

## Excel を用いた定常帆走性能の推定計算 (V P P)

金沢工業大学 増山 豊

### 1 はじめに

定常帆走性能を求めることは、船体とセールに作用する力とモーメントが釣り合う点を求めることに帰着する。一般にセーリングヨットの釣合い式は、サージ (x 軸方向)、スウェイ (y 方向)、ロール (x 軸まわり)、ヨー (z 軸まわり) の 4 自由度について立てることができる。これらの釣合い式は、艇速や横流れ角、風向風速などの変数に対して非線形になるので、解法にはニュートン・ラプソン法などが用いられる。このような釣合い方程式を解くプログラムを Velocity Prediction Program (VPP) と呼んでいる。ここでは、Microsoft Excel に組み込まれているソルバー 機能を用いることによって、プログラミングなしで釣合い方程式を解く方法について述べる。なお、VBA を用いて自動計算を行う方法についても述べる。

### 2 解析対象艇

解析の対象とする実船は、筆者が基本設計した KIT-34 級艇 “FAIR V” で、全長 10.6m、排水量 3.4ton の外洋セーリングヨットである。諸元を Table1 に、帆装図を Fig.1、船体船図を Fig.2、排水量等曲線図を Fig.3 に示す。また実船と、水槽試験に用いた 1/4.275 と 1/8 模型を Fig.4 に示す。[1,2]

### 3 定常帆走性能の推定式

船体に作用する流体力係数を  $X'$ ,  $Y'$ ,  $K'$ ,  $N'$ 、セールに作用する流体力係数を  $X_s'$ ,  $Y_s'$ ,  $K_s'$ ,  $N_s'$  とすると、釣合い状態を求めるための 4 元連立方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2} X' \rho_s V_B^2 L D + \frac{1}{2} X_s' \rho_A U_A^2 S_A &= 0 \\
 \frac{1}{2} Y' \rho_s V_B^2 L D + \frac{1}{2} Y_s' \rho_A U_A^2 S_A &= 0 \\
 \frac{1}{2} K' \rho_s V_B^2 L D^2 + \frac{1}{2} K_s' \rho_A U_A^2 S_A^{3/2} - \Delta \overline{GM} \sin \phi &= 0 \\
 \frac{1}{2} N' \rho_s V_B^2 L^2 D + \frac{1}{2} N_s' \rho_A U_A^2 S_A^{3/2} &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

但し、 $\rho_s$  : 水密度  $\rho_A$  : 空気密度  $V_B$  : 艇速  $U_A$  : 相対風速  $L$  : 喫水線長さ  
 $D$  : 喫水深さ(フィンキール下端)  $S_A$  : セール面積  $\Delta$  : 排水量  $GM$  : メタセンタ高さ

真風速を  $U_T$  真風向を  $\gamma_T$  とすると、相対風速  $U_A$  と相対風向  $\gamma_A$  は Fig.5 に示す風速三角形から次のように求まる。

$$\begin{aligned} U_A &= \sqrt{U_T^2 + V_B^2 + 2U_T V_B \cos(\gamma_T + \beta)} \\ \gamma_A &= \sin^{-1}\{U_T \sin(\gamma_T + \beta) / U_A\} - \beta \end{aligned} \quad (2)$$

これらは  $U_T$  と  $\gamma_T$  を与えれば、他の変数から求めることができる。以上より(1)式は、艇速  $V_B$ 、リーウエイ角  $\beta$ 、ヒール角  $\phi$ 、舵角  $\delta$  の4つを未知数とする4元連立方程式となる。これを解くことによって、ある真風速  $U_T$ 、真風向  $\gamma_T$  に対して帆走状態が1つに定まることになる。

## 4 船体に作用する流体力

### 4-1 直立直進時の船体抵抗

供試船の 1/4.275 と、1/8 模型を用いて曳航水槽試験を行い、実船の船体抵抗を推定した値と、実船を海上で曳航して実測した値との比較を Fig.6 に示す。ここではフィンキールとラダーを除く、カヌーボディの値を次式によって無次元化して示している。

$$C_{TC} = R_{TC} / \left\{ (1/2) \rho_s V_B^2 S \right\} \quad (3)$$

ここで  $S$  はカヌーボディのぬれ面積である。

なお Excel を用いる本解析では実船の曳航試験結果を直接用いることにし、Excel での計算を行いやすいように多項式近似で表すことにする。Fig.13 に曳航試験結果と近似式の関係を示す。

### 4-2 横流れと横傾斜による船体性能変化

#### (1) 定式化

セーリングヨットが横傾斜しながら横流れする時に、船体に作用する流体力の係数を次のような多項式で表すことにする。ここで横流れ(リーウエイ)の影響は、横流れ速度  $V$  で表している。 $U$  を  $x$  軸方向速度とすると、 $V$  とリーウエイ角  $\beta$  の間には、 $-V/U = \tan \beta$  の関係がある。またここでは  $V = V/V_B$  として無次元化している。

$$\begin{aligned} X'_H &= X'_{VV} V'^2 + X'_{V\phi} V' \phi + X'_{\phi\phi} \phi^2 + X'_{VVV} V'^4 \\ Y'_H &= Y'_V V' + Y'_\phi \phi + Y'_{VV} V'^3 + Y'_{VV\phi} V'^2 \phi + Y'_{V\phi\phi} V' \phi^2 + Y'_{\phi\phi\phi} \phi^3 \\ K'_H &= K'_V V' + K'_\phi \phi + K'_{VV} V'^3 + K'_{VV\phi} V'^2 \phi + K'_{V\phi\phi} V' \phi^2 + K'_{\phi\phi\phi} \phi^3 \\ N'_H &= N'_V V' + N'_\phi \phi + N'_{VV} V'^3 + N'_{VV\phi} V'^2 \phi + N'_{V\phi\phi} V' \phi^2 + N'_{\phi\phi\phi} \phi^3 \end{aligned} \quad (4)$$

また舵による流体力変化は次のように表す。

$$\begin{aligned} X'_R &= C_{X\delta} \sin \alpha_R \sin \delta \\ Y'_R &= C_{Y\delta} \sin \alpha_R \cos \delta \cos \phi \\ K'_R &= C_{K\delta} \sin \alpha_R \cos \delta \\ N'_R &= C_{N\delta} \sin \alpha_R \cos \delta \cos \phi \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $C_{X\delta} \sim C_{N\delta}$ は舵角試験によって決定される係数である。また有効舵角 $\alpha_R$ は、舵への流入角減少率を $\gamma_R$ とすると次のように表される。

$$\alpha_R = \delta - \gamma_R \beta \quad (6)$$

流入角減少率は、それぞれのリーウエイ角 $\beta$ において舵直圧力が0になる舵角 $\delta_0$ を求め、これより $\delta_0 = \gamma_R \beta$ として求めた。流入角減少率 $\gamma_R$ の測定結果をFig.7に示す。

## (2) 実験結果と微係数

舵に作用する流体力は、あるリーウエイ角 $\beta$ に設定して舵角を種々変化させて得られた模型全体の力から、舵角を $\delta_0$ にした時の全体の力を差し引いて求めた。これらの無次元値を $X'_R \sim N'_R$ とし、(5)式に代入して重回帰分析し、舵の流体力係数 $C_{X\delta} \sim C_{N\delta}$ を求めた。実験結果をFig.8に、流体力係数をTable 2に示す。

