

Excel を用いた 470 級の帆走性能解析手法

金沢工業大学 増山 豊

1 はじめに

470 級の帆走性能については、別に示した「470 級の帆走性能解析」にいくつかの結果例を示した。ここではこの解析に用いた VPP の詳細と、これを Excel を用いて計算する手法について述べる。上記の「470 級の帆走性能解析」の内容とオーバーラップを避けるために、基礎的な部分と結果例は省略するので、随時上記記事を参照頂きたい。

帆走時の釣り合い状態を求める方法は Velocity Prediction Program (VPP) と呼ばれており、一般に“ニュートン・ラプソン法”などと呼ばれる解法を用いてプログラミングしなければならない。しかしながら、皆さんが使っておられる Microsoft Excel には上記と同じ能力を持つ「ソルバー」と呼ばれる機能が備わっており、これを用いればプログラミングなしで釣り合い方程式を解くことができる。そこでまずこの「ソルバー」を用いて性能予測をする方法について述べる。次いで、これも Microsoft Excel に備わっている機能である VBA を用いて（若干のプログラミングが必要であるが）、風向を変えながら自動計算を行う方法について述べる。これによって、自動的にポーラーダイアグラムを作成することが可能になり、船体やセールの調整によって帆走性能がどのように変化するかを目の当りにすることができる。なお、この Excel ファイルも当 Web サイトからダウンロードできるので、興味のある方はダウンロードの上計算を行ってみて頂きたい。

2 横流れなどによる船体抵抗の変化

470 級などのセーリングヨットのセールに作用する力は、追い風状態を除いて一般に船の進行方向と一致していない。このため船はヒールし、横流れ（リーウェイ）しながら、かつラダーを少しきった状態で帆走することになる。この場合船体に作用する抵抗は、直進抵抗に比べて一般に大きなものになる。直進抵抗に加えて、船体に新たに作用する力やモーメントは、水槽模型試験（斜航試験や舵角試験などと呼ばれる）などで求めることができる。ここで座標系と力やモーメント、ならびに角度の定義を図 1 に示しておく。なお Y 力は水平面内の値をとるものとし、図中の矢印の向きがプラス方向を表している。

船体に作用する流体(水)による力やモーメントの係数は、一般に次式のような形で表される。

$$\begin{aligned}
 X'_H &= X'_{\delta\delta}\delta^2 + X'_{\beta\beta}\beta^2 \\
 Y'_H &= Y'_\delta\delta + Y'_\beta\beta + Y'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + Y'_\phi\phi \\
 K'_H &= K'_\delta\delta + K'_\beta\beta + K'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + K'_\phi\phi \\
 N'_H &= N'_\delta\delta + N'_\beta\beta + N'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + N'_\phi\phi
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

