ある横帆模型の空力特性と帆まわりの流れについて

多田納久義*・大杉 勇**・雨宮 伊作**・芳村 康男***

On the Aerodynamic Characteristics and Flow Fields of Square Sails

Hisayoshi TATANO, Isamu OHSUGI,
Isaku AMEMIYA and Yasuo YOSHIMURA

Abstract

Through wind tunnel experiments, aerodynamic characteristics are presented for a square sail model of sail training ship, NIPPON MARU. Unlike of large aspect ratio wings which show a phenomenon of stall, the lift coefficient of the sail increases its value with increasing attack angles and the maximum value reaches 1.3 or more at 45~48 degrees of the attack angle. Even for more larger angles, there are no stall and the lift coefficients gradually decrease the value.

The flow visualization was conducted in order to provide the information for the lift-drag phenomena utilizing smoke wire technique. The results tell us that a pair of free vortices generated from upper and lower ends of the sail looks comparatively large for the sizes of the sail and then the down wash due to the vortices also becomes large as to delay the growth of separation.

In test results of the fore mast model with 6 square sails, the lift coefficient curve shows the same tendencies with the one for the single square sail. But the maximum lift coefficient is 1.03 at 30 degrees of attack angle.

1. は じ め に

本論文は練習帆船日本丸の横帆に於ける上から2番目, UPPER TOPGALLANT SAIL の空力特性を硬帆, 軟帆の風洞試験によって求めるとともに, この帆まわりの流れを『スモークワイヤー法』によって観察した結果から, 空力特性と流れの関係を明らかにするのを主眼とした。また同じ帆が布製の場合ならびに横帆6枚の場合の空力特性も求めて比較検討したものである。

横帆単独の場合に, 帆まわりの流れを可視化してみると, 帆の上下端から発する互いに逆まわりの自由渦(翼端渦とも呼ばれる)の間隔が狭いことから, この一対の渦による吹降ろしが帆の背面の流れの剝離を抑える働きをしている。このため迎角が 25° ~ 30° と大きくなっても大きなアスペクト比の翼で起きる, いわゆるストールは生じない。前述のような流れの可視化は極端に低い風速で実施されるのが一般的であって, 本例の場合も2.2 m/s の下で実施したのであるが, 実船の帆の特性を推定するにはずっと高い風速, つまり高レイノルズ数下での試験結果を用いる。そこで今回も風速10m/s, レイノルズ数, 5.2×10^5 における試験も併せて行い, 前述の流れの可視化の時相当の風速における結果と比較したが, 両者の差は小さく問題にする程ではなかった。

また実測結果に対し, 風洞試験における閉塞率の修正を加えて実際の帆の特性とするので, この修正量が大きすぎても流れの可視化との対比がむずかしくなる。今回はこの問題もなかった。

次に同じ横帆の布製のもの(以下これを軟質横帆と呼ぶことにする)は前述のエポキシ製のもの(以下これを硬質横帆と呼ぶことにする)に比べ実験の結果, やや揚抗特性が劣るが, それは布製のために, 硬質横帆と全く

* 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 運輸省航海訓練所(〒100 千代田区霞が関2-1-3)

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

同じ形に作れないことに原因があると思われる。

また日本丸のマストに装備されている6枚の横帆の縮尺1/75の模型についても単独帆の場合と同様に流れの可視化を行い、空力特性を求めて比較検討した。

SAILS	PROJECTED AREA m ²	MEAN t _v /H	t _{MAX} 700
HARD	.163	.18	.12
SOFT	.168	.23	.16

FOR HARD SAIL

PROJECTED SAIL AREA = 0.163 m²
 MEAN CHORD LENGTH = (0.7 + 0.8)/2 = 0.75 m
 MEAN SPAN = 0.163/0.75 = 0.217 m
 ASPECT RATIO = 0.217²/0.163 = 0.289

図1 横帆模型の形状と諸寸法等

図2 ヤード付マストの模型

2. 帆模型と風洞試験の方法

今回使用した硬質横帆模型は縮尺1/21.2のやや硬いエポキシ製で、一応実際の帆に似た膨らみをつけてある。この帆模型の形状と寸法を図1に示す。図中にはキャンバーの値の一例も示している。弦長は上端で700 mm、下端で800 mmであり、レイノルズ数算定用の長さにはこれらの平均値、750 mmを使用した。

無風時の正面投影面積は0.163 m²であり、揚力等の無次元化にはこの値を使用した。またこの帆とほぼ同じ寸法の軟質模型は展帆時の写真から計ると硬質のものと若干形状や面積が違っており、その程度は図1に併せ示してある。これらの帆模型は図2に示すヤード2本をもつマストに固定し、帆に迎角を与えるには鉛直に立てたヤード付マスト全体を迎角相当分だけ水平

