

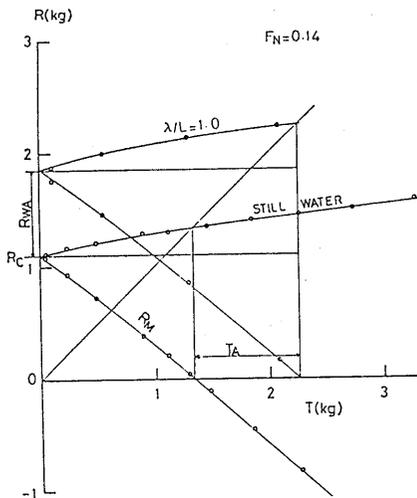


Fig.3 R-T diagrams

Fig.4では、同船の自航特性すなわち推力減少係数 t 、伴流係数 w 、プロペラ単独効率 η_0 の波浪中における λ/L に対する変化を示している。

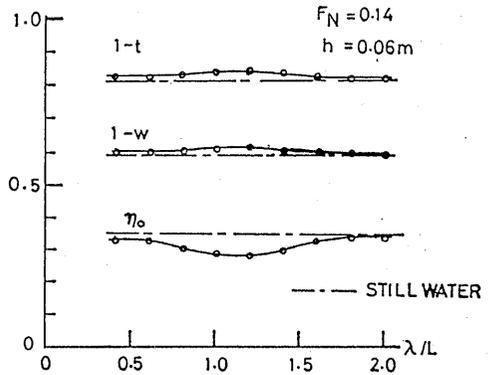


Fig.4 Estimated Self-Propulsion Factors from Propeller Load Varying Test

2. 2 高速艇試験技術

2. 2. 1 研究の流れ

1985年より「高速艇に関する研究」が実施されるに先だって高速時の計測技術に関して様々な角度から検討を加えた。当時の推進性能部には、大型から小型の模型船に対応できる計測機器が存在していたが、それらのいずれもが低速の排水量型船舶を対象としていた為、小型で高速の滑走型船舶に使用するには重量及び計測容量などで適当な機器がほとんどなかった。結局計測機器について問題を抱えながら研究を開始し、自航モーターと自航動力計の整備を急ぐこととなった。

1987年より「外洋高速船舶に関する研究」が計画され、海上保安庁との共同研究で巡視艇の推進性能の調査が開始された。この研究により実艇と模型との相関をとる機会を得、模型試験の有用性が確認された⁹⁾。また解析方法については従来の方法が有効ではあるものの、より精度を高めるためには航走中の浸水表面積を知る必要があるなどの知見が得られた。

高速艇の研究では、当初より平水中だけでなく波浪中での推進性能の調査の重要性が指摘され、数隻の模型について規則波及び不規則波中を高速で曳航し、応答特性や抵抗増加について調査された¹⁰⁾。この経験をもとに1988年より「高速船の波浪中性能に関する研究」で滑走型及び排水量型船舶について高速時の波浪中試験を積極的に行うことにした。この研究は現在進行中である。

2. 2. 2 研究施設の更新及び計測機器の整備

施設の更新としては400m水槽の曳引車の高速制御が改良された。曳引車の発進および停止時の加速度の設定が時間軸に対し、矩形状でなく、台形状に行えるようになり、高速時の計測の安定性が増した。

計測機器に関しては高速の滑走型船舶は低速の排水量型船舶と比較して船長が同じでも排水量が少ない（つまりバランスウエイトが少ない）、計測容量が大きい等の顕著な違いがある。これらを考慮して、現在までに以下のような計器を導入した。

「小型軽量自航動力計」

日章電機製、自重約5Kg、スラスト25Kg、トルク1Kg・m

「2.2KWモーター」

大洋電機製、自重約30Kg、デジタル制御、250%過負荷可能

「高速艇用抵抗計測装置」

電子工業製、支柱上下移動速度40mm/秒、許容水平荷重100Kg

2. 2. 3 相似模型による抵抗試験

当所の三鷹第2船舶試験水槽（400m 水槽）ではその大きさを生かし、他の水槽と比較すると比較的大型の模型での各種の高速艇試験が行われている。その内の1つとして半滑走艇の相似模型による水槽試験を行った⁹⁾が、この試験を一例として高速艇試験における計測技術について述べる。

長さが30mの半滑走艇の縮尺模型である4mの大型模型とその半分の長さの小型模型の2隻について抵抗試験を行った。実艇まわりの流れは乱流であると思われるが、模型船の場合も乱流になっているかを

確認する必要がある。層流の時はスタッド等による乱流促進が必要となる。この実験ではスタッドは付けていない。次に曳航点であるが、滑走艇では全抵抗はトリム角に大きく依存する性質がある¹¹⁾ので、抵抗の計測ではプロペラのシャフト線上に曳航点をとって行うことが望ましい¹²⁾。しかし、高速艇では一般商船の場合と比較して航走時の姿勢変化が大きい¹³⁾、模型の航走時の姿勢変化に対応して曳航点を上下に移動させなければならない。本実験の場合は上下の移動量を予測して曳航点を移動したり（大型模型）、Fig.5に示す様に三分力計を利用して、それを航走中に上下させることにより調整した（小型模型）。

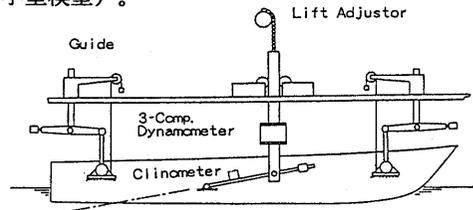


Fig.5 Testing Apparatus for Planing Boat

また、曳航するロッドに傾斜計をとりつけて、航走時に計測した模型の航走姿勢から求めたプロペラシャフトの傾斜とロッドの傾斜とを比較して確かめつつ試験を行った。その後上下動をより高速で正確に行える高速艇用抵抗計測装置を開発した。曳航ロッドのジンバル部に角度を検出する為のポテンショメータを取り付け、表示された角度を見ながら装置の支柱をリモートスイッチで昇降させて一定の角度を保持している。

抵抗試験時に計測した相似模型船の船体浮上量をFig.6に示す。

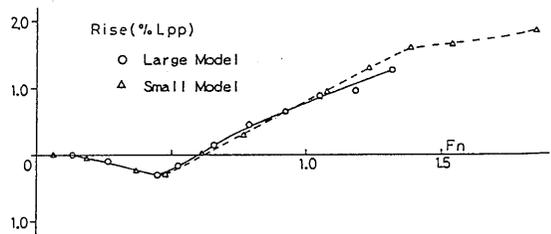


Fig.6 Comparison of Rise on Two Scale Models

大型模型では $F_n=1.0$ 付近から高速側でやや浮上量が小さくなっている。しかし、模型船がない時の曳引車の風圧の造波等による相対水位の変化を調べて図にあらわしてみると、2隻の模型船の航走姿勢が一致する傾向となる¹⁴⁾。大型模型に対する小型模型の全抵抗係数の比をFig.7に示す。検力計にかかる風圧抵抗の修正の必要なが分かる。

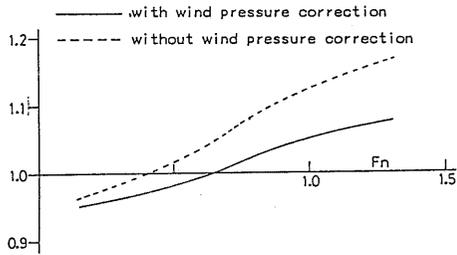


Fig.7 Ratio of Resistance Coefficient on Two Scale Models

馬力推定を行う際に重要な航走中の浸水表面積は、高速艇では航走中に姿勢が変化するため、大きく変化する。本実験では航走時の模型の姿勢から求めている。他の実験では、模型船を透明なエポキシ樹脂で作り、航走中の水線を船内側からカメラおよびビデオカメラで撮影して浸水表面積を求めた¹⁵⁾。この方法は正確ではあるが、常に用いることは困難なので、容易かつ精度のよい浸水表面積の計測法の開発が望まれる。

大型模型では自航試験も行っている。高速艇プロペラは一般に斜流状態で作動し、かつキャビテーションを発生していることが多いので、正確な馬力推定のためには斜流状態でのプロペラ・キャビテーション試験も必要となる¹⁵⁾。

2. 3 波浪中に関する模型試験

実海域を航行する船艇は広い範囲の荷重条件の中を航行しているが、その航行性能の推定およびそこで発生する諸問題を解決するためのデータを得ることが曳航水槽における波浪中試験の大きな目的である。高速船にプロペラの損傷事故例がいくつか報告されているがこれらの事故は力が突発的に翼に加わったためではなく、波動、船体運動、船尾伴流分布等

に基づく繰り返し荷重がプロペラ翼に加わり生じた疲労破壊と推定されている。従って波浪中における船体運動、伴流分布を計測しプロペラ翼に加わる負荷変動の推定をすることが重要となる。以前、推進性能部では自航試験に自航状態方式（大陸式）を用いてきていた。しかしながら、実際の船では時々刻々荷重条件が変化していることを考慮するとプロペラ荷重は変動しているものと考えられる。そこで推進性能部では変化している荷重にたいして対応できるようにプロペラ荷重変更法を開発し平水中に使用しているが、そのプロペラ荷重変更法をより広範囲に荷重度が変化する波浪中試験に応用した船型試験システムを開発し¹⁶⁾、三鷹第2船舶試験水槽で全長6mの中型模型船を用いて正面規則波中の自航試験で同システムの有効性を検証した。また、波浪中試験の基礎調査として各種条件下でのプロペラ単独試験および波浪中の抵抗試験、船尾伴流分布計測をも実施して自航試験結果との関係を調査した¹⁷⁾。

