練習帆船日本丸の帆の空力特性について—II.

—マスト別の特性と流れの可視化について—

雨宮 伊作*・塩田 重須*・福井 寛明*

多田納久義**・芳村 康男***

On the Aerodynamic Characteristics of the Sail Training Ship NIPPON MARU

—Aerodynamic Characteristics and Flow Visualization on Each Mast—

Isaku AMEMIYA, Nobumochi SHIOTA, Hiroaki FUKUI,

Hisayoshi TATANO and Yasuo YOSHIMURA

Abstract

By means of wind tunnel experiments, Aerodynamic Characteristics of The Sail Training Ship NIPPON MARU were presented. These results were applied to practical ship maneuvering.

The Jigger mast as a 4.1 high aspect ratio sail showed phenomenon to stall at 15 degrees of the attack angle, the maximum lift coefficient value reached 1.1 though the Fore mast as a 2.2 aspect ratio sail with 6 square sails didn't stall until 30 degrees but indicating the max. C_L value 1.0. Also, Jigger was larger than Fore at the drag coefficient value that had bad effects on windward performance.

Thrust force of Jigger mast and Fore mast sails had similar tendencies at close-hauled or beam reach conditions. The difference of windward performance depended on sail trimming angle, as the yards bracing angle of square rigger like the NIPPON MARU was restricted by standing rigging over 30 degrees.

On the actual ship, Sail scandalizing experiments carried out in following wind and wave conditions of the Winter North Pacific Ocean. Course keeping ability were improved by decreasing sails from after mast.

1. はじめに

筆者らは、運輸省航海訓練所の練習帆船日本丸で使用されている帆の空力特性等について報告してきた⁽¹⁾⁽²⁾。今回は、ジガーマスト単体についての風洞実験結果を行い、各種の帆の実験結果との比較を含めて報告する。また展帆状態を変化させた風洞実験結果から帆走速力率等の推定を行ったが⁽³⁾、同様の状態での実船実験を行ったのであわせて報告する。

* 正会員 運輸省航海訓練所（〒100 千代田区霞ヶ関2-1-3）

** 正会員 大阪大学工学部（〒565 大阪府吹田市山田丘2-1）

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

2.1 風洞実験

JIGGER MAST

Ssail area=0.117m²

Aspect ratio=4.10

1.025

130

130

255

150

163

144

143

205

300

31.8

350

481

検力計

床面

単位=メートル

図1 ジガーマスト模型

図 2 座標系

写真1 ジガーマスト $\alpha=10^\circ$
(マストの影響が観察できる)

写真2 ジーガースト $\alpha=20^\circ$
(剝離が始まっている)

写真3 ジガーマスト $\alpha=30^\circ$
(完全に剝離している)

写真4 フォアマスト $\alpha=20^\circ$
(帆に沿って流れている)

写真5 フォアマスト $\alpha=30^\circ$
(剥離が始まっている)

写真6 フォアマスト $\alpha=90^\circ$
(帆の隙間から風が抜けている)

写真7 アッパーゲルンスル $\alpha=30^\circ$
(帆に沿って流れている)

測定項目は揚力 L 、抗力 D 並びに鉛直軸周りのモーメントを計測し、風洞の閉塞率修正も前回同様の方法⁽⁴⁾で行った。これらを次式により無次元化し、さらにヤード開き角度 ε を与えて、視風向毎の推力係数 C_X 及び横力係数 C_Y を計算した。

$$C_L = L / 0.5 \times \rho_A \times S \times U_A^2 \quad \dots\dots(1)$$

$$C_D = D / 0.5 \times \rho_A \times S \times U_A^2 \quad \dots\dots(2)$$

$$\gamma_A = \varepsilon + \alpha \quad \dots\dots(3)$$

$$C_X = C_L \times \sin \gamma_A - C_D \times \cos \gamma_A \quad \dots\dots(4)$$

$$C_Y = C_L \times \cos \gamma_A + C_D \times \sin \gamma_A \quad \dots\dots(5)$$

ここに

C_L : 揚力係数

C_D : 抗力係数

ρ_A : 空気密度

S : 帆面積

U_A : 視風速

γ_A : 視風向

α : 迎え角

ε : ヤード開き角

C_X : 推力係数

C_Y : 横力係数

γ_T : 真風向

β : 横流れ角

ϕ : 傾斜角

δ : 舵角

またあわせて可視化実験をジガーマスト、フォアマストについてスモークワイヤー法で行い、その時の上限風速は約2m/secであった。煙を流す高さ h については、帆の中央付近を通る流れを0.5としている。

表1 使用模型・実験諸元

Sail	Jigger Mast	Fore Mast	Upper Toppallant	Full Sails
Number of Sails	3	6	1	36
Scale	1/40	1/75	1/20	1/75
Sail Area (m ²)	0.117 (187)	0.106 (597)	0.163 (74)	0.491 (2,760)
Aspect Ratio	4.10	2.22	0.29	-
Reynolds Number	2.30×10^5	2.03×10^5	5.20×10^5	1.10×10^6

