

3次元乱流境界層第一近似解を用いた 公称伴流係数の一試算

石 坂 純*

Some Examples of Nominal-Wake-Coefficient-Estimation applying the Theory of Three-Dimensional Turbulent Boundary Layer

By

Jun ISHIZAKA

Abstract

Numerical estimation of nominal wake on a propeller disk has become important for preliminary design of stern hull forms. Numerical calculations of nominal wake coefficient were performed for four ship models by applying the theory of three-dimensional turbulent boundary layer.

The assumption has been made in this study that the nominal wake coefficient is composed of the potential and the frictional wake coefficient, and that the wake flow does not include bilge vortices. The potential wake coefficients were calculated from the numerical results of the Hess-Smith method. The frictional wake coefficients were obtained by the application of the first order approximation of three-dimensional turbulent boundary layer.

Numerical results of nominal wake coefficient show good agreement with the measured ones, except for the case that strong stern vortices exist in a wake flow, for example for a case of a tanker ship model.

1. ま え が き

船尾形状の初期設計には、公称伴流係数の値が正しく、かつ容易に推定できることが重要である。しかしながら、理論的な公称伴流係数の推定法は、実用的に完成していない。したがって、系統的に整理された過去の実験結果から推定する方法が一般的になっている。つまり、主に船型主要目ベースに整理された船型試験資料から推定する方法である。この方法では、主要目の変更を伴わない程度の船型の変化、例えばframeline形状の変化などについて伴流の差を知ることが容易でない。公称伴流係数の値が理論的に求められればこのような場合にも対応することが可能と思われる。

若干の試みとしては、3次元乱流境界層理論を応用して伴流分布を計算する方法が報告されている^{1),2)}。

* 推進性能部

原稿受付：昭和57年3月1日

しかし、実用的には十分とはいえない。今回、3次元乱流境界層第一近似解による公称伴流係数の理論的推定法を目指して、以下のような試みを行った。まず、船尾縦渦のない船型について、公称伴流係数を数値計算により求め、実験値と比較した。次に、縦渦のある船型についても計算を行い、本方法の実用化に参考となるデータの収集を計画した。なお、本研究では従来の研究と異なり、伴流分布を算出することは考慮していない。計算を伴流分布の積分値に相当する公称伴流係数に止めることが、問題の見通しを良くし実用的解決を促進すると考えたことによる。また、計算の実行に際しては、できる限り作業のシステム化がはかれるように考慮した。このために、理論的には多少疑問な点を含んでいても、近似計算としての手順の容易さを優先することとした。

2. 計算法概要

公称伴流係数 (W_N) の定義式を

$$W_N = \frac{2}{S} \int_{-z_0}^{z_0} \int_0^{y=f(z)} \left(1 - \frac{u}{U_\infty}\right) dy dz \quad (1)$$

とする。ここに、 S はプロペラ面積、 u はプロペラ面に流入する流れの x 方向成分、 U_∞ は一様流速である。 $f(z)$ 、 z_0 および座標系を Fig. 1 に示す。

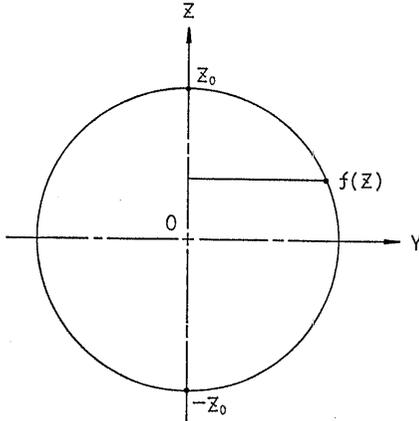


Fig. 1 Coordinate system of propeller disk

次に、 u を接合摂動法の考えにならって

$$u = u_{in} + u_{out} - u_0 \quad (2)$$

とする。ここに、 u_{in} は境界層方程式から得られる速度の x 方向成分、 u_{out} はポテンシャル流れの x 方向成分、 u_0 は両者の接合領域での値とする。今回、接合領域は境界層外端とする。

(2) 式を (1) 式に代入し整理すると

$$W_N = \frac{2}{S} \int_{-z_0}^{z_0} \int_0^{y=f(z)} \left(1 - \frac{u_{out}}{U_\infty}\right) dy dz + \frac{2}{S} \int_{-z_0}^{z_0} \int_0^{y=f(z)} \frac{u_0}{U_\infty} \left(1 - \frac{u_{in}}{u_0}\right) dy dz \quad (3)$$

となる。上式において、右辺第 1 項はポテンシャル伴流係数に、第 2 項は摩擦伴流係数に相当する。ポテンシャル伴流係数 (W_p) の値は、Hess-Smith 法などを用いて u_{out} の値を得れば、容易に算出できる。以下摩擦伴流係数 (W_f) の算出法の概要を述べる。

(3) 式右辺第 2 項に関しては、座標系として流線座標を考える。船尾付近で流線が水面と余り大きな角をなさないと考え、 u_0 はポテンシャル流線上の速度 u_s に等しいと仮定できる。また、接合領域を境界層外端としたことから、 y 方向の積分範囲を $y=0$ から境界層厚さ δ 程度と仮定できる。結局第 2 項に関しては、排除厚さ δ^* を使って

$$W_f = \frac{2}{S} \int_{-z_0}^{z_0} \int_0^{y=f(z)} \frac{u_0}{U_\infty} \left(1 - \frac{u_{in}}{u_0}\right) dy dz$$

(246)

$$= \frac{2}{S} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{u_s}{U_\infty} \delta^* d\zeta \quad (4)$$

