大型練習帆船の帆走性能の推定

芳村 康男*・田辺 穰**・大杉 勇**

雨宮 伊作**・多々納久義***

On the Prediction of the Sailing Performance for a Large Sail Training Ship

Yasuo YOSHIMURA, Yutaka TANABE, Isamu OHSUGI,

Isaku AMEMIYA and Hisayoshi TATANO

Abstract

Sailing performances of sail equipped ships are generally provided by the balance of forces between sail and hull. However, there are few works on the prediction of sailing performance particularly with a large ship.

The authors have been trying to establish the predicting technique based upon hydrodynamic and aerodynamic researches with a new sail training ship "Nippon-maru". Then we find the suitable mathematical model which can describe the sailing performance well. In this model, hydrodynamic forces acting on hull and rudder are described by a modular type mathematical model which is similar to MMG's, and the aerodynamic forces are added in it.

The predicted sailing performances are well coincide with observed data in actual navigation.

1. ま え が き

練習帆船日本丸は竣工後5年以上が経過し、数多くの遠洋航海が実施された。これらの航海実績については幾つか報告され^{(1)~(3)}、本船の帆走性能が明らかにされてきた。

帆走性能の推定は一般に水槽試験と風洞試験で得られた各流体力の釣り合いから求めることができる⁽⁴⁾。しかし、大型帆船は数少なく、その帆走性能を推定し、また実船の結果と比較して推定精度を論じた例はほとんどないのが現状である。

また、大型帆船は小型のセイリングボートと異なり、模型の縮率が大きくなるため推定精度が低下する傾向にある。とりわけ風洞試験は、閉塞率の制限から模型が小さくなり、軟帆の剛性の問題が生ずることや、また数多くの帆の調整等の問題があり、実船と相似にすることが極めて困難である。

本報では、こうした風洞試験の問題点を踏まえて実験を行い、本船の帆走性能を最近の船舶操縦性分野の成果を応用して推定することを試みる。また、これらを実船の航海実績と比較することによって推定精度を検討する。

2. 帆走性能推定の数学モデル

帆の力は推進力になると同時に船を横流れさせ、かつ船に回頭モーメントを与えるため操舵が必要になる。帆走時の船体運動を推定するには、前進方向の力の釣り合いのみならず、当舵と横流れがどの程度発生するかといった横方向のバランスを把握し、これらによる抵抗増加も考慮する必要がある。この場合の運動方程式は図1に示す座標系を用いて次式で表わすことができる。

* 正会員 住友重機械工業株式会社平塚研究所（〒254 神奈川県平塚市夕陽ヶ丘63-30）

** 正会員 運輸省航海訓練所（〒100 東京都千代田区霞ヶ関2丁目1-3）

*** 正会員 大阪大学工学部（〒565 大阪府吹田市山田丘2-1）

帆走中の船の運動は上式の運動方程式を解くことにより求められるが、船が風に対し一定の角度を保ちながら直進する場合の平衡式は(2.1)式において $\dot{u}_G = \dot{v}_G = \dot{r} = 0, \dot{\phi} = \dot{\psi} = 0$ および、 $r = 0$ として得られる。すなわち、

ここで流体力 X, Y, N, K は以下のように分離して取扱う。

ここに添字 H, R, A は次のことを意味する。

H ：水面下の主船体に働く力

R : 水面下の舵に働く力

A ：帆及び船体上部構造物に働く風圧力

水面下の力は船の周りの相対流速と流向，横傾斜角，並びに舵角で変化する。帆の力は帆の角度によって異なるが，帆の推力が最大となる角度は船の相対風向に応じて一つ決まるので，水面上の力は相対風向・風速の関数として表現できる。これらの力の取扱いについて以下に要約する。