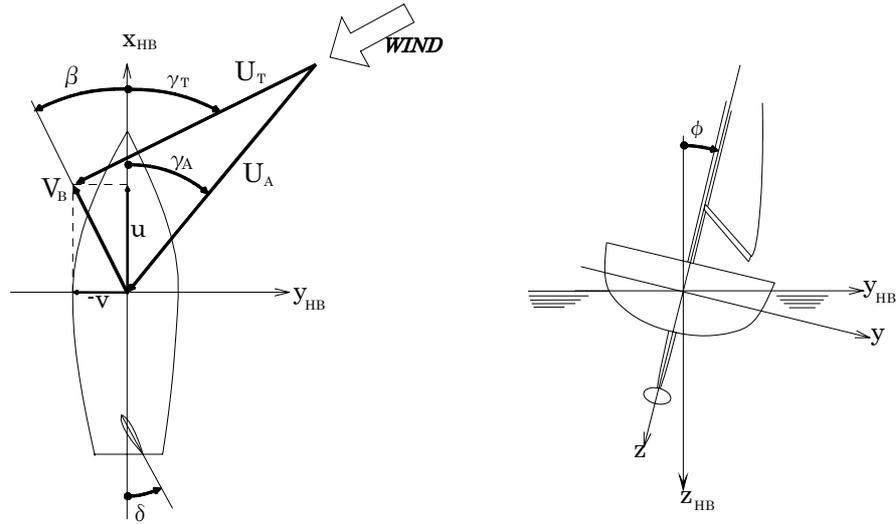


図1 座標系ならびに力、モーメント、角度の定義

表1 470級船体の流体力微係数

$X_{\beta\beta}'$	2.0×10^{-5}	Y_{β}'	3.98×10^{-2}	K_{β}'	-1.26×10^{-2}	N_{β}'	9.20×10^{-4}
		Y_{ϕ}'	8.70×10^{-4}	K_{ϕ}'	9.00×10^{-4}	N_{ϕ}'	-1.15×10^{-3}
		$Y_{\beta\beta\beta\beta}'$	5.40×10^{-5}	$K_{\beta\beta\beta\beta}'$	-2.20×10^{-5}	$N_{\beta\beta\beta\beta}'$	7.00×10^{-6}
$X_{\delta\delta}'$	-1.2×10^{-4}	Y_{δ}'	-6.66×10^{-3}	K_{δ}'	1.75×10^{-3}	N_{δ}'	4.42×10^{-3}

ここで、 X_H' は船体の前後（x軸）方向の力の係数（推進力係数）、 Y_H' は横（y軸）方向の力の係数（横押し力係数）、 K_H' は（x軸まわりの）ヒールモーメント係数、 N_H' は（z軸まわりの）ヨーモーメント係数を表している。また、 β はリーウエイ角、 ϕ はヒール角、 δ は舵角を表しており、単位は[degree]である。これらの式中の $X_{\delta\delta}'$ などは流体力微係数と呼ばれるが、470級の場合の流体力微係数を表1に示す。これは元大阪大学の多田納久義氏¹⁾が模型試験から求められたもので、センターボードを直角に下ろした状態について示している。なお、表1に示す流体力微係数の値が有効なのは、各々の角度が 10° 以下の範囲に限られることに注意を要する。

(1)式で求められる係数から、さらに実船に作用する力やモーメントに換算するには次式を用いる。

$$\begin{aligned}
 X_H &= \frac{1}{2} X_H' \rho_S V_B^2 A - X_0 \\
 Y_H &= \frac{1}{2} Y_H' \rho_S V_B^2 A \\
 K_H &= \frac{1}{2} K_H' \rho_S V_B^2 AD \\
 N_H &= \frac{1}{2} N_H' \rho_S V_B^2 AL
 \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、 ρ_s は水の密度、 V_B は船の速度、 A は喫水線下の船体側面積（ラダー、センターボードを含む）、 L は喫水線長さ、 D は最大喫水深さ（センターボード下端まで）である。なお第1式の X_H を求める式において、 X_0 は直進時の抵抗値である。470級の実艇について、これらの主要目を示すと表2のようになる。

表2 470級船体の主要目

水密度	ρ_s	1025 kg/m ³	海水の場合。真水の場合は 1000 kg/m ³
船体側面積	A	0.974 m ²	ラダー、センターボードを含む
喫水線長さ	L	4.83 m	(ここでは) ラダー後縁まで
最大喫水深さ	D	1.085 m	センターボード下端まで

(なお上記の水密度で求めた場合、力の単位は N[ニュートン]となるので、kgf に換算する場合は 1/9.8 とすること。)

3 セールに作用する流体力

470級のセールデータに関しては「470級の帆走性能解析」に、推進力係数 X_S' と横押し力係数 Y_S' のグラフ、ならびに着力点のセール図面上の面積中心(CE)からのずれ Δz_{CE} 、 Δx_{CE} を示した。

セール流体力係数から、実艇のセールに作用する力とモーメントを求めるには次式を用いる。なおここでは、セールが右舷側から風を受けているもの(スターボード・タック)としているので、 Y_S にはマイナスを乗じている。

$$\begin{aligned}
 X_S &= \frac{1}{2} X'_S \rho_A U_A^2 S_A \\
 Y_S &= -\frac{1}{2} Y'_S \rho_A U_A^2 S_A \\
 K_S &= Y_S (Gz_{CE} + \Delta z_{CE} + Tz_{CE}) \\
 N_S &= Y_S (Gx_{CE} + \Delta x_{CE} + Tx_{CE})
 \end{aligned} \tag{3}$$

