

LDV によるプロペラ回転中の模型船尾流場計測  
—練習船“青雲丸”—

角川 明\*, 竹子 春弥\*, 牧野 雅彦\*

Flow Field Measurements around a Rotating  
Propeller at Stern of a Ship Model Using LDV  
—Training Ship “Seiun-maru”—

By

Akira Kakugawa\*, Haruya Takeshi\*, Masahiko Makino\*

Abstract

In the study of propulsive performance of a ship under propeller-hull interaction, the flow field measurement around a ship in self-propulsion condition is important. The authors measured the flow field at the stern of a model ship in self-propulsion condition using LDV (Laser Doppler Velocimeter) in a towing tank at the Ship Research Institute.

The measurements were made at three sections before and after the propeller. The velocity distributions both with and without a rotating propeller were measured, from which the mean velocity distribution and the standard deviation of the fluctuating component were obtained. The fluctuating component of the flow velocity under the rotating propeller condition may be decomposed into two parts. One is an ordinary fluctuation of the wake flow, and the other is the fluctuation due to rotating propeller blades. Therefore the periodically fluctuating component corresponding to the propeller blade frequency was extracted from the measurements, based on the propeller phase information. As the result, the flow field which contains the tip vortex and the free vortex sheet emanated from the trailing edge was made clear in the velocity distribution behind the propeller rotating in the hull wake.

目 次

\* 推進性能部

原稿受付 平成5年7月13日

審査済 平成5年9月8日

|                |    |
|----------------|----|
| 1. 序           | 34 |
| 2. 計測方法        | 35 |
| 2.1 曳航水槽用 LDV  | 36 |
| 2.2 シーディングシステム | 39 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 2.3 曳航水槽における LDV 利用の問題点   | 40 |
| 3. 試験状態                   |    |
| 模型船, プロペラの主要目, 試験状態, 計測断面 | 40 |
| 4. 計測結果                   | 44 |
| 4.1 平均流速分布                | 44 |
| 4.1.1 プロペラなしの場合 (Wake)    | 44 |
| 4.1.2 プロペラ作動中の場合          | 47 |
| (1) $V_x$ 速度成分流速分布        | 47 |
| (2) $V_y$ 速度成分流速分布        | 49 |
| (3) $V_z$ 速度成分流速分布        | 49 |
| (4) $V_{yz}$ 流速分布         | 50 |
| 4.2 Data rate の分布         | 50 |
| 4.3 プロペラ作動中流場の変動および乱れ     | 53 |
| 4.3.1 速度成分の標準偏差と流場の関係     | 53 |
| 4.3.2 プロペラ翼数に伴う周期的な変動流    | 55 |
| 5. まとめ                    | 65 |

## 1. 序

船体による抵抗はプロペラがある場合と無い場合とで異なり, プロペラの推力も同様にそれぞれの場合によって異なる。船舶の推進性能を推定するためには, 船体あるいはプロペラ単独の性能を求めるだけでなく, 船体とプロペラが互いに干渉している状態の性能を求める必要がある。船体とプロペラとの干渉の研究は, おもに推力減少率の観点から数多くなされてきた<sup>1)2)3)</sup>。理論研究を支援, 実証する実験的研究として, 船体とプロペラが干渉しあっている流場の直接計測が Kux を始めとして行われ<sup>4)</sup>, その計測手段として LDV (Laser Doppler Velocimeter: レーザドップラ流速計) が使用されてきた。

プロペラ単独流場についての計測は, 回流水槽であるキャビテーション水槽で実施された例が数多く報告されている<sup>5)6)</sup>。キャビテーション水槽におけるそれらの計測例では, LDV が常設の試験機器として用いられ, 水槽の外からレーザー光を流場に照射することにより流速を計測し, 流場に無接触で影響を与えないという LDV の長所が最大限に生かされている。しかしキャビテーション水槽で船体とプロペラ干渉の精密な実験をするためには, 船の伴流を正確に再現する必要がある。そのためには曳航水槽で伴流を計測し, そのパターン (あるいは必要に応じて推定した実船のパターン) を実現するようにメッシュを製作, 修正し, キャビテーション水槽に設置する作業が必要である。また当研究所のキャビテーション水槽のように, 模型船を水槽内に直接取り付けると

が可能な大規模施設では, メッシュ製作は不要であるが, 上壁面が個体壁であるため流場の重要な要素である自由表面が無く, 制限水路影響も無視できないことを考慮すると, 曳航水槽の伴流を忠実に再現することは困難である<sup>7)8)</sup>。このように伴流分布の実現に制約の多いキャビテーション水槽に対し, 曳航水槽は, 実際の船舶の航走状態における伴流分布を自然に実現できる特徴を有している。

曳航水槽でのプロペラなしの流場は, 一般に5孔ピトー管により計測されている。また同様の流場を LDV により計測した計測例として, Fry による船首付近の流場計測<sup>9)</sup>がある。それに対しプロペラが作動中の流場の計測は, 5孔ピトー管のように計測する流場そのものにセンサーを挿入する方法では困難であるが, LDV による計測であれば, その早い応答性と流場に無接触で影響を与えないという長所から, より高精度な計測が可能となる。

曳航水槽でのプロペラ作動中の船尾流場は, Kux<sup>4)</sup>らがプロペラ前方の流場を実船と模型船について LDV により計測し比較しているが, プロペラ後方の流場については述べておらず, 今後発達が予想される CFD (Computer Fluid Dynamics: 計算流体力学) の検証データとしては不十分であると思われる。著者等はすでに, 自動車運搬船 (PCC) の船尾流場について, LDV と5孔ピトー管による計測結果を比較し, LDV による計測方法の有効性を検証した<sup>10)</sup>。さらに前記 LDV の計測距離を 500mm に拡大した2次元LDVにより, 自航試験状態における模型船船尾に LDV システムを搭載し, プロペラ後方流場を計測した<sup>11)</sup>。しかし, その模型船搭載型 LDV による流場計測方法は, トラバースによる模型船姿勢の変化が安定するまで時間がかかるなど実用面から問題があった。今回の実験では, 曳航水槽において模型船を, CFD 計算も試みられている満載トリム無しの状態で曳引車に固定し, 作動中のプロペラ前後の船尾流場を LDV により計測した。

対象の模型船は, 実船計測など数多くの計測データがある<sup>12)13)14)</sup>, 運輸省航海訓練所練習船「青雲丸」の模型 (長さ6.687m) とした。計測断面としてプロペラ前後の3断面を取り, プロペラが作動している状態およびプロペラ無しの状態の2状態で計測し, 平均流速分布, および流れの乱れ度の分布を求めた。特にプロペラ回転中の流れでは, 流れの乱れ成分の中には船体の伴流による乱れと, 回転するプロペラ翼による変動がある。そこでプロペラ翼数に伴う周期的な変動流を求めた。それらの

解析結果について報告する。

2. 計測方法

曳航水槽における LDV 計測方法は、模型船船体に透明な窓を作り、その窓から光を流場に照射して模型船内部から計測する方法と、船体外側の水中に置かれた

LDV プローブから計測する方法がある。模型船内部から計測する方法は、流場は無接触で影響を与えないという LDV の長所を最大限に生かせるが、船尾など船体形状が複雑な部分では窓が曲面となり、レーザー光の屈折などの理由から計測がかなり困難である。プローブを用いて船体外側から計測する方法は、計測する箇所を任意

Table 1 LDV Technical Specifications

| LDV Type             | DANTEC model 60X11         |
|----------------------|----------------------------|
| Velocity Components  | 2D                         |
| Probe diameter       | 60mm                       |
| length               | 250mm                      |
| weight               | 1.1Kg                      |
| Side-looking capsule | 72x374mm                   |
| weight               | 3.5Kg(capsule)             |
| Beam spacing         | 38mm                       |
| Beam diameter        | 1.4mm                      |
| Focal lengths in air | 400mm                      |
| Fiber length         | 10m                        |
| Laser wave lengths   | 488/514.5nm<br>(Argon-ion) |
| Measuring volume     |                            |
| diameter             | 0.2mm                      |
| length               | 4.1mm                      |

LDV Set-up

LDV Probes linked by Optical Fibers  
in the Water

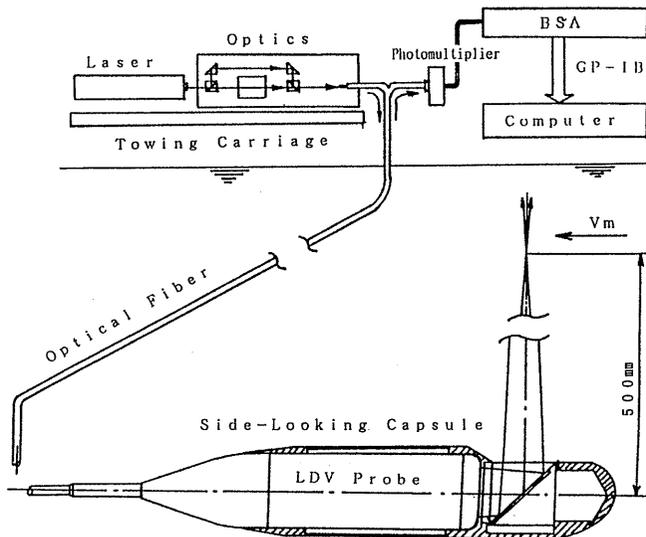


Fig. 1 Composition of LDV System

に選ぶことが出来るが、水中に置かれたプローブが流れに影響を及ぼすことを考慮しなければならない。今回は回転しているプロペラの近傍である船尾流場を計測するため、船体外側から計測する方法を採用した。以下に今回使用した曳航水槽用 LDV およびシーディングシステムについて述べる。

## 2.1 曳航水槽用 LDV

本計測に使用した曳航水槽用光ファイバ LDV (DANTEC 60X11 型) は文献11)に掲載したものと同様であるが、その仕様を Table1 に示す。今回使用した LDV システムは Fig.1 に示されるように、プローブと曳引車上の LDV が長さ10mの光ファイバケーブルにより接続されている。それによりこの LDV の水中部分が軽量小型となり、さらに配置の自由度が増すなどの特徴を有している。レーザ光線の照射方向をプローブの先端で90度変更するため、頭部にプリズムをセットした Side-Looking カプセルを使用した。カプセル中心から計測点までの距離は水中 500mm であり、カプセル直径 70mm の約7.1倍である。そのためプローブによる計測点への速度影響は、同じ断面形状の2次元円柱のポテンシャル計算によると約2%であるが、実際は

3次元形状であり、さらに小さいと思われる。

水槽曳引車にトラバース装置を搭載した場合の配置を Fig.2 および Fig.3 に示す。トラバース装置の総重量 (プローブ、カプセルおよびそれらのサポートを含む) は、対象模型船 (長さ 6 m, 排水量 1 t) に搭載することを考え、170kg と軽量化に努力したため剛性が低くなり、それによりプローブが振動し、計測結果に影響を与えている可能性がある<sup>11)15)</sup>。その影響については第4章に詳述する。

今回の計測においては、Fig.4 に示すように、先ず模型船左舷側 (プロペラ横方向) から模型船長さ方向速度成分  $V_x$  および上下方向速度成分  $V_z$  を計測し、次にプローブなどの配置を変更して、模型船下方向から  $V_x$  および幅方向速度成分  $V_y$  を計測した<sup>15)</sup>。計測した流場の再現性は、2度計測される  $V_x$  を比較することで確かめられる。

LDV により得られたドップラバースト信号は、BSA (Burst Spectrum Analyzer) を使用し、バーストモードによりドップラ周波数に変換される。ここで使われる計測値あるいは速度成分は、このドップラ周波数に較正係数を乗じたものである。較正係数は、プローブのフロントレンズの焦点距離と、計測点における2本のレー

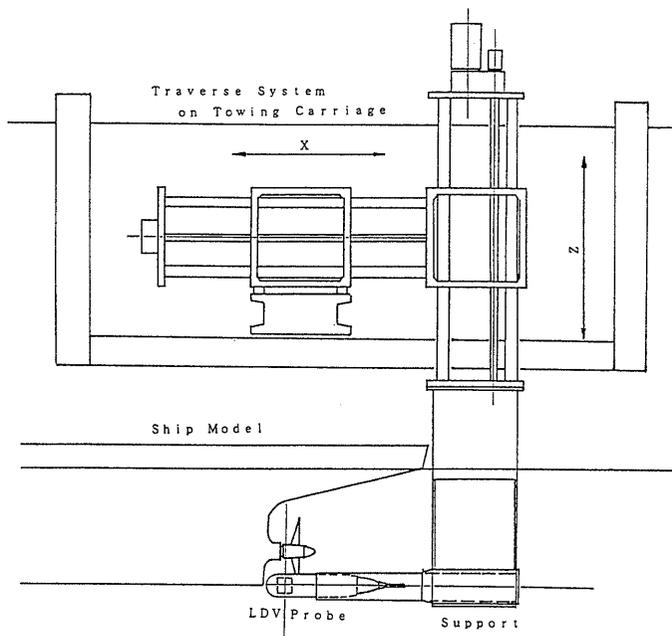
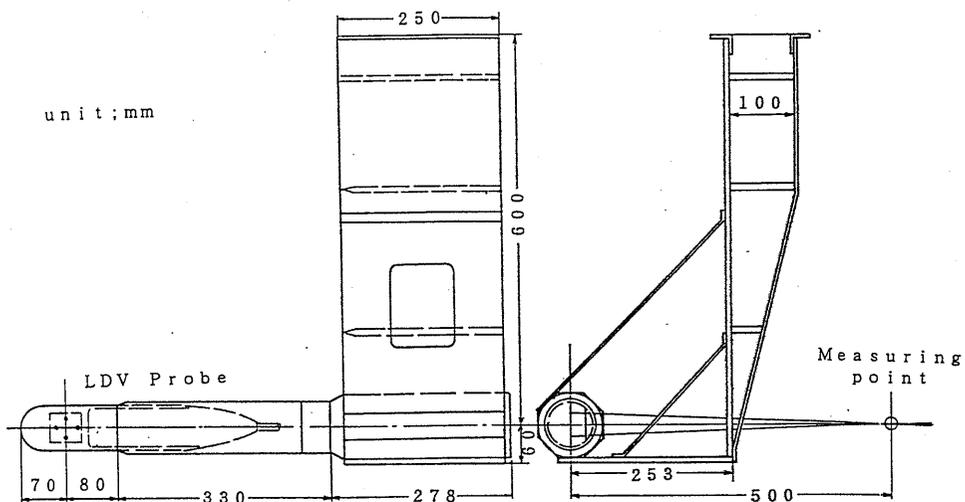
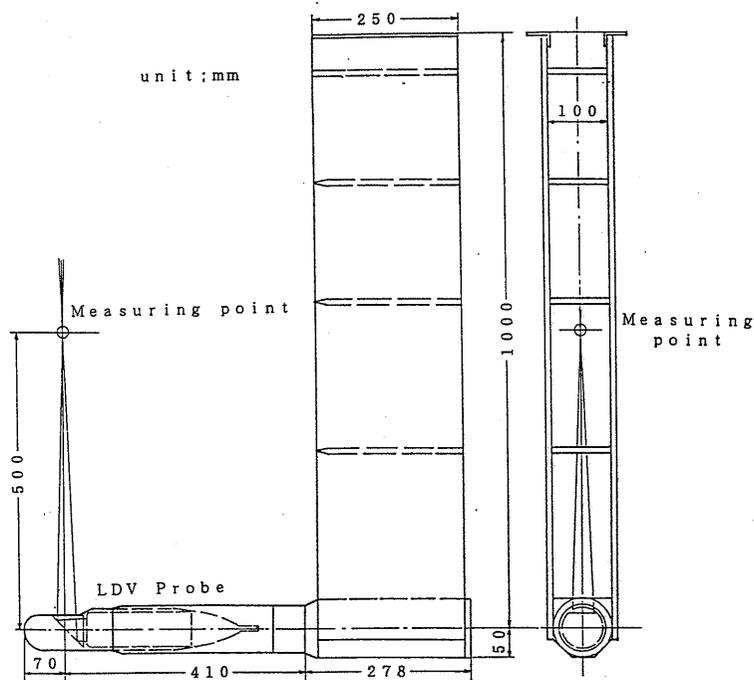