(1) 水面下の船体に働く力

水面下の流体力は船の操縦性における取扱いと同様、MMG⁽⁵⁾の考え方に従って、(2.3)式のように主船体と舵に分離して表現できる。これらの力の内、 X_H, Y_H, N_H, K_H は斜航試験により、また X_R, Y_R, N_R, K_R は舵角試験で求めることができる。

a) 流体力 X_H, Y_H, N_H, K_H

船体前後方向の力 X_H は斜航角 β や横傾斜角 ϕ に応じて変化し、横方向の力 Y_H とモーメント N_H, K_H は主に β の増加と共に大きくなる。これらの変化は概略次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} X'_H &= X_H / {}^0_2 L dU^2 = X'_0 + X'_{\beta\beta\beta^2} + X'_{\beta\phi\beta\phi} + X'_{\phi\phi\phi\phi} + X'_{\beta\beta\beta\beta\beta^4} \\ Y'_H &= Y_H / {}^0_2 L dU^2 = Y'_{\beta\beta} + Y'_{\phi\phi} + Y'_{\beta\beta\beta\beta^3} + Y'_{\beta\beta\phi\beta^2\phi} + Y'_{\beta\phi\phi\beta\phi^2} + Y'_{\phi\phi\phi\phi\phi^3} \\ N'_H &= N_H / {}^0_2 L^2 dU^2 = N'_{\beta\beta} + N'_{\phi\phi} + N'_{\beta\beta\beta\beta^3} + N'_{\beta\beta\phi\beta^2\phi} + N'_{\beta\phi\phi\beta\phi^2} + N'_{\phi\phi\phi\phi\phi^3} \\ K'_H &= K_H / {}^0_2 L d^3 U^2 = K'_{\beta\beta} + K'_{\phi\phi} + K'_{\beta\beta\beta\beta^3} + K'_{\beta\beta\phi\beta^2\phi} + K'_{\beta\phi\phi\beta\phi^2} + K'_{\phi\phi\phi\phi\phi^3} \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.4)$$

ただし, $\beta = -\sin^{-1}(v/U)$

船を ϕ 傾斜させ、船首から β の方向に斜航させた時に主船体に働く力を無次元化して図 2 に示す。図中の曲線

表1 練習帆船日本丸の主要目

HULL	
L_{PP} (m)	86.0
B (m)	13.8
d (m)	6.2
C_b	0.61
GM (m)	1.18
RUDDER	
$A_R / L d$	1/39.5
Λ	2.80
x'_R	-0.5
z'_R	0.518
SAIL (PLANE)	
$A_s / L d$	4.11

図2 船体傾斜を伴う斜航試験の結果

表2 斜航・舵角試験による流体力係数

$X'_{\beta\beta}$	-0.0445	N'_β	0.1152
$X'_{\beta\phi}$	-0.0197	N'_ϕ	-0.0004
$X'_{\phi\phi}$	0.0041	$N'_{\beta\beta\beta}$	-0.0347
$X'_{\beta\beta\beta\beta}$	0.3312	$N'_{\beta\beta\phi}$	-0.3158
		$N'_{\beta\phi\phi}$	0.0213
		$N'_{\phi\phi\phi}$	-0.0293
Y'_β	0.4252	K'_β	-0.1797
Y'_ϕ	0.0165	K'_ϕ	-0.0074
$Y'_{\beta\beta\beta}$	2.4403	$K'_{\beta\beta\beta}$	-0.5147
$Y'_{\beta\beta\phi}$	0.1328	$K'_{\beta\beta\phi}$	-0.0885
$Y'_{\beta\phi\phi}$	-0.4778	$K'_{\beta\phi\phi}$	0.5588
$Y'_{\phi\phi\phi}$	-0.0666	$K'_{\phi\phi\phi}$	-0.1309
$1-t_R$	0.881	$1-w_R$	0.539
a_H	1.849	γ_R	0.057
x'_H	-0.473		
z'_H	1.045		

