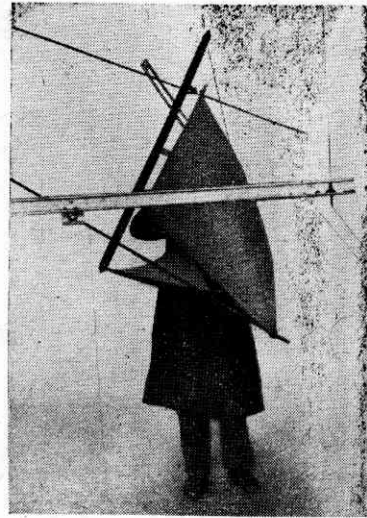


ヨットの帆の風洞実験

元 良 誠 三 (船舶)



実験中のヨットの帆

7月ともなるとヨットのシーズンであつて、海には帆に薫々と風まはらんだヨットが軽快に走っているのが見うけられる。ヨットはどうして走るか、性能のよい帆はどのような帆か、ということをも風洞で行つた実験の結果によつてここに紹介したい。

人類が船の推進力として風の力すなわち帆を利用するようになったのは紀元前約 6,000 年頃からであるといわれ、一時は数本のマストに数段の帆を張つて大洋を横断する巨大な帆船が海を壓したのである。

最近では機関の發達とともに帆船はだんだん實用面からは姿を消し、漁船のようにエンジンを持たないものあるいはエンジンの音で魚を逃がすと具合の悪いものに實用される外はほとんどスポーツ用のヨットとしてもつばら現在は使われている。

満々と全帆に薫風をはらみつゝ軽快に走るヨットはまさにサマースポーツの華であろう。戦争中一時廢れていたヨット競技も終戦後各大学および實業團のヨット部の復活とともにおいおい盛んになりつつあることは喜ばしい限りである。

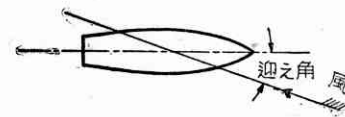
いままで帆について學問的な研究は主としてドイツで行われ、その一例をとるとエンカー教授が行つた実験では錫板を帆の形に切つて種々の形の帆の優劣を判定したものと、帆のふくらみ(これをアーチングという)を種々に變えて、それぞれの特性を調べたものでいづれも風洞において実験されたものである。したがつてこれらの実験より帆の形をどのようにに選定すべきかというようなことが判定されるのである。しかし、實際ヨットが走る際には単に一枚の板に風が或る迎角で當るといふ簡単な問題でなくて風の方向と艇體の方向によつて種々の姿勢の組合せが生じてくるのであつて、そのあらゆる姿勢における帆の性質を知らなければ、その帆が艇體に適合しているかどうかという優劣の判定は下せないわけである。

筆者はできるだけ實際航走時に取りよるような姿勢で風洞実験を行つて見ようと思ひ、昭和 22 年から 23 年にわたつて実験を行つて、一應定性的には結果をえたのであるが、相似則の問題や模型の材質、海面の風速の分布等

の問題があつて定量的には未だ決定的な結論を下しえない状態であるがここにその成果概略を述べて讀者諸賢の御批判を仰ぎたいと思ふのである。

1. 帆走理論

風が後から吹けば帆船はその抵抗で前に進むのは當然であつて、帆船とは後ろから風を受けて走るものであると考えている人が案外に多いのであるが、實際はこのような場合すなわち追手で走ることよりもむしろ横または

