

操縦運動時の船体まわりの流場に関する研究

運動性能部 野中 晃二、原口 富博、二村 正、上野 道雄、藤原 敏文
推進性能部 牧野 雅彦、児玉 良明
元運動性能部 吉野 良枝

Research on Flow Field around a Ship in Manoeuvring Motion

by

Koji NONAKA, Tomihiro HARAGUCHI, Tadashi NIMURA,
Michio UENO, Toshifumi FUJIWARA, Masahiko MAKINO,
Yoshiaki KODAMA, Yoshie YOSHINO

ABSTRACT

An accurate method of estimating ship manoeuvrability needs to be developed to accurately evaluate and improve the manoeuvrability of ships. In order to estimate manoeuvrability by a mathematical model, the hydrodynamic forces acting on a ship in manoeuvring motion need to be estimated, for which information on the flow field around a ship is needed.

In this research, we investigated the flow field around a ship and developed a method of estimating the hydrodynamic forces.

We measured the flow field at the ship stern in detail, since this information is particularly important for manoeuvrability. We collected data on the characteristics of the flow field around a ship and developed a method to estimate hydrodynamic forces acting on a ship in manoeuvring motion.

We studied two methods of estimating hydrodynamic forces. One is a simple, practical method that can be used at the initial design stage. We proposed an approximation method based on the slender body theory. The other is a precise method called CFD (Computational Fluid Dynamics) that can estimate flow field and hydrodynamic forces in detail. The CFD method is increasingly used in the study of ship resistance and propulsion. We used the CFD method to study oblique towing motion, and confirmed that the method can be used to estimate hydrodynamic forces acting on a ship in manoeuvring motion.

In addition to the above researches, we conducted free-running model tests of dry cargo ships to study the effect of loading conditions on manoeuvrability, and found that a change in draft affects the course stability.

The results of these studies will facilitate future research of ship manoeuvrability.

目次

1. 緒言	2
2. 斜航時流場の研究	2
2.1 概要	2
2.2 供試模型船及び実験内容	3
2.3 斜航船体まわりの流場の特徴	5
2.4 実験結果と考察	7
2.5 流体力計測結果	15
2.6 まとめ	17
参考文献	19
3. 操縦流体力推定法の研究 (その1.実用的推定法)	19
3.1 概要	19
3.2 流体力の推定式	21
3.3 流場の推定式	24
3.4 計算方法	30
3.5 計算結果と実験結果の比較	32
3.6 まとめ	42
参考文献	43
4. 操縦流体力推定法の研究 (その2.高精度推定法)	44
4.1 概要	44
4.2 定式化	44
4.3 NS計算	44
4.4 まとめ	51
参考文献	51
5. 載貨状態と操縦性能	51
5.1 概要	51
5.2 実験方法	51
5.3 実験結果と考察	52
5.4 まとめ	66
参考文献	66
6. 結言	66
6.1 研究成果	66
6.2 研究成果の活用方法と今後の課題	67
7. 発表論文リスト	68

1. 緒言

船舶の航行安全性の確保は、人命安全上、経済性上のみならず、タンカー事故等による海洋汚染、環境破壊を防ぐための海洋環境保護という面からも、社会的に強く要請されている。

海難事故の約半分ほどの割合を占め、かつ、重大事故につながる危険性の高い衝突・座礁事故を少なくするには、船舶の操縦性能の正確な把握と性能向上が重要であり、国際海事機関 (IMO) における船舶の操縦性基準設定の動きも、この認識に立つものである。

船舶の操縦性能の正確な把握と性能向上のためには、操縦性能の精度良い推定技術の確立が必要となる。特に、設

計段階において操縦性能を推定し、操縦性基準を満足する船型にしなければならないという、IMOの操縦性基準への対応の必要性からも、船舶の操縦性能の精度良い推定技術の確立が世界的に強く要請されている。

船舶の操縦性能推定に必要な、船体に働く操縦流体力を推定するには、操縦運動時の船体まわりの流場の把握が必要となるが、精度良い流場モデルを構築出来るほど流場の把握は進んでなく、操縦性能推定に必要な操縦流体力を理論計算のみで推定できる段階にはなっていない。

船体に働く操縦流体力の推定においては、主船体に働く流体力の推定と、主船体・プロペラ・舵の間の相互干渉力の推定が重要な研究課題となっているが、本研究においては、主船体に働く操縦流体力に的を絞り、流場の把握および流体力推定の技術開発と精度向上のための基礎的研究を進めた。

流場把握については、3隻のVLCCの模型船を用いて、船体まわりの流場において、操縦性上重要な流場情報が最も集積している船尾付近の流場を、斜航状態について計測した。

操縦流体力の推定については、上述の流場資料等を参考に、取り扱いの比較的容易な渦層をもつ非粘性流体の仮定のもとに、操縦流体力推定のための流場モデルおよび計算手法の開発を進めるとともに、抵抗・推進分野で実用化が進みつつある数値流体力学の、操縦流体力推定への適用について検討を行った。

なお、実際の操縦性能推定の段階で問題となっている、載貨状態と操縦性能の関係についての資料を得るため、2隻の乾貨物船について、載貨状態の違いによる操縦性能の変化を調べるための自由航走模型試験を行った。

本報告においては、斜航時流場、操縦流体力についての実用的推定法と高精度推定法、及び、載貨状態と操縦性能に分けて、本研究の内容と成果を報告する。

2. 斜航時流場の研究

2.1 概要

船体に働く流体力の推定には、船体まわりの流場の把握が必要になるが、操縦流体力の推定においては、横力発生の主要因となる剥離渦流を含む船尾付近の流場の把握が特に重要となる。主要目は同じでも、船尾形状の違いにより大きく操縦性能が変化する例も報告されており、IMO操縦性暫定基準の施行とあいまって、フレームライン等の詳細な船体形状の影響も考慮出来る精度良い操縦流体力推定法の開発が急務となっている。そのためにも、操縦運動している船体まわりの流場の正しい把握が要求されている。

