

船 の 摩 擦 抵 抗

田 宮 眞

1. 従來の考え方

船を一定速度で航行させるのには、水および空気の抵抗に打克つために一定の力を加えなければならない。現在大多數の船はこの力を螺旋推進器から得ている。船を作る場合、その船を希望される速度で最も經濟的に走らせるよう、船の形や寸法を定め、これに最適の推進器を設計することは造船技術者の大切な仕事である。

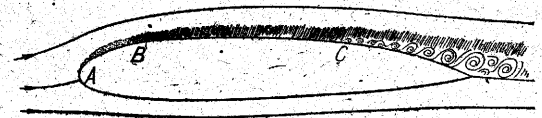
この仕事を正しく行うためには、まず船に働く水や空気の抵抗を知らなければならないが、實船の抵抗を測定することは非常に困難で、従來この種の實驗で完全なもの平賀博士¹⁾が驅逐艦夕立を使つて行われたものだけである。W. Froude²⁾が Greyhound 號で行つた測定は歴史的にも學術的にも有名であるが、種々の點で夕立の實驗に比して不備の點がある。現在われわれはもつぱら模型船を使用して船の抵抗の性質をしらべ、これを Froude の法則に従つて實船に換算して實船の抵抗を求めている。

Froude の法則の根本思想は船の抵抗を獨立な二つの成分——摩擦抵抗と剩餘抵抗(主として造波抵抗)——に分けることにあり、このうち摩擦抵抗は流体の粘性に關係し、剩餘抵抗は重力に關係している。模型から實船への換算に當つて、これ等はそれぞれ別個の法則に従うために困難な問題が生ずる。Froude の考えに従つて實船の抵抗を算定するには更に次の假定が行れる。すなわち船の摩擦抵抗は、船の水中の表面積(浸水面積)と同じ表面積をもち、船と同じ長さの矩形平板の摩擦抵抗に等しいとするのである。現在に至るまでほとんどすべての船體抵抗の研究はこの假定を認めて行われている。平板の摩擦抵抗式としては Froude 父子の勞作³⁾による Froude の公式⁴⁾を基礎とするものが、世界共通に今も使用され、理論式では Schoenherr⁵⁾ 又は Prandtl-Schlichting⁶⁾ の式が一般に認められている。これ等の式が船の實際の摩擦抵抗を正しくあらわすかどうかは、直接には確めにくいので、多くはこれを使つて模型から

Froude の方法で推定して得た實船の成績が、試運轉の成績とどの位一致するかで驗證している。この方法では Froude の換算の仕方の誤差やその他の誤差も入つてくるのであいまいな點が残るが、大體現在までのところ満足すべきものと考えられている。摩擦抵抗の値を直接驗證することは困難であるが、壓力分布を精密にはかれば模型船の全抵抗は簡単に測定できるので、全抵抗と壓力抵抗との差として摩擦抵抗を求めることができる。この實驗は横田、山本博士⁷⁾等が行い、外國では Eggert⁸⁾ Lante¹⁰⁾ が行つている。その結果を見ると Froude 式とは大なり小なり異つており、速度の高低によつて實測値と計算値との大小の關係が逆になるものもある。結局われわれは船の摩擦抵抗が平板の摩擦抵抗といかに違ふかを確める根據がないため、便宜上 100 年以前の Froude の方法をそのまま踏襲している有様である。

2. 境界層の概念

一方最近の航空工學の發達に伴つて物體のまわりの流れの模様がくわしくわかつてきた。Prandtl¹¹⁾ の提唱した境界層の理論は船舶工學にも大いに寄與するところがある。物體の表面に極めて近接した流体の部分はいわゆる境界層と名づけられ、この部分は、それから遠くはなれた部分とは大いに異つた様子を呈する(第 1 圖)。流速



第 1 圖

が十分大きくなると A から B の範圍には層流と稱せられる流れがあり、B からは亂流状態となる。後方 C に到ると剝離の現象が起り境界の厚さは激増し、大きな渦流がおこる。船のように大きな物體が高速で運動するときは AB の範圍は極めて短く、ほとんど船の全長が BC の状態にあると考えられる。境界は粘性を考へて初めて説明されるが、粘性のないいわゆる理想流体の場合物體表面