ここで、 Tz_{CE} と Tx_{CE} は「470級の帆走性能解析」の図1に示した帆装図からの、マストレーキ変更などによる図心の移動量である。図1の帆装図のままであればこれらは0としてよい。したがって、 $(Gz_{CE} + \Delta z_{CE} + Tz_{CE})$ は喫水線から実際のセール流体力の着力点までの高さ、 $(Gx_{CE} + \Delta x_{CE} + Tx_{CE})$ は船体中心(ミジップ)から実際のセール流体力の着力点までの前後距離(前がプラス)を表している。船体がヒールした場合はセールが風下に振り出されるので、本来ヨーモーメント N_S には前進力 X_S の成分も含まれることになるが、後述のようにトラピーズによって艇体をフラットに保つものとして考えるので、ここでは考慮しないことにする。

(3)式において ρ_A は空気密度、 U_A は(相対)風速、 S_A はセール面積を表している。470級の実艇について、セールの主要目を示すと表3のようになる。

表3 470級のセールの主要目

空気密度	ρ_A	1.20 kg/m ³	
セール面積	S_A	12.7 m ²	$\gamma_A < 100^\circ$ メイン : 9.1m ² ジブ : 3.6m ²
〃	S_A	19.1 m ²	$\gamma_A > 100^\circ$ メイン : 9.1m ² スピン : 10.0m ²
面積中心前後位置	$G_{x_{CE}}$	0.04 m	船体中心 (No.5 セクションより)
面積中心高さ	$G_{z_{CE}}$	2.63 m	喫水線高さより

(なお上記の水密度で求めた場合、力の単位は N[ニュートン]となるので、kgf に換算する場合は 1/9.8 とすること。)

ところで、海上を吹いている風の風向・風速を、真風向 γ_T ・真風速 U_T と呼ぶが、この中を船が走るとき、船上で受ける風はこれとは異なってくる。これを相対風向 γ_A ・相対風速 U_A と呼んでいる。これらの関係は図 1 に示す「風速三角形」より、次式で表される。

$$U_A = \sqrt{U_T^2 + V_B^2 + 2U_T V_B \cos(\gamma_T + \beta)} \quad (4)$$

$$\gamma_A = \sin^{-1}\{U_T \sin(\gamma_T + \beta) / U_A\} - \beta$$

したがって、(3)式よりセールに作用する力とモーメントを求めるには、相対風向 γ_A から流体力係数を求めた上で、相対風速 U_A を用いて計算しなければならない。

4 定常帆走性能の推定式

これまでの手続きによって、船体とセールに作用する力とモーメントを求める方法が整った。これらの式を用いて定常帆走状態を求める方法について説明する。定常帆走状態というのは、ある真風向・真風速のもとで得られる船の帆走性能のことであり、艇速、リーウェイ角、舵角、ヒール角などが一つに定まる状態である。この状態は、船体とセールに作用する力とモーメントが各々釣り合ったときに得られる。

一般に、セーリングヨットの釣り合いは、前後方向 (x 軸方向) と、横方向 (y 軸方向) の力の釣り合いと、ヒールモーメント (x 軸まわり) と、ヨーモーメント (z 軸まわり) の釣り合いの、合計 4 つの釣り合いを考えている。しかしながら 470 級のようなディンギでは、トラピーズなどによって艇体をほぼ水平に保っているの、ここではヒールモーメントに関してはすでに釣り合っているものとして考慮しないことにする。(トラピーズしても水平に保てない風速の場合は、限界値を示すことにする。)

したがって、前後方向 (x 軸方向) の力、横方向 (y 軸方向) の力、ヨーモーメント (z 軸まわり) の 3 つの釣り合いについて、(2)式と(3)式を加え合わせると次のようになる。

$$\begin{aligned} X_H + X_S &= 0 \\ Y_H + Y_S &= 0 \\ N_H + N_S &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

これは3元連立方程式となっており、未知数は、艇速 V_B 、リーウェイ角 β 、舵角 δ の3つである。すなわち、この3元連立方程式を解くことによって、艇速 V_B 、リーウェイ角 β 、舵角 δ の3つが決定され、定常帆走状態を求めることができるという訳である。