図3 揚力係数 C_L 図4 抗力係数 C_D

2.2 帆の揚抗特性

各種の帆の揚力特性を図3に抗力特性を図4に示す。また流れの可視化実験結果を写真1から写真7に示す。ジガーマストでは迎え角 20° 付近ですでに流れは帆から剥離を始めており、揚力のピークも 15° 付近となっている。帆の前端いわゆるリーディングエッジにマストがあって、そこで流れが影響を受けていることが観察できる。これに対しフォアマストでは迎え角 20° 付近では流れは帆に沿っており、 30° 付近で剥離を始めていることが観察できる。揚力係数もこの付近で降下を始めその値はジガーマストよりやや低くなっている。一方単独のアップーゲルンズルでは迎え角 30° を超えても流れは剥離せず、ようやく 50° 付近で揚力は降下を始めている。揚力の傾斜はジガーマスト、フォアマスト、アップーゲルンズルの順で大きく、帆のアスペクト比の大きな順になっている。

一方、抗力はジガーマスト、アップーゲルンズルがフォアマストに比較して大きな値を示している。フォアマストの6枚の横帆の間から風が抜けている様子が可視化写真から観察されたが、このことがフォアマストの抗力を小さくしている一因となるかもしれない。また自由渦の発生状態もアップーゲルンズルのような大きな渦はフォアマストの場合には観察できず、ジガーマストでは、上端のガフトップスルの斜めになっているアフターリーチで渦が発生していることが観察された。

2.3 帆の推力特性と横力特性

各種の帆の推力特性を比較するために、3種類の帆の揚抗特性から推力係数及び横力係数を計算しフルセールの船体模型実験結果もあわせて図5及び図6に示した。日本丸では構造上ヤード開き角 ϵ を 30° より小さくすることができないため、すべての帆について $\epsilon \geq 30^\circ$ の条件で計算したものと、 $\epsilon \leq 30^\circ$ としたものを分けて示した。またフルセール模型については他の帆模型と異なり船体模型も含んでおり、無次元化の際に船体側面積と帆面積の和を採用している。これらの結果をまとめると次のようになる。

(1) 最大の推力係数 C_x はアップーゲルンズルの視風向 $\gamma_A = 135^\circ$ 付近で得られる。しかし視風向 90° 以下及び 150° 以上ではジガーマストが最も大きい。また横力係数 C_y についてはアップーゲルンズルが大きな値を示しており、フルセールも大きな値を示している。

(2) ジガーマストとフォアマストを比較すると、推力係数では視風向 120° 付近以下まではほとんど差が生じていないが、視風向 120° 以上では抗力の差からジガーマストが大きな値を示している。一方横力係数ではフォアマストが小さくなる傾向を示している。

(3) 横帆6枚を連ね、全体のアスペクト比では約2となるフォアマストはアスペクト比が約0.3の横帆単独のアップーゲルンズルよりもフルセール船体模型と傾向が良く似ている。

図5 推力係数 C_x 図6 横力係数 C_y

3. 実船による減帆実験

3.1 実施海域及び方法

毎年航海訓練所の練習帆船は冬季遠洋航海を米国に向けて行ってきた。北太平洋を東航する場合、強い偏西風と巨大なうねりを追い風に受けて航海を続けることになり、こうした条件下ではしばしば保針に苦慮しなければならないことが多い。そこで通常強風下では上方の帆から畳むのに対して、後方のマストから帆を減じることを風洞実験で試み、帆走性能を推定し⁽³⁾、1991年冬、北太平洋において減帆の実船実験を行った。

海域は北東貿易風帯であったが、夏季に比べて不安定であり、実験期間を通して4 m程度のうねりが存在していた。測定項目はヤード正横のまま展帆状態毎に一定針路で航走し、針路、速力、横流れ角、傾斜角、舵角等を測定し、これらから、速力率を算出したもので、1986年に行った実験とはほぼ同様の方法によった⁽⁵⁾。また帆の空力特性についても流体力微係数等から推定を行った。

3.2 実験結果

展帆状態別の速力率ポラーカーブを図7に示す。点線は風洞実験からの推定カーブで実線が今回の実船実験値である。また、一点鎖線で1986年の夏季貿易風帯で得たフルセールの実船実験値を示している。今回の実験値が最大8%ほど低い理由としては、4 mのうねりの存在、風の不安定、出渠後の経過日数が約5ヶ月と長かったこと等があげられる。

図8には風洞実験で得た推力係数 C_x を展帆状態別に実線及び点線で示し、実船実験からの推定値をマークで示している。また測定した横流れ角 β 、傾斜角 ϕ 及び舵角 δ を図9に示し、風洞実験からの推定値を実線及び

図7 速力率ポラーカーブ（点線は風洞実験からの推定値）

図8 展帆状態別推力係数

(フルセール面積+船体側面積で無次元化)

