

(昭和 55 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

水中翼を用いた帆走艇の性能について (第 1 報)

正員 増 山 豊*

Performance of a Hydrofoil Sailing Boat (1st Report)

by Yutaka Masuyama, *Member*

Summary

The performance of a hydrofoil sailing boat, which has dihedral-angled and surface-piercing foils, at high speed is described.

A simple method of performance prediction was devised, which considered two important factors for sailing boats as follows: (i) variation of hydrodynamic drag caused by change of heel and leeway angles; (ii) limitation of sailing performance due to capsizing.

For the present study one typical sailing hydrofoil configuration was used, i. e. a 5.08 m long catamaran, with a pair of surface-piercing front (main) foils having 40 degree dihedral angles, and one horizontal rear foil, which formed an inverted "T" in combination with the rudder.

The calculations aimed to predict the effect of dihedral angles, width between the foils, and weight of the boat on performance.

The results obtained were as follows: (1) the present method gives good estimated values for the performance of a hydrofoil sailing boat with dihedral-angled and surface-piercing foils; (2) the sails should be trimmed to produce the maximum thrust force, but the performance of a boat to a beam reach is subject to limitation due to capsizing, and to windward, due to leeway angle; (3) although the true wind angle varies extensively, the apparent wind angle at high speed varies much less, so that the aerodynamic drag angle of the sail can be regarded approximately constant; (4) the predicted heel angle is between 0 and -6 degrees at high speed (heel to weather-side); (5) the aerodynamic force coefficients of the sail estimated from the sea trial are smaller than the wind tunnel test data; (6) there are small differences between the predicted and measured immersion of the hydrofoils; (7) the weight of a boat has an appreciable effect on the light wind performance; (8) the dihedral angles and width between the foils have a considerable effect on the boat performance. The optimum dihedral angle is between 40 and 45 degrees, and the optimum width between foils is around 1.2~1.6 h_s , h_s being the height of C. E., the centre of sail force, above the foil bottom.

1 緒 言

風力を舟艇の推進力源として再度見なおすとき、風の“むら”や“ふれ”などの非定常性が存在することや、風向に対して進行方向に制限を受けるなどの問題点があげられる。同様に、得られる速度に制限があることも大きな欠点とされている。

帆走艇の速度に着目するとき、これまでの多くの研究は風上に向かってどれだけの速度を得られるかという、いわゆる“上り性能”に重点をおいて行なわれてきている^{1),2)}。しかしながら、この上り性能にとらわれず、風力をなるべく有利に利用して最大の船速を得ようとするときの問題点を明らかにすることも、帆走艇の性能を向

上するうえで重要であると考えられる。

帆走艇の速度を上げるには、基本的には帆の効率を良くし、船体の抵抗を減らせば良いと考えられるが、横転の危険性と表裏一体をなしており、その最適設計はかなり複雑なものとなる。

抵抗を減ずる手段として、水中翼を用いる方法は、帆走艇特有のリーウェイに対処するうえでも有効であることから、比較的以前から着目され、Bakerによる試験艇“Monitor” (1955)などに使用されて成功を納めている³⁾。その後 Nigg⁴⁾、Hook⁵⁾、Bradfield^{6),7)}らによって、1~2人乗りの小型艇の研究が進められており、外洋帆走艇の領域においても Keiper⁸⁾が、全長 10m の外洋帆走艇“Williwaw” (1970)により、水中翼浮上時の巡航速度 15~25kt を示し、外洋帆走艇の水中翼走行の可能

* 金沢工業大学

性と有効性を示した。

しかしながら、これらの水中翼を用いた船の性能に関しては、帆走艇の性能を考察する際に欠くことのできない

- (i) リーウェイと、ヒールによる抵抗の変化
- (ii) 横転による帆走性能の制限

の、2つのファクターを同時に考慮したものは見あたらない。

本報では、高速帆走の可能性と、風向風速に対する性能を明らかにするため、ある型式の水中翼艇を考え、簡単なモデル化を行なって、上記の (i), (ii) を考慮した解析法を示し、ついで実験艇を試作して、これについての予測値と実験値を比較した。また、この方法を用いて、水中翼上反角と左右の水中翼間隔および、船体重量が性能に及ぼす影響についても考察を加えた。

なお、問題を高速帆走時に絞るため、解析は、水中翼浮上時についてのみ行ない、また、帆の効率の悪い追い風に近い状態については別の機会にゆずることとして重点をおいていない。

2 解析の方法

2.1 釣合方程式とその解法の方針

水中翼帆走艇の代表的な形式を考え、これに作用する力とモーメント、および角度を Fig. 1 のように定義し、図に示す方向を正とする。ここで座標軸は、水平面内の進行方向を x 軸、これに直角の方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とする。船体運動の動的解析においては、普通、船体に固定した座標軸がとられているが、本報では、静的

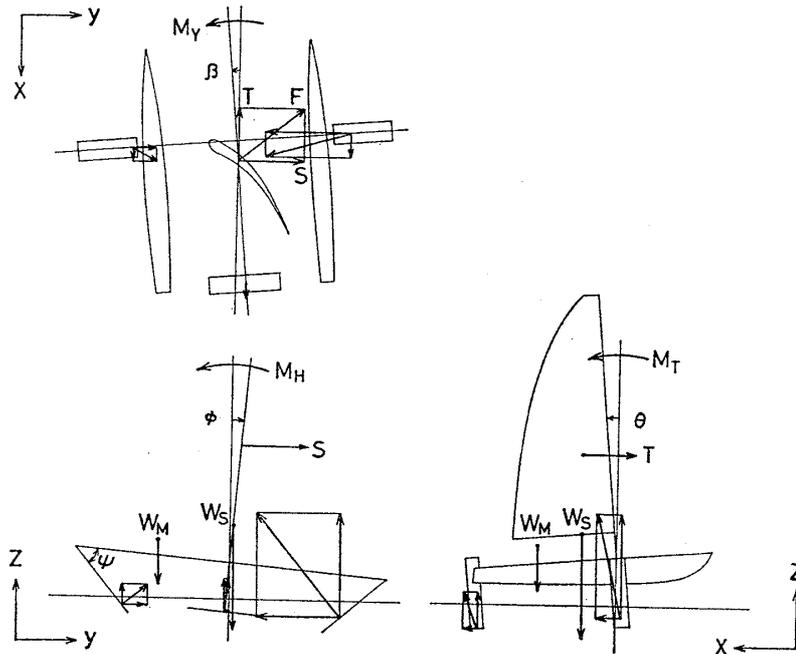


Fig. 1 Forces and moments acting upon hydrofoils and sails

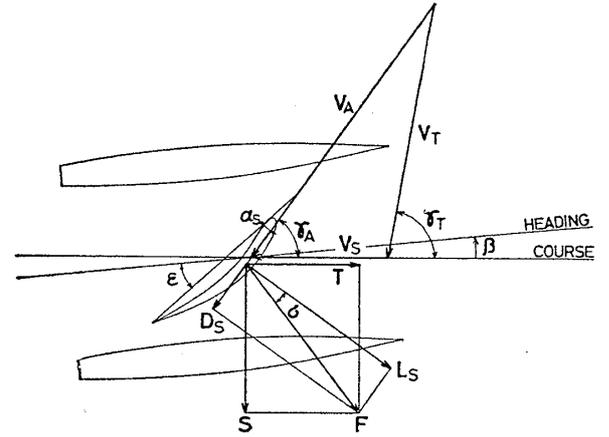


Fig. 2 Relation between the sail and the wind

釣合のみを考えることとし、また水中翼の性能は、翼面が進行方向となす角と、鉛直方向の変位量との関数として表わされるため、これらの表現に都合の良い上記の座標軸をとることとした。

また帆に働く流体力の関係を Fig. 2 に示す。ここで

- ϕ : ヒール角
- θ : トリム角
- β : リーウェイ角
- ψ : 水中翼上反角

W_S : 船体重量

W_M : 乗員重量

V_T : 真風速

V_A : 船上で観測される相対風速

γ_T : 進行方向と真風向とのなす角

γ_A : 進行方向と相対風向とのなす角

V_S : 船速

F : 帆に働く合力

T : 帆に働く前進力

S : 帆に働く横押力

σ : 揚抗比角 $= \tan^{-1}(D_S/L_S)$ 。

L_S, D_S はそれぞれ帆に働く揚力および抗力 (Fig. 2 参照)

M_T : トリム・モーメント

M_H : ヒール・モーメント

M_Y : ヨウ・モーメント

とする。なお、これらモーメントを測る基準点は左舷水中翼の上縁船首端にとる。また、

X : 水中翼の発生する抗力 (進行方向に逆向き)

Y : 水中翼の発生する横向力

(進行方向に直角)

Z : 水中翼の発生する上向力 (鉛直方向)