舵以外の船体に作用する流体力は、舵角を $0^\circ$ に設定して行った斜航試験の値から、(5)式において $\delta = 0^\circ$ として得られる舵の流体力を差し引いて求めた。これらを $V$ と $\phi$ の関数として(4)式のように表し、流体力微係数を重回帰分析して求めた。なお、X力については、直立直進時の抵抗値を $X_0$ としてあらかじめ差し引いている。これらの実験結果をFig.9に、流体力微係数をTable 2に示す。

## 5 セールに作用する流体力

セールに作用する流体力は供試船のセールデータを用いるべきであるが実施していないので、ここでは筆者らが先に行ったFlying Fifteen級のセール風洞試験結果[3]を用いることにする。Flying Fifteen級のセールは、メインセールのアスペクト比が供試船のものよりやや小さいなどの差異はあるものの、全体的な形状はほぼ同じである。

しかしながら上記の風洞試験ではヒール時の実験を行っていない。また一般に公表されているものでも、ヒールによるセールの性能変化について述べているものはほとんど見られない。このため、ここでは次のようにヒール時のセール性能を推定することにする。

まずヒール角が大きいのは向い風から横風にかけての場合であり、この領域ではセールは失速していないものと考えられる。この場合ヒールによる影響は、有効迎え角の減少と、セール弦長に沿った速度成分の減少として表れるが、後者は相対的に小さいので省略することにする。有効迎え角の減少は $\gamma_A \cos \phi$ で表されるので、揚力係数 $L'_s$ は $\cos \phi$ に比例し、 $D'_s$ は $(\cos \phi)^2$ に比例して減少するものといえる。ここでヒール時の水平面内の流体力係数 $X'_s, Y'_s$ を $L'_s$ と $D'_s$ で表すと次のようになる。

$$\begin{aligned} X'_s &= L'_s \cos \phi \sin \gamma_A - D'_s \cos \gamma_A \\ Y'_s &= -L'_s \cos \phi \cos \gamma_A - D'_s \sin \gamma_A \end{aligned}$$

よって直立時の係数 $L'_{s0}$ と $D'_{s0}$ でヒール時の $X'_s, Y'_s$ を表すと次のようになる。

$$\begin{aligned}
X_S' &= L_{S0}' \cos^2 \phi \sin \gamma_A - D_{S0}' \cos^2 \phi \cos \gamma_A \\
&= X_{S0}' \cos^2 \phi \\
Y_S' &= -L_{S0}' \cos^2 \phi \cos \gamma_A - D_{S0}' \cos^2 \phi \sin \gamma_A \\
&= Y_{S0}' \cos^2 \phi \\
K_S' &= Y_S' z_{CE}' / \cos \phi = K_{S0}' \cos \phi \\
N_S' &= (N_{S0}' + X_{S0}' z_{CE}' \sin \phi) \cos^2 \phi
\end{aligned} \tag{7}$$

ここで、セール流体力の着点のz座標を  $z_{CE}$  とすると、 $z_{CE}' = z_{CE} / \sqrt{S_A}$  である。また、 $N_S'$  を求める式の括弧内の第 2 項目は、ヒールによってセールの着点が横へ振り出されることによるヨーモーメントを表している。

このように考えて F. F. 級のセール風洞試験結果をもとに算定したセール流体力係数を Fig.10 に示す。ここでセールは右舷側から風を受けているものとして符合を決めており、ヒールモーメント係数  $K_S'$  は船体重心回り、ヨーモーメント係数  $N_S'$  はミジップ回りの値で示している。

Excel を用いる本解析では、ヒールしていない時の風洞試験結果を Fig.14 に示すような多項式近似で表し、(7) 式でヒールの影響を考慮することにする。なお、風洞試験結果は  $\gamma_A = 100^\circ$  前後で、メインセール+ジブの場合とメインセール+スピネカーの場合に切り替えているが、ここではこれらをまとめて 1 本の曲線で表すことにする。

## 6 Excel ソルバー を用いた釣合い方程式の解法

Excel ソルバー は Microsoft Excel に標準装備されている解法ツールである。ただし、標準のインストールを行った場合は、この機能は使えるようになっていないようなので、以下の手順で確認して Excel の説明書に従って使える状態にしてもらいたい。

**確認方法：** Excel の表を開いた状態で、「ツール」をクリックし、プルダウンメニューの中に「ソルバー」があれば使用可能。「ソルバー」が表示されない時は、「ツール」→「アドイン」とクリックすると、「アドイン」ウインドウが開く。この中に「ソルバーアドイン」の項目があれば、先頭のチェックボックスにチェックを入れて「OK」をクリックすれば使用可能になる。「ソルバーアドイン」の項目がない場合はインストールされていないので、Microsoft Office の CD から次の要領でアドインファイルを追加する。コントロールパネル→プログラムの追加と削除→ Microsoft Office 200～→ 変更→ メンテナンスモード→ 機能の追加/削除→ Microsoft Excel for Windows→ アドイン→ ソルバー→ マイコンピュータから実行→ 完了

ソルバーには、ある条件を満足する解（未知数）を自動的に求める機能があるので、この例のような非線形の連立方程式を解くこともできる。未知数は複数個（説明書によれば 100 個まで）あってもよい。本例での未知数は上述のように、艇速  $V_B$ （ここでは x 軸方向速度  $u$  とする）、リーウエイ角  $\beta$ 、ヒール角  $\phi$ 、舵角  $\delta$  の 4 つである。

Fig.15 に V P P 計算に用いる Excel シートを示す。なおこのシートには、次章に示す V B A マクロが組み込まれているので、ファイルを開こうとすると「マクロにはウイルスが～」という警告が出るが、問題ないので「マクロを有効にする」をクリックしてほしい。

以下、図中の番号と対応させながら説明する。

- ① 真風速、真風向の入力。
- ② 4つの未知数： $u$  ( $x$ 方向速度)、 $\beta$  (横流れ角)、 $\delta$  (舵角)、 $\phi$  (ヒール角)、の入力。  
最初は、予測値に近いと思われる値を初期値として入力する。
- ③ 水密度、空気密度、船体諸元、セール面積などの入力。
- ④ 船体の流体力微係数の入力。(Table 2の数値)