今回、操縦流体力推定法の開発に資する事を目的に、主要目がほぼ同じで船尾形状のみ異なる3隻のVLCC船型について、斜航時の船尾流場の5孔ピトー管による計測、

タフト法による船尾流場の観察、および船体に働く流体力計測を行い、斜航時の流場の特徴の把握、船尾形状と船尾流場、流体力との関係の把握を試みた。

流場計測では、二つの渦グループに代表される斜航時流場の特徴は、定性的には船型による大きな差は見られないものの、伴流分布、渦度分布の集中度、範囲、強さ等に船型により明確な差が現れた。流体力計測においても、横力、回頭モーメントそのものには大きな差はないものの、操縦性能に大きく影響する圧力中心に船型による明確な差が現れた。

本研究により得られた知見は、今後の操縦流体力推定法の開発に有効な資料となると考え、ここに報告する。

なお、Ship - A、B両船型については、大森他 [1] [2] により、斜航状態と定常旋回状態での船体表面圧力分布計測及び流場と流体力の推定計算が、又、牧野他 [3] により、斜航状態での流場と流体力の推定計算が報告されている。

2.2 供試模型船及び実験内容

2.2.1 供試模型船および実験状態

実験に使用した模型船の要目をTable 2.1に、船体形状をFig. 2.1に示す。Ship - A、C、Bの3船型は主要目がほぼ同じで、S.S.4より後方の船尾形状が異なっている。Ship - Aは、船尾部断面形状がV型と称されるもので、喫水線での船体幅が広く、船底幅が狭い船型である。逆に、Ship - BはU型と称されるもので、喫水線での船体幅が狭く、船底幅が広い船型である。Ship - Cはその中間型である。実験はすべて舵、プロペラなしの船体単独について行った。

行った実験は、斜航船体の5孔ピトー管による船尾流場計測、タフトによる船尾流場の可視化実験、斜航船体に働く流体力計測の3種類で、その実験内容をTable 2.2に示す。可視化実験は、表面タフト法による船体後半部の表面流の可視化と、タフトグリッド法による船尾流場の可視化を行った。実験方法の詳細については後述する。

2.2.2 5孔管による流場計測の方法

流場計測は直径12mmの球形5孔ピトー管を用い、Fig. 2.2に示すように、模型船の進行方向に垂直な断面を上下左右20mmの間隔で計測を行った。水圧は半導体圧力計により計測し、サンプリング周波数10HzでA/D変換して、5秒間の平均値を計算機に取り込んだ。計測断面はA.P.断面での計測を主体とした。Table 2.2に示すように、Ship - A、Bについては、船尾付近での船体に沿った流場の変化を見るためS.S.1断面とA.P.断面で流場を計測したが、S.S.1断面では装置の都合上船体近くの流場は計測できなかった。Ship - Cについては、船体後方での流場の変化を見るため、A.P.断面とS.S.-2断面において流場計測を行った。水槽使用期間の制限のため一部計測できなかった状態

Table 2.1 Principal Particulars of Ship Models

	Ship-A	Ship-C	Ship-B
L _{pp} (m)	3.50	3.50	3.50
B (m)	0.634	0.634	0.634
d (m)	0.211	0.211	0.211
L/B	5.52	5.52	5.52
B/d	3.01	3.01	3.01
Disp. (m ³)	0.37706	0.37652	0.37581

(Model Scale = 1/91.43)