Fig. 2 Model Ship, Traverse System and LDV Probe



Support A to measure  $V_x$  and  $V_z$

Fig. 4(a) Set-up for LDV Measurement



Support B to measure  $V_x$  and  $V_y$

Fig. 4(b) Set up for LDV Measurement

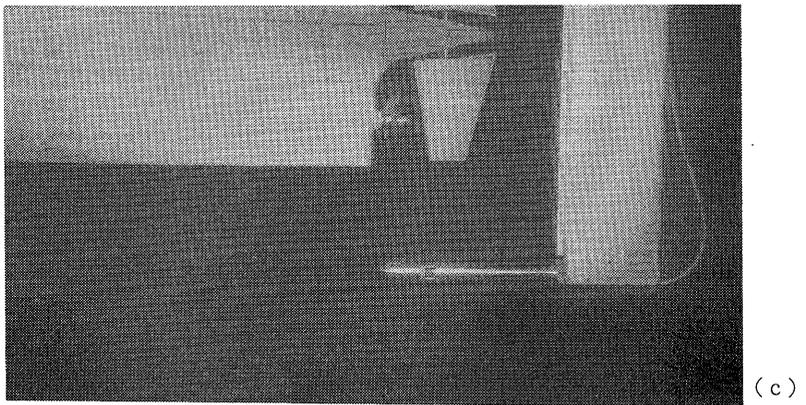
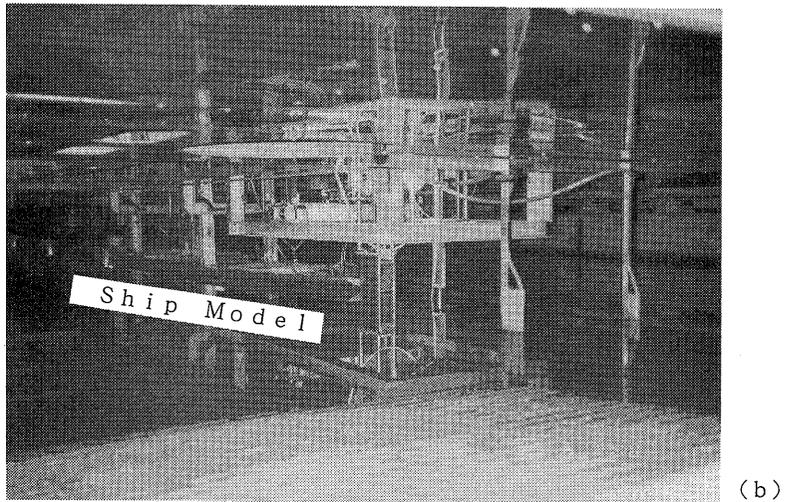
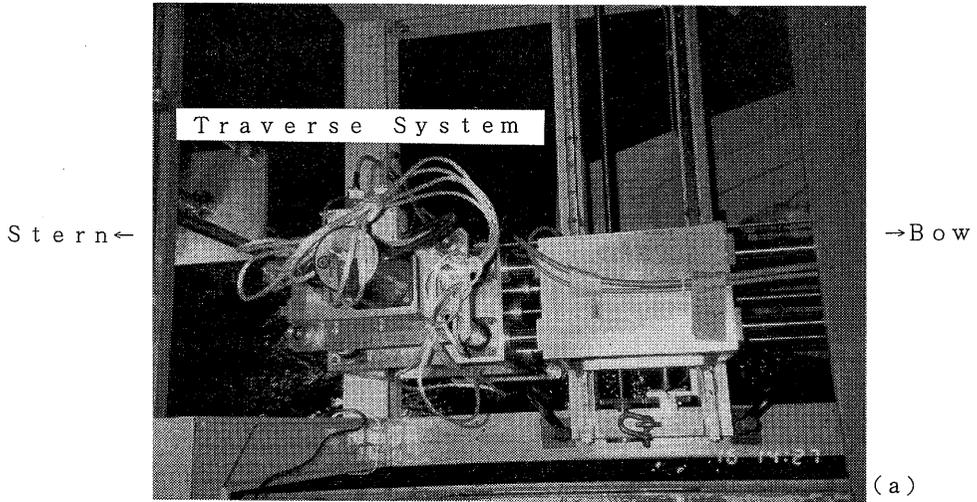


Fig. 3 LDV Measuring System

ザビームによる交差角によって決定される。計測前に焦点距離の計測を試みたが十分な計測精度が得られなかったため、今回の計測ではカログ値である空気中の焦点距離 400mm を採用した。

LDV による速度計測値の精度は文献(11)に述べているが、計測器のカatalog性能から求めた誤差は、校正係数では $\pm 0.5\%$ およびドップラ周波数では $\pm 0.1\%$ である。この他に実際の計測データには、シーディングの流れに対する影響および光学的ノイズの影響などが誤差として追加されるが、平均値から標準偏差の4倍以上はなれた

計測値は明らかにノイズであると判定し、計測データから除去した。最終的に、繰り返し試験から推定される計測誤差は1%程度であった。またプロベラの位相情報を基にした解析に使用した計測開始からの経過時間の精度は、BSA の性能によって定まり、誤差 $\pm 0.021\text{msec}$ であった。

## 2.2 シーディングシステム

LDV による計測では、流場にレーザー光を散乱反射する微細な粒子が必要である。しかし通常の曳航水槽の状

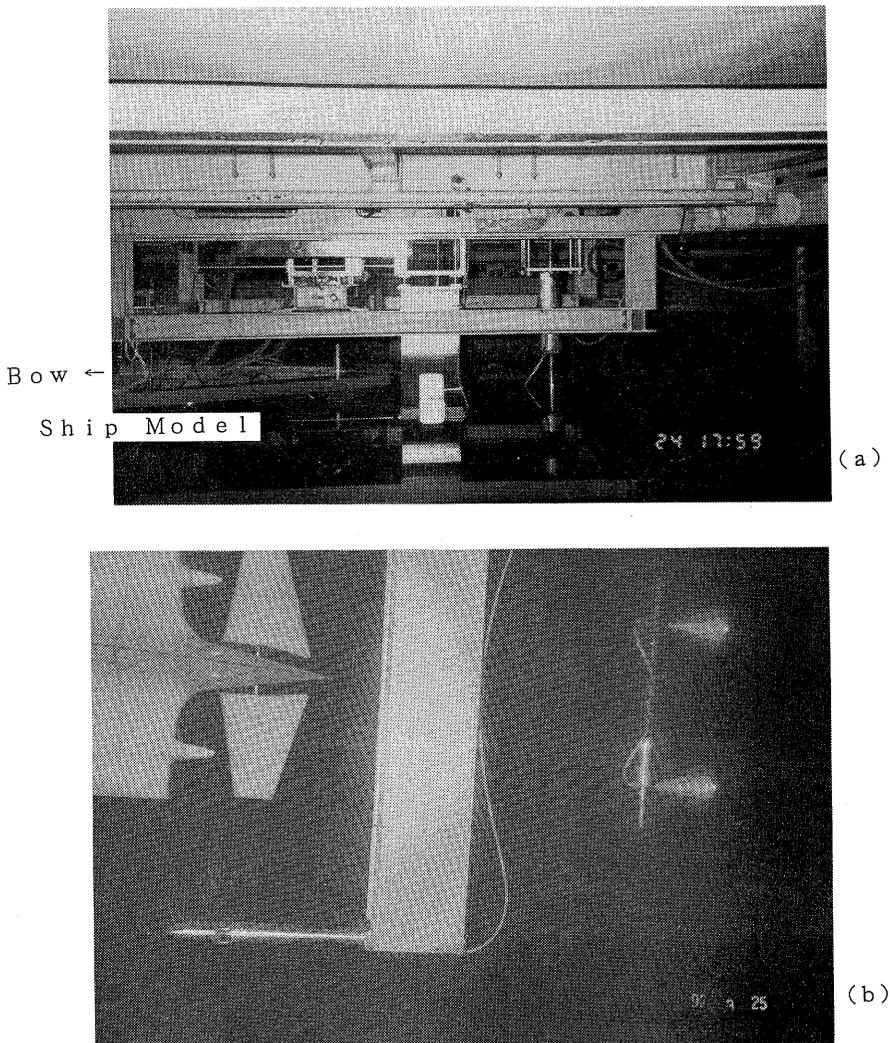


Fig. 5 Seeding System

態では、レーザービームの交差位置を通過する光散乱粒子の割合が毎秒2〜3個と少ない。そのため1航走で計測できるデータ数が少なく、計測時間がかかり非能率的である。また毎秒2〜3個では、流速変動など計測したい現象の流れを解析するには、データの密度が不十分である。そのためシーディングが必要となるが、本来の計測目的からすると出来る限り流れへの影響を少なくしなければならない。

今回の計測では、この相反する要求を満たすため以下のようなシーディングを行った。シーディングの検討項目としては、材料、大きさ、形状、濃度、光の反射能、親水性、水中分布、散布方法および流場に対する影響などがある。シーディング材料は、粒径 $32\mu\text{m}$ 以下のアルミニウム粉末を水槽水と混合して曳航水槽に散布した。アルミニウム粉末は、安価で効果があり光の反射能も塗料に比較すると数倍良く、比重が2.7あるため最終的に水槽底に沈澱するが、大きさが小さいことにより沈降速度は小さく7日から10日間水槽中に浮遊し、光散乱粒子として利用可能である。ただし親水性が悪く水との混合には界面活性剤などが必要であり、その形状は不定形である<sup>10)</sup>。

水槽水を出来る限り汚さず、効果的なシーディングを実施するために重要な項目は散布方法である<sup>10)</sup>。今回用いたシーディングシステムの概要を Fig.5 に示す。模型船を曳引車と共に走行させ計測した後、出発位置への復行時に船尾後方へ大型ノズルによりシーディングを行った。それにより流場への影響を最小に押さえ、船体による攪拌効果も期待できる。その大型ノズルは直径150mmの円錐型であり、300個の穴が開けてある。シーディングは復行時に行うため、その回数は模型船の航走回数に等しいが、混入するアルミニウム粉末の量は、2〜3日間の単位時間当たり計測データ数(Data rate)を参考にして、Data rateが一定量に到達した後は徐々に減量し調整することにより、不必要なシーディングを行い水槽水を汚すことを避けた。この散布方法によるシーディングの効果は、第4章で説明する。

### 2.3 曳航水槽におけるLDV利用の問題点<sup>10)</sup>

曳航水槽用LDVシステムは、曳引車上に常設する計測器では無いため、実験ごとに移動、搭載そして撤去を繰り返すことになる。移動毎の光学系の調整作業を少なくするため、レーザー装置のベンチを木製架台で補強した。

レーザー光源装置はLDVの仕様から4W水冷アルゴ

ンレーザーとなり、8KVAの電力と毎分20リットルの冷却水が、走行する曳引車上で必要である。冷却水は水槽水を使用し、曳引車と水槽間をポンプにより循環させた。この方式では、水槽水の温度が $10^{\circ}\text{C}$ の場合、レーザーからの排水の温度が $40^{\circ}\text{C}$ になり、この温排水を水槽に戻すと、10時間連続して使用した場合、水槽全体の温度上昇は $0.1^{\circ}\text{C}$ であり、継続して数週間実験を繰り返していると、水槽水の温度上昇がかなり大きくなる可能性もある。しかし今回の計測は4月から5月であるため、夜間に気温が下がることが期待できる。さらにこのLDVによる温度上昇は、日中の温度上昇による水槽水の温度上昇に比べて無視できるほど小さいことが、年間の水槽水の温度変化から予想される。

レーザー冷却水の取水および排水位置は、模型船への影響を少なくするため、水槽壁近くに設置すべきであるが、作業効率を考慮してトリミングタンクにおいてLDVの調整、レーザー光による位置合わせを行うため、模型船の船尾から2〜3m後方とした。

なおLDVを曳航水槽で常時使用する場合には、年間の大きな温度変化( $10^{\circ}\text{C}/\text{日}$ ,  $20^{\circ}\text{C}/\text{年}$ )と高湿度(75〜90%)に対する対策が必要となる。温度および湿度の影響はおもに結露によるLDV光学系の性能低下として現れる。水槽曳引車上では、LDV光学系の陸上部分に対し扇風機により終日送風し、LDVの結露を防止した。防水対策は水中に設置するLDVプローブに対し重点的に行った。それはLDVプローブを分割する部分のOリングの直径を太くすること、Oリングおよび接合ネジ部分にシリコングリースを均一に塗ることなどである。

### 3. 試験状態

試験はすべて三鷹第3船舶試験水槽において実施した。

Table 2 Principal Particulars of Ship Model

|                   |                    |       |
|-------------------|--------------------|-------|
|                   | $L_{FP}$ (m)       | 6.444 |
| Load Water Length | $L_{WL}$ (m)       | 6.687 |
|                   | B (m)              | 0.984 |
| Draught           | d (m)              | 0.359 |
| Displacement      | ( $\text{m}^3$ )   | 1.323 |
| Wetted Area       | S ( $\text{m}^2$ ) | 8.016 |
|                   | CB                 | 0.576 |
|                   | CP                 | 0.610 |
|                   | CM                 | 0.945 |
|                   | LCB (% $L_{FP}$ )  | 0.66  |
|                   | L/B                | 6.563 |
|                   | B/d                | 2.752 |

Table 3 Principal Particulars of Model Propeller

|                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| Propeller Type         | Conventional Propeller |
| Diameter $D_p$ (m)     | 0.22095                |
| Boss Ratio             | 0.1972                 |
| Pitch Ratio            | 0.9500                 |
| Expanded Area Ratio    | 0.6500                 |
| Mean Blade Width Ratio | 0.2465                 |
| Blade Thickness Ratio  | 0.0442                 |
| Blade Section          | Modified MAU           |
| Number of Blades       | 5                      |
| Rake Angle (deg.)      | 6                      |
| Skew Angle (deg.)      | 10.5                   |

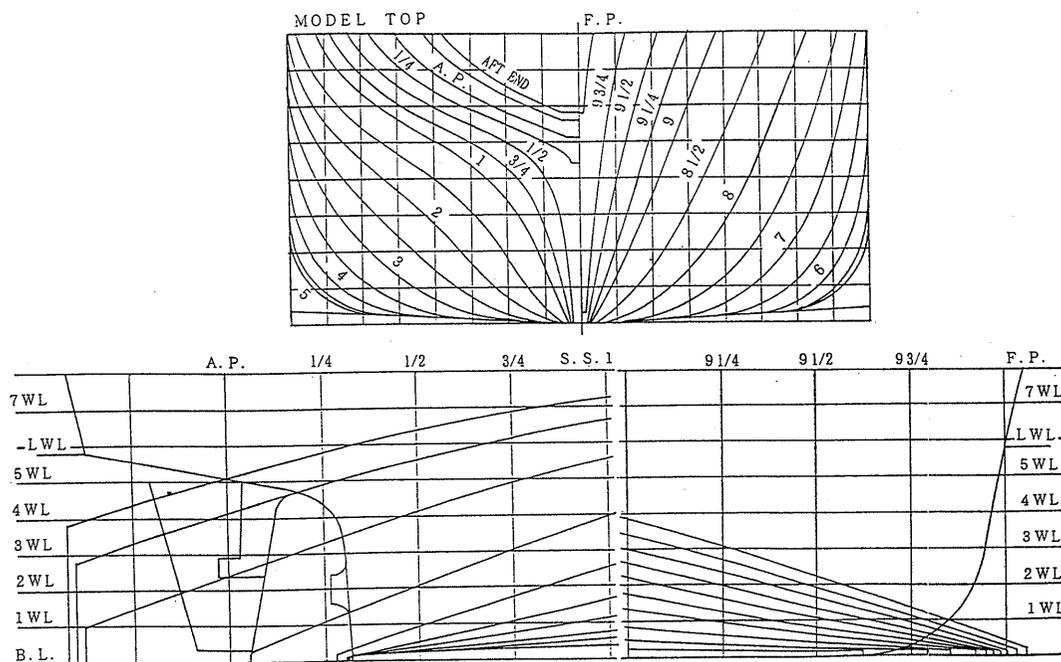


Fig. 6 Body Plan, Stern and Stem Profiles

対象の模型船および模型プロペラの主要目を Table 2 および Table 3 に、模型船の正面線図および船首尾形状を Fig. 6 に、船尾の写真を Fig. 7 に示す。模型船は、トリム無しの満載状態で水槽曳引車に固定した。それは、プローブの影響により模型船の姿勢が変化することを避けるため<sup>15)</sup>、および一般に船体まわりの CFD 計算がトリム無しの満載状態で計算されることが多いためである。そのため通常の抵抗試験状態あるいは自航試験

状態（トリム自由）とは、模型船の姿勢などが異なる。曳引車に固定した模型船の状況を Fig. 8 に示す。模型船速度  $V_m$  は、1.619m/sec ( $F_n=0.20$ ) とした。プロペラ回転数  $np$  は、自航試験の解析から得られた  $F_n=0.20$  のプロペラ回転数  $np=502\text{rpm}$  ( $np=8.367\text{rps}$ ) を採用した。