船に働く水の抵抗のうち摩擦抵抗はその 80% にも達するのが普通である。従つてこの値を正しく推定し、できるだけ小さい抵抗の船をつくることは常にわれわれの重大關心事である。従來 W. Froude が 19 世紀末に提唱した方法に従い、船の摩擦抵抗は相當平板の抵抗で計算されてきたが、粘性流体力學の發達に伴い、船體表面近くの水の流れの状態に注意が向けられて種々の疑問が生じてきた。ここには船體の運動によつて起される攪亂——波の影響をふくむ——によつて船體のまわりのいわゆる境界層にどんな變化が起り、船の推進性能にどのような影響があるかについて筆者がこれまで調べてきたところを概説する。

の壓力は一般に斷面の最大の點で低く、前後端では最高に達する。

境界層は極めて薄いので、AからCに至る間は、物體表面の壓力はほとんど理想流體として計算される値と異ならないが、Cに到つて剝離が起ると壓力は上昇し得ず、このことは物體を後方に引くこととなつて壓力抵抗の一因となるわけである。この現象は空氣中および水中の實驗によつて確められている。又このような物體の表面にできる亂流境界層から物體表面に働く摩擦應力の算定についても研究が行われかなりよい結果をあたえている。たゞ亂流については平板以外は十分確認された計算法をきかない有様である。しかし剝離の現象は平板では起りにくいものと想像されるし、表面にそつて壓力變化のある場合の亂流境界層の有様が平板のそれと異なることも十分考えられることである。又船が水上を航行するということは、その表面近くの流速又は壓力分布が波のために變化し、航空機や潜水艇のように波を生じない物體のまはりの流れと異なる有様を呈することとなる。筆者が亂流理論を船體のまはりの流れに適用して船の摩擦抵抗の問題を直接にしらべようと考えたのはこの故である。

3. 亂流境界層の計算

現在壓力變化を伴う流れの亂流境界層の計算法としては Buri¹²⁾ の方法と Gruschwitz¹³⁾ の方法とが發表されており、後者の方が精度が高いようであるが、計算法が簡便なことから、結果の直接驗證が困難な現状とを考へ合せて Buri の方法を採用してこの計算を初めたのである。まず Fage と Falkner¹⁴⁾ が行つた實驗結果に Buri の方法をあてはめてみると、かなりよく一致することを確めたので、1. 二次元模型 2. 準三次元模型 3. 模型船體の順に計算をすゝめたのである。準三次元模型というのは船の吃水が極めて大きく、しかも水平斷面の形がかわらない場合であつて、水表面から十分はなれた深部では、二次元流れと考えられるものである。この結果は造船協會¹⁵⁾¹⁶⁾ですでに發表し、本誌にも速報¹⁷⁾として掲載した。現在までに得た結果を簡単にまとめると次のようになる。

1. 二次元的な流れでは船の長さとの比で變るがこの比が 5~8 の範圍で抵抗は平板より 10% 内外増加する。剝離の起る位置(第1圖C)は船の長さの 92~98% にあるが、前後端を平板のように細く(幾何學でいう尖點)すると計算上剝離の起らない場合もある。
2. 波を伴う、船形についての計算は手數がかかるため一般的傾向を斷定するに到らないが、波の影響によつて流速が船體表面上で何回も増減をくりかえす特長があり、このことは流速を単に一様な平均進行速度に持來すのとは異つた影響を摩擦應力

分布に與える結果となつて抵抗の増加をきたす。又剝離點は一例ではほぼ船の長さの 95% にあるが、水面のごく近くでは剝離が起りにくいようである。これ等の計算では剝離した後は摩擦應力は 0 と假定してあるが、實際は若干の抵抗があるはずで、この部分の流れの様子と摩擦應力の分布については今後大いに研究の必要がある。

3. 水中に深く没した物體の場合についての一計算結果は、平板として計算された値より小さく出ているが、剝離點がかなり前方にあることからみて不思議ではなく、Amtsberg¹⁸⁾の實測とは極めてよく一致している。

これまでに得られた結果がその近似的方法の結果であるにもかかわらず、Laute の實測とはかなりよく、Amtsberg の結果とは極めてよく一致したことに力を得て、さらに廣くこの方法をおしすすめると共に、亂流境界層の機構および剝離點以後の流れの様子をくわしく調べようと考えている。なお實船にあつては層流域は無視できるものと思われるが、模型船ではある程度之を考慮する必要がある、この點については造船協會水槽委員會で研究を實施中で、筆者もその一部を擔當している。層流域と亂流域では摩擦應力に大きな差があり、又層流境界層にも剝離の現象が附隨しうるので、これを精細に考慮しなかつた従前の水槽試驗結果は全部破棄されねばならないと極言する人もある。