と書き表わすことができ、伴流分布を得ることなしに摩擦伴流係数を求めることが可能なことを示している。流線座標 (ξ, η, ζ) は Fig. 2 に本手法 (後述) の図解とともに示す。

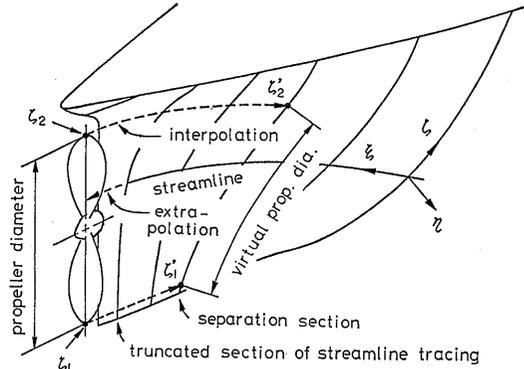


Fig. 2 Illustration of present method (1)

しかしながら、(4) 式をそのまま用いて摩擦伴流係数を得ることは困難である。これは、流線追跡をプロペラ位置まで行うことが困難であることと、船尾付近における境界層解の発散が考えられることによる。本研究では、この困難を解消する為に (4) 式の計算を、境界層解が発散しない後端付近で行うことを考えた。

まず、Square Station (S.S.) 1/2 付近までの流線追跡の結果から、プロペラ面内に流入する流線を外挿法により求める。次に得られた流線について 3 次元乱流境界層第一近似解³⁾ を用いて境界層諸量 (H ; 形状係数、 θ_{11} ; 運動量厚さ、 C_f ; 局部摩擦抵抗係数、 β ; 2 次流れ角の壁面值) を求める。この結果から、予想される剝離位置 (Separation Section) を定める。(4) 式の計算を剝離位置で行うために、プロペラ面を内挿法により剝離位置まで移動させる。移動したプロペラ面を仮想プロペラ面と書くことにする。以上の説明を図解したのが Fig. 2 である。図からもわかるように、元のプロペラ直径と仮想プロペラ直径は異なることになる。したがって、(4) 式を次式のように変更する。

$$W_f = \frac{2}{S} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{u_s}{U_\infty} \delta^* d\zeta \equiv \frac{8}{\pi(\zeta_2' - \zeta_1')^2} \int_{\zeta_1'}^{\zeta_2'} \frac{u_s}{U_\infty} \delta^{*'} d\zeta \quad (5)$$

ここに、添字 ' は剝離位置での値を意味する。上式は

縦渦の影響等を無視したことになるが、数値計算の実行は容易になったと考えられる。

(5) 式により求められた値を摩擦伴流係数とする。しかし、縦渦の影響等を無視しているため、なお近似値が与えられるにすぎない。

以上により得られた摩擦伴流係数と(3)式右辺第1項より得られるポテンシャル伴流係数を加え合わせて公称伴流係数とする。ポテンシャル流速分布の計算から公称伴流係数を得るまでのフローチャートを Fig. 3 に示す。

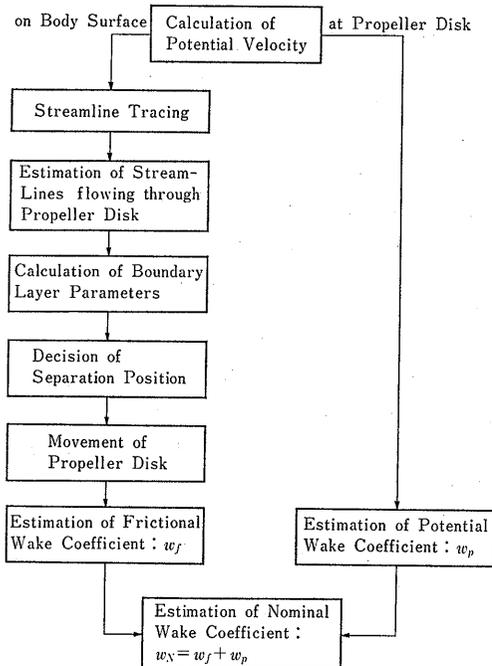


Fig. 3 Flow chart of present method

3. 計算結果と考察

本研究に使用した模型船の主要目、レイノルズ数およびプロペラ直径を Table 1 に示す。Model-A は数式船型で、一般に Wigley 船型と呼ばれている。同じく数式船型の Model-B は、前後左右対称で各肋骨線形状は半楕円形であり、排水量分布に造波抵抗の少ない実用船型の前半部を採用している。船型の詳細は、文献 4) に紹介されている。Model-C は三鷹第 2 船舶試験水槽の標準船型、Model-D は SR-48 の母型である。全模型とも伴流計測は、型喫水 d でトリム零の試験状態で行われている。

船体表面上のポテンシャル流速分布およびプロペラ

Table 1 Principal dimension of model ships and propellers

Model ship	A	B	C	D
Length L_{pp} (m)	4.0	4.0	7.0	9.0
Breadth B (m)	0.4	0.4	1.0	1.64
draft d (m)	0.25	0.24	0.42	0.67
L/B	10.0	10.0	7.0	5.5
B/d	1.60	1.67	2.40	2.46
C_B	0.44	0.45	0.57	0.82
C_P	0.67	0.57	0.60	0.83
C_M	0.67	0.79	0.95	0.99
Reynolds No. Rn	6.2×10^6	3.7×10^6	1.6×10^7	1.3×10^7
Propeller diameter D_P (m)	0.20*	0.20*	0.30	0.25
	0.15*	0.16*		
	0.10*	0.12*		

notes; * virtual propeller diameter for wake calculation

- A mathematical ship form (wigley)
- B mathematical ship form
- C cargo liner
- D tanker

