

セーリング流体力に関する実船試験と数値計算

(第1報：定常帆走性能)

正員 増 山 豊* 正員 深 沢 塔 一*
北 崎 隆 雄**

Investigations on Sail Force by Full Scale Measurement
and Numerical Calculation
(Part 1: Steady Sailing Performance)

by Yutaka Masuyama, *Member* Toichi Fukasawa, *Member*
Takao Kitazaki

Summary

Sail forces were measured in a full-scale sailing boat with the use of a sail force dynamometer. This apparatus consisted of an aluminum frame fixed to the hull by way of several load cells. The sailing boat was modified so that the dynamometer frame could be installed inside the hull. The mast, stays, winches, and other sailing rig were fixed on the frame so as to transmit all the forces acting on sail to the frame. By transforming the measured forces, the lift force, drag force, thrust, side force, or the center of effort of the sail force could be obtained. The sailing conditions of the boat, such as the boat speed, heel angle, wind speed, wind angle, and so on, were also measured.

Sail shapes of the boat in the up-wind condition were also measured with the use of CCD cameras installed in the boat. The sail shape images taken by the cameras were transformed to bit-map files, and then processed by an SSA-2 D, a sail shape analyzing software. With the use of this software, sail shape parameters were obtained. The relationship between the measured sail forces and the sail shape parameters is discussed in this paper. Moreover, the measured sail shapes were used as the input data for the numerical calculations.

Numerical calculations were performed to estimate the sail forces of the boat. In the calculations, two sails, a mainsail and a jib, were modeled in the form of a vortex lattice. The vortex lattice method was adopted as the numerical calculation method. Step by step calculations were conducted up to attaining the steady state of the sail in steady wind. Calculated sail forces were compared with the measured forces, and the validity of the numerical method was studied.

1. 緒 言

セーリングヨットのセーリング性能を実験的に明らかにする方法としては、これまで風洞試験^{1),2)}がほとんど唯一のものであった。この風洞試験で信頼性のある結果を得るためには、何よりもまず模型のセーリング形状を実船のものと相似

形にして実験する必要がある。しかしながらセーリング模型は、実際のセーリングと同様に布やフィルムのパネルを縫い合わせて作られるので、これらのパネルのサイズが非常に小さくなる模型で、正確な断面形状を再現できるように製作することはかなり困難となる。さらに、セーリングの断面形状はフィルム状の弾性面に作用する張力と流体力のバランスによって形成されるので、このような小さな模型を用いて実際と相似な形状を風洞内で完全に再現することも困難といえる。

一方、セーリングヨットが鉛直方向に風速変化のある海面上を、風に対してある迎角をもって帆走するとき、船上で受ける相対風の風向および風速は高さによって変化し、

* 金沢工業大学

** (株)電業社機械製作所 (研究当時、金沢工業大学大学院)

原稿受理 平成9年1月10日

春季講演会において講演 平成9年5月15日

「ねじれ」が生ずることが知られている。実際のセールは相対風の中で作動するため、風洞試験においても当然このねじれを考慮しなければならないが、これまでの風洞試験では一般に無視されている。最近 Flay³⁾ によってねじれ流れを発生する風洞を製作してセール実験を行ったことが報告されているが、風洞そのものに特殊な装置を必要とし、まだまだ一般的な実験方法とはいえない。

風洞試験にはこのような弱点があるため、帆走性能を求めるために用いられる速度予測プログラム (Velocity Prediction Program: VPP⁴⁾) によって得られた性能予測値が実測値と合わないとき、この不一致の原因がセールデータの不確かさによるものとして処理されることが多かった。このことは VPP の他のパラメータや、VPP のモデリングそのものに含まれる誤りを過小評価することになり、結果として VPP の精度を上げる上で大きな障害となっていた。

上記のような風洞試験の持つ制約を克服するために、実船を用いて帆走状態で直接セールに作用する流体力を測定する方法が考えられる。船体そのものをダイナモメータとして用いようとするもので、いわば自然風の中で行う実物大の風洞試験といえる。この方法では、特殊な艇を建造しなければならないことや、較正試験が大掛かりとなるなど克服すべき点が多いが、セールの実験としては大きなメリットを有している。

そこで本研究では、増山ら^{5),6),7),8)} のこれまでの外洋セーリングヨットの海上実船試験における経験をもとに、より信頼性の高いセール性能データを得ることを目的として、全長 10.3 m のセールダイナモメータ実験艇を建造した。同艇にはセールダイナモメータの他、セール形状測定用 CCD カメラや、船体の航走状態を検出する計測機器が搭載されており、各種の計測が行えるようになっている。このようなセールダイナモメータを搭載した実験艇は、これまでに Milgram ら⁹⁾ が建造して成果を上げているが、本実験艇はこれをさらに発展させたもので、現存する唯一のものである。本艇を用いて種々のセールのトリム状態において、セールに作用する流体力とともに、セール形状や船体航走状態の測定を行った。

一方、数値計算によってセール性能を推定する方法として、一般に渦格子法が適用されているが^{10),11),12)}、深沢ら^{13),14)} はこの方法に加えてセール面の伸びを考慮した計算例を示している。これらの計算においては正確なセール形状の入力が必須であるが、これまでに、実測したセール形状を入力として計算し、さらに実験結果と比較した例は報告されていない。本研究のもう 1 つの大きな目的は、このような計算値と実測値を比較して数値計算法のバリデーションを行うことにある。このためにセール流体力と同時に計測されたセール形状を入力として計算を行い、実測値と比較を行った。

なお、本実験艇は当初、アメリカ杯ヨットレース参加艇に適用される国際アメリカズカップ級 (IACC)¹⁵⁾ のセール性能を明らかにすることを目的に 1994 年に建造されたが¹⁶⁾、同級のセール形状は通常の外洋ヨットに比べるとメインセールの上部面積が大きいなどやや異なった形をしており、データは一般的ではない。従ってここでは、通常の外洋レーシングヨットに適用されている IMS ルール¹⁷⁾ に適合するセールについて実験解析を行った結果について述べる。

2. 実験艇の概要

2.1 諸元

実験艇はヤマハ蒲郡製造(株)にて建造され、1994 年 5 月進水し「風神」と命名された。本艇の船体諸元およびセール寸法を Table 1 に、帆装図とデッキ配置図を Fig. 1 に示す。同艇はヤマハ発動機(株)設計の IMS レーシングヨット「YR-10.3 m」級をベースに製作された。船体は同級のものをを用いているが、デッキはジブセールの調整を広範囲に行うことができるように、オリジナルのものよりもキャピンの横幅を狭くしてデッキ面を広くとってある。

セールプランの主要寸法である I (フォアトライアングル上端高さ)、J (フォアトライアングル底辺長さ)、P (メインセール前縁長さ)、E (メインセール底辺長さ) の値は、このサイズの IMS 艇のセールとしてほぼ妥当な値である。しかしながらジブの大きさは、通常最も大きいもので LPG (ジブの前縁から垂直に計った後縁までの長さの最大値) が J の 150 % となっているが、ここでは 130 % のものとした。これは前述のように本実験艇が IACC 級のセール実験を主な目的として建造されており、同級のジブが小型でジブシート用のトラック長さが短いため、これに合わせて IMS セールを製作したためである。

Table 1 Principal dimensions of "Fujin"

HULL		
LOA	[m]	10.35
LWL	[m]	8.80
BMAX	[m]	3.37
BWL	[m]	2.64
Disp	[ton]	3.86
SAIL		
I	[m]	11.00
J	[m]	3.61
P	[m]	12.55
E	[m]	4.51
Area (Main)	[m ²]	33.10
Area (Jib)	[m ²]	26.23

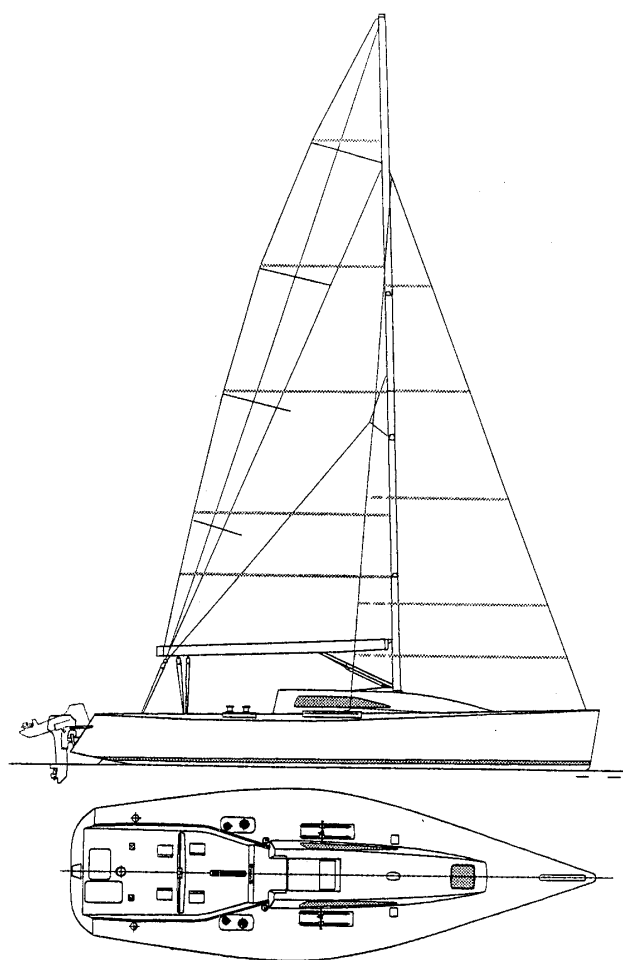


Fig. 1 Sail plan for IMS and deck arrangement of "Fujin"