流速分布を計測した断面位置は、Fig. 9 に示すプロペラ前後の断面 1、断面 2 および断面 3 である。断面 2

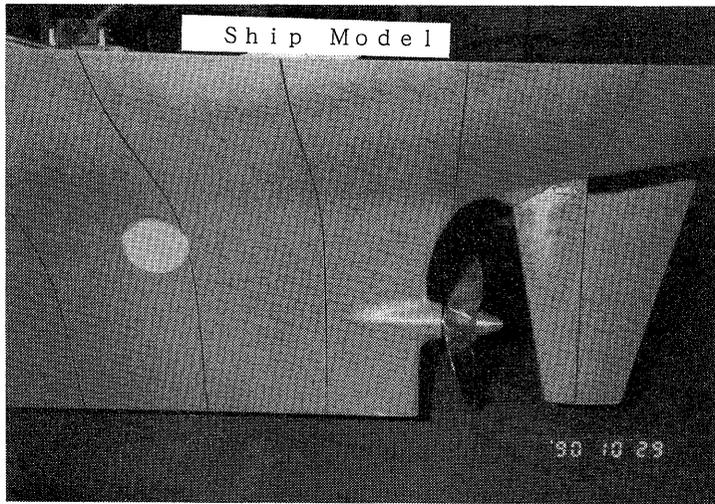


Fig. 7 Stern Profile

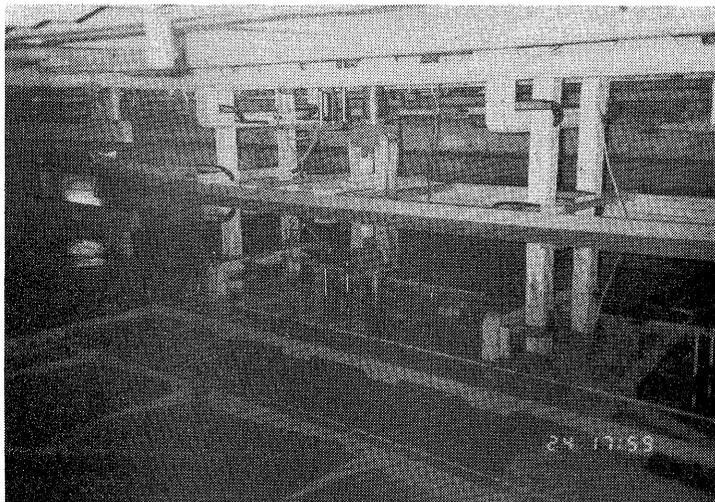


Fig. 8 Model Ship fixed at Towing Carriage

は、プロペラ上流で極力プロペラに近い位置とした。計測の便宜上座標系は、模型船長さ船首方向をX、幅（左舷）方向をYおよび上方向をZとする左手座標系とした。YZ断面の原点は、プロペラシャフト中心、X方向の原点はA.P.（舵軸中心）とした。YZ断面では、一辺240mmの正方形の範囲を、各20mm毎に計測し、必要な部分はさらに細かく計測した。

計測はTable 4に示すような実施状態において行われた。ただし次に述べるように、計測していない部分（欠落している部分）がある。断面1と断面3では、LDV計測を2回行い（ $V_x$ ,  $V_z$ ）と（ $V_x$ ,  $V_y$ ）を計測

しているが、断面2では、（ $V_x$ ,  $V_z$ ）の計測のみである。さらに断面2では、プロペラボス周辺にてレーザー光が回転するプロペラ翼に遮られたため、中心付近は計測不可能であった。模型船左舷側（プロペラ横方向）から計測した $V_x$ および $V_z$ の場合は、プロペラボスの影となる右舷側が計測できなかった。同様にプロペラ下方向から計測した $V_x$ および $V_y$ の場合は、プロペラボスの影となるボスの上側が計測できなかった。

プロペラ無しの状態の断面1においては、参考のため5孔ピトー管による計測も行った。

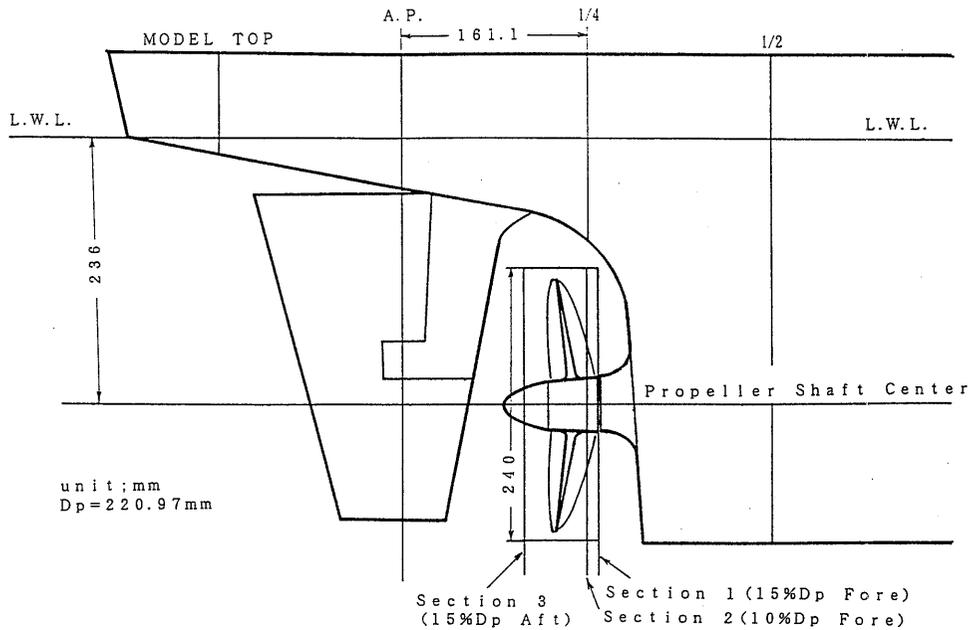


Fig. 9 Measuring Sections

Table 4 Experimental Conditions

| Ship model conditions                    | Measuring Sections                             | Velocity components |
|--|--|---------------------|
| LDV to Measure $V_x, V_y, V_z$           |  |                     |
| Without Propeller                        | Section 2 ( $X=159.7\text{mm}, -10\%D_p$ Fore) | $V_x, V_z$          |
| Without Propeller                        | Section 3 ( $X=104.5\text{mm}, +15\%D_p$ Aft)  | $V_x, V_y, V_z$     |
| With Propeller                           | Section 1 ( $X=170.7\text{mm}, -15\%D_p$ Fore) | $V_x, V_y, V_z$     |
| With Propeller                           | Section 2 ( $X=159.7\text{mm}, -10\%D_p$ Fore) | $V_x, V_z$          |
| With Propeller                           | Section 3 ( $X=104.5\text{mm}, +15\%D_p$ Aft)  | $V_x, V_y, V_z$     |
| 5H-Pitot Tube to Measure $V_x, V_y, V_z$ |  |                     |
| Without Propeller                        | Section 1 ( $X=170.7\text{mm}, -15\%D_p$ Fore) | $V_x, V_y, V_z$     |

Note: "X" is distance from A.P. to a measuring section.  
 "Dp" is the model propeller diameter. ( $D_p=220.95\text{mm}$ )  
 Distance from A.P. to propeller is 137.6mm.

#### 4. 計測結果

2.1節で述べたように、今回の計測では、模型船左舷側から ( $V_x$ ,  $V_z$ ) を、そして模型船下方から ( $V_x$ ,  $V_y$ ) を計測した。これら2方向からの計測における流場の再現性については、2度計測した  $V_x$  の平均流速値の差が約1%とほとんど一致したことにより確認した。それにより2回の計測から同時計測ではないが、速度3成分が計測された。 $V_x$  の平均流速分布は、同じ位置における模型船左舷側からと模型船下方からの計測結果がほぼ等しく、流速分布の Contour-curve も差がないので、模型船下方から計測した結果に、模型船左舷側から計測したプロペラボス上方の流速分布を組み合わせたものとした。同様に  $V_{yz}$  は2方向からそれぞれ計測された  $V_y$  と  $V_z$  の計測値を組み合わせて表現した。以上の状態で計測を行った結果を以下に示す。

なお今回の計測結果では、船体外側の水中に置かれたプローブから計測する方法によるため、水中に置かれたプローブが流場に与える影響が含まれていることと、水槽曳引車にトリム無し満載状態で模型船を固定したため、曳航水槽において行われている通常の抵抗試験状態あるいは自航試験状態とは、模型船の姿勢などが異なることが注意すべき点である。

##### 4.1 平均流速分布

###### 4.1.1 プロペラなし (Wake) の場合

プロペラなし (Wake) 状態の計測は、プロペラ作動中状態の計測結果と比較するために行った。今回の計測では計測データの信頼性を確保するため、および変動成分の解析を行うために、1計測点の計測データ数を1000~2000個とした。断面2における  $V_x$  速度成分の平均流速分布を Fig. 10 に、そして  $V_z$  速度成分の平均流速分布を Fig. 11 に示す。断面2における  $V_y$  速度成分は計測していない。断面3における  $V_x$  速度成分の平均流速分布を Fig. 12 に、 $V_y$  速度成分の平均流速分布を Fig. 13 に、そして  $V_z$  速度成分の平均流速分布を Fig. 14 に示す。図中の速度成分は、模型船速度  $V_m$  により無次元値にしている。 $V_y$  の流速分布は、右舷へ向かう流れを実線で、左舷へ向かう流れを破線で示している。 $V_z$  の流速分布は、上向きの流れを実線で、下向きの流れを破線で示している。2回の実験に分けて計測した  $V_y$  および  $V_z$  速度成分を合成して示したものが Fig. 15 の  $V_{yz}$  流速分布である。プロペラの前方向から後方へ  $V_x$  速度成分の流速分布を見ると、しだいに伴

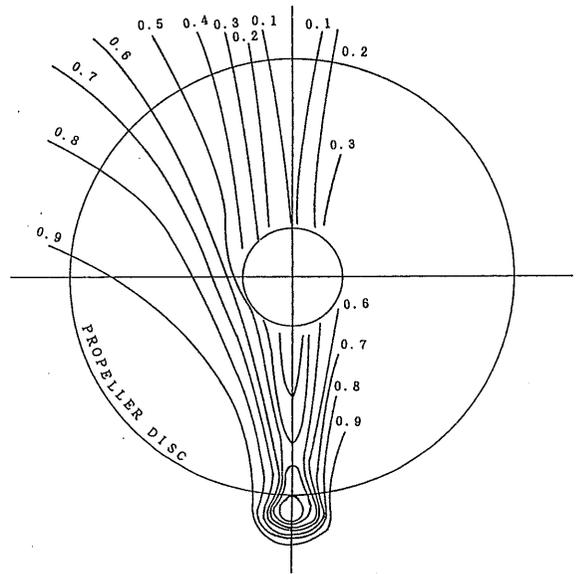


Fig. 10  $V_x$ -Component distribution at Section 2 without Propeller

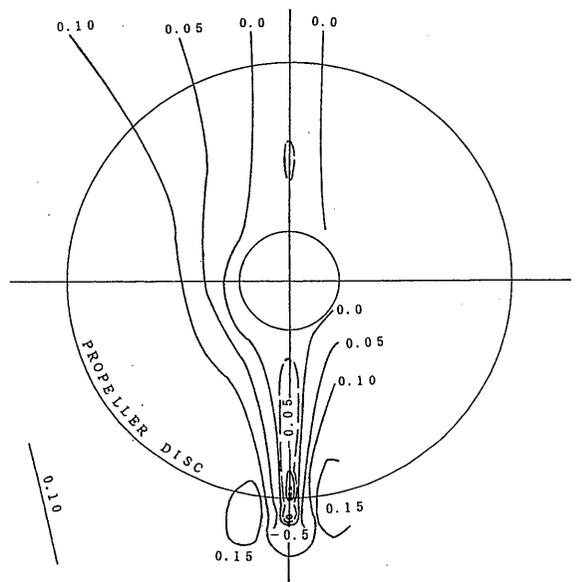


Fig. 11  $V_z$ -component distribution at Section 2 without Propeller

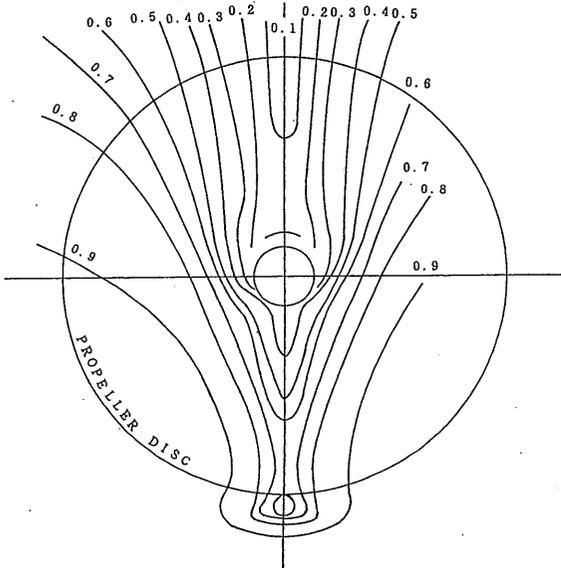


Fig. 12  $V_x$ -component distribution at Section 3 without Propeller

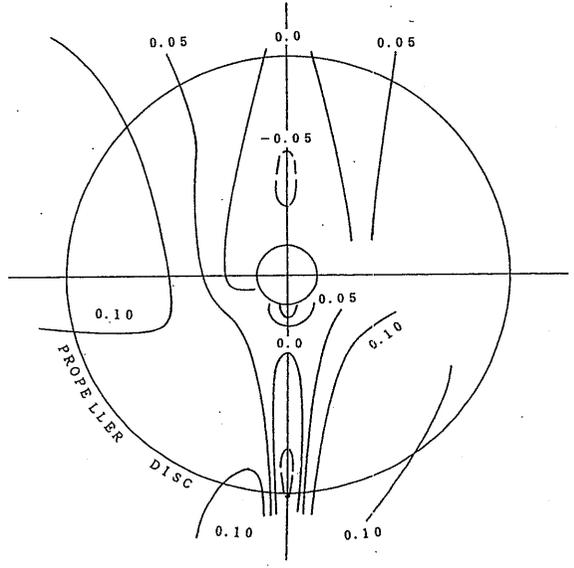


Fig. 14  $V_z$ -component distribution at Section 3 without Propeller

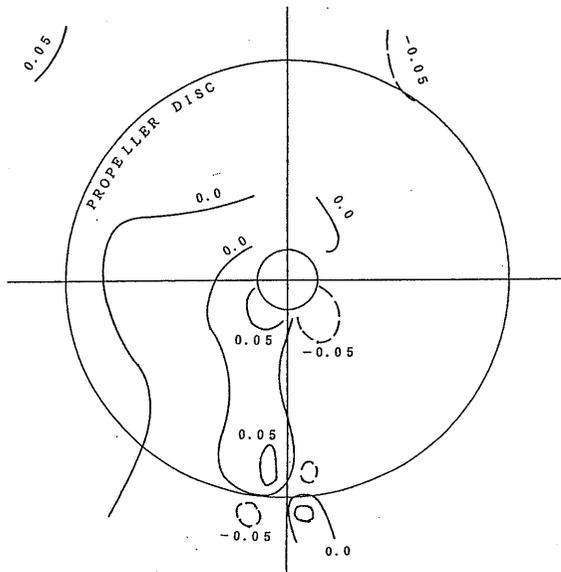


Fig. 13  $V_y$ -component distribution at Section 3 without Propeller

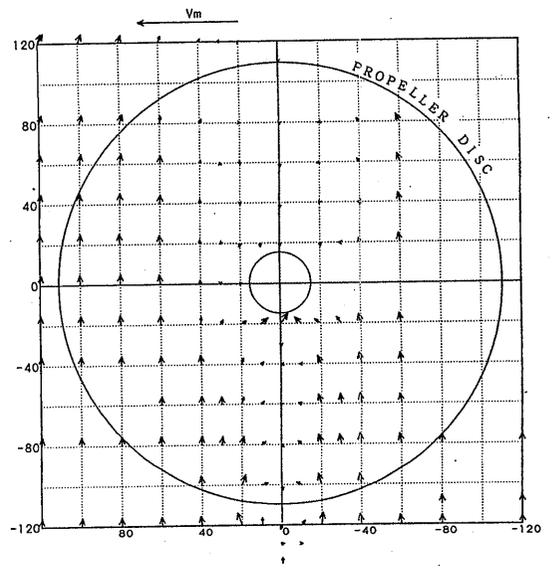


Fig. 15  $V_{yz}$ -component distribution at Section 3 without Propeller

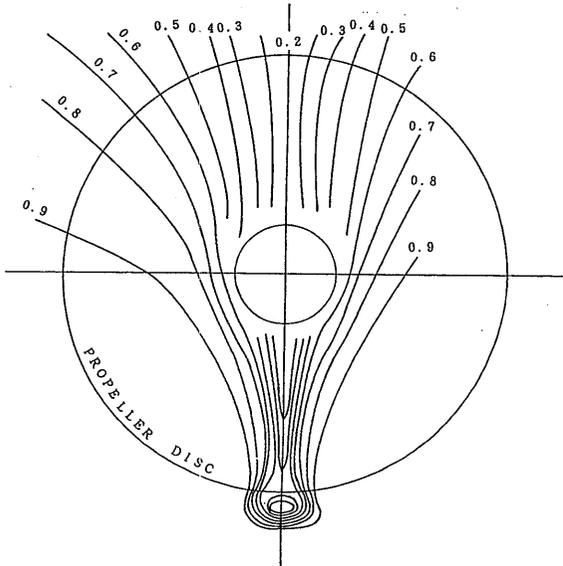


Fig. 16(a) Vx-component distribution at Section 1 without Propeller (Pilot-tube)

