

12. 潜水調査船着水揚収システムの開発研究(第5報), —CPP中立翼角時の流速および流向の分布測定—

谷内 琢也*¹ 高川 真一*¹ 萩原 右門*¹ 對馬 克己*¹ 野沢 和男*²

2,000 m 潜水調査船システムにおける支援母船は、その主な用途の一つに調査海域における潜水調査船の着水揚収の支援がある。この支援作業のうち、潜水調査船の吊揚金具、ガイド索および曳航索の結合、解除等の作業はダイバー作業として行われる。この作業の間、本支援母船はプロペラの回転を停止せず、CPPの翼角を中立にし、船速をほぼゼロに保持する必要がある。このため、CPP周辺の流れはかなり複雑になり、プロペラの後方で作業するダイバーの作業性とか、潜水調査船に悪影響を及ぼす可能性が予想された。これらの現象はきわめて複雑であり、この影響を精度よく推定することはきわめてむずかしい。そこで、これらの影響を実験的に明らかにする目的で、回流水槽で模型CPPの単独試験を行い、CPP周辺の流場のトレサーによる観測、ならびにプロペラ式流速流向計による計測を行った。その結果、ダイバー等への影響が問題となるCPPの後方 $D_p \times 2$ (D_p : プロペラ直径) 以上離れた領域での流速は $0.04 \sim 0.08$ m/s 以下で、かなり微速であり、ダイバーへの悪影響はほとんど考えられないことが明らかになった。

Development of a Launch and Retrieval System for a 2,000 m Deep Submergence Research Vehicle (Report 5), CPP Open Test at a Neutral Pitch Angle to Investigate Flow and its Velocity Pattern

Takuya Taniuchi*³, Shinichi Takagawa*³, Umon Hagiwara*³,
Katsumi Tsushima*³, Kazuo Nozawa*⁴

One important mission of the support ship for our 2,000m Deep Submergence Research Vehicle (DSV-2K) is to launch and retrieve the DSV-2K on the surface at the research area. In order to execute this mission, divers must connect the towing line, guide lines, and stopper lines to the submersible. They must also confirm the state of the self-mating device on the submersible.

During this operation, since the support ship requires good maneuverability at nearly zero speed, the controllable pitch propeller (CPP) must continuously rotate at a neutral pitch angle where the thrust is nearly zero. At

*¹ 深海開発技術部

*² 川崎重工業株式会社技術室神戸設計部

*³ Deep Sea Technology Department

*⁴ Kobe Designing Department, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

this time, the flow pattern around the CPP is very complicated, and it is difficult to estimate precisely the flow line and its velocity.

Next, a CPP open test was held in a circulating water channel to investigate its effect on the divers.

The flow and velocity around the CPP was measured by a tracer of resin particles and a propeller type flow meter. Through the results of this test, the flow speed was determined to be less than $0.04 \sim 0.08$ m/s at the point of $2D_p$ behind the CPP (D_p is diameter of CPP).

Thus, it is confirmed that divers can work safely near the stern of the support ship.

1. ま え が き

2,000 m潜水調査船システムにおける支援母船は、その重要な用途の一つとして、調査海域で潜水調査船の着水揚収の支援がある。この着水揚収オペレーションは、本船の船尾に設置されたA-フレームクレーンの起倒によって行われる。

これに関連する作業として潜水調査船の前後部吊揚金具、ガイド索および曳航索の結合、解除等はダイバー作業として行われる。この作業が行われる間、本支援母船のプロペラは、CPPであるので翼角を中立に近い状態で稼働させ続け、船速をほぼゼロに保持しておく必要がある。

このため、CPPの周辺の流れはかなり複雑になり、プロペラの後方で作業を行うダイバーの作業性とか潜水調査船に悪影響を及ぼす可能性が予想される。この影響を実験的に明らかにするため、

川崎重工業株式会社技術研究所の回流水槽で、中立翼角に近い状態に設定した模型CPPの単独試験を行い、CPP周辺の流場をトレーサーを用いて観測するとともに、プロペラ式流速流向計を用いた流場計測を行った。本船およびプロペラ要目等を表1に示す。