W : 船体重量および乗員重量の合計

h : 左右水中翼の平均没水深さ (翼走浮上に伴って h は減少)

M_{TH} : 水中翼に作用する力によるトリム・モーメント

M_{HH} : 水中翼に作用する力によるヒール・モーメント

l : 船体と乗員の合成重心の、モーメント基準点からの前後距離

b : 船体と乗員の合成重心の、モーメント基準点からの左右距離

h_{CE} : 帆に働く力の着点の、モーメント基準点からの高さ

A_S : 帆面積

ρ_A : 空気密度

静的釣合はこれらの座標軸方向の力と、三方向のモーメント M_T, M_H, M_Y の釣合を考えればよい。

ここで M_Y については、帆と水中翼の前後配置をバランスよく設計しておけば、ごくわずかなあて舵によって釣り合わせることができることを予備試験艇⁹⁾によって確認しているので、考慮の外におくこととする。従って、舵角についても考慮しないこととする。このことから、モーメントに関しては M_T, M_H のみの釣合を考えればよいことになる。

翼走状態を考えるから釣合に寄与する力は、(i) 水中翼の発生する力、(ii) 船体および乗員重量、(iii) 帆に働く力、の3つである。

(i) 水中翼の発生する力は航走状態を表わす変数 $V_S, \phi, \beta, \theta, h$ の関数として得られ、これによって X, Y, Z, M_{TH}, M_{HH} が求められる。

(ii) 船体および乗員重量によるモーメントは、乗員位置を与えれば、 l, b が決まって求められる。

(iii) 帆に働く力は、帆の風に対する迎角 α_S (Fig. 2 参照) と風速 V_A で決まる。そして帆の迎角 α_S は、船の相対風向 γ_A と帆のトリム角 ε で決まる。帆のトリム角を風向 γ_A に対してどのように決めるかは操帆のキーポイントであるが、ここでは次の2つの条件のいずれかに従って γ_A と帆のトリム角の間の関係を指定することにする。

(a) 帆に働く前進力 T が最大となるようトリム角を決める。

(b) そのトリム角で発生する帆の横押力 S が船の横転限界を超えるときには、その限界一杯の S を与えるようトリム角を決める。

この2つの条件は、水中翼帆走艇の現実の操帆をよく表わしていると考えてよい。

この条件を指定すると、風向 γ_A に対して帆のトリム

角 ε が1つに決まるから、 γ_A に対して帆の迎角 α_S が1つに決まることになる。従って、相対風向 γ_A と相対風速 V_A の2つを与えれば、帆に働く力が決まることになる。

すなわち、

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{\rho_A}{2} \cdot V_A^2 \cdot A_S \cdot C_T(\gamma_A) \\ S &= \frac{\rho_A}{2} \cdot V_A^2 \cdot A_S \cdot C_S(\gamma_A) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} C_T &= C_L(\gamma_A) \cdot \sin \gamma_A - C_D(\gamma_A) \cdot \cos \gamma_A \\ C_S &= C_L(\gamma_A) \cdot \cos \gamma_A + C_D(\gamma_A) \cdot \sin \gamma_A \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

なお後述するように本論文では計算の便宜上、合力係数 C_F と、揚抗比角 σ を使って、次の表現を使っている。

$$\left. \begin{aligned} C_L &= C_F \cdot \cos \sigma \\ C_D &= C_F \cdot \sin \sigma \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

さらに、 V_A, γ_A は、真風速 V_T 、真風向 γ_T 、船速 V_S を使って

$$V_A^2 = (V_S + V_T \cdot \cos \gamma_T)^2 + V_T^2 \cdot \sin^2 \gamma_T \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \gamma_A &= \frac{V_T}{V_A} \cdot \sin \gamma_T \\ \cos \gamma_A &= \frac{V_S}{V_A} + \frac{V_T}{V_A} \cdot \cos \gamma_T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

のように表わすことができるので、結局、所与の帆に作用する T, S は、 V_T, γ_T, V_S の関数となる。なお後述のように、 ϕ と θ は共に数度以下となるので、帆の力 T, S の水平成分に与える ϕ と θ の影響は無視している。

上記 (i), (ii), (iii) の力の関係から、次の5つの釣合方程式が得られる。

$$W = Z(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \quad (6)$$

$$T(V_T, \gamma_T, V_S) = X(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \quad (7)$$

$$S(V_T, \gamma_T, V_S) = Y(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \quad (8)$$

$$W \cdot l = T(V_T, \gamma_T, V_S) \cdot h_{CE} + M_{TH}(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \quad (9)$$

$$W \cdot b = S(V_T, \gamma_T, V_S) \cdot h_{CE} + M_{HH}(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \quad (10)$$

真風速 V_T と、真風向 γ_T を所与の風の条件とすれば、この釣合方程式から残る5変数 $V_S, \phi, \beta, \theta, h$ が決定され、船の運動状態が解けたことになる。

ところで、これらの方程式において船の姿勢を表わす変数 ϕ, β, θ と、水中翼の迎角との間の幾何学的関係式は、相当複雑である。また没水深さ h は翼面積と翼のアスペクト比を変化させる。これらを考慮して水中翼の発生する力とモーメントを表わす式を求めると、さらに複雑な非線形の式となるので、連立方程式 (6)~(10) を解析的に解くことはほとんど絶望的である。

そこで本解析法では、運動状態から X, Y, Z, M_{TH}, M_{HH} を求める形までを計算機にプログラムし、運動状

態変数を少しずつ変えて計算をくり返して解を求める方法をとる。その具体的手順を述べると次のようである。

まず(9), (10)式中, 帆に働く力 T, S はそれぞれ(7), (8)式を用いて水中翼に働く力 X, Y におきかえることができる。すなわち,

$$W = Z(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \quad (11)$$

$$W \cdot l = X(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \cdot h_{CE} + M_{TH}(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \quad (12)$$

$$W \cdot b = Y(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \cdot h_{CE} + M_{HH}(V_S, \phi, \beta, \theta, h) \quad (13)$$

となる。

次に V_S, ϕ を任意に与えて連立方程式(11)~(13)を満足する β, θ, h の組を求めて(7), (8)式右辺に代入すると, X と Y から β, θ, h が消去されたことになる。形式的に書けば $X(V_S, \phi), Y(V_S, \phi)$ となる。

一方, 帆の力は $T(V_T, r_T, V_S), S(V_T, r_T, V_S)$ の形で表わされるが, V_T と r_T は最初に与える条件であるから, これを指定すると結局, T と S は V_S だけの関数となり, 形式的に書けば, $T(V_S), S(V_S)$ となる。

ここで釣合方程式(7)と(8)を用いると

$$X(V_S, \phi) = T(V_S) \quad (14)$$

$$Y(V_S, \phi) = S(V_S) \quad (15)$$

となり, これを満足する V_S と ϕ の1組が, 所与の風の条件 V_T, r_T に対して釣合方程式(6)~(10)を満足する V_S と ϕ の組となる。また, この値に対して(11)~(13)式を満足している β, θ, h は, 同じく所与の V_T, r_T に対して釣合方程式(6)~(10)を満足する。こうして所与の風に対して船の航走状態が1つに求められたことになる。

2.2 水中翼に働く力の表現式

水中翼に作用する流体力を算出する際に, 次のような仮定をおく。

(i) キャビテーションおよび, ベンチレーションは発生しない。

(ii) 抗力は, 二次元抵抗, 誘導抵抗, 造波抵抗の3つのみとし, スプレー抵抗や, ベンチレーション防止用フィンなどの付属物の抵抗は考慮しない。

このことから, 個々の水中翼に作用する翼面垂直揚力 L' と, 上向力 Z' , 横向力 Y' , および抗力 X' は, 次式から求められる。

$$L' = \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot V_S^2 \cdot A_H \cdot C_{L3} \quad (16)$$

$$C_{L3} = K_1 \cdot C_{L2} \cdot \frac{A}{2+A} \quad (17)$$

$$Z' = L' \cdot \cos(\psi \pm \phi) \quad (18)$$

$$Y' = \pm L' \cdot \sin(\psi \pm \phi) \quad (19)$$

$$X' = \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot V_S^2 \cdot A_H \cdot C_{D3} \quad (20)$$

$$C_{D3} = C_{D2} + C_{Di} + C_{Dw} \quad (21)$$

$$C_{Di} = K_2 \cdot \frac{C_{L3}^2}{\pi \cdot A} \quad (22)$$

$$C_{Dw} = C_{L3}^2 \cdot \frac{c}{h_D} \cdot \frac{0.5}{F_h^2 \cdot e^{(\frac{2}{F_h^2})}}^{10)} \quad (23)$$