はいずれも上記(2.4)式で近似した特性であり、その係数(流体力微係数)を表2に掲げる。これらの試験は縮率1/22.22の模型船で、住友重機械・平塚研究所の角水槽で実施した。帆走時は帆の力によって船が横流れ(斜航)し、この力に対抗するような流体反力が水面下に発生する。この力が Y_H であり、その前後方向の作用中心(C.L.R)は N_H/Y_H で得られる。本船ではこの値は船体中央より約0.28L前方(S.S.7.5付近)となる。因みに帆の力が上記作用点付近に配置されるならば、帆走時の当舵は少なくなり、この点が最適帆装位置となる。しかし、現実には配置上の制約等から、必ずしも上記の位置に配置できるとは限らない。このアンバランスモーメントを打ち消すのが次に示す舵の力である。

b) 流体力 X_R, Y_R, N_R, K_R

直進中に舵角を取った時の流体力 X_R, Y_R, N_R, K_R を図3に舵直圧力 F_N の船体前後方向成分と横方向成分に対してそれぞれ無次元化して示す。

舵直圧力 F_N と船体の流体力 X_R, Y_R, N_R, K_R の関係は一般に次式で表わせる。

図3 舵角試験の結果

この原因は既に述べた船体後部に近接した不平衡舵特有の現象であり、本船の舵は小さい舵抵抗で強い舵効きが得られることになる。なお、舵の力をこのような有効流速に置き換えることにより、舵力のスケール修正も可能になる。

次に船が斜航した時の舵の力について述べる。この力は前述の斜航試験で舵角を取った時の舵直圧力を解析することにより求めることができる。船が斜航すると、舵の流入角は斜航角に応じて減少し、この変化を次式で表現できる。

$$\alpha_R = \delta - \gamma_R (U/U_R) \beta \quad \dots\dots (2.8)$$

ここに、 γ_R は船体の整流係数であり、この値を表2に示す。なおこの値は通常の船舶では0.4程度となるが、本船の舵は既に述べた不平衡舵のため、船体の整流効果が大きく、 γ_R が非常に小さくなっている。

以上の(2.6)式～(2.8)式を(2.5)式に代入すると、操舵による力 X_R, Y_R, N_R, K_R の数学モデルが得られる。ただし、簡略にするため $\sin \delta \cdot \sin \alpha_R \doteq \delta^2$, $\cos \delta \cdot \sin \alpha_R \doteq \alpha_R$ と近似する。

$$\left. \begin{aligned} X'_R &= -(1-t_R)F'_N \sin \delta \\ Y'_R &= -(1+a_H)F'_N \cos \delta \\ N'_R &= -(x'_R + a_H x'_H)F'_N \cos \delta \\ K'_R &= (z'_R + a_H z'_H)F'_N \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (2.5)$$

ただし、 x_R, z_R は舵の座標を表わし、 L, d で無次元化した本船の値は $x'_R = x_R/L = -0.5$, $z'_R = z_R/d = 0.518$ である。また、 $1-t_R, a_H, x'_H, z'_H$ は図3に示すように、 $F'_N \sin \delta$ あるいは $F'_N \cos \delta$ に対する X'_R, Y'_R, N'_R, K'_R の傾斜から求めることができる。その結果を先の表2に要約する。 $1-t_R$ や x'_H の値は通常の船舶と大きな違いはないが、 a_H は1.8以上となり、通常船舶が0.3程度であることを考えると相当大きく、小さな舵直圧力で舵効きをよくしている。これは本船の舵が船体後部に近接した不平衡舵を採用していることによると思われる⁽⁵⁾。

一方、舵直圧力係数 F'_N は、図4のごとく、直進時は舵角 δ にほぼ比例し、これを一般に次式で表現することができる。

$$\begin{aligned} F'_N &= F_N / \frac{1}{2} L d U^2 \\ &= (A_R / L d) f \alpha U_R^2 \sin \alpha_R \quad \dots\dots (2.6) \end{aligned}$$

ただし、 U_R と α_R は舵の有効流速と流向を表わし、

$$\begin{aligned} U'_R &= U_R / U \\ f \alpha &= 6.13 A / (2.25 + A) \end{aligned}$$