2. 3. 1 波浪中プロペラ単独試験

プロペラ特性の基本となる単独試験では平水中で回転数を一定に保ち、プロペラ前進速度を変化させてスリップ比が0~100%に対応した前進係数の範囲についてプロペラのスラストおよびトルクの計測を行い、特性曲線図を求めた。また、波浪中に対応する試験ではプロペラ単独試験動力計を平水中で前後に強制動揺しながらの単独試験、および正面規則波中で単独試験を行い、その時のスラストとトルクの時間的変動値を計測した。その結果、プロペラが前後に運動している場合および正面規則波中でもプロペラ特性の時間的平均値は平水中のプロペラ単独特性によって表現できることが分かった。また、時々刻々の値はプロペラおよびプロペラ軸の慣性量を修正すれば平水中特性曲線上を波浪の周期に対応して移動することが示された¹⁸⁾。

2. 3. 2 波浪中伴流計測

平水中の伴流分布は通常の計測ルーチンに組み込まれ実施されることが多いが、波浪中の伴流分布計測例は数少ない。プロペラは波浪による船体運動で

時々刻々変化する伴流中を回転しているの、プロペラ翼に加わる変動量を調べるため、5孔ピトー管で規則波中のプロペラ面船尾伴流を計測した¹⁹⁾。同様な計測系による圧力応答試験から利得および位相遅れは十分無視できることを確認したので、本計測系において、5孔ピトー管からの圧力信号の位相遅れ等はないと考えられる。データはピトー管各孔の圧力を最小自乗法とニュートン・ラプソン法により正弦波に近似し、その結果を用いて伴流分布を求めた。波浪中の時間的的平均値を平水中のパターンと比較しているが、大略はよく似た分布を示している。Fig.8 に船首が平水時の水線を切る角度を0度として1周期を12等分して伴流分布、すなわち速度Contour とプロペラ横断面内流速が時間経過によって変化する様子を示している。

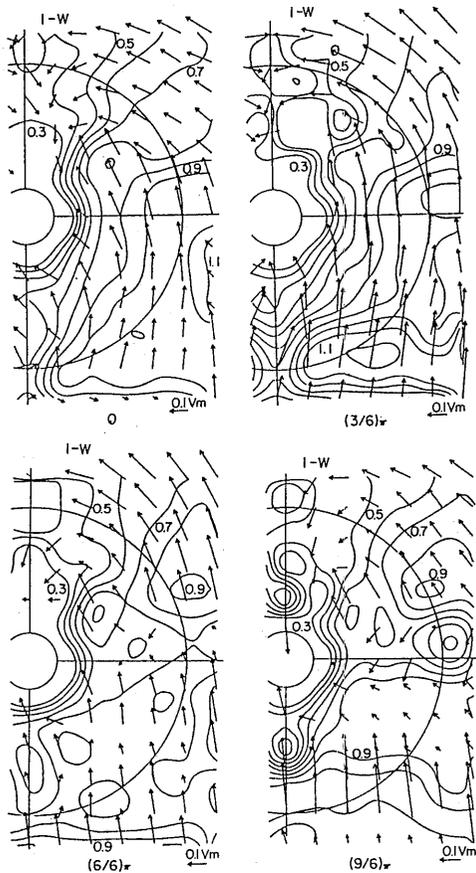


Fig.8 Velocity Distribution in Waves

このパターンをビデオに記録し、簡易アニメーションとしてビジュアル化の試みも行われた。

2. 3. 3 波浪中の抵抗およびプロペラ荷重度変更自航試験

正面規則波中においてFig.9 に示すカウンターウエイト方式で抵抗試験と荷重度変更自航試験を行った。平水中試験を波浪中での荷重度を含む範囲で行っておけば、Fig.10 に示す様に、規則波中のR-T曲線は平水中 R-T曲線にはほぼ平行になる。また、トルクおよびプロペラ回転数はスラストに対してはそれぞれ平水中と同じ曲線上に分布する²⁰⁾。このことは、波浪中抵抗増加が与えられれば平水中の自航特性から波浪中の自航特性が推定できることを示している。従来の方式では熟練が必要であったモーター回転数の推定と設定が、荷重度変更法では容易にできる。そのため、荷重度変更法は波浪中試験の効率化および精度向上に寄与している。

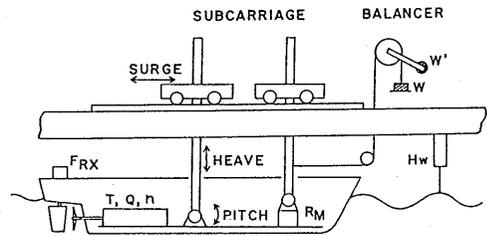


Fig.9 Testing Apparatus in Waves

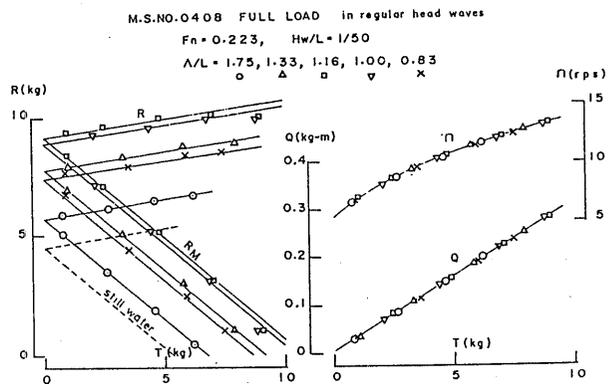


Fig.10 Results of the Propeller Load Varying Tests in Regular Head Waves

2. 4 二重反転プロペラ試験

二重反転プロペラに関しての研究・実験等は古くから行われているが、プロペラ軸系の反転機構等の問題もあり、実用化が遅れていた。しかし第二次オイルショックの後に、省エネルギー対策の一貫として再び研究開発が盛んになってきており、最近では二重反転プロペラを装備した実船も建造されつつある。

推進性能部においても、10数年前から二重反転プロペラの設計法の開発および実験を実施している^{21) 22), 23)}。

2. 4. 1 二重反転プロペラ動力計

第一世代の二重反転プロペラ動力計は電子工業製のもので、この動力計は、各軸共にスラストは20Kg、トルクは1Kg-mの容量を持っており、プロペラの単独性能試験も自航試験も同一の動力計で実験をおこなえる。しかしこの二重反転プロペラ動力計は、検出器の歪ゲージが老朽化したことやプロペラ軸径が大きく、各軸のアイドル量が不安定であるなどの理由で低回転時の試験結果の再現性に問題があった。

1987年に新しい二重反転プロペラ動力計を導入した。この二重反転プロペラ動力計(日章電機製)の容量は各軸共にスラストが10Kg、トルクが0.5Kg-mである。動力計の外観を Fig.11に示す。この新しい動力計も旧動力計と同じように自航試験およびプロペラ単独試験に使用されるものであるが、単独試験については、専用ボート(L=3.0m, B=0.4m)を使用している。

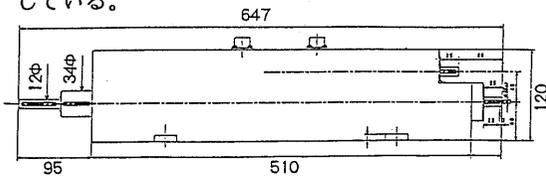


Fig.11 Dynamometer for Contra-Rotating Propeller

新しい二重反転プロペラ動力計を購入したのと同時に、新しく設計したスタンチューブを含むプロペラ軸系を二組作成した。一組は、単独試験用のボートに取り付けて、単独試験専用を使用するもので、

スタンチューブの長さが1.2mであり、他の一組は同長さが0.8mの自航試験専用に出てきている。これらのプロペラ軸系は旧動力計の時に使用されていたプロペラ軸系より、細くなっている重量的にも軽減されている。

しかし、動力計の容量が旧動力計に対して、1/2であるため、計測精度は向上したものの、単独試験は動力計を取り付けるボートの乾舷の影響等もあって、回転数によっては、前進係数 $J=0$ からスラスト係数 $Kt=0$ までの全ての範囲について実験を行うことは、困難である。自航試験に関しては、そのような問題は起こっていない。

2. 4. 2 計測例

模型実験の一例として、二重反転プロペラとして M.P.No.0258/0259(C.R.P) と通常型プロペラとして M.P.No.0145(C.P) を使用してコンテナ船型について行ったものがあげられる²⁴⁾。それらの実験の単独試験の結果を Fig.12に示す。これと自航試験の結果から、通常型プロペラに対して二重反転プロペラは、省エネルギー対策として有効なことが確かめられた。

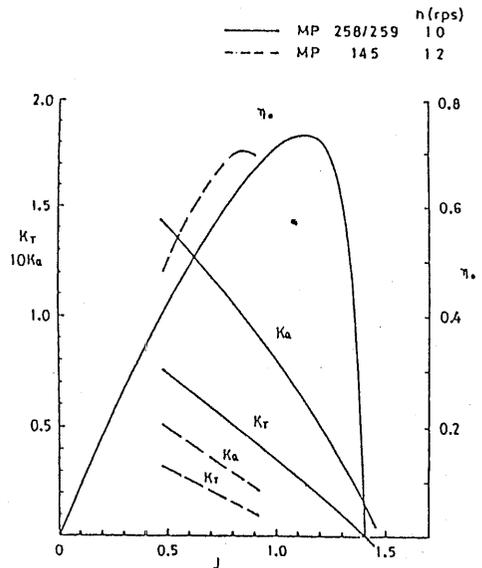


Fig.12 Open Water Characteristics of CRP and CP

今後、機器整備としてまず、単独試験専用の小型で計測容量が現在の約二倍程度の二重反転プロペラ動力計を準備する必要がある。それにより、レイノルズ数に影響されやすい二重反転プロペラのレイノルズ数に関する調査・研究等が行いやすくなる。さらには、前後プロペラの回転数比を或る範囲で自由に変化させることが可能なギャボックスを作成する必要がある。