なお、本試験の実施にあたっては、“潜水調査船開発研究会”の委員各位に適切なご助言、ご指導を得たことに対して、深く謝意を表する次第である。

2. 実験内容

2.1 実験方法

図1にオープンボートを使用した今回の実験の状況を示す。

すなわち、オープンボートに中立CPP模型を取り付け、ほぼ実船対応の没水深度で回流水槽に

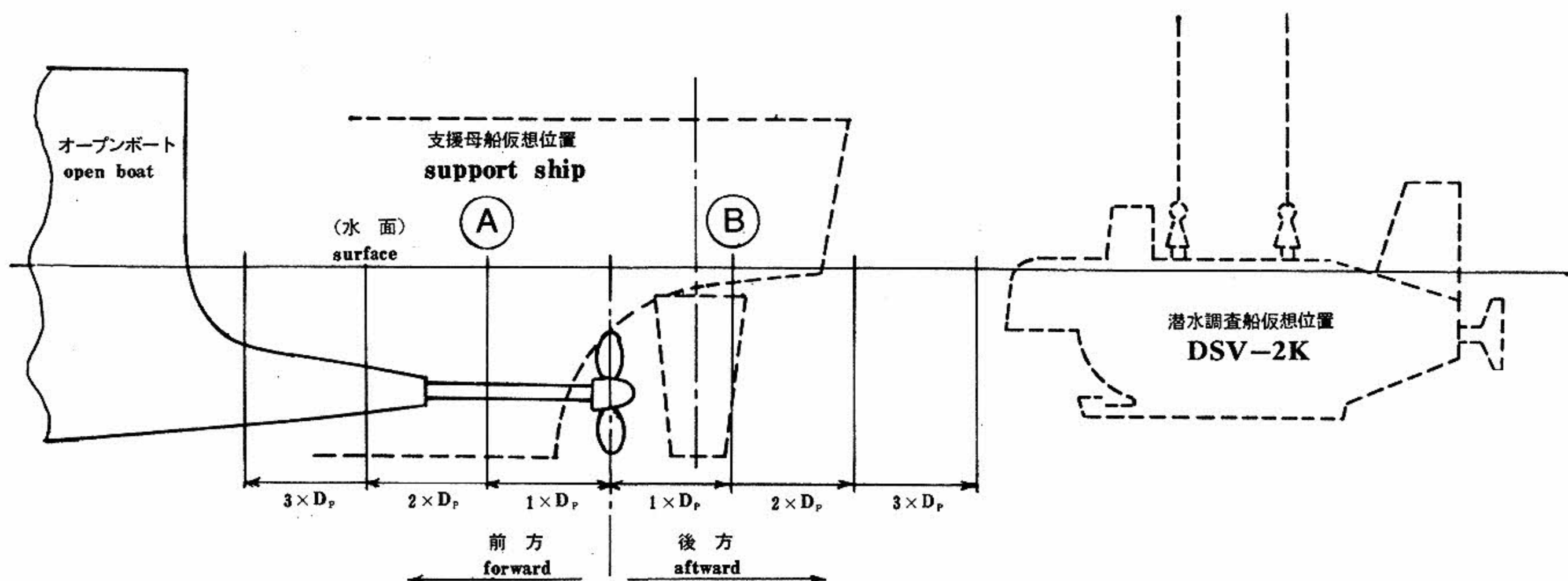


図1 オープンボート使用の実験状況
CPP test situation by the open boat

固定した。この状態で流速（船速）をゼロとしたまま，プロペラを所定の回転数で稼働させ，CPP周辺の流場の観測および計測を行った。図中にはCPP位置を実船と一致させた場合の支援母船，潜水調査船の仮想位置を点線で示した。これからダイバーや潜水調査船へのプロペラ後流の影響はCPP後方の $D_p \times 2 \sim 3$ 倍（ D_p ：プロペラ直径）以上隔った断面で調査できれば十分であることが分る。本実験ではCPPの直前，直後についても調べて見ることにした。

写真1にはCPP装着時のオープンボードを示した。

2.1.1 模型CPPの要目

本船用CPPに近い要目をもつ，直径 $D_p = 0.2127\text{ m}$ のStock CPPを使用した。このCPPの要目を表2に示す。

この模型CPPはボス部のボルトを緩めること

によって4翼連動の状態で翼角を増減できる機構となっている。

写真2は中立翼角に設定した本模型CPPの形状を示す。

2.1.2 中立翼角およびプロペラ回転数の設定

(1) 中立翼角

CPPが稼働状態にあっても，その翼角を調節し，理論上，発生推力をゼロにすることができる。この翼角を中立翼角と称している。

本実験の遂行にあたっては，まず，上述の厳密な中立翼角の設定が望まれるが，実際，問題として，この設定はきわめて困難である。

そこで，本CPPの基準ピッチ比 $p = 0.98$

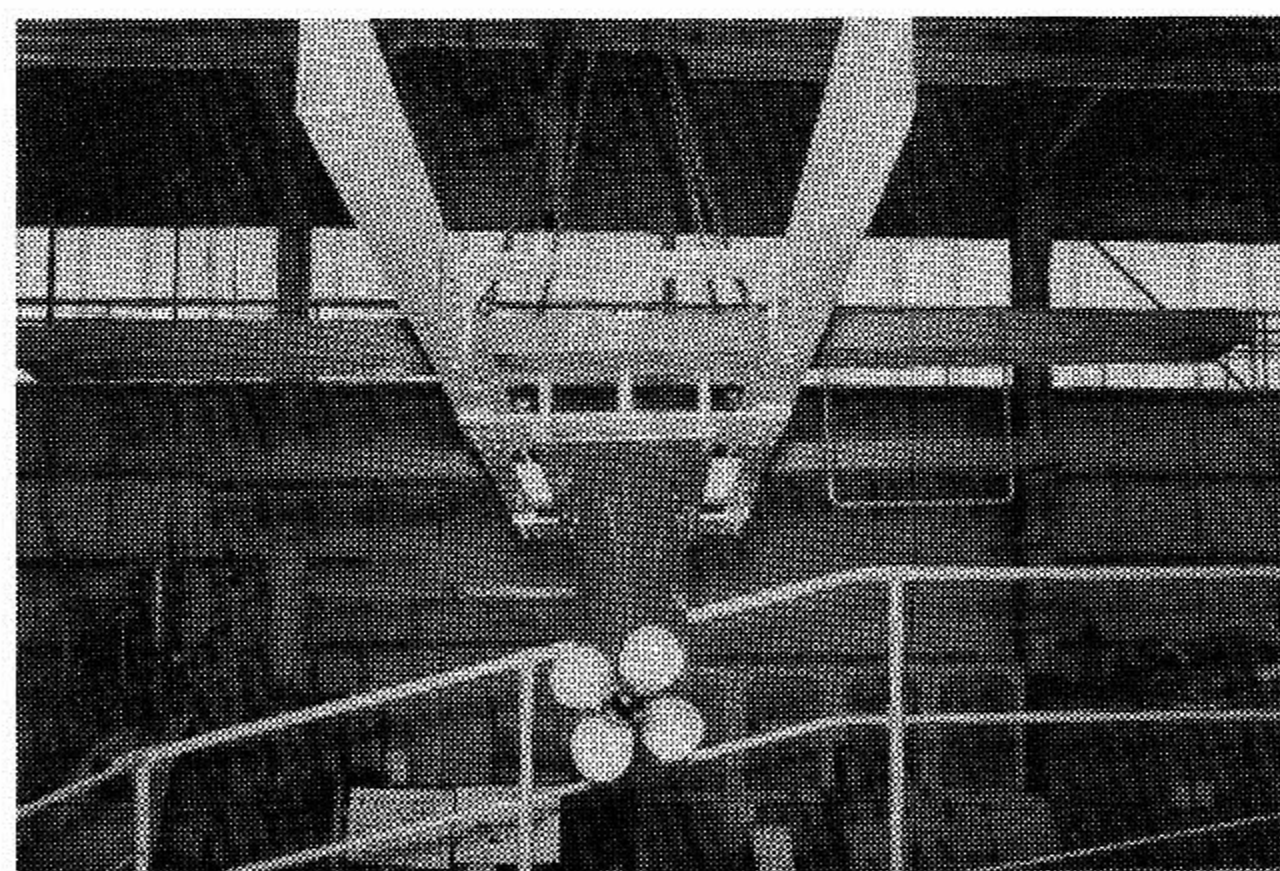
（これはこの模型CPPの設計ピッチである）のときのボラードプル推力をあらかじめ計測しておき，この推力の $\pm 1\%$ 以下になるような翼角を実験的に見出し，これをもって近似