面内でのポテンシャル流速の x 方向成分 u_{out} は Hess-Smith 法により求めた。また、境界層計算の初期位置は S.S. $9\frac{1}{2}$ とした。

計算はまず Model-A を用いて、3次元乱流境界層第一近似解応用の可能性を確認することから始めた。Model-A は、理論船型であることからプロペラを有していない。仮のプロペラ位置として、伴流計測が行われている船尾端 (A.P.) をとる。船底から 0.1 m の高さを中心を持つ半径 0.1, 0.075, 0.05 m の同心円をプロペラ面と仮定して計算を行った。

流線追跡を行った結果を Fig. 4 と 5 に示す。Fig. 4 は、正面線図上に描いた流線である。この図に基づいて、横軸に船長方向 (S.S.) をとり、縦軸に各 S.S. のガス長 (ただし、船体中央; S.S. 5 のガス長で無次元化してある) をとった図面を作成し流線を描いたのが Fig. 5 である。この図は、船体の展開図と見ることができ、船側船底の流線の様子を同時に見ることができる。特に平底を有する船型の場合では、ビルジ部を回る流線の様子を知るのに便利である。以下、こ

の図を船体展開図上の流線と書くことにする。

Fig. 6 に各流線上の速度 u_s (一様流速 U_∞ で無次元化してある), 流線の拡大縮小率 K_1 および測地的曲率 K_2 を示す。 K_1, K_2 は 2m の相似模型での値を示したものである。少々前後対称性が失われた部分もあるが, その差はごくわずかであり境界層計算に与える影響は小さいと考えられる。

3次元乱流境界層第一近似解により各流線の境界層諸量を求め, 形状係数 H と運動量厚さ θ_{11} を Fig. 7 に示す。 H の値は, 船型が fine なためほぼ一定値をとり船尾付近で少し増加している。また流線による違いもほとんど無く, 船尾付近で少し差が見られるだけである。一般に剝離位置は, H の値で推定されることが多いが, この図の H からは少し定めづらい。(5)式は縦渦の影響等を見無視することを意味しているが, 同時に境界層解の発散を避ける意味もある。このことは, 剝離位置の推定を厳密に考える必然性が無いことを示していると考えられる。そこで今回は, 運動量厚さが船底に近づくにつれ極小値を持つ傾向が見られることから, 剝離位置を θ_{11} の極小値から推定した。結局, 剝離位置として S.S. 3/4 を定めた。

S.S. 3/4 における排除厚さ δ^* および境界層外端速度 u_s/U_∞ の分布を Fig. 8 に示す。縦軸は Fig. 5 と同様である。なお, この図にはプロペラ面に流入する流線を S.S. 1/4 から A.P. まで各流線を直線で延長して求めた様子も示されている。流線番号 (St.) 18 からキールにいたる間で流線が得られていない。これは, 船体中央部の船底付近で流線の分布が密になるため, 数値計算による誤差が大きくなり流線が精度良く

求められなかったことが原因であり, 問題を今後に残した。

さらに, Fig. 8 には仮想プロペラ直径を求めるためにプロペラ直径を A.P. から S.S. 3/4 に移動した様子, S.S. 3/4 における $\delta^*, u_s/U_\infty$ の積分範囲をプロペラ直径ごとに実線, 破線および一点鎖線で示した。この手順をプロペラ直径 0.1m の場合を例にとって図解したのが Fig. 9 である。まず Fig. 5 から船尾付近における流線の分布を写しとり, 流線追跡の打ち切られた位置 S.S. 1/4 から A.P. まで各流線を延長する。番号 ① で示す。次に境界層計算の結果から剝離位置を推定し, $\delta^*, u_s/U_\infty$ の分布図を描く。番号 ②~⑤ である。プロペラ直径の上端 ζ_2 と下端 ζ_1 を流線に沿って剝離位置へ移動し ζ_2', ζ_1' を求める。次に基線に平行に直線を引き, $\delta^*, u_s/U_\infty$ の曲線との交点を求める。番号 ⑥~⑧ である。

得られた摩擦伴流係数 (W_f) とこれにポテンシャル伴流係数を加えた ($W_f + W_p$) を, 実験により得た公称伴流係数 (W_w) と比較した結果を他の船型の結果とともに Fig. 10 に示す。縦渦のほとんどない船型であるため, 実験値との一致は非常に良いといえる。ただし, プロペラ直径が小さくなると実験値から離れる傾向が見られる。プロペラ位置への流線の延長, 剝離位置へのプロペラ面の移動などの手法を改良することにより改善されることが考えられる。

Model-A の結果に基づいて, 排水量分布が実用船型の前半部と等価な数式船型の Model-B について同様の計算を行った。この船型もまた, プロペラを有していないため, 伴流計測の行われている A.P. をプロ

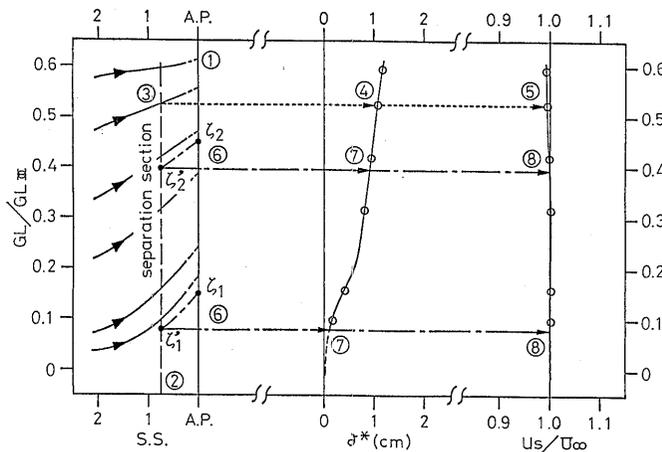


Fig. 9 Illustration of present method (2)