—————以上 入力、 以下 出力—————

- ⑤ 船体直立抵抗計算結果。(Fig.13より)
- ⑥ 船体流体力係数。( (4) 式と④の入力値より)
- ⑦ 船体に作用する流体力。
- ⑧ ラダーに作用する流体力。( (5)、(6) 式と④の入力値より)
- ⑨ 相対風速、相対風向の計算結果。( (2) 式より)
- ⑩ セール流体力係数。(Fig.14より)
- ⑪ セールに作用する流体力
- ⑫ 船体復原モーメント
- ⑬ 船体とセールに働く  $X$ 、 $Y$  力と、 $K$ 、 $N$  モーメントの合計値。( (1) 式より)  
これらをそれぞれ、 $\Sigma X$ 、 $\Sigma Y$ 、 $\Sigma K$ 、 $\Sigma N$  とする。
- ⑭ 上記の合計残差を次式で求め、この値が許容値以下になるように②の未知数を変化させる。

$$\text{残差} = \sqrt{(\Sigma X)^2 + (\Sigma Y)^2 + (\Sigma K)^2 + (\Sigma N)^2}$$

以上の計算式は、全てそれぞれのセルの中に組み込まれているので、確認頂きたい。②の初期値の目安はほぼ次のとおりである。ここで右舷側から風を受けた状態(スターボードタック)を考えているので、通常 $\beta$ は正の値、 $\delta$ と $\phi$ は負の値となる。(Fig.5の座標系の定義参照)

$$u=4\text{m/s}, \quad \beta=5^\circ, \quad \delta=-10^\circ, \quad \phi=-30^\circ$$

最初、②にこれらの初期値を入力すると、当然まだ解が求まっている訳ではないので、⑭の合計残差は大きな値になる。ここでソルバー機能を用いて②の値を変化させて残差を0に近づければ解が求まったことになる。具体的には次のようである。

- (1) 「ツール」→「ソルバー」→「パラメータ設定」ウインドウ (Fig.17) の表示。  
「パラメータ設定」ウインドウにおいて以下、
- (2) 目的セル：⑭の合計残差の入ったセル番号にする。
- (3) 目標値：「最小値」または「値」を選ぶ。「値」を選んだ場合は、許容値を入力する。
- (4) 変化させるセル：②の未知数の入ったセルを範囲で指定する。
- (5) 制約条件：未知数のとり得る範囲などをここで制限しておく。これによって計算の無駄を省く。特に多項式近似をしている変数は、適用範囲を越えると予想外の動きをするので、適用範囲を越えないように制限を加える必要がある。
- (6) 以上の設定が終わったら、「実行」ボタンを押す。
- (7) 「探索結果」ウインドウ (Fig.18) が表示されるので、以下、

- (8) 「最適解が見つかりました。制約条件はすべて満たされました。」という表示が出て、⑭の残差の値が許容値以下になっていれば解が得られたものと判断できる。
- (9) 「仮の解が見つかりません」という表示が出て、⑭の残差の値が許容値以上であれば、探索に失敗したものと見なし、初期値を変えて再度求めてみる。この時、変数の値が制約条件の限界値までいっている場合は、その条件（例えばその真風速）では解が得られないことを意味しているものと考えられる。
- なお目標値で「値」を選んだ場合は、許容値を小さくし過ぎると残差の値が十分小さくても「仮の解が見つかりません」と表示されるので、残差の値を見て判断すること。
- (10) この時の②の4つの値が、この真風速、真風向における解であり、 $x$ 方向速度  $u$ 、リーウエイ角  $\beta$ 、ヒール角  $\phi$ 、舵角  $\delta$  を表している。
- (11) 以上が1つの真風速、真風向における定常帆走状態を求める手順である。全風向に対する帆走性能を求めるには、ここで得られた②の値を記録した上で、真風向を変えて同じ手順を繰り返せばよい。

## 7 Excel VBA を用いた自動計算

6章のソルバー機能を用いた計算を、これも Excel に標準装備されている VBA (Visual Basic for Applications) を用いて、自動的に連続して行う方法を示す。Fig.15 の **C**部分と **E**~**G**部分 は VBA によって計算された結果を表示するシート部分である。この自動計算では 6章では用いなかった Fig.15 中の、「計算条件」**A**、**B**を用いる。**A**では、真風向を指定する条件（計算開始、終了、変更間隔の角度）と、②の4つの未知数に対応する初期値を与えている。**B**の「VPP 実行」ボタンを押すことによって計算がスタートする。1つの風向の計算が終ると「探索結果」ウインドウが開くので、「OK」ボタンを押すと風向を変えて計算を続行する。なお **A**で指定した真風向の風向変化が全部終了するまで、途中でやめることはできない。初期値が適切でない場合や解が得られない場合は、Fig.15 の **D**の「残差」の値が大きくなるので、**A**の初期値を変えて再度求めてみる必要がある。（なお、一部の真風向の場合に解が得られない時は、その真風向だけについて 6章の手順でソルバーを実行すると、うまくいく場合がある。）

この自動計算は、このシートに含まれているプログラム (Fig.19) によって行っている。プログラムは次の手順で表示させることができる。

- (1) Fig.15 を表示させる。
- (2) 「ツール」→「マクロ」→「マクロ」→「マクロ」ウインドウの表示。
- (3) 「マクロ」ウインドウの中に「プログラム FAIRVPP」が表示され、すでに選択されているので、「編集」ボタンを押すと、「コードウインドウ」と呼ばれる画面が現れ、プログラムが書き込まれている。
- (4) なお、プログラムの実行は「マクロ」ウインドウの中の、「実行」ボタンを押すことによってもできる。

以下、プログラム中の番号と対応させながら説明する。

- ① 初期値を **A**から読み込む。（なお、ここで読み込んだ値を1回目の初期値とするが、これ

らのセルの値は変更しないので、**A**の値は変化しない。また、実行開始後の2回目以降の初期値は、前回の収束結果を初期値として用いている。)

- ② 真風向の計算範囲と真風速を読み込む。
- ③ ソルバー機能実行のコマンド
- ④ 結果一覧表 **C**への出力。
- ⑤ ポーラーダイアグラム表示用の表 **E**への出力

ここで、真風速は Fig.15 の①の値を用いている。またこのプログラムは、自動的に風向を変えて記録することのみを行っており、実質的な計算はそれぞれのセルの中で行っている。すなわち、Fig.15 をそのまま用いている訳である。なお、③のソルバー機能が VBA プログラムで作動しない場合は、次の手順で VBA で有効な状態にする必要がある。

- (1) 上記 (3) の「コードウインドウ」を開き、プログラムが表示された状態にする。
- (2) このウインドウの「ツールバー」の「ツール」→「参照設定」を押す。  
(Excel シートの「ツール」ではないので注意)
- (3) 「参照設定」ウインドウが開くので、その中の「ソルバー」にチェックがついていなければ、チェックをつけて「OK」ボタンを押す。もし、「ソルバー」の項がなければ、一度、Fig.15 の状態で「ソルバー」を実行する。

以上で、Excel VBA を用いた自動計算が可能になるはずである。なお、ポーラーダイアグラム **F**はExcelのレーダーチャートグラフを流用しているので、ここでは  $10^\circ$  毎 ( $360^\circ$  表示のためにデータが 36 個必要) しか表示できない。それ以外の風向間隔で計算した場合は正しく表示されないので注意されたい。 ( $5^\circ$  毎表示の場合は、ダミーでもいいから 72 個必要。) また同じ理由で、ポーラーダイアグラム **F**にはリーウエイ角は含まれていないので注意を要する。なお、**G**のグラフの横軸 ( $=\gamma_T + \beta$ ) には、リーウエイ角を含めている。

## 8 VPP結果と実測値との比較

“FAIR V”を建造した直後の1990年～1992年に海上帆走実験を行った。VPPの結果と、海上実験によって得られた実測値との比較をFig.11、12 [文献(1)]に示す。Fig.11は、真風向に対する進行方向と艇速の関係を表したポーラーダイアグラムである。またFig.12は、進行方向 ( $=\gamma_T + \beta$ ) と艇速、リーウエイ角、ヒール角、舵角の関係を表している。なお、“FAIR V”は1999年にフィンキールの改造を行い、2005年に再実験を行った。ここに示したVPPのデータは改造後のものであり、実測値との比較をFig.16のポーラーダイアグラムに示す。

## 参考文献

- (1) Y. Masuyama, I. Nakamura, H. Tatano, K. Takagi : "Dynamic Performance of Sailing Cruiser by Full-Scale Sea tests", 11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, SNAME, pp.161-179, (1993).
- (2) Y. Masuyama, T. Fukasawa, H. Sasagawa : "Tacking Simulation of Sailing Yachts, Numerical Integration of Equations of Motion and Application of Neural Network Technique", 12th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, SNAME, pp.117-131, (1995).
- (3) 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.