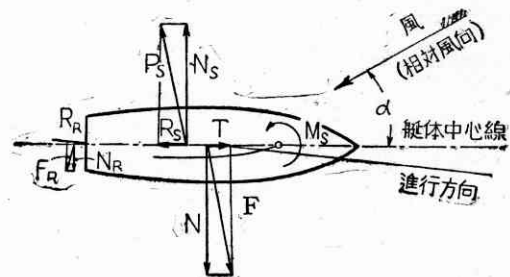


第1圖

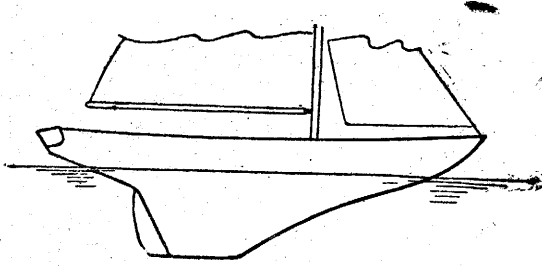
迎風で走ることの方が多いのであつて、特に風に向つて何度までさかのぼれるかということがヨットの性能上大切なのである。(第1圖)

ヨットが風に向つて走れるというのは帆の揚力作用に基いており、従つて帆は揚力を生ずる翼としての高性能を要求されるわけである。

第2圖において、風が艇體と α なる角度で當ると、帆が一つの翼として作用し、合力として(揚力抗力の)



第2圖



第 3 圖

F なる方向の力を生ずる。この F を艇體中心線方向の成分 T とそれに直角な成分 N とに分離する。この T が推力となり、 T が前向きであるかぎり艇は前進するわけである。もし空氣が理想流體であるならば帆は揚力のみを生じその方向は風の方に對し直角であるから、風の眞向を一寸でも外れれば T は前向となるのであるが實際は空氣の粘性によつて抵抗が生ずるので $T > 0$ となる限界の α は通常 30° 以上である。

一方艇は N という垂直分力によつて横に流されようとする。そこでヨットには第 3 圖のように水面 F に深く突きだしたフィンキールまたはセンターボートがあり艇が横流れをすると水がこれ等の翼型に對して式迎角を以て當るために大きな揚力を生じる。

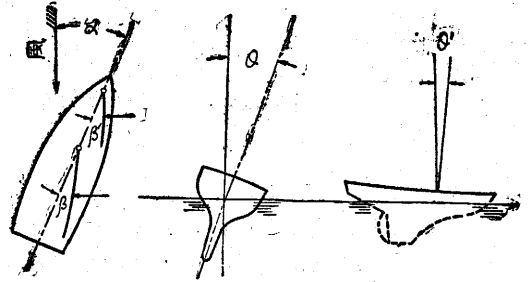
艇體全部の抗力をも合はせるとこれが第 2 圖の F_s のようになる。これを中心線方向 R_s と垂直方向 N_s とに分離すると N_s が N に對抗して横流れを防ぎ R_s が推力 T に對して抵抗となる。

一方艇體には水壓力の合力による廻轉モーメント M_s が働く他帆の力 F と艇體の水壓力 F_s とのモーメントが生ずる。よく設計された艇ではこの二つがほとんど相殺してしまふが、通常これを舵の力によつて補うのである。かくしてヨットは一定方向に進むようになる。そこで帆の性能としてあらゆる姿勢における推力 T と垂直力 N および力の着力點を求めることが必要となつてくるのである。

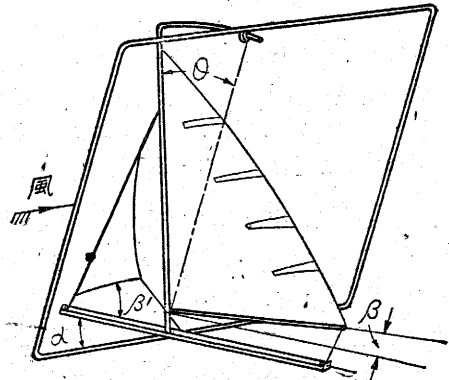
2. 實驗裝置および模型

對象を 6 m 級ヨット玄海號の帆とし、jib および mainsail を一緒に裝置した場合について實驗した。取りやべき姿勢としては第 4 圖に示すように、

- 相對風向と艇體中心線のなす角..... α ,
- 帆と風のなす角..... $\alpha - \beta$,
- main sail と艇體中心線のなす角... β ,
- jib と艇體中心線のなす角..... β'
- 艇の横傾斜角..... θ
- 艇の縦傾斜角..... θ'