それらの機器を整備する事に依って、二重反転プロペラ研究の一層の発展が可能となる。

3 レーザドップラ流速計(LDV)による計測技術の研究

3. 1. レーザドップラ流速計 (Laser Doppler Velocimeter : LDV)

3. 1. 1 LDVの一般原理

代表的なLDVの方式は、2本のレーザ光を交差させ、その交差点にレーザ光の波面が作る光の干渉縞を利用する「差動ビーム方式」と呼ばれるものである。

レーザ光は進行方向に垂直な波面を持つコヒーレント光である。2本のレーザ光の交差点には、光の交差角に応じた数の干渉縞（光の明暗）が作られる。その干渉縞の中を散乱粒子が通過するとき、レーザ光は粒子の速度に比例して周波数が変化した散乱光となる。その散乱光と元のレーザ光の周波数の差をドップラ周波数と呼ぶ。LDVはドップラ周波数を検出することにより流速を計測する装置である。

散乱粒子の速度に比例して周波数が変化した散乱光は、レーザ光の交差点（流速の計測点）から光電管 (Photo Multiplier) を通して、電気信号となる。その信号から様々な雑音を除去しドップラ周波数を求めることが、LDV信号処理である。LDV信号処理装置には、トラッキング回路によりドップラ周波数を求める周波数トラッカー、パルス波形に近似させて周期を求めるカウンタプロセッサおよび周波数スペクトラム解析からドップラ周波数を求める BSA (Burst Spectrum Analyzer) 等がある。

3. 1. 2 試験水槽計測器としてのLDVの特性

LDVを計測器として見る場合、その長所は、非接触であり流れを乱さないこと、そして短所は、取扱いおよび保守に関する負荷が非常に大きいことである。以下にLDVの得失を列記する。

[LDV計測法の長所]

- (1) 光を用いるため、非接触であり流れを乱さない。
- (2) 散乱光のドップラ周波数と流速の関係が、レンズと計測点の幾何学的な配置および光の波長によって決定される。

よって、較正係数は水槽環境の変化（温度、圧力、時間経過）に影響されない。

- (3) LDV センサーと計測点の距離は、レンズ系の交換により変更可能である。

ただし、受光量がレンズ直径の2乗に比例するため、計測点までの距離はLDVセンサー部の大きさによって制限される。

（現在の標準的なLDVは、レンズ直径100mm、焦点距離600mm）

[LDVの短所]

- (1) 計測に最適なシーディング（水中散乱粒子の散布）が必要である。
- (2) LDV光学系の調整が複雑かつ微妙である。
- (3) LDV光学系の光軸が長期間の計測（3週間以上）ではずれる場合が多く、調整を必要とする。
- (4) LDV水中センサー部の流場に与える影響を考慮する必要がある。（曳航水槽）
- (5) LDV水中プローブの防水および防湿の構造が必要である。（曳航水槽）
- (6) LDV光学系本体、信号処理装置など精密機器を水槽の環境（高湿度、振動等）から保護する必要がある。
- (7) レーザ光源用電力（8kVA）および冷却水（1000 Kcal/hour）の供給が必要である。

上記のような問題点を検討しつつ、推進性能部におけるLDV計測技術の実用化および計測法の研究を進めたが、水槽へのLDV導入に先だって検討されたものはほとんど無く、目前の問題に直面した後、対

応策を検討することとなった。

3. 2 キャビテーション水槽におけるプロペラまわりの流場計測

3. 2. 1 キャビテーション水槽へのLDV導入

1981年、1次元後方散乱方式 LDV(DISA 55X型)が導入され、ただちにキャビテーション水槽において計測法の開発と実用化の研究が開始された。Fig. 13にLDVシステムの概観を、Fig. 14に標準的な構成のキャビテーション水槽用LDVの概略図を示す。

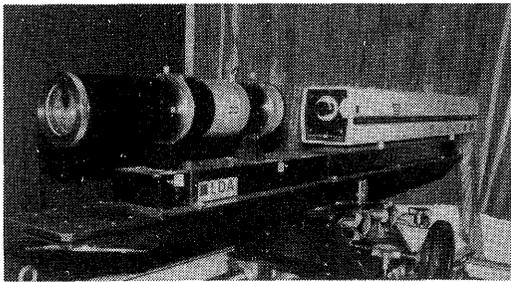


Fig.13 Laser Doppler Velocimeter

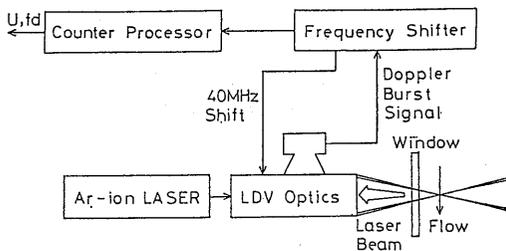


Fig.14 LDV System

LDVには、従来の流速計(ピトー管等)では計測不可能な流場、例えば作動中のプロペラ近傍の流れ等の計測、および流場中に速度センサーを設置しない精密な計測が期待され、速い時期に実用化が望まれた。

推進性能部におけるLDV実用化の研究の中から、2例について述べる。まず、均一流中のプロペラまわりの流場計測を実施した。Fig.15に流場計測例^{2,5)}

を示す。D、Rはそれぞれプロペラ直径および半径、x、rは軸方向および半径方向距離である。半径方向位置を縦軸に、軸方向位置と流速を横軸に取っている。○印がLDV計測値、実線が無限翼数プロペラ理論の計算値である。つづいて、模型船船尾(ダミーモデル)の伴流分布を計測した^{2,6)}。Fig.16にLDV計測結果をPitot管との比較として示す。全体の形状はPitot管と同様だが、細部はあまり一致していない。LDV導入直後でもあり、光学ノイズの除去が不十分なためと思われる。

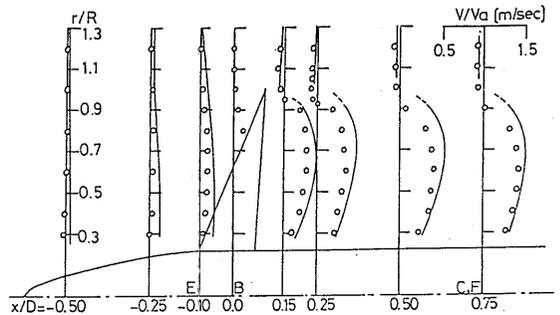


Fig.15 Axial Velocity Distributions induced by a Propeller

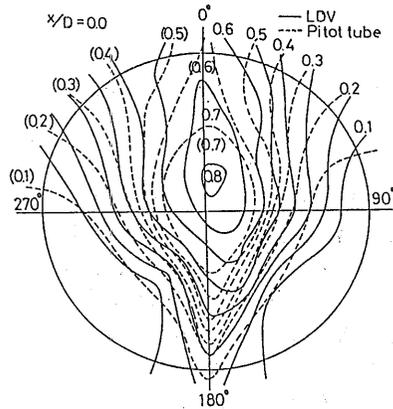


Fig.16 Wake Fraction Contours by LDV

これらによりキャビテーション水槽におけるLDV計測の実用化が進捗したが、早急に実用化を進めたため計測法の研究(LDVの限界、計測における問題点の摘出および散乱粒子の制御等)が後に残された。このことは、後に述べる曳航水槽へのLDV導入およ

びその後の研究に対し、影響を与えている。

3. 2. 2 プロペラまわりの流場計測

当初より、均一流中プロペラ単独流場構造の調査、
 解明が進められ、その研究により以下のような報告
 がなされた。1983年には、回転同期計測装置を開発
 し²⁷⁾、プロペラ翼位置に対応したプロペラ後流の
 流場を計測した²⁸⁾。LDV回転同期システムの概略図
 を Fig.17に示す。

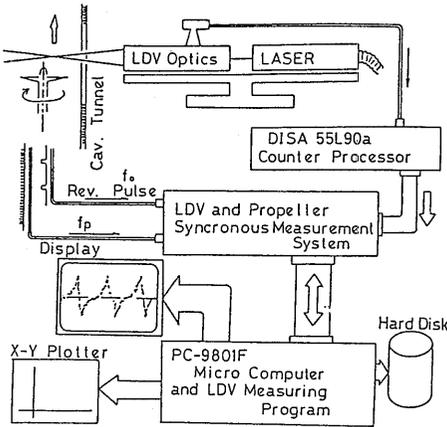


Fig.17 LDV Measuring System

同計測システムは、空間に固定した計測点における
 LDV による時系列データおよび、プロペラの翼位置
 データを同時に計測することにより、回転中のプロ
 ペラ翼位置に対応した流速分布を計測するシステム
 である。Fig.18 は解析前のLDV計測値をプロットし
 たもので、縦軸は半径方向流速成分 V_R を一様流速 V_v
 で無次元化した値、横軸は翼角位置である。翼端渦
 の通過した翼角位置で流れが反転している様子が明
 らかである。Fig.19は、プロペラ直後の流速分布を
 V_R-V_T のベクトル図により示したものである。3翼
 プロペラから発生した3本の翼端渦が、あたかも瞬
 間的に計測されたと同様な流場構造として明瞭に捉
 えられている。