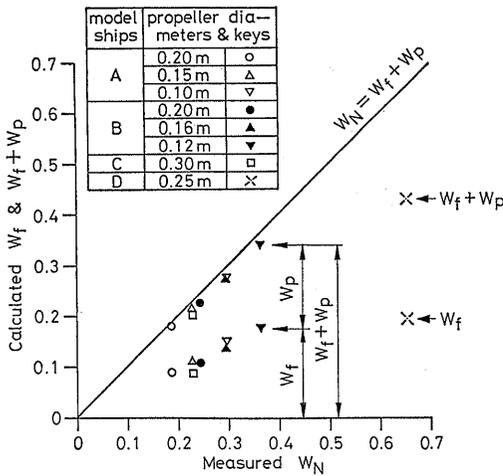


Fig. 10 Comparison of calculated and measured nominal wake coefficients

ペラ位置と仮定した。Model-Aと同様に船底から0.1 mの高さに中心を持つ半径0.1, 0.08, 0.06 mの同心円をプロペラ面として計算を行った。

まず流線追跡の結果を Fig. 11~13 に示す。Fig. 13 で流線上の速度 us が船尾において加速されていることが通常と異なる。この影響は、境界層計算の結果にも表われている。Fig. 14 に示す境界層諸量のうち形状係数 H が船尾において減少しており、また運動量厚さ θ_{11} も船尾において増加せず逆に減少している。おそらく、船型の特徴と考えられる。

剝離位置の推定は、Model-Aと同様に形状係数 H でなく運動量厚さ θ_{11} で判断した。ただし、極小値でなく極大値で判断し、S.S. 3/4 を剝離位置と定めた。S.S. 3/4 における排除厚さ δ^* および境界層外端速度 us/U_∞ を Fig. 15 に示す。また、得られた摩擦伴流係数および公称伴流係数を Fig. 10 に示す。Model-Aと同様に縦渦のない船型のため、実験値との一致は良い。

以上、Model-A および B に関して本研究の手法による公称伴流係数の推算は、実験値と良い一致を示した。次に実用船型に適用した場合の結果を述べる。

まず、Model-C は現在、船研および他の試験水槽で標準模型として使用されている船型で、若干の縦渦の存在が計測されている。流線追跡の結果を Fig. 16~18 に示す。Fig. 17 における破線は、Flat Bottom line (F.B.L.) の形状を示している。ビルジ部を回る

流線の様子が良くわかる。境界層計算結果を Fig. 19 に示す。形状係数 H の値はほぼ一定値を示し、船尾においても若干増加しているのみである。剝離位置は、運動量厚さ θ_{11} で判断し S.S. 1 $\frac{1}{2}$ と定めた。この位置における排除厚さ δ^* および境界層外端速度 us/U_∞ を示したのが Fig. 20 である。得られた摩擦伴流係数および公称伴流係数を Fig. 10 に示す。実用船型ではあるが実験値との一致はかなり良い。おそらく、 $C_B=0.57$ と瘦せた船型のためと考えられる。

本研究による手法は、剝離による縦渦の発生を考慮していないが、Model-Cのように縦渦の影響が小さいと考えられるような船型には適用できることがわかった。次に、Model-D に本手法を適用し、縦渦の影響等がどの程度表われるか調査した。

流線追跡の結果を Fig. 21~23 に、境界層計算結果を Fig. 24 に示す。剝離位置は、運動量厚さ θ_{11} から判断し S.S. 2 に定めた。この位置における排除厚さ δ^* および境界層外端速度 us/U_∞ を Fig. 25 に、摩擦伴流係数と公称伴流係数を Fig. 10 に示す。縦渦の影響で計算値は実験値よりも約 30% ほど小さい値を示した。本手法は、縦渦の影響が大きいと予想される船型に適用するには何らかの修正をほどこす必要があることがわかる。つまり、縦渦の影響等を量的に把握できれば肥大船への適用も可能と考えられる。

今回、境界層計算にあたって形状係数の初期値を船型によらず一定としたが、実際には船型ごとに異なるものと考えられる。縦渦の影響等を考慮することと合せて今後の問題としたい。

4. まとめ

公称伴流係数を数値計算により求める手法を紹介した。特に、摩擦伴流係数を境界層計算により得られる排除厚さで表現したことを特徴とする。また、プロペラ面を剝離位置まで移動することにより数値計算が容易になっている。しかし、縦渦の影響等を考慮していないため、瘦せた船型では計算値と実験値との一致は良いが、肥えた船型では一致しない。今後、実用船型での計算例を増すことにより、本手法の実用化をはかりたいと考えている。

本研究は、科学技術庁の国内留学制度による5箇月間の研修成果を進展させまとめたものである。研修中御指導をいただいた大阪大学田中一朗教授に深く感謝致します。また、本研究の完成は、日夏宗彦技官の討論と助言によるところが大きく、合せて御礼申し上げます。

ます。なお、本研究で行った計算は船研計算センター FACOM M-180 II AD によるものである。

参 考 文 献

- 1) 田中一朗, 姫野洋司, 松本典幸: 船体まわりの粘性流場の計算——主として伴流について——, 関西造船協会誌, 第 150 号 (昭和 48 年 9 月)
- 2) 波多野修次, 茂里一紘, 福島雅博, 山崎礼二: 船の伴流内流速分布の計算, 日本造船学会論文集, 第 138 号 (昭和 50 年)
- 3) 田中一朗, 姫野洋司: 3次元乱流境界層第一近似理論とその応用, 日本造船学会論文集, 第 138 号 (昭和 50 年)
- 4) 田中 拓, 不破 健, 石坂 純, 吉野信治, 山下進, 繁田裕美: 非対称双胴船の設計法の研究 (双胴船体の圧力分布を対称化する試みについて), 船研報告, 第 16 卷 4 号 (昭和 54 年 7 月)