第 4 圖



第 5 圖

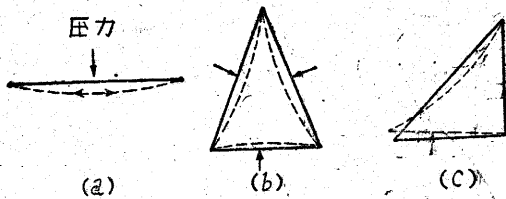
この間 β' はつねに main sail より數度大きく開くこととして β のみを變數とし、縦傾斜角 θ' は小さいので省略した。

これ等の姿勢を自由にかつ迅速にとるために第 5 圖に礎すような枠を用い、測定した値より枠だけの力を引いて帆の力を求めたのである。模型は實物の 1/15 とし、布目の方向、縫目等も總て實物と同様にした。布地はポプリン、綿およびキャンパスを用いて厚さを變化して行つた。

3. 帆の撓みの影響、相似則の問題

飛行機の翼のように固いものならば風速によつて形が變化しないので、ある一定のレイノルズ數以上の範圍で實驗を行えば、その力の係數をそのまま實物の係數として用いることができるのであるが、帆のようなものは風によつて撓みが違ふためにある風速で行つた實驗が實物ではどの風速に相當するかということが問題となつてくるのである。

そこでまず帆の撓みがどのようにして起るかを考えてみよう。いま布を固い枠に張つてこれに風を當ると周邊の形は變化しないので布は糸目自體が延びて長さを變じそれだけたるんで撓みがでる。



第6圖

もし周囲が弾性的に支持されている場合には、周囲が變形し主としてその變形によるたるみによつて布は撓むわけで、この際は布自体は全然伸縮しないものであつてもよいわけである。(b)

また周囲が固い枠で支持されている場合でも、それらの間の角度が變化するとやはり撓みを生ずる。(c)

實際帆の撓みはこれ等が重なり合つてみるとみるべきであろう。したがつて帆の樹型相似則においては撓みを代表する因子たとえば布の弾性率とか索具の弾性率とかが入つてくるわけである。これ等の問題を考えると、相似則は次ぎの2種が考えられる。

a) 三次元的相似の場合

すなわち帆の模型を形、厚さ等すべて實物と相似に作つたものをいう。この場合空氣の粘性の影響を無視すれば、すなわち實驗が一定のレイノルツ數の範囲に入つていと考えるならば、風速と弾性の關係だけを考えればよいわけである。

いま帆の弾性の代表的なものとして、(實はこれは未知である) 布のヤング率ともいうべきものを取れば

- 空氣密度 ρ
- 風速 v
- ヤング率 E

として、 $C = \frac{\rho v^2}{E} = \text{一定}$

という Cauchy の相似則が成立すればよいわけである。

ρ は實物、模型共に等しいから、したがつてもヤング率の等しい布を用いるならば(これは布目の數、糸の太さ、材質がすべて實物と相似なることを意味する) 實物と模型の風速は等しくてよいことになる。

つぎに空氣の粘性を考えると

- 空氣の動粘性係數 ν
- 模型の代表的な寸法を l } として、

$R = \frac{v l}{\nu} = \text{一定}$

という Reynolds の相似則が成立しなければならない。したがつて實物より l が小さければ $v \cdot l$ が一定になるように風速を上げなければならない。この二つの條件を完全に満足せしめるためには

$\frac{E l^2}{\rho \nu^2} = \text{一定}$

なる條件を満たしてやらねばならない。すなわち小さな模型を使つたら、その縮尺比の二乗に反比例して剛い布地を用いなければならないということになる。

實際は小模型では Reynolds 數一定という條件を満たせば風速が過大となつて不可能であるから、ある程度模型の Reynolds 數が大きくなつて亂流境界層ができる範圍の最小の風速で實驗を行うから、したがつて布の弾性もそれに應じて強いものを用いばよい。