$$F_h = \frac{V_S}{\sqrt{g \cdot h_D}} \quad (24)$$

ただし

C_{L2} : 二次元揚力係数

C_{D2} : 二次元抵抗係数

C_{Di} : 誘導抵抗係数

C_{Dw} : 造波抵抗係数

ρ_W : 水密度

A_H : 水中翼没水面積

h_D : 水中翼没水深さ

c : 水中翼弦長

A : 水中翼没水部アスペクト比

K_1 : 水面貫通型の前部水中翼については 0.9^3 , 完全没水型の後部水中翼については 1.0 の値をとる

K_2 : 前部水中翼については 2.0^3 , 後部水中翼については, 水深によって, $1.0 \leq K_2 \leq 2.0$ の値をとる¹⁰⁾

C_{L2}, C_{D2} の値は各々の文献の値を用い, Z', Y', X' の作用点は, 没水面積の図心とする。

上反角 ψ を持った翼が, 船体とともに前後に傾き, トリム角 θ となったとき, 水中翼の見かけの上反角 ψ' は,

$$\psi' = \tan^{-1}(\tan \psi \cdot \cos \theta)$$

で表わされ, 水平面への投影翼型は, 後退角 A を持つことになるが, θ は数度以下となるので ψ', A の変化については無視するものとする。この仮定のもとに, 船体とともにトリムした角度を θ , リーウェイ角を β とするとき, 水中翼は, Fig. 3 に示す相対迎角 α_H によって, 翼面垂直揚力を発生する。図の関係から, α_H は次式によって求められる。

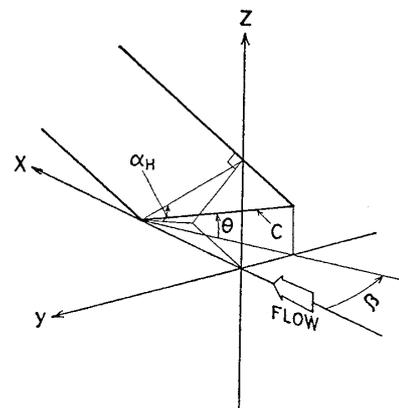


Fig. 3 Attack angle of hydrofoil

$$\alpha_H = \sin^{-1} \left[\frac{\sin \theta \cdot \cos(\psi \mp \phi) \pm \cos \theta \cdot \tan \beta \cdot \sin(\psi \mp \phi)}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{\cos \theta \cdot \tan \beta}{\cos(\psi \mp \phi)} \right\}^2}} \right] \quad (25)$$

式中の逆符号は、反対弦の水中翼についての値である。

3 性能推定計算の実例

3.1 解析の対象とした船の諸元等

帆走艇に用いられる水中翼の形状と配置については、これまで各種のものが報告されているが³⁾、ここではその中でも比較的多く製作され、安定した性能を示している

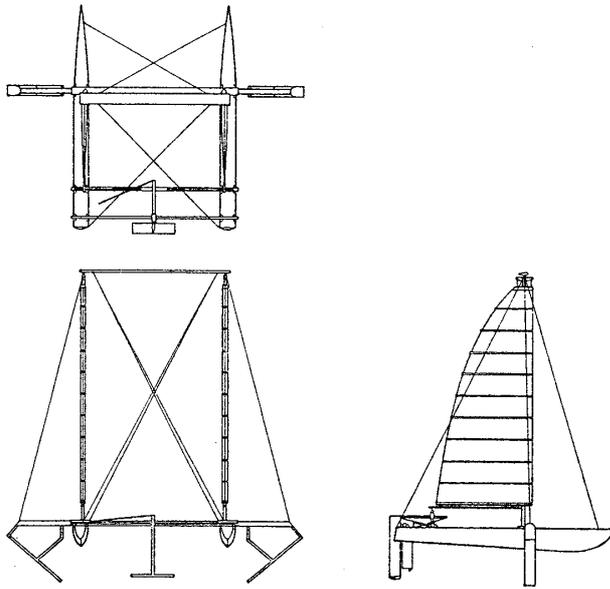


Fig. 4 Three views of the test boat

Table 1 Principal dimensions of the test boat

HULL			
Loa	5.08 m		
Lwl	4.95 m		
Bmax without Foils	3.74 m		
Bmax with Foils	6.84 m		
Materials	Plywood and G.F.R.P.		
FOIL	FRONT (MAIN)	REAR	RUDDER
Foil Section	O _{5a} 11.7	NACA64A010	NACA64A010
Chord Length	230 mm	240 mm	240 mm
Span	1.61+0.84 m*	1.0 m	---
Dihedral Angle	40°	0°	---
Materials	G.F.R.P. Sandwich construction with polyurethane foam core and reinforced by carbon fibre.		
SAIL AREA	16.0 m ² (8.0 m ² x 2)		
TOTAL WEIGHT	255 kg		
CREW	1 person (70 kg)		

* maximum length

る次の形式をとった。すなわち、前翼（主翼）として、上反角を持った水面貫通型の翼を1対、後翼として、舵と一体化して逆T字型とした水平翼を1個の、計3翼による支持方式のものである。

この形式の安定性および基本的性能については、予備試験艇を試作して、曳航および帆走実験を行なって確かめた⁹⁾。

海上試験および解析に用いた試験艇を Fig. 4 に、諸元を Table 1 に示す。

前部水中翼は、後述の上反角と性能の関係から、上反角 40° を選び、翼断面形状は、製作しやすく、かつキャビテーションを起こしにくいとされている O_{5a}^{11.7} 型¹¹⁾ を使用した。材質は F.R.P. を用いたサンドイッチ構造である。工作の手順としては、精密に木型を製作し、これから F.R.P. 雌型をとった後、硬質発泡ウレタンを芯材として F.R.P. を積層形成する方法をとり、補強にカーボンクロスを使用した。

後翼および舵板は、NACA 64 A 010¹²⁾ の対称翼断面を使用し、前翼と同様の方法で製作した。前翼にはベンチレーション防止用のフィンを3カ所取り付けられている。

こうして供試船の水中翼配置を与えたので、2.2 節に従って水中翼に働く力が計算出来る。これから船全体に働く力およびモーメントの各成分 X, Y, Z, M_{TH}, M_{HH} を計算することができる。

船体は通常のカタマラン・セーリングボートと同様の形式で、合板と F.R.P. で製作したが、水中翼の配置の都合上から船体間隔はかなり広めである。本論文では水中翼浮上後の性能について考察するため、船体形状については省略する。

帆は、なるべく風圧中心を下げ、かつ操作を容易にするために、メインセイルを2枚並列に並べた形式とした。また、通常の布セイルではマストが帆の前縁の流れを乱し、特に高速域では悪影響をおよぼすと考えたため、Fig. 5 に示すようなリブを用いて布セイルがマストを包み込み、翼型を形成するようにした。リブの後半は適度の弾力を持つパテンであり、これによってどちら側にもキャンバーを形成することができる。

3.2 帆と船体に作用する空気力の評価

水中翼に作用する水の流体力は、既に述べたように求めることができた。次に、帆と船体に作用する空気の流体力係数を決定するため、それぞれ1/10

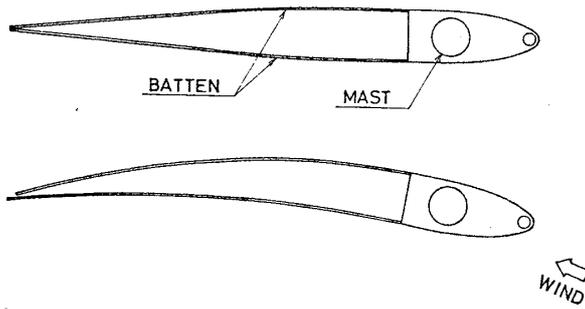
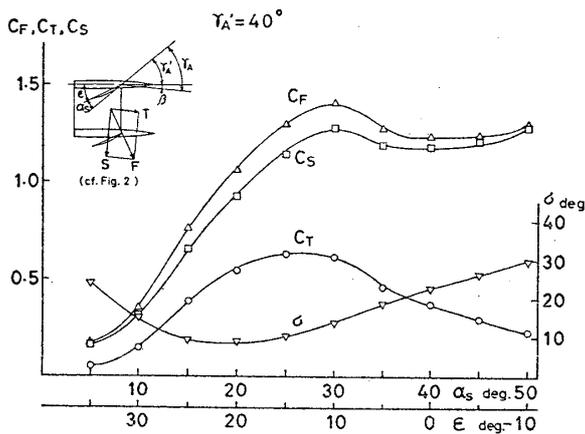