2.2 セーリングダイナモメータ

セーリングダイナモメータは船内に設置されたアルミニウム合金のトラス構造のフレームと、これを船殻に固定する4個のロードセルによって構成されている。ダイナモメータフレームの船内配置状況と、ロードセルの検力システムを各々Figs. 2, 3に示す。4個のロードセルの内、2個は1分力計(LMC-1736, 日章電機)であるが残りの2個は2分力計(LMC-2737, 同)である。従ってこれらのロードセルによって6成分の荷重測定系が構成され、これにより船体軸方向の力と船体軸周りのモーメントを確定することができる。ロードセルの番号と、各々の荷重測定方向を図中に示すが、これらのフルスケールはそれぞれ、No. 1とNo. 2が40 kN, No. 3とNo. 4が20 kN, No. 5とNo. 6は30 kNである。

マストやこれを支えるリギン類、ならびにセーリングを操作するウインチやジブトラックなどの機装品は全てこのフレーム上に取り付けられている。Fig. 4に船内の様子の写真を示すが、これらのデッキ上の機装品は(a)図に示すようなデッキ穴を貫通する延長ベースを通してフレームに固定

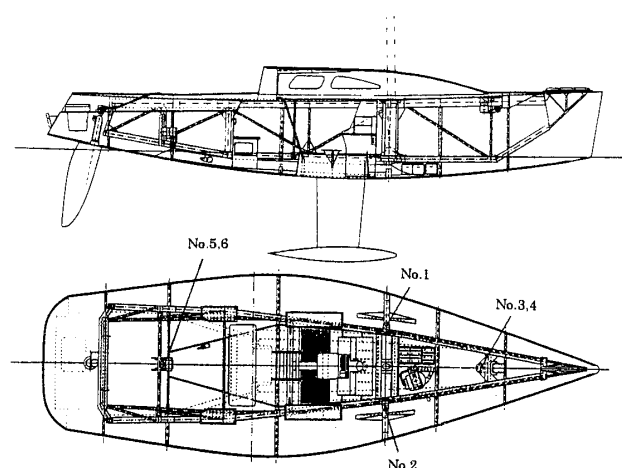


Fig. 2 Inboard arrangement and dynamometer frame construction

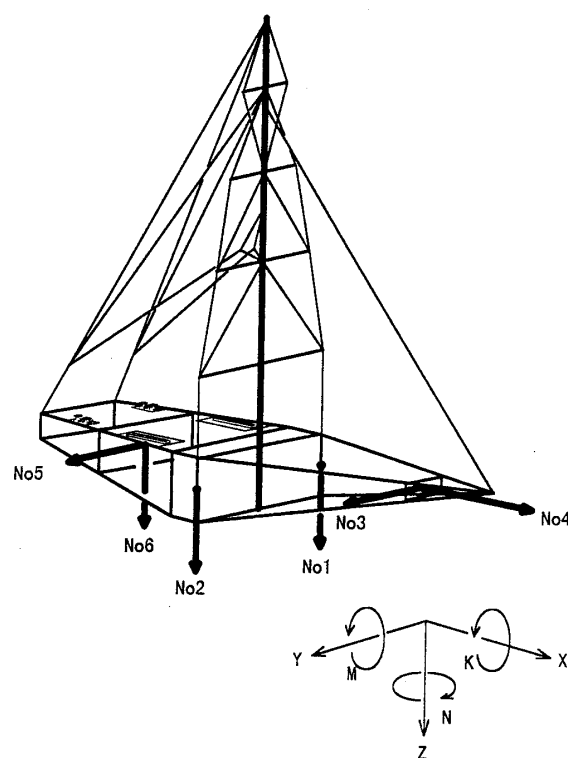
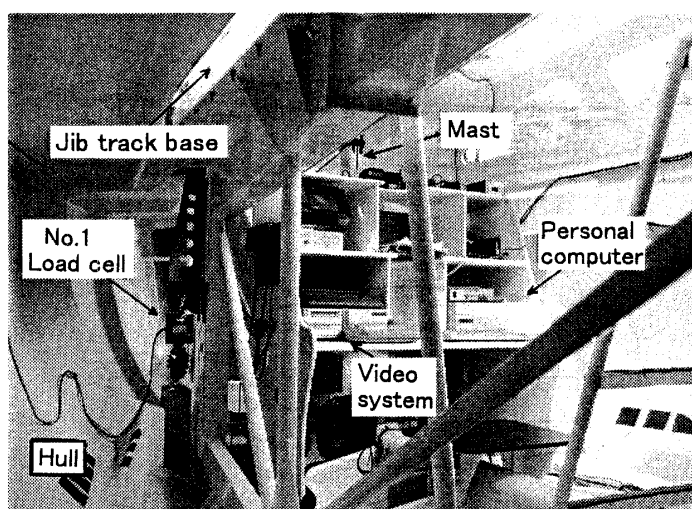


Fig. 3 Schematic representation of frame and rigging showing the six measured forces

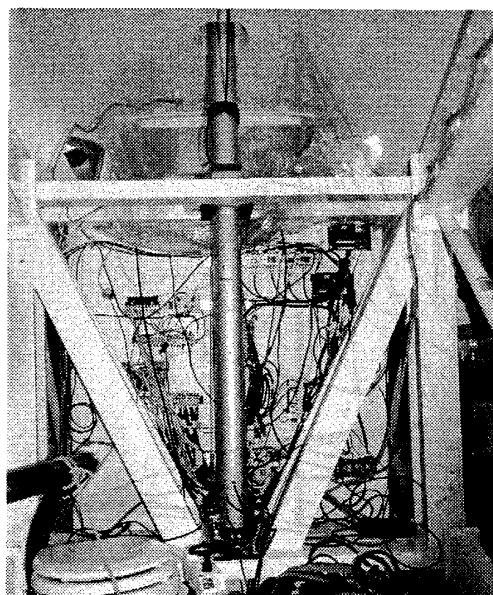
されている。またマストの船体内部分は(b)図に示すようにフレームに直接固定されている。デッキ穴はやわらかいスピネーククロスでカバーし、雨やスプレーの侵入を防ぐとともに、測定値に影響を与えないようにしている。

2.3 計測システム

本艇にはセーリングダイナモメータに加えて他の計測機器が搭載されており、これらの出力はパソコンに取り込まれてA/D変換され、DCS (Data Collection System) プログラ



(a) Looking toward measurement system console from port side aft



(b) Looking toward mast and dynamometer frame from bow

Fig. 4 Photographs of measurement system and dynamometer frame

ムによって海上で計測中にリアルタイムで計算処理されるようになっている。これらの計測機器の配置と、DCSのブロックダイアグラムを各々Figs. 5, 6に示す。計測機器と測定項目は以下の通りである。

- (i) 帆走計器システム (OCKAM-001-CPU 他, Ockam) : 風向風速, 艇速, フォアステー張力等
- (ii) バーチカルジャイロ (TA 31 N 10, 多摩川精機) : ヒール角, トリム角
- (iii) 地磁気方位センサ (MASS-50, トキメック) : 方位角
- (iv) 舵角測定用ポテンショメータ : 舵角