ところで(5)式はこれらの未知数によって複雑に変化することが分かる。例えばx軸方向の抵抗は、 V_B や δ 、 β などによって複雑な式で計算されたのは上述のとおりである。このような(非線形の)連立方程式を解くには一般にパソコンを用いて、“ニュートン・ラプソン法”などの方法が用いられ、プログラミングの知識が必要になる。ここではこの解法を、Excelに装備されている“ソルバー機能”を用いて、プログラミングなしで求める方法を紹介する。

5 Excel ソルバーを用いた釣合い方程式の解法

5.1 Excel シートの準備

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ので、付録1に示す手順で使える状態にしてもらいたい。

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)、リーウェイ角 β 、舵角 δ の3つである。なお、本計算はスターボードタック(右舷から風を受ける状態)について計算するようにしている。

図2にVPP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VBA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。

なお[A]の「風向範囲」、「初期値」とある欄、ならびに[B]の「VPP 実行」ボタンは、後述のVBAを用いた自動計算のときに用いる。また[C]の欄はVBA自動計算の出力用で、これらはここでは用いない。

② u (x方向速度)、 β (横流れ角)、 δ (舵角)、の入力。(ϕ (ヒール角) は 0° としておく)。

なお最初は初期値として、予測値に近いと思われる値を入力する。

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。(表1の数値)

—————以上 入力—————

—————以下 出力—————

⑤ 船体直立抵抗計算結果。(Excel “係数” シートの 1. より)

⑥ 船体流体力係数。((1) 式と④の入力値より)

⑦ 船体に作用する流体力。((2) 式より)

⑧ トラピーズ距離。詳細は付録3に示す。

⑨ 相対風速、相対風向の計算結果。((4) 式より)

- ⑩ セール流体力係数。(Excel “係数” シートの 2. より)
 - ⑪ セールに作用する流体力。((3) 式より)
 - ⑫ 船体とセールの働く X、Y 力と N モーメントの合計値。((5) 式より)
- これらをそれぞれ、 ΣX 、 ΣY 、 ΣN とする。
- ⑬ 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。

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

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 β は正の値、 δ は負の値となる。(図 1 の座標系の定義参照)

$$u=4\text{m/s}, \quad \beta=5^\circ, \quad \delta=-10^\circ, \quad (\phi \text{ は } 0^\circ \text{ で一定とする})$$

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、⑬の合計残差は大きな値になる。なお図 2 においては、①の風の条件のもとでソルバーを実行した後の結果が表示されているので、②の値は初期値ではなく解が入っており、⑬の合計残差も 0 に近い値になっている。

セーリングヨットの釣合計算(470級) トラピーズ限界を考慮する。KS,NSは着力点位置より by Masuyama 2006.1.22 修正

ソルバーとVBA使用

① UT= 5 m/s
γ T= 180 deg

② u= 2.30 m/s
β= -0.16 deg
δ= -0.37 deg
φ= 0.00 deg
φ= - rad

③ 計算開始 30 deg
計算終了 180 deg
計算間隔 10 deg

④ 初期値 u= 4 m/s
β= 10 deg
δ= 10 deg
φ= 0 deg

⑤ 直立直進抵抗 RT= 8.01 kgf
78.58 N
watercco= 2643.13

⑥ 船体に働く流体力係数 XHO= -0.0002
YHO= -0.00400
KHO= 0.00140
NHO= -0.00180

⑦ 船体に働く力 XH= -78.62 N
YH= -10.57 N
KH= 4.01 N-m
NH= -23.02 N-m

⑧ クルー体重 70 kgf
トラピーズ距離 -1.053 m (1.7m以下のこと)
ヒール角 10° までとして艇体重量による復原力をスキッパーが風上側へ座った上で、クルーがトラピーズするものとして計算する。

