

(昭和50年11月日本造船学会秋季講演会において講演)

肋骨線が垂直な肥大船の船尾渦に関する実験

正員 乾 崇 夫* 正員 梶 谷 尚*
正員 加 藤 直 三**

Observation and Analysis on the Behaviour of Stern Vortices

Shed from Wallsided Full Forms

by Takao Inui, *Member* Hisashi Kajitani, *Member*
Naomi Kato, *Member*

Summary

Instability of stern flow in the coexistence of 2-dimensional separated eddies and bilge vortices are observed using the two 2m full model ships both of which have the same vertical framelines, but one with usual round bilge M30 R, and the another with sharp edged bilge M30 S.

The three velocity components are measured in the rear of M30 S at four sections to study the diffusive process of bilge vortices, and evaluate the induce drag.

Wake survey and resistance tests are performed and viscous resistance components are compared.

(1) Instability or queer stable state seems to occur on stern flow with interaction between 2-dimensional separated eddies and bilge vortices.

(2) Hydrodynamical properties of strong bilge vortices have been studied. Path of vortex center, vorticity distribution, slight decay of circulation, velocity profiles of vortex core, diffusion of vorticity and induced drag were analyzed.

(3) There seems no breakdown in case of strong bilge vortices in a certain range.

(4) Viscous resistance obtained from wake survey at 0.5 L aft of AP gave a good agreement with that from resistance test.

1 緒 言

肥大船の船尾流場、とくにビルジ部分から発生する縦渦の挙動を知ることは、船尾の形状とプロペラの相互関係ひいては推進性能を明らかにする意味で重要である。船尾渦流場の観測と解析は多くの研究機関で進められ、すでにかかなりの成果¹⁾が収められつつあるが、まだ十分とはいえない。

本報告は、船尾渦流場の基本的性状を観察することを目的とし、つぎの3項目についての実験と考察をまとめたものである。

- (1) 船尾渦流場の動的挙動
- (2) 船尾ビルジ渦の流体力学的特性
- (3) 誘導抵抗と伴流解析からみた粘性抵抗成分

(1)は渦を伴う流れが基本的に非定常な性質をもち易いとされることから、船尾渦流場にどのような非定常運動が出現するか、肥大船の自航試験でしばしば報告される二股現象に対応するような物理現象を捉えることはできないかを追求したものである。(2)は実際のビルジ渦がどのような基本的特性をもっているか、後流へ伝わるにつれてどのように粘性影響を受けていくか、を流速計測結果をもとに解析したものである。(3)はマクロ的な立場から、粘性抵抗成分に検討を加えたものである。

* 東京大学工学部

** 東京大学大学院工学系研究科

2 供 試 模 型

渦流場の基本的性質を明らかにするため、渦の発生し易い wall sided model M 30 を採用した。主要目は、

$$L_{PP} \times B \times d = 2.0 \times 0.364 \times 0.16 \text{ m}$$

で、run angle は約 45° である。この模型は、元来 SR 98 のバルブなしの船首部水線をもとに、その肋骨線を垂直にしたものである。仲渡らの研究²⁾によれば、U, V 型肋骨形状船のうち、形状因子 K が最も大きくなるのは、肋骨線が垂直となる（つまり同論文において $\theta = 0^\circ$ となる）ときで、本船型はこれに該当している。

なお予備実験としてビルジ渦を回流水槽で観察したところ、左右の渦の著しい偏寄が認められた。そこで模型としては Fig. 1 に示すよう、ビルジ部に通常の丸みをもたせた原型 M 30 R に加えて、丸みを埋めシャープエッジにしたもの M 30 S を用意した。さらに実流場の渦にしばしばみられる fluttering 現象を抑えるため、T 字板を設けることとし、実験目的に応じて着脱させることにした。

3 船尾渦の動的挙動

3.1 実 験

船尾渦を観察する流域は大別して船体表面、自由表面、内部流域に分けられる。船体表面には、バブル型渦の初生に対応する剥離線、付着線、死水領域、逆流域などがあり複雑である。その定性的なパターンは一応風洞実験によって観察されているが、圧力分布の計測・解析と合わせ報告することとし、ここでは、自由表面および内部流域にみられるマクロな渦の観察結果を報告したい。