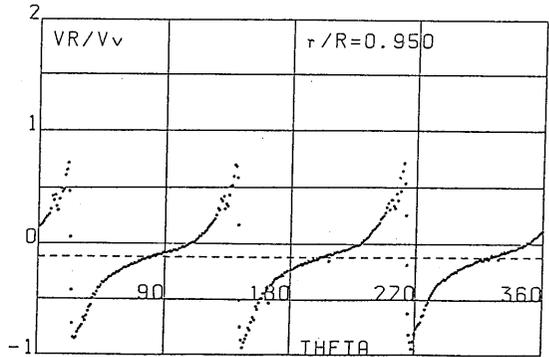


Fig.18 Typical Data of Radial Velocity induced by a Propeller

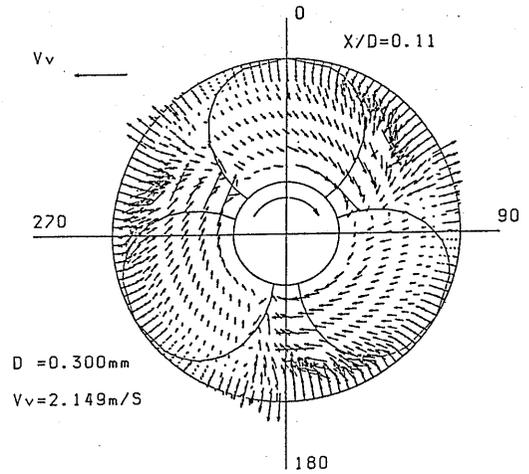


Fig.19 Velocity Vector Pattern

LDV によるプロペラ回転同期計測、および平均流
 分布から流場構造のデータを得て、プロペラ特性解
 析法の理論計算における推定値の精密化を進めた。
 Fig.20 (a)、(b)、(c)に3翼プロペラの軸方向の軸方
 向流速 V_x 、半径方向流速 V_R および円周方向流速 V_T の
 平均流速分布を示す²⁹⁾。縦軸に流速、横軸に半径位
 置を取っている。 $r/R=0.9$ 付近の縦線は翼端渦位置
 を示し、その変化からプロペラ後流の縮流の状況
 を判断出来る。そして、レーザ光をマーカーとして、

プロペラ後流の縮流および翼端渦のピッチを調べた。

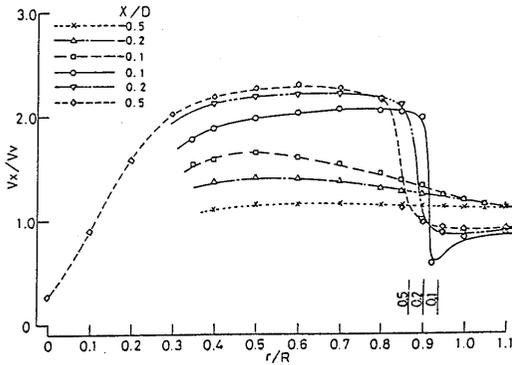


Fig. 20(a) Axial Velocity Distributions

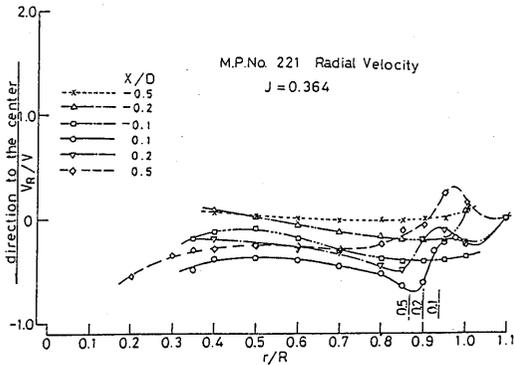


Fig. 20(b) Radial Velocity Distributions

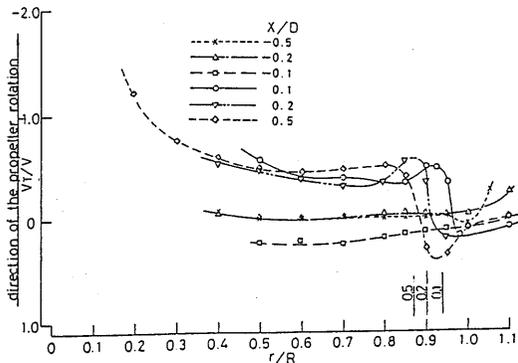


Fig. 20(c) Tangential Velocity Distributions

1985年には、プロペラ近傍の速度分布を特性解析法の理論計算と比較し、翼端の流れは未だ実験値と合わず、計算に改良の必要なことを示した^{30), 31)}。

また、LDV 計測を新分野へ応用しようとする試みがいくつかなされた。

まず1982年より、日本造船研究協会との共同研究として実船試験への応用が検討され、口径300mm のフロントレンズとズームレンズ機構による陸上システムを用いて、最大計測可能距離および気泡をふくむ海水の影響が調査された。しかし、最大計測距離は実船において必要とされる5m以上に達せず3.5mに留まった。

1983年、翼端小翼付プロペラの流場計測を行い、翼端小翼による翼端渦の拡散を染料注入法による流れの可視化と共に報告している³²⁾。

1985年、直径400mm のプロペラ翼面境界層計測を実施した。計測方法の概念図をFig. 21に示す。図の手前から2本のレーザー光が、紙面に垂直に通過している。そのレーザー光をプロペラのピッチ面と平行に設定し、ピッチ角と平行な流速成分を求めた。

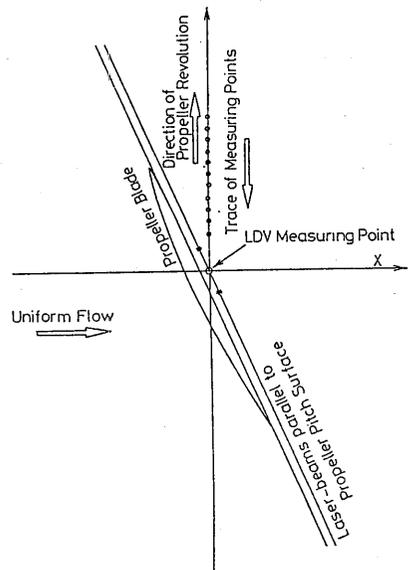


Fig. 21 Sketch of a Measuring Method

プロペラ翼表面近傍の流速計測データ例をFig. 22に示す。横軸は、プロペラ円周方向の翼角位置である。

下向きの鋭いピークは、境界層内の流速分布を表わしている。

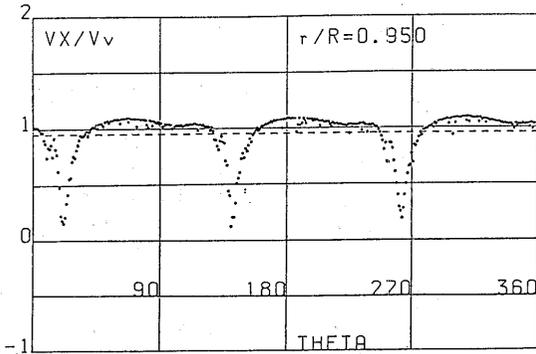


Fig. 22 Velocity Distribution near Propeller Surface

これらの大量な計測データをマイクロコンピュータで処理することにより、プロペラ翼面の境界層内部の流速分布をかなり詳細に求めることが出来た³³⁾。これらは、数値計算の実験的な検証に必要なデータを得る足がかりになったと思われる。計測結果として翼断面まわりの速度ContourをFig. 23に、境界層内流速分布をFig. 24に示す。

作動中のプロペラ翼面に形成される境界層は 0.3 mmから5mmとかなり薄く、LDVによる計測は位置の設定をふくめてきわめて困難である。推進性能部において計測されるまでは、1984年のJessupらによる計測³⁴⁾があるのみであった。なお1986年、普通型プロペラに引続き、ハイリースキュープロペラにおいてもプロペラ翼面境界層計測を実施した。

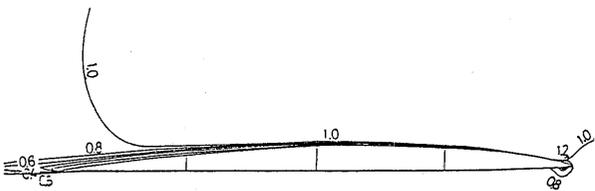


Fig. 23 Velocity Contour u/u_0 around a Propeller Blade

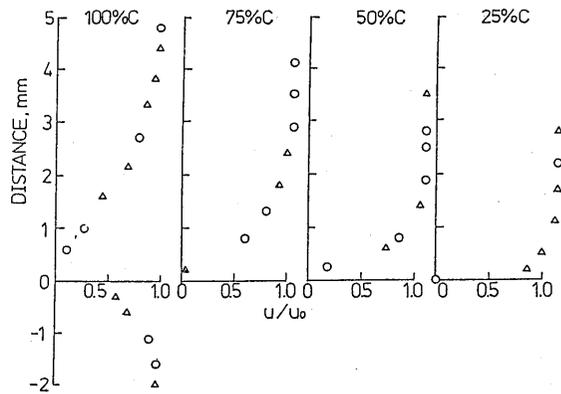


Fig. 24 Boundary Layer Profile on the Section of the Blade

3. 2. 3 プロペラ関連研究へのLDV技術の応用

最近の数年間、LDV 技術も定着し、プロペラおよびキャピテーションに関する研究の中においてLDV の利用も増加しつつある。その例として以下のような研究がある。後退角付3次元翼まわりの流速分布計測³⁵⁾、二重反転プロペラまわりの流場計測³⁶⁾、プロペラ翼面圧力と LDVによる流速分布の同時計測、そして斜流プロペラまわりの流場計測等^{37)・38)}である。いずれもピトー管など、従来方式の流速計では計測困難である流場の速度分布を計測するためにLDVが利用されている。

応用例として、二重反転プロペラまわりの流場計測および Pre-Propeller Finまわりの流場計測について以下に述べる。

二重反転プロペラまわりの流場は前後プロペラ相互の干渉により複雑な流れとなっている。LDV を用いて、プロペラまわりの軸方向流速 V_x 、半径方向流速 V_R および円周方向流速 V_T を非同時に計測した³⁶⁾。すなわち、 V_x および V_R は計測部側面から、 V_T は計測部底面から鏡を用いてレーザー光を照射した。LDV 回転同期計測システムを用いることにより、プロペラ一回転中のある半径における円周上の流速分布が求められる。計測例をFig. 25に示す。