氷密度	rhov=	1025 kg/m ³	空気密度	rho=	1.2 kg/m ³		
諸元							
排水量	disp=	275 kg	セール面積	S=	19.1 m ²		
喫水線長さ	L=	4.83 m	CE図心前後	Gxce=	0.04 m (MDから)		
喫水深さ	D=	1.085 m	CE図心高さ	Gzce=	2.81 m (WLから)		
水線下側面	A=	0.974 m ²	船体流体力係数				
X β β=	2.00E-05	Y β β=	3.98E-02	K β β=	-1.26E-02	N β β=	9.20E-04
X φ φ=	0.00E+00	Y φ φ=	8.70E-04	K φ φ=	9.00E-04	N φ φ=	-1.15E-03
				K β β β=	-2.20E-05	N β β β=	7.00E-06
X δ δ=	-1.20E-04	Y δ δ=	-6.66E-03	K δ δ=	1.75E-03	N δ δ=	4.42E-03

⑨ 相対風 UA= 2.70 m/s
γ A= 0.47 179.53 deg
aircco= 83.48

⑩ セール流体力係数 Xs0= 0.943
Ys0= 0.127
Zzce/√S= 0.200 図心からのずり
Xxce/√S= 0.600 図心からのずり

⑪ セールに働く力 XS= 78.72 N
YS= 10.57 N
KS= 37.25 N-m
NS= 23.03 N-m

⑫ 合計 X力 0.098742
Y力 0.005997
Kモーメン 0.000000
Nモーメン 0.014616

⑬ 残差 0.00999955

⑭ 横流れ速 v= 0.0065469 m/s
基準横流 v0= 0.0028452 m/s
合成速度 VB= 2.30 m/s
VB= 4.47 kt

⑮ VPP実行

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)	トラピーズ距離 (m) 1.7m以下の	舵角 (deg)	艇速 VB (m/s)	艇速 (knot)	γ T + β (deg)	相対風速 (m/s)	相対風向 (deg)	VB/UT	セール推進力 (N)	セール横力 (N)	セールモーメント (Nm)	セールヒールモーメント (Nm)	船体ヒールモーメント (Nm)	残差 (N&Nm)
30	2.04	4.63	0.80	0.30	2.05	3.98	34.63	6.79	20.12	0.410	53.5	-392.8	-63.6	-1090.8	-136.3	0.01000
40	2.53	4.08	1.39	0.19	2.54	4.93	44.08	7.05	25.49	0.508	106.1	-529.3	-78.9	-1448.5	-183.2	0.01000
50	2.91	3.51	1.66	0.11	2.91	5.66	53.51	7.13	30.82	0.583	161.5	-598.0	-82.6	-1615.7	-206.6	0.01000
60	3.20	2.95	1.68	0.04	3.20	6.23	62.95	7.06	36.16	0.641	211.3	-607.6	-75.7	-1623.2	-209.5	0.01000
70	3.41	2.44	1.49	-0.05	3.41	6.63	72.44	6.85	41.67	0.682	248.6	-569.5	-59.5	-1506.0	-195.9	0.01000
80	3.52	1.98	1.15	-0.16	3.52	6.84	81.98	6.50	47.61	0.703	268.8	-496.5	-35.6	-1300.6	-170.4	0.01000
90	3.52	1.58	0.73	-0.28	3.52	6.85	91.58	6.04	54.32	0.704	269.8	-402.9	-6.8	-1046.2	-137.8	0.01000
100	3.43	1.23	0.30	-0.44	3.43	6.66	101.23	5.48	62.20	0.685	252.7	-304.3	23.3	-784.0	-103.6	0.01000
110	3.26	0.91	-0.09	-0.64	3.26	6.33	110.91	4.90	71.60	0.651	221.7	-214.6	50.3	-549.2	-72.4	0.01000
120	3.04	0.63	-0.40	-0.84	3.04	5.91	120.63	4.33	82.86	0.608	183.7	-141.0	69.4	-359.2	-46.9	0.01000
130	2.81	0.37	-0.65	-0.97	2.81	5.46	130.37	3.83	96.83	0.561	146.0	-82.7	75.2	-210.0	-26.9	0.01000
140	2.91	0.25	-0.70	-1.01	2.91	5.66	140.25	3.33	106.46	0.583	163.2	-70.0	87.3	-177.7	-22.4	0.01000
150	2.67	0.06	-0.90	-0.55	2.67	5.20	150.06	3.00	123.68	0.535	125.8	-21.6	40.8	-54.7	-6.6	0.01000
160	2.50	-0.07	-1.02	-0.15	2.50	4.86	159.93	2.79	141.93	0.500	102.3	5.1	11.1	17.9	1.9	0.01000
170	2.39	-0.13	-1.05	-0.31	2.39	4.64	169.87	2.68	160.73	0.477	88.4	9.3	20.3	32.9	3.5	0.01000
180	2.30	-0.16	-1.05	-0.37	2.30	4.47	179.84	2.70	179.53	0.460	78.7	10.6	23.0	37.2	4.0	0.01000