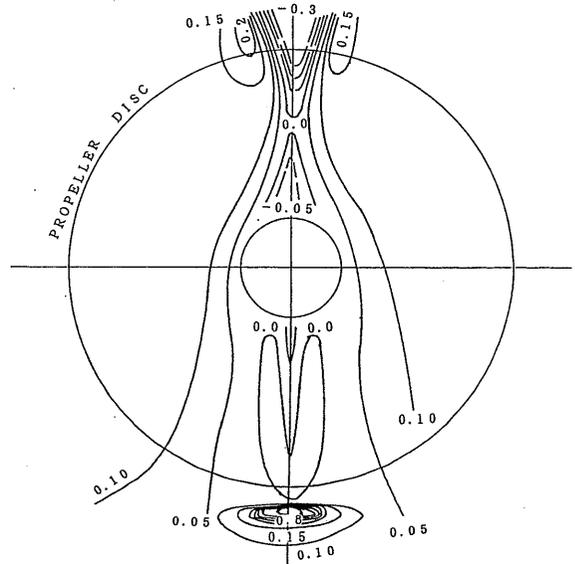


Fig. 16(c) Vz-component distribution at Section 1 without Propeller (Pilot-tube)

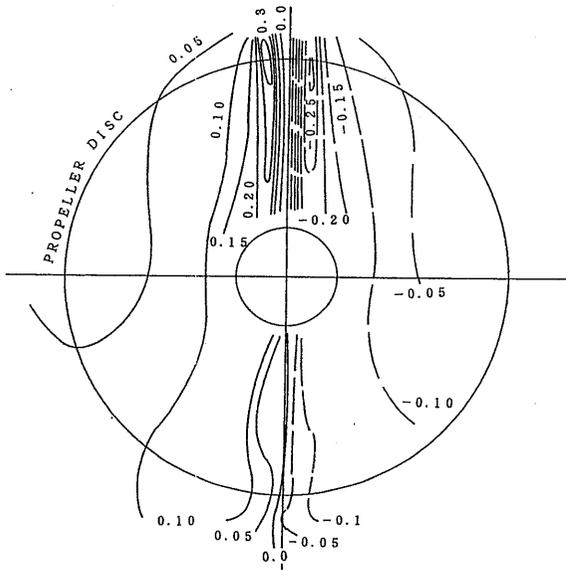


Fig. 16(b) Vy-component distribution at Section 1 without Propeller (Pilot-tube)

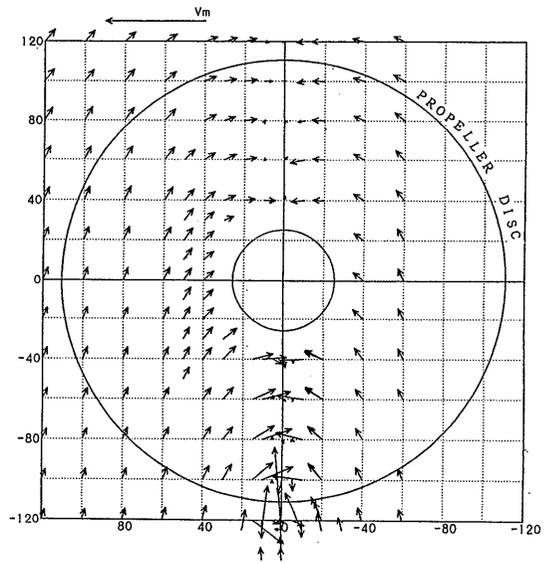


Fig. 16(d) Vyz-component distribution at Section 1 without Propeller (Pilot-tube)

流域が拡大していく様子がみられる。

断面1におけるLDVの計測結果が無いため、参考として5孔ピトー管により伴流分布を計測した。その計測結果をFig. 16に示す。ピトー管による断面1の $V_x$ 速度成分(Fig. 16(a))は、LDVによる断面2(Fig. 10)に比較してプロペラ直径 $D_p$ の3~5%ほど伴流領域が狭くなっている。

LDVによる伴流分布は5孔ピトー管によるその計測結果と比較した場合、以前から指摘してきたように、伴流領域が多少広く計測される傾向がある。言いかえると、5孔ピトー管による計測は、伴流の強いところで強い、弱いところでより弱い計測結果となる傾向がある<sup>10</sup>。模型船の船体から離れた流場および伴流の弱い流場において、5孔ピトー管による計測は実績もあり信頼して良いと思われる。しかし強い伴流の領域言い替えば乱れが大きく流向流速が大きく変動する流場では、5孔ピトー管の較正範囲を越えて計測している可能性も多く、LDVによる計測の方が信頼性がある。LDVと5孔ピトー管とでどちらがより正しい計測結果を与えるかという点については、今後さらに計測を積み重ねて検討する必要がある。

#### 4.1.2 プロペラ作動中の場合

曳航水槽でのプロペラなしの船尾流場は、一般に5孔ピトー管により計測されているが、プロペラ作動中の場合はピトー管をプロペラに接近させる危険も含めて困難である。LDVを使用すれば、その問題は解決される。以下にプロペラ作動中の平均流速分布について、LDVによる計測結果を示す。

プロペラ回転数 $n_p$ は、模型船速度 $V_m=1.619\text{m/sec}$ ( $F_n=0.20$ )における自航試験解析から求めたプロペラ回転数 $n_p=502\text{rpm}$ ( $n_p=8.367\text{rps}$ )とした。プロペラ作動中の平均流速分布をFig. 17からFig. 26に示す。プロペラなしの場合と同様に、計測データの信頼性を確保するため、および変動成分の解析を行うために、1計測点の計測データ数を1000~2000個とした。図中の速度成分は模型船速度 $V_m$ により無次元値により示している。なお伴流分布内の位置を示すために、原点をプロペラシャフト中心とし、模型船の後方からみて右回りで、プロペラ真上を $\theta=0\text{deg}$ .とする角度を使用する。

##### (1) $V_x$ 速度成分流速分布

プロペラ面全領域の $V_x$ 速度成分の計測データが模型船下方からは計測できなかったため、プロペラボス上側の流速分布は模型船左舷側から計測した $V_x$ 速度成

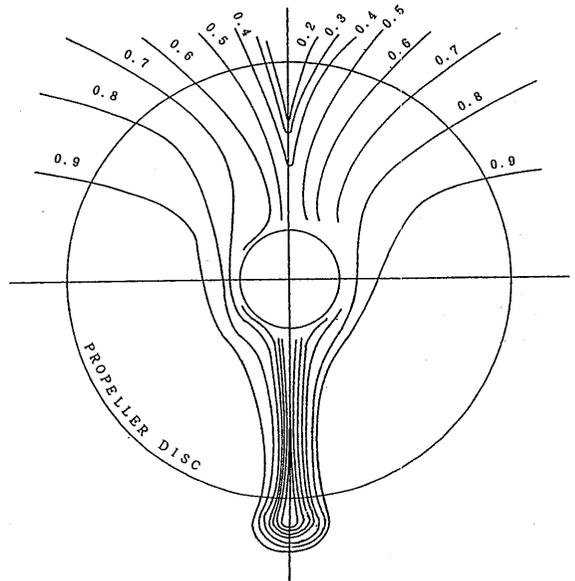


Fig. 17  $V_x$ -component distribution at Section 1 with Propeller

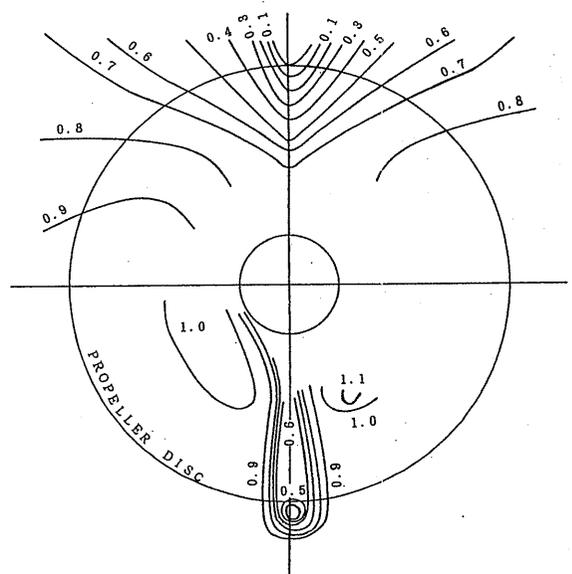


Fig. 18  $V_x$ -component distribution at Section 2 with Propeller

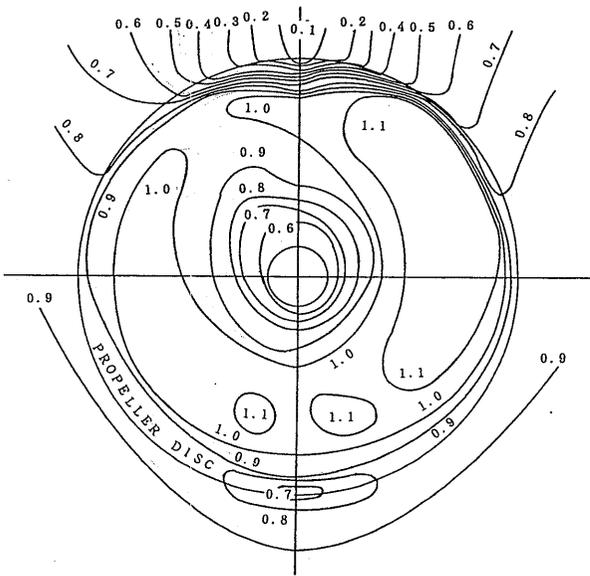


Fig. 19  $V_x$ -component distribution at Section 3 with Propeller

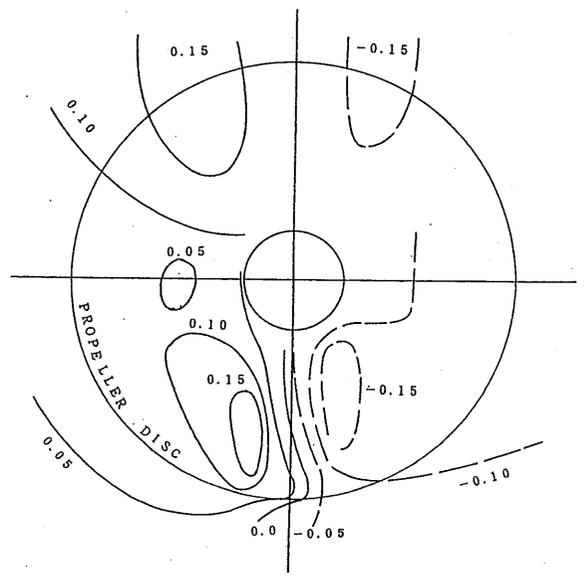


Fig. 20  $V_y$ -component distribution at Section 1 with Propeller

分の計測結果を使用した。それ以外の領域の流速分布は、模型船下方から計測した  $V_x$  速度成分の計測結果を使用した。断面1における  $V_x$  速度成分の平均流速分布を Fig. 17 に、断面2における同様の流速分布を Fig. 18 に、そして断面3における同様の流速分布を Fig. 19 に示す。

断面2 (Fig. 18) の  $V_x$  速度成分を見ると、断面1の速度分布 (Fig. 17) に現れていない  $V_m$  を越える速度領域が、左舷プロペラボスの斜め下の半径  $0.5R$  以内に現れている。断面3 (Fig. 19) の  $V_x$  速度成分は、プロペラにより加速されてプロペラ半径  $0.4R$  から  $1.0R$  のドーナツ状の領域が  $V_m$  より早くなっている。その流速は円周方向に一様ではなく、右舷側 ( $\theta=15\sim 135\text{deg.}$ ) が  $V_m$  より  $10\sim 18\%$  加速されているのに対し、左舷上部 ( $\theta=315\sim 340\text{deg.}$ ) の領域では  $V_m$  より  $0\sim 5\%$  遅くなっている。また、プロペラによる加速の大きさは、プロペラ作動中の  $V_x$  (Fig. 19) とプロペラなしの  $V_x$  (Fig. 12) の差を取ると、右舷側においては  $V_m$  の  $20\sim 60\%$  であり、左舷上部においては  $V_m$  の  $40\sim 50\%$  である。このように断面3の  $V_x$  は非左右対称の流れとなっている。これは、船尾縦渦によって生じる面内速度成分の影響により、プロペラ翼の迎角が左舷で小さく右舷で大きくなり、結果として発生するスラストが左舷で小さく右舷で大きくなるためと考えられる。

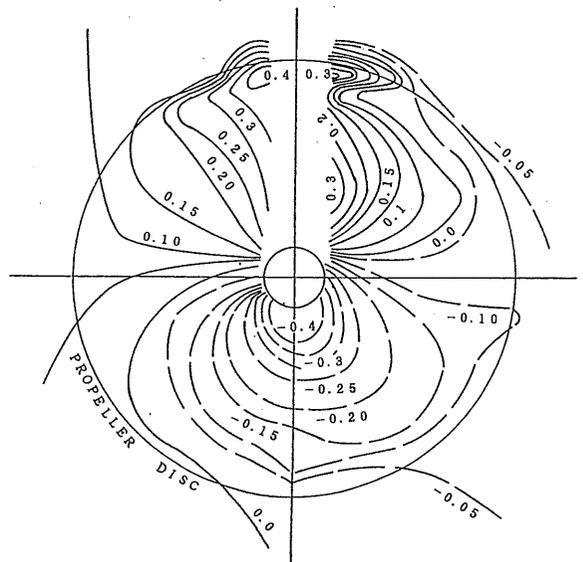


Fig. 21  $V_y$ -component distribution at Section 3 with Propeller

(2)  $V_y$  速度成分流速分布

模型船下方から計測した  $V_y$  速度成分の断面1における平均流速分布を Fig. 20 に、断面3における平均流速分布を Fig. 21 に示す。断面2における  $V_y$  速度成分は計測していない。 $V_y$  の流速分布は、右舷へ向かう流れを実線で、左舷へ向かう流れを破線で示している。断面1 (Fig. 20) の  $V_y$  速度成分が、船体中心を境にほぼ対称な外側から内側への流れが大部分であるのに対し、断面3 (Fig. 21) の  $V_y$  速度成分は、直前のプロペラによる右回りの回転流の影響によりプロペラ軸上部は右舷へ向かう流れ、プロペラ軸下部は左舷へ向かう流れが強い。後述する  $V_y$ 、 $V_z$  速度成分を合成してベクトル表示した Fig. 26 の  $V_{yz}$  流速分布にも同様の傾向がさらに見やすい形で表れている。

(3)  $V_z$  速度成分流速分布

模型船左舷側から計測した  $V_z$  速度成分の断面1における平均流速分布を Fig. 22 に、断面2における同様の流速分布を Fig. 23 に、そして断面3における同様の流速分布を Fig. 24 に示す。 $V_z$  の流速分布は、上向きの流れを実線で、下向きの流れを破線で示している。断面2 (Fig. 23) の  $V_z$  速度成分を見ると、プロペラボスの左舷側下部に、断面1の速度分布 (Fig. 22) に