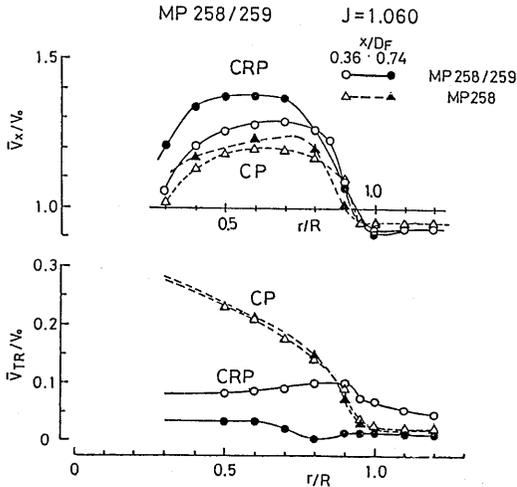


Fig. 25 Velocity Distributions in the Propeller Race (CRP & CP)

前方プロペラ(直径 D_F)のみの場合の V_T と V_R の合速度 V_{TR} は下流でも減衰しないにも拘らず、二重反転プロペラの場合はほぼ零になっており、前方プロペラの旋回流が後方プロペラにより回収されていることが分かる。また、他の計測結果から干涉速度の設計値は計測値より大きいことが明らかになり、設計法改良に役立った。

次に斜流プロペラにつけたフィンまわりの流場計測について述べる。斜流中で作動する高速艇用プロペラに発生しやすいルート・エロージョン防止策として、プロペラ直前に取り付けられる可変ピッチ、可変位相のフィン、Pre-Propeller Fin が有効であることがエロージョン実験により示された³⁹⁾ので、その理由を調べる為 LDVによりフィンとプロペラ間の流場を計測した³⁸⁾。水槽固定座標での V_x 、 V_y および V_z を各回転角度位置で計測し、プロペラ固定座標での値 V_x 、 V_R 、 V_T に変換した。それらの値から求めたプロペラ翼断面への流入迎角の一回転中の変化をFig. 26に示す。フィンなしの場合と比較してルート部付近で右舷側での迎角が小さくなっていることがわかる。迎角の減少は右舷側でのフィンによる V_x の加速とマイナスの V_T の発生によるものである。このようにしてフィンの役割が LDVによる計測から明らかになった。

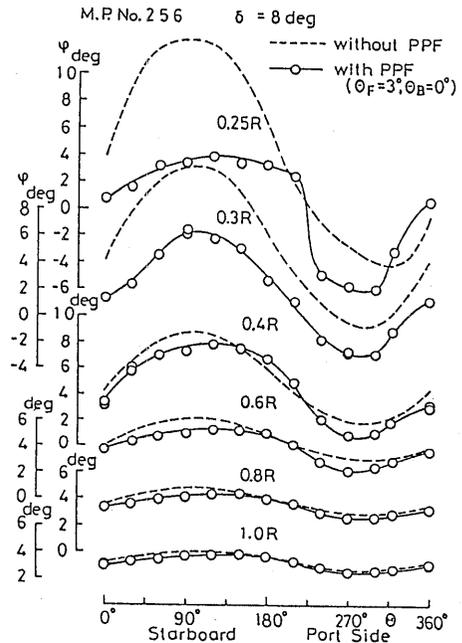


Fig. 26 Effect of PPF on Inflow Angle to Propeller

3. 3 曳航水槽におけるLDV計測技術の開発

3. 3. 1 曳航水槽へのLDV導入

1986年曳航水槽においてLDVが使用できるかどうかを調べるため、小型光ファイバLDV (DANTEC 60X1 3型) が導入された。Fig. 27(a) にLDVシステムの概念を示す⁴⁰⁾。このLDVの特徴は、水中プローブ(直径14mm、長さ120mm)と呼ばれる円筒型のセンサーとLDV光学系本体を光ファイバで接続しているため、プローブをセットする位置の自由度が大きいことである。プローブ先端から発射された2本のレーザー光(He-Ne 波長633nm)が交差する点の速度成分を計測する。プローブの形状もピトー管と同程度の小型であり、Fig. 27(b) に示す様に5孔ピトー管との同時計測も可能である。光源のHe-Neレーザと組み合わせたLDVシステムも、水槽間の移動も簡単で使いやすいが、計測距離(LDVセンサーから計測点までの距離)が50mmと短いことが難点である。

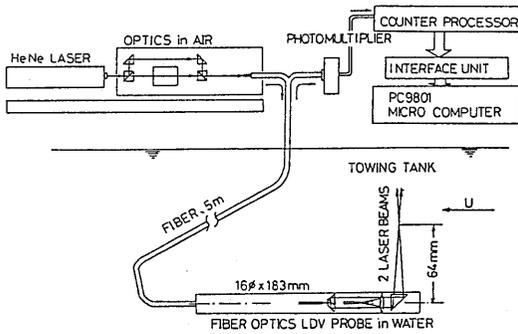


Fig. 27(a) Description on the Small Fiber Optic LDV System

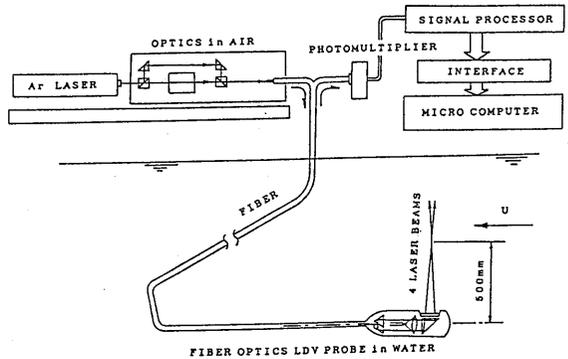


Fig. 28 Description on the Fiber Optic LDV System

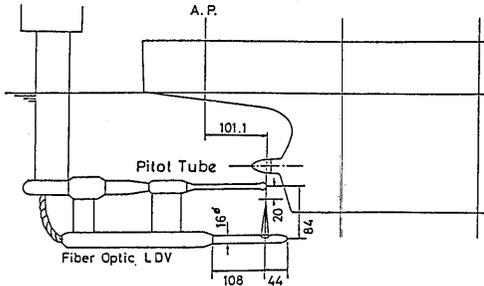


Fig. 27(b) Arrangement of the LDV and 5 hole pitot Tube

そこで、計測距離を水中500mmと長くし、速度成分の3次元同時計測を可能とする光ファイバLDVシステム(DANTEC 60X11型)が1988年に導入された。Fig. 28にLDVシステムの概観を示す。このLDVの特徴は、速度成分の2次元同時計測用水中プローブ(直径60mm、長さ300mm)を2組備え、2個のプローブを直角に組み合わせると3方向の速度成分を計測できることである。それぞれのプローブから緑と青のレーザー光(Ar-ion 波長514.5nmおよび488nm)が4本出て直交する2方向の速度成分を計測する。光ファイバは全長10mあり、曳引車上のレーザー光源とLDV光学系本体を、水中プローブと接続している。しかし、このLDVシステムは装置が大型であり、開発途上の製品であったことも加わって、可動率が予想をかなり下回った。そのため現在(1990年)も計測法を含めた実用化の研究が続けられている⁴¹⁾。

3. 3. 2 LDV計測法の開発

曳航水槽においてLDV流場計測を実施するために解決する必要がある問題点は、前に記述した(3.1.2参照)以外に次のようなものがある。

- (1) 曳引車の振動による計測点の誤差
- (2) LDV水中センサー部の流体力による振動
- (3) 水中にあるLDVセンサーおよび支持具による非対称流れの影響
- (4) 大型トラバース装置(重量200kg)を模型船に搭載する方法

上記のような問題点を検討しつつ、曳航水槽におけるLDV計測技術の実用化および計測法の研究を進めたが、残された課題は多い。例えば、LDV水中センサー部が流場に与える影響(センサーの振動、センサーおよび支持具による非対称流れ)は、影響を検討しつつあるところである。曳引車の振動による計測点の誤差についても同様である⁴²⁾。

LDV水中プローブの防水および防湿の構造の改善は、メーカーに期待するしかなく、改良の方法を示し要望を出している。シーディングについては、LDV計測技術の基礎的な研究として継続して実施している。以下にシーディングに関する研究を紹介する。

キャビテーション水槽におけるLDV計測用のシーディング(Seeding)は、比較的粒子形状の荒い家庭用ペイントを使用している⁴³⁾が、回流型的水槽であるため、少量で済み散乱粒子濃度も低下しない。しかも、他の試験への影響を軽減するために、LDV

計測終了後は水槽水を全交換している。 それに対し、曳航水槽へのシーディングは、その容積が巨大であるがために全体へ均等に実施するのは適切ではない。 模型船の進行する航路上に散布する工夫が必要となった。 そのため、シーディングの研究が1986年から続けられている。 シーディング材料としては、安価であり、かつ効果の大きいアルミニウム粉末を使用している。 さらにアルミニウム粉末の粒径とLDVの信号の関係を調査した結果、直径 $32\ \mu\text{m}$ 以下の粉末が適当であることが明らかになった。 曳航水槽において試みられた散布方法は、アルミニウム粉末と水道水を混合した液を(1)模型船船首に固定したシーディングノズル(6~8本)から水中散布する方法、(2)模型船前方のシーディングノズルを船尾計測位置の移動と共にトラバースする方法、(3)粉末はすぐには沈まない為、試験航走の帰路、あらかじめ模型船後方に水中散布する方法等がある。しかし、模型船船首近傍に置いたシーディングノズルが、船尾流場に全体的に数%の速度低下をもたらすことが最近判明した。そのため現在は、流場計測値の精度を保持するため試験航走の帰路、模型船後方に水中散布する方法を実施している。

