The Society of Naval Architects of Japan

推進器逆轉による船の惰性前進距離 竝に時間の計算式に就て

正員 工學博士 渡 邊 惠 弘

Abstract.

On the Formulae for the Decelerated Motion of a Ship with Screw reversed.

By Y. Watanabe, *Kogakuhakushi, Member.*

When the rotation of a ship's screw is reversed in its forward motion, the blade elements are generally in stalled condition. In such a condition, the action of the screw propeller is analysed, and the thrust in the aftward direction is obtained.

Assuming the virtual mass to be one-fifth of that of the ship, and the resistance to be proportional to the square of the velocity, the formulae for the time and the distance in the decelerated motion are developed in this paper.

1. 緒 言

此の論文は船がある前進速度で進行して居る時急に機關を逆轉し、推進器に後退回轉を與へた時、船がその前進惰性のため、靜止する迄に幾何の距離竝に時間を航走するかを主として推進器の機能を考慮に入れて解いたものである。此の問題は著者の知る限りでは餘り解かれて居ない様で唯 Lovett の著書 (Apllied Naval Architecture) 中に取り扱はれて居るが、此の中では推進器の後退推力を全力前進の場合の九割であると云ふ假定の下に解かれ推進器の機能に對しては少しの考慮も拂はれて居らぬ。

此の論文の取扱の中で次の様な主なる假定がなされて居る。卽ち船の質量の見掛の增加は船それ自身の質量の 1/5 であると云ふ普通一般に行はれて居る約束と、船の抵抗は此の取扱に入る速度の範圍では速度の 2 乘に比例すると云ふ事である。此の第 1 の假定は英國の古い實驗から一般の習慣の様になつて居るがその後の多くの實驗を見ると或は是よりも小さくてもよいのではないかとも思はれる。然し、是等は未だ決定的の議論迄に達して居るとも思はれぬ故普通の約束に從つて置く次第である。

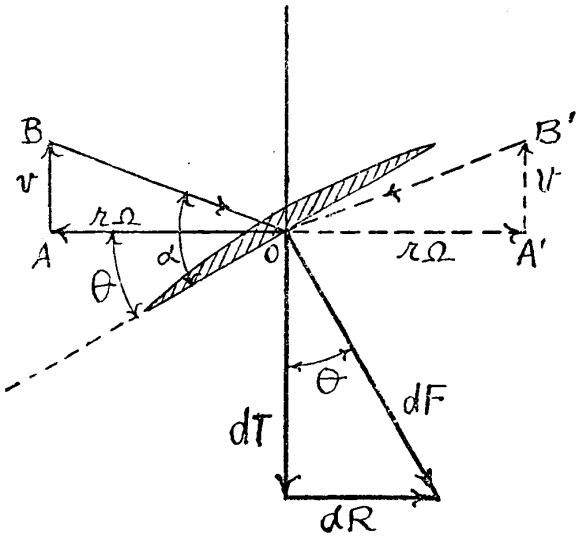
NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

第2の假定も若し途中に hump speed が入れば完全に成立せぬが普通は是は入らぬと見るのが當然である。是が入らぬでも摩擦抵抗を考へれば此の假定は正しくはないが計算の簡易を考へれば此の誤差は許容せられる。

2. 推進器の作用

今軸より r の距離の推進器翼素を取つて考へるに、船が前進し推進器が普通の回轉をして居れば OA' の方向に回轉し從つて前進速度 v と結合して水は $B'O$ の方向から運動して來る筈であるが、現在考へて居る様な問題では逆廻轉をして居る故 OA の方向に回轉し、從つて水は BO の方向から翼に當る。