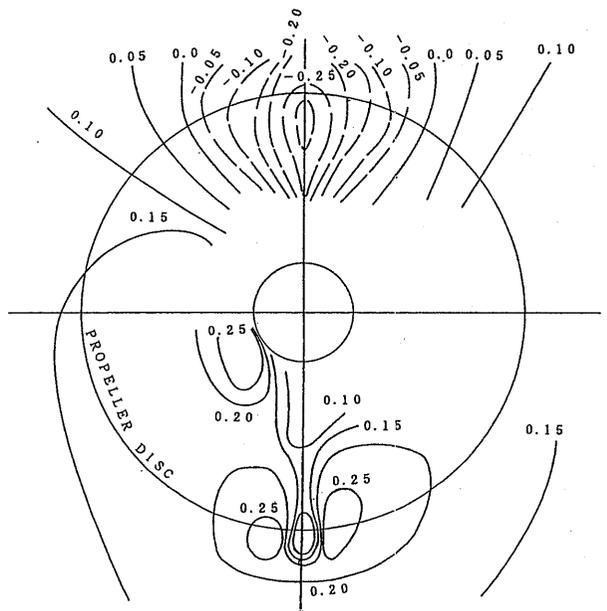


Fig. 23  $V_z$ -component distribution at Section 2 with Propeller

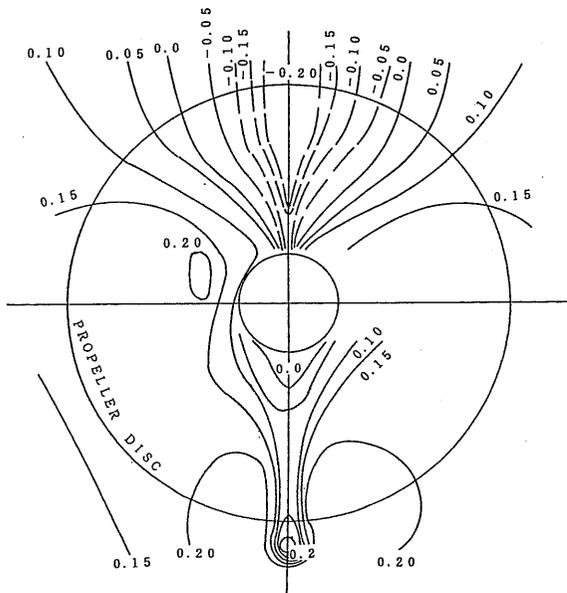


Fig. 22  $V_z$ -component distribution at Section 1 with Propeller

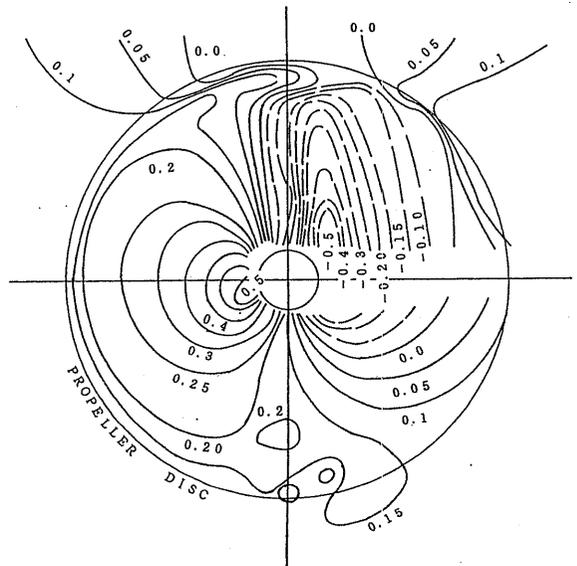


Fig. 24  $V_z$ -component distribution at Section 3 with Propeller

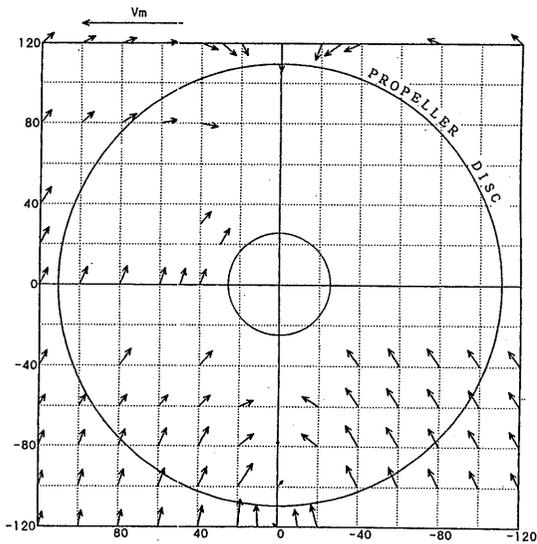


Fig. 25 Vyz-component distribution at Section 1 with Propeller

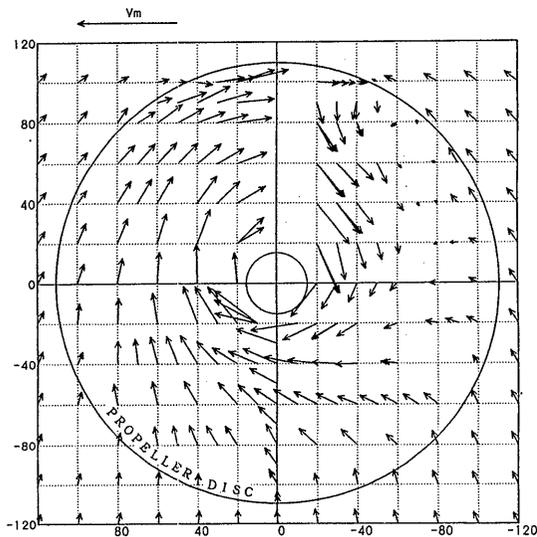


Fig. 26 Vyz-component distribution at Section 3 with Propeller

はない  $V_m$  の約30%の強い上向きの流れがある。断面3 (Fig. 24) の  $V_z$  速度成分は、船体中心線を境に左舷側が上向きの流れ、右舷側が下向きの流れとなっているのは断面1 (Fig. 22) と同様だが、プロペラの中心に近づくほど強い流れとなっている。プロペラ半径0.2 R あたりでは  $V_m$  の50%を越える強い流れも見られる。船体伴流による流入速度の影響は、プロペラ上部のプロペラ面の外側および  $Y=0\text{mm}$ ,  $Z=-120\text{mm}$  あたりを中心としたキールからの縦渦によるものが、わずかに見えるのみである。

#### (4) $V_{yz}$ 流速分布

$V_{yz}$  速度成分は、模型船下方から計測した  $V_y$  速度成分と、模型船左舷側から計測した  $V_z$  速度成分から合成した。 $V_{yz}$  速度成分の断面1における流速分布を Fig. 25 に、そして断面3における流速分布を Fig. 26 に示す。断面2における  $V_y$  速度成分を計測していないため、断面2における  $V_{yz}$  流速分布はない。断面1における流速分布の模型船右舷側上半部において、 $V_{yz}$  速度成分がないのは  $V_y$  速度成分を計測していない領域が多いためである。

断面1の  $V_{yz}$  流速分布 (Fig. 25) を見ると、5孔ピトー管によるプロペラなしの  $V_{yz}$  速度成分 (Fig. 18 (D)) よりも、プロペラ下半分の  $V_{yz}$  速度成分が  $V_m$  に対し15%程度、プロペラの誘導流により加速されている。断面3 (Fig. 26) の  $V_{yz}$  流速分布には、プロペラにより誘起された強い右回りの回転流が生じている。その回転流はプロペラ左舷側半面と右舷側上部中心よりが、 $V_m$  の30~60%と強い流れとなっている。この左右非対称性は、 $V_x$  速度成分の項 (4.1.2(1)) で述べたことと関連するが、船尾縦渦による面内速度成分にプロペラによる誘起速度の回転成分が重なり、面内速度成分が左舷で増速され、右舷で減速されることにより生じている。プロペラ中心近傍では、プロペラボスおよび翼の付け根付近からの渦による  $V_m$  の50~60%に相当する特に強い右回転の流れが発生している。またプロペラ面外側から中心へ向かう流れ (縮流) の大きさは、断面3 (Fig. 26) において  $V_m$  の10%程度である。

#### 4.2 Data rate の分布

LDV による計測値の信頼性を確認するため、そして流場の変動や乱れを解析する場合に十分なデータ密度が確保されているかどうかを確認するために Data rate の分布を検討した。Data rate とは、その計測データ数を計測時間で割ったものである。また実験時にシーディ

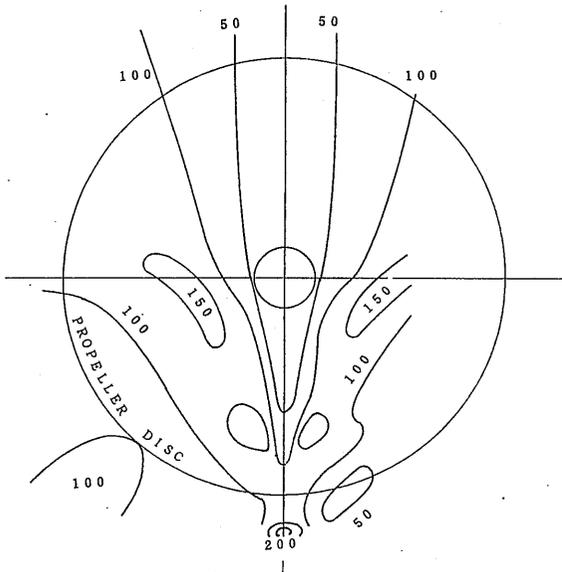


Fig. 27(a) Data rate of Vx-component at Section 3 without Propeller

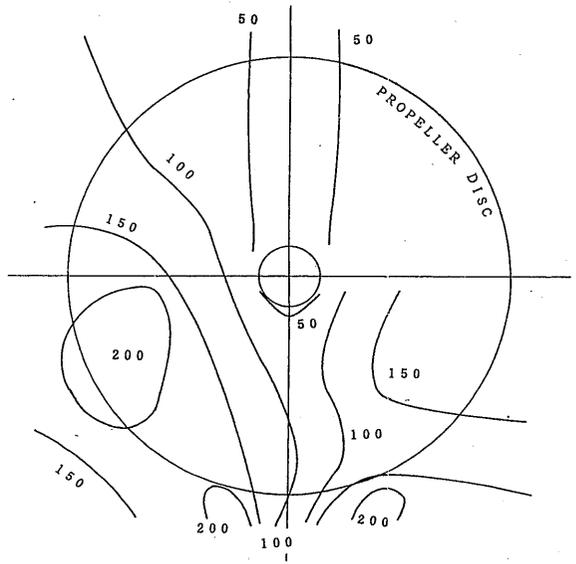


Fig. 27(c) Data rate of Vz-component at Section 3 without Propeller

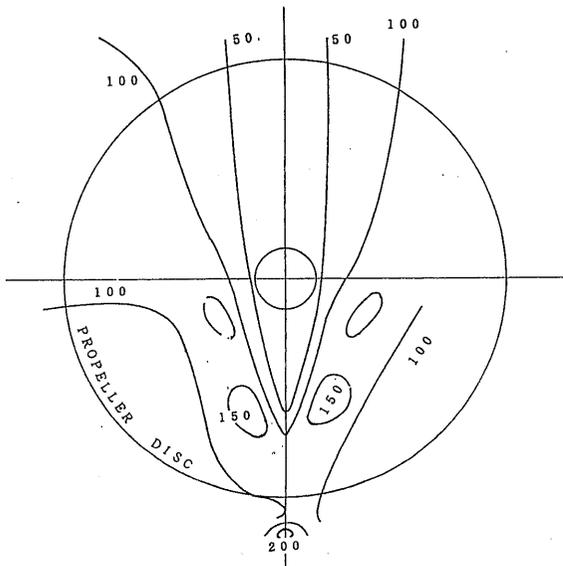


Fig. 27(b) Data rate of Vy-component at Section 3 without Propeller

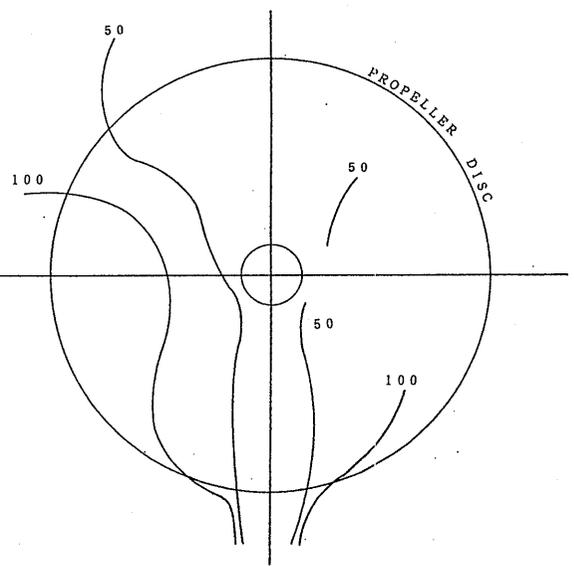


Fig. 27(d) Data rate of Vx-component at Section 3 without Propeller

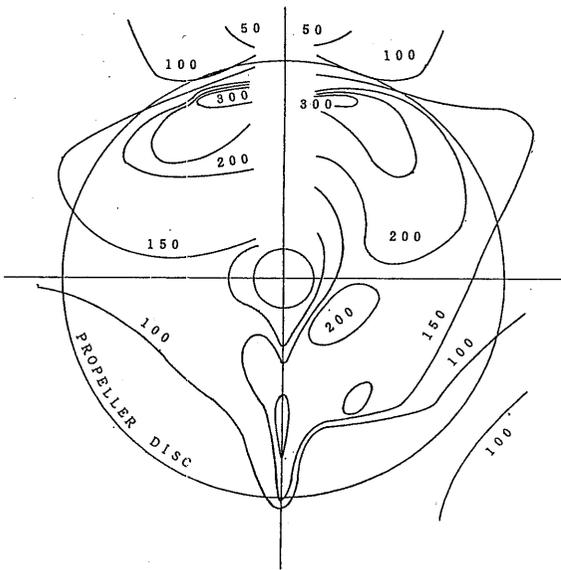


Fig. 28(a) Data rate of Vx-component at Section 3 with Propeller

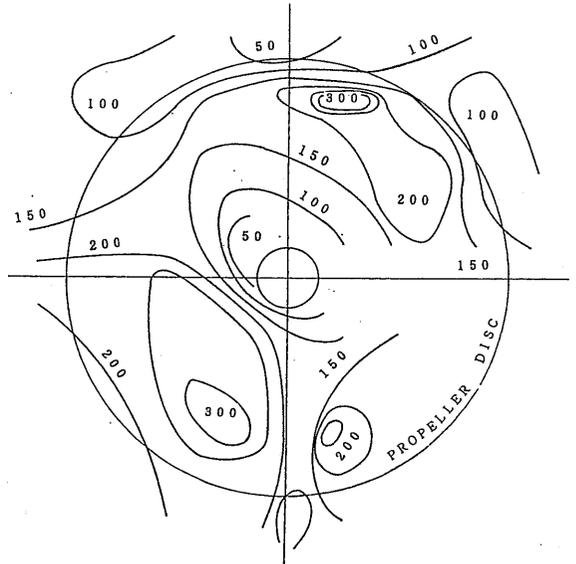


Fig. 28(c) Data rate of Vz-component at Section 3 with Propeller

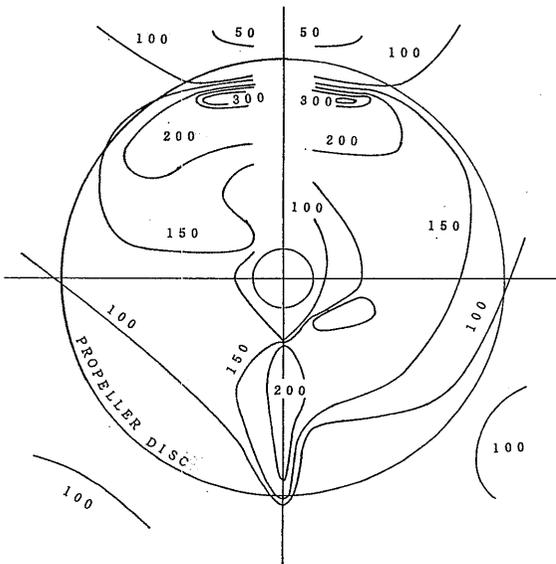


Fig. 28(b) Data rate of Vy-component at Section 3 with Propeller

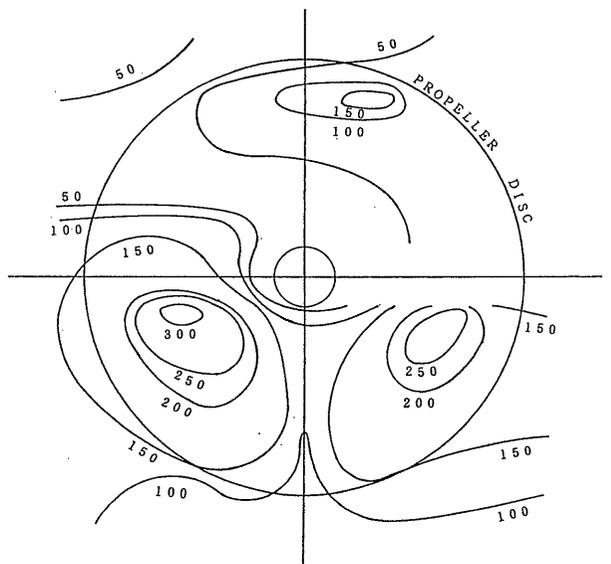


Fig. 28(d) Data rate of Vx-component at Section 3 with Propeller

ングが流場に均一に行われたかどうかを Data rate の分布で判断し、Data rate が一定量 (100個/sec) より多ければ必要なデータ密度が確保され、シーディングが良好に行われたと判断した。最も乱れと変動が大きいプロペラ直下流の断面3において、プロペラ作動中の場合およびそれと比較するためのプロペラがない場合のそれぞれの Data rate の分布について以下に述べる。