結局、實物と同一材質の模型では模型の實驗風速がそのまま實物風速に相當する。ただし帆の力の係數には空氣の粘性による誤差が多少入つてくる。

粘性に對する誤差をのぞくために實驗風速を上げるならば、その二乗に比例して模型の布地の弾性率を高めなければならないということになる。

b) 二次元的相似 模型の形のみ實物と相似にし、布の目の數、糸の太さ或は布の厚さ等は相似にしないものをいう。

この場合にはヤング率のように面積當りの弾性率を取らず、單位長さ當りの弾性率を考えてこれを E' とすると、Cauchy の相似則は

$C' = \frac{\rho v^2 l}{E'}$

すなわちこの場合には、縮尺を小さくするなら、實驗風速を上げるか、布の弾性率を小さくするかしなければならぬ。後者は薄い布地を用いることを意味する。

また粘性に對する條件も満足せしめるには

$\frac{E' l}{\rho \nu^2} = \text{一定}$ となる。

いずれにしてもこの場合には(a)と違つて E' を上げるためには材質を變えなくとも布の厚みを變えることにより調節できる利點がある。

今度の實驗で選んだのは (b) の方法である。

4. 實驗結果

實驗は東京大學第一工學部の 1.5 m 風調で行い、

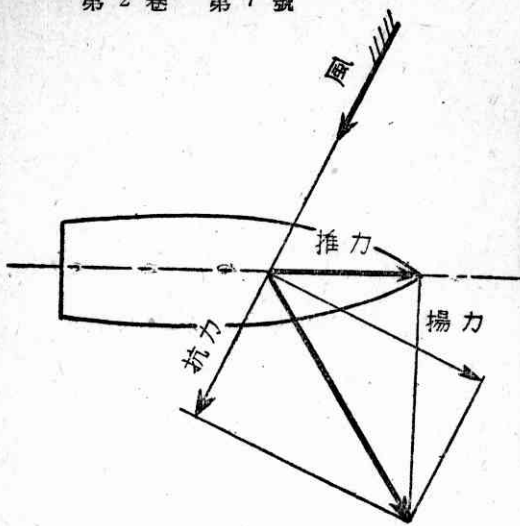
- 風と艇體のなす角..... α
- 艇の横傾斜角..... θ_h
- 帆の艇體中心に對する開き角..... β

を種々に變化せしめて行い、第7圖のように揚力、抗力を求め、これより船體中心線方向の推力を求め、さらに推力係數

$G = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A v^2}$

- T 推力
- ρ 空氣密度
- A 帆面積
- v 風速

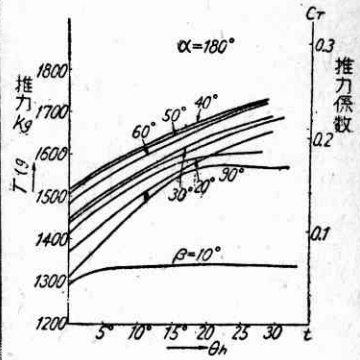
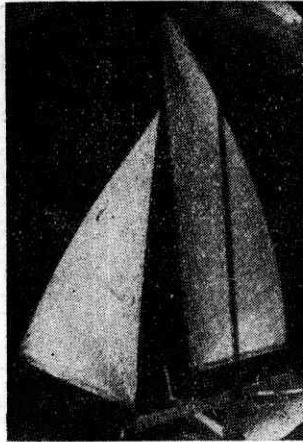
を計算した。



第 7 圖

模型の縮尺は 1/15 で実験風速は 13m/sec でありこれを前節(b)の方法で換算すると、實物では約 5m/sec の風速に相當する。ただし粘性による誤差が多少入っているわけである。

1) 種々の姿勢に対する性能 風と艇のなす角 θ_a を $20^\circ \sim 130^\circ$ 迄 10 種類、おのおのの θ_a につき θ_h を 5 種類、上記の組合せにつきさらに β を 5 種類、計約 250 状