自由表面にみられるバブル型渦³⁾（2次元剥離渦）は、これまでの波紋写真撮影技術を生かし、微粒アルミ粉をトレーサーとして流れの可視化を行った。

ビルジ渦については、幅×高さ が $50 \times 25 \text{ cm}$ のタフトグリッドを使用し、その後方に、光軸を 90° かえる「のぞき鏡」をおき、鉛直上方から観察できるようにした。目視を主体に、写真と 8 ミリ撮影を併用した。

実験速度は $U = 63 \text{ cm/sec}$ 。これは $F_n = 0.14$, $R_n \div 10^6$ に対応している。なお実験は曳航水槽で実施した。

3.2 バブル型渦の挙動

M 30 R と M 30 S の自由表面流場の一例を Fig. 2 に、またスケッチを Fig. 3 に示す。M 30 R (round bilge) では、剥離渦が左舷または右舷に偏寄した形で現われる。偏寄が生じる舷は決まっておらず、時には一航走中 5 ～ 10 秒程度の間隔で左右のパターンが入れ換わる。

上流 $1/2 \sim 1\frac{1}{2}$ には船側に沿う小さい eddy がいくつも並び、下流にいくにつれ成長する。死水領域のある側の舷では、数は少ないが比較的大きな渦が現われ、反対舷のいくつもの小さい渦とは対照的である。最もこの死水領域というのは、もちろん文字通りの死水ではなく、渦を放出しながら、その回転流によって、 $w > 1$ の伴流つまり逆流帯があることは、8 ミリ映画に明瞭に示されている。このように偏寄した剥離流は Townsin の報告⁴⁾にもみられ、肥大化した船の船尾に起り勝ちな現象と思われる。

これに対し、M 30 S (sharp bilge) では、渦のスケールが一段と大きくなり、左右舷ほぼ同じ大きさの渦を生成し放出する。したがって流れの偏寄はなくなるが、渦の放出に応じて剥離流の道幅が太くなったり狭くなったり規則的な変動に結びつく現象がみられる。しかも M 30 R にみられる不安定な流れは現われてこない。

3.3 ビルジ渦の挙動

M 30 R, M 30 S について、T 字板をつけた場合とつけない場合の計 4 ケースについて観察した。Fig. 4 は T 字板なしの場合をスケッチした図である。船尾ビルジ渦は、後述するように 2 番付近から発生し、成長と拡散によって回転の径を増大させながら進んでいく。

M 30 R ではバブル型渦と関係して左右非対称となる。Fig. 4 の M 30 R は左舷にバブル型渦がある場合の後方からみたビルジ渦である。剥離流全体の流れに応じて、図では右舷のビルジ渦が左舷側にひきずり込まれ、船体中心線上の自由表面近くにねじられる。したがって反時計廻りの渦が上に位置し、左舷のビルジ渦は抑えられ、中心線の下付近に来て消散するかにみえる。平衡状態が崩れ、バブル型渦が右舷に転移すると、ビルジ渦の左右の関係が逆転し、左舷側の渦が上にくる。したがって回転は時計廻りとなる。

タフトのゆらぎ、fluttering 現象は僅かで、しかも緩やかである。

これに対し M 30 S では、左右ほぼ同大のビルジ渦が発生し、M 30 R にみられる左右渦の twist はみられな

い。その代りタフトの動きは速く激しく、渦の中心も不規則に変動する。強い渦には自励現象が伴っているようである。この他小さい逆回転渦が AP 直後の自由表面近くにみられることは衆知の通りである。

T 字板を装着すると、偏寄や高周波の fluttering 現象が抑えられ、速度分布など定常的物理量の計測が容易になることがわかった。

なお round bilge にみられ、sharp bilge にはみられない不安定現象は、バブル型渦とビルジ渦の相対的強さに依存しているのではないかと考えられる。sharp bilge M30S ではビルジ渦が強すぎ、干渉が起らないのではないかと考えられる。

4 ビルジ渦の流体力学的特性

前章にみたよう、M30R では渦の位置が偏寄し、ビルジ渦の特性を求める模型船としては不適當である。M30S は渦度が大きく、計測量も増大する。ただそのままでは激しい流場の変動を伴うため、T 字板を装着して供試模型とした。実際には渦中心の軌跡、流速・渦度分布・循環、渦核の速度場と渦度の拡散を調査することとした。