Fig. 5 Cross section of the sail

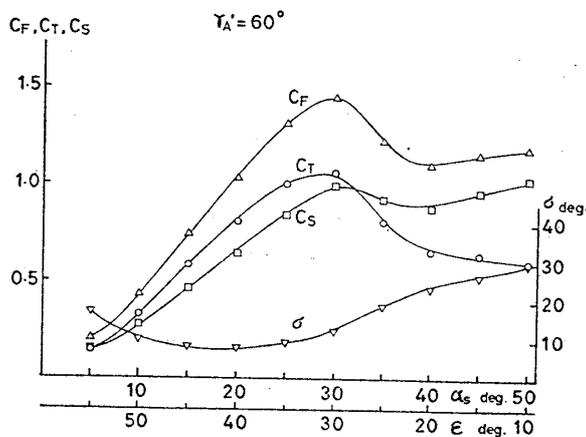
の模型を製作して風洞実験を行なった。帆模型には、 1 oz/ft^2 のスピネーカー用ナイロンクロスを使用した。

2.1 節 (iii) の項で既に述べたように、帆の流体力係数は、相対風向 γ_A と帆のトリム角 ϵ によって変化する。風洞実験で得られたトリム角 ϵ による流体力係数の変化を Fig. 6 に示す。

本例のような2枚帆では、2枚のトリム角の差によっても性能は変化するが、このことについては今後の問題点とすることとし、ここではトリム角の差の無い場合、すなわち2枚の帆を平行にトリムする場合についてのみ



(a)



(b)

Fig. 6 Aerodynamic coefficient of the sail obtained through wind tunnel tests

考える。

図は、風向と船体中心線とのなす角 γ_A' ($\gamma_A' = \gamma_A - \beta$) が 40° と 60° の場合の例である。また、 C_T 、 C_S は各々 (2) 式で表わされる前進力係数と横押力係数である。

本解析では、帆の調整の第一条件として、2.1 節 (iii) の条件 (a) を用いるものとし、帆に働く前進力 T が最大となるようトリム角を決めるものとする。このようにした場合の帆の C_F 、 σ の値を Fig. 7 の太実線で示す。また船体に作用する空気力は、海面上風速の垂直分布¹⁾を考慮したうえで、便宜上、帆の力に合成して考えるものとする。これらの合力を帆面積に対する係数として表わせば、 V_T 、 γ_T によって多少の違いはあるが、ほぼ図中の太破線のようなになる。これが第一の条件に用いられる C_F 、 σ の値である。

ところで、Fig. 6 より、 C_T を最大とする時は C_S も大きくなることがわかり、船が横転する可能性のあることを示している。帆に働く前進力が最大となるトリム角では船が横転する場合は、当然帆の迎角を減じて (トリム角は増大する) C_F 値を下げ、横転寸前の状態で帆走するよう調整することになる。これは 2.1 節 (iii) に示した条件 (b) であり、これを帆の調整の第二条件とする。この場合の C_F は、第一条件の場合よりも小さい値となるが、Fig. 7 に示すように、 σ の値はあまり変わらない。

ところで、3.4 節に述べる解析結果によると、問題となる高速帆走時の γ_A は $30 \sim 60^\circ$ の範囲にとどまっている。このことと Fig. 7 の結果より、揚抗比角 σ は 15° 一定とみなすことにする。

また Fig. 7 によると、 γ_A' がある程度変わっても、 C_F の変化はあまり大きくない。これに横流れ角 β は数度を超えることは稀であることをあわせ考えると、Fig. 7 の横軸 γ_A' を γ_A に読みかえても大きな誤差にはならない。

この2つの簡単化は実用上大きな問題にはならないと考えられるが、この点をさらに精密化することは可能で

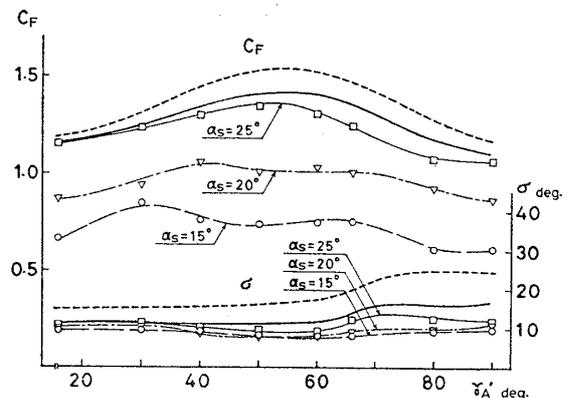


Fig. 7 Aerodynamic coefficient of the sail vs. γ_A'

ある。しかしながらそのような場合には、同時に帆の風洞実験における相似則や、海面上風速の垂直分布の問題も、もっと詳細に詰めるべきであろう。これらの状況を考慮したうえで本論文においては、ひとまず上記の簡単化を利用して帆に働く空気力の評価を行なうことにした。

3.3 計算手順

実際に計算をする際のフローチャートを Fig. 8 に示し、以下にその手順をのべる。

- ① 解析を行なう V_T, γ_T を設定する。
- ② V_S, ϕ をまず仮定する。

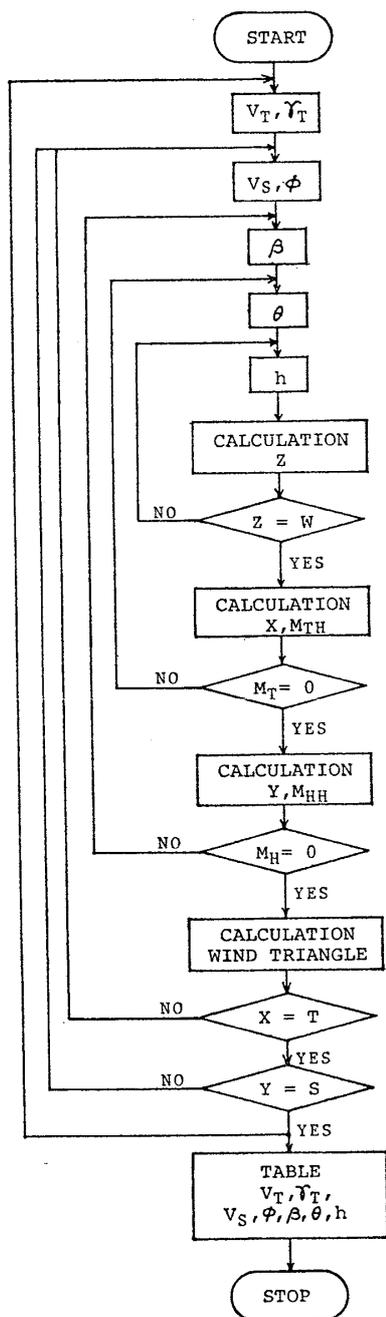


Fig. 8 Flow chart for calculation of performance prediction

- ③ 次に β, θ を仮定し、(11) 式を満足する h を求める。
- ④ ③をくり返して (12) 式を満足する θ, h を求める。
- ⑤ ④をくり返して (13) 式を満足する β, θ, h を求める。同時に X, Y が得られる。
- ⑥ ①の V_T, γ_T について (1)~(5) 式を用いれば T, S が得られる。
- ⑦ 以上の作業により、ある V_S, ϕ に対する X, Y, T, S の値が求められた。これらを用いて (14), (15) 式が同時に成立する V_S, ϕ を求める。

具体的には、 V_S を 0.2kt, ϕ を 0.2~0.05° の間隔で変化させて X, Y を求め、線形補間を行なって T, S と比較し一致する点を探した。

- ⑧ V_T, γ_T を変えて以上をくり返し、性能曲線を得る。

ここで、計算は水中翼の失速角などの制限から、トリム角 $\pm 10^\circ$, ヒール角 $\pm 10^\circ$, リーウェイ角 $\pm 12^\circ$ の範囲とした。また乗員位置は、通常の乗艇位置である風上側船体上としたが、船体幅、水中翼上反角などの条件を変更したときに (11)~(13) 式を満足する解が得られない場合は、実際に可能な範囲で乗員位置を設定しなおして、計算を行なった。

3.4 性能推定計算の結果

釣合計算によって得られた釣合状態が静的に安定であるためには、 $\partial M_T / \partial \theta < 0$, $\partial M_H / \partial \phi > 0$ である必要があるが、計算結果の一例を Fig. 9 に示す。図は $V_S = 18\text{kt}$ の場合で、 $\beta = 4^\circ$ 時のトリム角 θ に対する M_T の変化と $\beta = 3 \sim 9^\circ$ 時のヒール角 ϕ に対する M_H の変化を示している。図より、 $M_T = 0$, $M_H = 0$ となるときに、それぞれ上記の条件を満たしていることがわかる。

また、ヒール角 0° , リーウェイ角 0° 時の水中翼浮上後の抗力 X と、その内訳を、Fig. 10 に示す。この X は直進抗力を意味している。図中の破線は船体トリム角 θ である。離水時に抗力が大きいのはトリム角が大きいためで、速度の増加とともにトリム角は減少し、抗力もいったん減少することを示している。