4. 剝離

剝離の現象は摩擦應力を變化させるが、これは摩擦抵抗の變化としてはそう大きくひびかない。むしろ壓力を變化(低下)させることによつて、壓力抵抗を大幅に増加する。又波の形や位置を變えることもたしかで、間接に造波抵抗にも影響をあたえる。剝離は境界層外の動壓が上昇するところで起ることは認められているが、船尾に推進器が作動していると、そのために推進器前方の船尾附近は壓力が低下する。従つて剝離の位置が變ると考えられる。これを模型的に計算した結果¹⁹⁾によると實際に剝離の位置が後退することが見られた。このことは剝離にもとづく壓力抵抗を幾分減少するが、推進器の吸引作用自體はこれより大きい量で、差引すれば推進器がついたために船體抵抗は増加し、いわゆる推力減少(Thrust Deduction)とよばれる事實として現れる。なお摩擦應力は幾分増加するが、その量は極めて小さいことが明らかになつた。ただしこのことは單螺旋船についていえることで、双螺旋船のように推進器が船體中心線上になく、しかも船尾より前方にあるものでは事情が變つてくる。推進器後方では壓力が増加するから、剝離が起りやすくなることも考えられる。

單螺旋船の場合、後部船體では、その斷面を船尾附近で

はU字形とすることが実際に良いと認められていて、これは推進器へ流れてくる水の状態を一様化するからと説明されているが、これは船尾端を尖點形に近づけることも意味し、剝離をおくらす方向になっているのは興味あることと思う。

以上 3, 4 節をあわせて船の摩擦抵抗としては、形状の影響(波動の影響をふくむ)を考慮した亂流境界層理論による抵抗をとり、剝離點後方に對しては、さらに別の計算によるもの(未だ不明)を加え、これと全抵抗との差を壓力抵抗と考えるべきであると思う。壓力抵抗の内一部は主として剝離にもとづくもので、他はいわゆる造波抵抗である。模型の結果から實船の値を算定するには上の方法で得た壓力抵抗に Froude の比較則を適用して實船の壓力抵抗の第一近似を求め、これに剝離點の移動に關する修正を行い、別に實船に對して算出した摩擦抵抗を加えるのである。模型船の摩擦抵抗の算定に當つては層流域の存在をも考慮すべきである。さらに理論的に精度をあげるには造波抵抗と摩擦抵抗との干渉を考慮せねばならない。實際問題として一々の船毎にかかる計算を行うには多くの難點があるが、代表的な船形および寸法について一度はこれ等の事項を確めておかねばわれわれは安んじて水槽實驗に頼ることができないと思う。

5. 伴流に對する影響

境界層と剝離後の流れの研究は船體抵抗ばかりでなく、これに打撃つて船を推しすすめる推進器の設計にも大きな意義を有する。船の推進器は航空機のプロペラと色々異なる點があるが、ほとんど例外なく船の一番後端に位置することもその大きな相連點の一つである。このために推進器は船體が攪亂した水流の中で作動することになる。このことをわれわれは推進器が伴流(Wake)の中で作動するという。伴流すなわち船體が水にあたる攪亂を次の三つの原因からなるものと考へている。

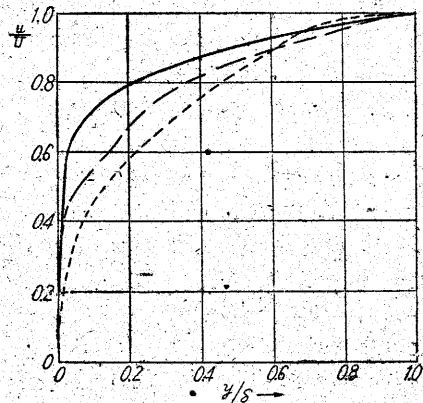
1. 摩擦によるもの。船體表面に働く摩擦力で水が船の進行方向に引きずられる。摩擦伴流
2. 流線運動によるもの。船が水の中をおしわけてすすむため船首近くの水は前方におしやられ、船尾附近は船の方にすいよせられいづれも前方に動くとする。流線流。
3. 波動にもとづくもの。波ができると、波頂では水は船の進む方向へ、波底ではこれと逆の方向に速度をもつ。造波伴流。