実験速度は前と同様 $U=63$ cm/sec である。

4.1 渦中心の軌跡

回流水槽内にアルミ粉を浮遊させ、真横からスリット光線をあてて、流れの断層写真を取り、渦の中心を判読した。計測位置は AP 前方 0.3L より 0.1L 間隔で AP 後方 0.4L まで、AP の前後 0.05L、計 10 断面とした。結果を Fig.5 に実線で示す。これに対し破線は、4 本の渦糸があるとし、これらを 0.05L の渦線分に区切り、ビオサバールの法則から、3 次元渦の AP 後の軌跡を追跡した結果である。ただし船体の攪乱流場、T 字板の境界層を考慮していないが、後述の渦度分布から求めた循環 Γ (Fig.6) を用いると、大体実測に近い軌跡となる。

4.2 流速分布

抵抗水槽で 6mm 径の球型五孔管を用い、船尾左舷流場の流速を AP, 0.1, 0.2, 0.3L aft で計測した。T 字板のある中心線 $y=0$ と水面 $z=0$ を除き、 y, z 方向に 2cm 間隔に各断面上 100~120 点を計測箇所とした。これとは別に、T 字板のみの場合の流速を計測し、板面近くの薄い層の外には影響がないことを確認した。各断面内の速度成分 (v, w の合成) を Fig.7 に示す。AP 断面の中心線寄りの部分には、前にふれたバブル型渦による逆流現象があるため計測不能の領域があるが、それ以外は、全て実験と同時に解析を行い基礎データの正確を期した。

4.3 渦度分布

流速分布をもとに 2cm の各正方格子について、主流方向の渦度を求め、等高線図としたのが Fig.8 である。AP では固く集中した菱形状の渦度がみられ、0.1L aft では円形状となり、僅かに拡散している。さらに後方では拡散と渦運動により上下に長い楕円形となっていくのがわかる。

4.4 循環

Fig.8 の渦度分布から循環を求めると Fig.6 のようになる。AP では計測不能領域があったため見かけは少ない。これから循環 Γ は緩やかな減衰であることがわかる。後方 3 断面の結果をもとに、渦に指数関数的な崩壊があると仮定して、AP までの循環を推定すると点線のようになる。渦軌跡の計算で Γ を 500, 600, 700 とした場合、ほぼ 500 と 600 の中間が実測値に近く、上記の推定とも対応することがわかる。

4.5 渦中心の特性

Fig.7, Fig.8 にみられるよう、AP, 0.1L aft 付近では、ほぼ軸対称型の流場の特性が得られた。そこで、渦度が集中している領域 (とりあえず渦核と呼ぶことにする) の流場の性質を考察してみる。計測 4 断面の軸中心から水平方向にみた渦流場の軸速度と周速度を Fig.9 に示す。このような縦渦の性質は航空の分野で古くから扱われ、渦形成時に軸中心に粘性の作用が少ない leading vortex と、粘性の作用を受けた trailing vortex があることが知られている。break down 後の leading vortex と trailing vortex はよく似ており、僅かな違いとして、break down した渦の中心には周速度ゼロの領域があることがあげられている⁵⁾。このことから判断すれば、予想通り trailing vortex であることがわかる。

4.6 渦の拡散

次にかなり大胆な試みではあるが、 $0.1L$ での渦度分布が円形に近いところから、軸対称の理論計算をもとに、渦の拡散のオーダーをあたってみる。一例として Batchelor の翼端渦に対する漸近解⁶⁾をもとに推定してみる。これは円筒座標 (r, θ, x) の中心に直線状に伸びる軸対称の渦場を、Navier-Stokes の方程式から、Core Center に対する境界層近似を行って求めたものである。一様流 U_∞ 、軸速度 U_x 、周速度 $\sqrt{V^2 + W^2}$ 、循環を $2\pi K_c$ とし、 r, x を組合せた変数 ζ を次式のように選べば、周速度、軸速度、渦度は、

$$\begin{aligned}\zeta &= \frac{U_\infty \cdot r^2}{4\nu x}, \\ \sqrt{V^2 + W^2} &= \frac{K_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x \zeta}} \cdot (1 - e^{-\zeta}), \\ U_x &= U_\infty - \left(\frac{K_c^2}{8\nu x} \log \frac{\alpha U_\infty x}{\nu} \right) \cdot e^{-\zeta} + \frac{K_c^2}{8\nu x} f(\zeta) - \frac{\alpha U_\infty^2}{8\nu x} e^{-\zeta}, \\ \xi &= \frac{U_\infty K_c}{2\nu x} \cdot e^{-\zeta},\end{aligned}$$