また Fig. 11 は (11)~(13) 式を満足する X, Y の値である。ある V_S, ϕ に対して一組の X, Y が与えられるので一つの曲面を形成する。 Y の上限は主にリーウェイ角の制限によって決まってくる。図中に示す太実線は、 T, S の値の例で、 $V_T = 9\text{m/s}$, $\gamma_T = 90^\circ$, $C_F = 0.8$ の場合の値である。この曲線と X, Y 曲面の交点が、(14), (15) 式を同時に満足する点で、所与の風に対する性能を表わしている。

このようにして得られる帆走性能を、風速 V_T に対する船速 V_S で表わしたのが Fig. 12 である。 γ_T が 70° ,

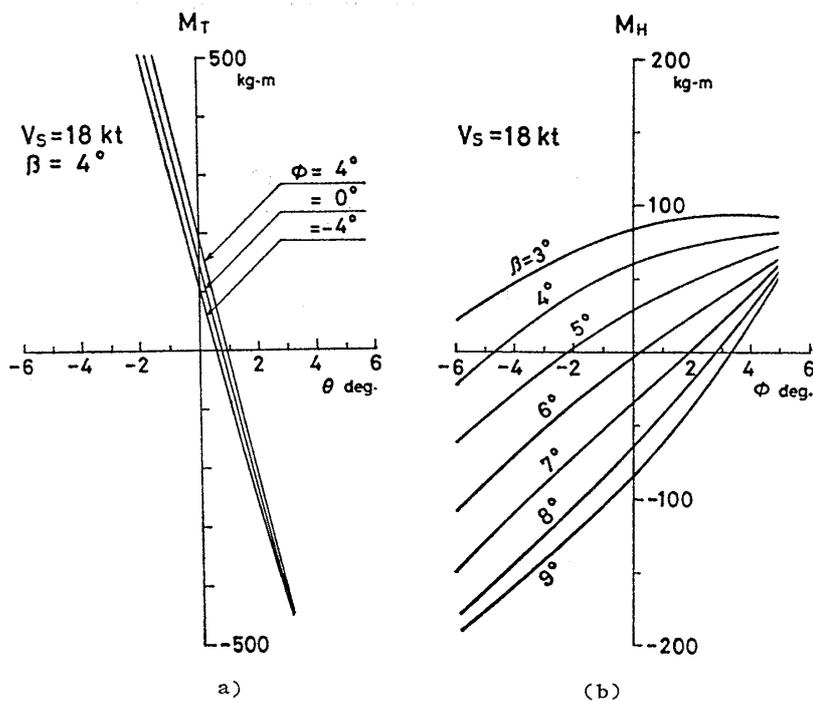


Fig. 9 Trim moment vs. trim angle and heel moment vs. heel angle

90°, 110° についての値であるが、いずれの場合も最大の前進力を生ずる C_F となる前に横転することを示している。図に示す船速の上限は、横転寸前に帆を調整する時に得られる値である。またこのような場合には、風速の増大の割には船速は伸びないことがわかる。

Fig. 13 は $V_T=9\text{ m/s}$ 時について極座標に表わしたものであるが、横転による制限は $\gamma_T=64\sim 125^\circ$ にわたっている。 γ_T が 125° 以上では、最大の前進力を生ずるように帆を調整しても、横転しなくなるが、同時に γ_T の増大に伴って船速は急に低下する。結果として $\gamma_T=125^\circ$ のときに最大の船速が得られている。また、 γ_T が 64° 以下の風上方向ではリーウェイ角が大きいために、水中

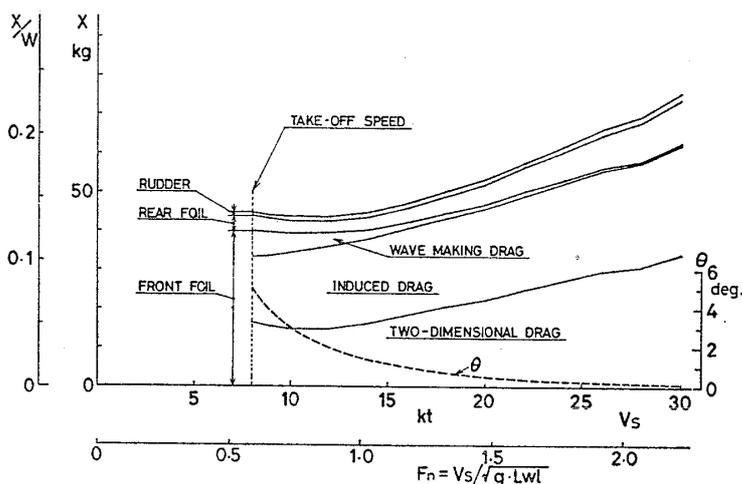


Fig. 10 Zero leeway drag and its components, and trim angle θ

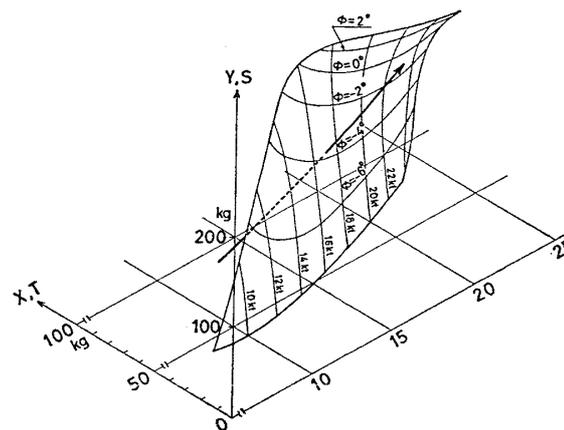


Fig. 11 Drag and side force of hydrofoils vs. boat speed

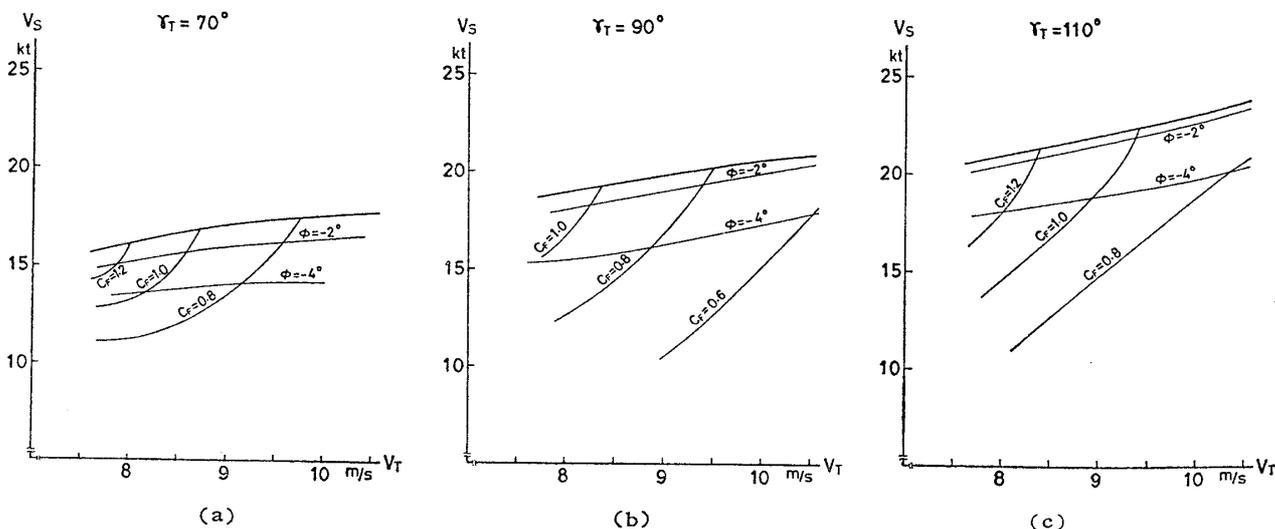


Fig. 12 Predicted performance vs. true wind speed

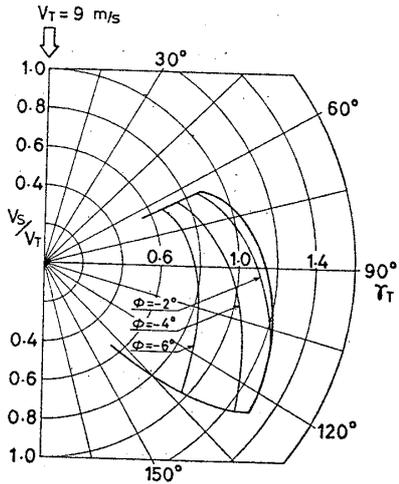


Fig. 13 Predicted polar diagram

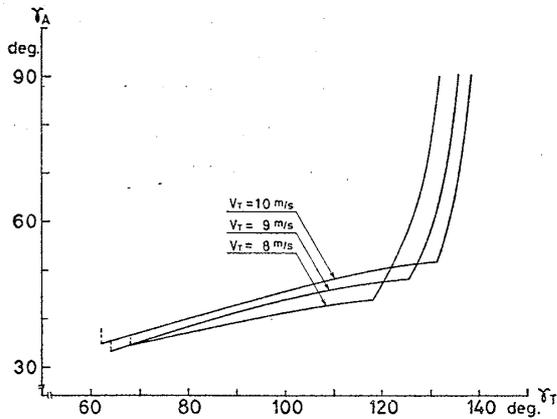


Fig. 14 Predicted apparent wind direction

翼帆走が不可能となることを示している。

ヒール角 ϕ は、 $0\sim-6^\circ$ となり、風上へヒールする傾向を示している。通常の帆船と違って、風下へのヒールでバランスする状態がないことは興味をひく。