然る時は翼素の迎角は圖に示す如き α となり、是はその pitch angle θ より大きく普通の翼の狀態としては、その失速角以上となる。從つて推進器の作用は普通の狀態とは著しく異る。此の様な失速狀態以上に於ける推進器の作用に就ては Glauert[1] が解いて居る。此の時翼素に働く力は翼素面に直角の方向で是を dF とする。是を軸方向に dT, 是に直角の方向に dR とに分解する。然る時は dT は推力を與へ dR と軸よりの 距離 r を掛けたものが捻力 dQ を與へる事は明である。

$$\left.\begin{aligned} dT &= dF\cos\theta \\ dQ &= rdR = rdF.\sin\theta \end{aligned}\right\}$$

$$\therefore \quad \frac{dQ}{dT} = r\tan\theta$$

今推進器の pitch $=H$ とすれば $\quad H = 2\pi r\tan\theta$

$$\therefore \quad d\theta = \frac{H}{2\pi}dT$$

此の式で dQ と dT とは半徑に沿ふて變り、殊に所謂 wake の狀態を考へれば極めて複雜な r の函數であるが、H は略ぼ常數と見る事が出來る。上式を推進器全體に就て積分すれば dT 及び dQ が r の如何なる函數なるに關せず次式が成立する。

$$T = \frac{2\pi}{H}Q \cdots\cdots (1)$$

(1) Tech. Rep. of Aero. Res. Com. Reports and Memoranda. No. 1342. 1930~31. Airscrew for high speed aeroplanes

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

卽ち推力は捻力に比例する。

然るに Q は機關の氣筒内の平均壓力等の如きものできまり、卽ちきまつた運轉狀態では Q は先づ常數と見る事が出來る。從つて此の狀態では推力 T が常數であつて是は Lovett の式の假設と一致する。

今此の後退時の運轉狀態に於ける I. H. P.$=P_i$, 軸馬力$=P_s$, 廻轉數$=n$ とすれば

$$P_s=\eta_m\cdot P_i=2\pi n Q$$

但し η_m は mechanical efficiency で普通 0.82～0.85 位の間にある。

故に此の運轉狀態に於ての後方推力は

$$T=\frac{\eta_m\cdot P_i}{H\cdot n} \quad \cdots\cdots (2)$$

3. 惰性前進時間

丁度船の進行を止めようとし初める時の前進速度を V_0, 此の時の抵抗を R_0 とし、抵抗が速度の 2 乘に比例すると假定すれば或る速度 v に於ける抵抗 R は

$$R=R_0\left(\frac{v}{V_0}\right)^2$$

故に質量見掛の增加を船の質量の 1/5 と假定すれば、船の運動式は

$$\frac{6}{5}\frac{W}{g}\frac{dv}{dt}=-(T+R)=-\left[\frac{\eta_m\cdot P_i}{H\cdot n}+R_0\frac{v^2}{V_0^2}\right] \quad \cdots\cdots (3)$$

是を積分して

$$t=\frac{6}{5}\frac{W}{g}\frac{V_0\sqrt{H\cdot n}}{\sqrt{\eta_m\cdot P_i\cdot R_0}}\left\{\tan^{-1}\sqrt{\frac{H\cdot n\cdot R_0}{\eta_m\cdot P_i}}-\tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{H\cdot n\cdot R_0}{\eta_m\cdot P_i}}\frac{v}{V_0}\right)\right\}$$

故に靜止に到る迄の時間 T_0 は

$$T_0=\frac{6}{5}\frac{W}{g}\frac{V_0\sqrt{H\cdot n}}{\sqrt{\eta_m\cdot P_i\cdot R_0}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{H\cdot n\cdot R_0}{\eta_m\cdot P_i}} \quad \cdots\cdots (4)$$

此の式中の R_0 は實際の計算に於ては不便なる故書き換える。卽ち V_0 の前進狀態に於ける機關の I. H. P.$=P_{i0}$ とし此の時の Propulsive coef.$=\mu$ と置けば

$$R_0=\frac{P_{i0}\cdot\mu}{V_0}$$

$$\therefore \quad T=\frac{6}{5}\frac{W}{g}\frac{V_0\sqrt{H\cdot n\cdot V_0}}{\sqrt{\eta_m\cdot P_i\cdot P_{i0}\cdot\mu}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{H\cdot n\cdot P_{i0}\cdot\mu}{\eta_m\cdot P_i\cdot V_0}} \quad \cdots\cdots (5)$$