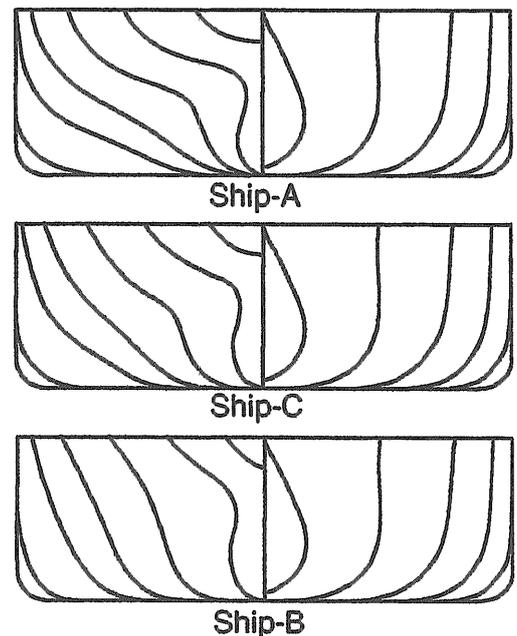


Fig. 2.1 Body Plans

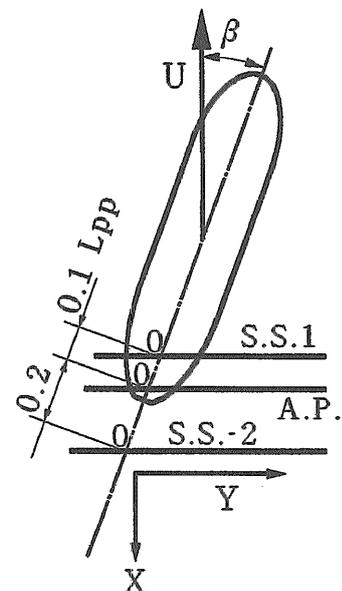


Fig. 2.2 Cross Sections for Flow Field Measurements

Table 2.2 Experimental Conditions

Kind of Experiment	Wake Measurement	Flow Visualization		Measurement of Hydrodynamic Forces
Measurement Apparatus	5-Hole Pitot Tube	Tufts on Ship Surface	Tuft Grid	Force Gauge
Ship Speed	$U = 0.81\text{m/s}$ $Fn = 0.138$ $Rn = 2.4 \times 10^6$	$U = 0.43\text{m/s}$ $Fn = 0.073$ $Rn = 1.3 \times 10^6$	$U = 0.43\text{m/s}$ $Fn = 0.073$ $Rn = 1.3 \times 10^6$	$U = 0.81, 0.43\text{ m/s}$ $Fn = 0.138, 0.073$ $Rn = 2.4 \times 10^6, 1.3 \times 10^6$
Ship-A	A.P. $\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$ S.S.1 $\beta = 0^\circ, 9^\circ$	$\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$		$\beta = -24^\circ \sim +24^\circ$
Ship-C	A.P. $\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$ S.S.-2 $\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$		A.P. $\beta = 0^\circ, 4.5^\circ, 9^\circ, 13.5^\circ, 18^\circ$ S.S.-2 $\beta = 0^\circ, 4.5^\circ, 9^\circ, 13.5^\circ, 18^\circ$	$\beta = -24^\circ \sim +24^\circ$
Ship-B	A.P. $\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$ S.S.1 $\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$	$\beta = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$		$\beta = -24^\circ \sim +24^\circ$

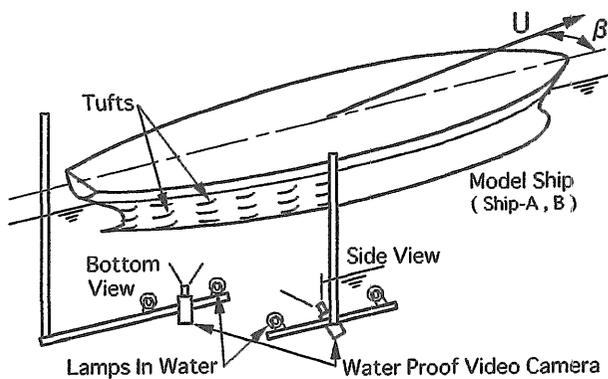
(β : Drift Angle)

Fig.2.3 Setup for Flow Visualization by Surface Tufts

があるが、各々の断面の斜航角 0° 、 9° 、 18° について計測した。船速は $U = 0.81\text{m/s}$ ($Fn = 0.138$, $Rn = 2.4 \times 10^6$ 、ただし代表的長さは船長とした。)の一状態である。

2.2.3 表面タフト法による可視化実験の方法

表面タフト法による可視化実験はShip - A、Bについて行った。実験配置図をFig.2.3に示す。

表面タフト法による可視化実験は船尾船体表面に絹糸をアルミテープで張り付け、水中ビデオカメラにより船側、船底のタフトの様子を観察した。また、撮影した画像から平均的なタフトの向きを読み取り、視角補正を行い後述する可視化図を作った。観察した斜航角はTable2.2に示すように、 $\beta = 0^\circ$ 、 9° 、 18° で、船速は $U = 0.43\text{m/s}$ の一状態である。

2.2.4 タフトグリッド法による可視化実験の方法

最近、タフト法の新しい手法として航空機や自動車の分野で蛍光ミニタフト法が用いられているが、この蛍光ミニタフト法は通常のタフト法に比べ鮮明な画像が得られている [4]。そこで、今回水中にもこの方法の適用を試みた。実験配置図をFig.2.4に示す。タフトグリッドを、5孔管による流場計測と同様に模型船の進行方向に垂直な断面に置

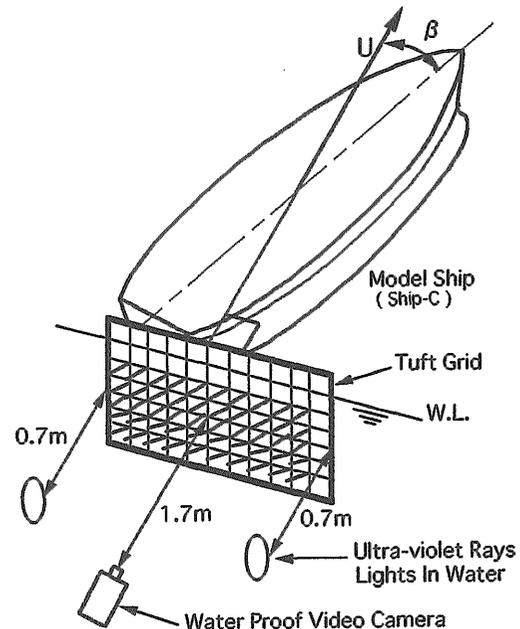


Fig.2.4 Setup for Flow Visualization by Taft Grid

き、その後方の水中ビデオカメラにより観察を行った。グリッド部は 0.7mm の釣糸製で、寸法は幅 400mm 、深さ 240mm 、格子点間隔 20mm である。タフトは、水中での紫外線の減衰が大きいことを考慮し、太さ 0.8mm 、長さ 50mm の蛍光染料で染色したナイロン製を使用した。比重は水よりも僅に重い。照明は水銀灯の外球に紫外線透過フィルターを使用した市販品で、 400W 2灯を水中に設置した。なお観察断面に比べタフトグリッドが小さいため、1航走ごとに模型を横方向に移動し、断面全体を観察した。Table2.2に示すようにタフトグリッド法による可視化実験はShip - Cについて行った。船速は $U = 0.43\text{m/s}$ の一状態、斜航角は $\beta = 0^\circ$ 、 4.5° 、 9° 、 13.5° 、 18° で、観察断面はA.P.断面と船体後方のS.S.-2断面であるが、A.P.断面については船体があるためA.P.断面より 140mm 後方の断面を観察している。