Fig. 14 は、 V_T が 8, 9, 10 m/s 時の真風向 γ_T に対する相対風向 γ_A の変化を示す。高速を維持するのは、横転による制限を受ける $\gamma_T=60\sim130^\circ$ の範囲であるが、この間の γ_A は、ほぼ $30\sim60^\circ$ の値となることがわかる。

4 実艇実験

4.1 曳航実験

波浪の影響の少ない湾内で、無風の日を選び、実験艇を $2\sim24$ kt の範囲で曳航し、直進時の推進抵抗を測定した。また、このとき、同時に写真撮影を行なって、浮上姿勢、水中翼没水長さを測定した。

4.2 帆走実験

風速 $8\sim9$ m/s 時に帆走実験を行ない、主として高速時の性能を調べた。

実験艇は 1 人乗りで、横転の可能性もあるため、速度計以外の測定機器は積んでいない。速度計は市販のもの

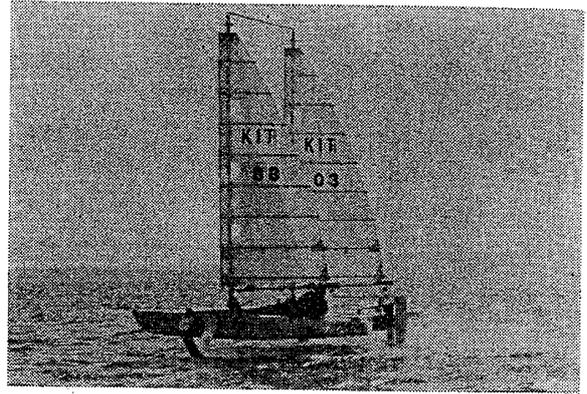


Photo. 1 Test boat under hydrofoil sailing

で、直径 19 ミリのプロペラが回転し、電磁パルスをカウントする形式のものである。水中翼浮上時にも、プロペラが水深 0.3m 以上の深さとなるよう、スケグの下部に取り付けた。実験には校正して用いたが、帆走中は操縦者がメータを読みとるため、得られる精度は 0.5kt 程度である。船速は、約 20 秒以上安定して航走する間の平均の速度をとった。

風向、風速および実験艇の進行方向は、伴走船から測定した。風速測定には手持風速計を用い、ほぼ実験艇のセール風圧中心に等しい高さで測定した。

実験艇の帆走状態を Photo. 1 に示す。

4.3 推定計算と実艇実験との比較と考察

4.3.1 推進抵抗

解析により得られた推進抵抗予測値と、実験値の比較を、Fig. 15 に示す。図中の予測値に含まれている、“AIR-DRAG” は、風洞実験から得られた船体の風圧抵抗を計算したものである。予測値にはほぼ等しい 8kt 前後から浮上し、これ以後の抵抗値の増加が比較的小さいことがわかる。

実測値と予測値は、ほぼ同一の傾向を示しており、数値的にもかなりよい予測値を得ているようである。

なお、図中の Δ 印は、水中翼の無い場合の抗力値で、ほぼ 13kt 付近で水中翼の有無による抗力の大小関係が入れかわることがわかる。

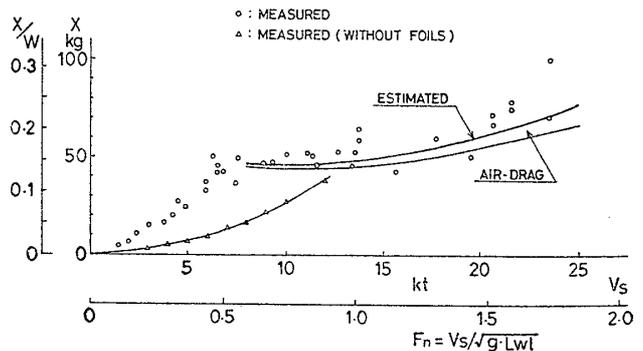


Fig. 15 Predicted and measured zero leeway drag

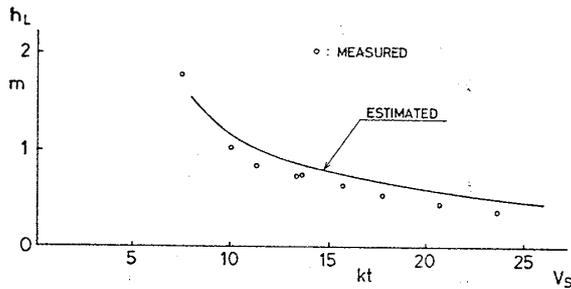


Fig. 16 Length of submerged section of hydrofoil

前翼没水長さ h_L の実測値と予測値との比較を Fig. 16 に示す。両値は同一の傾向を示しているが、実測値がやや下まわった値となっており、水中翼に作用する流体力を求める式に多少の見なおしが必要と考えられ、今後の問題としたい。

4.3.2 帆走性能

真風速 V_T が 8m/s, 9m/s の場合の解析結果と実測値を Fig. 17 に示す。実験艇の都合上、船速のみの測定に終わったが、トリム角、ヒール角に関しては、8ミリ撮影解析の結果、ほぼ予測値に近いことがわかった。

図中の細線は、帆の C_F を 0.9 ~ 1.0 となるように調整した場合の予測値であるが、これより、実験艇では帆を $C_F=0.9 \sim 1.0$ 程度で使用していることがわかる。予測結果から、帆のトリム角を大にして風下へ向かえば、さらに高速となり、最大速度を得ることも可能であるが、帆走実験ではこれらの方向で安定したデータを得ることはできなかった。これは、Fig. 7 に示されるように、 C_F 値が帆のトリム角 α_S によって大きく変化するため、これを高速時に的確に調整することは相当困難であることと、進行方向のわずかなずれによって横転、もしくは急速な速度の低下を招くためであると考えられ

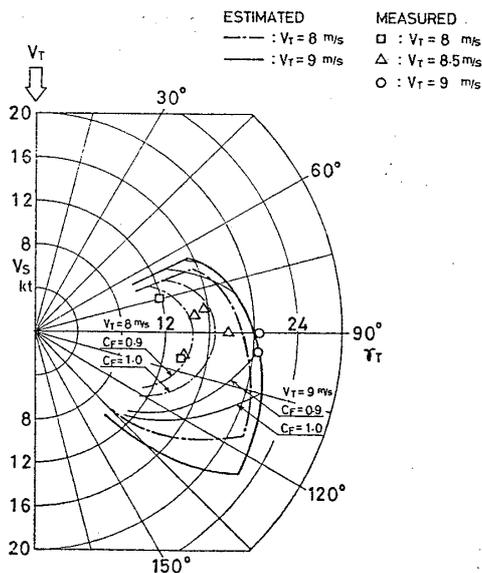


Fig. 17 Predicted and measured sailing performance

る。換言すれば、このような範囲を実艇で実用的にするためには、帆を自動的に調整するなどの改良の余地があることを示しているともいえる。

結果的に、帆走実験では帆のトリム角を一定（すなわち Fig. 7 より C_F 値もほぼ一定）に保つても、進行方向の多少のずれに対し、安定した性能を示すことができ、速度も最大となる横風方向の結果のみとなったが、この場合に得られた実測値は、予測値をほぼ実現していると言えるので、本解析法は、ほぼ妥当な値を与えることができると思われる。

帆の実物と模型の性能比較に関しては、キャンパーやねじれなどが必ずしも一致しているとはいえないことや、前述のごとく海面上風速の垂直分布のため、実艇では帆の高さによって相対風向と風速が変化するが、風洞実験ではこれを考慮していないなどの問題がある。従って帆のトリム角から直接船の性能を予測することや、最大 C_F 値の実測などについては、なお今後の検討が必要であろう。

帆走実験中の最大速度は、 $V_T=9$ m/s 時に γ_T が 90° , 95° の方向で得られた $V_S=20.5$ kt ($V_S/V_T=1.17$) であった。この程度の風速になると、かなり波浪は高くなるが、このような状況においても、安定して水中翼走行した。