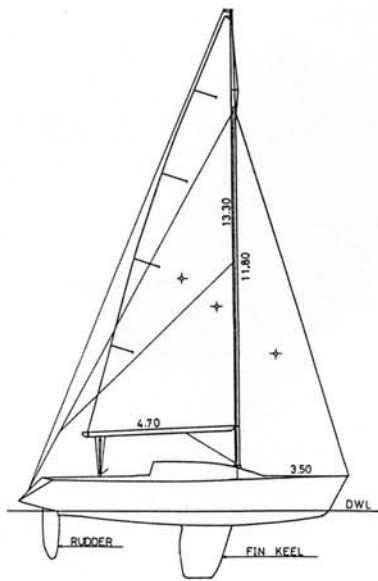


Fig. 1 Sail plan of KIT34

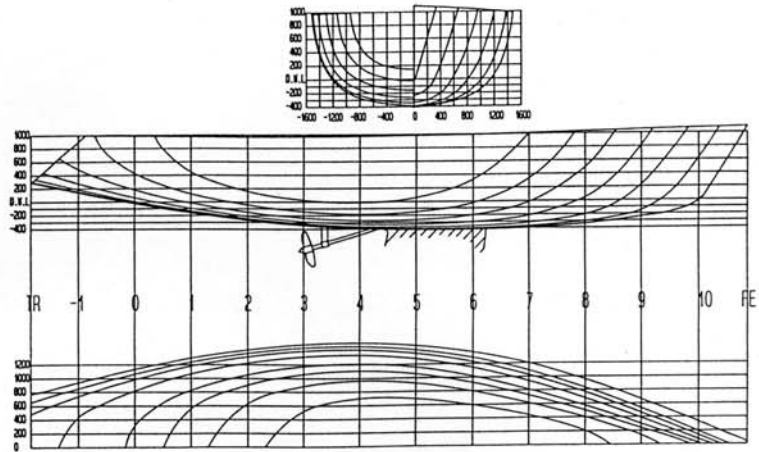


Fig. 2 Lines of KIT34

Table 1 Principal dimensions of KIT34

DIMENSIONS		
(1) HULL		
LOA	(m)	10.68
LWL	(m)	8.55
BMAX	(m)	3.04
BWL	(m)	2.42
Draft (Canoe body)	(m)	0.41
Draft (Fin keel)	(m)	1.94
Displacement (DWL)	(ton)	3.46
Displacement (*)	(ton)	3.78
Wetted Surface Area	(m <sup>2</sup> )	16.60
GM	(m)	1.307
C <sub>v</sub>		0.398
C <sub>s</sub>		0.563
Ballast/Displacement Ratio		0.488
(2) SAIL		
I	(m)	11.80
J	(m)	3.50
P	(m)	13.30
E	(m)	4.70
Area (Mains'l)	(m <sup>2</sup> )	35.69
Area (Jib: ForeΔ)	(m <sup>2</sup> )	20.65
Area (Spinnaker)	(m <sup>2</sup> )	61.58
(3) Center of Gravity (*)		
X <sub>CG</sub> (Aft from Midship)	(m)	0.238
Z <sub>CG</sub> (Downward from DWL)	(m)	0.066
(3) Radius of Gyration (*)		
K <sub>xx</sub>	(m)	1.816
K <sub>yy</sub>	(m)	2.445
K <sub>zz</sub>	(m)	1.730

\* Sea test condition

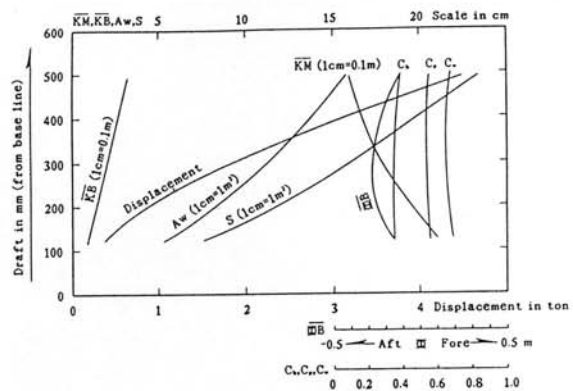


Fig. 3 Hydrostatic curve of KIT34

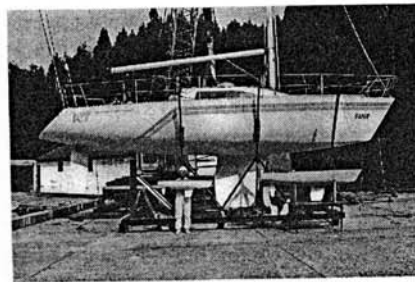


Fig. 4 Full size boat and scale models of KIT34

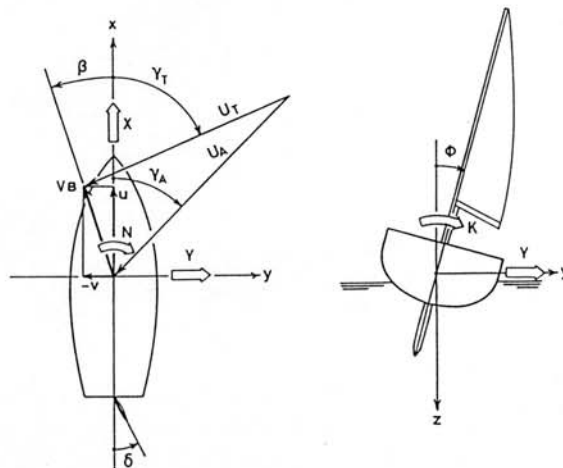


Fig. 5 Co-ordinate system



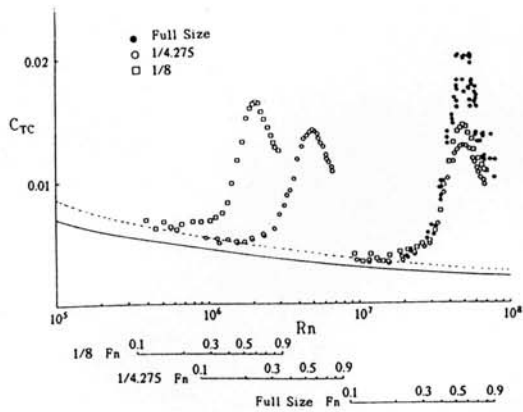


Fig. 6 Total drag coefficients of canoe body of full size boat and scale models

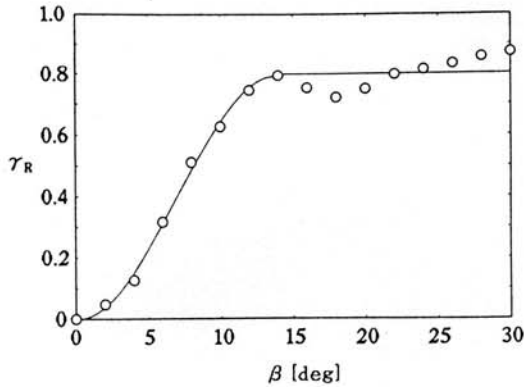


Fig. 7 Decreasing ratio of inflow angle for rudder

Table 2 Added masses and moments of inertia and hydrodynamic derivatives of hull for tacking simulation