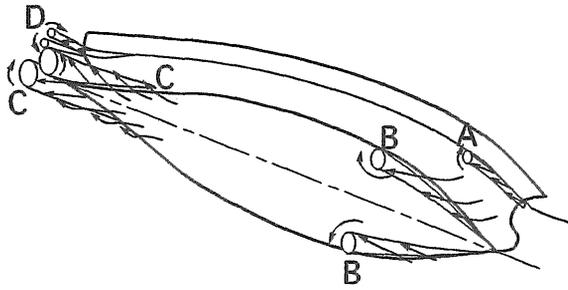


Fig.2.5 Separation Vortices under Straight Towing Condition

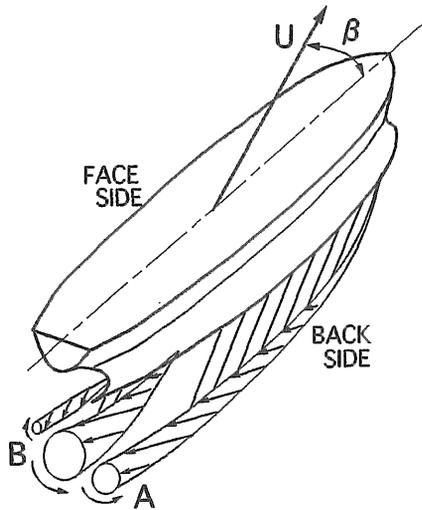


Fig.2.6 Separation Vortices under Obliquely Towing Condition

2.2.5 流体力計測の方法

斜航船体に働く流体力 (surge force, sway force, yaw moment) の計測は、pitch、heave、rollを自由にし、曳航点と模型の重心高さを一致させて計測した。船速は実船相当15kt ($U=0.81\text{m/s}$) と8kt ($U=0.43\text{m/s}$) の2種類で、斜航角は -24° から $+24^\circ$ の範囲で流体力及び姿勢変化を計測した。後述する流体力の計測結果はすべて船体固定座標系で、yawmomentはS.S.5まわりのモーメントである。

2.3 斜航船体まわりの流場の特徴

斜航船体まわりの流場に関しては、これまでいくつかの可視化実験や流場計測が行われ、おおよその構造が明らかとなってきた [5] ~ [10]。そこで計測結果について詳しく述べる前に、これまでの研究成果と今回行ったタフトグリッド法による可視化結果及び流場計測結果により、斜航状態の肥大船まわりの流場の特徴について述べる。

2.3.1 直進状態の肥大船まわりの流場

直進状態の肥大船には多くの剥離渦が発生している。それらの主なものを模式的にFig.2.5に示す [10]。船首では、船首水面付近の首飾り渦 (A) と、船首船底の船首ビルジ渦 (B) がある。船尾では、船底ビルジ部の船尾縦渦あるいは船尾ビルジ渦と呼ばれる渦 (C) と、水面付近の跳水渦 (D) 等がある。この他にもビルジキールでの剥離やパブル型の剥離なども観察されている。これらの剥離渦のう

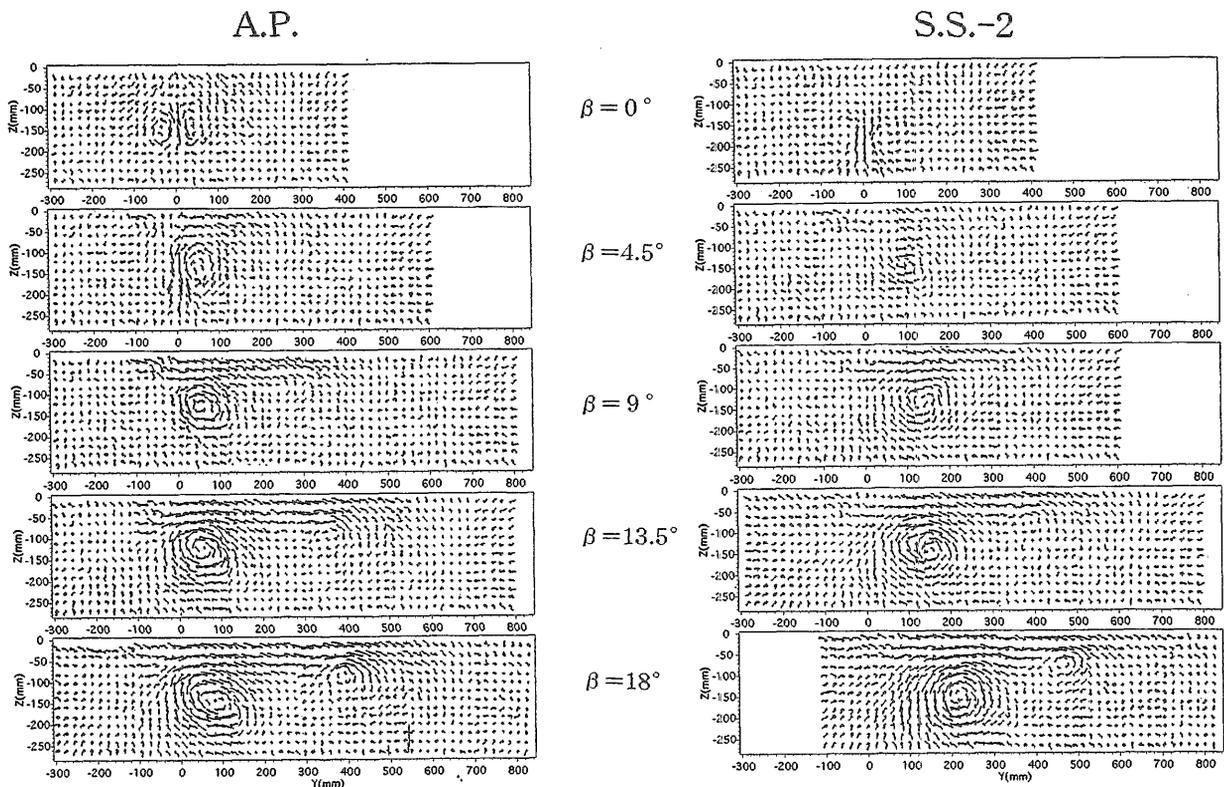


Fig.2.7 Visualized Cross Flow Pattern (Ship-C)