図9 横流れ角 β , 傾斜角 ϕ , 舵角 δ

点線で示している。速力率、推力係数ともに風向角が前方になるとうねりの影響からか、実船の方が小さく、また当て舵量にもはっきりとした差異が見いだせなかった。このため針路を安定させる効果を定量的に同実験から示すことはできなかったが、後方から減帆することにより舵の座りが良くなったことは、実際に操船して感覚的には確かめられ、同様の感想は、ベテランの操舵手も述べている。

4. 考察

本研究結果から、実船の操帆上には次のようなことを留意すると良いと思われる。

- (1) ジガーマストは迎え角が 15° 付近を過ぎると揚力が降下し始めるので、風上へ切り上がって航走するクロスホールドや横風を受けるビームウィンドでは視風向に対して小さな迎え角 α を取るようトリムするとよい。大きな迎え角をとると横力が大きくなり、船の回頭モーメントにも影響を与えて、当て舵を増すことになる。
- (2) 斜め後ろからの追い風クォーターウィンドでは、日本丸のジガーマストは約 45° までしかブームを開くことができないので、推力より横力や回頭モーメントを増加させるおそれがある。特に強風時は船首を風上に切上げ当て舵量を増加させるので、このような場合縮帆しておくことが妥当であろう。
- (3) フォアマストはマスト全体の特性を考えると迎え角 20° から 30° で大きな揚力を得られる一方、上方から減帆するとアスペクト比が低くなることにより風上航の性能が落ちる可能性がある。よってクロスホールドやビームリーチでは帆のアスペクト比を小さくしないほうが帆走性能を落とさないと思われる。
- (4) 後方からの風では、展帆面積を少なくしても速力率や推力に差が生じにくい。後方のマストの帆から減じると速力をあまり減少させずに針路を安定させやすくなる可能性がある。ただしフォアマストのみで航走すると、横流れ角が大きくなる傾向があり、操船を船尾で行う帆船では帆の状態が把握しにくいということもあって、荒

天下実船での操船には、フォアマストのみの展帆は適していないようであった。実際には低アスペクト比の帆が大きな抗力係数を得る事も利用して、例えば、フォアマスト6枚、メインマスト4枚ないし3枚、ミズンマスト1枚ないし2枚といった展帆状態が推奨される。

5. ま と め

本報告中の検討結果からは次のようなことが言えるであろう。

(1) 風上航性能は視風向が小さい時の推力係数を大きくするとともに横力係数を小さくすることに左右されるが、横帆マストと縦帆マストには推力係数でほとんど差がない一方、横力係数は横帆マストの方が小さい。

ただし横帆を備える帆装では構造上ヤード開き角 ε を小さくできにくいことがあり、縦帆では ε を 0° にすることができが逆に大きくすることが困難な場合が多い。縦帆船と横帆船の風上航性能の差はこの点に起因すると思われる。

(2) マスト高さを一定とするなら横帆マストの方が展帆面積を大きくでき、推力を高めることができる。このことは、現在各地で造られている橋梁がマスト高さを50mから60m程度に制限していることで大型帆船にとって重要である。

(3) 大洋をその風系を利用しながら横断するような航海をする大型帆船には、上記の理由で推進性能の良い横帆中心の帆装が適当であろう。一方沿岸航海を中心とする中、小型帆船には小回りのきく縦帆中心の帆装が適当であるが、横帆を適切に使用した場合荒天下の順走に有利なことがあり、フォアマストに横帆を有する帆装が推奨される。現在、世界各国で青少年の教育訓練に帆船を利用する機運が高まって帆船建造が続いており、わが国でも数隻が就航予定である。その帆装形式には大型帆船では、バーク型ないしシップ型が採用され、中小型帆船では、トップスルスクナー型や、ブリガンティン型が採用されていることが多いようである。これらの経験的選択が、船舶流体力学的にも一致することを示唆できたとすれば幸いである。

おわりに風洞実験に際して様々なご教示をいただいた、大阪大学工学部の浜本剛実、田中一朗両教授、五十嵐一孝技官に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 多田納久義, 大杉 勇, 雨宮伊作, 芳村康男: ある横帆模型の空力特性と帆まわりの流れについて, 日本航海学会論文集第84号, 平成3年3月
- (2) 雨宮伊作, 大杉 勇, 多田納久義, 芳村康男: 練習帆船日本丸の帆の空力特性について, 日本航海学会論文集第84号, 平成3年3月
- (3) 芳村康男, 田辺 穰, 大杉 勇, 雨宮伊作, 多田納久義: 大型練習帆船の帆走性能の推定, 日本航海学会論文集第84号, 平成3年3月
- (4) 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, 昭和57年6月
- (5) 雨宮伊作, 大杉 勇: 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, 昭和63年9月

質 疑 応 答

井上欣三(神戸商船大学): 流れの可視の方法から得られる現象面からの情報と流体力の計測から得られる力変動の情報とをどのように対応づければ, 双方の実験結果をうまく活かすことができるのでしょうか。

雨宮伊作: 今回の実験結果から申し上げれば, 帆面から流れが剝離することと揚力の降下点が一致し, 帆の種類による特性の差がわかりやすくなりました。また, 自由渦の存在が抗力や流れの剝離に及ぼす影響も観察することができました。