特に V_0 で前進して居た時と後退運動の時の機關の運轉狀態が同一であり唯推進器廻轉の方向が反對になつたとすれば $P_i=P_{i0}$ なる故

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$$\frac{W}{P_{i0}}\equiv\alpha,\qquad \frac{H.n}{V_0}\equiv\beta,\qquad \frac{\mu}{\eta_m}\equiv\gamma \quad \text{と置けば}$$

$$T=\frac{6V_0^2}{5g}\frac{\alpha}{\eta_m}\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}\tan^{-1}\sqrt{\beta\gamma}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

となる。此處で α は power loading とも稱すべきもので若し W/P_{i0} を tons/H.P. に取れば α は是に 0.245 を掛けたものを取る。β, γ は單位のない單なる常數である。

4. 惰性前進距離

(3) を書き換え s を距離に取れば

$$\frac{3}{5}\frac{W}{g}\frac{dv^2}{ds}=-\left[\frac{\eta_m.P}{H.n}+R_0\frac{v^2}{V_0^2}\right]$$

$$\therefore\qquad =\frac{3}{5}\frac{W}{g}\frac{V_0^2}{R_0}\log\left[\left(\frac{\eta_m.P_i.V_0^2}{H.n.R_0}+V_0^2\right)\Big/\left(\frac{\eta_m.P_i.V_0^2}{H.n.R_0}+v^2\right)\right]$$

故に靜止する迄の距離 S は

$$S=\frac{3}{5}\frac{W}{g}\frac{V_0^2}{R_0}\log\left(1+\frac{H.n.R_0}{\eta_m.P_i}\right)$$

$$=\frac{3}{5}\frac{W}{g}.\frac{V_0^3}{\mu P_{i0}}\log\left(1+\frac{H.n.\mu.P_{i0}}{\eta_m.P.V_0}\right)$$

特に $P_i=P_{i0}$ の時は

$$S=\frac{3V_0^3}{5g}.\frac{\alpha}{\mu}\log(1+\beta\gamma)\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

以上は單螺旋の場合に就てその儘成立する事である。推進器が二つ以上の場合に就ても全く同じ事で、各推進器に就ての推力を加へ合せればよく從つて (7) 乃至 (8) と同じ樣な式が得られる。

5. 數値計算例

今一つの例を取つて計算の例を次に示す。

單螺旋貨物船 $W=$ 5,565 噸　　$H=29$ 呎

$P_{i0}=$ 5,800 馬力　　$n=64.6$/分$=1.08$/秒

$V_0=16.16$ 節$=17.3$ 呎/秒

$\mu=0.53$, $\eta_m=0.83$ に取る。　　然る時は $\alpha=4.25$, $\beta=1.8$, $\gamma=0.63$

是を (7) 式に入れゝば　$T_0=79$ 秒$=1$ 分 19 秒

又 (8) 式に入れゝば　$S=586$ 呎

是等の結果は Lovett の式より小さい値を與へる樣である。

〔九州帝國大學造船學教室〕

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

討　　論

○會長代理(湊　一磨君)　唯今の御講演に對し御質問又は御意見のある御方は御述べを願ひます。

○岡本方行君　一言所見を述べさせて戴きます。唯今の御話にありました「船の見掛の質量增加」は此の種計算に於きましては重要な要素でありまして、こゝでは之を從來通り船の質量の 1/5 に取つて居られますが、實際はもう少し小さくても宜しいとの御說であります。此の御說を裏書きします實例を申上げたいと思ひます。先年海軍に於きまして驅逐艦と巡洋艦に就き或る實驗が行はれまして、其際船が增速したり減速したりする場合の速力の變化及び經過時間などを測定して其結果を解析した事があります。此の結果によりますと從來の 1/5 卽ち 0.2 では大き過ぎるのでありまして、此の場合には 0.13 として計算しますと實際の結果と良く一致致す事が知られて居り、此の點を申述べまして御參考に供したいと思ひます。