ち、直進状態の船尾で流場を観察した場合に明瞭に認められるものは船尾縦渦 (C) である。

2.3.2 斜航状態の肥大船まわりの流場

前述のような流場を持つ肥大船が斜航した場合、その流場は更に複雑であるが、ここでは横力発生的主要因素と考えられる主な剥離渦を模式的に Fig.2.6 に示す。肥大船が斜航した場合の流場の特徴は、船体前半部から発生する剥離渦 (A) (以下、船首渦と呼ぶ) と、船尾縦渦を含む渦グループ (B) (以下、船尾渦と呼ぶ) の二つの渦 (グループ) の存在である。著者らのこれまでの研究 [8] によれば、斜航角 β がある程度大きい状態においては、船首渦 (A) は船体前半部の船底肩部ビルジ部から発生し、船体平行部ビルジ部の剥離流を巻き込んで行く集中度の強い渦で、その経路は、少しずつ上昇しながらおおそ船体中心面に沿って流れる。船尾渦 (B) は船尾縦渦が斜航角により変化したもので、斜航角の増加とともに Face 側の船尾縦渦が弱くなり、Back 側の船尾縦渦が強くなる。船尾渦は船首渦に比べ広い範囲をゆっくりと巻き込みながら流れる。

Fig.2.7 に今回行った中間的な船型である Ship - C のタフトグリッド法による可視化結果を示す。左側が A.P. 断面、右側が船体後方の S.S. - 2 断面の流場の様子で、 $Y=0$ が船体中心面位置である。ここに示した観測結果は、ある一瞬の画像をつなぎ合わせたものであり、視角補正も行っていない。また、流れにはゆらぎがあるため必ずしも平均的な流場を表わしていない部分もあるが、定性的には以下のような様子が読みとれる。直進状態の A.P. 断面では、一对の船尾縦渦が確認できるが、斜航角が大きくなるに従い、Face 側 (左舷) の渦が弱くなり、Back 側 (右舷) の渦が強くなる。断面間の流場を比較すると、直進状態の A.P. 断面に見られる一对の船尾縦渦は、S.S. - 2 断面では互いに相殺され減衰する。斜航状態の船尾渦は、斜航角の小さいうちは互いに相殺され減衰するが、斜航角が大きくなると相殺量は小さく、残った部分はほぼそのままの強さで後方へ流れている。このような流場の様子は、5孔管計測によりもっと定量的にとらえることができるが、タフトグリッド法による可視化実験は簡単なため、大まかな流れの様子をつかむには便利な方法である。

次に、後述する 5孔管計測から求めた船首渦、船尾渦 (グループ) 各々の渦度の中心位置から、渦の流れる経路について述べる。中間的な船型である Ship - C の船首渦、船尾渦各々の渦度の中心位置を Fig.2.8、2.9 に示す。計測は A.P. 断面と S.S. - 2 断面についてしか行っていないため船体付近の情報はないが、船体後方においては以下のことが言える。斜航角が 9° 、 18° の状態とも船首渦は上昇しながらおおそ船体中心面と平行に流れ、船尾渦は船首渦ほど上昇せず、船体中心面から離れる傾向にある。参考のため、計測範囲すべての渦度の中心位置を Fig.2.10、2.11 に示す。

以上のように、今回実験に供した模型船についても、横

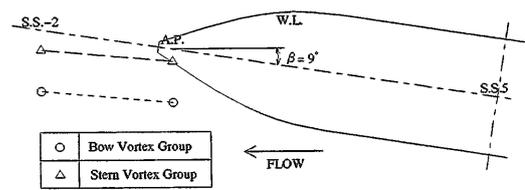


Fig.2.8 Trajectory of Bow and Stern Vortices (Ship-C, $\beta = 9^\circ$)

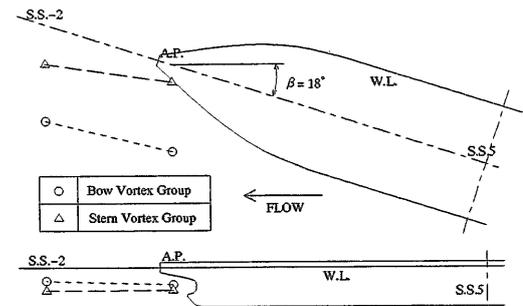


Fig.2.9 Trajectory of Bow and Stern Vortices (Ship-C, $\beta = 18^\circ$)

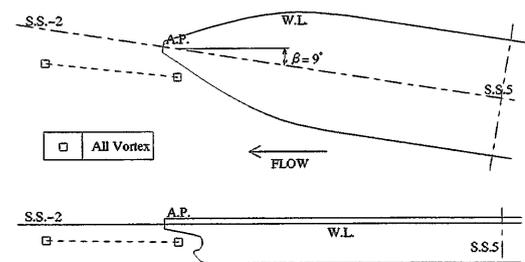


Fig.2.10 Trajectory of Center of Vorticity (Ship-C, $\beta = 9^\circ$)

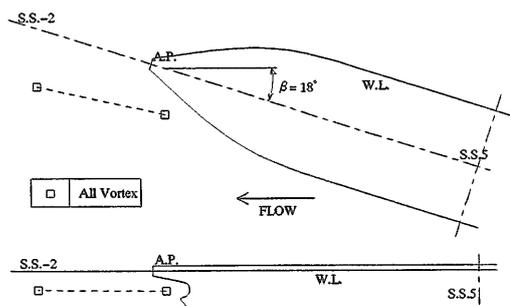


Fig.2.11 Trajectory of Center of Vorticity (Ship-C, $\beta = 18^\circ$)