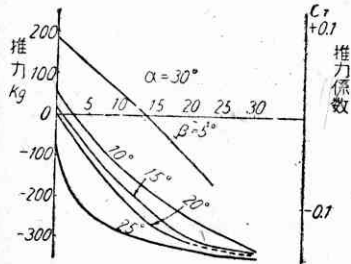
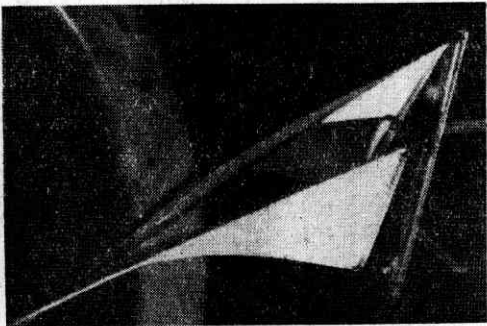
第 10 圖

態について実験した。その結果を全部のせることは紙面の都合上できないので、その代表的なものを第 8 圖、第 9 圖、第 10 圖に示す。

第 8 圖は詰開き附近であつて、推力正の部分が可能の範圍である。これより見て、艇が傾かない方が利きがよいということになる。

第 9 圖は Wind ab am の状態である。

第 10 圖は追風の場合でいわゆる追手を帆にうけての状態でも最も推力が大きい。ただし相對風速をとると、艇速が大きくなると風速が小さくなるので追手では當然風より速くは走れないのに反して横から風を受ける時は風速が減じないから艇速が大きくなると有利になつてくる。最大船速は通常 Wind abeam のときにえられるのである。



第 8 圖

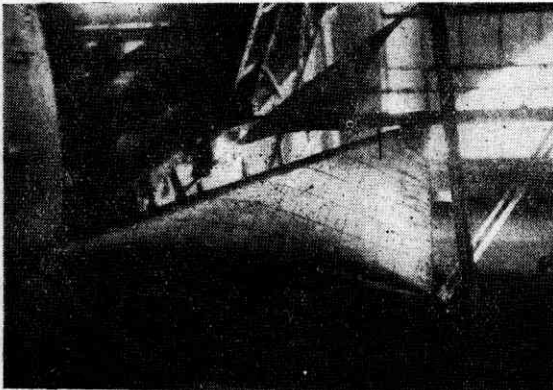
2. 風向と推力の關係 帆の開き角を一定にし、風と艇體のなす角度を變化させると

第 11 圖のようになるところで山を生ずる曲線となる。

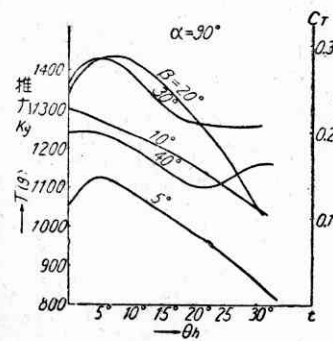
帆の開き角や艇の傾きを變化させるとそれぞれに對應する曲線がすこしづつずれてでくる。

その包絡線をとれば第 12 圖のようになりこれがその帆の出しうる最大推力の曲線となる。

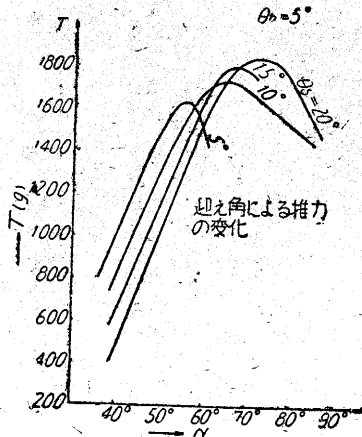
第 12 圖で 90° の近



第 9 圖

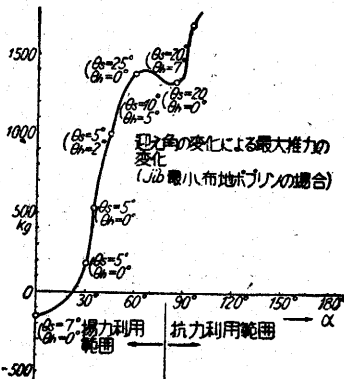


傍に谷を生じているが、これは小迎角では主として帆の揚力が推力に寄與しているが迎角が大きくなると、失速の現象を生じて一時推力は減少する。それより迎角が増加して90°をこえると今度は抗力が推力に役立ってきて推力が増加するからである。