Sea test condition			
$m$	3780[kg]		
$I_{xx}$	12500[kg·m <sup>2</sup> ]	$K_{xx}$	1.816[m]
$I_{yy}$	22600[kg·m <sup>2</sup> ]	$K_{yy}$	2.445[m]
$I_{zz}$	11300[kg·m <sup>2</sup> ]	$K_{zz}$	1.730[m]
$m_x$	140[kg]	$J_{xx}$	8100[kg·m <sup>2</sup> ]
$m_y$	2880[kg]	$J_{yy}$	33230[kg·m <sup>2</sup> ]
$m_z$	10900[kg]	$J_{zz}$	8420[kg·m <sup>2</sup> ]
$m_{y<Sail>}$	270[kg]	$J_{xx<Sail>}$	4330[kg·m <sup>2</sup> ]
		$J_{zz<Sail>}$	1400[kg·m <sup>2</sup> ]
$X_{\dot{v}}$	$2.349 \times 10^{-1}$	$K_{\dot{v}}$	$2.915 \times 10^{-1}$
$X_{\dot{w}}$	$-1.360 \times 10^{-2}$	$K_{\dot{w}}$	$1.262 \times 10^{-2}$
$X_{\dot{r}}$	$-2.883 \times 10^{-3}$	$K_{\dot{v}v}$	-2.615
$X_{\dot{v}v}$	-1.162	$K_{\dot{v}w}$	1.232
$X_{\dot{w}w}$	$-2.722 \times 10^{-2}$	$K_{\dot{w}r}$	$-1.637 \times 10^{-1}$
		$K_{\dot{r}r}$	$-4.549 \times 10^{-2}$
		$K_{\dot{r}}^*$	$-3.013 \times 10^{-1}$
		( $K_{\dot{r}}^{**}$ )	$-1.160 \times 10^{-1}$
$Y_{\dot{v}}$	$-5.542 \times 10^{-1}$	$N_{\dot{v}}$	$-5.621 \times 10^{-2}$
$Y_{\dot{w}}$	$7.602 \times 10^{-3}$	$N_{\dot{w}}$	$-1.181 \times 10^{-2}$
$Y_{\dot{r}}$	1.557	$N_{\dot{v}v}$	$-2.737 \times 10^{-2}$
$Y_{\dot{v}v}$	$-4.872 \times 10^{-1}$	$N_{\dot{v}w}$	$-8.011 \times 10^{-2}$
$Y_{\dot{w}w}$	1.329	$N_{\dot{v}r}$	$7.056 \times 10^{-2}$
$Y_{\dot{r}r}$	$-8.667 \times 10^{-3}$	$N_{\dot{w}w}$	$2.756 \times 10^{-2}$
$Y_{\dot{r}}^*$	$2.273 \times 10^{-1}$	$N_{\dot{w}r}$	$-8.460 \times 10^{-3}$
$Y_{\dot{r}}^{**}$	$-1.280 \times 10^{-2}$		
$C_{x\delta}$	$-4.440 \times 10^{-2}$	$C_{x\delta}$	$3.949 \times 10^{-2}$
$C_{y\delta}$	$-1.059 \times 10^{-1}$	$C_{y\delta}$	$4.772 \times 10^{-2}$

\* with sail  
\*\* without sail

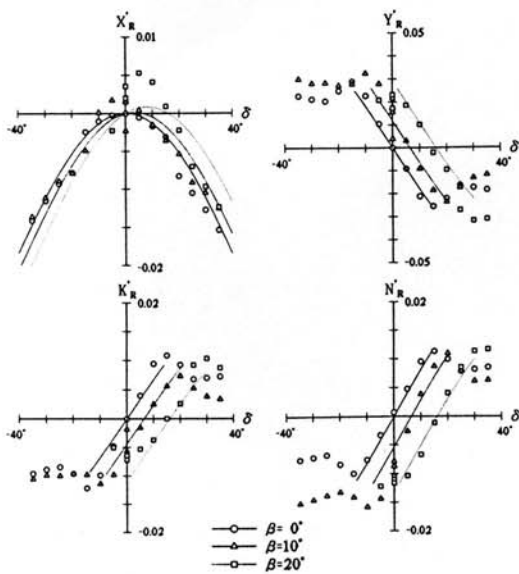


Fig. 8 Variation of hydrodynamic coefficients of rudder with rudder angle  $\delta$

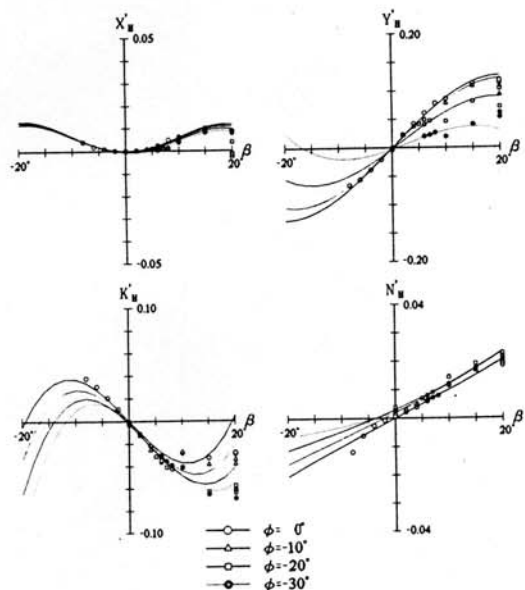


Fig. 9 Variation of hydrodynamic coefficients of hull with leeway angle  $\beta$  (without rudder forces)



Table 3 Upright resistance of hull

VB(m/s)	D(kgf)
0.5	2.2
1.0	6.7
1.5	14.1
2.0	25.9
2.5	43.7
3.0	66.7
3.5	114.1
4.0	185.9
4.5	298.5
5.0	444.4
5.5	596.3
6.0	781.5