表1 船型およびプロペラ要目
Principal particulars and characteristics of CPP

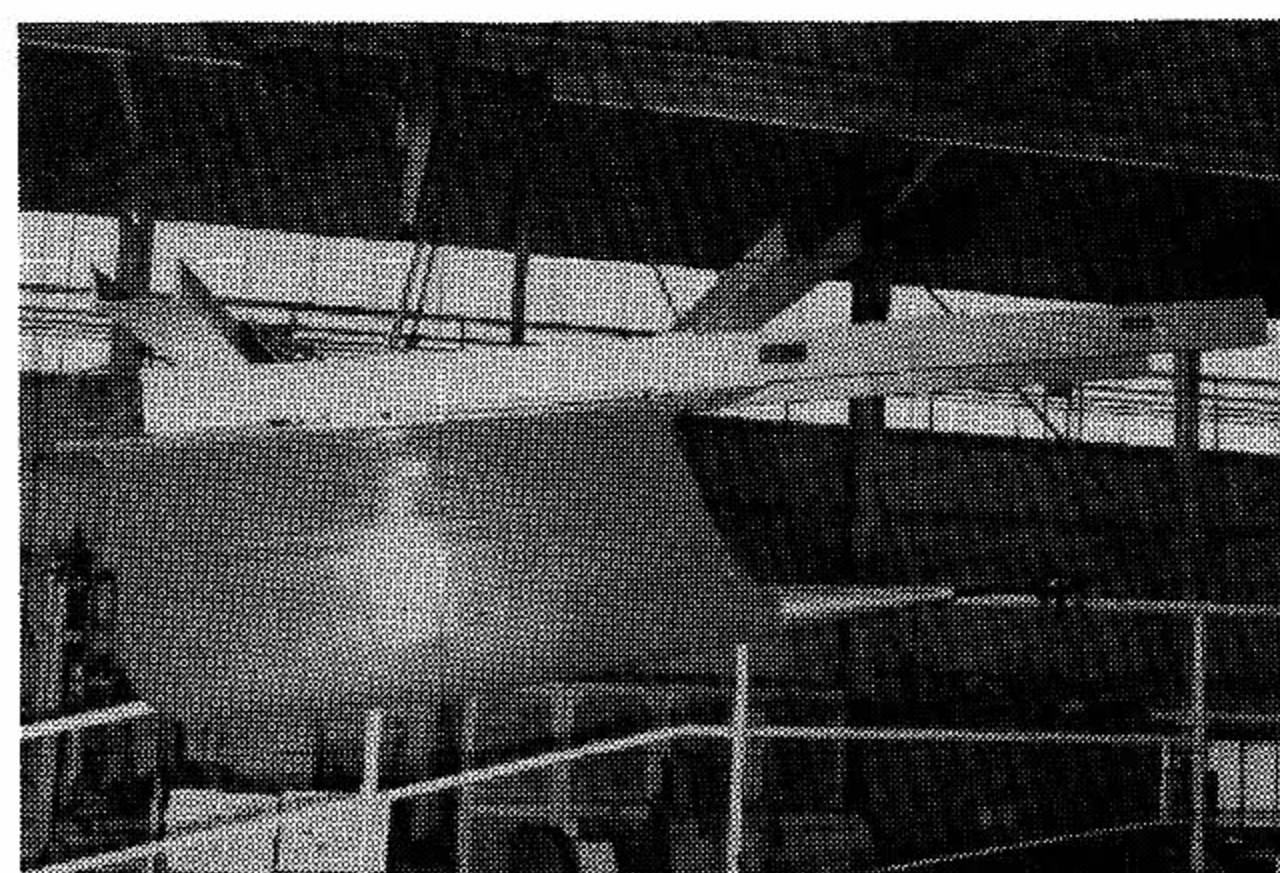
(1) 船体要目	
(a) Lpp	60.0 m
(b) B	13.0 m
(c) Draft	3.5 m
(d) Dispt.	1,567 t
(e) Lpp/B	4.62
(f) B/d	3.71
(g) C_b	0.56
(h) ℓ_{cb}	2.0 % Lpp
(2) 主 機	
(a) MCR:	850PS x 220rpm x 2
(b) NOR:	720PS x 220rpm x 2
(3) プロペラ	
(a) CPP:	4翼
(b) D_p	= 2.3 m

表2 実験に使用した模型CPP要目
Characteristics of CPP model, used for experiment

(1) 翼 数	； 4翼
(2) 直 径	； 0.2127
(3) 基準ピッチ比(0.7 R)	； 0.98
(4) ボス比	； 0.30
(5) 展開面積比	； 0.57



(1) 後方, view afward



(2) 真横, side view

写真1 オープンボート
Open boat

的に中立翼角とした。

図2は本模型CPPの翼角を基準ピッチおよび中立ピッチに設定したときのピッチ分布を示す。

この図から中立翼角時のピッチ分布に関し、次のことがわかる。

(a) 翼角の変更によってプロペラ先端付近では負のピッチとなるが、翼根部では正のピッチが保たれている。

(b) この状態でプロペラを稼働させると、翼先端付近は負の推力（負の流速）、翼根部では正の推力（正の流速）を発生し、全体として推力はゼロとなるが、周辺の流速は正、負が行き交い、さわめて複雑な流場となる。

(2) プロペラ回転数、船速

模型CPPの流場を実船CPPの流場と相似に保つため、次の条件が満たされねばならない。

(a) 幾何形状が相似であること

(b) プロペラの前進率が同一であること

すなわち、 $J_s = J_m$ (1)

ここで、 $J = v / nD$ ；前進率

v ；プロペラ流入速度

n ；プロペラ回転数

D ；プロペラ直径

s, m ；実機および模型

このうち、(a)については、中立ピッチ設定によってほぼ満足されるものとする。また(b)については実機、模型とも船体停止時、すなわち、 $v = 0$ の流場を対象としているので、

回流水槽の流速をゼロとすればプロペラ回転数のいかに問わず、下記を満足する。

$$J_s = J_m = 0 \quad (2)$$

このような条件で実験を行えば周辺の流場は相似となる。さて、プロペラ回転数の選定は、後述のように、プロペラの誘起速度はプロペラの回転数に比例して大きくなるので、計測精度向上の見地からなるべく高い回転数で実験を行うことが望ましい。air draw等の制約から、本実験では10 rpsとした。

2.2 観測および計測の方法

2.2.1 観測方法

中立翼角のCPPの稼働によって生ずる誘起速度の大きさおよび流向は、前述のピッチ分布から予想されるように、かなり非定常、不均一で複雑なものとなろう。この様相を把握して計測の可否を判断するため、まず毛糸およびトレサーによる流れの可視化を行った。

観測は目視、ビデオカメラおよび写真撮影によって行った。ここで用いたトレサーはポリスチロール製で、直径約1 mmの白色球状粒子であり、比重が約1.0強であるため、静止水面に散布するときわめて微速で沈降する性質をもっている。本実験にこのトレサーを使用すると、プロペラの誘起速度の範囲がトレサーの流動によって明確に把握できるのできわめて有効である。