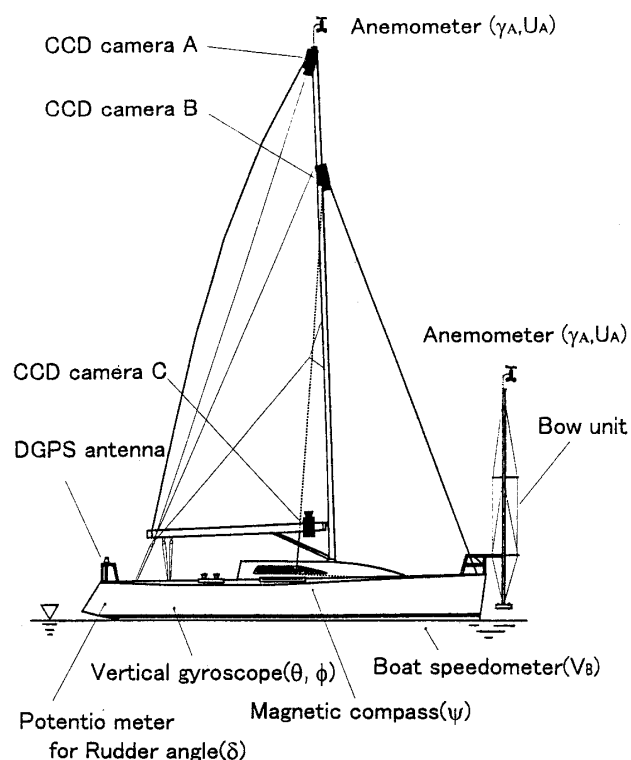


Fig. 5 Arrangement of measurement instruments

- (v) ディファレンシャル型 GPS (MX 9112 および MX 9212, Magnavox) : 艇の航跡

DCSは入力データを10 Hzで処理し、そのままハードディスクに記録するとともに、任意の時間間隔で平均値を求めこれを記録することができる。風向風速計はマストトップに取り付けられているものの他に、船首に設置した「パウユニット」にも取り付けられている。パウユニットはヒールフリーとなっており、船体がヒールしても鉛直を保つことができる。またパウユニット上の風向風速計の高さは、セールの幾何学的な図心（幾何学的風圧中心：GCE）に一致している。風上帆走の場合、数値計算結果よりこの位置でのセールのアップウォッシュ影響はほとんど無視できることがわかっている。従ってパウユニットで測定した風向風速は、セールの存在やヒールの影響を受けていないGCE高さの値を示しているものといえる。風上帆走のデータを係数化するにあたってはこの風速値（相対風速）を用いた。なお上記の風向風速計は市販のセーリングヨット用の装置であるが、あらかじめ風洞実験を行って較正式を求めている。

2.4 較正マトリックス

セールダイナモメータに取り付けられたロードセルより $h_1 \sim h_6$ の計6個の出力が得られる。これを船体固定軸方向の力 X, Y, Z とモーメント K, M, N に換算するため、次のような換算式が必要となる。

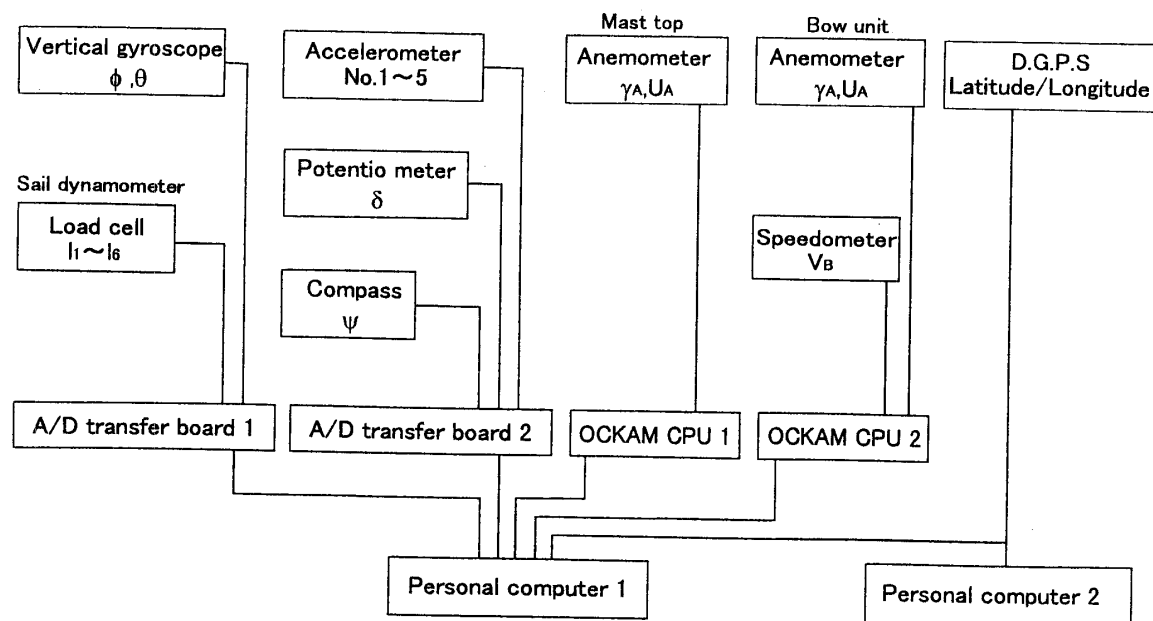


Fig. 6 Block diagram of Data Collection System (DCS)

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ l_5 \\ l_6 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

(1)式の $[a_{ij}]$ が較正マトリックスであるが、これを求めるため較正試験を実施した。「風神」を陸上に水平に設置し、荷重付加台を用いて垂によって負荷をかけた。負荷はダイナモメータとは別のロードセルで直接測定し、2 kNまで付加した。Fig. 7に試験結果の例を示す。この例ではマストの後方3.25 mの位置から y 方向に荷重をかけており、この時の Y 力と K, N モーメントとこれに対する $l_1 \sim l_6$ の出力の関係を示している。このような荷重試験を9種類のパターンについて行い、最小自乗法により較正マトリックスを求めた。

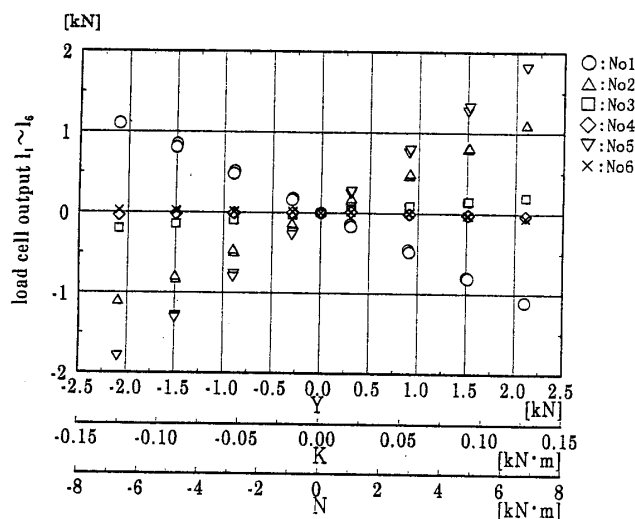
2.5 ダイナモメータフレーム重量修正

ダイナモメータフレームとこれに取り付けられているマストなどの機装品を含めた全重量は約660 kgfとなり、船体のトリム角とヒール角によって重量成分が測定値に含まれてくる。この重量成分の修正値を求めるために陸上で傾斜試験を行った。較正試験と同様に最初水平に設置し、ヒール角で $\pm 20^\circ$ 、トリム角で $\pm 6^\circ$ の範囲で傾斜させて、これらの角度とともにロードセルの出力を測定した。これらの結果よりロードセルの重量修正値を次のように表した。

$$\Delta l_i = k_{i1}\theta + k_{i2}\phi + k_{i3}\theta^2 + k_{i4}\theta\phi^2, \quad (i=1 \sim 5)$$

$$\Delta l_6 = k_{61}\theta + k_{62}\theta\phi + k_{63}\theta^2 + k_{64}\phi^2 \quad (2)$$

帆走試験時はまず、バーチカルジャイロで測定されたヒール角とトリム角を用いて(2)式より重量修正値を求め

Fig. 7 An example of calibration test result (Forces are applied to the y direction 3.25 m aft from the mast.)

る。次いでこれを各ロードセルの測定値から差し引いた上で(1)式に代入し、力とモーメントに変換している。これらの計算結果は、実験時にリアルタイムで船内のパソコンのモニタ上に表示されるようになっている。

3. セーラー形状計測システム

3.1 セーラー形状パラメータ

ヨットのセーラー形状は、高さ方向や幅方向にそのふくらみ方が異なるばかりではなく、セーラー全体で上下方向にねじれており、その全体形状は複雑で表現にくい。しかしながらセーラーの水平断面を考えた場合、その形状は薄翼に近似できる。このため一般に、セーラー形状は水平断面ごと

に翼形状を表すパラメータで表現される。この断面ごとの翼形状を表すパラメータは、弦長 (Chord Length), 最大ドラフト (Maximum Draft), 最大ドラフト位置 (Maximum Draft Position), 入口角 (Entry Angle), 出口角 (Exit Angle), ねじれ角 (Twist Angle) の6つであり、セール形状パラメータと呼ばれる。これらの定義を Fig. 8 に示す。

3.2 計測システム

現在実用的に最もよく用いられているセール形状計測法は、セールを真上または真下から撮影するという2次元の計測法である。本研究では、この方法に基づいた2次元のセール形状計測システムを開発した。なおこの計測法の特長から、本計測システムで対象とするセールは、必然的に風上航セール (メインセールおよびジブ) に限られ、スピネカーやジェネカーなどの風下航セールの形状計測には適用できない。