5 船体諸元の性能に与える影響

以上の解析によって、本論文の解析法が実艇性能推定にはほぼ信頼できる結果を与えることがわかったので、この解析法を利用して、水中翼の上反角、左右の水中翼間隔など、水中翼帆走艇の性能に大きな影響を持つと思われるいくつかの設計諸元について、検討を加えてみた。

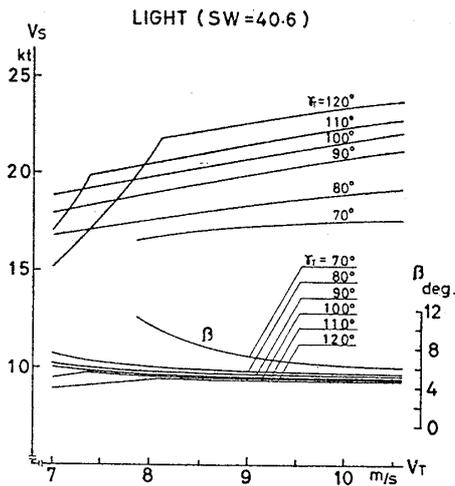
5.1 船体重量の影響

船体重量を変化させて、帆面積/(全備重量)^{2/3} で表わす、帆面積排水量比 (SW) を本実験艇 (SW=33.8) から $\pm 20\%$ とした場合の結果を Fig. 18 に示す。

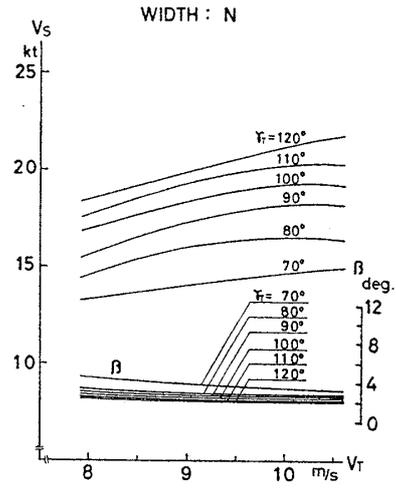
$V_T=8$ m/s 以上ではこれらの間にほとんど差は見られないが、それ以下の風速では軽量艇の速度が大きいことがわかる。これは、8 m/s 以上では、どの船も横転による制限を受けるためであり、得られる速度の上限は船体重量よりも、水中翼間隔、上反角などによって決まるためと考えられる。

8 m/s 未満では重量艇は、最大の前進力となるように帆を調整しても横転しなくなるため、風速の減少とともに急速に速度も低くなる。一方、軽量艇では 7 m/s 近くまで横転寸前の速度を維持できることを示している。

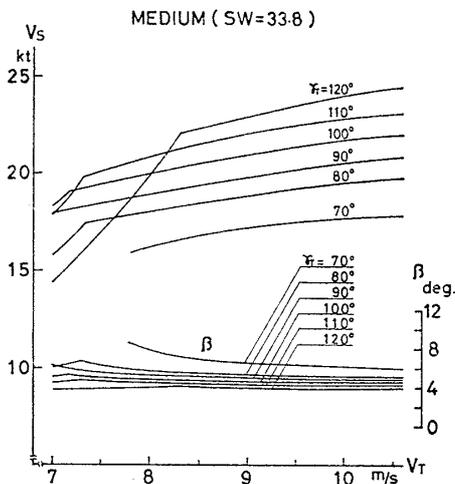
このことから、船体重量は、弱風時の性能に大きく影響を与えると言える。



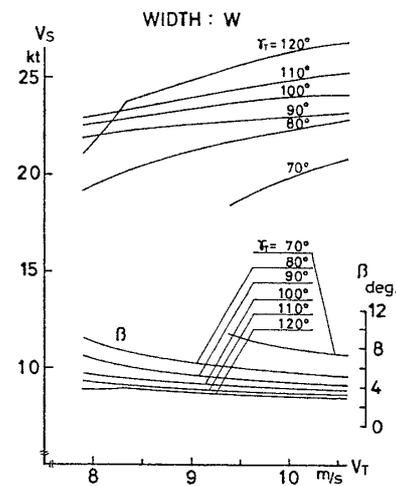
(a)



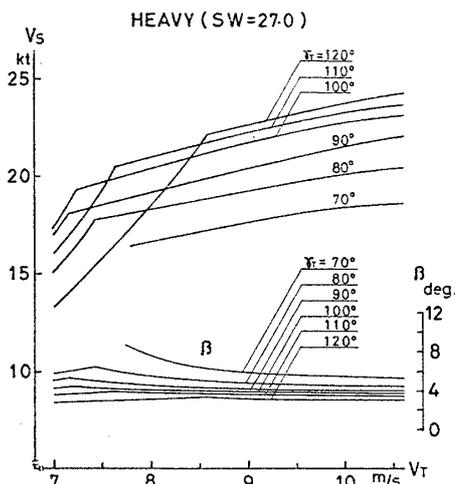
(a)



(b)



(b)



(c)

Fig. 18 Effect of boat weight

5.2 水中翼間隔の影響

水中翼間隔を14%減少した場合(N)と、20%増大した場合(W)の船速の変化を Fig. 19 に示す。間隔が小の場合は、リーウェイ角は小さいが、横転による制限のた

Fig. 19 Effect of width between foils

め使用できる C_F 値も小さく、船速は伸びない。

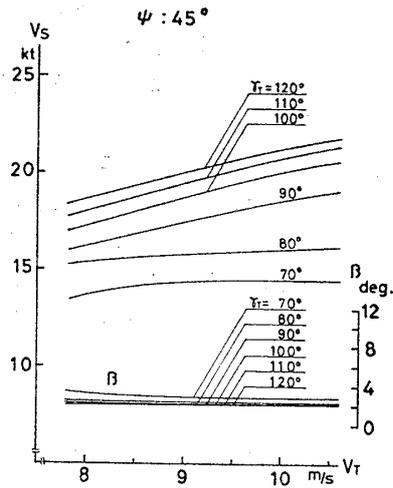
間隔が大の場合には、横転に対しては強く、船速は大となるが、同時にリーウェイ角も大きい。このため、乗員位置を船体中心方向へ移動して計算を行なっているが、それでも $\gamma_T=70^\circ$ の一部ではリーウェイ角の計算上の制限を超える場合が出ている。

水中翼間隔が大きい時、リーウェイ角が大となる理由は、Fig. 1 に示す水中翼発生力による横復原モーメントが、作用点距離の拡大によって増加することと関係があるが、そのメカニズムの詳細についてはなお検討の余地がある。

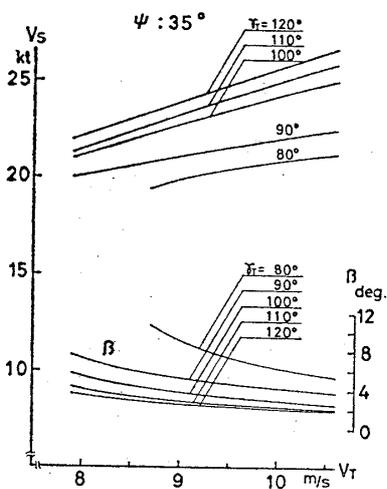
5.3 水中翼上反角の影響

同一の水中翼間隔で、上反角を 35° と 45° にした場合の変化を Fig. 20 に示す。上反角が大の場合には、水中翼の発生する上向力成分が小さいため、翼の没水面積が大きく、抗力が大となって、船速は低くなるが、リーウェイ角は小さい。

上反角が小の場合には、没水面積が小さくなるため船



(a)



(b)

Fig. 20 Effect of dihedral angles

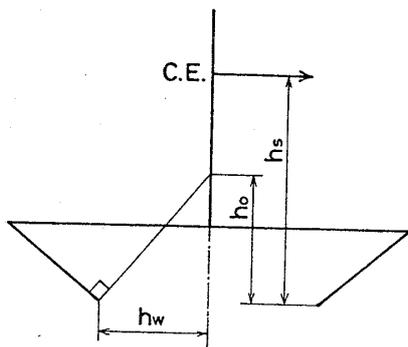
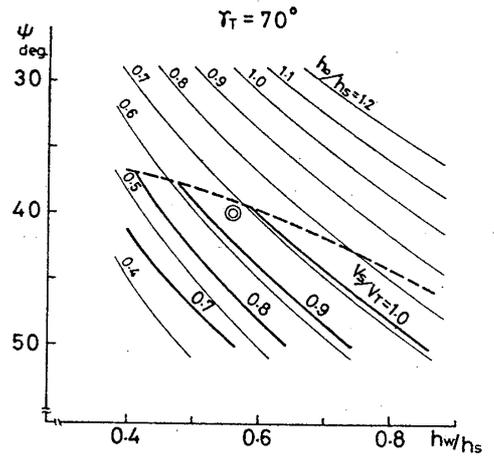