2.2.2 計測方法

上述の観測結果を考慮して、図3に示すようなCPP周辺の代表点の流速、流向をプロペラ式流速流向計を用いて計測する。この流速計の概要は次の通りである。

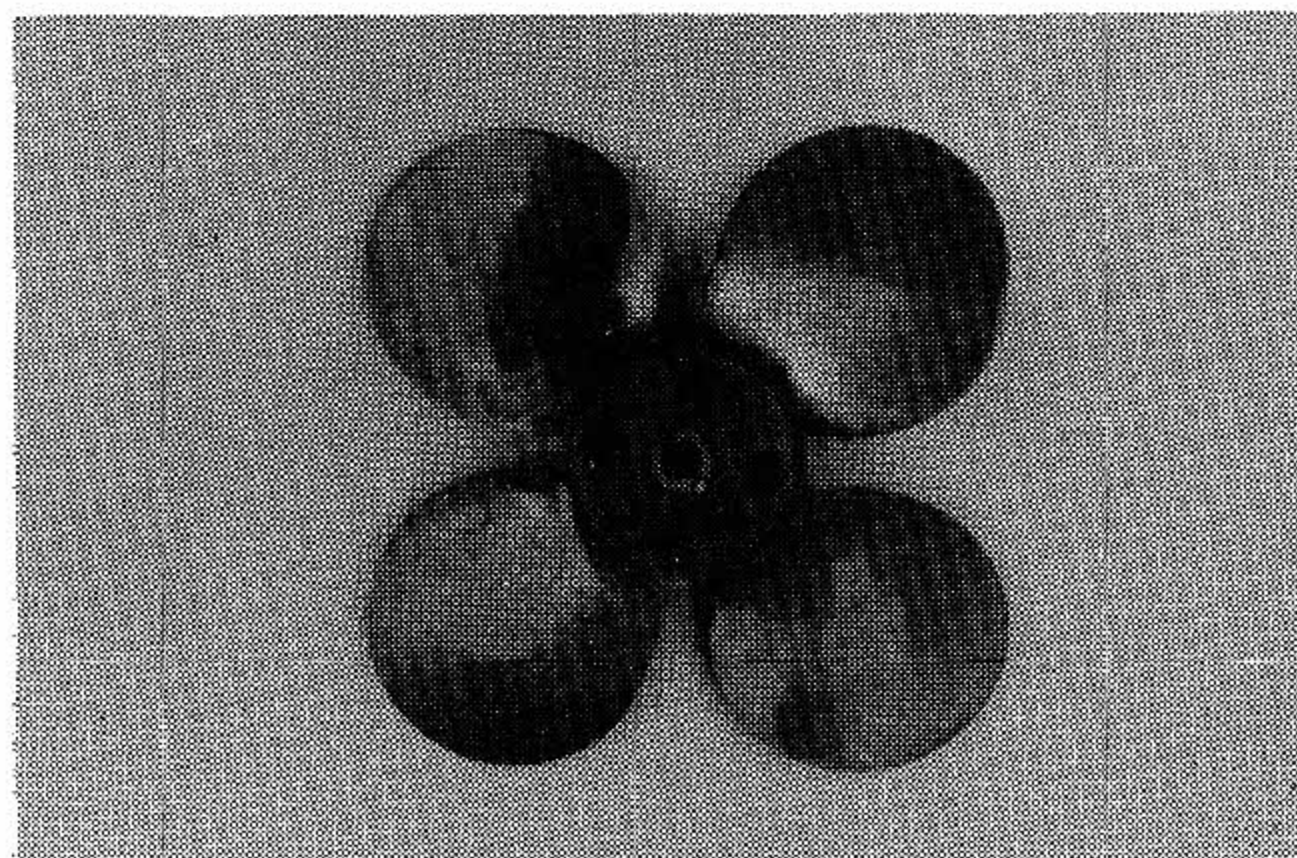


写真2 模型CPP（中立翼角時）

Model of CPP (at neutral pitch)

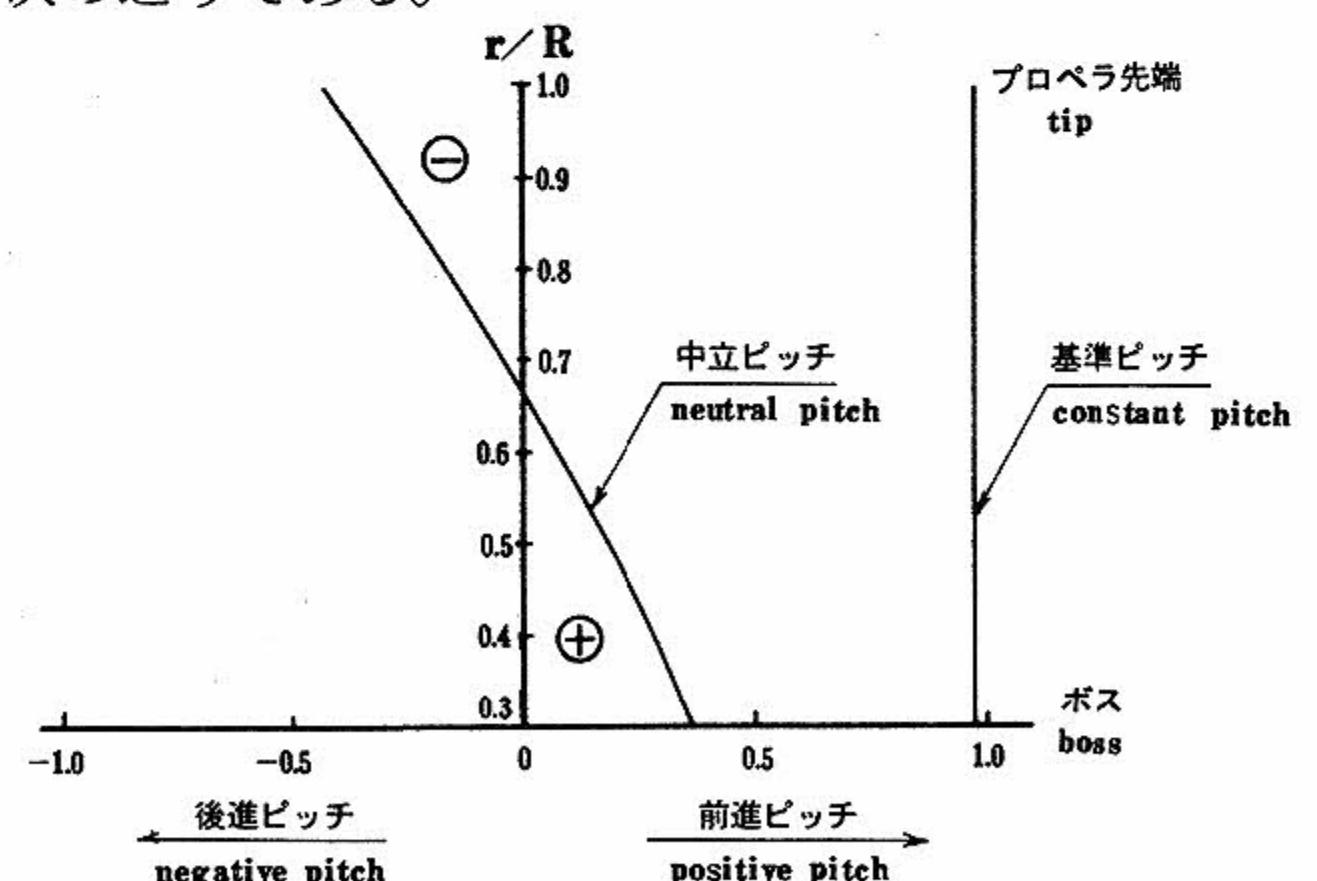


図2 中立翼角時のピッチ分布

Radial pitch distribution at neutral pitch

プロペラ式流速流向計：

- (1) スクリュー直径 20 mm
- (2) スクリュー翼数 4 翼
- (3) 測定可能範囲 2 ~ 100 cm/s
- (4) 測定可能方向 0 ~ 180°