断面3におけるプロペラがない場合において、模型船下方から計測した  $V_x$  の Data rate の分布を Fig. 27 (a) に、そして  $V_y$  の Data rate 分布を Fig. 27 (b) に示す。同様に模型船左舷側から計測した  $V_z$  の Data rate の分布を Fig. 27 (c) に、そして  $V_x$  の Data rate の分布を Fig. 27 (d) に示す。プロペラがない場合において、 $V_x$  と  $V_y$  の Data rate の分布は、船体伴流の  $V_x$  速度成分の分布 (Fig. 10) と似た傾向がある。それに比べて  $V_z$  の Data rate の分布は、プロペラ面下半分の両側に Data rate の特に多い領域がある。この分布は船体伴流の  $V_z$  速度成分の分布 (Fig. 11) により近い。模型船左舷側から計測した  $V_x$  の Data rate の分布 (Fig. 27 (d)) は、 $V_z$  の Data rate の分布 (Fig. 27 (c)) よりも模型船下方から計測した  $V_x$  の Data rate 分布 (Fig. 27 (a)) に近い。これは Data rate 流場の  $V_x$  速度成分にほぼ比例しているが、 $V_z$  速度成分が大きいところではその影響を受けることを示している。以上から水槽中の散乱粒子の分布がかなり一様であることが判断できた。

断面3におけるプロペラ作動中の場合において、模型船下方から計測した  $V_x$  の Data rate 分布を Fig. 28 (a) に、そして  $V_y$  の Data rate の分布を Fig. 28 (b) に示す。同様に模型船左舷側から計測した  $V_z$  の Data rate の分布を Fig. 28 (c) に、そして  $V_x$  の Data rate の分布を Fig. 28 (d) に示す。プロペラ作動中の Data rate の分布において、模型船下方から計測した  $V_x$  と  $V_y$  の Data rate の分布は、プロペラが無い場合と同様に船体伴流の  $V_x$  速度成分の分布 (Fig. 10) と似た傾向であった。それに比べて模型船左舷側から計測した  $V_z$  と  $V_x$  の Data rate の分布は、プロペラ面下半分の両側に Data rate の特に多い領域がある。この分布は船体伴流の  $V_z$  速度成分の分布 (Fig. 11) により近い。言い替えば模型船左舷側から計測した  $V_x$  の Data rate の分布 (Fig. 27 (d)) は、模型船下方から計測した  $V_x$  の Data rate の分布と比較して  $V_z$  速度成分の影響が強く現れていると言える。また LDV の計測方向の差が Data rate の分布に影響

している可能性も考えられる。一方プロペラ軸上部の0.9 R 半径位置付近では、プロペラ翼の強い加速流により、どの速度成分においても Data rate が増加している。

よってプロペラ作動中の場合における Data rate の分布は、プロペラが無い場合と同様に、船尾への流入速度に大きく依存した分布となっているが、プロペラの回転によって引き起こされた流れにもかなり影響されることが明らかになった。以上に述べたように Data rate の分布から今回のシーディングは、水槽の模型船が通過する部分 (流体中) に、ほぼ一様に光散乱粒子を分布させることが出来たと考える。

### 4.3 プロペラ作動中流場の変動および乱れ

#### 4.3.1 速度成分の標準偏差と流場の関係

流場の乱れを検討するための材料として速度成分の標準偏差があるが、LDV による計測データには、流れの乱れ成分以外に不連続データであることの影響も含まれている。そのような LDV による計測データから求めた標準偏差であるが、流場の乱れを判断する資料として検討してみる。

LDV による計測において、計測されたデータの密度を示す一例として Fig. 29 (a), (b) および Fig. 30 に計測例を示す。縦軸は速度、横軸は計測開始からの経過時間である。Fig. 29 (a) の例はプロペラ下方向から計測した  $V_x$  速度成分の10秒間の計測データ例を示し、Fig. 29 (b) は Fig. 29 (a) の計測開始から0.8秒間のデータを示している。Fig. 30 は同じ計測位置で、模型船左舷側 (プロペラ横方向) から計測した  $V_x$  速度成分の計測データ例である。

計測データ例として示した模型船左舷側 (プロペラ横方向) から計測した  $V_x$  (Fig. 30) の標準偏差 (0.112 m/sec) に比べて、プロペラ下方向から計測した  $V_x$  (Fig. 29) の標準偏差 (0.212m/sec) は約2倍程度ある。この傾向は、プロペラ横方向から計測した  $V_x$  と、プロペラ下方向から計測した  $V_x$  の計測データを比較した場合、各断面において伴流域外側のデータに共通して見られた。その理由として同時に同じ流場を計測していないことから、2回の計測における流場の乱れ成分に差があることの他に、プローブが振動しそれが流場の乱れの計測に影響している可能性などが考えられる。計測時のプローブの水深を比較すると、Fig. 30 の場合は 236 mm であるのに対し、Fig. 29 の場合は 736mm である。そのためプローブの水深に応じてトラバース装置に加えられた荷重が増加し、プローブが振動している可能

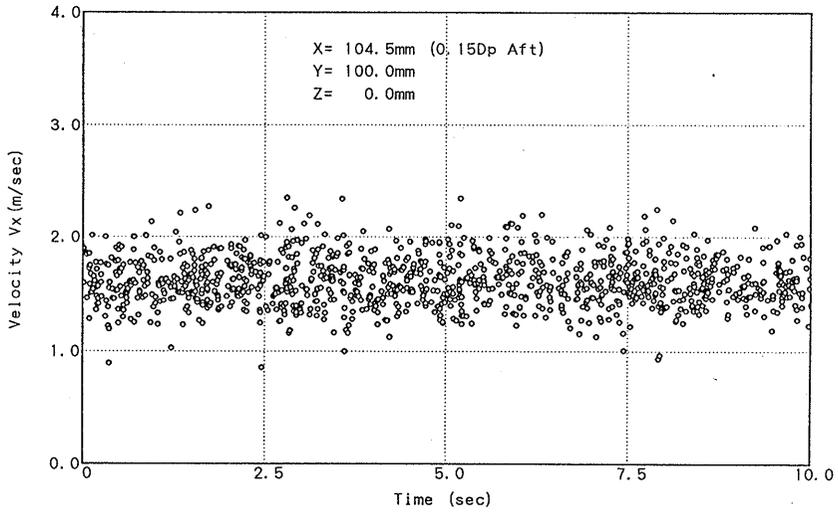


Fig. 29(a) LDV Measuring Data

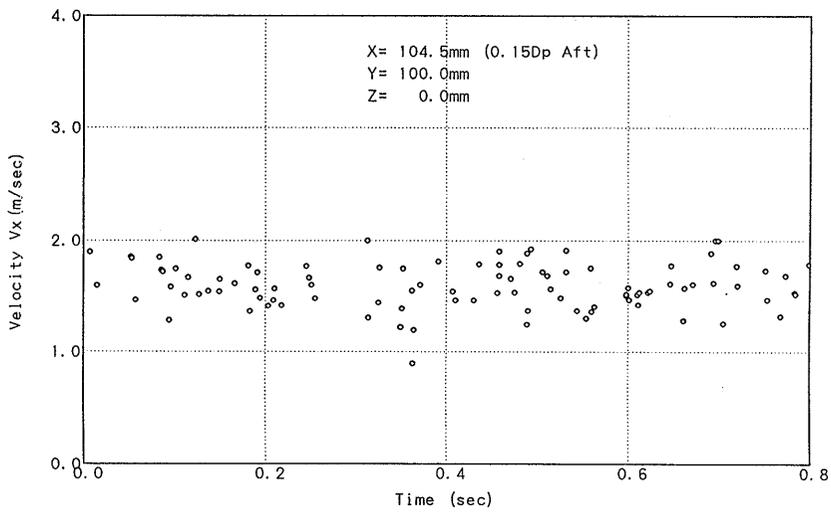


Fig. 29(b) LDV Measuring Data

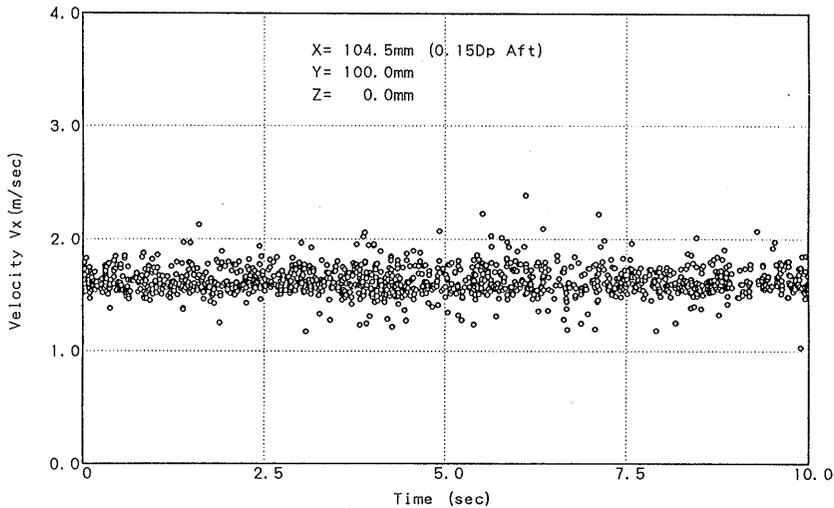


Fig. 30 LDV Measuring Data

性がある。

断面3において、プロペラが無い場合の標準偏差の分布を Fig. 31 に、プロペラがある場合の標準偏差の分布を Fig. 32 に示す。速度成分の標準偏差を模型船速度  $V_m$  により無次元値にしている。 $V_x$  および  $V_y$  速度成分の標準偏差 (Fig. 31 (a), (b) および Fig. 32 (a), (b)) は、プロペラ左舷側から計測した場合の標準偏差であり、 $V_z$  速度成分の標準偏差 (Fig. 31 (c) および Fig. 32 (c)) はプロペラ下方向から計測した場合の標準偏差である。

プロペラが無い状態では、 $V_x$  速度成分の流速分布 (Fig. 10) (言い替えれば船体による伴流分布) と傾向の似ている左右舷対称の分布となり、プロペラ軸下部船体中心線まわりの標準偏差が  $V_m$  の15%から20%と比較的大きな値となっている。ただしプロペラ軸上部の船体中心線付近の、速度成分の標準偏差は  $V_m$  の10%程度であり、流速分布と異なり急激な変化は見られない。

プロペラ作動中において Fig. 32 の標準偏差値の分布には、どの速度成分についてもプロペラ円周部分に、 $V_m$  の30%から40%に相当する大きな乱れの分布が存在する。これはその存在領域から、強い船体伴流による乱れと計測断面を通過している翼端渦による乱れが重なったためと考えられる。また、プロペラ中心線下部のプロペラ円周近くに標準偏差値が  $V_m$  の20%程度の領域がある。これは船体キールからの渦の影響が残っているた

めと考えられる。プロペラ円周部分より内側、プロペラ軸に近い領域の標準偏差の分布は大きな変化は見あたらず、プロペラ面より外側の領域と同程度の標準偏差値であり、伴流分布の影響は目立たなくなっている。

以上の解析からプロペラ作動中において、プロペラ円周部分の流れに含まれる変動成分と乱れ成分の標準偏差は、 $V_m$  の±30%以上に達していることが明らかになった。そのような変動及び乱れの大きい流場において5孔ピトー管による高精度な計測は困難と思われる、今回LDVを用いて計測したことにより精度良い計測が可能になったと考える。

#### 4.3.2 プロペラ翼数に伴う周期的な変動流

プロペラ回転中の流れでは、流れの乱れ成分は、船体の伴流による乱れと、回転するプロペラ翼による変動に分けられる。そこでプロペラ翼数に伴う周期的な変動流を、プロペラの位相情報を基にした解析により求めた。解析方法はキャビテーション水槽におけるプロペラ回転同期計測<sup>17)</sup>と同様であるが、今回の計測では、プロペラの回転合図マークが無い場合、図中の翼角度位置 (横軸) とプロペラとの位相関係は残念ながら不明である。

前節 (4.3.1) でも述べたように、プロペラ後方流場に含まれる乱れおよび変動は、プロペラ円周部分の流れが最も大きい。そこで断面3におけるプロペラ円周部分 (プロペラ半径,  $R=110.475\text{mm}$ ) に最も近い計測データの変動成分を解析することにし、プロペラ半径位置

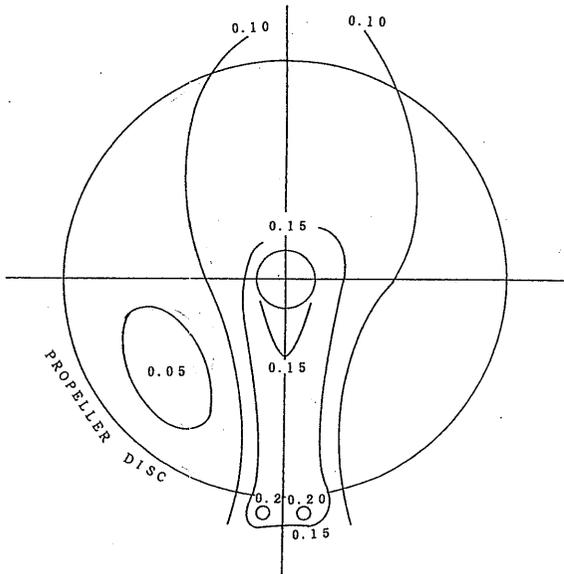


Fig. 31(a) Standard deviation of  $V_x$ -component at Section 3 without Propeller

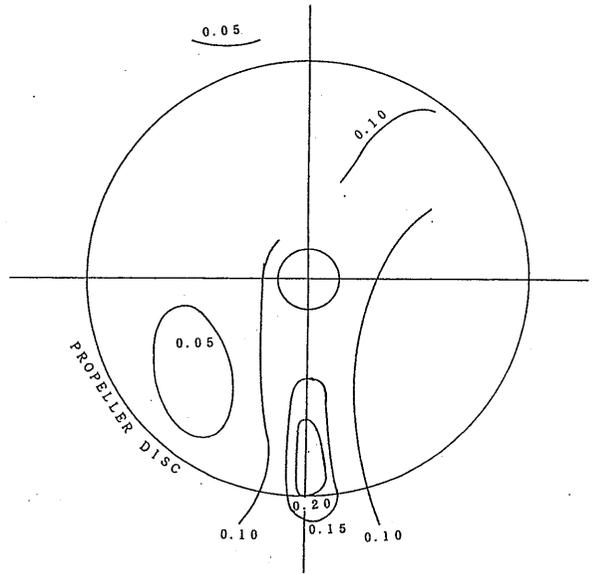


Fig. 31(b) Standard deviation of  $V_y$ -component at Section 3 without Propeller

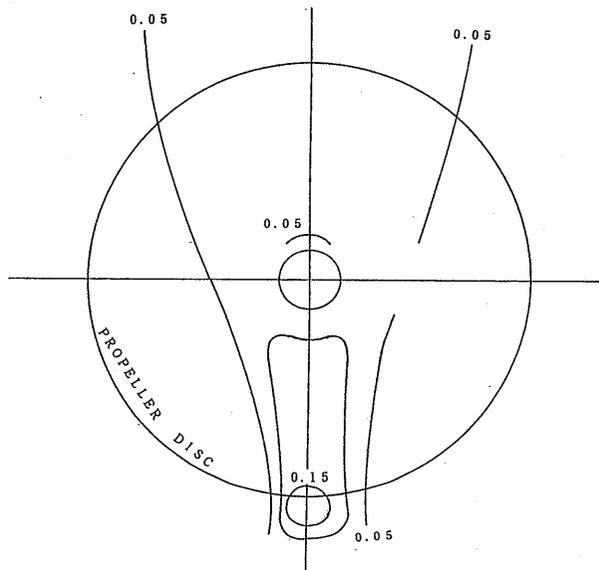


Fig. 31(c) Standard deviation of  $V_z$ -component at Section 3 without Propeller