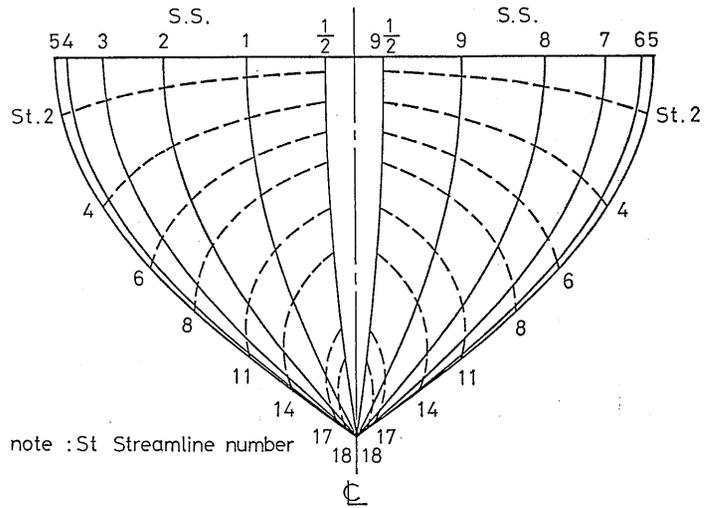


Fig. 4 Body plan and streamlines of Model-A

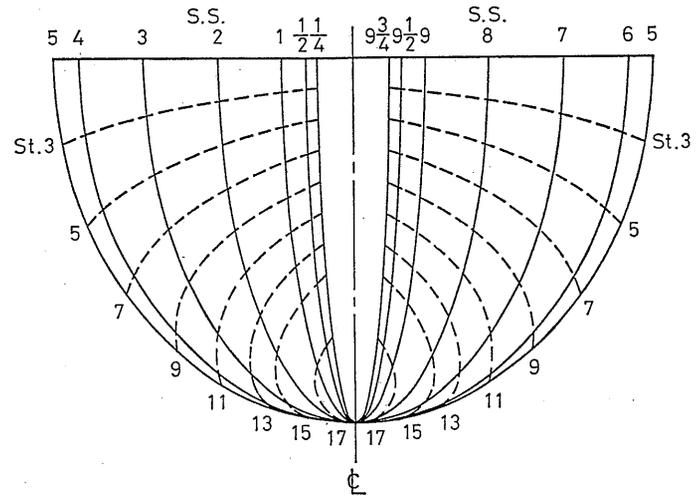


Fig. 11 Body plan and streamlines of Model-B

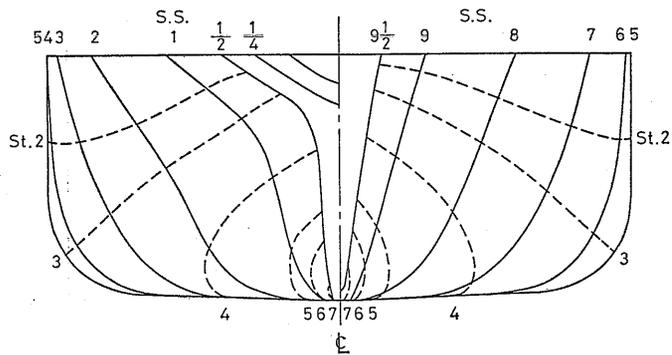


Fig. 16 Body plan and streamlines of Model-C

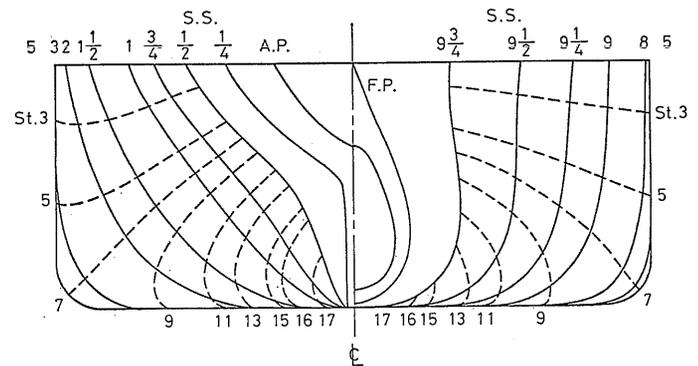


Fig. 21 Body plan and streamlines of Model-D

notes: GL Girth Length from ϵ
GL_m Girth Length at midship section

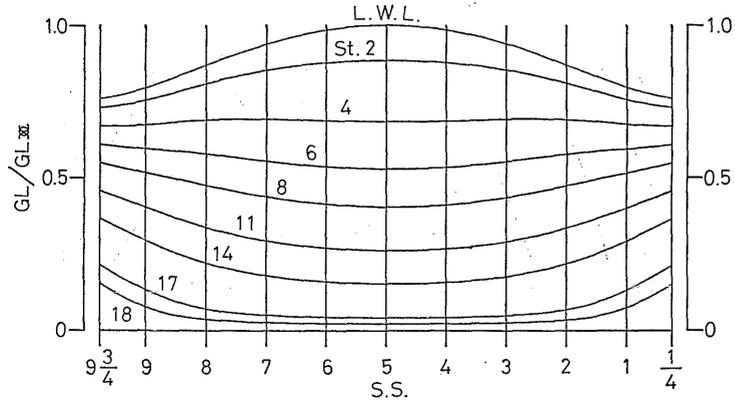


Fig. 5 Streamlines on expanded hull surface of Model-A