図 2 V P P 計算 Excel シート

5.2 ソルバーの実行

ソルバーを実行する具体的な手順は次のとおりである。

- (1) 「ツール」 → 「ソルバー」 → 「パラメータ設定」 ウィンドウの表示(図 3)。
「パラメータ設定」 ウィンドウにおいて以下、
- (2) 目的セル：⑬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（例えば、0.01）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（例えば、 $u \geq 0$, $u \leq 10$ ）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値になったりするので、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」のウィンドウ（図 4）が表示されるので、以下、
- (8) 「最適解がみつかりました。制約条件はすべて満たされました。」という表示が出て、⑬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。「OK」をクリックすると、②のセルに解が書き込まれる。
- (9) 「仮の解が見つかりません」という表示が出て、⑬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) 「最適解がみつかりました。～」の時の②の3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 β 、ヒール角 ϕ 、舵角 δ 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。異なった風向風速におけ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、①の条件を変えて同じ手順を繰り返せばよい。

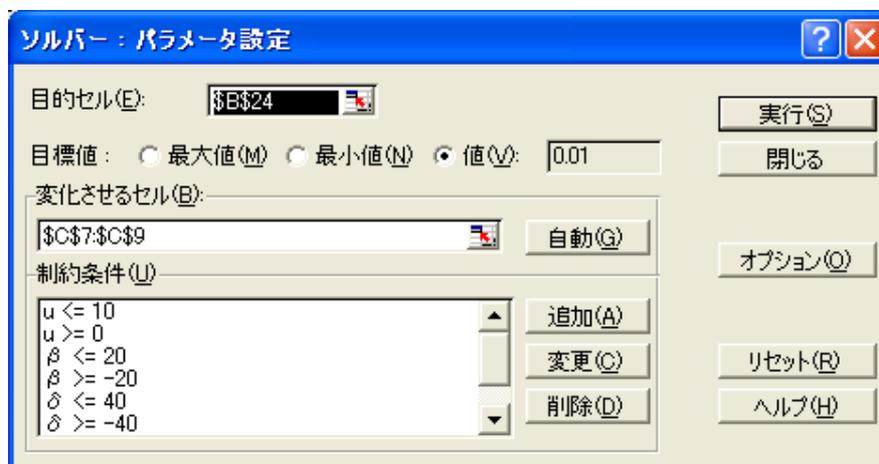


図 3 パラメータ設定ウィンドウ

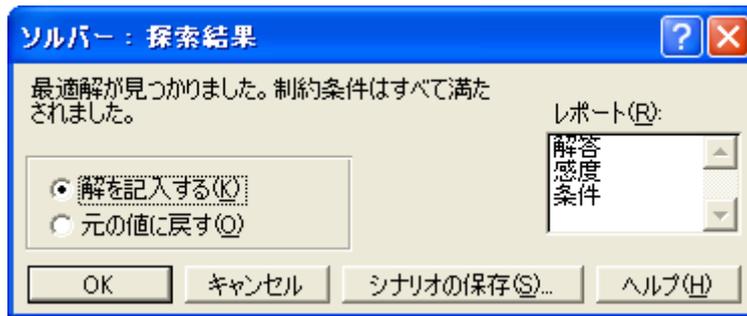


図4 探索結果ウインドウ

6 Excel VBA を用いた自動計算

5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。図2下部の[C]部分と図5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。なお図5は図2と同じシートの右側部分である。また、以下のVBAを実行する前に、一度5章の要領でソルバーを実行しておく必要がある。