本研究で開発したセール形状計測システムは、セール撮影用のビデオカメラとビデオデッキ、撮影された画像をコンピュータに取り込む画像処理装置、およびセール形状解析のためのソフトウェア (SSA-2 D) から成る。使用したビデオカメラは25万画素のCCDカメラ (HVM-351, ソニー) であり、Fig. 5 に示す Camera A, B, C の位置の両舷に1台ずつ、計6台設置されている。A のカメラはメインセールを上から撮影するためにマストトップに取り付けられており、マストの両サイドへ約50 cm の位置にある。C のカメラはグースネックの後方へ20 cm, ブームの両サイドへ10 cm のところに設置され、メインセールを下から撮影する。B のカメラはジブを上から撮影するためのもので、I ポイントの両サイド20 cm の位置に設置されている。これらの複数のカメラで同時に撮影された画像は、スイッチャーにより解析に必要な画像を選択してビデオテープに録画される。またこれらに加えて、ハンディのビデオカメラ (TR-900, ソニー) を用いて、デッキ上よりメインセールとジブを適宜撮影した。

画像処理装置は、再生画像の内の解析対象となる1コマを、画像入力ボードを介してコンピュータに取り込み、Windows 上の Bit Map File に変換する。ビデオデータの取り込みにはビデオキャプチャボード (CVI II, カノーブ

ス), およびビデオ画像取り込み用ソフト IMAGEPAQ-98 (同) を使用した。この画像入力ボードは、最大、横640 dot, 縦480 dot でフルカラー (16,000 色) の画像取り込みが可能である。

3.3 セール形状パラメータの算出方法

実験用のセールには幅5 cm の形状計測用ストライプが、セール高さの10, 20, 40, 60, 80 %の位置に描かれている (Fig. 1 参照)。これらのストライプについては、あらかじめ変形前の長さとして弦長が計算される。本研究では解析精度を向上させるため、画像上のセールストライプをスプライン曲線によって近似し、スプラインのパラメータをセール形状パラメータに置き換える方法をとった。具体的には次のようである (Fig. 9 参照)。

- (i) セールストライプの両端を前縁側、後縁側の順に指示する。
- (ii) 次にセールストライプ上の任意の点を指示すると、この3点で定まる両端ベクトルフリー (自然条件) のスプライン曲線が描画される。
- (iii) このスプライン曲線とセールストライプが重なっていない箇所がある場合は、その部分に定義点を追加してスプラインの矯正を行う。
- (iv) スプライン曲線とセールストライプが一致した時点で計算処理を行うと、6つのセール形状パラメータが出力される。

4. 数値計算によるセール性能解析法

4.1 渦格子法

セール性能を数値的に検討するために、流体を非粘性、非圧縮、非回転と仮定し、渦格子法を用いて数値シミュレ

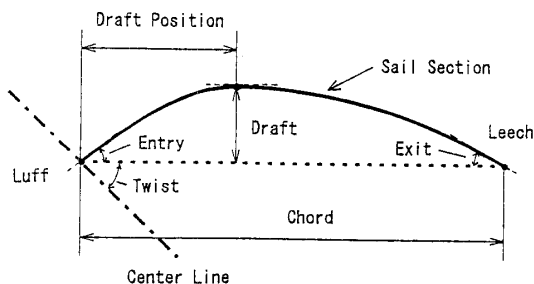


Fig. 8 Definition of sail shape parameters

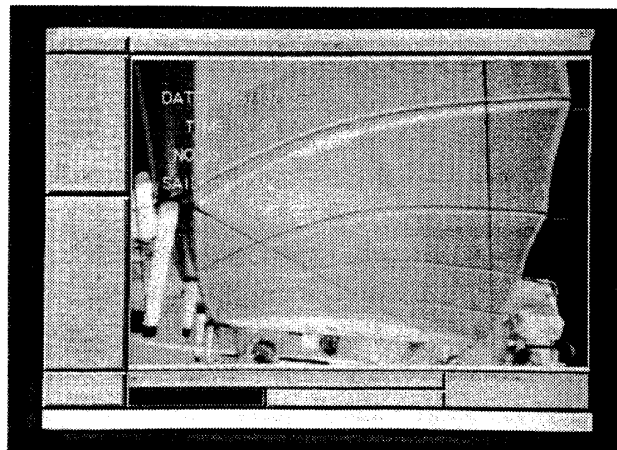


Fig. 9 An example of a processed image of a mainsail using SSA-2 D

ーションを行った。渦格子法は離散化された馬蹄形渦をセーリング表面上に分布させ、セーリング上の標点において境界条件を満たすように渦の強さを決めるものであるが、ここではセーリング表面を4角形パネルに分割し、各パネルのコード長1/4の位置から後方に向かって馬蹄形渦を配置した。セーリング面上と後流の馬蹄形渦によって誘起される速度ベクトルを一般流の速度ベクトルに足し合わせた合成速度ベクトルが、各パネルのコード長3/4の位置の点(標点)でセーリング表面に沿うように各馬蹄形渦の循環を決定した。なお、馬蹄形渦はセーリング表面上から無限遠方まで続くものとし、セーリング後流もこの馬蹄形渦によって表される。後流における馬蹄形渦は、その場その場での流れの方向に沿うものとし、数値計算ではこれを次に述べるような時間増分法(逐次流出型渦格子法)によって求めた。すなわちLagrangeの渦定理とKelvinの循環定理により、セーリング面上の全循環 Γ_B と後流での全循環 Γ_w は、次の関係を満たす必要がある。

$$\Gamma_B + \Gamma_w = 0 \quad (3)$$

$$\frac{D\Gamma_B}{Dt} = 0 \quad (4)$$

ここで、後流渦は時間ステップ Δt の間に渦点での局所流速 $\tilde{U}$ で後方に $\Delta\xi$ だけ移動するものと仮定すると、(3)、(4)式より、セーリング面上の循環の変化に対応して第 k 番目の時間ステップに放出される後流渦の循環は、

$$\begin{aligned} \Delta\Gamma_w^k &= -\frac{1}{\tilde{U}} \int_0^{\Delta\xi} \frac{\partial\Gamma_B}{\partial t} d\xi = -\frac{\Delta\xi}{\tilde{U}\Delta t} (\Gamma_B^k - \Gamma_B^{k-1}) \\ &= \Gamma_B^{k-1} - \Gamma_B^k \end{aligned} \quad (5)$$

と表わすことができる。ここで、各循環の上付きの添え字 $k, k-1$ は数値計算における k および $k-1$ 番目の時間ステップを表す。なお、一旦流出された後流渦は放出されたときの循環の大きさを保ちながら後方に流れていくものとする。

セーリング表面上の馬蹄形渦の循環が定まると、Kutta-Joukowskiの定理より各渦糸に働く力(空気力ベクトル)が求まる。この空気力ベクトルをセーリングに働く揚力、抗力、推力、横力、風圧中心(CE)位置に変換して、以下の実験結果との比較に用いることにする。ここで、揚力とは空気力ベクトルの一般流の直角方向成分であり、抗力は空気力ベクトルの一般流方向成分である。推力は空気力ベクトルの船の長手方向成分であり、横力はそれと直交する空気力ベクトルの船の横方向成分である。また、CEは、空気力ベクトルによって生ずる原点まわりのモーメントを横力で除して求めることとする。以下にこれらのパラメータの定義式を示す。

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (6)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (7)$$

$$C_X = C_L \sin \gamma_A - C_D \cos \gamma_A \quad (8)$$

$$C_Y = -C_L \cos \gamma_A - C_D \sin \gamma_A \quad (9)$$

$$x_{CE} = \frac{N}{Y} \quad (10)$$

$$z_{CE} = \frac{K}{Y} \quad (11)$$

ここで、 S はセーリング面積であり、 γ_A は相対風向である。なお摩擦抗力については、後述の方法により別途考慮した。

4.2 数値計算

数値計算で扱うセーリングはメインセーリングとジブの2枚とし、マストとブームの存在は無視した。それぞれのセーリングのいくつかの断面を6つのセーリング形状パラメータを用いてスプライン曲線で表し、これを高さ方向に補間してセーリング面上の座標点を生成した。なお、実際の計算では、セーリング面を表す馬蹄形渦の数はそれぞれのセーリングで高さ方向に20、コード方向に10とした。このようにして生成された各セーリングにマストのレーキ角と艇のヒール角を考慮することによって定められた座標系でのセーリング形状が表現できる。Fig. 10に、SSA-2Dにより計測されたセーリング形状パラメータから生成されたセーリング形状を、ワイヤフレーム表示したものを示す。

数値計算では相対風向、相対風速、艇速それぞれを入力データとするが、絶対風速のみに鉛直方向の風速変化を考慮することによって風向のねじれを考慮することができる。なお、実際の実船試験において鉛直方向の風速変化を計測したところ、顕著な変化が認められなかったため、ここでは風向のねじれを考慮しないで計算を行っている。