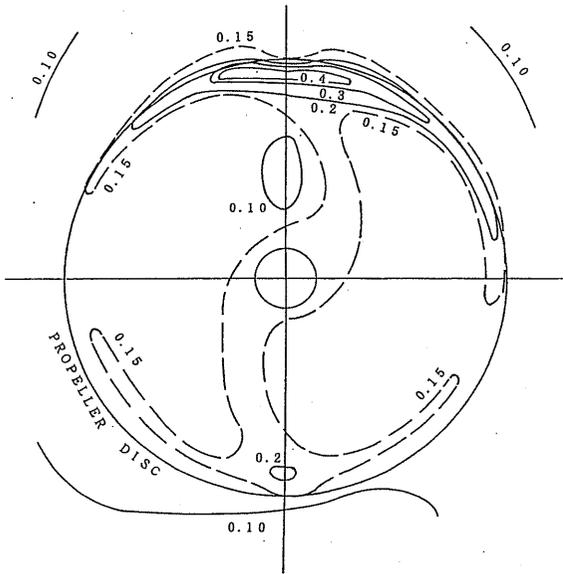


Fig. 32(a) Standard deviation of  $V_x$ -component at Section 3 with Propeller

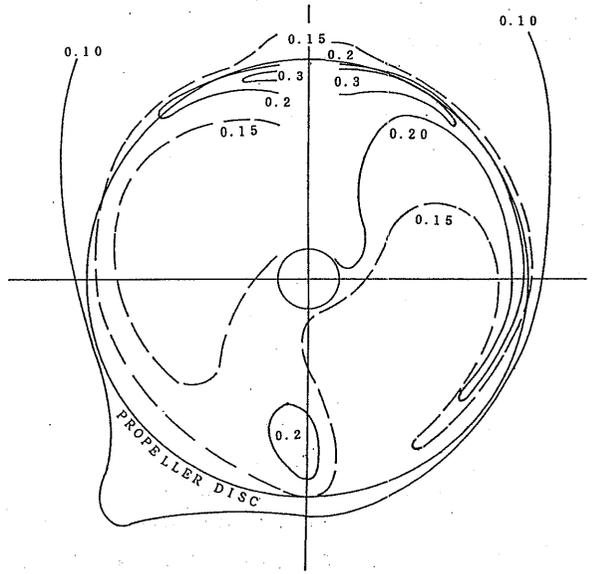


Fig. 32(b) Standard deviation of  $V_y$ -component at Section 3 with Propeller

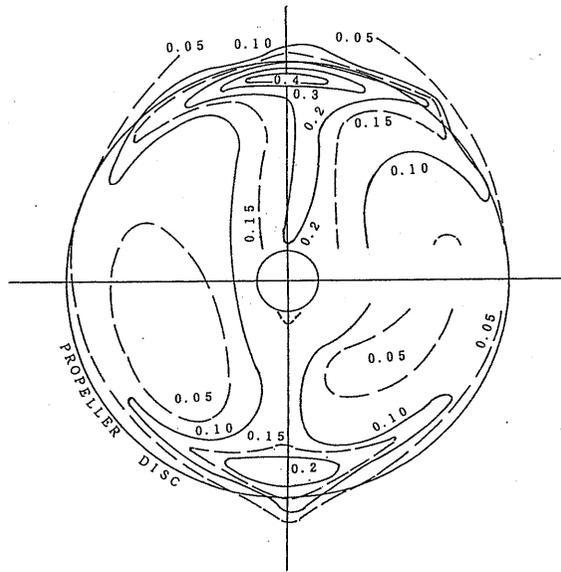


Fig. 32(c) Standard deviation of  $V_z$ -component at Section 3 with Propeller

0.905R (r=100mm) の上下左右4計測点を解析した。以下に示す図の縦軸は、模型船速度  $V_m$  により無次元値にした速度成分である。図の横軸は計測開始時刻を0度とし、プロペラが1回転する時間 0.1195sec を360度としてプロペラ翼角位置に対応させものである。図中の速度成分は、計測終了時刻までの計測データを繰り返し重ね合わせて表示している。図中に平均速度が実線で、標準偏差が破線で示されている。

プロペラ真上 (Y=0, Z=100) における  $V_x$  の変動流を Fig. 33 に、 $V_z$  の変動流を Fig. 34 に示す。この計測位置の  $V_y$  は、プロペラボスの影となったため計測していない。 $V_x$  の変動流 (Fig. 33) は、強い船体伴流の中にあるため全体として乱れ成分が目立つが、5枚のプロペラ翼に伴う下向きの5カ所のピークをふくむ変動流の周期的なパターンが図から読み取れる。さらに  $V_x$  の大きさと符号がピーク近傍で-1.0から+1.5と大きく変化していることは、プロペラの前後方向に流れが激しく向きを変えて流れたことを示しており、それは強い渦 (プロペラ翼端渦) が計測点を通過したために生じた現象と思われる。 $V_x$  の計測例から求めた流速の単純平均

値 ( $V_x/V_m$ ) は0.482、標準偏差 (S.D.) は0.449であるが、その平均値が図のような変動流の平均値を正しく表しているのか疑問である。

$V_z$  の変動流 (Fig. 34) は、上下方向に鋭いピークのある変動流の周期的なパターンが明瞭にみられる。 $V_x$  と同様に、 $V_z$  の大きさと符号がピーク近傍で-1.5から+1.5と大きくプロペラの上下方向に変化している。 $V_x$  および  $V_z$  の流れの向きの変化から判断すると強い渦 (プロペラ翼端渦) は、ほぼプロペラ円周方向に添って計測点を通過したと考えられる。この計測位置での  $V_z$  速度成分は、プロペラの半径方向速度成分  $V_R$  となる。 $V_z$  の計測例から求めた流速平均値は-0.089、標準偏差は0.537である。

プロペラ真下 (Y=0, Z=-100) における、模型船左舷方向から計測した  $V_x$  の変動流を Fig. 35 に、 $V_z$  の変動流を Fig. 38 に示す。そして模型船下方から計測した  $V_x$  の変動流を Fig. 36 に、 $V_y$  の変動流を Fig. 37 に示す。Fig. 35 と Fig. 36 はどちらも  $V_x$  速度成分であり、その平均値および標準偏差に差がなく、変動流の形状からも再現性は良いと考えられる。その理由

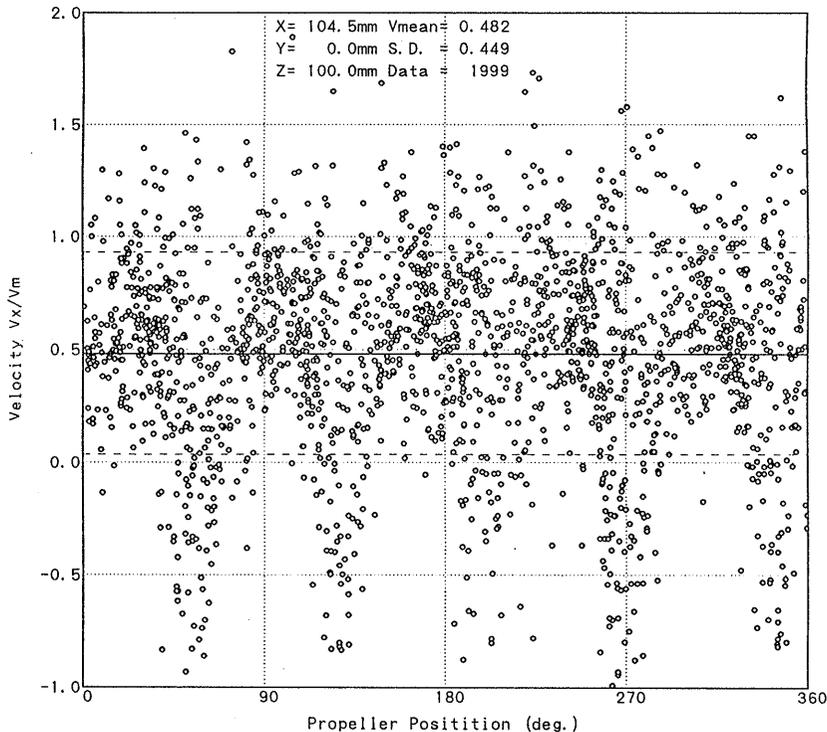


Fig. 33 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_x$  velocity component due to Propeller rotation in Section 3

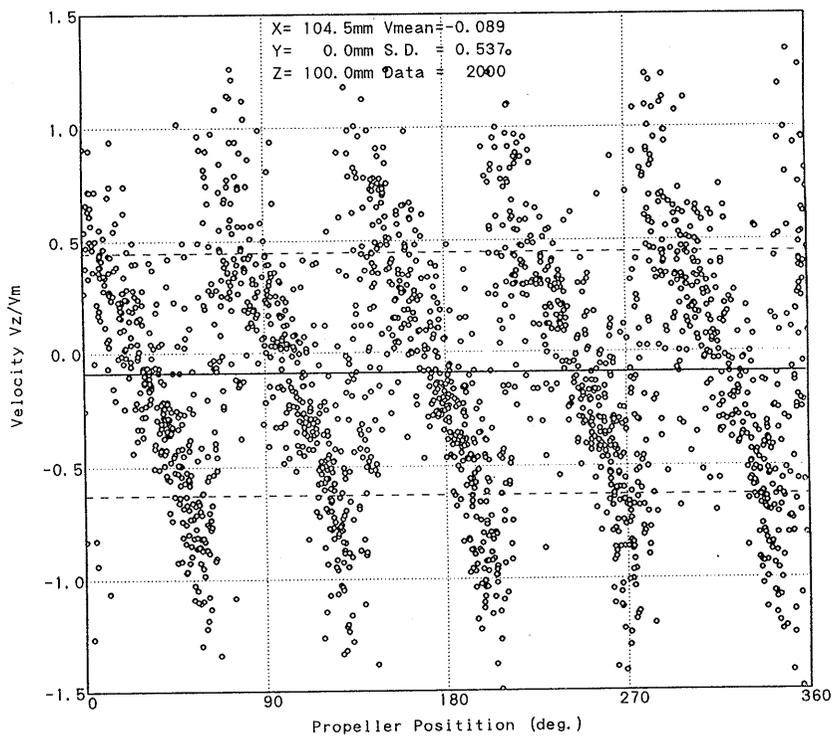


Fig. 34 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_z$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

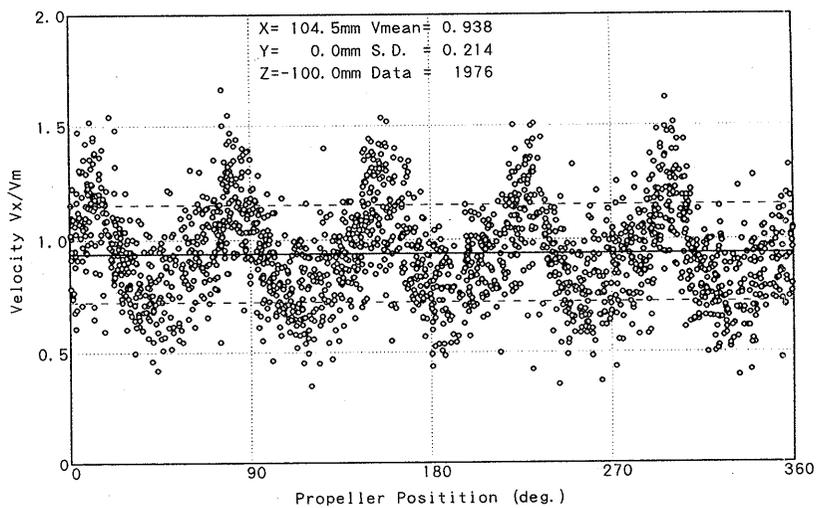


Fig. 35 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_x$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

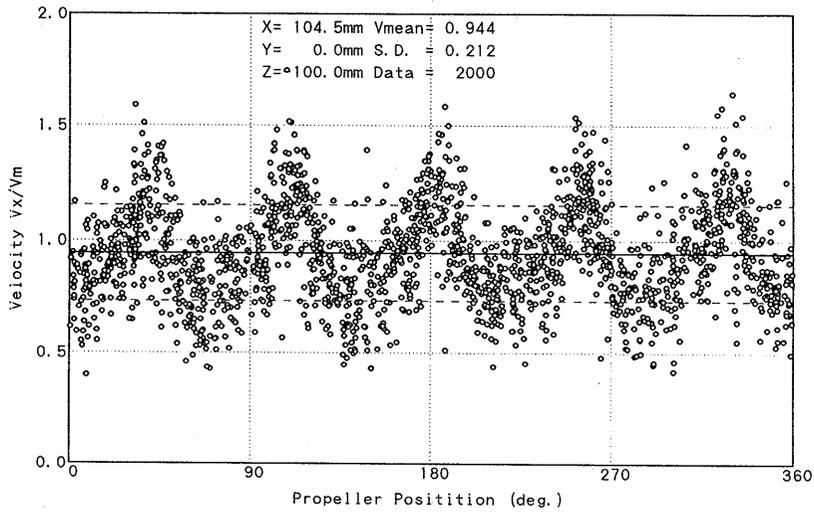


Fig. 36 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_x$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

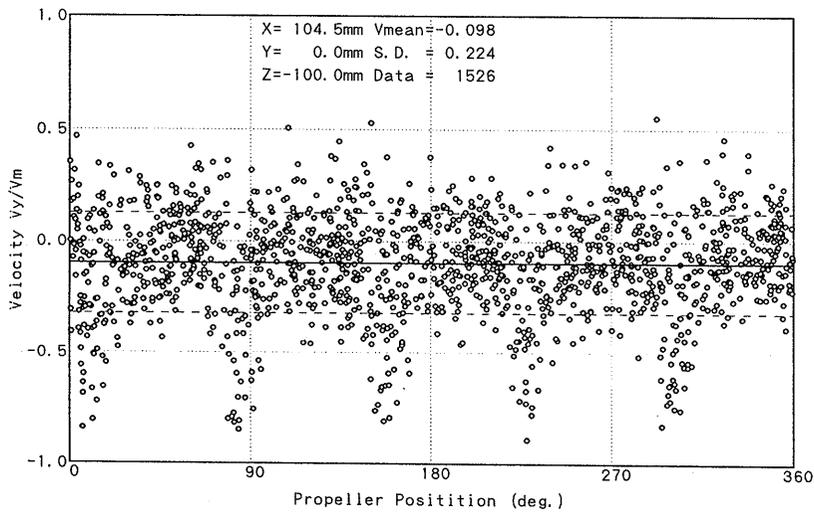


Fig. 37 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_y$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

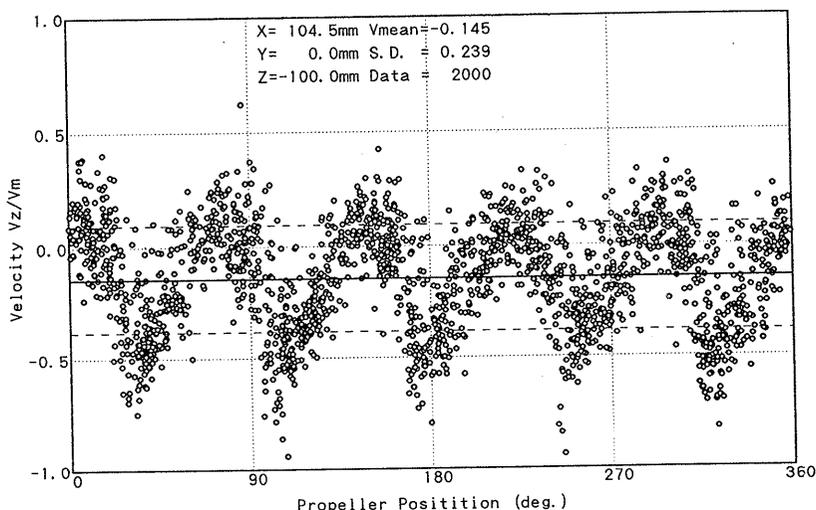


Fig. 38 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_z$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

として前節 (4.3.1) でも述べたように、LDV プロープが伴流域の中央部にあり、その振動が流場の乱れの計測に与える影響が小さかったためと考えられる。

$V_x$  の変動流において、Fig. 35 および Fig. 36 は、船体伴流の中央部にあるため全体として乱れ成分が多いが、上下それぞれ5カ所のピークをふくむ変動流の周期的なパターンが図から読み取れる。ピークの変動量はプロペラ真上の  $V_x$  の変動流 (Fig. 33) に比べて  $\pm 0.5$  と半減している。

$V_y$  の変動流 (Fig. 37) は、全体として乱れが多くデータ数も少ないため変動流の形状は分かりにくい、下向きのピークのある周期的なパターンが図から読み取れる。そのピークは左舷へ向かう流れを示し、模型船後方からみて右回転しているプロペラによる回転流である。Fig. 37 からプロペラ真下における  $V_y$  は、プロペラ翼が通過するとき誘起されるプロペラ回転方向の流れ以外では、伴流による乱れ成分が支配的であるように見える。

$V_z$  の変動流 (Fig. 38) は、周期的な流れのパターンが図から明瞭に読み取れる。 $V_x$  と同様に、ピーク近傍での  $V_z$  の変化量は、プロペラ真上の  $V_z$  (Fig. 34) に比べて  $\pm 0.5$  と約  $1/3$  に減少している。変動流の周期的なパターンをプロペラ真上の  $V_z$  (Fig. 34) と比較すると、プロペラ真上の場合はプロペラ翼角度位置が大きくなると流れの向きが上向き (正符号) から下向き (負符号) に変化しているのに対し、プロペラ真下の場合は逆に流れの向きが下向きから上向きに変化している。これは2