この三者の内、1, 2 が大きい役割を占め、特に單螺船では摩擦伴流の値*は大きく、推進器の設計には重大な影響をもつている。從來この伴流については、實驗的に推進器の位置の流速分布を調べてその性質を研究してい

* 伴流の値は前進方向の伴流の速度と、船の速度との比であらわしている。

るが、實船については推進器自體を一つの伴流測定器と考へて、平均値を求める他に方法がない。この場合にも實船の抵抗と模型船の抵抗との關係に似た困難が存在する。模型船で得た伴流値のうち上の 2, 3 については、實船でもほぼ同じ伴流が起るものとして大した誤はない。1. は實船における方が低い値となることが豫想される。實際には模型船で得られる伴流値と、實船の推進器の成績から得られる平均伴流値とを比較し、上記の考察をもととしてある補正係数を求めておいて、新しい推進器の設計にあたつている。

しかし實際に必要なのは平均伴流値だけでなく、その推進器翼面上の分布も重要である。現在これを理論的に推定するには單に平板における亂流境界層の教えるところに従つて速度分布を求めているが、船體が曲面であること、剝離の生ずる可能性とを考えると、その不當なことは明らかである。さらに推進器の作動によつて剝離點が後退することも考へに入れると、模型船と實船との關連はますます複雑となり、簡単な平板境界層の置換が無理であるといえる。筆者が最近行つた風洞實驗によると、剝離が起つた位置の後方の平均速度の分布は曲率のためかなり變化している。これと平板における亂流境界層の速度分布とを比較して第 2 圖に示した。この圖に



第 2 圖

は飛行機翼の直後にできる後流の速度分布の一例をも記してあるが、そのいづれとも異なることがわかる。剝離が起つた後の流速分布が剝離點のある程度後方ではまた船體表面との摩擦力の影響である法則に従つた形をとるに到ることが想像される。このことは剝離點以後の摩擦應力が再び 0 でない値をとることをも想像させる。剝離がこのように伴流分布に影響をもつとすると實船ではどうなるのであろうか。非常に大きい物體がはやい速度で動くときの剝離の様相を正しく推定することは今後の大切な問題である。

6. 粗 度

船の摩擦抵抗に關して見落してならない重要な問題は船體表面粗度である。船が出渠したばかりの清淨な外板面でも、鉄頭、縦横縁、等の凸起が存在するため滑面とは見なされない。逆に十分にいいいに仕上げた實物推進器は、模型推進器に比し滑な面を持つものである。このような粗面についての研究は廣く行われ、Kempf²⁰⁾は實船の粗度に關して大がかりな測定を行い、米國では實船の摩擦抵抗式に Schoenherr の式を用い、これに粗度の餘裕を一定値見こむことを水槽委員會で決定している。しかしながらこれ等はいずれも直圓管や平板に對する粗度影響を根據としている。滑曲面に對する亂流理論の應用について、粗曲面に對する計算ならびに實驗を行う必要を感じて、筆者は本年度文部省科學研究費によりこの研究に着手している。

この他最近いぢるしく關心をひくに至つた非常問題の取扱においても、摩擦抵抗の取扱いは不明の點ばかり多く、最近米國で實用化されたときく熱線型水中速度計の利用はこの方面に大きい力となる。

7. 造波抵抗理論との關係

船體抵抗の一分である造波抵抗の理論的研究は戰時中から木下博士および乾助教授(工學部船舶工學科)等の努力で大いに進歩した。Michell および Havelock が開拓したこの分野について計算の精度が高まるにつれて摩擦抵抗との相互作用の解明が重要な問題となつてきた。すでにのべたように剝離現象は造波現象に對して大きな影響を持つもので、造波抵抗値を十分變化させる力をもつと思われる。船體全般にわたつても波形が計算されたものと喰違う原因は粘性に歸せられる部分が少くない

と思われる。筆者の研究は船體表面の境界層の情況を通じてこれ等の問題の解明へ一步を進めようとするものであり、造波抵抗の理論的研究と表裏一體をなすものである。(26-7-9)