ところで、セーリングヨットのセーリングを考えるとジブはそのフットがほぼデッキに接しており、またメインセーリングもブームに取り付けられているとはいえフットのすぐ下にデッキが存在する。したがって空力的にはこのデッキ面を鏡像面として考えるのが妥当であると思われるが、ヨットは通常ヒールして航行するためデッキ面は常に水平ではな

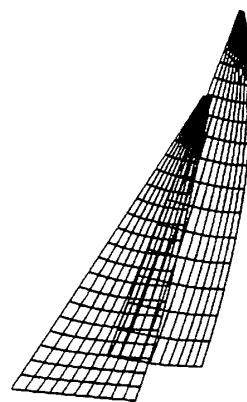


Fig. 10 An example of sail panels for calculation generated from measured sail shape parameters

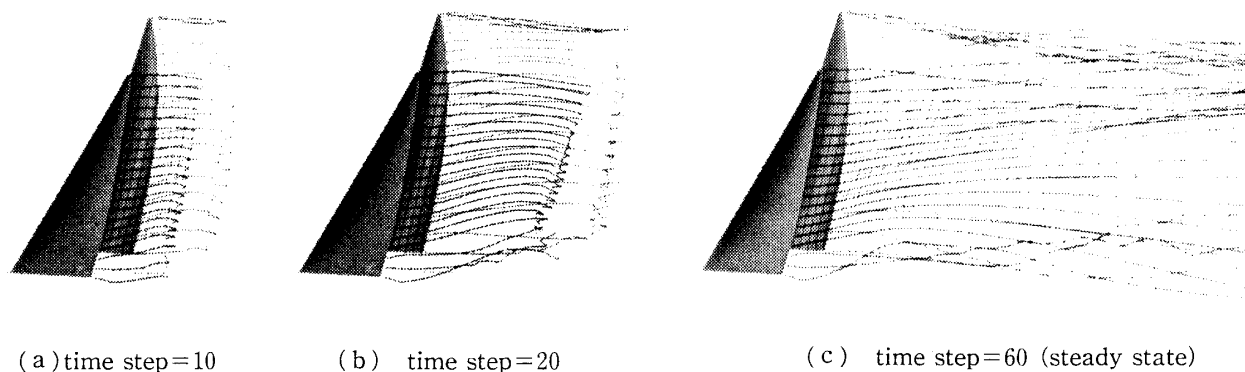


Fig. 11 Calculated stream lines by the vortex lattice method using a step-by-step procedure

く、風によってある傾斜角をもってしまふ。そこで、本研究ではまず、セールの鏡像面として水平な海面、デッキ位置での水平面、ヒールした実際のデッキ面のそれぞれについて実験結果と比較し、検討を行った。この結果、鏡像面としては、空気力を若干過大評価するものの、ヒールしたデッキ面が適当であることが判明したので、以下の計算ではこれを鏡像面として用いた。本計算法のように後流渦を全くのフリーにして数値計算を行うと、鏡像面の取り方によっては渦同士が反発しあい、発散してしまうことがある。本研究では鏡像面をヒールしたデッキ面としたが、この渦同士の反発を避けるため、ジブの後縁下端から放出される渦のみについては循環をゼロとした。これは、デッキ面を鏡像面としているものの、実際にはジブのフットが完全にデッキに接しているわけではなく、若干の隙間が存在するので、この隙間の影響を循環ゼロとして表現したことになる。

Fig. 11 に、時間ステップごとの後流の流線を示す。図の (a), (b), (c) はそれぞれ、10, 20, 60 時間ステップにおける様子である。本研究では 60 時間ステップのものを定常状態として用いている。数値計算においては、時間ステップの取り方によっては、ジブの後流がメインセール面を突き抜けてしまう場合があるが、計算結果を全てこのようなグラフィックス画面でチェックし、問題の無いもののみを採用した。

5. 実験結果と計算結果の比較

5.1 実験手順

海上試験は能登半島の七尾湾北湾において行った。この湾内は潮流の影響が少なく、また風が比較的強く吹いても波高はあまり高くない。風上航（クローズホールド）状態のデータを得るために、相対風向 γ_A が 20° から 40° の範囲において定常帆走試験を行った。これは VPP の精度を向上する上で最も重要な部分であるとともに、セールの剥離影響があまり表れない迎角範囲となるため、実験デー

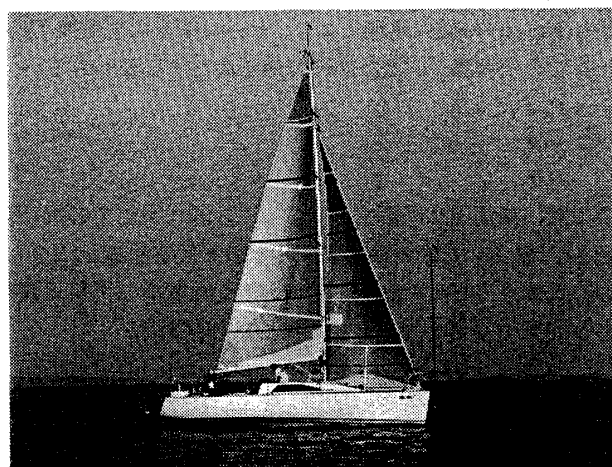


Fig. 12 Photograph of a sea test condition in light wind

タを数値計算のバリデーションに用いる上で有効だからである。実験時の相対風速は 5 m/s から 11 m/s であった。軽風時の実験の様子を Fig. 12 に示す。

データサンプリングは帆走状態が定常になったと判断してから開始した。定常帆走試験では 10 Hz でサンプリングしたデータを 5 秒毎に平均して記録し、これを 90 秒間続けた。またこの間、同時に CCD カメラを用いてセール形状を撮影した。90 秒間の採取データのタイムヒストリーの例を Fig. 13 に示す。90 秒間において相対風速や相対風向がかなり変動した場合には、そのデータは採用しなかった。

5.2 相対風向に対する性能変化

(1) 実験結果

相対風向に対するセール性能変化を Fig. 14(a), (b), (c) に示す。係数などは (6) 式から (11) 式で定義したとおりであるが、ここで S はメインセールとジブの実面積の合計を用いており、 U はバウユニットで測定した相対風速を用いている。またこの結果にはマストやリギン類に作用する空気力が含まれている。なおこれらの結果は (1) 式で得られた船体固定座標系で表記しているので注意を要する。

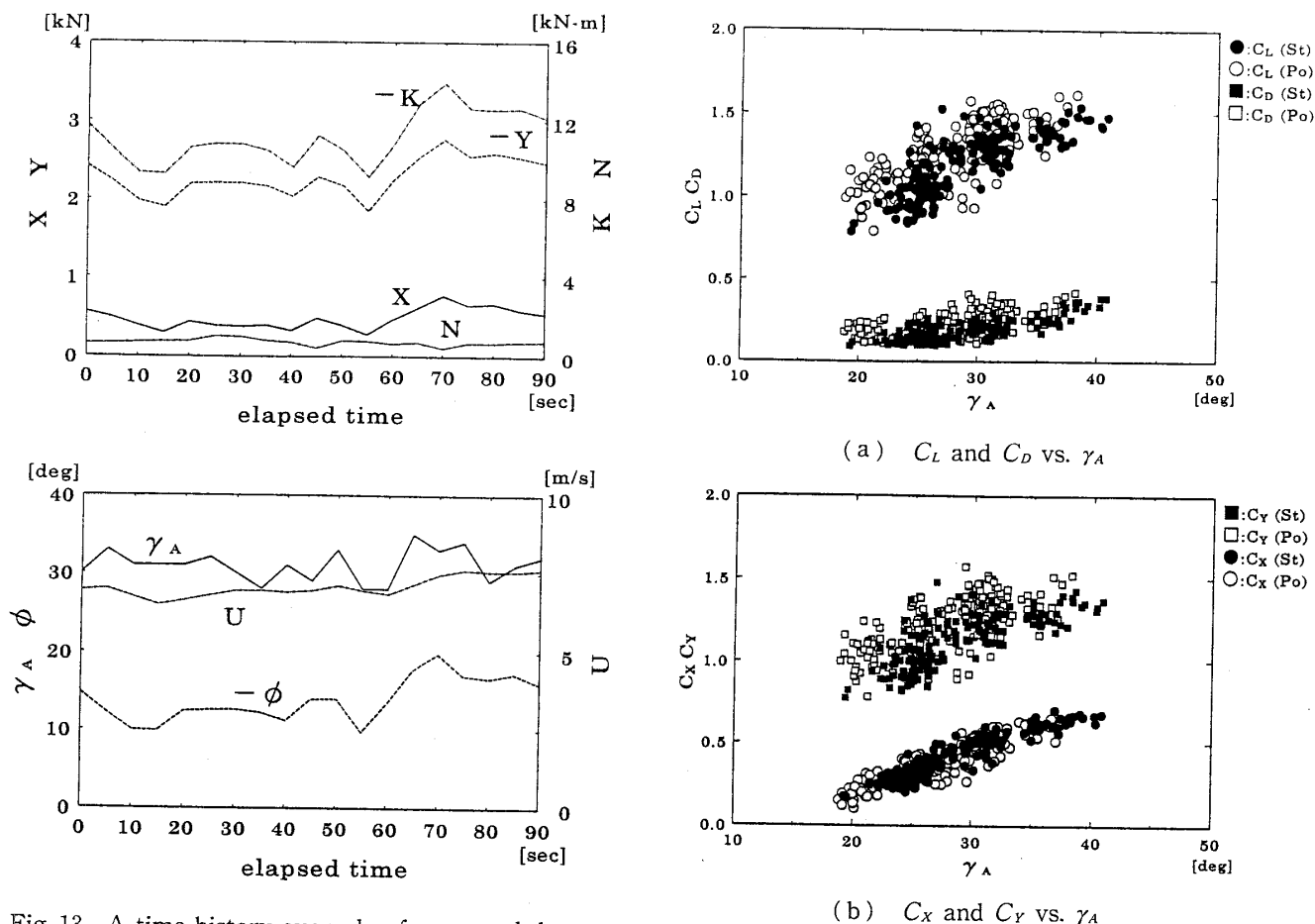


Fig. 13 A time history example of measured data taken during a 90 second interval

