矩形帆の特性に関する実験研究

稲 葉 恭 人*

Experimental Studies on the Aerodynamic Characteristics of Rectangular Sails

Y. Inaba

Abstract

As a part of studies on the aerodynamic characteristics of rectangular sails, the writer performed wind tunnel experiments on the sail models indicated in Table 1. A sketch of the apparatus used in measurements of lift, drag and centre of pressure to various angles of attack is shown in Fig. 1. Table 2 indicates the Reynolds Numbers and effective angles of attack α in each measurement. Their coefficient about each model expressed by equations(1), and the stalling angles and maximum lift coefficient with parameter camber are obtained as shown in Figs. 2-7. Then, making use of these results obtained by the writer, coefficients of maximum thrust C_t and side force C_s at the same time expressed by equations(2) against θ_a , the directions of apparent wind from bow, are shown in Figs. 8-9, and its angles of attack α_m are indicated in Fig. 10. Some discussions of the findings are presented.

1. ま え が き

略正方形に近い矩形の、前後縁を固定した帆の揚力、抗力、圧力中心等の特性を風洞実験により求めたのでその結果を報告し、併せて若干の考察を試みる。

2. 実験について

表1 模 型 の 要 目

model number	span (m)	chord length (m)	aspect ratio	$\frac{\text{arc length}}{\text{chord length}}$	camber
No. 1	0.1405	0.1405	1.0000	1.000	0.0000
No. 2	0.1390	0.1370	1.0150	1.011	0.0622
No. 3	0.1390	0.1347	1.0315	1.028	0.1026
No. 4	0.1390	0.1222	1.1370	1.133	0.2287
No. 5	0.1390	0.1043	1.3320	1.328	0.3676

* 北大水産学部

2・1 模型 実験に使用した5種の帆模型の要目を表1に示す。表中 Camber は帆断面を円弧と仮定した場合の数値である。No.2 乃至 No.5 の模型は幅 0.139 m, 弦長 0.1385 m, 厚さ 3/100 mm のポリエチレン製で, 実験中の伸びを防ぐため弦の方向に等間隔に幅 5 mm のセロテープを貼付し, 支持ボルトの位置を移動して弦長を変えたものであり, No.1 の模型は No.2