図3 帆模型の計測量と無次元表現

に回転させ、揚力や抗力ならびに鉛直軸まわりのモーメントの計測はこのヤード付マストの下端に固着した検力計によって検出した。

横帆6枚の模型は縮尺1/75、軟質横帆6枚付のFORE MASTを検力計の上に設けた金具の上に固定して試験を行った。試験結果にはこの金具の抗力を除いたものを示している。なお軟質横帆の素材は単独、6枚組の場合共1.8 oz/yd²のナイロンスピクロスである。

計測した揚力等の無次元化は図3に示す(1)式に従い、また閉塞率の修正をしない場合の揚抗力係数には添字Uを付加している。なお、閉塞率の修正方法は文献⁽¹⁾に従った。また流れの可視化については文献⁽²⁾に詳しく述べられているので本論文では省略する。

3. 横帆の空力特性

3.1 硬質横帆

硬質横帆について帆まわりの流れと空力特性の対応を見るために流れの可視化を行ったと同じ風速、2.2 m/s、レイノルズ数、1.2×10⁵における揚力ならびに抗力係数を図4に示す。まず閉塞率未修正の揚力係数を見てみ

図4 硬質横帆の空力特性

図5 硬質横帆の空力特性に及ぼすレイノルズ数の影響

る。迎角 5° から 25° まではほぼ直線的に増加し、 25° で0.90となる。迎角がさらに増加すると係数の増加率は鈍るものの 35° で1.18を越え、 $40^\circ \sim 48^\circ$ で最大値、1.31に達する。これ以上に迎角が増えると係数は急激に下がり、 60° で曲線は折れ曲がる。このとき係数の値は0.82となり、 90° では零となる。

一方、同様に未修正の抗力係数は迎角 55° まで増加を続け、1.56となる。迎角 60° になると少し小さい値、1.41を示すが以後再び迎角の増加に従ってわずかながら増加し、迎角 90° で 55° の場合と同じ1.56になっている。

ただこれらの結果は先にも述べたように低レイノルズ数における試験結果であり、実船の帆の特性はもっと高いレイノルズ数における試験結果によらなければならないと言われている。そこで本横帆に対しても、風速10 m/s、レイノルズ数、 5.2×10^5 において試験した結果を先の結果と併せ示したのが図5である。

両者の間に若干の差が認められるが、それらの差は比較的小さく、流れの可視化を行った場合と実船の帆の場合の流れの様子の間には差がないと見てよからう。但し、流れの可視化を行ったレイノルズ数、 1.2×10^5 における試験結果に閉塞率の修正を施すと図4に破線で示したようになり、迎角 40° 以上では特性が少し変わるのでこれを考慮する必要がある。例えば迎角 $60^\circ \sim 90^\circ$ の間では風洞試験で得られた抗力係数の82~84%が実船相当の値となる。これは狭い風洞内のため、帆模型まわりの風速が相対的に高くなるからだと考えられる。

3.2 軟質横帆

硬質横帆と同じ横帆の布製の場合についても空力特性を求めてみた。硬質横帆に出来るだけ近い形になるように製作したが迎角 90° の展帆状態では図1に示したように軟質横帆のキャンバーが縦横の両方向とも若干大きくなった。その外の迎角では帆形状の計測を行っていないのではっきりしないがこのキャンバーの差によるものであろうか、硬軟両質の帆の空力特性の間には図6に見られるような差が生じている。この空力特性の差は迎角の小さい間で生じており、迎角が大きくなり帆の背面に剝離を生ずるようになると両者の差はほとんど見られない。なお、このような軟質の帆は低い風速では形がくずれて帆の形をなさないから流れの可視化を行っても実船の帆とは異って意味がなく、また特性の差と帆まわりの流れの関係等についての知見を得ることは困難である。

図6 硬軟両質帆の空力特性の比較

4. 硬質横帆まわりの流れ

本節では横帆まわりの可視化写真について述べる。

迎角 20° の場合、帆の真上から写したものが写真1である。気流は『FLOW』の矢印方向、写真に向って左から右に流れている。白い帆の上側が帆の背面であり、反対の下側にヤードがある。なお、写真中に『 $h=0.5$ 』とあるのは帆の上下方向の略中間からスモークを流していることを、また『 $h=0, 1.0$ 』と別の写真に示すのは帆の下端、 $h=0$ 及び上端、 $h=1.0$ の2ヶ所前方からスモークを流したことを意味している。また写真中に示した角度は帆の迎角で、ヤードと一般流とのなす角である。