本来水面上を航行するセーリングヨットのVPPに適用するためには、局所水平座標系で表した方が便利であるが、局所水平座標系ではヒール角とともに係数値が変化する。ここではヒール角ではなく、セーリング形状と性能との関係を明らかにすることを目的としているので、船体固定座標系で表すことにする。本結果をVPPに適用するには、ヒール角を用いて局所水平座標系へ座標変換すればよい。

Fig. 14(a), (b), (c)にはスターボードタックとポートタックの両方の帆走データを重ねて示してある。両タックのデータを比較するため γ_A , C_L , C_Y の値は絶対値で示しているが、両タック間で多少のずれが見られる。実験に際し、この左右非対称性を取り除こうと努めたが、最終的にこの程度のずれが残った。実際、左右のタックで艇速も多少異なっており、マストを含めたりギンの調整が未だ不十分だったか、船体とフィンキール、ラダー、あるいはダイナモメータフレーム相互の取付等になんらかの非対称性があったのではないかと考えられる。

Fig. 14(a), (b)において、これらの相対風向範囲では C_L , C_D あるいは C_X , C_Y の値が単調に増加していくことが分かる。なおこのデータにはセーリングの設定がベストと考えられるものばかりでなく、ベストの点を探索するために

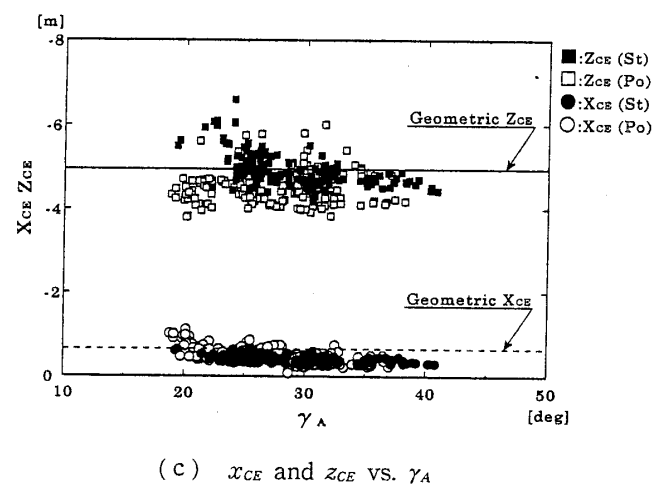


Fig. 14 Variation of sail performance with apparent wind angle (measured)

意識的に設定をずらしたものも含まれている。

Fig. 14(c)において x_{CE} と z_{CE} は、セーリングの風圧中心の x 座標と z 座標 (船体固定軸座標系) を表している。座標系の原点はデッキセンターラインとマスト後面の交点であり、 x_{CE} の負の値は原点より後方を、 z_{CE} の負の値は上方を各々意味している。図中の破線と実線は、幾何学的風圧中心 (GCE) の x 座標と z 座標を各々表している。 x_{CE} は LWL の 3~11% だけマスト後方にあり、相対風向の減少

とともにわずかに後方へ移動することがわかる。 $\gamma_A > 25^\circ$ の範囲では、測定された x_{CE} は GCE よりも前方にあるが、ここで用いられているジブの LPG が 130% のものであることに注意を要する。最大の 150% のジブを用いた場合の x_{CE} は、測定値よりも少し後方になるものと考えられる。

z_{CE} の値は I ポイントの高さの 35~55% という、比較的広い範囲に分散している。このばらつきはメインセールのキャンバーやツイスト調整の違いによって生じたものと考えられる。LPG が 150% のジブを用いた場合の z_{CE} は、測定値よりも少し下方になるものと考えられる。一方、 z_{CE} の値は相対風向の減少にともない、やや上方へ移動することがわかる。相対風向の減少にともなうこのような x_{CE} と z_{CE} の移動は、メインシートやジブシートを引き込んでくることによってセールのツイストが減少し、セールの後方ならびに上方部分に作用する流体力が相対的に増加するためと考えられる。このような傾向は増山らによって行われた風洞実験結果²⁾でも示されている。

(2) 実験結果と計算結果との比較

Fig. 14 に示された実測データの内の典型的なものに対して数値計算を行った。これらのデータを採取した時のセ

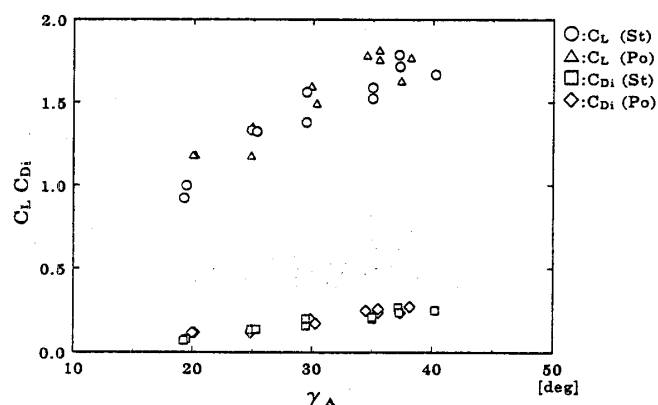
ール形状、ならびに相対風向、相対風速、艇速、ヒール角を入力データとして用いた。渦格子法を用いた数値計算では揚力と誘導抗力しか求められないので、実験結果と比較するために、セールやマストなどのリギン類に作用する粘性抗力成分を別に求めて加えなければならない。風上航の場合、全抗力係数 C_D は次のように表すことができる。

$$C_D = A \times C_L^2 + C_{DP} \quad (12)$$

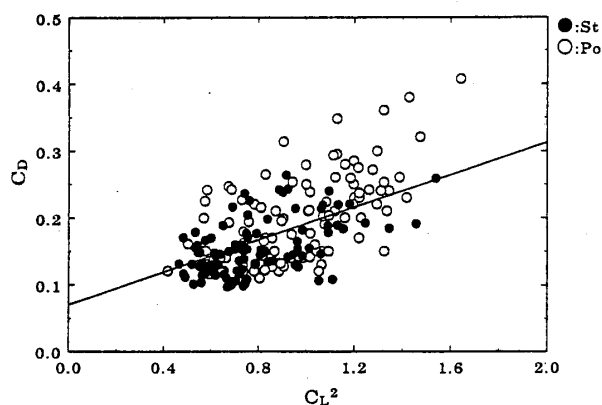
ここで第 1 項目は誘導抗力成分を表し、第 2 項目はセールとリギン類に働く粘性抗力成分を表している。

Fig. 15(a) は実測したセール形状をもとに計算した揚力係数 C_L と誘導抗力係数 C_{Di} を示している。これらの値を用いて Milgram ら⁹⁾ が示した方法をもとに、次の手順で C_D 値を求めることにする：

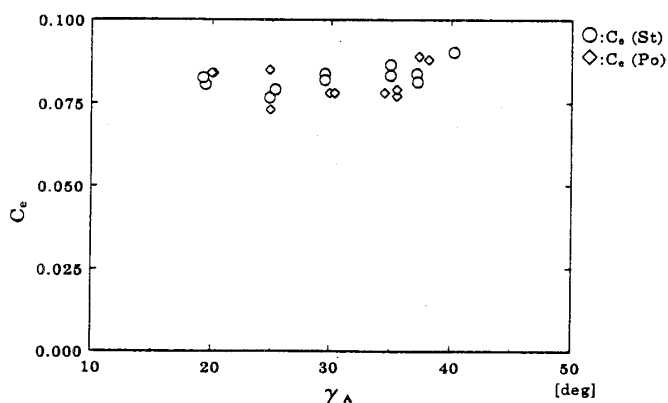
- (i) 計算値より $C_e = C_{Di}/C_L^2$ を求める。
- (ii) γ_A に対して C_e をプロットする (Fig. 15(b) 参照)。
- (iii) 実験値を γ_A の範囲でグループ分けし、各々の結果の C_D 値を C_L^2 値に対してプロットする。Fig. 16(a) と (b) は、各々 γ_A の範囲を 20° から 30° と、 30° から 40° についてグループ分けして示し



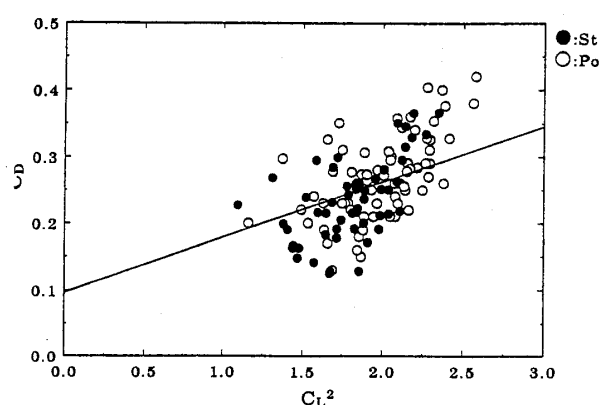
(a) C_L and C_{Di} vs. γ_A



(a) γ_A range: 20 deg. to 30 deg.