3. 3. 3 LDVによる船尾流場の計測

1988年から5年計画により開始された、数値シミュレーションを利用した新船型開発に関する研究の中で、実用船型の船体周りの流場をLDVにより計測し、CFD(Computational Fluid Dynamics)技術により得られた数値シミュレーション結果を検証するための資料とすることになった。研究計画前半の2年間でLDV計測システムを整備し、後半3年間で計測結果を蓄積し検討する計画であったが、LDVの故障(特に防水、防湿の対処)等もあり、研究は約1年に近い遅れを出している。そこで計画を変更し、LDVによる流場計測範囲を船尾プロペラまわりに集中することとした。1990年に自動車専用船および練習船青雲丸の、船尾流場における伴流分布およびプロペラ直前の流速分布計測結果について報告する予定である。Fig. 29(a)(b)(c)に流速分布計測の一例を示す⁴⁴⁾。

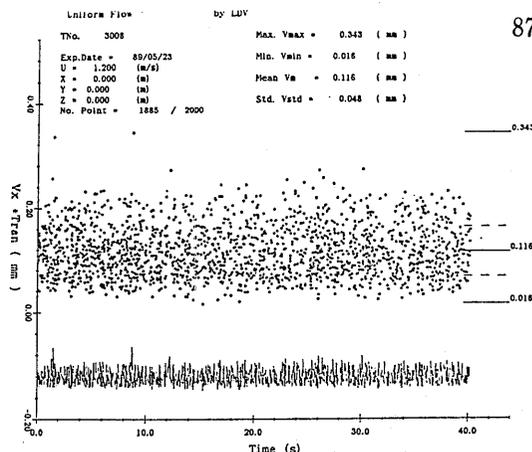
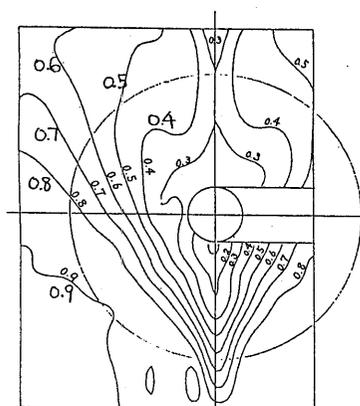
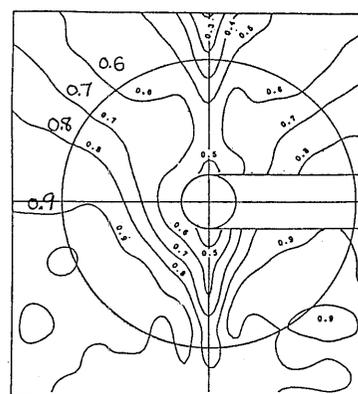


Fig. 29(a) Typical Data obtained by LDV System behind a Model Ship



プロペラなしの流速分布 (V_x/U)

Fig. 29(b) Wake Fraction Contour without Propeller



プロペラありの流速分布 (V_x/U)

Fig. 29(c) Wake Fraction Contour with Propeller

4 新しい計測技術の研究

4.1 プロペラ翼面圧力計測

プロペラの性能及びプロペラ翼面上に発生するキャビテーションの発生範囲を推定する上で、プロペラの翼面圧力は最も重要な量である。この為、近年プロペラ翼面上の圧力計測が盛んに行われている。プロペラ翼面圧力計測には、いくつかの技術上の困難さがある。まず、回転体からの S/N比の高い信号の取り出し方式の開発がある。第二に模型プロペラの 0.7R 以上にも取り付けられる大きさで感度が良く、ドリフトが小さく、応答周波数の高いセンサーの選定及びその取り付け方法の開発がある。また、圧力値へのプロペラ遠心力や翼応力の影響を除かねばならない。

推進性能部でも 1977 年以来、いくつかのプロペラについて翼面圧力計測が行われている^{45)・46)・47)・48)}。信号の取り出し方式としては、圧力計からの信号を中空シャフトを通して動力計内に導き、送信機で多チャンネルの信号を FM 多重化し、搬送周波数にのせ、有線を受信機におくるテレメータ方式を採用した⁴⁵⁾。翼面圧力計測装置の概略を Fig. 30 に示す。

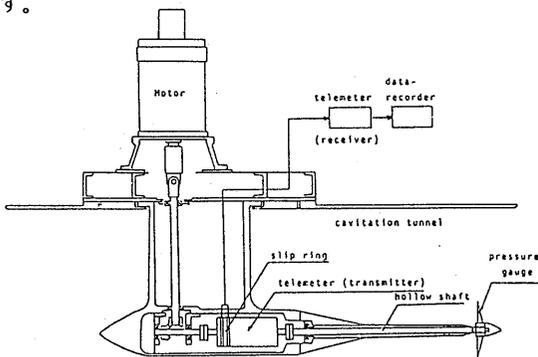


Fig. 30 Measuring Apparatus

信号は直接デスクトップコンピュータにより解析されるか、データレコーダに記録された後、オフライン解析される。また、センサーの開発と平行して各種の圧力計が使用された。現在模型プロペラの翼面圧力計測には P303-1S (三計エンジニアリング製) が、実船プロペラの翼面圧力計測には PS-5KB 又は 2K

B (共和製) が使用されている。その特性を Table 1 に示す。

Table 1 Performance of Pressure Transducers

Type	P303-1S	PS-5KB
Capacity	1Kg/cm ²	5Kg/cm ²
Resp. Freq.	7KHz	40KHz
Output Voltage	50mV	2.4mV
Non-linearity	0.5% FS	1% FS
Repeatability	0.2% FS	1% FS
Bridge Voltage	6VDC	3VDC

圧力計の取り付けには翼形状を損なわないこと、翼面上の多くの点が計測できること、応答周波数が十分高いこと、プロペラの遠心力や翼応力の影響を受けないこと等が要求される。取り付け方式として 1) 翼表面に直接取り付ける方法 2) 翼表面に圧力孔を開け、チャンバーに圧力計を取り付ける方法 3) 翼面上の圧力孔と圧力計を導管により結ぶ方法がある。不均一流中やキャビテーション状態でも計測したい場合、チャンバー方式が良いと言える。但し、ある程度の翼厚が必要な為、翼面上の計測位置に制約が生じ、また、高価になる。当部でも直接取り付け方式⁴⁵⁾ からチャンバー方式⁴⁸⁾ にかえ、いろいろな改良を行った。最近、直径 400mm φ の大型模型プロペラについて計測を行った^{49)・50)} が、その時の圧力計の取り付け方法を Fig. 31 に示す。

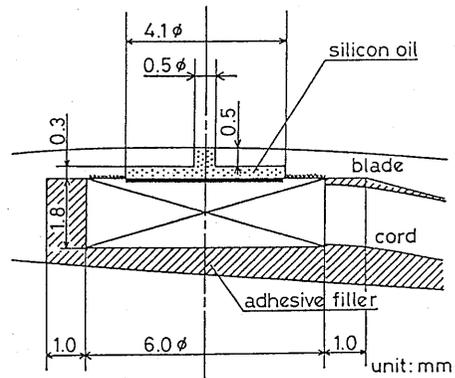


Fig. 31 Helmholtz Cavity and Pressure Gauge in Newly Shaped Chamber

プロペラ翼表面に直径 0.5mm φ の圧力孔を開け、その反対側裏面に圧力計を取り付けて、チャンバーが

形成される様に工作した。チャンバー内にはシリコンオイルを入れ、圧力計取付用接着剤にはシリコン系の弾性型のものを使っている。この方式により圧力計測に及ぼす翼の歪の影響や遠心力の影響をほぼ取り除くことができた⁴⁹⁾。周波数応答特性は水中スピーカーを用いて調べた。その計測例をFig. 32に示す。100Hzから約400Hz迄の周波数範囲で、振幅の減衰は3dB以内であり、位相差はなかった⁵⁰⁾。

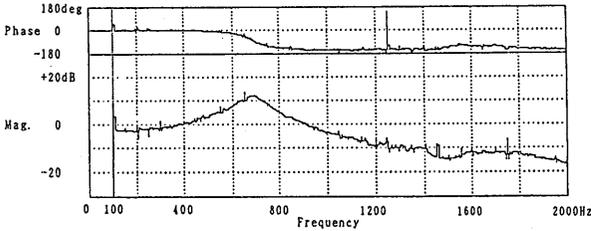


Fig. 32 Transfer Function of Present Helmholtz Cavity

以上の計測方式により、実用的プロペラでの翼面圧力計測が精度良く行えるようになった。航海訓練所の練習船「青雲丸」の通常型プロペラ及びハイリール・スキュード・プロペラの模型プロペラについて、均一流中及び不均一流での計測を行った⁵⁰⁾。その結果の一例をFig. 33に示す。図中には測定値の誤差の大きさをIマークで示す。同じ図中にはプロペラ揚力面理論による圧力係数 C_p の計算値を併せて示しているが、この様に比較、検討することにより理論の改良に寄与している。

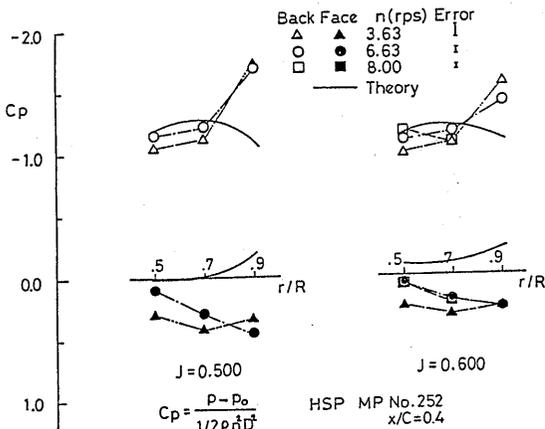


Fig. 33 Radial Pressure Distribution on HSP in Uniform Flow

現在、実船プロペラの翼面圧力計測も模型プロペラの場合と似た方法で行われており⁵¹⁾、実船プロペラ性能の解明に役だっている。今後、翼厚の薄い位置での計測の工夫やデータ処理方法の改良等が望まれる。