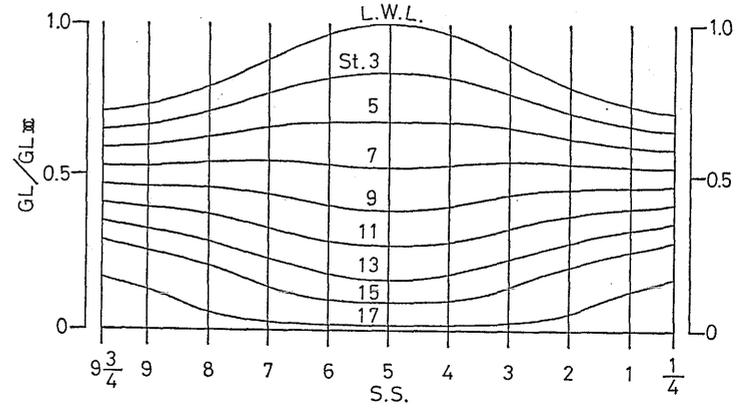


Fig. 12 Streamlines on expanded hull surface of Model-B

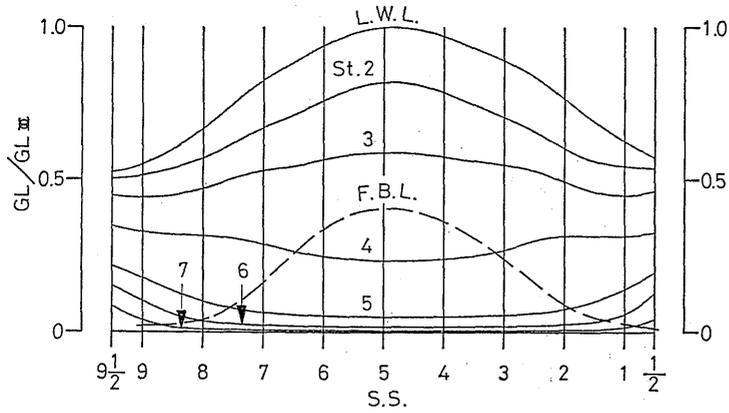


Fig. 17 Streamlines on expanded hull surface of Model-C

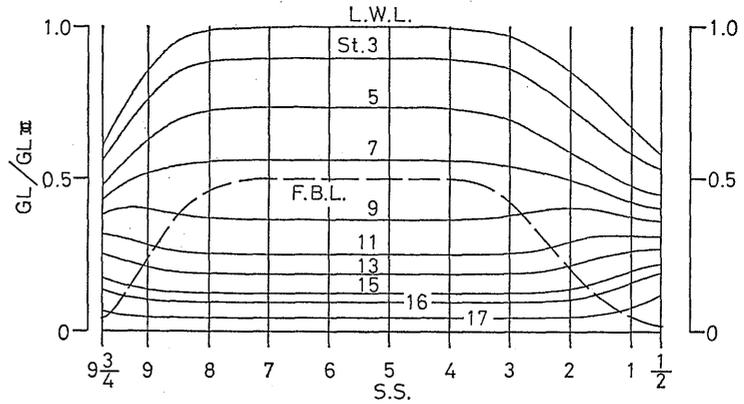


Fig. 22 Streamlines on expanded hull surface of Model-D

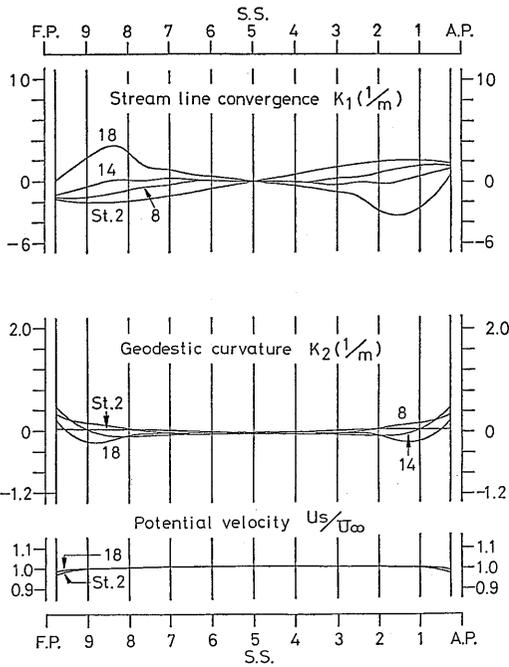


Fig. 6 Distribution of parameters along stream-line of Model-A ($L_{pp}=2.0\text{m}$)

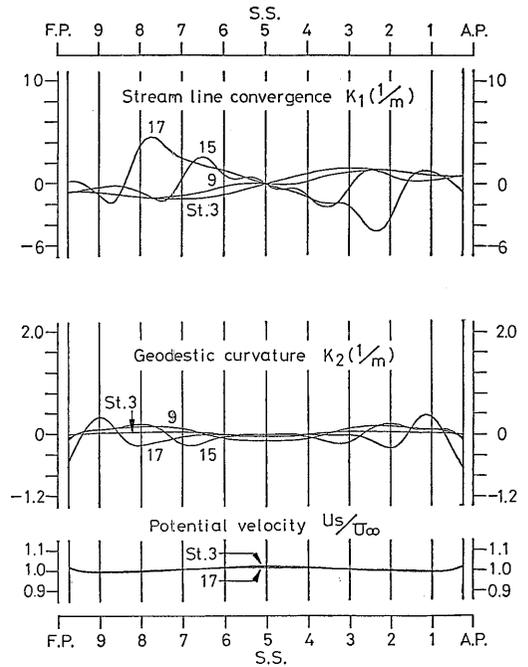


Fig. 13 Distribution of parameters along stream-line of Model-B ($L_{pp}=2.0\text{m}$)