となる。ただ実測の渦流場は乱流であると考えられ、上記の解に渦動粘性係数 ν_T を適用する。 $\nu_T = 200\nu$ 、 $\Gamma_{AP} = 554 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (Fig. 6)、渦の発生点を AP 前方 $0.2L$ とし、軸中心の AP での軸速度が実測に合うよう任意定数を定めた場合を Fig. 9 に、これに対応する渦度分布を Fig. 10 に示す。計算には渦の崩壊による循環の減衰は考慮されていないが、かなりよい一致を示している。結局船尾ビルジ渦において粘性の作用は回転 shear の強い軸中心に限られ、渦の崩壊による循環の減衰は、AP 後方のある区間では、ほとんど起っていないと考えられる。

5 抵抗成分

前章までの流場の視測に続いて、流場と抵抗成分の関係をみる意味で、ビルジ渦による誘導抵抗、伴流解析を実施し、抵抗試験による全抵抗との関係を調べることにした。誘導抵抗、伴流解析は共に M30S について、前章までと同じ速度 1 点について求めた。

5.1 誘導抵抗

縦渦による流体の単位長さ当りの全運動エネルギー E は、渦核としての流体の回転運動によるもの E_0 と渦重心の運動によるもの E_G 、および渦核外のポテンシャル領域の運動エネルギーの和として表わされる。実際の計算は 2 cm 角の格子中心に、循環 $\xi \cdot \delta y \delta z (= 4\xi)$ の 2 次元渦系があるとして誘導抵抗係数 C_E を 4 断面で求めた。AP では計測不能の領域を残したまま計算した。結果を Fig. 11 に示す。参考のため、上記 3 成分も図示してある。本図からも、誘導抵抗の断面による違いは少なく、崩壊は少ないといえる。また成分としては E_P と E_G がほとんどで田中 拓の解⁷⁾と同じ傾向を示している。ただしこの計算は 2 次元渦系を仮定した近似計算である。

5.2 伴流解析

伴流解析は $0.5L$ aft で M30S の T 字板なしで行った。計測は櫛型ピトー管 10 本 (4 cm 間隔) で深さ方向 2 cm 、幅方向 $|y| < 20 \text{ cm}$ 間は 1 cm 間隔、 $52 > y > 20 \text{ cm}$ 間は 2 cm 間隔で総計 1152 点での総圧を計測、総圧の減少量 $(H_0 - H)$ を求めた。一例を Fig. 12 に、その等高線図を Fig. 13 に示す。 $y = 25 \text{ cm}$ の位置には船首ビルジ渦による伴流がみえる。なお今回の計測速度は $F_n = 0.14$ のため wave breaking に対応する wake はないようである。総圧損失だけから求めた粘性抵抗成分を Fig. 14 に示す。

5.3 抵抗試験と抵抗成分

最後に抵抗試験と波形解析 (M30S のみ) を実施した (Fig. 14)。M30S としての抵抗試験値と伴流解析による結果は、ほぼ合っている (伴流解析における第 2 項を考慮すれば推定値は若干下るものと考えられる)。また波形解析からは造波抵抗の寄与が $F_n = 0.14$ でほとんどないことを確認した。

粘性抵抗における誘導抵抗と形状抵抗の関係をみる意味で M30R (T 字板なし) についても抵抗試験を実施した。M30S との差は、その大部分がビルジ渦の誘導抵抗増加と考えてみた。しかし 5.1 で求めた $C_E = 0.096$ は、これを埋めかつあますには余りにも小さいことがわかる。結局 sharp bilge と round bilge では、パブル型渦の強さも変わってくること、T 字板をはずした場合に現われる渦の fluttering 現象が抵抗増加に関与してい

るとも考えられ、今後の課題とすることにした。なお M 30 R の抵抗試験では流れの不安定要因が含まれているものと思われる。今後測定環境を改善し、不安定現象からみた、流場と「力」の変動の直接関係を明らかにする必要がある。

6 結 言

以上の実験と考察から次のことが明らかとなった。

- (1) 肋骨線が垂直な肥大船の船尾渦流場を観測し、流場の基本的特性について考察した。
- (2) 船尾には、バブル型渦とビルジ渦が併存し、両者が相互に影響して、流れの偏寄と不安定を誘発する原因をつくる。
- (3) 強いビルジ渦の流力的特性について考察し、渦中心、流速分布、渦度、循環等の場所による変化と、渦の拡散について新知見を得た。
- (4) 誘導抵抗・伴流解析・抵抗試験を通じて粘性抵抗成分を検討した。