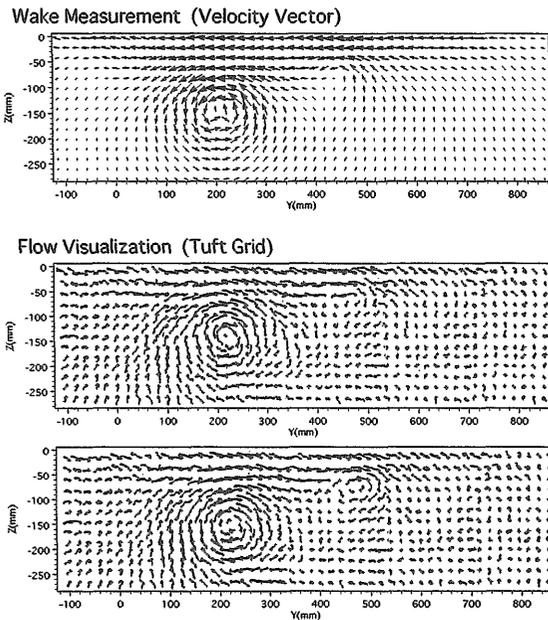


Fig.2.12 Flow Field Measurement and Flow Visualization by Tuft Grid
(Ship - C, $\beta = 18^\circ$, S.S. - 2)

力発生の主要因と考えられる船体前半部から剥離した船首渦と船尾縦渦を主体とする船尾渦という、二つの渦グループに代表される斜航時の流場の特徴、渦強さの変化の傾向、渦の流れる経路など、定性的には著者らのこれまでの研究成果と同じであると言える。

2.3.3 流場のゆらぎと5孔間による流場計測

Fig.2.12にShip - C, $\beta = 18^\circ$, S.S. - 2断面の5孔管により計測した断面内速度ベクトルとタフトグリッド法により撮影したビデオ画像の出力2画面を示す。定性的には速度ベクトルとタフトの様子が良く似ているが、タフトグリッド法の結果を比べると、画像の取り込み時間が違うだけで、タフトの向きや渦の中心位置が移動している。ビデオ観察によれば、斜航角や計測断面によらず、どの状態においても渦の中心付近で周期の短い流場のゆらぎが観察されるが、渦の中心付近以外の流れは安定している。5孔管による流場計測は一点につき5秒間の圧力の平均値から求めた流場で、ゆらぎの周期はこの計測時間に比べると短い周期ではあるが、特に渦中心での圧力計の変動が大きいこと、規則的な圧力変動ではないことから、渦の中心付近の細部構造までは計測できていないと考えられる。例えば、Fig.2.12に示す5孔管により計測した断面内速度ベクトルの、 $Y = 200\text{mm}$ 、船尾渦中心付近のベクトルの向きの不自然さなど、流場のゆらぎによる影響であると考えられ、後述する5孔管による流場計測結果を見る場合には注意を要する。しかし、渦の中心付近以外の流れは安定していることから、渦中心以外については平均的な流場として計測できていると考えている。

2.4 実験結果と考察

2.4.1 5孔管による流場計測

2.3章で斜航船体まわりの流場の定性的な傾向について述べたが、以下では、斜航にともなう流場の変化や、計測断面間の流場の変化、船型の違いによる流場について、5孔管による定量的な計測結果を基に検討を加える。

5孔管による流場計測結果は、伴流分布、渦度分布、速度ベクトルとして表した。ただし、伴流分布といっても船体の長さ方向の速度成分ではなく、計測断面に垂直方向、即ち船体の進行方向の速度成分の分布であり、渦度分布も同様に計測断面内の渦成分の分布である。Ship - A, C, Bの、A.P.断面での伴流分布をFig.2.13に、渦度分布をFig.2.14に、速度ベクトルをFig.2.15に示す。なお、実際の計測はここに示す図よりも横方向に広い範囲について計測を行い、少なくともここに示す計測範囲よりも横には剥離渦が無い事を確認している。

2.4.1.1 直進状態の流場

直進状態における計測結果の左右対称性は、実験精度の評価の一つの目安となる。Fig.2.13の伴流分布の直進状態($\beta = 0^\circ$)を見ると、Ship - A, C, Bともほぼ左右対称な流れとなっている。Fig.2.14の渦度分布の直進状態($\beta = 0^\circ$)では、一対の船尾縦渦が特徴的であり、水面付近にも小さな渦領域が存在するが、どの船型もほぼ左右対称な渦度分布となっている。また、後述する3分力計測結果と渦度分布から推定した横力も比較的良好な一致を示しており、本実験の誤差は、本研究目的に対し許容範囲内にあると見てよいであろう。

2.4.1.2 斜航角による流場の変化

直進状態におけるA.P.断面での流場は船型によらずほぼ左右対称な流れであったが、斜航角がついた場合、船型によらず以下のような流場の変化が見られる。

Fig.2.13の伴流分布では、直進で左右対称な流れは、右に 9° 斜航角がつくとプロペラ付近の伴流分布が右へ移ったような形になるとともに、右舷側に船体前半部で剥離した船首渦に対応する伴流が現れる。更に斜航角が右へ 18° となると、船首渦に対応する伴流は更に大きく強くなるが、プロペラ付近の右へ移動した伴流は少し弱くなっている。

Fig.2.14の渦度分布では、直進状態での一対の船尾縦渦は、右に斜航角がつくと、右舷側船尾縦渦が右に移動し大きくなるとともに、左舷側の船尾縦渦が右舷側縦渦の中へ小さくなってめり込むような形になる。また、右舷側には船体前半部で剥離した船首渦が現れる。斜航角が大きくなると、右舷船尾縦渦と船首渦は強さと大きさを増してゆく。