表2 各測定時の有効迎角 (α°) と Reynolds Number $\times 10^{-5}$

model number		lift																	
No. 1	α	1.8	6.3	10.9	19.9	24.8	29.2	34.0	36.9	41.2	44.5	50.0	55.1	60.4	71.0	81.5	90.0		
	R. N.	1.384	1.384	1.359	1.290	1.334	1.206	1.196	1.177	1.168	1.187	1.196	1.168	1.157	1.168	1.177	1.177		
No. 2	α	1.6	6.0	10.5	19.4	28.7	33.3	36.4	38.6	44.3	49.6	54.9	60.2	70.8	81.6	86.8			
	R. N.	1.363	1.330	1.307	1.223	1.160	1.123	1.113	1.142	1.133	1.133	1.133	1.133	1.123	1.123	1.133			
No. 3	α	1.8	6.3	11.0	19.9	29.4	32.2	34.2	36.1	39.2	45.5	50.8	56.0	61.3	71.9	82.5	87.8		
	R. N.	1.313	1.273	1.231	1.155	1.118	1.095	1.095	1.091	1.091	1.128	1.137	1.109	1.109	1.109	1.100	1.100		
No. 4	α	2.1	6.4	10.9	19.6	24.2	27.0	29.0	34.1	39.3	44.5	46.7	50.5	56.3	61.6	72.1	82.5	87.8	
	R. N.	1.210	1.167	1.129	1.049	1.023	1.015	1.006	1.006	1.006	1.015	1.015	1.049	1.057	1.057	1.049	1.035	1.049	
No. 5	α	7.3	11.9	20.9	25.8	30.6	35.2	39.9	42.9	45.1	50.3	55.5	57.6	61.6	66.9	72.1	82.6	87.8	
	R. N.	1.015	1.000	0.949	0.929	0.908	0.894	0.879	0.879	0.886	0.873	0.886	0.894	0.908	0.908	0.922	0.922	0.922	
		drag																	
No. 1	α	0.0	1.8	6.3	10.9	19.9	29.2	34.0	39.0	44.5	50.0	55.1	60.4	65.7	71.0	81.5	90.0		
	R. N.	1.403	1.395	1.395	1.386	1.281	1.215	1.196	1.186	1.186	1.206	1.196	1.176	1.186	1.186	1.186	1.206		
No. 2	α	0.0	1.6	10.5	19.4	24.1	28.7	30.6	33.3	38.6	44.3	49.6	60.2	70.8	81.6	90.0			
	R. N.	1.343	1.343	1.283	1.210	1.165	1.151	1.119	1.119	1.109	1.128	1.119	1.109	1.109	1.109	1.119			
No. 3	α	0.0	1.8	6.3	11.0	19.9	29.4	31.3	34.2	36.1	39.2	45.5	50.8	61.3	71.9	82.5	90.0		
	R. N.	1.306	1.330	1.306	1.265	1.186	1.150	1.127	1.112	1.112	1.103	1.141	1.131	1.131	1.141	1.141	1.112		
No. 4	α	0.0	2.1	6.4	10.9	19.6	29.0	31.0	34.1	36.2	39.3	44.5	50.5	56.3	61.6	72.1	82.5	90.0	
	R. N.	1.239	1.239	1.180	1.133	1.058	1.015	1.015	1.006	0.997	0.997	1.015	1.041	1.041	1.041	1.058	1.033	1.058	
No. 5	α	2.7	7.3	11.9	20.9	30.6	35.2	39.9	45.1	50.3	55.5	61.6	66.9	72.1	82.6	90.0			
	R. N.	1.049	1.030	1.010	0.950	0.914	0.907	0.884	0.892	0.907	0.900	0.922	0.929	0.929	0.922	0.936			
		Centre of Pressure																	
No. 1	α	1.8	6.3	10.9	19.9	29.2	34.0	39.0	44.5	50.0	55.1	60.4	71.0	81.5	90.0				
	R. N.	1.370	1.370	1.336	1.258	1.194	1.165	1.145	1.155	1.155	1.155	1.155	1.145	1.145	1.155				
No. 2	α	1.6	6.0	10.5	19.4	28.7	33.3	38.6	44.3	49.6	54.9	60.2	70.8	81.6	90.0				
	R. N.	1.354	1.354	1.296	1.209	1.153	1.144	1.115	1.144	1.134	1.134	1.134	1.125	1.144	1.144				
No. 3	α	1.8	6.3	11.0	19.9	29.4	34.2	39.2	45.5	50.8	56.0	61.3	71.9	82.5	90.0				
	R. N.	1.260	1.282	1.231	1.173	1.136	1.108	1.089	1.127	1.127	1.118	1.127	1.136	1.127	1.118				
No. 4	α	2.1	6.4	10.9	19.6	29.0	34.1	39.3	44.5	50.5	56.3	61.6	66.9	72.1	82.5	90.0			
	R. N.	1.198	1.168	1.121	1.049	1.015	0.997	1.006	0.997	1.032	1.037	1.037	1.037	1.032	1.049	1.041			
No. 5	α	7.3	11.9	20.9	30.6	35.2	39.9	45.1	50.3	55.5	61.6	66.9	72.1	82.6	90.0				
	R. N.	0.986	0.986	0.925	0.891	0.883	0.869	0.869	0.869	0.869	0.891	0.898	0.898	0.905	0.898				

以下との比較のため、セルロイド板と真鍮板を貼合せた、厚さ 1 mm の不撓性平板で、共に 0.25 mm のピアノ線を前後縁に固定し、それにより支持ボルトに接続緊張する。