文 献

- (1) Y. Hiraga, Experimental Investigations on the Resistance of Long Planks and Ships, T. I. N. A., 1934.
- (2) W. Froude, On Experiments with H. M. S. "Greyhound", T. I. N. A., 1874.
- (3) R. E. Froude, The "Constant", System of Notation of Results of Experiments on Models Used at the Admiralty Experiment Works, T. I. N. A., 1888.
- (4) Decisions of the Meeting of Paris, Congrès International des Directeurs de Bassins, Paris, 1935.
- (5) K. E. Schoenherr, Resistance of Flat Surfaces Moving through a Fluid, T. S. N. A. & M. E., 1932.
- (6) L. Prandtl, Zur turbulenten Strömung in Rohren und längs Platten, Ergeb. A. V. G., IV. Lief., 1932.
- (7) S. Yokota, T. Yamamoto, A. Shigemitsu and S. Togino Pressure Distribution over the Surface of a Ship and its Effect on Resistance, 萬國工業會議論文集, 東京, 昭和 4 年.
- (8) E. F. Eggert, Form Resistance Experiments, T.S.N.A. & M. E., 1935.
- (9) E. F. Eggert, Further Form Resistance Experiments, T.S.N.A. & M.E., 1939.
- (10) W. Laute, Untersuchungen über Druck-und Strömungsverlauf an einem Schiffsmodell, J.S.T.G., 1933.
- (11) L. Prandtl, Verhandlungen des dritten internationalen Mathematiker-Kongresses, Heiderberg, 1904 其の他.
- (12) A. Buri, Berechnungsgrundlage für die turbulente Grenzschicht bei beschleunigter und verzögerter Grundströmung, Diss. Zürich, 1931
- (13) E. Gruschwitz, Die turbulente Reibungsschicht bei Druckabfall und Druckanstieg, Ing. Arch., Bd. 2, 1931
- (14) Fage-Falkner, An Experimental Determination of the Intensity of Friction on the Surface of Aerofoil, R. & M., No. 1315.
- (15) 摩擦抵抗に關する一二の問題, 造船協會, 昭和 25 年秋季講演會, (未刊)
- (16) 摩擦抵抗における形狀影響, 造船協會, 昭和 26 年春季講演會 (未刊)
- (17) 本誌速報, 第 3 卷 第 3 號
- (18) H. Amtsberg, Untersuchungen über die Formabhängigkeit des Reibungswiderstandes, J.S.T.G., 1937.
- (19) 本誌速報, 第 3 卷 第 7 號
- (20) G. Kempf, Über den Einfluss der Rauigkeit auf den Widerstand von Schiffen, J.S.T.G., 1936.

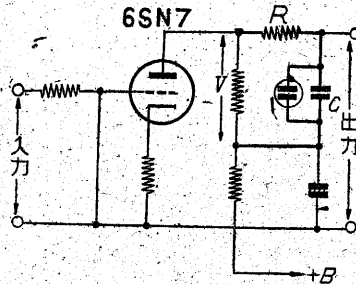
速報 29

Audible Alarm の一改良

唐 澤 孝

直流電壓の小さな變化で可聴周波数振器の周波数を變化させ、それを定性的に耳で檢出する装置は Audible Alarm とよばれ真空装置の洩れさがしに用いられている。

これまでに發表された回路はマルチバイブレーター方式のもの⁽¹⁾は、やや複雑であり、直流電壓 0.2~1.0 volt の變化に對して、200~800 への周波數變化を示し、周波數變化がかなりせ



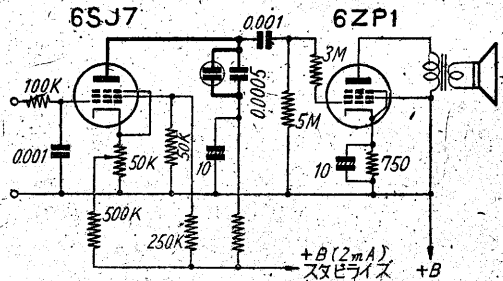
第 1 圖

まい。サイラトロン使用のもの⁽²⁾は、前段に直流増幅をふくむ大げさなもので、直流電壓 0~6 volt の變化に對して、15~3000% の周波數變化を示す。ネオン管を使えば回路は簡單にはなるが、従来の第 1 圖に示されるものは、周波數變化がせいぜい 100~500% でせますぎる。

ネオン管發振回路の周波數は

$$f = 1/RC \cdot \log(V - V_c) / (V - V_s) \dots\dots (1)$$

(65 頁へ續く)



第 2 圖