この自動計算では5章では用いなかった図2中の、[A]の「風向範囲」、「初期値」と[B]の「VPP実行」ボタンを用いる。[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3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（図4）が開くので、「OK」ボタンを押すと自動的に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。（[Esc]キーを何回か押すことによって強制終了させることは可能）。初期値が適切でない場合や解が得られない場合は、図2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。また真風速が大きすぎたり、真風向が30°以下と小さすぎたりする場合も、解が得られない場合がある。なお繰り返すが、[A]の初期値はスターボードタックの場合である。

この自動計算は、このシートに含まれているプログラム（図6）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) 図2（または図5）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「Prog470VPP」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 初期値を図2の[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図2の[A]から読み込む。
- ③ ソルバー機能実行のコマンド。ここで、図3のパラメータ設定ウインドウ内の設定をプログラムで行なった上で実行している。
- ④ 結果一覧表、図2の[C]への出力。
- ⑤ ポーラーダイアグラム表示用の表、図5の[E]への出力

ここで、真風速は図2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、図2のシート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、付録2に示す手順で有効な状態にする必要がある。(VBAを実行する前に、一度5章の要領でソルバーを実行しておけば、問題ないはずである。)

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、図5の[F]のポーラーダイアグラムは Excel のレーダーチャートグラフを流用しているため、リーウェイ角は含まれていない。またレーダーチャートグラフは全てのデータを用いて 360° 表示するようになっているため、ここでは[E]の表にデータを 36 個準備して、これを用いて 10° 毎に表示するようにしている。なお真風向 0° ~30° では計算していないので空欄とし、ポート側の値にはスターボード側の値をコピーして用いている。もし 5° 毎の表示にしたい場合は、72 個のデータが必要である。