○荒木　勤君　唯今の御計算と私の實驗とは大分懸離れて居りますが、cargo ship の實例で排水量 a,500 噸で長さ 300 呎とすると 17～18 年前に乘りました遠江丸の實驗では 9 節の speed で full s5tern をかけると約 1,100 呎位進みましたと思ひます。只今まで船長として 14～15 隻も乘りましたが、300 呎の船で 600 呎で停止すると云ふのは覺えがありませんが。

○渡邊惠弘君　發令より推進器が逆回轉するまでの時間が掛るからです。

○荒木　勤君　reciprocating engine ですか。

○渡邊惠弘君　別に recipro. と限つたわけでもありませんが。

○荒木　勤君　reciprocating engine だとすると發令から船が停止するまで 3 分位は掛ります。turbine ならば發令より 30 秒位で機關が go astern になります。夫以上になると condition は餘程悪いものです。30 秒で engine が廻はらぬ船は稀だと思ひます。

○渡邊惠弘君　夫は逆に廻はり初めまでですか。

○荒木　勤君　廻はり初めまでです。

○渡邊惠弘君　唯今の話では發令より完全に propeller が逆廻轉する迄の時間が掛りますが夫は入つて居りません。

○荒木　勤君　實際は 30 秒掛るのも少なく、20 秒か夫以下のもあります。

○渡邊惠弘君　私はもつと大きい樣に他の人から聞きましたが。

○荒木　勤君　否、そんな事はありませんと思つて居ります。

○渡邊惠弘君　30 秒にしても時間にして T_0 の半分で、9 節で走つて居りますから、可成り走ると思ひます。

○荒木　勤君　次に之は私の意見でありますが、go astern の時は go ahead の時の 90% の thrust

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

が掛ると言はれましたが。

○渡邊惠弘君 いや、それは Lovett と云ふ人がしたのです。

○荒木 勤君 そうですか。私の實驗に依りますと總噸數 11,000 噸の歐洲航路の少し舊式型の船で 13～14 節の速力のものが港に近づくと 12 節位になります。pressure 200 封度のが 180 封度に落ちて居りますが、full astern を掛ると uniform speed になつて走るとき 8 節は越しません。つまり此の問題と離れて engine を go astern にし、船が後退せるときには T が go ahead で走る時の 0.5 と思はれます。propeller からの水が run の中に入り水通が悪くなるのです。所謂船は go ahead し engine のみ full astern である時は水の通が良い爲に T は 0.5×1.5 卽ち go ahead の時の 7 割強と推定されます。以上は私の經驗を述べたのみです。

○八代 準君 渡邊博士の扱はれました此の問題は、實際に船を操縱する人及び機關設計に於て astern turbine の力量を定める様な場合に、甚だ必要な事でありますが、未だ十分滿足な解決が得られて居らない問題で、博士が其解決に寄與されました事は誠に難有い事であります。

博士は此の問題を扱つた文獻が Lovett の著書(1920)以外には見當らぬ様に言はれて居ますが、之より古く 1912～1914 年に Schiffbau 誌上で Weitbrecht, Müller, Dressler, Rothe 等が此の問題を扱つて居ります。然し之等の人々の取扱ひ方も實際の場合とは掛離れた多くの假定がしてありますので、勿論滿足なものではありません。

一體船が加速又は減速する時には、其起す波の連列が定型になつて居らず、時々刻々變化しますので、其時の船體抵抗又は推進器推力の様なものも時々刻々變化し且つ適切に計測し又は豫想する事が出來ませんので、或は理論的にやつても或は實驗的に模型試驗成績等を用ひても、滿足な解析は出來ない様に思ひます。それで結局は或假定の元に理論的又は實驗的の解析を行つた成果と、實際の船に就て之等の試運轉を行つた成績とを對比して、何か實用的係數の様なものでも定めて置かないと、實際の役には立たぬと云ふ事になると思はれます。