(b) $C_e (=C_{Di}/C_L^2)$ vs. γ_A



(b) γ_A range: 30 deg. to 40 deg.

Fig. 15 Variation of sail performance with apparent wind angle (calculated)

Fig. 16 Relation between C_D and C_L^2 for a 10 degree range of apparent wind angle (measured)

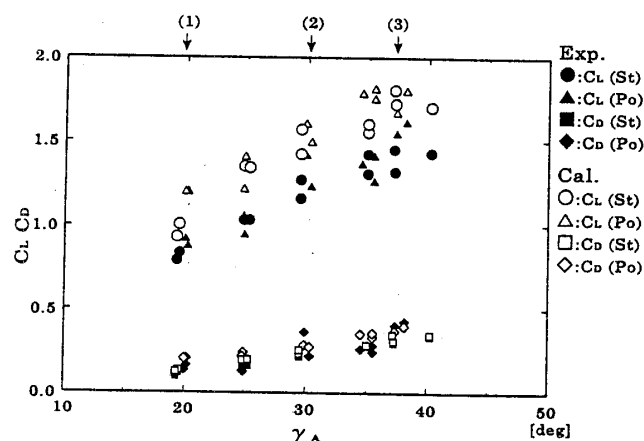
たものである。

- (iv) グループ化した γ_A に対する C_e 値を Fig. 15(b) より求める。これを(12)式の A に代入して、 C_D 値と C_L^2 値に対して最小自乗法を適用し C_{DP} を求める。Fig. 16(a), (b) のデータに最小自乗法を適用した結果を図中の直線で示すが、これによって得られた C_{DP} 値は各々0.070と0.096であった。
- (v) 各々の γ_A の範囲に適用される C_{DP} 値を用いて、 $C_D = C_{Di} + C_{DP}$ より抗力係数 C_D を求める。

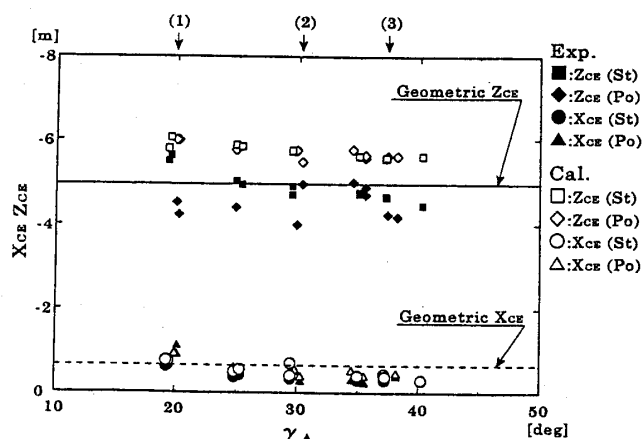
実験値と計算結果の比較を Fig. 17(a), (b), (c) に示す。図中黒点が実験値であり、白ぬき点が計算値である。Fig. 17(d) は実測されたセーラー形状の例である。これは CCD カメラによって記録された画像を SSA-2D を用いて解析した結果であり、メインセーラーとジブの各々の高さの 0, 20, 40, 60, 80 % における断面形状を表している。(d) 図の(1), (2), (3)の番号は(a), (b), (c) 図内の同一番号を付した実験点に対応している。数値計算は全てこ

のように実測したセーラー形状を入力データとして用いている。

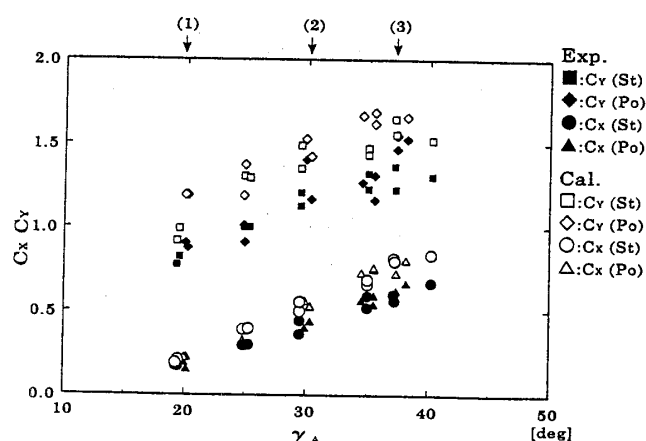
C_D の計算値は上記のように C_{DP} を加えた値であるが、実験値と良く一致していることが分かる。これに対して C_L の計算値は実験値よりやや大きめの値を示している。また z_{CE} の計算値も実験値より高い値を示している。これは数値計算において、 C_L に関してマストの存在と剥離の影響を考慮していないためと考えられる。一般にメインセーラーがジブとオーバーラップしている部分では、マストによって生ずる剥離がおさえられることが知られているが、ジブとオーバーラップしていない上方部分では、実際には剥離影響を受けているものと考えられる。数値計算では剥離を考慮していないため、メインセーラー上部に作用する流体力を過大評価してこのような結果になったものと考えられる。しかしながら計算値は実験値の傾向をよく表している。一方、 x_{CE} の計算値は実験値と良く一致しており、 γ_A の減少とともに後方へ移動する傾向もよく表している。これ



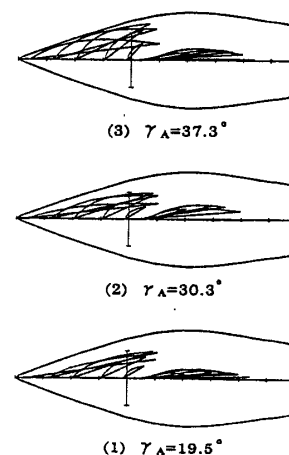
(a) C_L and C_D vs. γ_A



(c) x_{CE} and z_{CE} vs. γ_A



(b) C_x and C_y vs. γ_A



(d) Examples of measured sail geometry

Fig. 17 Comparison of sail performance between experimental results and calculated results (variation with γ_A)

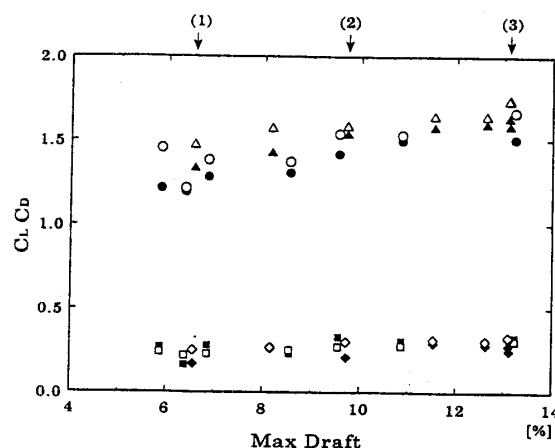
らの結果より、計算結果は実験値と多少のずれはあるものの、セール性能をよく表しているものといえる。

5.3 メインセールキャンバー深さによる性能変化

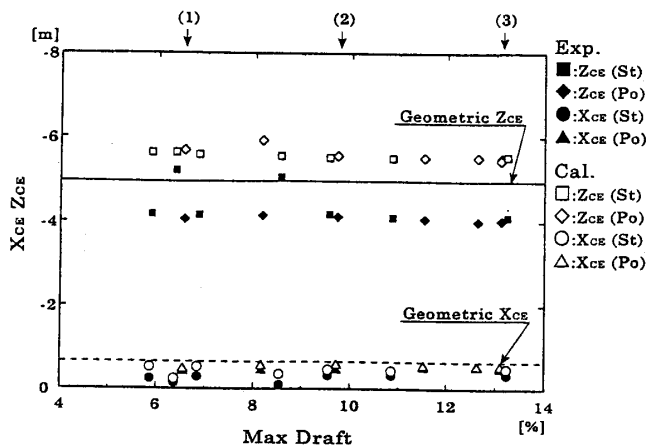
メインセールのキャンバー深さ（ドラフト）は、セール性能をコントロールする上で最もよく用いられるパラメータの1つである。ここではメインセールのドラフト変化による性能の違いを実験的に求めるとともに、このときのセール形状を用いて数値計算を行い実験結果と比較した。ドラフトはバックステイとチェックステイの張力と、メインセールのアウトホールの位置を変えることによって変化させた。メインセールのツイストは、トップバテン位置（高さのほぼ80%位置）のキャンバーラインの後縁が、常にブームと平行になるように調節したので、ほぼ一定と考えてよい。またブームはほぼセンターライン上にある。このときのセール形状の実測値の例を Fig. 18(d) に示す。実験は γ_A を 30° 一定として行い、この間ジブのセール形状は変えなかった。Fig. 18(a), (b), (c) の横軸は最大ドラフト