最後に、昭和 49 年度卒業実験として、この歴大な実験と解析に取組まれた、坂本武・古田盛照両工学士、東大船型試験水槽の全職員に対し厚くお礼申し上げます。また船用機械工学科の田古里哲夫教授には助言と回流水槽実験の場を、また航空工学科の高野暲教授には風洞実験（次回模型表面流として発表予定）の場を提供していただきました。なお試験は一部文部省科研費によったこと、東大大型計算機センターを利用したことを付記し、関係各位にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 例えば、笹島秀雄，田中一郎，鈴木敏夫，萩野繁之：肥大船船尾流場と縦渦による誘導抵抗（その 1），日本造船学会論文集，第 128 号（1970）。
- 2) 仲渡道夫，山崎芳嗣，鈴木 勲，砂原誠一，松井明男：粘性抵抗の小さい U 型，V 型船尾形状の実験，関西造船協会誌，第 151 号（1973）。
- 3) 田中一郎：剥離について，日本造船学会粘性抵抗シンポジウム（1973）。
- 4) Townsin, R. L.: Boundary Layer Separation from Ship Models, Trans. R. I. N. A., Vol. 107 (1965).
- 5) 林 良生，中谷輝臣：デルタ翼前縁剥離渦と Break Down, 日本航空宇宙学会誌，第 226 号（1972）。
- 6) Batchelor, G. K.: Axial Flow in Trailing Line Vortices, J. of Fluid Mech., Vol. 20 (1964).
- 7) 田中 拓：扁平な没水体の浅深度抵抗について，日本造船学会論文集，第 136 号（1974）。

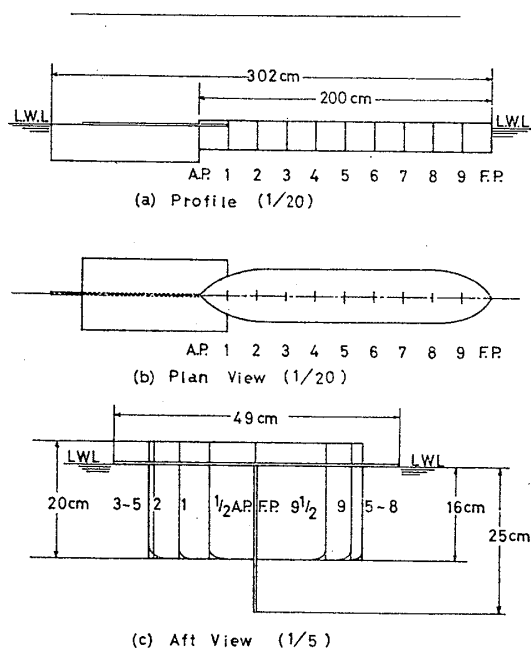
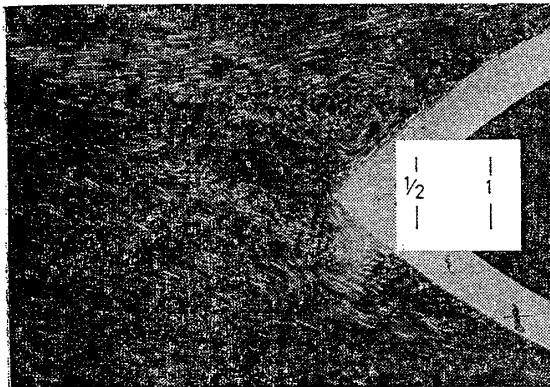
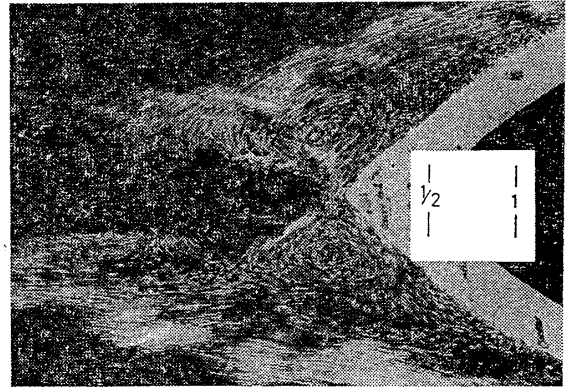


Fig.1 Model Ship { M 30 R (Round Bilge)
M 30 S (Sharp Bilge)