写真1 迎角 20° の場合

写真2 迎角 30° 、帆の真上から見る

写真3 迎角 40° 、前端に剝離が発生

写真4 迎角 40° 、自由渦の下流側から見る

写真5 迎角 50° 、剝離は帆の半で消える

写真6 迎角 75° 、帆の斜め前から見る

写真2は迎角 30° のもので帆の上端前方 ($h=1.0$) からスモークを流し、帆にそって形成される自由渦の範囲を帆の上方から写したものである。これで見ると自由渦の外端はヤードの前端から斜め後方に向かって直線状に伸びており、この直線とヤードのなす角度は迎角の約半分て意外に大きい。このような発達過程をたどる自由渦による吹き降ろしは、帆の後面にゆくと強くなり剥離を生じにくくしている。

写真3は迎角 40° の場合である。ここまで迎角が大きくなると帆の前端に剥離が見られるので揚力特性が若干悪くなることが予想される。しかし吹き降ろしの影響により再び背面に沿った流れに変わるので、揚力特性の低下もそれほどではないだろう。

写真4は迎角 40° において自由渦の後方から写したものである。本例では帆の上下端前方の2ヶ所からスモークを流しているが、帆の下端 ($h=0$) 前方から帆の下端を回り自由渦を形成している方の流れがはっきり可視化されている。即ち帆の前方からの流れは、帆の下端よりかなり前方で斜め下方に向きを変え、帆を過ぎたあたりから上向きの流れとなり、帆の背面での自由渦を形成している。この自由渦の回転方向は、後方から見て上下互いに逆回りで、上のものが右回り、下のものが左回りである。従って帆の高さ方向中央では帆の背面に向って垂直に吹き込む流れ、いわゆる『吹き降ろし、Down-wash』が存在し、その結果帆の背面の流れに大きい影響を与える。特に本例のようにアスペクト比の小さい場合には上下両端から放出される自由渦の『吹き降ろし』が共に強めあって、帆の背面で発生するであろう剥離を常に抑制することになる。この現象を図示したものが図7で、写真では明確でない上下の自由渦の向きと吹き降ろしを描いている。

図7 横帆まわりの流れ場

続く写真5は迎角 50° の場合である。このように大きい迎角でも帆の前端で剥離した流れが帆の中間あたりで再び背面に沿う流れに転じている。従ってこのような大迎角でもストールは現れないだろうと想像され、図5でも揚力特性の低下量は迎角 45° の場合に比べわずかであることがわかる。

写真6は迎角 75° において帆の斜め前方から写したものであり、気流は右から左へ流れている。この状態ではもはや自由渦はなく、帆の後方に広い剥離域が形成されている。さらに迎角が大きく 90° となっても剥離の状態はこの場合とほぼ同じであった。

5. 横帆6枚の揚抗力

図8は横帆6枚付 FORE MAST を示したものである。縮尺 $1/75$ のため、模型の帆面積は 0.106m^2 と小さい。図中に示した帆6枚の高さと面積からアスペクト比を求めると 2.22 となる。ヤードは同一線上に並んでおり、各ヤード位置における迎角は同じ値をとる。この模型マストを鉛直に立て、ヤードごとと水平面内に回転させて迎角を与えたので、実船の展帆とは異っている。

帆の素材は軟質単帆模型と同じで、実船での展帆状態に近い帆形状になるよう工夫して製作した。しかし、各々の帆が小さく風速も 10m/s と素材の剛性に比較すれば低いため、必ずしも満足のゆく帆形状にはならなかった。流れの可視化実験も行ったがアスペクト比が 2.22 と大きいため、自由渦は帆の大きさに比べて小さくなったので、これが空力特性に与える影響

図8 横帆6枚の形状と諸寸法等

図9 横帆6枚の空力特性

MARKS	ASPECT R.	NOTE
○	0.289	SQUARE SAIL (HARD)
△	1/3	SQUARE SAIL
▲	1/3	FLAT PLATE
●	2.22	6 SQUARE SAIL

図10 参考文献の資料との特性比較

は単帆の場合よりずっと少ないだろうと思われた。事実、空力特性を示した図9にははっきりと現れている。即ち、最大揚力係数を示す迎角が45°を越えていた単帆の場合に対し、本例では30°に減少し、また最大揚力係数も1.0をわずかに越える程度である。ただアスペクト比が大きいため、揚力係数傾斜は大きく、単帆の場合に1.48であるのに対し、本例では2.0となっている。