の平均値であるが、これは高さ方向の20, 40, 60, 80%の4つの断面における最大ドラフトと弦長の比(%)を平均したものである。

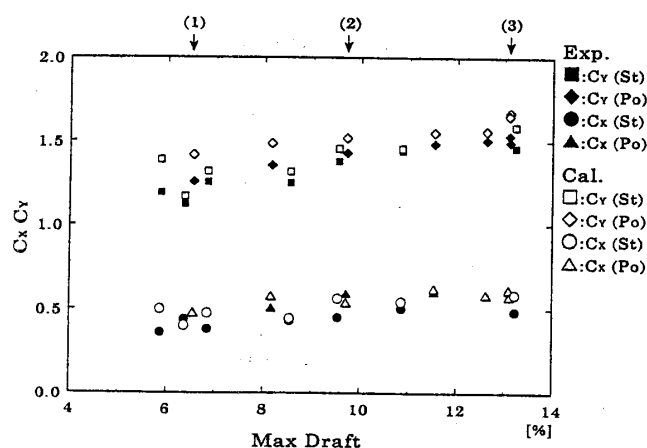
Fig. 18(b) に示した実験値より、6%のドラフト減少によって C_x が約30%, C_y が約20%低下することがわかる。この結果は強風時にセール力を減少させる方法として、これまで定性的に知られていたメインセールのフラットニングの効果を、実船レベルで初めて定量的に示したものである。また C_y の計算値は実験値よりやや大きい値となっているものの、計算結果はこのようなフラットニングの効果を非常によく表していることがわかる。一方、Fig. 18(c) では x_{ce} と z_{ce} の値はドラフトによってほとんど変化せず、計算結果もこの傾向をよく表している。このように本報告で示した数値計算法は、セール形状の微妙な変化に対しても性能の違いを明確に表すことができるので、詳細なセールのトリムコンディションの決定にも有効に用いることができるものと考えられる。



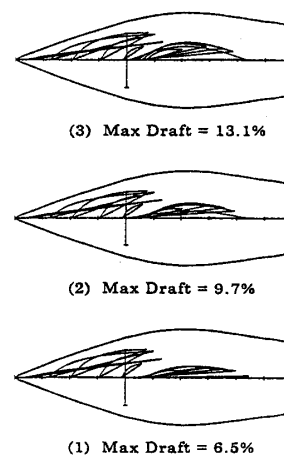
(a) C_L and C_D vs. maximum draft of mainsail



(c) x_{ce} and z_{ce} vs. maximum draft of mainsail



(b) C_x and C_y vs. maximum draft of mainsail



(d) Examples of measured sail geometry

Fig. 18 Comparison of sail performance between experimental results and calculated results (variation with maximum draft of mainsail)

6. 結 言

風上航において、セーリングダイナモメータ実験艇を用いて実船レベルでセーリングに作用する流体力を測定した。またこの時同時に CCD カメラを用いてセーリング形状を測定し、これを入力データとして数値計算を行った。数値計算には逐次流出型渦格子法を適用し、計算結果と実験結果を比較した。

実験結果は、通常の風洞試験では明らかにすることが困難な、相対風向やセーリング形状の微妙な変化に対する性能変化を明確に示すことができた。これらの結果はセーリング性能データの信頼性を高め、セーリングヨットの帆走性能向上に資することができるとともに、IMS 艇の VPP の信頼性の向上に大きく貢献するものと考えられる。

計算値は実験値とある程度のずれはあるものの、相対風向やセーリング形状の違いによる性能変化の傾向をよく表していることがわかった。特にメインセーリングのドラフト変化などの微妙な変化に対しても、性能の違いを明確に表すことができた。以上のような実験結果と計算結果の比較より、本報告で示した数値計算法はラフなセーリングプラン設計のための性能解析にとどまらず、最適のセーリングトリムコンディションの探索にも有効に用いることができるものと考えられる。

謝 辞

本研究は、(財)シップ・アンド・オーシャン財団のもとに組織された Advanced Craft (AC) 技術委員会の研究の一環として行われたものである。このような艇の建造と研究の機会を与えていただいた、(財)日本財団ならびに AC 技術委員会の関係各位に深甚の謝意を表します。実験艇の設計建造にはヤマハ発動機(株)ならびにヤマハ蒲郡製造(株)に尽力いただいた。またセーリングの製作と実験実施には(株)ダイヤモンドセーリング・ジャパン (現(株)ノースダイヤモンドセーリングメーカーズ・ジャパン) より協力いただいた。実験実施にあたっては(株)デックの協力をいただくとともに、DCS の開発には(株)CSK, SSA-2 D の開発には(株)アルモニコスに尽力いただいた。各社の関係各位に深く謝意を表します。

海上試験は金沢工業大学穴水湾自然学苑ヨットハーバーを基地として行ったが、種々の便宜を図っていただいた同施設職員各位に謝意を表します。また平成6年度から8年度の間金沢工業大学機械工学科、機械システム工学科の卒業研究生諸君、ならびに大学院生の上新武志、昆俊雄、長谷川功各君らには、海上試験の実働部隊として活躍いただいた。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Marchaj, C. A.: "Aero-Hydrodynamics of Sailing", Granada, 1979, p. 483
- 2) 増山 豊, 多田納久義: "帆走の船舶流体力学的研究 (第4報) 帆の風洞実験について", 関西造船協会誌, 第185号, (1982), pp. 107-115
- 3) Flay, R. G. J.: "The Design and Performance of a Twisted Flow Wind Tunnel for Testing Yacht Sails", 12th Australasian Fluid Mechanics Conference, (1995)
- 4) 増山 豊: "アメリカス・カップ艇の技術開発", 日本造船学会誌, 第710号, (1988), pp. 473-486
- 5) 増山 豊, 中村一郎, 多田納久義, 高木 健, 宮川尚之: "外洋セーリングヨットの実船性能 (第1報)", 日本造船学会論文集, 第172号, (1992), pp. 349-364
- 6) Masuyama, Y., Nakamura, I., Tatano, H. and Takagi, K.: "Dynamic Performance of Sailing Cruiser by Full-Scale Sea tests", 11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, SNAME, (1993), pp. 161-179
- 7) 増山 豊, 中村一郎, 多田納久義, 坂口一夫, 兼清忠: "外洋セーリングヨットの実船性能 (第2報)", 日本造船学会論文集, 第174号, (1993), pp. 377-388
- 8) Masuyama, Y., Fukasawa, T. and Sasagawa, H.: "Tacking Simulation of Sailing Yachts — Numerical Integration of Equations of Motion and Application of Neural Network Technique —", 12th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, SNAME, (1995), pp. 117-131
- 9) Milgram, J. H., Peters, D. B. and Eckhouse, D. N.: "Modeling IACC Sail Forces by Combining Measurements with CFD", 11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, SNAME, (1993), pp. 65-73
- 10) Milgram, J. H.: "The Analytical Design of Yacht Sails", Trans. SNAME, Vol. 76 (1968), pp. 118-160
- 11) 橋本 淳, 内田 誠: "揚力面渦格子法によるスループリグセーリングの特性予測", 日本航海学会論文集, Vol. 75 (1986), pp. 95-103
- 12) 江口辰哉: "帆走性能の推定法について", 西部造船会会報, Vol. 88 (1994), pp. 39-56
- 13) Fukasawa, T.: "Aeroelastic Transient Response of 3-Dimensional Flexible Sail", Aero-Hydroelasticity, ICAHE '93, (1993), pp. 57-62
- 14) Fukasawa, T. and Katori, M.: "Numerical Approach to Aeroelastic Responses of Three-Dimensional Flexible Sails", 11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, SNAME, (1993), pp. 87-105
- 15) "International America's Cup Class (IACC) Rule", Ver. 3. 0, Challenger of Record and Defender for America's Cup, 1996
- 16) AC 技術委員会: "平成7年度小型高速艇等に係る性能向上の調査報告書", シップ・アンド・オーシャン財団, 1996
- 17) "International Measurement System (IMS)", Offshore Racing Council, 1996