2・2 風圧測定装置 装置の略図を図 1 に示す。模型 A は支持ボルト B、回転板 C を介して 60 cm 角の枠 D に固定する。D は、下方両端に支点となるナイフエッジを有する金具 E により重さを支える。D は気流に垂直に置かれ、抗力は E を D に平行に固定してスプリング F_1 の伸びによりそのモーメントを測定し、揚力は E を D の面に直角に置いて F_2 により測定する。圧力中心は、E を取除き、枠 D の上下中心の軸を軸受に固定し、D に作用する回転モーメントを F_3 により測り、揚力、抗力の合力とその方向を基にして算出する。迎角は角度目盛板 G を読み、C を回転して決める。前項に述べたように B は C 上を移動調整出来る。

図 1 風圧測定装置の概要

2・3 実験方法 実験は No.1 より No.5 までの各模型につき迎角 α を 0° より 90° まで変えて揚力、抗力、圧力中心に関するモーメントを測定し、同時に気流の動圧、気温、気圧を讀取つた。各測定時の有効迎角に対する Reynolds Number を表 2 に示す。但しその風速は風洞吹出口断面のものを使用し、実験中最大 15.06 m/sec, 最小 11.85 m/sec であつた。長さとしては弦長をとっている。

3. 実験結果について

揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D 、圧力中心係数 C_P は次式により算定し¹⁾、図 2 乃至図 6 に示す。単位は kg-m-sec である。

$$\left. \begin{aligned} C_L &= F_x / \frac{1}{2} \rho S v^2 \\ C_D &= F_y / \frac{1}{2} \rho S v^2 \\ C_P &= t / l \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに

F_x : 揚力

F_y : 抗力

ρ : 空気密度

S : 帆の最大投影面積

v : 風速

t : 弦長

s : 帆の前縁より弦に沿うて圧力中心までの距離

実験結果に対する修正は、気流中にある支持ボルトの抗力修正、及び揚力に基づく境界影響の

図 2 模型 No.1 の特性

図3 模型 No. 2 の特性

図4 模型 No. 3 の特性

図5 模型 No. 4 の特性

図6 模型 No. 5 の特性

修正を抗力，迎角に対して行つた。但し気流断面積 C は 0.0564m^2 とし，係数 δ は $(-)0.1385$ とした。

4. 考 察

4.1 図5，図6 の C'_L ， C'_D は(1)式の S の替りに帆の表面積 $S_{\max}$ を代入したもので，同一の帆を運用する場合，Camber を増せば投影面積は減少し，相対的な揚力，抗力は小さくなることを示すものである。

4.2 失速角は No.1 より No.5 までの模型について順次 39° ， 40° ， 43° ， 48° ， 59° 附近である。これを Camber について図示すれば図7が得られ，略直線的に増加する。この迎角附近において C_L ， C_D ， C_P の各係数殊に C_L に顕著な変化が現われる。

4.3 C_L の最大値の迎角は No.4 の模型の場合を除き $37^\circ \sim 40^\circ$ にあり，これは C_D が大きく変化率を変える点即ち C_D の線の肩の部分と一致する。

4.4 No.1 の平板模型に於ては最大揚力係数の迎角と失速角は近接しているが，Camberが増

すにつれてその角度差が大きくなる。これが柔軟性があり自由に断面形状を変え得る帆面の特長の一つと考えられる。

4.5 C_L の最大値は Camber について図 7 に示すように変化し, No. 4 の Camber 附近において最大となる。各模型の失速角以上の迎角における下降する C_L の変化率は略等しい。

4.6 迎角が 0° 附近の C_D は Camber と共に大きくなる。又肩の部分即ち迎角が 40° 附近より以上の C_D の変化率は Camber が増すにつれて小さくなっているが, C_D の値そのものは若干大きくなる。No. 3 の場合を除き C_D が $\alpha=90^\circ$ で小さくなっているのは左右対称となつてかえつて渦流域が減少するためと考えられる。