また、 A_R : 舵面積

A : 舵のアスペクト比

である。舵の有効流速は舵位置の有効伴流係数で定義し、次式で表わす。

$$U'_R = 1 - w_R \quad \dots\dots (2.7)$$

上記直進中の舵角試験で計測された舵直圧力から舵直圧力一致法にて $(1-w_R)$ を求めることができる。本船ではこの値は0.5と通常船舶に較べて小さく、舵直圧力のみならず舵抵抗も小さくなっている。

$$\begin{aligned}
X'_R &= -(1-t_R)C_\delta \delta^2 = X'_{\delta\delta} \delta^2 \\
Y'_R &= -(1+a_H)C_\delta \{\delta - \gamma_R \beta / (1-w_R)\} \\
&= Y'_{\delta} \{\delta - \gamma_R \beta / (1-w_R)\} \\
N'_R &= -(x'_R + a_H x'_H)C_\delta \{\delta - \gamma_R \beta / (1-w_R)\} \\
&= N'_{\delta} \{\delta - \gamma_R \beta / (1-w_R)\} \\
K'_R &= (z'_R + a_H z'_H)C_\delta \{\delta - \gamma_R \beta / (1-w_R)\} \\
&= K'_{\delta} \{\delta - \gamma_R \beta / (1-w_R)\}
\end{aligned}
\quad \dots\dots (2.9)$$

ここに,

$$C_\delta = (A_R/Ld) \{6.13A/(2.25+A)\} (1-w_R)^2$$

(2) 帆および船体上部構造物に働く力

帆および船体上部構造物の空力係数は相対風向 ϕ_a に依存し、これを次式で表現する。

$$\begin{aligned}
X^*_A(\phi_a) &= X_A / (\rho_a/2) A_s U_a^2 \\
Y^*_A(\phi_a) &= Y_A / (\rho_a/2) A_s U_a^2 \\
N^*_A(\phi_a) &= N_A / (\rho_a/2) A_s L U_a^2 \\
K^*_A(\phi_a) &= K_A / (\rho_a/2) A_s d U_a^2
\end{aligned}
\quad \dots\dots (2.10)$$

ただし, A_s : 帆面積 (有効帆)

U_a : 相対風速

ϕ_a : 相対風向

ρ_a : 空気の密度

空力係数 $X^*_A, Y^*_A, N^*_A, K^*_A$ は風洞試験により求められる。

本船の風洞試験は縮率1/75の模型船を用い、大阪大学工学部の試験風洞にて実施した。操帆は日本丸の航海士である著者の一人が担当し、実船の経験を活かして帆のトリムを行った。帆装状態は図5に示す①～④の状態で、その試験結果を図6に示す。

(3) 帆走時の平衡方程式

前述の(2.3)式～(2.4)式, および(2.9)式～(2.10)式を(2.2)式に代入すると、以下の U, β, δ, ϕ に関する平衡方程式が得られる。すなわち,

図5 風洞試験の帆装状態

図4 舵角試験時の舵直圧力係数

図6 風洞試験による帆と船体上部構造物の空力特性

図7 各種帆装状態の帆走性能(真風速10m/sの推定)

$$\begin{aligned}
 & X'_0 + X'_{\beta\beta}\beta^2 + X'_{\beta\phi}\beta\phi + X'_{\phi\phi}\phi^2 + X'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + X'_{\beta\beta\phi}\beta^2\phi + X'_{\beta\phi\phi}\beta\phi^2 + X'_{\phi\phi\phi}\phi^3 + X'_{\delta\delta}\delta^2 + X'_A(\rho_a/\rho)(A_s/Ld)(U_a/U) = 0 \\
 & \{Y'_\beta - Y'_{\delta R}/(1-w_R)\}\beta + Y'_\phi\phi + Y'_{\beta\beta}\beta^2 + Y'_{\beta\phi}\beta\phi + Y'_{\phi\phi}\phi^2 + Y'_{\delta\delta}\delta^2 + Y'_A(\rho_a/\rho) \\
 & \times (A_s/Ld)(U_a/U)^2 = 0 \\
 & \{N'_\beta - N'_{\delta R}/(1-w_R)\}\beta + N'_\phi\phi + N'_{\beta\beta}\beta^2 + N'_{\beta\phi}\beta\phi + N'_{\phi\phi}\phi^2 + N'_{\delta\delta}\delta^2 + N'_A(\rho_a/\rho) \\
 & \times (A_s/Ld)(U_a/U)^2 = 0 \\
 & \{K'_\beta - K'_{\delta R}/(1-w_R)\}\beta + K'_\phi\phi + K'_{\beta\beta}\beta^2 + K'_{\beta\phi}\beta\phi + K'_{\phi\phi}\phi^2 + K'_{\delta\delta}\delta^2 + K'_A(\rho_a/\rho) \\
 & \times (A_s/Ld)(U_a/U)^2 - g \cdot Cb(B/d)GM \cdot \sin \phi / U^2 = 0
 \end{aligned}$$