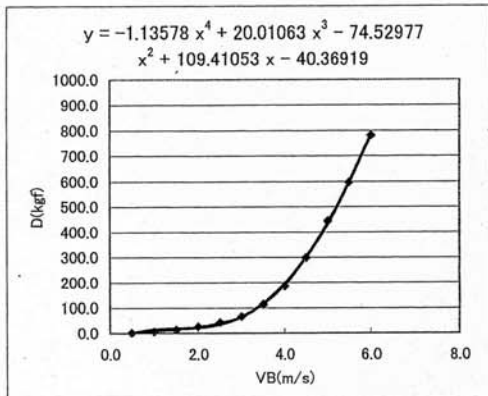


Fig. 13 Upright resistance of hull

Table 4 Aerodynamic coefficients of sail

gammaa	CX	CY	CK	CN
10	0.034	0.260	0.200	0.000
15	0.107	0.700	0.600	-0.015
20	0.195	1.060	0.930	-0.040
25	0.295	1.280	1.100	-0.080
30	0.404	1.415	1.248	-0.097
35	0.519	1.460	1.285	-0.100
40	0.636	1.470	1.294	-0.098
45	0.753	1.452	1.280	-0.092
50	0.866	1.400	1.217	-0.078
60	1.068	1.243	1.074	-0.040
70	1.220	1.065	0.911	0.003
80	1.303	0.880	0.736	0.046
90	1.312	0.688	0.565	0.092
100	1.272	0.500	0.403	0.110
110	1.200	0.450	0.298	0.100
120	1.243	0.280	0.162	0.080
130	1.250	0.138	0.055	0.060
140	1.240	0.023	-0.032	0.050
150	1.230	-0.076	-0.105	0.043
160	1.200	-0.150	-0.144	0.029
170	1.150	-0.188	-0.162	0.022
180	1.100	-0.199	-0.165	0.018

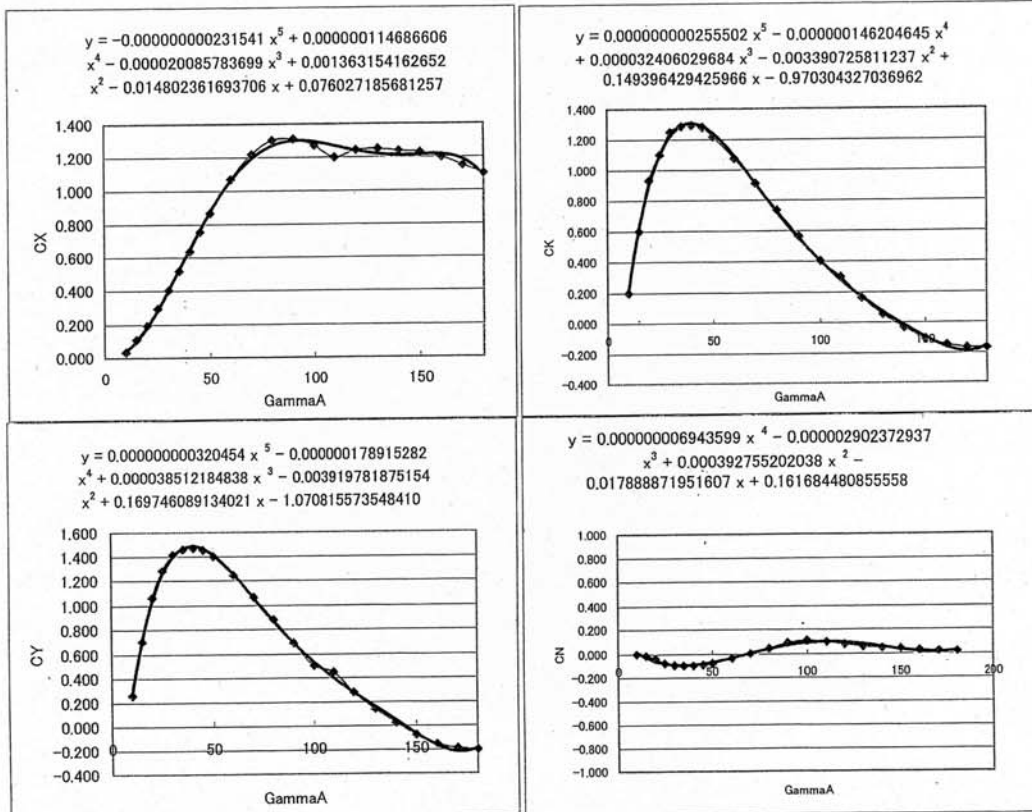


Fig. 14 Aerodynamic coefficients of sail

セーリングヨットの釣合計算

艇名: FAIR V 改良バラスト 計算条件  
新抵抗グラフによる

① UT= 5 m/s  
γT= 180 deg

② x方向速度 u= 2.32 m/s  
リーウェイ: β= -0.09 deg  
舵角 δ= 0 deg  
ヒール角 φ= 0.38 deg

横流れ速度 v= 0.003545940 m/s  
基準横流れ vB= 0.001529705 m/s  
合成速度 VB= 2.32 m/s  
VB= 4.51 kt

⑬ 合計  
X力 = -0.002343  
Y力 = -0.350455  
Kモーメント = 0.027774  
Nモーメント = 0.005061

⑭ 残差 = 0.12362091

A

計算開始 40 deg  
計算終了 180 deg  
計算時間 10 deg

初期値  
u0= 4 m/s  
β0= 5 deg  
δ0= -15 deg  
φ0= -35 deg

VPP実行

B

C

⑧ 舵流入角減少率  
γr= 0.005  
有効舵角 αR= 0.053

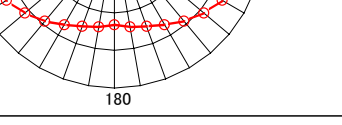
E

Galmei VB [m/s] VB/UT

0	0.000	0.000
10	0.000	0.000
20	0.000	0.000
30	0.000	0.000
40	2.840	0.568
50	3.094	0.619
60	3.282	0.656
70	3.422	0.684
80	3.518	0.704
90	3.562	0.712
100	3.547	0.709
110	3.466	0.693
120	3.323	0.665
130	3.126	0.625
140	2.894	0.579
150	2.672	0.534
160	2.510	0.502
170	2.419	0.484
180	2.318	0.464
190	2.419	0.484
200	2.510	0.502
210	2.672	0.534
220	2.894	0.579
230	3.126	0.625
240	3.323	0.665
250	3.466	0.693
260	3.547	0.709
270	3.562	0.712
280	3.518	0.704
290	3.422	0.684
300	3.282	0.656
310	3.094	0.619
320	2.840	0.568
330	0.000	0.000
340	0.000	0.000
350	0.000	0.000