写真 3 に流速計を示す。

2.3 実船への換算方法

模型実験で、計測された CPP の誘起流速値 v_m と実船相当の流速値 v_s との間にはプロペラの周速を $\pi D_p n$ として、次の関係がある。

$$\begin{aligned} v_s &= \left(\frac{\pi D_{ps} n_s}{\pi D_{pm} n_m} \right) \times v_m \\ &= \left(\frac{D_{ps}}{D_{pm}} \right) \times \left(\frac{n_s}{n_m} \right) \times v_m \\ &= 1.8 v_m \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 D_{ps} ；実船プロペラ直径、2.3 m

D_{pm} ；模型プロペラ直径、0.2127 m

n_s ；実船のプロペラ回転数(rps)

搭載機関の最低回転数は約 80 rpm であるので、ここでは若干余裕をみて 100 rpm を CPP 中立時の回転数とした。

すなわち、 $n_s = 1,667$ rps

n_m ；模型のプロペラ回転数

上述のように、 $n_m = 10$ rps

模型実験値 v_m の 1.8 倍が対応個所における実船プロペラの誘起速度 v_s となる。

3. 実験結果

3.1 観測結果

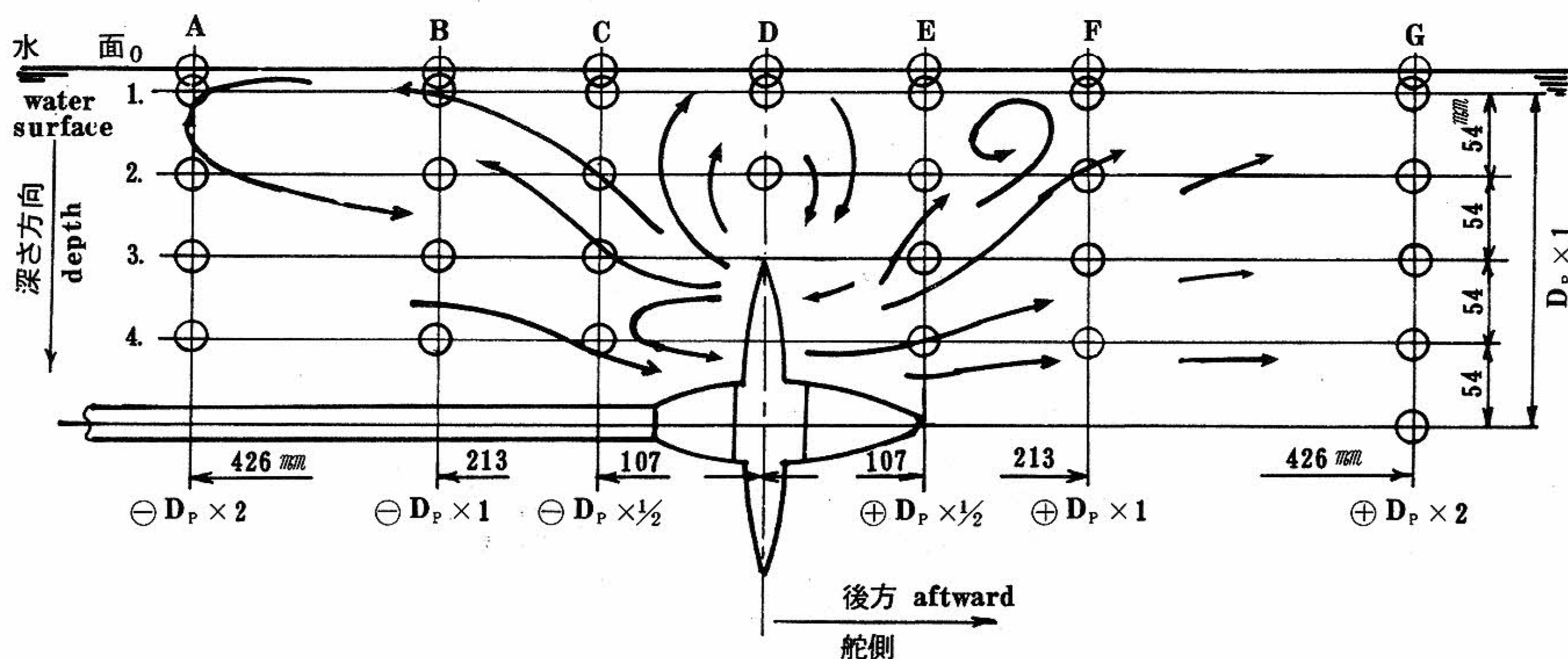
中立翼角 CPP を上述の条件で稼働させておき、その周辺にトレーサを散布し、流れの挙動を目視およびビデオカメラで観測し、写真撮影した。

これによると予想した通り、CPP のごく近傍の流れは場所によって前方、後方に行き交い、かつ回転してきわめて非定常、不均一な様相を示した。しかし、この複雑な流れも CPP のごく近傍のみにとどまり、CPP から後方 $D_p \times 2 \sim D_p \times 3$ (実船で 4.6 ~ 6.9 m、ただし D_p はプロペラの直径) 程度離れるとかなりおさまり、かつ微速になることが観測された。

上述の様相を示す一例として写真による流れの可視化を写真 4 に示す。これは CPP の直上付近および後方 $D_p \times 2$ 付近にトレーサを流し、この動きを下記の条件で撮影したものである。

撮影条件；

- (1) カメラ：キャノン F T B
シャッター速度；1 / 15 s
- (2) フラッシュ：F P - 6 B ナショナル
発光時間；約 1 / 25 s



○計測位置を示す。ただし、プロペラ軸を含む垂直面内の点である。

→ 流向の概略を示す。

図 3 流速計測位置

Measurement point of flow speed

写真4はフラッシュ発光時間約 $1/25\text{ s}$ におけるトレサーの軌跡を示しているものである。写真4および目視および写真観測等から総合して得られた流向のスケッチ（図3参照）から次のことがわかる。