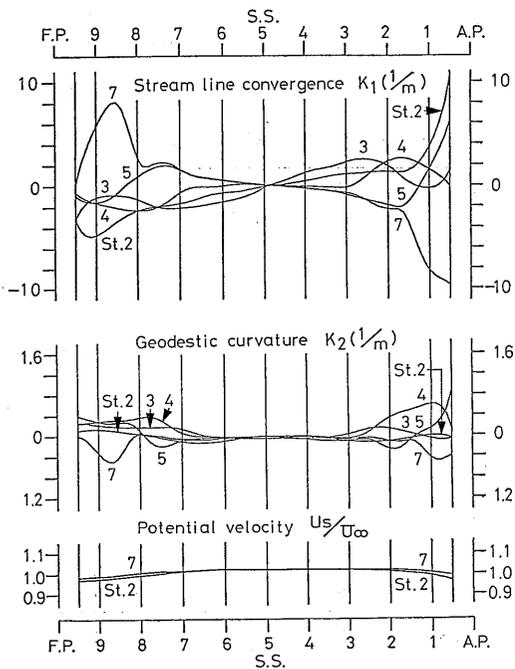


Fig. 18 Distribution of parameters along stream-line of Model-C ($L_{pp}=2.0\text{m}$)

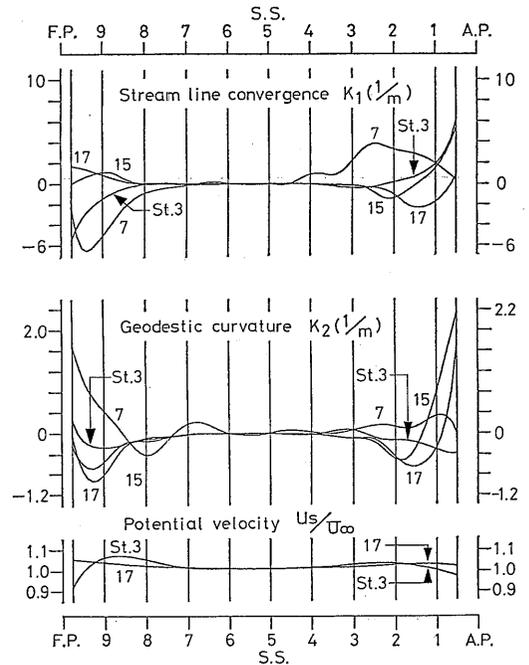


Fig. 23 Distribution of parameters along stream-line of Model-D ($L_{pp}=2.0\text{m}$)