所が實際の船に就て之等の試運轉を行ふ際の計測法なるものが、私の知つて居る所では可なり原始的な方法である様に思ひます。それで其計測法に關しては、先年新田重治氏が旋廻試運轉の計測法を考案されて、本協會に發表(造船協會々報第五十號)されたものがありますが、あの様な裝置を此の種の試運轉成績計測に適する様に作つて戴けると大變結構の様に思ひます。此の席には海軍技術研究所の方々も見えて居られる様でありますから、御考慮を願つて置き度いと思ひます。

それから反轉推進器の推力等の豫測に渡邊博士の御示しの様な方法も結構でありますが、之はやはり模型推進器の實驗成績を換算する方が一層信賴し得る結果が得られると思ひます。船に前進速度があつて推進器丈が反轉して居る様な場合を代表する推進器の open experiment は、まだ行はれて居らない様に思ひますが、之は何かの機會に實驗して戴けば大變役に立つ事と思はれます。船が後進し始めてからの反轉推進器の性能に關しましては、其模型實驗成績を私が本協會に發表(造船協會々報

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

第四十號）して置きました、船が後進速力を持ち始めてからの事は此の論文の範圍外でありますが、其様な時の推力等の豫測には、理論的の方法より此の成績を利用する方が信賴し得る結果が得られる様に思ひます。

○川原五郎君　大變有益な paper で吾々に利益する所が多いのでありますが、一寸御伺ひ致します。propulsive coefficient は go astern の時のですか、go ahead の時のですか。

○渡邊惠弘君　go astern の時のが分りませんから go ahead のを取りました。

○川原五郎君　若しそうなら異つた數字が出やしないかと思ひます。八代博士は計測の方法がないかと言はれましたが、長崎では turbine の go astern に缺點あるので tank の speed machine を使ひ turbine には必ず shaft に electric contact で revolution が分かり、engine に傳へて go astern に掛けて revolution の變るのが直ぐ分る様な機械があります。stopping and reversing trial も夫でやつて居るが、此の式も actual trial があるから當嵌めて見るのが良いと思ひます。propulsive coefficient は go ahead のであると大分變つて居ると思ひます。

○渡邊惠弘君　0.53 は Mackrow の pocket book のを取つたので別に根據のある數字ではありません。此の値で良くなければ外のを取りますが、唯單なる example として取つたのです。

○會長代理（湊　一磨君）　他に御發言の方は御座いませんか、なければ私より一言御挨拶申上げます。渡邊博士は推進器逆轉に依る船の惰性前進距離竝に時間の計算式を、數學的解析に依つて求められたのであります。此の種の論文は外國に於ても取扱はれた例は餘り多くないとのことでありますが、我造船協會への提出論文としては、私の記憶して居る範圍では初めての様に思ひます。此の問題は軍艦に於て戰術上其他で重要なる事は勿論、一般船舶に於ても災害防止の見地より極めて重要な問題でありまするが、渡邊博士は之を簡單迅速に算出する方法を御示し下さつたのでありまして、會員一同の裨益する所は尠くないと思ひます。此の問題は船の運動、推進器背面の作用、周圍の水の運動等、種々複雜な事項を含んで居ります爲め、單に數學的解析のみで解決することは相當困難かと察せられますので、八代博士も御指示になりました様に、水槽試驗を行ふて、其結果と照合して考察する事は極めて必要の事と考へられます。尙近年新造の船舶の試運轉の際には、急速停止試驗、卽ち全力前進の際命令一下急速に機關を全速後進とし、發令より機關全速後進に至る迄の時間、船が停止するに至る迄の時間及び其間の船の前進距離等を測定する試驗を行ふて居り、此の種の實績資料も相當にある事と承知して居りますから、此の問題は單に數學的に片附けるよりも、水槽試驗の結果及び實船の成績等を併せ考へて、解決を期せられたならば一層有益であらうと思ひますので、此の際特に著者に對して御願ひ致して置き度いと思ひます。渡邊博士が玆に新たな問題を捕へて、會員一同を啓發して下さつた事に對し、諸君と共に拍手を以て感謝の意を表し度いと思ひます。（一同拍手）