M 30R Round Bilge



M 30S Sharp Bilge

Fig. 2 Bubble Type Vortices

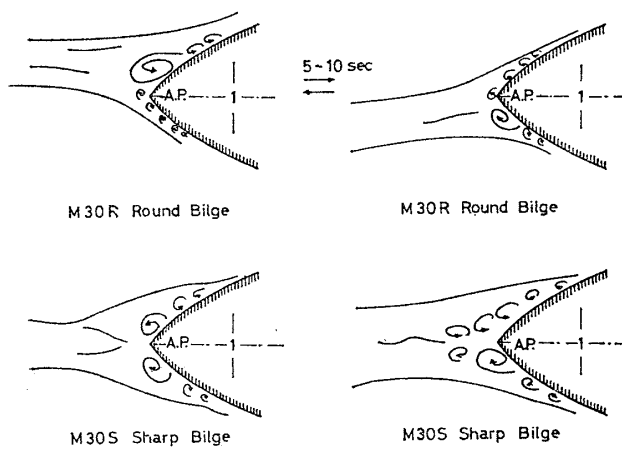


Fig. 3 Sketches of Surface Stern Flow

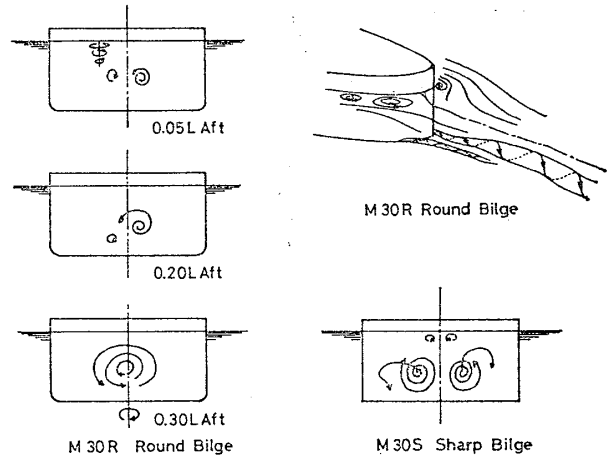


Fig. 4 Sketches of Under-water Stern Flow

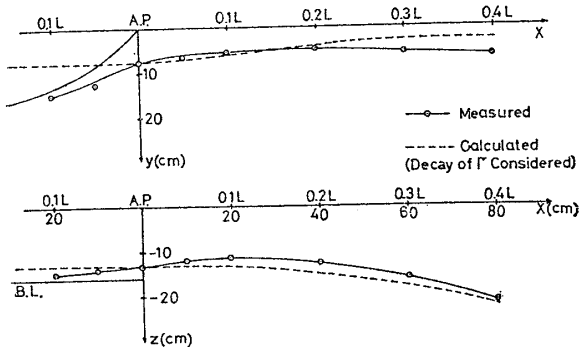