F

艇名: FAIR V UT= 5 m/s  
Polar Diagram には、リーウェイ角を含んでいないことに注意



G

下記の図には、リーウェイ角を含んでいる



by Masuyama 2007.1.18

水密度	ρ <sub>水</sub> = 1025 kg/m <sup>3</sup>	空気密度	ρ <sub>空</sub> = 1.2 kg/m <sup>3</sup>				
積元		セーリング面積	S= 56.4 m <sup>2</sup>				
排水量	disp= 3775 kg	セーリング風圧	zce= -6.4 m (重心より上が負)				
喫水線長さ	L= 8.55 m	メタセンタ高さ	GM= 1.31 m				
喫水深さ	D= 1.94 m						
船体流体力係数		微係数変	2007/1/18				
X <sub>v</sub> v=	3.37E-01	Y <sub>v</sub> v=	-6.04E-01	K <sub>v</sub> v=	3.02E-01	N <sub>v</sub> v=	-2.27E-02
X <sub>v</sub> φ=	0.00E+00	Y <sub>v</sub> φ=	1.61E-02	K <sub>v</sub> φ=	-8.08E-03	N <sub>v</sub> φ=	-2.36E-02
X <sub>v</sub> φφ=	-9.83E-04	Y <sub>v</sub> vφ=	3.25E+00	K <sub>v</sub> vφ=	-1.33E+00	N <sub>v</sub> vφ=	-3.41E-03
X <sub>v</sub> vφφ=	-1.88E+00	Y <sub>v</sub> vφφ=	-4.68E-01	K <sub>v</sub> vφφ=	1.33E-01	N <sub>v</sub> vφφ=	-9.20E-04
Y <sub>v</sub> φφ=	6.61E-01	K <sub>v</sub> φφ=	-3.33E-01	N <sub>v</sub> φφ=	-2.78E-02		
Y <sub>v</sub> φφφ=	-4.03E-02	K <sub>v</sub> φφφ=	2.08E-02	N <sub>v</sub> φφφ=	3.07E-02		
船体流体力係数							
C <sub>x</sub> δ=	-6.210E-02	C <sub>y</sub> δ=	-1.78E-01	C <sub>k</sub> δ=	9.32E-02	C <sub>N</sub> δ=	9.10E-02

⑤ 直立直進抵抗  
RT= 26.90 kgf  
N= 263.81 N  
waterco= 45678.40

⑥ 船体に働く流体力係数  
XH0= 0.00000  
YH0= -0.00082  
KH0= 0.00041  
NH0= -0.00019

⑦ 船体に働く力  
XH= -263.77 N  
YH= -37.39 N  
KH= 36.29 N-m  
NH= -74.00 N-m

⑧ 舵に働く力  
Xδ= 0.00 N  
Yδ= -7.52 N  
Kδ= 7.62 N-m  
Nδ= 32.79 N-m

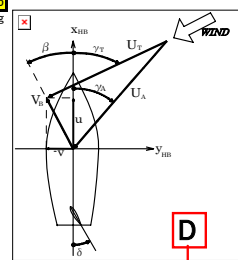
⑨ 相対風  
UA= 2.68 m/s  
γA= 0.25 deg  
airco= 243.41

⑩ セーリング流体力係数  
X<sub>s</sub>0= 1.084  
Y<sub>s</sub>0= 0.183  
K<sub>s</sub>0= 0.150  
N<sub>s</sub>0= 0.029

⑪ セーリングに働く力  
X<sub>S</sub>= 263.77 N  
Y<sub>S</sub>= 44.56 N  
K<sub>S</sub>= 273.59 N-m  
N<sub>S</sub>= 41.21 N-m

⑫ 船体復元モーメント  
KHheel= -317.48 N-m

図の方向を正とする。スターボードタックで考えるので、ヒール角(φ)は負になる。また、舵角(δ)も一般に負になる。



真風向 (deg)	X軸方向速度 (m/s)	リーウェイ角 (deg)	ヒール角 (deg)	舵角 (deg)	艇速 VB (m/s)	艇速 (knot)	γT+β (deg)	相対風速 (m/s)	相対風向 (deg)	VB/UT	セーリング推進力 (N)	セーリング横撓 (N)	セーリングモーメント (Nm)	セーリングヒールモーメント (Nm)	船体直進抵抗 (kgf)	残差 (N&Nm)
40	2.84	2.05	-19.71	-5.00	2.84	5.52	42.05	7.36	25.02	0.57	466.31	-2044.27	-3.10	-14223.06	46.27	0.000999161
50	3.09	1.62	-21.83	-5.79	3.09	6.02	51.62	7.33	30.69	0.62	659.45	-2211.63	448.44	-15671.57	62.90	0.000999022
60	3.28	1.20	-22.00	-6.13	3.28	6.38	61.20	7.18	36.39	0.66	841.85	-2217.92	926.77	-15771.70	79.17	0.000999104
70	3.42	0.85	-20.67	-6.05	3.42	6.65	70.85	6.92	42.16	0.68	996.02	-2104.44	1290.93	-14840.74	93.96	0.000999127
80	3.52	0.59	-18.21	-5.58	3.52	6.84	80.59	6.57	48.10	0.70	1102.98	-1890.89	1453.54	-13122.81	105.37	0.000999876
90	3.56	0.42	-14.89	-4.78	3.56	6.93	90.42	6.12	54.39	0.71	1140.78	-1594.71	1394.77	-10851.30	111.02	0.000999863
100	3.55	0.31	-11.42	-3.78	3.55	6.89	100.31	5.59	61.36	0.71	1100.97	-1245.28	1171.58	-8298.52	109.00	0.000999863
110	3.47	0.24	-7.94	-2.74	3.47	6.74	110.24	5.00	69.45	0.69	987.40	-887.23	891.31	-5780.36	99.07	0.000999412
120	3.32	0.17	-4.95	-1.83	3.32	6.46	120.17	4.40	79.22	0.66	822.95	-569.72	649.18	-3601.91	83.26	0.000999291
130	3.13	0.11	-2.70	-1.15	3.13	6.08	130.11	3.83	91.54	0.63	642.96	-326.07	478.05	-1955.56	65.34	0.000999169
140	2.89	0.05	-1.28	-0.71	2.89	5.63	140.05	3.35	106.35	0.58	484.55	-168.17	349.22	-911.08	49.34	0.000999495
150	2.67	0.01	-0.45	-0.39	2.67	5.19	150.01	3.00	123.58	0.53	375.04	-71.67	226.70	-305.80	38.23	0.000999236
160	2.51	-0.03	0.07	-0.12	2.51	4.88	159.97	2.78	141.92	0.50	316.27	-6.26	103.63	61.83	32.25	0.000999083
170	2.42	-0.06	0.39	0.09	2.42	4.70	169.94	2.65	160.72	0.48	289.16	40.36	15.05	291.86	29.48	0.000999505
180	2.32	-0.09	0.38	0.05	2.32	4.51	179.91	2.68	179.75	0.46	263.77	44.56	41.21	273.59	26.90	0.000999729