- (1) CPP位置から後方 $D_p \times 1$ の範囲では不均一で、かつ渦を伴った複雑な流れとなっている。

このことから中立翼角CPPによる流れの特徴であるプロペラ先端付近では前方へ、ボス付近では後方へ向う流れがあり、これらの流れの一部がShort Circuitして逆流しているのがうかがえる。一方、 $D_p \times 2$ 付近になるとトレサーの動きはきわめて微小となる。

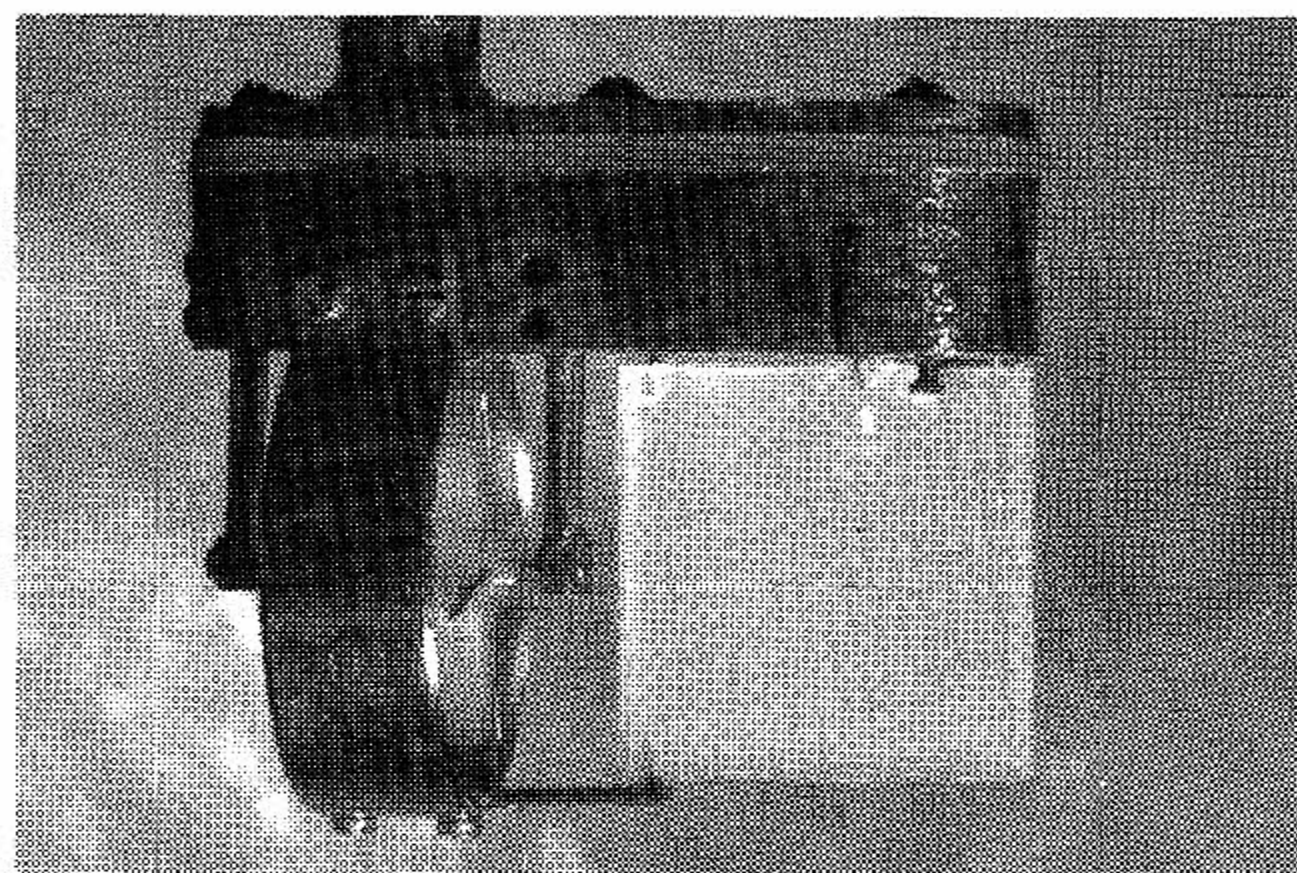
- (2) フラッシュ発光時間 $1/25\text{ s}$ のトレサーの軌跡の長さから、CPP後方 $D_p \times 1 \sim 2$ 付近の流速の最大値を近似的に求めて見ると実船相当で次の通りとなる。