.....(2.11)

ただし, U_a : 相対風速

g : 重力加速度

ρ_a : 空気の密度

ρ : 水の密度 (実船では海水の密度)

種々の風向・風速に対する帆走性能は上記平衡方程式を解くことにより求められる。ただし、この場合解析的な解法は不可能なので、電算機で数値的に解くことになる。具体的には、種々の風速と風向に対し、ある仮定した U, β, δ, ϕ の周りで(2.11)式を線形展開し、多元 Newton-Raphson 法によって求めるという手法である。

なお、実船の性能推定に際しては、各流体力は無次元係数の形にしていることから、基本的にスケールが異なっても同じ係数を適用することができる。しかし、一部の係数、特に水の粘性に大きく依存する部分については尺度影響の修正が必要である。本報では船体の抵抗係数を3次元外挿法により、また舵の有効伴流 $(1-w_R)$ を

プロペラ有効伴流と同じ方法でスケールアップすることとした。

3. 帆走性能の推定結果

前述の数学モデルを用いて、各種の帆装状態に対する定常帆走性能を求めた。その結果を図7に示す。真風速は10m/sとしている。上段から帆走速力率、横流れ角 (lee way), 傾斜角, そして平均当舵であり, これらを真風向に船の横流れ角を加算した角度, すなわち風上から計った船の進行方向に対して表示する。

フルセイルの状態①の帆走速力率は風上から90°~120°の方向への帆走で最大となり, その値は約0.6と推定される。風上への切り上がりは55°付近で最大となり, その時の速力率は0.35~0.4程度と推定される。120°より風下側への帆走では, 追っ手になるに従い速力率が低下し, 真追手の風における速力率は0.3となる。横流れ角や当舵は風上へ帆走するに従い増加し, 切り上がり性能最大の時, 横流れ角が5°, 当舵が7°程度になる。それより風上側に帆走すると, 横流れ角と当舵は急激に増加し, 速力も著しく低下する。傾斜角はアビームへの帆走が最大になる。

ステイスルを除いた状態②では, 帆面積が減少し, 最大速力率はフルセイルより低下する。しかし, 横方向の風圧力が小さくなり, 横流れ角や当舵が小さくなって切り上がり性能がやや向上する。横流れ角の大きさはフルセイルと顕著な差はないが, 当舵はフルセイルに較べて2°程度小さくなる。傾斜角も帆の横力が小さくなることから減少する。

後方の帆を順次外していくと, クォーター方向の帆走速力は低下するが, 当舵はほとんど不要になる。これ

図8 フルセイルの帆走性能の推定と実測の比較

図9 ステイスルを除いた帆走性能の推定と実測の比較

は既に述べたように船体の C.L.R が船体中央から前方 $0.28L$ にあり、この状態における帆の C.E がほとんどこの付近となることによっている。

4. 実船の帆走性能との比較

前述の推定した帆走性能がどの程度、実船の性能を表現しているかを以下に検討する。

練習帆船日本丸には、風向・風速、船速、横流れ角、傾斜角、舵角が一定時間毎に自動計測できる装置が装備されており、航海中の船体運動が記録できるようになっている。実船の帆走実績例として海象が比較的安定していた1985年の第2次航海の Los Angeles から日本の間に計測されたデータ⁽³⁾を用いる。なお風向・風速は文献(6)に示された方法に従って観測された風向・風速の修正を行った。計測点数はフルセイルの状態が144点、ステイスルを一部ないしは全部除いた状態が857点あり、それぞれの状態に分けて比較する。なお帆走状態③および④に相当する状態はない。真風速はいずれも10m/s 前後である。