Fig.15 VPP 計算用 Excel シート

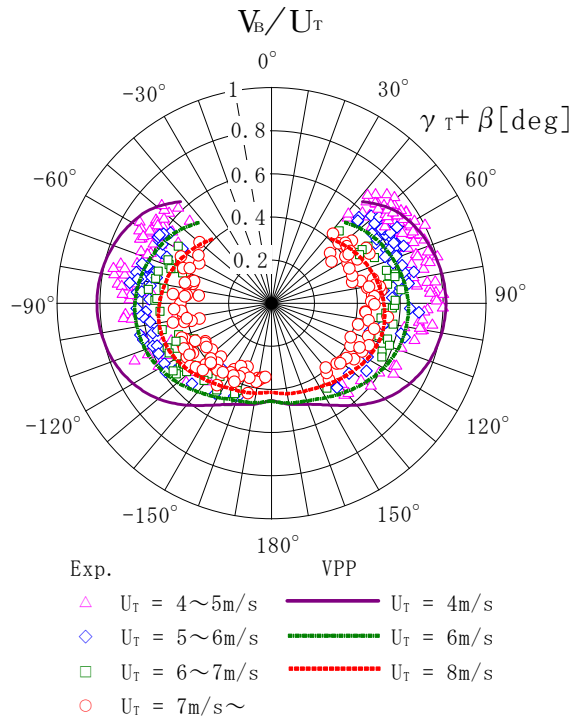


Fig.16 フィンキール改造後の”FAIR V” のポーラーダイアグラム

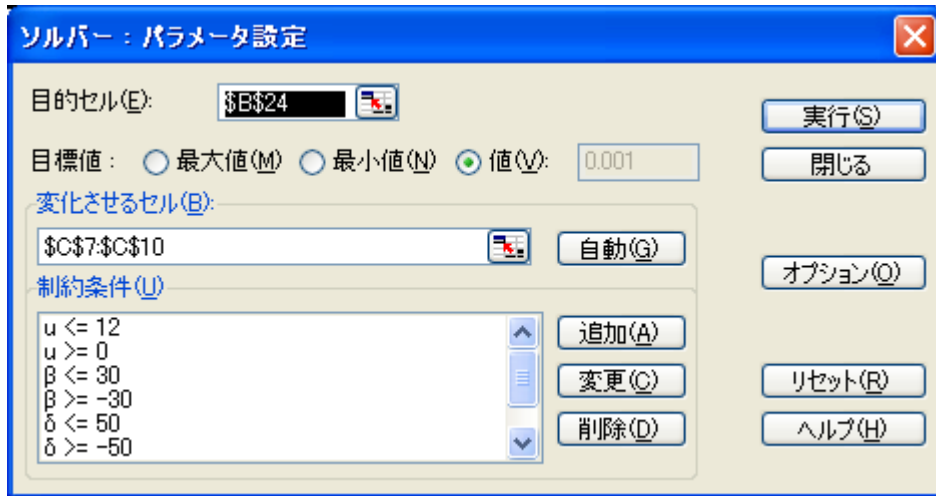


Fig.17 ソルバーを実行したときの「パラメータ設定ウインドウ」

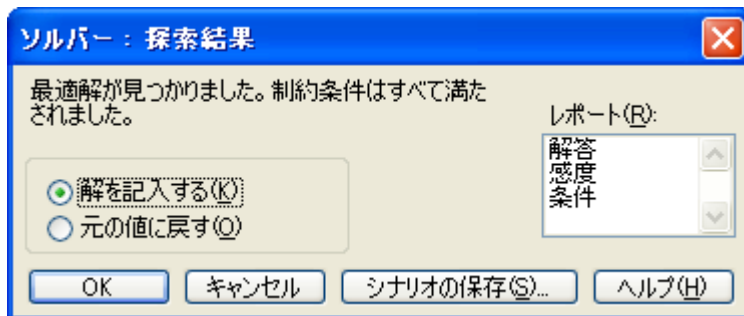


Fig.18 ソルバーを実行したときの「探索結果ウインドウ」

```

Sub FAIRVPP ()

' by 増山 豊

' 初期値
' ソルバーが解を得られない場合はこの初期値を適切に変更のこと。
' 以下の値は、St タックのクローズホールドから開始用の初期値である。

① { u0 = Range("E7")           ' x 方向速度 (m/s)
    beta0 = Range("E8")        ' リーウェイ角 (deg)
    delta0 = Range("E9")      ' 舵角 (deg)
    fai0 = Range("E10")       ' ヒール角 (deg)

' 1 回目の初期値
Range("C7").Value = u0
Range("C8").Value = beta0
Range("C9").Value = delta0
Range("C10").Value = fai0

② { ' 計算範囲
    GTs = Range("E3")         ' 計算開始真風向 (deg)
    GTe = Range("E4")        ' 計算終了真風向 (deg)
    dGT = Range("E5")        ' 真風向変化間隔 (deg)
    UT = Range("C4")         ' 真風速 (m/s)

Range("A39").Select
K = 0

' 繰り返し計算
For i = GTs To GTe Step dGT
GT = i
Range("C5").Value = GT

③ { ' ***** ソルバーの実行 *****
    ' 変化させるセル : C7~C10
    ' 目的とするセル : B24

    SolverOk SetCell:="$B$24", MaxMinVal:=3, ValueOf:="0.001", ByChange:="$C$7:$C$10"
    SolverSolve

    ' *****

' 計算結果の出力 (2 回目以降の初期値となる)
u = Range("C7")
beta = Range("C8")
delta = Range("C9")
fai = Range("C10")
VB = Range("C15")

```

Fig.19a 自動計算のための VBA プログラム (1)

```

' 結果一覧の出力
ActiveCell.Offset(K, 0).Value = GT
ActiveCell.Offset(K, 1).Value = u
ActiveCell.Offset(K, 2).Value = beta
ActiveCell.Offset(K, 3).Value = fai
ActiveCell.Offset(K, 4).Value = delta
ActiveCell.Offset(K, 5).Value = VB
ActiveCell.Offset(K, 6).Value = Range("C16")
ActiveCell.Offset(K, 7).Value = GT + beta
ActiveCell.Offset(K, 8).Value = Range("L18")
ActiveCell.Offset(K, 9).Value = Range("N19")
ActiveCell.Offset(K, 10).Value = VB / UT
ActiveCell.Offset(K, 11).Value = Range("L27")
ActiveCell.Offset(K, 12).Value = Range("L28")
ActiveCell.Offset(K, 13).Value = Range("L30")
ActiveCell.Offset(K, 14).Value = Range("L29")
ActiveCell.Offset(K, 15).Value = Range("H18")
ActiveCell.Offset(K, 16).Value = Range("B24")

' ポーラーダイアグラム表への記入
Select Case i
Case 0
If GTs > i Or GTe < i Then VB = 0
Range("T4").Value = VB
Range("U4").Value = VB / UT

Case 10
If GTs > i Or GTe < i Then VB = 0
Range("T5").Value = VB
Range("U5").Value = VB / UT
Range("T39").Value = VB
Range("U39").Value = VB / UT

====
以下、Case 20 Case 170 まで同様
====

Case 180
If GTs > i Or GTe < i Then VB = 0
Range("T22").Value = VB
Range("U22").Value = VB / UT
End Select

GT = GT + dGT
K = K + 1

Next i

End Sub

' ++++++ End of File ++++++

```

- ' 真風向 (deg)
- ' X 軸方向速度 (m/s)
- ' リーウェイ角 (deg)
- ' ヒール角 (deg)
- ' 舵角 (deg)
- ' 艇速 (m/s)
- ' 艇速 (knot)
- '  $\gamma T + \beta$  (deg)
- ' 相対風速 (m/s)
- ' 相対風向 (deg)
- ' VB/UT
- ' セール推進力 (N)
- ' セール横押力 (N)
- ' セールヨーモーメント (Nm)
- ' セールヒールモーメント (Nm)
- ' 船体直立直進抵抗 (kgf)
- ' 残差

④ Fi. 15 の C への出力

⑤ Fig. 15 の E への出力

Fig.19b 自動計算のための VBA プログラム (2)