4.7 迎角の小さいうちは帆面は風に対して袋状となり 後方に流れるため 圧力中心は中央より後方にあるが, それが前方に変わる迎角, 及び最も前方に移動する迎角は共に Camber の増加につれて大きくなる。圧力中心は平板の場合を除き失速角以上の迎角においては略中央に一定する。又 Camber が増すにつれて, 迎角の小さい場合の後方への移動量は大きくなり, 逆に中央より前方への移動量は小さくなる。

4.8 前記 4.1 に関連して, 同一の帆の運用に関する考察のため, その算定面積として表面積 $S_{\max}$ をとり, この矩形帆により生ずる推進力 F_t と横圧力 F_s を夫々の係数 C_t , C_s を用いて次式のようにあらわす。

$$\left. \begin{aligned} F_t &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_t S_{\max} \\ F_s &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_s S_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

船首尾線に対する相対風向 θ_a をパラメーターとしてその風向における C_t の最大値を実験結

図8 C_t の最大値と相対風向の関係

図7 失速角と C_L の最大値の Camber による変化

図9 C_t の最大値に対応する C_s

果の揚抗力より求めると図8が得られる。又これらの C_t の最大値に対応する C_s 及び迎角 α_m を図9, 図10に示す。 C_t は相対風向 130° で各模型共最大値をとり, この附近で C_s は負の値に変わる。切上りの限度と関連する $C_t=0$ の相対風向は Camber の小さい程有利であり, C_t の値は $\theta_a=50^\circ$ 附近までは No.2, No.3 が良く, それ以上の相対風向ではシートをゆるめて No.3, No.4 が大きくなるが, No.5 まで Camber を増すと No.1 の平板の場合と同程度まで減少する。これは係数算定に表面積をとっているためであり, 最大投影面積をとれば $\theta_a=130^\circ$ 附近で No.5 は No.4 と同程度となり Camber の大きさ自身の理由ではない。 C_s の値の一般的傾向として 90° 乃至 140° の直線的部分を除き, Camber の増す程正負共その絶対値は大きくなるので, lee way を考慮に入れば C_t の大きさのみを問題とすることは出来ない。 $\theta_a=180^\circ$ の C_s の値は開きを変換すれば, C_t には変化なく, 正負何れをもとり得る値である。 α_m の変化の形は前報告²⁾ の計算値と相似しており, $\theta_a=50^\circ$ 附近までは No.5 の場合を除いて参考書³⁾ に云う $\frac{1}{2}\theta_a$ に近い値をとり, それ以上 150° 附近までは各 Camber につき 30° 乃至 40° で変化が少ない。 150° 以上の相対風向になると急激に大きくなるが 180° においても 90° をとるのは No.3 だけで他は 81° 乃至 83° で最大の C_t となる。

図10 C_t の最大値に対応する α_m

5. あ と が き

5.1 本実験の前に 1.67×10^5 と 0.88×10^5 の両 Reynolds Number における同一模型の揚力係数の曲線が一致することを確認したのであるが, より以上離れた Reynolds Number の場合にこの実験結果を適用するには慎重であらねばならない。

5.2 考察は主として Camber の変化に基づいて行つたが, 各模型の aspect ratio も夫々変化しているためその影響も加わり, 又 Camber を変えると云うことも本実験の模型のような aspect ratio では二次元的な比較とは考えられない。従つてあくまで同一の矩形帆の場合として考えねばならない。

5.3 模型は前後縁にピアノ線が通つてはいるが附属品のない帆面のみと考えてよい。マスト, ヤード, ブーム等の艀装品や船体との相互干渉による影響は相当あるものと考えられるので実際の帆に適用する場合には十分な注意が必要である。

文 献

- 1) 航空評議会風洞試験統一主査委員会：風洞試験規程, (1942), p. 4
- 2) 稲葉恭人：帆走艇の推力係数その他について, 日本航海学会誌, 19 (1958) p. 91
- 3) 高等商船学校：短艇運用術参考書, (1946), p. 57