Fig.2.15の速度ベクトル分布で見ると、船首渦と船尾縦渦を主体とする船尾渦という、二つの渦グループに代表される斜航時の流場の特徴が良くわかる。

2.4.1.3 船型による流場の変化

前述のように、斜航中の船体まわりの流場は、どの船型

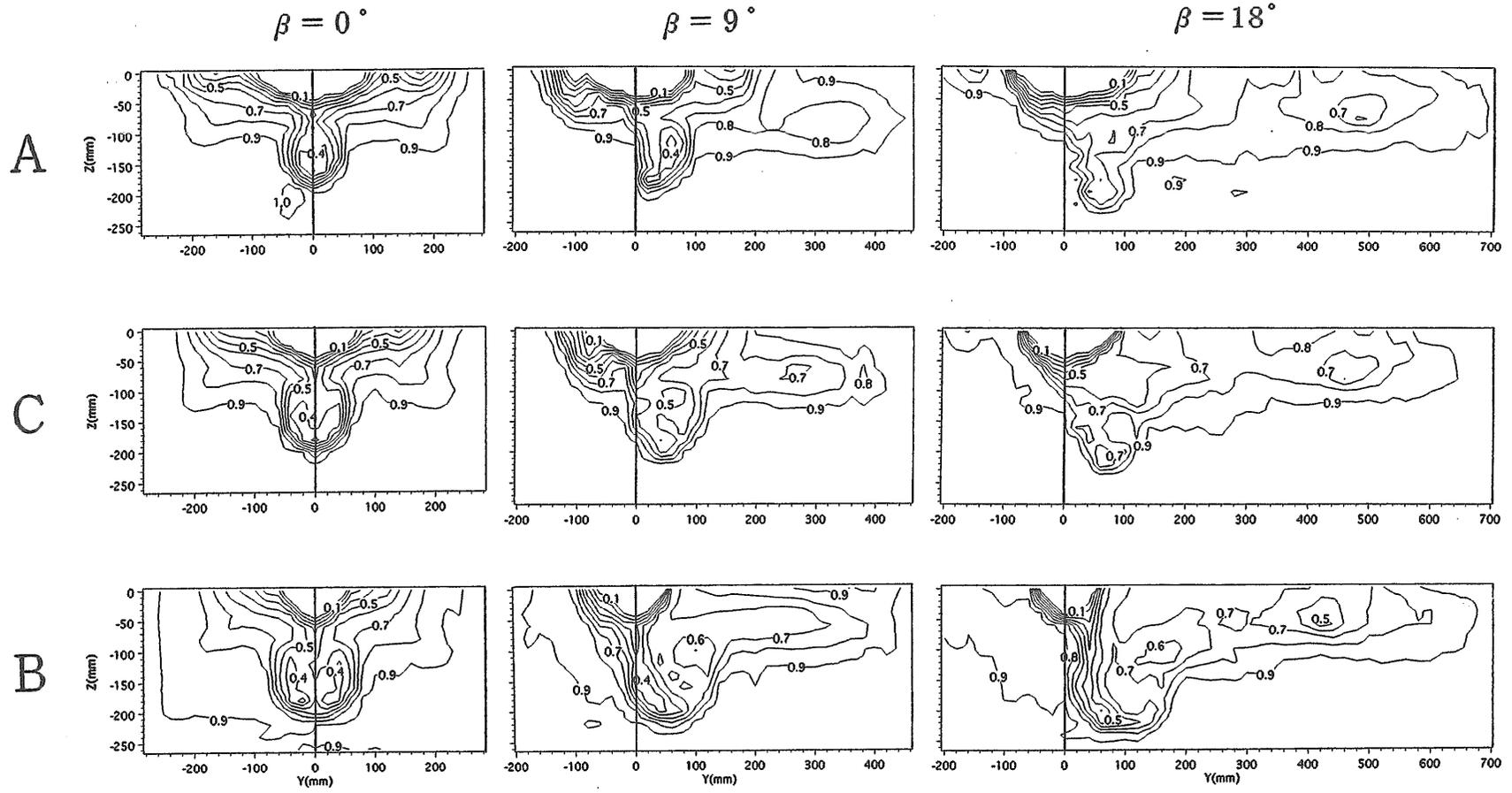


Fig.2.13 Wake Distribution (A.P)