第11圖

3) 揚抗比および最大揚力係数
帆も一種の翼であり、揚抗比の高いものほど風上に切上ることができるので、この揚抗比の大小は帆の性能判定上大切な因子である。大體實驗に用いた帆の形では揚力、抗力が、

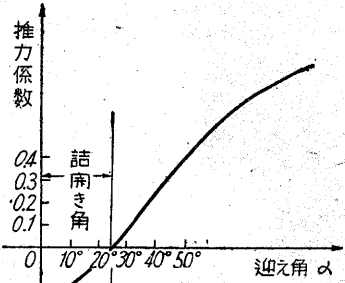


第12圖

3:1位が最大であつて、大體詰開き附近でえられる。また、最大揚力係数は約0.5であつて、大體迎角60°~90°でえられる。

いずれも固定翼型にくらべて格段に性能が低いのがこれは薄い布で作つてある點、重量の點等を考えると止むを得ないことであらう。

4) 詰開き角 艇が風に対して何度まで切上ることができるかということは、性能上非常に大切なことである。帆の推力と艇體に対する風の迎角との關係を示すと第13圖のようになる。第13圖で推力が0となつてゐるところが詰開き角である。



第13圖

實驗では大體25°~30°がえられた。これは相對風向に對するものであるから、艇の速度を考えると實際の風向きはもつと大きな角度になるわけである。

この實驗による角度は相似則の關係等で絕對的にはそのまま信用できないが、比較實驗により、どの帆は詰開き角が小さいということは求められるわけである。

速報 35

ポンプ作用に関する一般論とポンプの系列に関する考察

宮津 純 (機械)

流體に外部から與えるエネルギーと、途中で失うエネルギーとの差が、ポンプの水仕事になることはいうまでもない。エネルギーの與え方には(1)外力の作用によるもの(2)エネルギーを持つ流體を作用させるもの(3)流體摩擦の作用によるものがある。(1)の例には齒車ポンプ(2)の例にはジェットポンプがあり(3)は摩擦ポンプである。

(1)または(2)に屬するものも副次作用として摩擦の影響をまぬがれることは困難であり、(3)に屬するものには(1)または(2)の加わる場合がある。ときにはその何れが主であるか判定しにくい場合もある。

ポンプに限らず一般に流體機械を、作用の上から(3)とそれ以外のものとをむすぶ系列において考え、特定の機械についてはその双方から考察をすすめることにすれば、特性の推定を行うにも改良の方針をたてるにも、種々の手掛りをうることができると思われ

る。

ウエスコポンプを例にとる。これは粘力ポンプの驅動面に突起をつけた構造のものであつて、突起の回轉によつて流體は亂されながら引きずられ、構造に應じて副次の流れも誘導する。

突起を(1)亂れ装置とみる場合には亂れ摩擦ポンプとして特性を求めることができ、(2)副次流れを誘導する装置とみたり、齒車ポンプの齒のような輸送箱とみれば、摩擦によらないものとしての特性が考えられる。(3)また上のものの聯成作用としての特性も考えられる。

このポンプの特性が(1)によつてあらわされることはいまままでにわかつている。しかし亂れの内容が未知であるためにそれを(3)と解釋する餘地もある。

突起によつて齒車ポンプのような輸送作用が加わるとみて、それと粘力作用との聯成された特性を求めると、ウエスコポンプの特性として妥當なものがえられる。よつてこれが粘力ポンプと齒車ポンプとの中間の位置を占めるとみるのも一つの見方となる。兩者のいずれに近いかということ、および他の解釋によるものと比べていずれが妥當であるかということ、何れが實際に近いかによつて判定される。(1950.4.28)