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

追 記

○近藤政市君 一寸御伺申しますが、推進器の作用の處で dF が翼素面に直角に働くと云ふのは如何云ふ譯からなのですか。それから engine-screw system では推力は前進速度の1乘或は2乘と共に減少すると云ふのが飛行機の場合では事實であり又常識となつてゐますので、T が速度と共に不變であると云ふのは聊か妙に感じられます。又後退時の運轉狀態に於ける engine の回轉數 n も速度と共に變化する筈と思ひますが、この邊の御假定に就て一應の御說明を得れば幸に存じます。

○渡邊惠弘君 第一の力が翼素面に直角に働く事に就ては、此の取扱は普通の翼の理論の樣に流體が表面を萬遍なく smooth に流れる場合でなく、所謂 over-stall して面の後に渦が出來て居る狀態を取つたからです。

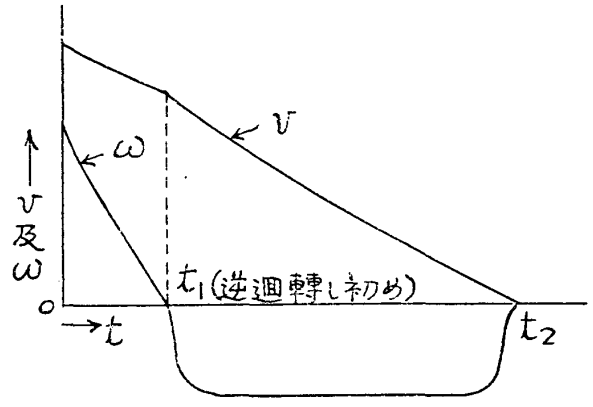
第二に飛行機の推進器の場合の推力と速度との普通の關係は翼素面が stall しない範圍の normal condition に於て働いて居る場合に就てですが、此處で考へて居るのは前にも述べた樣に stall した狀態で全く working condition が異ります。尙飛行機の hign pitch propeller が start の時は同じ樣な狀態になり、此の場合は本文中に擧げた Glauert の論文で取扱つて居る事は御承知の事と存じます。

次に engine の廻轉數が關係する筈だとの御意見は尤もの事であります。此の問題は實際は torque と thrust とを同時に考へて次の關係から解かねばなりません。

$$I\frac{d\omega}{dt}=Q_E-Q_P \cdots\cdots\cdots(1)$$

$$M\frac{dv}{dt}=T-R \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

I : shaft, propeller 及水の影響を入れた全部の慣性力率、 ω : 推進器の角速度、 Q_E : Engine から來る shaft を廻轉させ樣とする扭力、 Q_P : 水からpropellerに働く廻轉を止めやうとする扭力、 M : 船及び水の影響を入れた質量、 T : 推力、 R : 船の抵抗。



此處で Q_E は engine の運轉狀態できまり、Q_P と T は v と ω の函數、R は v の函數で、上の聯立方程式を解かねばなりません。然し、Q_P と T の函數の形は種々の working condition を併せ考へると非常に難かしくて到底數理的に簡單に取扱ひ得ません。それで今實際の trial の結果から ω と v が t と共に如何に變るかを見ると大體左の樣になります。t_1 迄は廻轉數は急に變りますが t_1 以

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

後は大體に於て殆ど const. であります。t_1 迄はだから、上の(1)式を考へに入れなければなりませんが、t_1 以後は考へず、唯(2)だけを取つて差支へないと思ひます。私の此處で取扱つたのは t_1 以後の問題で、發令より推進器が逆回轉し始むる迄の間は前に述べた over-stall の假定も疑問であります。出た結果に就ては t_1 から t_2 迄の時間を出して居り、此間に較べると o から t_1 迄は大した大きいものではないと思ひますが、走つた距離となると是は上の v—曲線に包まれた面積になりますから t_1 迄の距離は大きくなり、從つて發令から靜止する迄の前進距離を出すのには t_1 迄の狀態も考へなければなりません。然し此間の狀態は前にも述べた樣に非常に難かしく簡單には計算出來さうもありません。

NII-Electronic Library Service