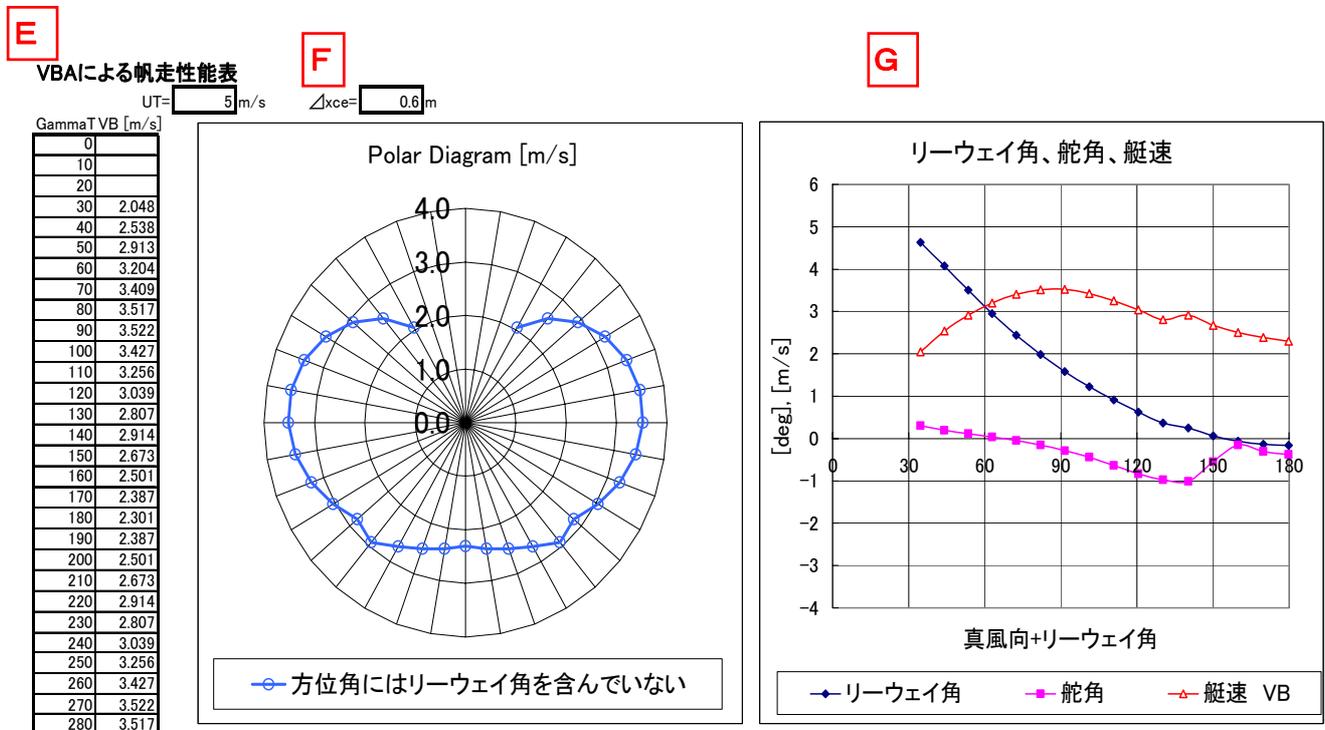


図5 VBAによる自動計算結果の表示部

7 おわりに

以上 470 級を対象に、Excel を用いた帆走性能推定計算 (VPP) の手法について述べた。この Excel シートをダウンロードした上で、470 に乗っている人自身に試してもらい、自艇の調整や走らせ方の改良に役立てて頂ければ幸いである。

参考文献

- (1) 多田納久義: “帆走の船舶流体力学的研究(第 6 報)セーリングヨットの設計に対する応用”、関西造船協会誌、第 193 号、(1984)、pp. 7-16.

付録 1 Excel ソルバーを使えるようにするには

- (1) 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」があれば使用可能となっている。
- (2) 「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。
- (3) 「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 からアドインファイルを追加する。具体的には「スタート」→「設定」→「コントロールパネル」→「プログラム (またはアプリケーション) の追加と削除」→「Microsoft Office 000」をクリック→「変更 (または追加と削除)」→「機能の追加と削除」→「Microsoft Excel for Windows」の+ボタンをクリック→「アドイン」の+ボタンをクリック→「ソルバー」→「マイコンピュータから実行」をクリック→「完了」。以上でインストールが始まるはずである。

付録 2 VBA プログラムを実行した時にソルバーが作動しない時

- (1) 「マクロ」ウインドウから「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「SOLVER.xls」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、「SOLVER.xls」の項がなければ、一度、図 2 の状態で「ソルバー」を実行する。

付録 3 トラピーズ距離の計算

本計算例ではヒールモーメント (x 軸周りの K モーメント) は、すでに釣り合っているものとして連立方程式には含めていない。これはこのような小型艇の場合、トラピーズなどによって船体全体の重心位置が大きく変化するため、Excel のセル内での計算式では対応できないためである。このため、逆にヒールモーメントを釣り合わせるためにはどれくらいのトラピーズをしないとけないかを目安として示すために、以下の式で計算している。

$$(K_S + K_H) + \Delta \overline{GM} \sin \phi + W_S y_S + W_C y_C = 0$$

ここで、

K_S : セールに作用する空気力によるKモーメント (スターボードタックの場合は負の値)

K_H : 船体に作用する水の力によるKモーメント (スターボードタックの場合は負の値)

Δ : 艇体 (乗員を除く) 排水量 (= 120kgf)

\overline{GM} : メタセンター高さ (= 1.32m)

ϕ : ヒール角 (ここでは = 10° とする)

W_S : スキッパー体重 (= 70kgf)

W_C : クルー体重 (D28 セルで与える。図 2 では = 70kgf)

y_S : スキッパーハイクアウト距離 (= 0.6m)

y_C : クルートラピーズ距離 (m)

よって、D29セルにおいて以下の計算を行っている。(なお、セルの中では、[kgf]の単位ではなく、[N]で計算している。)

$$y_C = \frac{-(K_S + K_H + \Delta \overline{GM} \sin \phi + W_S y_S)}{W_C}$$

ここで、 y_C は船体中心からクルーの体重重心までの距離であり、艇体ガンネルからフルにトラピーズした時の距離が 1.7m程度と考えられる。したがってこの値が 1.7mを越えるということは、クルーがトラピーズしても 10° 以内のヒール角に抑えることができないことを意味している。したがってたとえ図 2 のDの残差がほぼ 0 という条件を満たしていても、実際には帆走不可能な状態を表しているので、注意を要する。

なお y_C がマイナスの場合はクルーが風下側へ移動していることを表しているが、ここでは常にスキッパーが風上側にいるとともに、艇が 10° 風下側へヒールした状態となるものとしているので、ランニング状態の y_C の値は過大な値になっている。