4. 2 プロペラ・キャビティ形状計測

船舶の振動を考えると、プロペラに発生するキャビテーションが重要な役割を果たす。特にキャビテーションの体積変化(2次の時間変化分)を正確に知ることが、プロペラ起振力を精度良く推定するためには不可欠である。しかし、現在の理論予測法の精度は十分とは言えず、キャビティ形状を計測する方法としては次のようないくつかの方法が提案されている。

- ①ステレオ写真法⁵²⁾
- ②ピン・ゲージ法^{53)・54)}
- ③レーザ光散乱法^{54)・55)}

③は船研で開発された計測法であり、非接触法で精度が高いが、計測に時間がかかる欠点があった。そこで、この方法に、近年めざましく進歩してきている CCDカメラと画像処理技術を組み合わせることにより、模型プロペラに発生する非定常キャビティ形状を高速、高精度で計測する方法(以下、LASER-CCD法と称する)が新たに開発された⁵⁶⁾。

計測法の原理をFig. 34に示す。

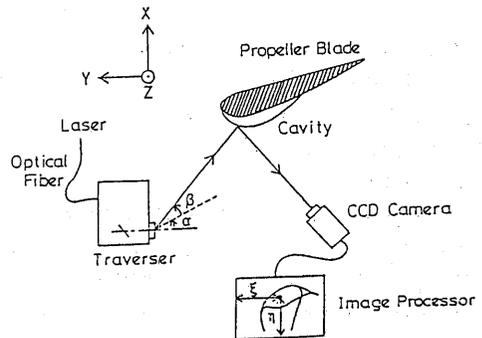


Fig. 34 Measurement Principle

キャビティ表面にレーザ光を照射し、その散乱光を CCD カメラで捉えることにより、空間内に2本の直線(レーザ光及びカメラから像への視線)が決定さ

れる。この2本の直線の交点として散乱点、即ちキャビティ表面の一点が算定できる。三角測量と原理は同じであるが、2本の直線の内の1本としてレーザー光を用いることにより、その直線をトラバースさせることによる高速な自動計測を可能としている。計測システムは、Fig.35に示すようにレーザーとそのトラバースを中心とする光学系、CCDカメラ、画像処理装置、系全体の制御とデータ処理を行うコンピュータ、及びそのソフトから成り、船研の大型キャビテーション水槽第2計測部内に模型船を取り付けて計測を行う。

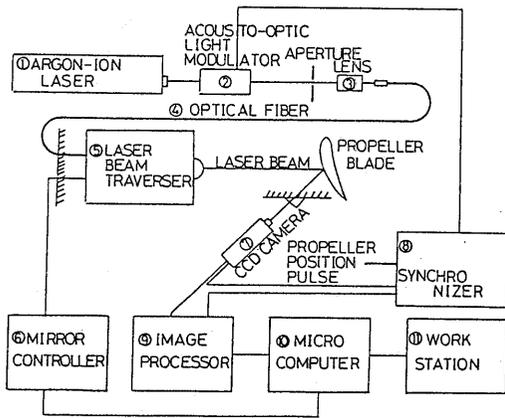


Fig.35 Propeller Cavity Shape Measuring System

レーザー光トラバースは模型船の内部に設置され、レーザー光は船尾に特別に作られた透明アクリル窓を通して、プロペラの回転に同期してプロペラがある翼角度位置にきたときにだけ翼面上に照射される。CCDカメラは水槽の窓の外に設置される。1点の計測にかかる時間は約1秒である。

この計測システムで、航海訓練所の練習船「青雲丸」の模型プロペラ上に発生するキャビティ形状の計測結果の一例を Fig.36に示す。実線がLASER-CCD法、丸印がレーザー光散乱法による計測結果である。一点鎖線はキャビテーションの発生範囲である。LASER-CCD法による計測値の誤差は、最大で約0.5mmである。

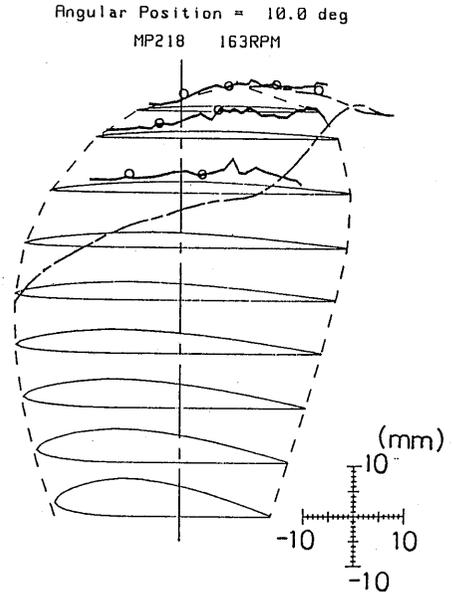


Fig.36 Measured Cavity Section on Propeller

4.3 スティング型斜流プロペラ単独動力計による計測

船研では、斜流時のプロペラ単独性能を計測すること、及び、回転数を変化させたときのプロペラ過渡特性を調べることを目的として、1988年にFig.37のスティンク型斜流プロペラ単独動力計（日章電機（株）製）を導入した。主な仕様は次の通りである。

- ・ 定格負荷 スラスト ±40kg
トルク ±2kg・m
- ・ 方式 全量式
- ・ 許容過負荷 150%FS
- ・ 使用最大回転数 50rps
- ・ 温度影響 零点 0.01%FS/°C
感度 0.01%Reading/°C
- ・ 非直線性 直進時 0.15%FS
斜流時 0.3%FS
- ・ ヒステリシス 直進時 0.15%FS
斜流時 0.3%FS
- ・ 干渉度 直進時 0.15%FS/FS
斜流時 0.4%FS/FS
- ・ 昇降ストローク 上下方向 570mm

- ・斜流角範囲 水平方向 ±30deg
- ・操作モード 手動操作 及び CPU操作
- ・CPUとの接続 RS232C

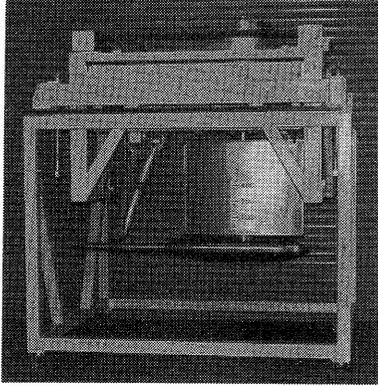


Fig.37 Sting Type Propeller Dyanmmeter

本動力計は船研の三鷹第三試験水槽（中水槽）で使用する。プロペラ単独試験に主として使用してきた船研の小型動力計と比較して、特徴としては、まず、いままでキャビテーション水槽でしか行っていなかった斜流中のプロペラ試験を曳航水槽で行えるようになったことが挙げられる。第二に、全量式であるために予め結果を予測してウェイトをセットする必要が無い、回転数がデジタル制御であるために回転数が定常に達するまでに要する時間が短い、等の利点により計測がスムーズに行い易くなった。さらに、予め回転数の変化の様子をプログラムしておいたパソコンで動力計を制御することにより、任意の回転数変化に伴うプロペラ過渡特性を調べることが可能になった。

Fig. 38にサーフェスプロペラのスラストとトルクの過渡特性の一例を示す。プロペラの回転数が上がるに連れてスラストもトルクも単調に増してゆくが、ある回転数に達したときにプロペラ翼が空気吸込みを起こしてスラスト、トルクともに減少すると同時に激しく振動を起こすようになる。更に回転数が上がり全ての翼が空気吸込みを起こした状態になると振動はある程度おさまり、スラストとトルクの変動幅は小さくなる。その状態から逆に回転数を下げると、空気吸込みを起こし始めた回転数より下がっ

ても空気吸込み状態にあるままであり、さらに低い回転数に於て全翼から同時に空気吸込みが消えて、スラスト、トルクも回復する様子が分かる。

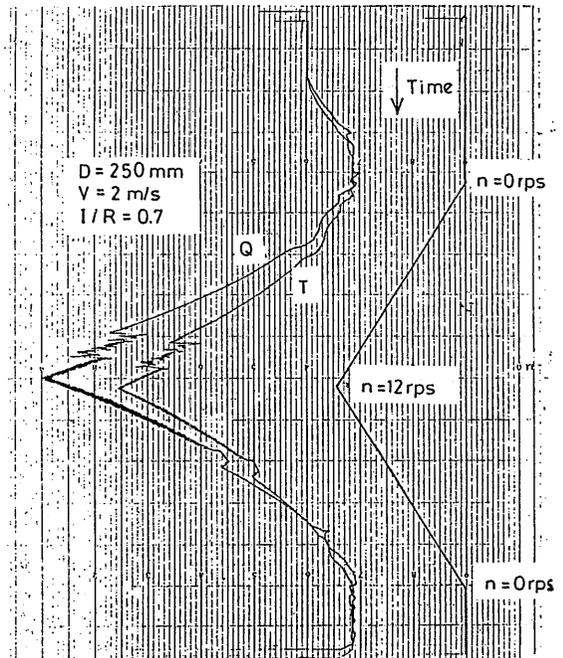


Fig.38 Transfer Characteristics of a Surface Propeller

5 今後の方向

以上、この約10年間に推進性能部の試験水槽で見られた試験法および計測技術の改良の概略を述べた。計測は従来船型やプロペラの開発を支える裏方として目立たない存在であった。しかし、近年の計測技術や処理技術の進歩によってそれらを十分理解し、活用しないと研究が進まなくなってきている。今後も技術の進歩を積極的にとりいれ研究を進展させる為には「とにかくやってみる」という積極さが必要と思われる。

具体的な方向として下記の事が考えられる。

1) 新しい計測対象の開発

- ・プロペラや船体まわりの渦流れ及び境界層内流れの非定常流速分布
- ・高速艇試験における姿勢制御、排水量変化の計測
- ・CFDを念頭においた新しい水槽試験法
- ・プロペラの過渡特性、サーフェイス・プロペラの試験法
- ・キャビテーション水槽での音響インテンシティ計測法
- ・Remotely Operated Vehicle試験法、Water Jet試験法