カ所の計測位置が、プロペラ軸中心を挟んで軸対称の関係にあるためである。

プロペラ左舷真横 ( $Y=100, Z=0$ ) における、模型船左舷方向から計測した  $V_x$  の変動流を Fig. 39 に、 $V_z$  の変動流を Fig. 42 に示す。そして模型船下方から計測した  $V_x$  の変動流を Fig. 40 に、 $V_y$  の変動流を Fig. 41 に示す。Fig. 39 と Fig. 40 はどちらも  $V_x$  速度成分であるが、その平均値はほぼ一致するが標準偏差および変動流が異なっている。その理由として前節 (4.3.1) でも述べたように、同時に同じ流場を計測していないことから2回の計測における流場の乱れ成分に差があること、またトラバース装置の剛性が不足しているためプロープが振動し、それが流場の乱れの計測に影響している可能性などが考えられる。

$V_x$  の変動流において、Fig. 39 (標準偏差 S. D. = 0.071) は、弱い船体伴流の中にあるため乱れ成分が少なく、5カ所のピークをふくむ変動流の周期的なパターンが図から明瞭に読み取れる、しかし Fig. 40 (標準偏差 S. D. = 0.134) は上向きのピークが何とか判別できるが周期的な変動流のパターンが乱れ成分に大部分隠されている。プロペラ真横における  $V_y$  はプロペラ半径方向速度成分  $V_R$ 、 $V_z$  はプロペラ周方向速度成分  $V_\theta$  にそれぞれ対応する。そのため  $V_y$  (Fig. 41) はプロペラ上下の  $V_z$  (Fig. 34, 38) に対応し、 $V_z$  (Fig. 42) はプロペラ真下の  $V_y$  (Fig. 37) に対応する。Fig. 41 および Fig. 42 の変動流は、船体伴流による乱れ成分が弱

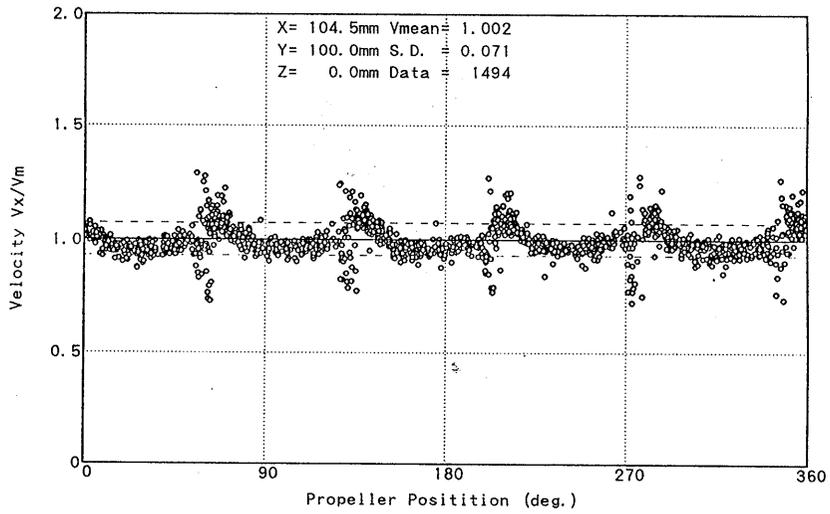


Fig. 39 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_x$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

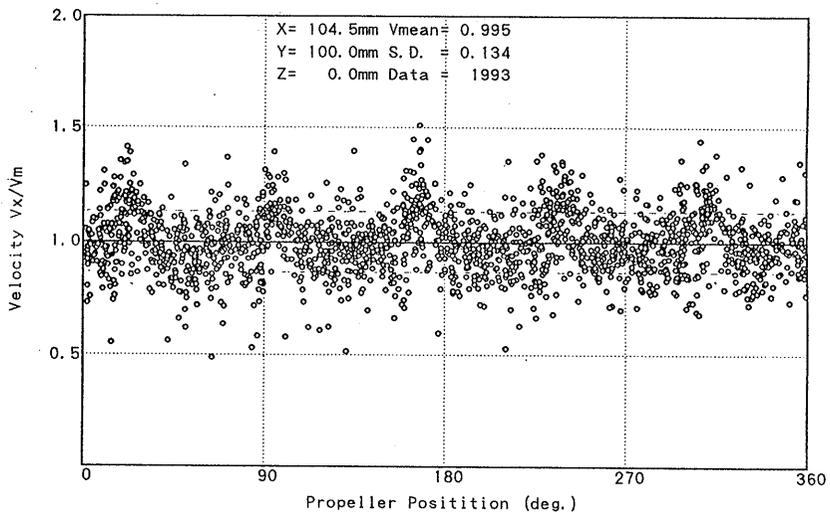


Fig. 40 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_x$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

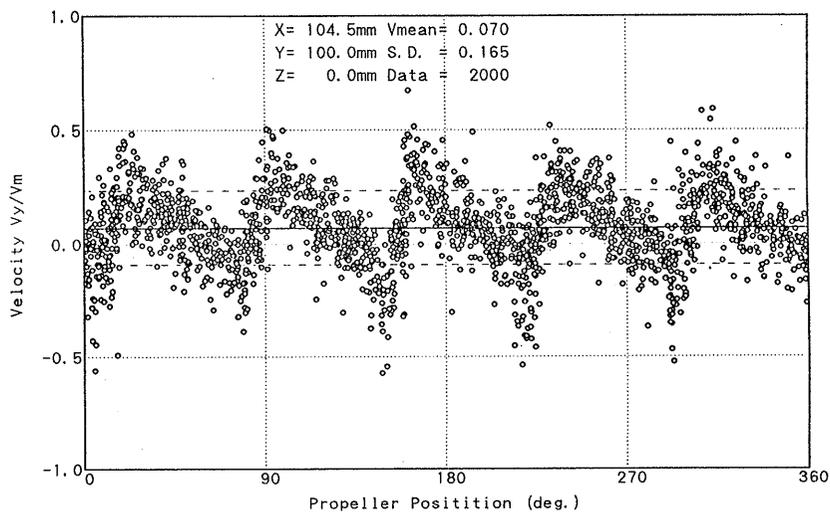


Fig. 41 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_y$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

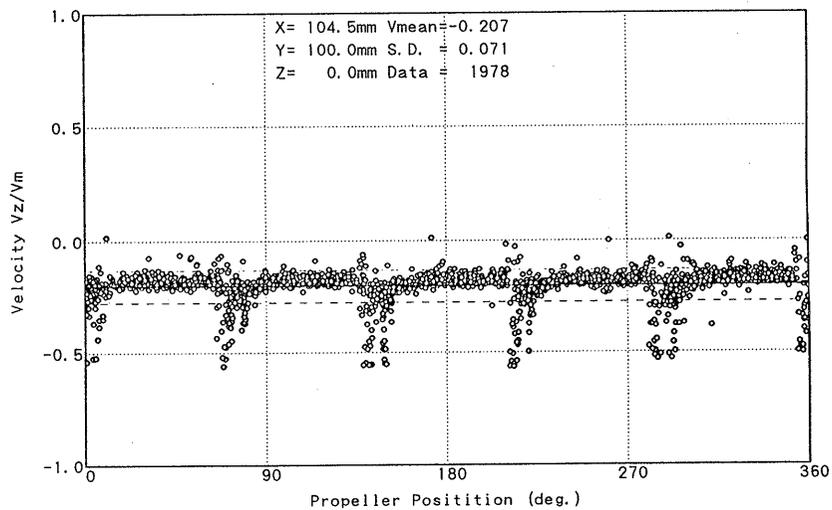


Fig. 42 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_z$  velocity component due to propeller rotation at Section 3

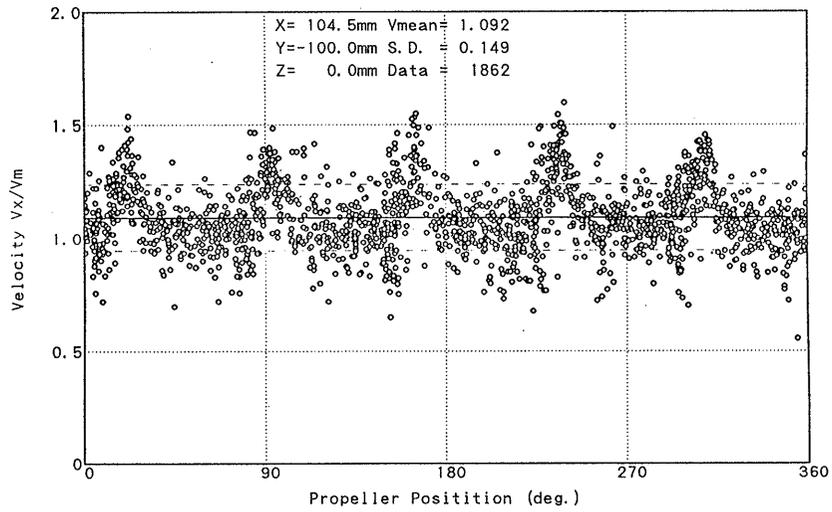


Fig. 43 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_x$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

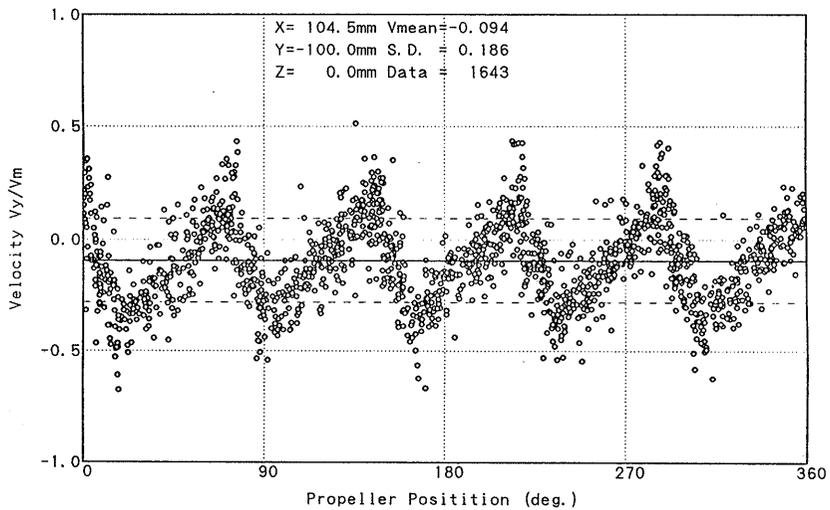


Fig. 44 Distribution of periodic fluctuation in the  $V_y$  velocity component due to Propeller rotation at Section 3

いため、周期的なパターンがかなり明瞭に読み取れる。

プロペラ右舷真横 ( $Y=-100, Z=0$ ) において、模型船下方から計測した  $V_x$  の変動流を Fig.43 に、 $V_y$  の変動流を Fig. 44 示す。この計測位置の  $z$ , プロペラボスの影となったため計測していない。 $V_x$  の変動流 (Fig. 43) は、左舷真横の  $V_x$  (Fig. 40) よりは5カ所のピークをふくむ変動流の周期的なパターンが判断しやすいが、乱れ成分が優勢である。右舷真横の  $V_y$  の変動流 (Fig. 44) を左舷真横の  $V_y$  (Fig. 41) と比較すると、その計測位置がプロペラ軸中心を挟んで軸対称の位置関係にあるため、変動流の周期的パターンが裏返しのパターンとなっていることが明瞭に認識できる。

キャビテーション水槽におけるプロペラ単独流場の計測例<sup>18)19)</sup>を参考にして判断すると、プロペラ翼端渦はプロペラ単独流場であれば半径位置 0.92R あたりで断面3を通過している。それによれば、今回計測した変動流成分の解析結果は半径位置 0.905R における計測結果であり、プロペラ翼端渦の通過位置よりも少し内側を計測したことになる。しかし今回解析した模型船船尾流場の、プロペラによる変動流成分の変動幅および変動流の周期的パターンから判断すると、プロペラボス真上の強い伴流域ではプロペラ翼端渦が、プロペラ単独流場よりもプロペラ中心方向へ少し移動して通過していると考えられる。

## 5. ま と め

曳航水槽において LDV を用いて、模型船(練習船“青雲丸”)のプロペラ作動中船尾流場を計測した。その計測結果から以下の知見を得た。

- (1) 今回の計測では、流場への影響を最小に押さえ、船体による攪拌効果も期待できるシーディング方法として、模型船を曳引車と共に走行させ計測した後、出発位置への復行時に船尾後方へ散布するシーディングを行い、水槽の模型船が通過する流体中に、ほぼ一様に光散乱粒子を分布させることができた。
- (2) 曳航水槽において模型船を曳引車に固定し、プロペラ作動中のプロペラ前後3断面の船尾流場を LDV により計測し、プロペラが作動している状態およびプロペラ無しの状態の2状態の平均流速分布により流場の状況を明らかにした。
- (3) プロペラ作動中において  $V_x$  速度成分の右舷側が左舷側よりも加速されている状況が平均流速分布の解析から明らかになった。

(4) プロペラ作動中のプロペラ下流側において、プロペラ円周部分の流れに含まれる変動成分と乱れ成分の標準偏差は、模型船速度  $V_m$  の±30%以上に達していた。このような変動の激しい流場においては、5孔ピトー管を用いて高い信頼性を持つ計測を行うことは困難であり、今回 LDV を用いて計測したことにより精度良い計測が可能になったと考えられる。

(5) プロペラ翼数に伴う周期的な変動流を、プロペラの位相情報を基にした解析により求めた。今回解析したプロペラ直下流の翼端近く (0.905R) の上下左右4カ所における変動流成分の変動幅および変動流の周期的パターンから判断すると、プロペラボス真上の強い伴流域ではプロペラ翼端渦が、プロペラ単独流場よりもプロペラ中心方向へ少し移動して通過していると考えられる。

長期間試験水槽を占有し、計測を行う必要のある本研究の実施を承認し、研究を推進して下さった前推進性能部北川弘光部長(現船舶技術研究所所長)に感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、LDV の有用性と水槽試験精度の方向から多くの討論と助言を頂いた推進性能部山口眞裕部長、ならびに研究の遂行を終始激励し船尾流場について討論を頂いた児玉良明研究室長に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 中武一明 船体とプロペラの相互干渉について 1967.07西部造船会会報第34号
- 2) 山崎隆介 静水中における船舶の推進性能に関する序論 1967.02西部造船会会報第33号
- 3) 中武一明 船体とプロペラの相互干渉について(第3報) 1969.02西部造船会会報第37号
- 4) Kux J. Laudan J. : Correlation of Wake Measurements at Model and Full Scale Ship, 15th O.N.R., 1984
- 5) Jessup S.D. Schott C. : Local Propeller Blade Flows in Uniform and Sheared Onset Flows Using LDV Techniques, 15th O.N.R., 1984
- 6) Hoshino T. Oshima A. Sasajima T. : Flow Measurements by 3-Component L.D.V. in a Cavitation Tunnel, ITTC87, 1987
- 7) 児玉良明他 小型カーフェリーの船尾振動に関する

- 選定フィン効果に関する水槽試験 1983.09 船舶技術研究所報告 第20巻5号 pp93
- 8) 右近良孝 船尾変動圧力の推定に関する研究 1991.07 船舶技術研究所報告 第28巻4号 pp19
- 9) Fry D.J. Kim Y.H. : Bow Flow Field of Surface Ships, 15th O.N.R., 1984
- 10) 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 No.211, 1989
- 11) Kakugawa, A. Takeshi, H. Makino, M. : Flow Field Measurements Around Marine Propellers at Towing Tank Using Fiber Optics LDV, 1991.8 Laser Anemometry Advances and Applications -1991-, The American Society of Mechanical Engineers
- 12) SR 183研究部会: 船尾振動・騒音の軽減を目的としたプロペラ及び船尾形状の研究, 日本造船研究協会, 1982, 1983
- 13) SR 199研究部会, プロペラ推進性能と騒音特性の推定法に関する研究, 日本造船研究協会, 1987
- 14) Tanibayashi : Full-Scale LDV Measurements of Ship Sturn Flow, 19th ITTC, 1990
- 15) 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
- 16) 角川明, 上田隆康, 竹子春弥, 牧野雅彦 LDV計測技術の開発と応用 1990.11 第56回船舶技術研究所研究発表会講演集
- 17) Kakugawa A. : Measurement of Flow Fields around a Marine Propeller, DANTEC Information No.4, 1987
- または, 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
- 18) 角川明, 小山鴻一, 岡本三千朗: 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
- 19) 岡本三千朗, 小山鴻一, 角川明: 均一流中におけるプロペラまわりの計測例, 第42回船舶技術研究所研究発表会講演集, 1983
- 20) Koyama K., Kakugawa A., Okamoto M. : Experimental Investigation of Flow Around a Marine Propeller and Application of Panel Method to the Propeller Theory, 16th