CPP後方； $D_p \times \frac{1}{2} \sim D_p \times 1$

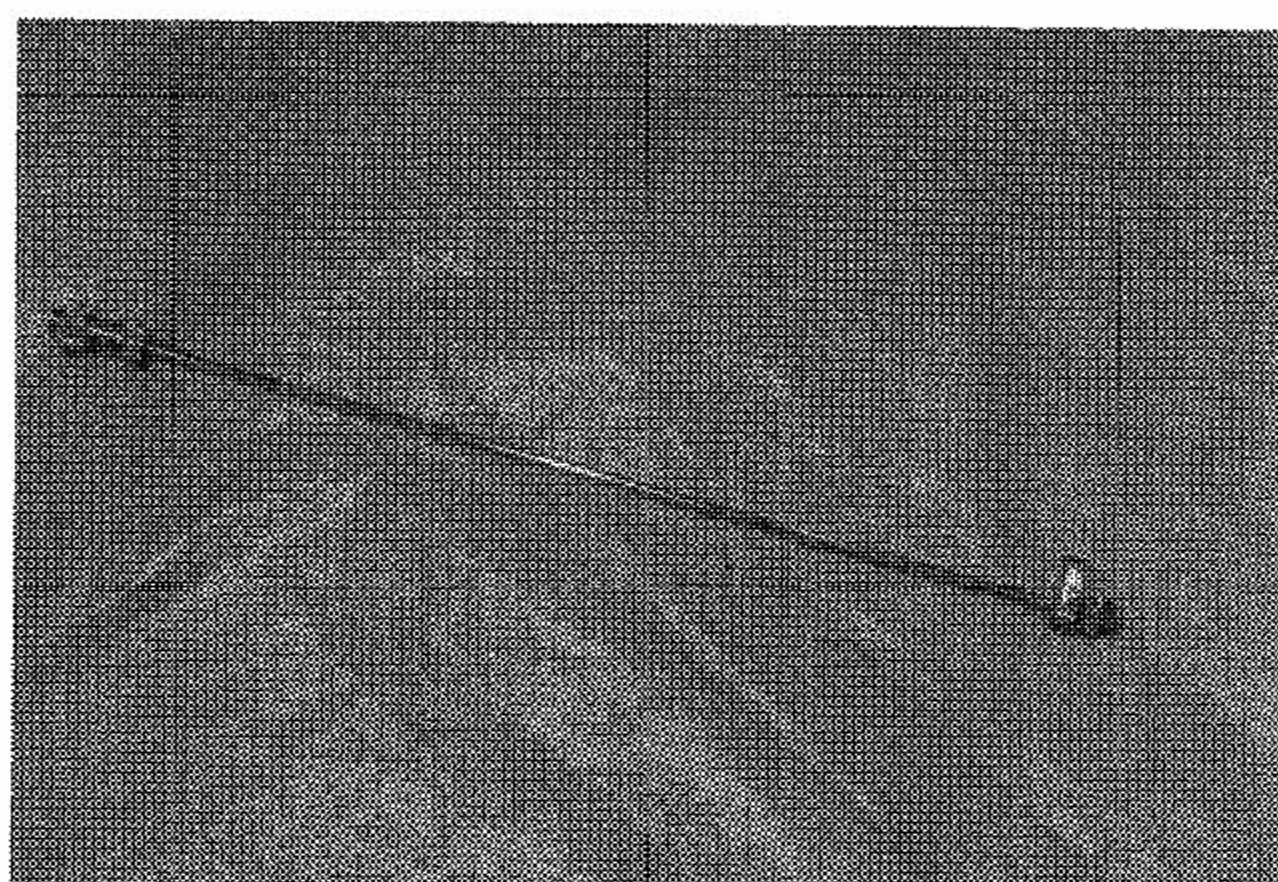
$$\dots\dots v \doteq 0.5\text{ m/s}$$

$$D_p \times 2 \dots\dots v \doteq 0.08\text{ m/s}$$

ただし、流速は後方に向う流れである。これによれば、ダイバー等への危険性から今回特に問題としているCPP後方 $D_p \times 2$ およびこれ以上離れた箇所でのプロペラ後流の大きさはかなり微小であり、問題視するオーダーでないと言えよう。

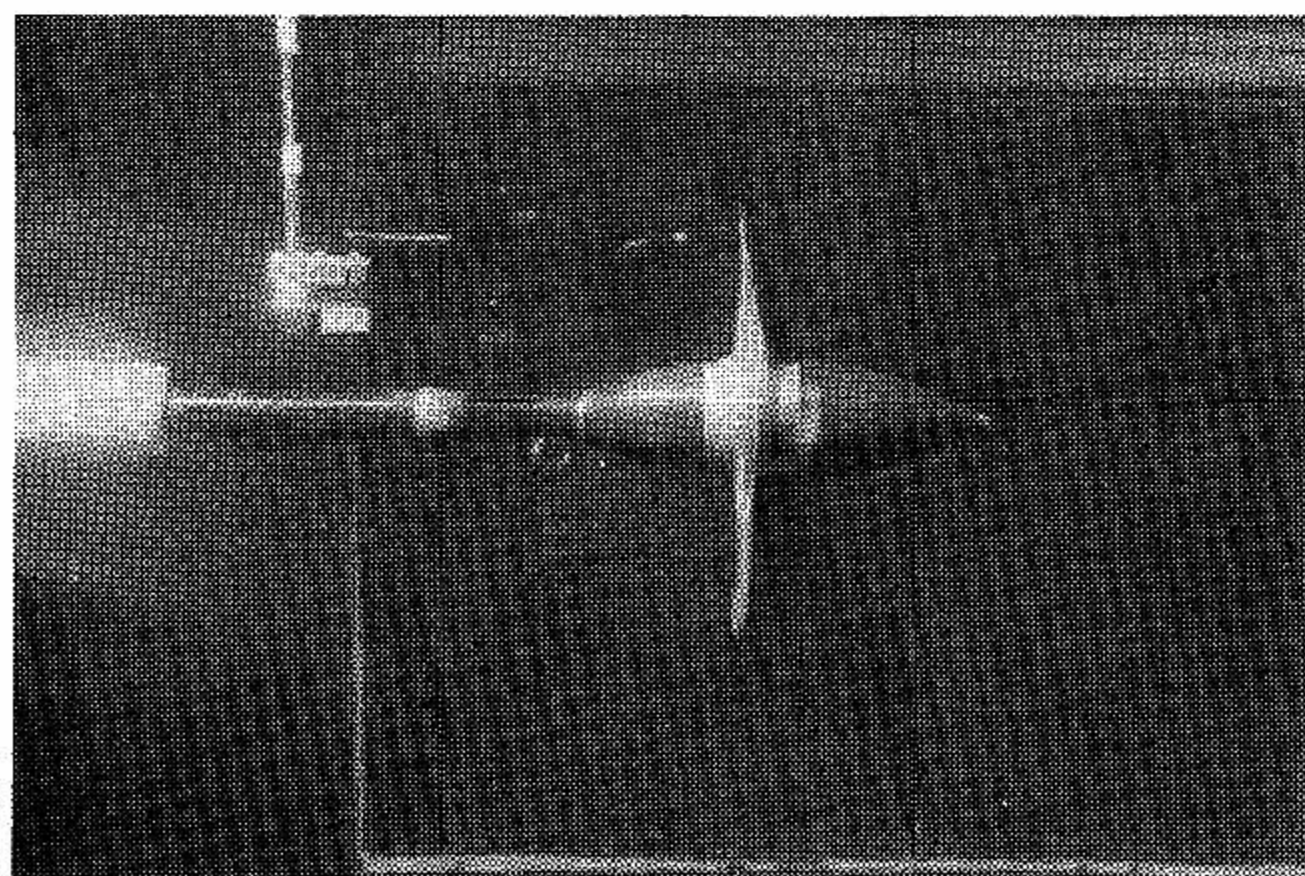


(i)



(ii)

(a) 流速流向計, flowmeter



(b) 流向, 流速の計測

measurement of flow line and speed

写真3 プロペラ式流速流向計

Flowmeter (propeller type)

3.2 計測結果

C P P 周辺の流速の計測が 2.2.2 に示したプロペラ式流速流向計を用いて行われた。

前節の観測結果から分るように、C P P の直前および直後の流速、流向は予想以上に非定常、不均一であること、また C P P のごく近傍を除いてかなり微速であること等のために流速計測を十分な精度で行うことはきわめてむずかしい。しかしある程度流向が安定し、計測が可能と考えられる C P P 後方 $D_p \times 2$ 付近の流速計測を主に行うことにした。流速計測点の位置を図 3 に示す。前後方向の計測範囲は C P P の位置を中心にして前方に $D_p \times 2$, $D_p \times 1$, $D_p \times \frac{1}{2}$ および後方に $D_p \times \frac{1}{2}$, $D_p \times 1$, $D_p \times 2$ の 5 断面 (A ~ G) とした。一方、深さ方向は水面からプロペラ軸心付近まで 4 断面 (番号 0 ~ 4) とした。このうち、水面の流速のみ、流木法で計測し、その他は流速計によった。

計測結果を(3)式を使用して実船に換算し、表 3 に示した。ただし、流れの非定常、不均一性のために三次元方向の流向を精度よく計測することが困難であったため、前方に流れる場合を“マイナス”，後方に流れる場合を“プラス”として区別するにとどめた。