一方、自由渦が小さくなっただけ抗力係数の値も減少し、また帆と帆の間に空いているためであろうか、迎角の大きい場合にも抗力が小さくなり、抗力係数は最大でも0.85に過ぎない。横力の見掛けの中心位置、 $1p'$ は単帆の場合に比べてその絶対値が小さくなる傾向が見られ、揚力や抗力係数曲線に折れ曲がりがないから $1p'$ にもそのような挙動はない。

6. 参考資料との比較

横帆単独の空力特性に関する資料はほとんどなく、ここではマルカイのアスペクト比、1/3のもの⁽⁴⁾ならびに文献⁽⁵⁾に示された同じアスペクト比、1/3の平板とわれわれの試験結果を比較することにし、まとめて図10に掲げた。同じ図中には著者の一人から提供されたJAMUDA SAILの特性も示したが、これは横帆のアスペクト比の変化が空力特性に与える影響を知る上で大変貴重なものである。マルカイの横帆模型の大きさや素材ならびに支持方法については記述がないのではっきりしないが、全体的には本例とよく似た特性だと言えよう。また平板では迎角が小さい場合には抗力も小さいが、キャンバーのある帆は迎角が40°~50°と大きくなると大きくなる。

横帆6枚の場合には小迎角でアスペクト比2のJAMUDA SAILの特性に近いが、迎角30°、最大揚力係数、1.02を示すあたりから抗力係数が増加し特性が急激に落ちる。

7. ま と め

練習帆船日本丸の横帆の風洞試験によって空力特性を求めるとともにスモークワイヤー法によって帆まわりの流れを観察し、次のような事実を明らかにした。

- 1 アスペクト比の小さい横帆の場合、帆の上下端から発生する自由渦の影響で帆の背面への強い吹き降ろしが剥離の発生を抑制する。従って帆の背面での全面的な剥離が生じないため、いわゆるストールの現象は起きない。このため、最大揚力の発生する迎角は40°~48°にも達し、この時の揚力係数は1.3となった。
- 2 ただ自由渦が強いため抗力も大きい。迎角が大きくなって全面剥離をするとその剥離域も広いようであり、抗力係数も大きくなる。
- 3 6枚の横帆では最大揚力係数は迎角30°で1.0を越える程度であり、帆と帆の間に隙間があるため、抗力係数は最大でも0.8と小さい。
- 4 本例のようにある対象物体の空力特性とその物体まわりの流れとの関係を知りたい場合、スモークワイヤー法によって流れを可視化することは簡単かつ有効な良い方法である。

本論文をまとめるにあたり、終始御指導を頂いた大阪大学浜本剛実教授ならびに田中一朗教授に御礼申し上げます。また風洞試験に際しては大阪大学教務員五十嵐一孝氏にお世話になった。御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 増山豊外：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，pp. 107～115（昭和57年6月）
- (2) 雨宮伊作外：練習船日本丸の空力特性について，日本航海学会，平成2年10月19日の講演会において発表
- (3) 田中一朗外：一様流中の乱れが舵の特性に及ぼす影響について，関西造船協会誌，第209号，pp. 47～55（昭和63年6月）
- (4) C. A. Marchaj: Aero-Hydrodynamics of Sailing, p.444, published by Granada Publishing Adlard Coles Limited, (1979)
- (5) Robaert D. Blevins: Applied Fluid Dynamics Handbook, p.335, Copyright 1984 by Van Nostrand Reinhold Company Inc.

質 疑 応 答

烏野慶一（北海道大学）：硬帆と軟帆では風圧を受けると大分形状が相違すると思いますが，特に流入角の小さいあたりでは顕著になるのではないのでしょうか，実験結果がありましたら御教示下さい。また，両者の帆の揚抗特性は似ているとの事ですが，流入角ベースに揚力及び抗力を比較した場合にはどうでしょうか。

多田納久義：本文中に軟帆のキャンバーの値を示しましたがこれは迎角90°の展帆状態の写真から計ったものであり，各迎角毎には計測しませんでした。

講演会では両者の特性の差を $C_L \sim C_D$ 曲線で示しましたが，御指摘のように迎角ベースの方が理解しやすいと思い，本文中にはそのような表現に改め，第3.2節の図6に掲げております。図中，迎角10°では軟帆の揚力の方が硬帆にわずかに勝っておりますが，それを越えると50°あたりまで硬帆の方が大きくなります。迎角が58°以上になりますと両者の間にほとんど差はありません。ただこのような特性の差と帆形状の相関関係を究明するところまでは立ち入っておりませんので，この点に関するお答えは出来かねます。