まずフルセイルの状態について、推定結果と実船との比較を図8に示す。速力率はアビームおよび追っ手付近で両者はほぼ一致しているが、クォーターリーでは推定値がやや大きくなっている。横流れ角は計測のバラつきが大きい、平均的に推定値はよく合っていると言える。横傾斜角、当舵の推定値も実船とほぼ一致する。

ステイスルを外した状態の推定結果と実船との比較を図9に比較する。実船の横流れ角は相当バラついており、実船における横流れ角の計測の困難さが理解できよう。速力率はクォーターリーでやや推定値が大きいと思われるが、平均的にはかなりよく合っている。また、このデータはまた風速が10m/s 付近によくまとまっており、速度に依存する傾斜角が推定値とよく合っている。当舵も平均的に推定値と実測はよく一致していると言える。

5. あ と が き

模型試験で流体力成分を計測し、この流体力係数を用いて大型練習帆船の帆走性能を推定することを試みた。そして、これらを実船の航海実績と比較することによって、本報の推定精度を確認した。その主要な結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 実船の帆走性能を推定する手法として、本報に示した数学モデル、すなわち水面下の船体に働く流体力を MMG モデルで表わし、これに帆の力を加える方法は、流体力学的メカニズムがかなり明確になり、実船へのスケールアップも容易である。
- (2) 実船の帆走性能を推定し、これを実船の結果と比較した結果、速力率、横流れ角、傾斜角、当舵とも平均的に推定値は実船の航海実績によく合うことがわかった。風洞試験で縮率が1/75という小さな模型を使用しても、数多くの帆の調整を実船とほぼ同じにすることによって、帆の空力特性の大略は把握できるものと考えられる。
- (3) しかし、より詳細にみると、クォーターリーへの帆走速力率の推定がやや過大となっていることが指摘でき、この付近の帆の力がやや過大と思われる。この原因の一つとして、この場合の相対風向が約 90° となって、風洞試験の閉塞率が最大となることから、あるいはこの時の閉塞率の修正方法に多少問題があるのかも知れない。この点は今後更に風洞試験で確認する必要があるだろう。

最後に、風洞試験の実施にあたっては、大阪大学工学部の五十嵐技官に多大の協力を頂いた。また、実船の帆走性能解析に際しては住友重機械工業(株)平塚研究所の門松浩司研究員に協力を頂いたことを付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 田辺 稷, 他: 日本丸航海実績の解析, 航海, 第94号(1987).
- (2) 大杉 勇, 他: 練習帆船日本丸の帆走性能に関する研究 (第1報, 第2報), 航海訓練所調査研究時報, 第63号, 第64号, (1987, 1988).
- (3) 雨宮伊作, 他: 練習帆船日本丸の帆走性能実験について, 日本航海学会論文集, 第79号 (1988).
- (4) 多々納久義, 他: 帆走の船舶流体力学的研究 (第1報~第6報), 関西造船協会誌, 第170号~第193号, (1978~1984).
- (5) 小瀬邦治, 他: 操縦運動の数学モデルの具体化, 第3回操縦性シンポジウム, 日本造船学会(1981).

- (6) 雨宮伊作, 他: 練習帆船日本丸の帆の空力特性について, 日本航海学会第83回 (平成2年度秋季) 講演会にて発表。

質 疑 応 答

烏野慶一(北海道大学水産学部): 切り上がり性能において, フルセイルの場合とステイスルを除いた場合とを比較しますと, フルセイルの場合が良くない結果となっています。その理由をご教示下さい。

芳村康男: 通常ステイスルは切り上がり性能を良くすると言うのが一般的な認識のようです。しかし, 今回の実験結果からの推定では, ステイスルを除いた状態で風上へ帆走する場合, 帆の前進推力が減少すると同時に帆の横方向の力も小さくなり, これが船の横流れ角や当舵を小さくして, 水面下の前進抵抗を減少させるというメカニズムになっています。なお, これが実船でも実現されているかについては, その差はわずかでもあり, 残念ながら確認できておりません。