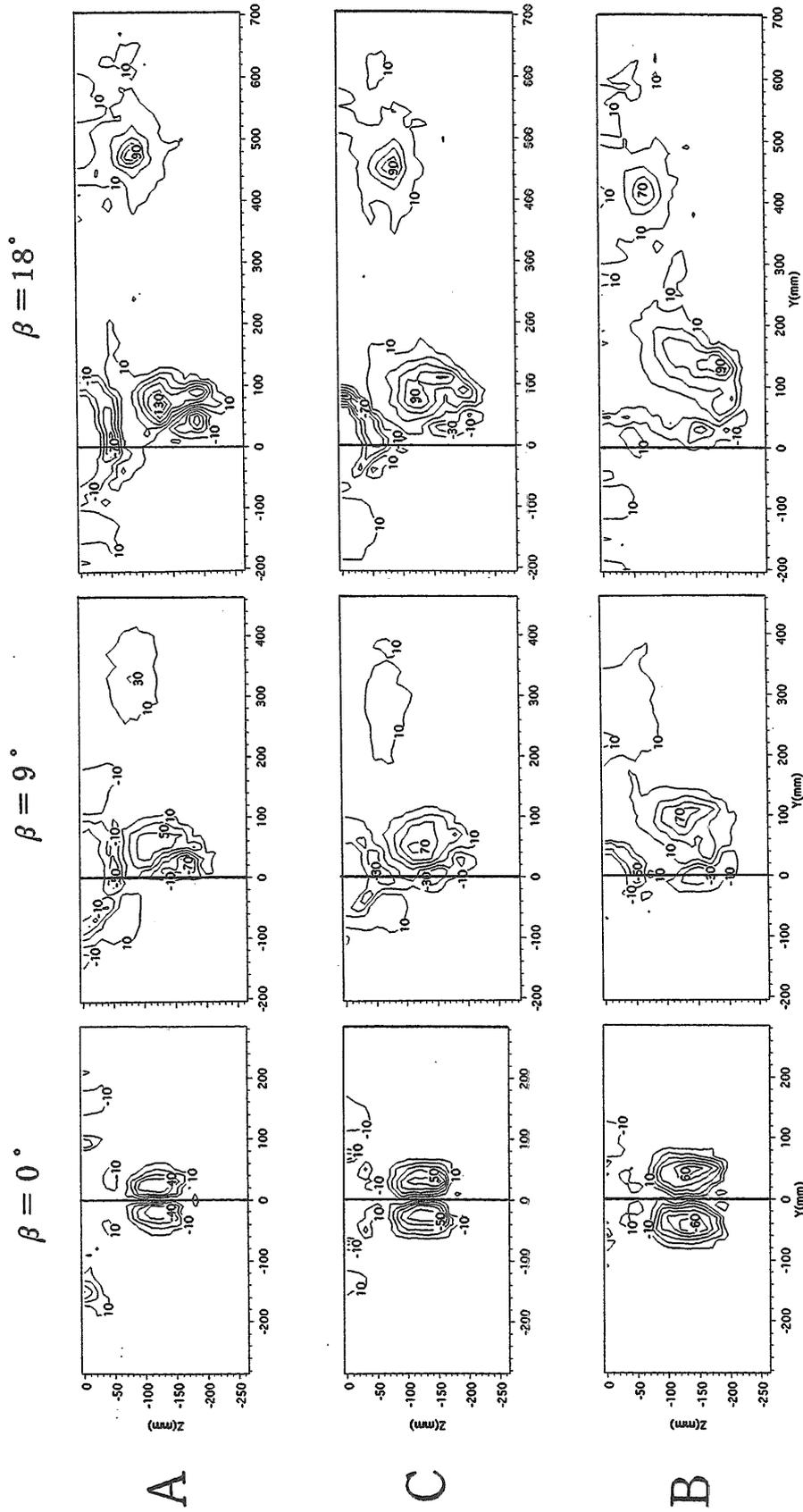


Fig.2.14 Vorticity Distribution (A.P)

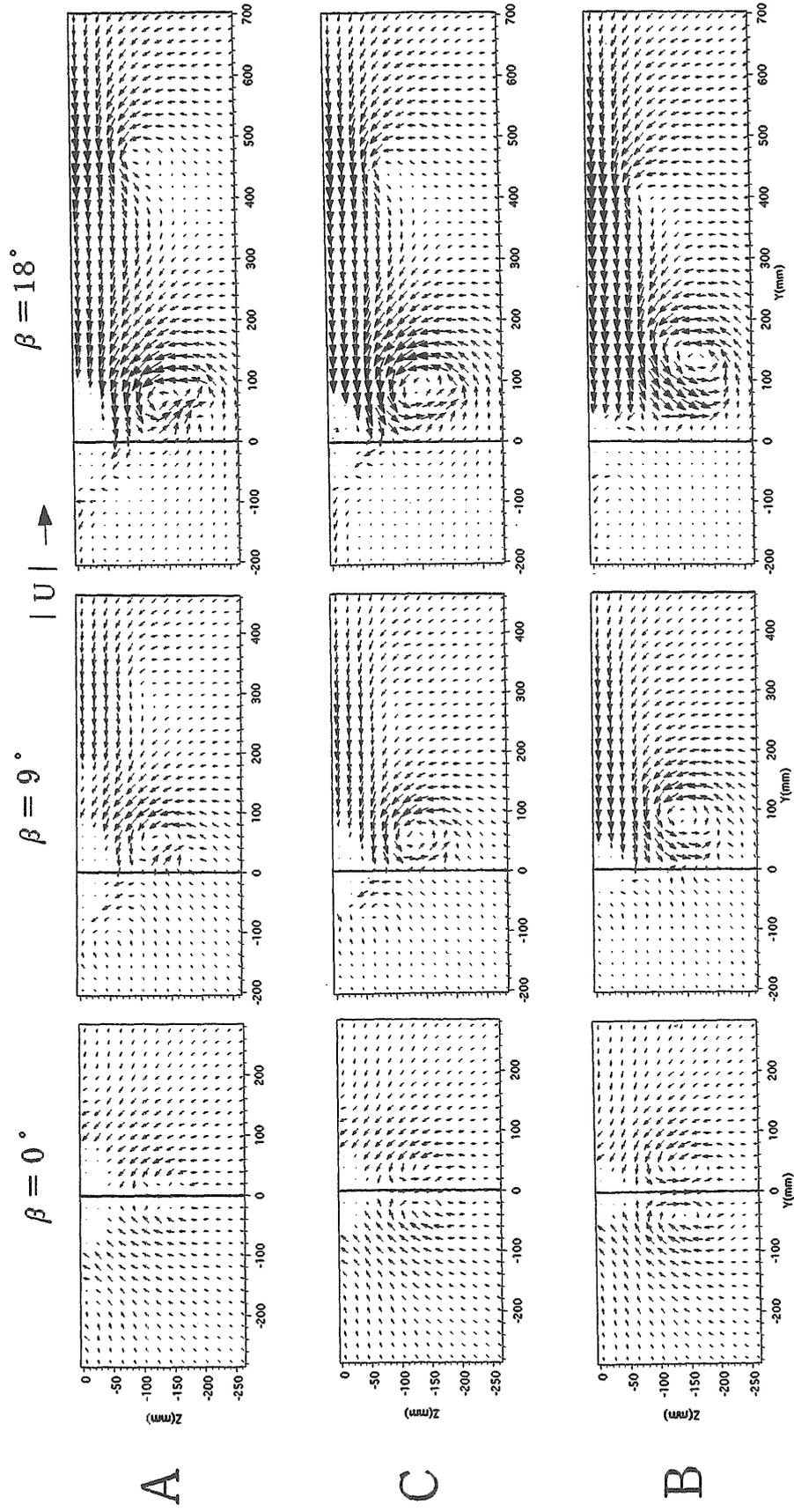


Fig.2.15 Velocity Vector (A.P)