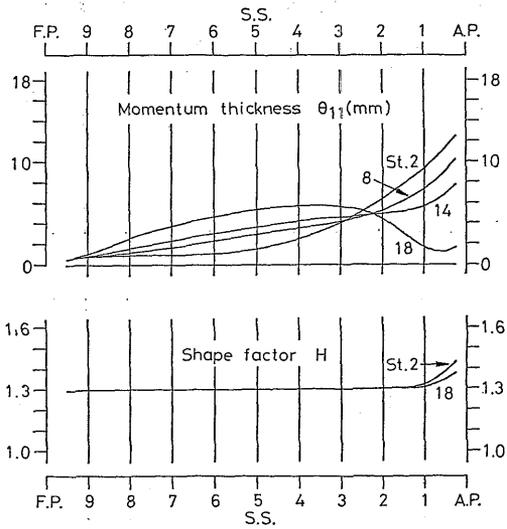


Fig. 7 Distribution of boundary layer parameters along streamline of Model-A

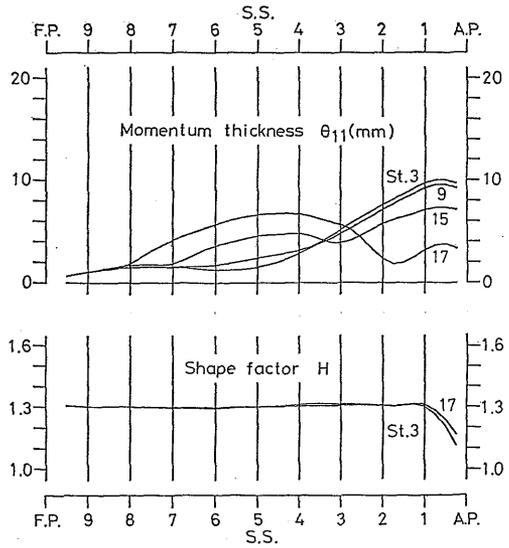


Fig. 14 Distribution of boundary layer parameters along streamline of Model-B

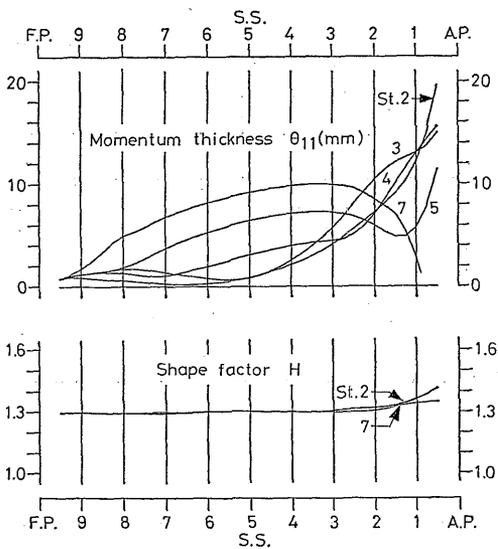


Fig. 19 Distribution of boundary layer parameters along streamline of Model-C

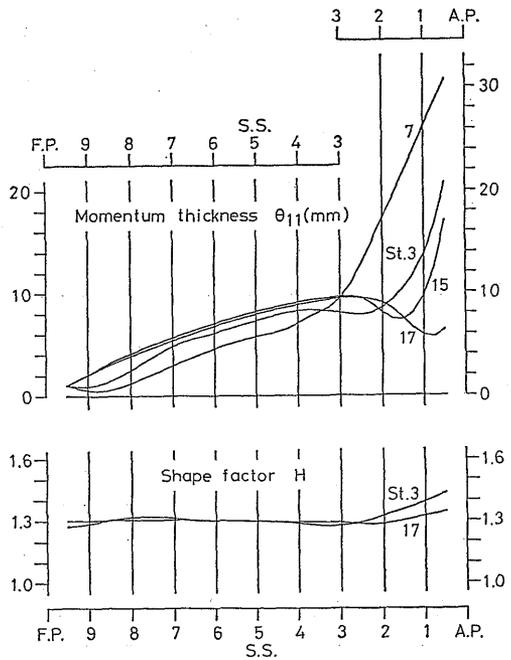


Fig. 24 Distribution of boundary layer parameters along streamline of Model-D

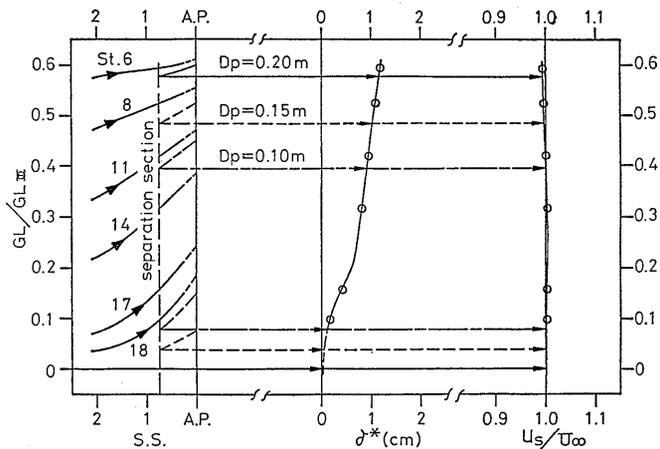


Fig. 8 Profiles of displacement thickness and velocity on outer edge of boundary layer at separation section of Model-A

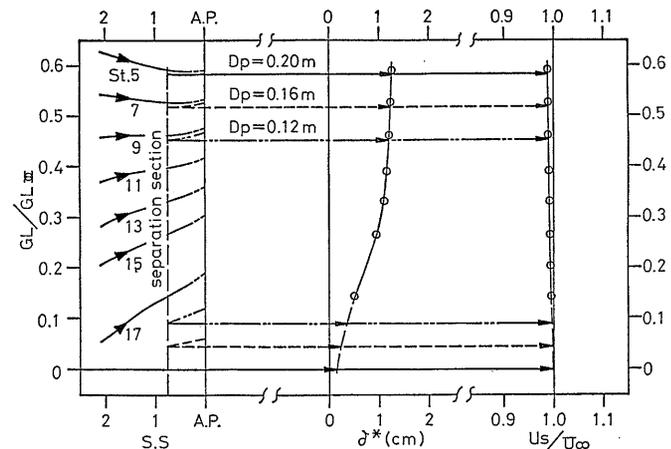


Fig. 15 Profiles of displacement thickness and velocity on outer edge of boundary layer at separation section of Model-B

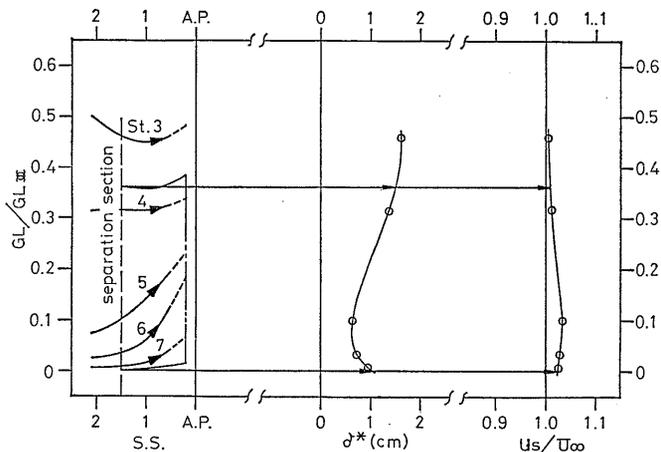


Fig. 20 Profiles of displacement thickness and velocity on outer edge of boundary layer at separation section of Model-C

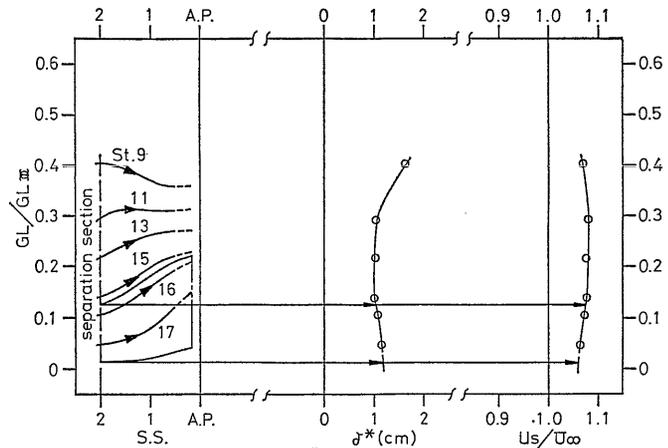


Fig. 25 Profiles of displacement thickness and velocity on outer edge of boundary layer at separation section of Model-D