Fig. 5 Path of the Observed Center of Bilge Vortices

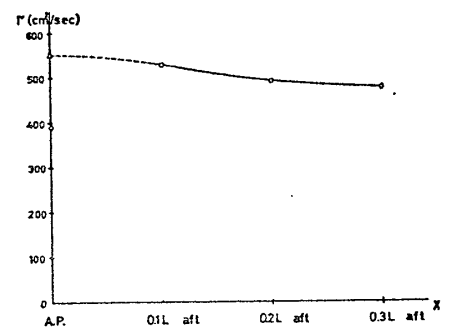


Fig. 6 Circulation of Bilge Vortices $V=63.0(\text{cm/sec})$
 $F_n=0.14$

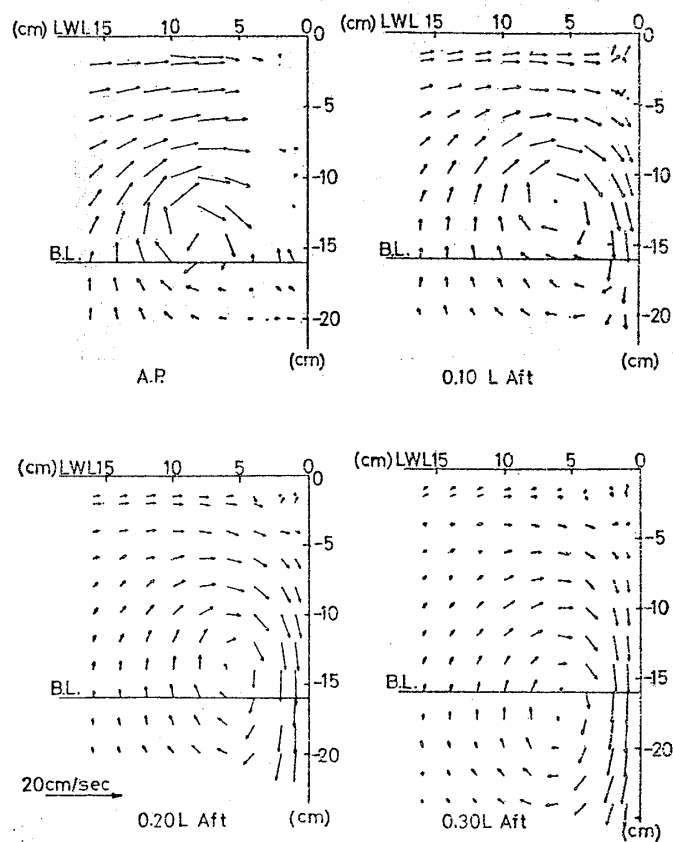
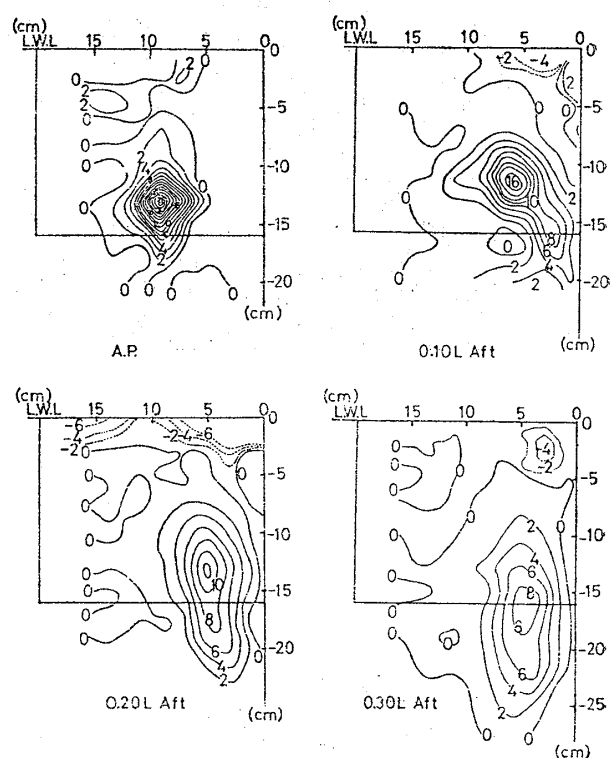
Fig. 7 Velocity Distributions ($Fn=0.14$)