2) データ処理技術の改良

- ・リアルタイム処理化の推進
- ・統計処理手法の利用
- ・データ受渡し方法の改良

3) 試験技術の向上

- ・計測精度の評価
- ・効率の良い実験を行う為の計測シミュレーション実行
- ・試験法の理論または基礎実験による改良
- ・試験の効率化、省力化、標準化の推進
- ・計測システムの保守
- ・計測機器のキャリブレーション

参考文献

- 1) 荒井能 : 船型試験水槽の計測へのマイクコンピュータの2,3の応用、第36回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1980)、pp.14~17
- 2) 足達宏之 : 荷重度変更法の基礎とその応用について、日本造船学会論文集、第154号、(1983)
- 3) 足達宏之、菅井信夫、森山文雄、上田隆康 : 荷重度変更法による船型試験システム、船舶技術研究所報告、第19巻、第3号、(1982)
- 4) Moriyama, F. : On the Effect of Rudder on Propulsive Performance, 日本造船学会論文集、第150号、(1981)
- 5) 森山文雄、山崎隆介 : プロペラの舵におよぼす影響について、西部造船会会報、第61号、(1981)
- 6) 菅井信夫、足達宏之、森山文雄 : 荷重度変更法の自航試験システムへの応用、第38回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1981)、pp.17~20
- 7) 森山文雄、菅井信夫 : 舵付船の自航特性について、船舶技術研究所報告、第18巻、第3号、(1981)、pp.1~12
- 8) 上田隆康、足達宏之、菅井信夫、森山文雄 : 荷重度変更自航システムによる船尾形状変化の性能評価について、日本造船学会論文集、第152号、(1983)、pp.70~78
- 9) 藤沢純一、堀利文、石坂純、山口真裕 : 高速艇の相似模型による抵抗試験、第50回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1987)、pp.21~24
- 10) 堀利文、藤沢純一、石坂純、山口真裕 : 高速艇の波浪中性能について、第50回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1987)、pp.25~28
- 11) 山口真裕他 : 高速艇の水槽試験(その3)、第52回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1988)、pp.57~60
- 12) 堀利文他 : 高速艇の推進性能(その4:滑走艇)、第54回船舶技術研究所研究発表会、(1989)、pp.80~83
- 13) 塚田吉昭他 : 2軸小型旅客船の性能改善に関する水槽試験例、第52回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1988)、pp.61~64
- 14) 小松正彦、山口真裕 : 高速艇の推進性能、シンポジウム「高速艇と性能」、日本造船学会、(1989)、pp75~118
- 15) 塚田吉昭他 : 内航高速旅客船の馬力推定に関する若干の考察、第54回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1989)、pp.84~87
- 16) 堀利文、牧野雅彦、武井幸雄 : プロペラ荷重

- 度変更法による波浪中船型試験システム、第44回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1979)、pp. 54~57
- 17) 門井弘行他 : 自動車専用運搬船の波浪中における推進性能に関する模型試験、船舶技術研究所報告、第23巻、第4号、(1986.7)、pp. 15~35
- 18) 門井弘行、岡本三千朗、堀利文、足達宏之 : 波浪中における自動車専用運搬船のプロペラ負荷変動、第44回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1984.11)、pp. 58~61
- 19) 武井幸雄他 : 波浪中における伴流の実験的研究、船舶技術研究所報告、第24巻、第5号、(1987)、pp. 69~82
- 20) 門井弘行、岡本三千朗、堀利文、足達宏之 : 自動車専用運搬船の波浪中試験結果、第46回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1985)、pp. 110~113
- 21) 門井弘行、小久保芳男、岡本三千朗 : 二重反転プロペラに関する1試験例、推進性能部技術資料、Tech. Memo. No19、(1983.11)
- 22) 右近良孝、黒部雄三、荒井能 : 二重反転プロペラのキャピテーション試験、第44回秋季船舶技術研究所研究発表会講演集、(1984.11)、pp. 98~103
- 23) 川上善郎、小久保芳男、柳原健 : 推進法の差異が推進性能に及ぼす影響について、船舶技術研究所報告、第16巻、第2号、(1979.3)、pp. 13~33
- 24) 右近良孝、他 : 二重反転プロペラの設計について—高速コンテナ船への適用—、西部造船学会報、第75号、1988年3月、pp. 52-64
- 25) 角川明他 : レーザードップラ流速計によるプロペラ近傍流場計測例、第38回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1981.12)、pp. 37-40
- 26) 武井幸雄、角川明、児玉良明、堀利文 : レーザードップラ流速計による船後伴流の計測、第40回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1982.12)、pp. 90-93
- 27) 角川明 : レーザ流速計による船用プロペラまわりの流場計測システムについて、第2回流れの動的計測シンポジウム、(1985)
- 28) 角川明、小山鴻一 : LDVによるプロペラまわりの瞬間的な流場計測例、第42回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1983.12)、pp. 27-30
- 29) 岡本三千朗、角川明、小山鴻一 : 均一流中におけるプロペラまわりの流場計測、第42回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1983.12)、pp. 23-26
- 30) 小山鴻一、角川明、岡本三千朗 : レーザ流速計による船用プロペラまわりの流場計測、機械学会論文集、51-4668、(1985)
- 31) KOYAMA K., KAKUGAWA A., OKAMOTO M. : Experimental Investigation of Flow Around a Marine Propeller and Application of Panel Method to the Propeller Theory, 16th O.N.R., (1986)
- 32) 角川明他 : 船用プロペラの流れの可視化、第11回流れの可視化シンポジウム、(1983)
- 33) 角川明、武井幸雄 : レーザ流速計によるプロペラ翼面境界層の計測例、関西造船協会誌、第203号、(1986)、pp. 21-26
- 34) Jessup S.D., Schott C. : Local Propeller Blade Flows in Uniform and Sheared Flows using LDV Techniques, 15th ONR, (1984)
- 35) Ukon, Y. : Cavitation Characteristics of a Finite Swept Wing and Cavitation Noise Reduction Due to Air Injection", Proc. of the Int. Symp. on Propeller and Cavitation, Wuxi, (1986), pp. 383~390
- 36) 黒部雄三、右近良孝、工藤達郎、牧野雅彦 : 二重反転プロペラまわりの流場計測、第48回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1986.11)、pp. 84-87

- 37) 黒部雄三他 : 斜流プロペラまわりの流場計測、第54回船舶技術研究発表会講演集、(1989.11)
- 38) 黒部雄三、右近良孝、鈴木茂 : Pre-Propeller Fin 流場のLDV計測、第56回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1990.11)
- 39) 右近良孝 : プロペラ・キャビテーションの研究の現状、第53回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1990.11)
- 40) 角川明、武井幸雄、竹子春弥、堀利文 : 光ファイバLDVによる船尾伴流の計測、関西造船協会誌、第211号、(1989)
- 41) 角川明、竹子春弥、堀利文、上田隆康 : 曳航水槽における船尾流場のLDVによる計測(第1報)計測法の開発に関連して、第54回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1989)
- 42) 牧野雅彦、角川明、竹子春弥、上田隆康 : 400m水槽における自航模型船に対するLDV計測システム、第56回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1990)
- 43) 武井幸雄他 : レーザ流速計(LDV)のシーディング(その1)、第50回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1987)
- 44) 竹子春弥、角川明、堀利文、牧野雅彦 : プロペラ作動時における船尾流場のLDV計測、第56回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1990)
- 45) 武井幸雄、小山鴻一、黒部雄三、吉田三雄 : プロペラ翼面圧力計測、第28回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1976.12)、pp.95-98
- 46) 武井幸雄、小山鴻一、黒部雄三、吉田三雄 : プロペラ翼面圧力計測(第2報)一均一流中でのキャビテーション発生時一、第30回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1977.12)、pp.17-20
- 47) Takei, Y., Koyama, K., Kurobe, Y. : Measurement of Pressures on a Blade of a Propeller Model, Papers of Ship Research Institute, No. 55, (1979)
- 48) 岡本三千朗、角川明、小山鴻一 : プロペラ翼面圧力計測例、第46回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1985.11)、pp.102-105
- 49) 黒部雄三他 : 大型模型プロペラを用いた翼面圧力計測法、第50回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1987.12)、pp.33-36
- 50) 右近良孝、黒部雄三、工藤達郎 : 通常型及びハイリースキュードプロペラの翼面圧力計測について一キャビテーションが発生しない場合一、日本造船学会論文集、第165号、(1989.6)、pp.83-94
- 51) 右近良孝他 : 実船プロペラ翼面圧力計測一通常型プロペラに関する計測一、日本造船学会論文集、第168号、(1990.12)
- 52) 山口一他 : ステレオ写真法によるプロペラ・キャビティ厚さの測定、第4回キャビテーションに関するシンポジウム、日本学術会議、(1986)
- 53) Hoshino, T : Estimation of Unsteady Cavitation on Propeller Blades as a Base for Predicting Propeller Induced Pressure Fluctuations, Journal of S.N.A.J., Vol.148, (1980), pp.33-44
- 54) 右近良孝、黒部雄三 : レーザー光を利用したプロペラ翼面上のキャビティ厚み分布の計測、船舶技術研究所報告、第19巻、(1982.1)、pp.1-12
- 55) Kodama, Y., Takei, Y., Kakugawa, A., : Measurement of Cavity Thickness on a Full Scale Ship Using Laser and a TV Camera, Papers of Ship Research Institute, No. 73, (1983), pp.1-42
- 56) 工藤達郎他 : 模型プロペラ翼面上に発生するキャビティ形状の計測、日本造船学会論文集、第166号、(1989.12)、pp.93-103