Fig. 21 Definition of h_0 , h_s , and h_w

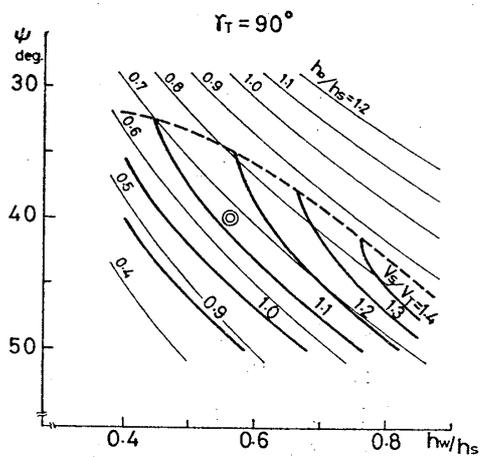
速は大きい、明らかにリーウェイ角も大きく、水中翼間隔が大きい場合と同様に、 $\tau_T=70^\circ$ と $\tau_T=80^\circ$ の一部では解が得られなかった。なお、この場合も乗員位置は船体中心寄りでの計算を行なっている。

5.4 水中翼間隔と上反角の相互関係について

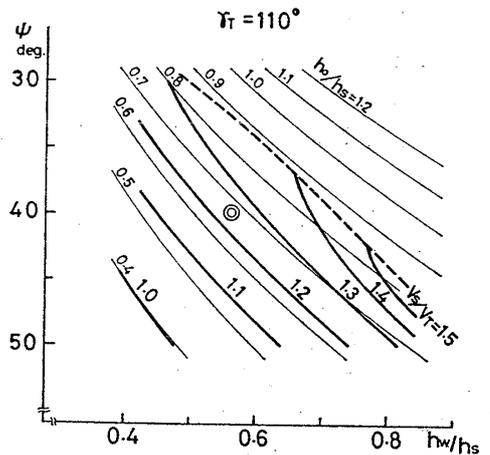
水中翼間隔の影響と、上反角の影響は非常によく似た変化を与えることが、Fig. 19 と Fig. 20 からわかるの



(a)



(b)



(c)

Fig. 22 Effect of dihedral angles and width between foils

で、これらの相互関係を調べる。

Fig. 21 に示すように、水中翼先端を基準高さとし、これから翼面に対して垂直に引いた線と中心線との交点までの高さを h_0 、帆の図心(C.E.) までの高さを h_s 、翼先端の間隔の半分を h_w とする。翼間隔を h_w/h_s で表わし、これと、上反角に対する船速の変化を示すと Fig. 22

のようになる。図は $V_T=9\text{ m/s}$ で V_T が 70° , 90° , 110° の場合の値であり、船速は V_S/V_T で示している。図中の細線は、等 h_0/h_S 線であり、◎点は実験艇の諸元を表わしている。

船速は h_0/h_S の値と強い関係があり、水中翼間隔と、上反角は密接につながって性能に影響を及ぼしていることがわかる。また、破線の上側の範囲は、リーウェイ角の制限によって帆走不能となる領域で、 h_0/h_S が 0.9 以上は不適當であることを示している。

本解析によって、水中翼間隔が小のときは上反角も小に、間隔が大のときは上反角も大として、 h_0/h_S を 0.7~0.8 に保つとよいことがわかる。また、 $\gamma_T=70^\circ$ の場合は、上反角が小のものや、間隔が大のものは帆走不能となるので、進行方向に対してオールラウンドな性能を得ようとする時は、上反角を $40\sim 45^\circ$ 、翼間隔は h_w/h_S の値で 0.6~0.8 とするのがよいといえる。

なお、これらの値は、水中翼断面形状や前後の水中翼間隔などによっても変化することが考えられるので、今後さらに検討の必要があると考えられる。

6 結 言

上反角のある水面貫通型の水中翼を持った帆走艇の性能推定計算と、対応する実験艇実験の結果を示したが、これによって次の結論を得た。

(1) 簡単なモデル化と仮定を用いて、静的な釣合から導かれる本解析法は、かなり良い推定値を与えることができ、このような形式の水中翼帆走艇の性能解析に有効であることがわかった。

(2) 帆は前進力が最大となるよう調整するのが理想であるが、本例では、風下よりに航走する場合にのみ、このような調整が可能であった。そして、このように調整し、かつ横転寸前となる進行方向のときに、最大船速が得られている。

横方向へ航走する場合は、横転による制限を受けるので、横転寸前で前進力が最大となるように帆を調整するものとする。この状態で得られる船速は、水中翼間隔と上反角などの水中翼の諸元によってほぼ決まり、風速や船体重量によっては、それほど変化しない。

風上への進行方向は、リーウェイ角によって制限を受け、水中翼帆走できない範囲がある。

(3) 真風向が変わっても、高速時の相対風向はそれほど変化せず、このことは帆の流体力の表現を単純化するのに役立つ。

(4) ヒール角は、 $0\sim -6^\circ$ 程度（風上へのヒール）で、 0° 以上では横転することがわかった。

(5) 実験艇の帆の流体力係数 C_F は、風洞実験で得られる最大値よりもかなり小さい値で使用している。こ

れは、実験艇では横風方向の結果のみしか得られなかったためであり、風下方向で大きな C_F 値を実現して高速を得るためには、帆を自動的に調整するなどの改良の余地があるといえる。また、帆のトリム角から直接船の性能を予測することや、最大 C_F 値については、風洞実験のやり方を含めて、なお今後の検討の必要がある。

(6) 前翼没水長さの実測値は、予測値より少し小さな値を示しており、水中翼に作用する流体力を求める式に多少の見なおしが必要と考えられ、今後検討の余地がある。

(7) 船体重量は、弱風時の性能に影響を与える。

(8) 水中翼間隔と上反角は密接に関係して、性能に影響を及ぼす。オールラウンドな性能を得ようとするときは、上反角を $40\sim 45^\circ$ 、 h_w/h_S を 0.6~0.8 とするのがよいことがわかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、暖かい励ましを賜った大阪大学 野本謙作教授、速度計較正に御尽力頂いた運輸省船舶技術研究所の北村文俊技官に深く感謝致します。また、風洞実験に関しては金沢大学工学部大型風洞装置を使用させて頂いた。関係各位に厚く御礼申し上げます。最後に、海上実験に協力を頂いた金沢工業大学 中村敏雄助教授、第1号艇から第3号艇までの製作と実験遂行の原動力となった昭和50年度から昭和54年度までの流体力学研究室の卒業研究生諸君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Marchaj, C. A.: Sailing Theory and Practice, Dodd, Mead and Company, 1964, p.310, p. 108.
- 2) Curtiss Jr., H. C.: Upright Sailing Craft Performance and Optimum Speed to Windward, Journal of Hydronautics, Vol.11, No.2 (Apr. 1977), p.42.
- 3) Alexander, A., Grogono, J., Nigg, D.: Hydrofoil Sailing, Hovering Craft and Hydrofoil, 1972, p.81, p.26, p.50.
- 4) Nigg, D. J.: A Sailing Hydrofoil Development, Marine Technology (Apr. 1968), p.150.
- 5) Hook, C.: Why Sailing Hydrofoils?, 4th A. I. A. A. Symp. on the Aer/Hydronautics of Sailing, Vol.11, A. I. A. A., (1973), p.82.
- 6) Bradfield, W. S.: Some Observed Effects of Foil Control on Hydrofoil Sailing Vehicle Performance, Chesapeake Sailing Yacht Symp. S. N. A. M. E., (Jan. 1974), p.8-1.
- 7) Bradfield, W. S.: The Development of A Hydrofoil Daysailer, 2nd A. I. A. A. Symp. on the Aer/Hydronautics of Sailing, Vol.9, A. I. A. A., (Apr. 1970), p.113.

- 8) Keiper, D. A.: Hydrofoil Ocean Voyager 'Williwaw', 3rd, A. I. A. A. Symp. on the Aer/Hydronautics of Sailing, Vol.10, A. I. A. A., (Nov. 1971), p.170.
- 9) 増山 豊: 水中翼を用いた帆走艇の試作とその性能について(第1報), 日本機械学会流体力学流体機械講論集, No. 780-11 (1978), p.182.
- 10) Hoerner, S. F.: Fluid Dynamic Drag, Published by Author, 1958, p.11-26, p.11-27.
- 11) 沼地福三郎, 中村正彦, 千田一郎: 製作しやすい翼型のキャビテーション性能(第7報), 東北大学高速力学研究所報告, Vol.7, No. 69 (1952), p. 115.
- 12) Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E.: Theory of Wing Sections, Dover Publication, 1959, p. 356.