Fig. 8 Vorticity Distributions

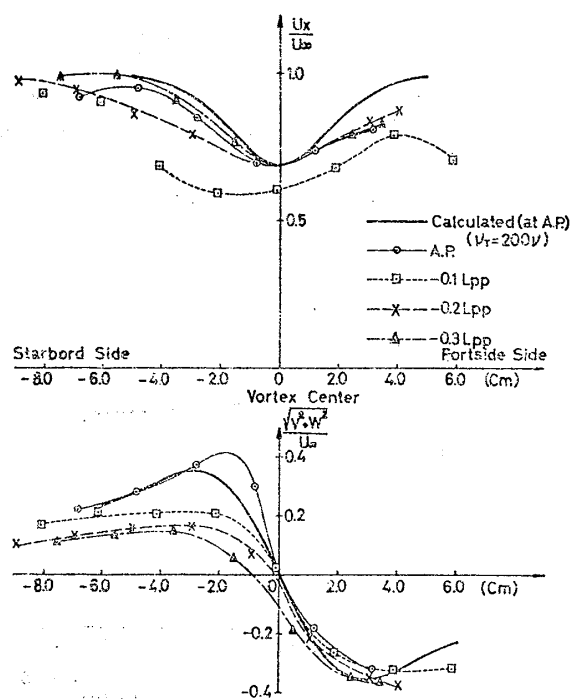


Fig. 9 Circumferential and Axial Velocity Profiles

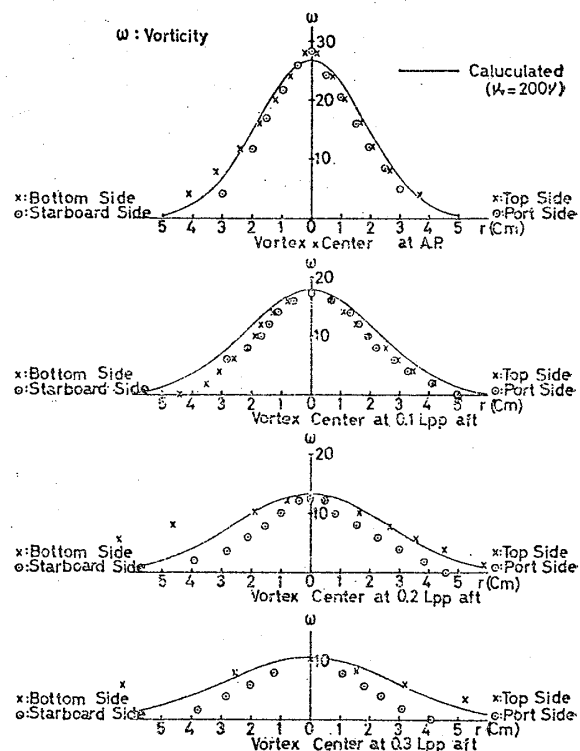


Fig. 10 Diffusion of Vorticity Distributions

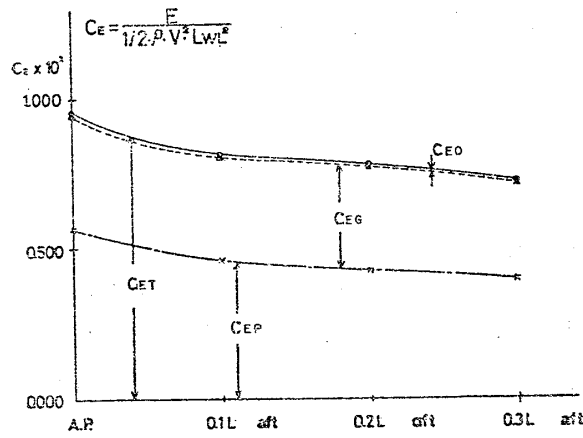
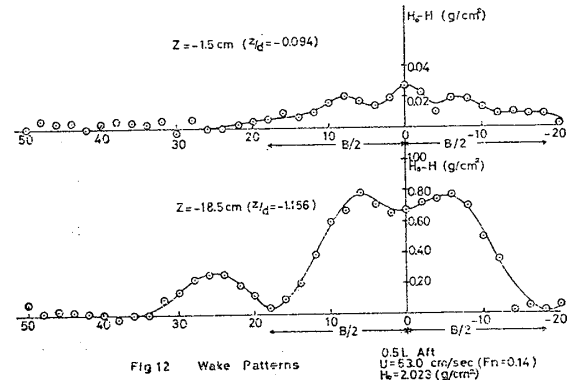

Fig. 11 Induced Drag ($Fn=0.14$)


Fig. 12 Wake Patterns

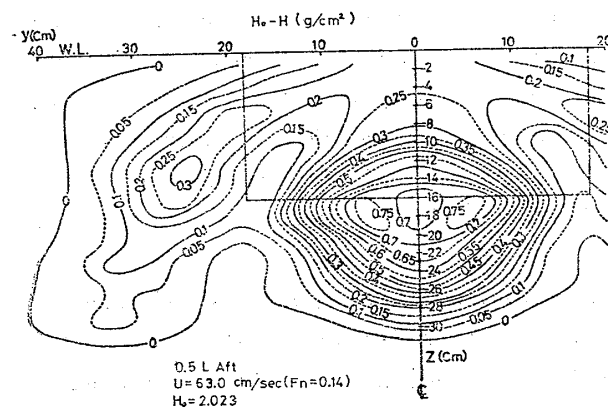


Fig. 13 Contour of Total Head Loss

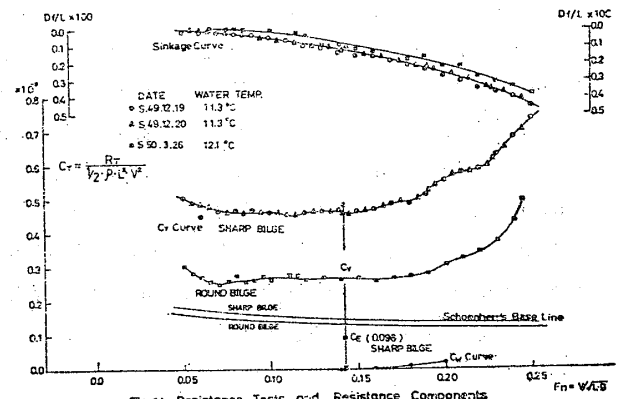


Fig. 14 Resistance Tests and Resistance Components