表 3 から次のことが分る。

- (1) C P P のごく近傍，すなわち $\ominus D_p \times \frac{1}{2} \sim D_p \times \frac{1}{2}$ での最高流速は 0.55 m/s 程度であり，複雑な流速，流向分布となっている。
- (2) C P P から $D_p \times 1$ 程度離れたところでの最高流速は 0.2 m/s 程度で小さい。
- (3) C P P からさらに後方 $D_p \times 2$ 程度 (約 4.6 m) 離れると，流速はかなり減少して約 0.04 ~ 0.08 m/s 程度となり，かつ後方に向う流れとなっている。
- (4) これらの流速値は，写真撮影によるトレーサーの軌跡から求めた流速値と同程度のオーダーとなっている。

表 3 C P P 周辺の流速値 (実船に換算済)
Measured flow velocity around CPP
(converted for actual value)

前後 方向 深さ 方向	A	B	C	D	E	F	G
0	$\ominus 0.03$	—	—	0.03	0.03	0.03	0.0
1	$\ominus 0.09$	$\ominus 0.14$	$\ominus 0.42$	0.05	0.09	0.10	0.08
2	0.03	0.05	$\ominus 0.48$	0.05	0.34	0.18	0.04
3	0.03	0.05	$\ominus 0.55$		0.23	0.09	0.04
4	0.03	0.04	0.39		0.21	0.04	0.04

(単位 m/s)

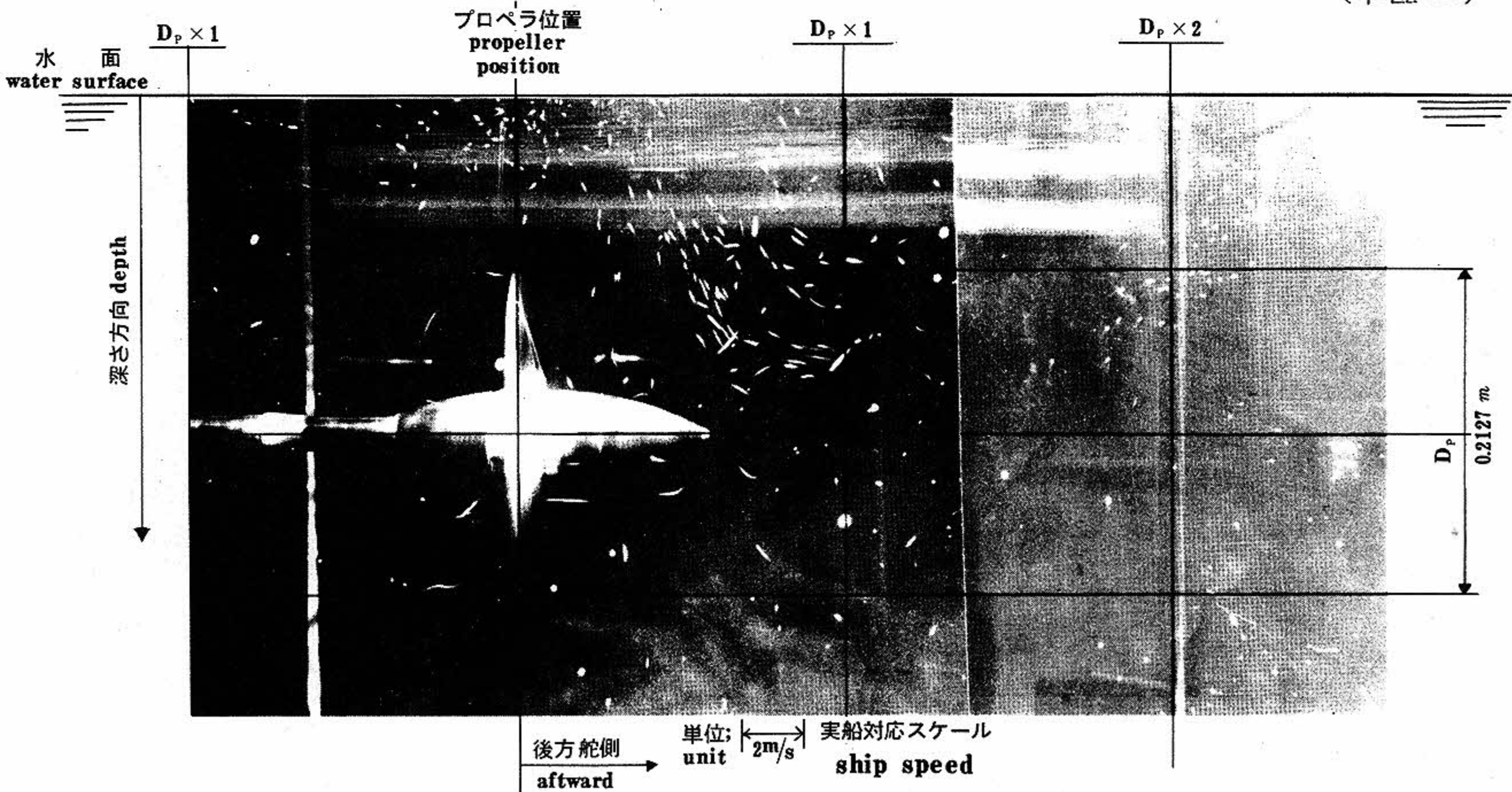


写真 4 C P P 周辺の流れ (トレーサーによる観測)
Flow lines around the CPP (observation by tracer)

以上の計測結果により、CPPの後方 $D_p \times 2$ 以上離れた領域でのCPP後流の大きさはきわめて微小でかつ後方へ向う流れとなっており、したがってダイバーの吸込み等の危険性は全くないこと、また潜水調査船の安定性に対する悪影響もほとんど考えられないこと等が明らかになった。

4. ま と め

潜水調査母船の着水揚収オペレーション時に中立翼角で作動するCPPの後流が、CPP後方 $D_p \times 2$ 以上離れた箇所で、作業をするダイバーとか、潜水調査船に及ぼす影響を調べるため、回流水槽にてCPP単独試験を行い、プロペラ誘起

流場の観測および計測を行った。これによると、

- (1) CPPのごく近傍、すなわち $\ominus D_p \times \frac{1}{2} \sim D_p \times \frac{1}{2}$ の範囲では、最高流速 0.55 m/s 程でやや大きく、きわめて非定常、不均一で複雑な流れとなっている。
- (2) しかし、CPPの後方 $D_p \times 2$ 程度離れると、流れの複雑さがおさまリ、流速は $0.04 \sim 0.08 \text{ m/s}$ とかなり微小となる。したがって、 $D_p \times 2$ 以上離れた箇所で作業するダイバーとか、潜水調査船へ及ぼす後流の大きさはさらに微小となり、悪影響はほとんど考えられない。