操舵機馬力一定の条件下で操舵時間が アドヴァンスと回頭おくれにおよぼす影響 —特に舵のアスペクト比の変化を考慮して—

山 本 平 弥*

The Effect of Rudder Speed upon Advance and
Turning Lag with a Constant Steering Engine Power.
—With Reference to the Effect of Rudder Aspect Ratio—

H. Yamamoto

Abstract

A survey on the effect of rudder speed upon advance and turning lag with a constant steering engine power has been published in the report presented by Nihon Kainan Bôshi Kyôkai (N. K. B. K.) in 1966. The said report of N. K. B. K., however, has paid no consideration for rudder aspect ratio. This paper treats of this subject, taking account of rudder aspect ratio, which varies inevitably with changing the rudder speed with a constant steering engine power.

1. 緒 言

操舵機馬力一定の条件下で、操舵時間がアドヴァンスと回頭おくれにおよぼす影響については、すでに日本海難防止協会報告書[1]に発表されている。

日本海難防止協会報告書における計算では、操舵トルクを舵面積比 α の1.5乗に比例させているが、このことは舵のアスペクト比が一定であるということを条件としている。しかしながら実際には舵面積の大幅の増加は、アスペクト比の低下をまねかざるをえず、これを考慮することが必要となる。

舵面積を大幅に増大するに際し、舵の高さ一定という制限は、実状にそくしているものと考えられる。そこでここでは、舵高さ一定という制限下で、舵面積の変化にともなうアスペクト比の変化を考慮にいれると、操舵機馬力一定の条件下で操舵時間がアドヴァンスと回頭おくれにおよぼす影響が、海難防止協会報告書の結果と、どのようにことなるかを検討する。

2. アスペクト比を考慮しない場合

日本海難防止協会報告書に発表されているアスペクト比を考慮しない場合の表題の要旨は、つぎのようである。

* 海上保安大学校（呉市若葉町1）

操舵機馬力を一定におさえて操舵時間を増すと、すなわちゆつくり舵をとると、操舵トルクを大きくとることができるから、大きい舵を装備できる。操舵時間の増加はアドヴァンスを増大し、舵面積の増加はアドヴァンスを減少させることを考えると、操舵機馬力一定の条件下にアドヴァンスを最小ならしめる操舵時間と舵面積の組合せが存在するはずである。この最適値問題はつぎのようにして解かれる。

旋回航跡の面から考えてみると、最大アドヴァンスは近似的に次式で示される。

$$\frac{\text{Max } D_A}{L} = \frac{V}{L} \left(T + \frac{t_1}{2} \right) + \frac{R_s}{L} = \frac{V}{L} \left(T + \frac{1}{K\delta_0} \right) + \frac{V}{L} \cdot \frac{t_1}{2} = T' + \frac{1}{K'\delta_0} + \frac{t_1'}{2} \quad \cdots(1)$$

ここに R_s は定常旋回半径, t_1 は操舵に費やす時間である。

$$K' = K / \left(\frac{V}{L} \right), \quad T' = T \left(\frac{V}{L} \right), \quad t' = t_1 \left(\frac{V}{L} \right)$$

R/L は宝田の図表[2] を数式化すると, $B/d=2.50$, イーブンキールに対し

$$\frac{R}{L} = \frac{0.0070}{(1-0.070/(\nabla/L^2d))} \cdot \frac{1}{\alpha}, \quad \alpha \equiv \frac{A_R}{Ld} \quad \cdots(2)$$

となる。

一方、普通操船程度の舵角の旋回における T' 指数は、舵面積に大きく依存するが、 35° 旋回における T' 指数は舵面積の大小にほとんど関係しないので、一定とみなしてよい。その理由は 35° 旋回のような強い運動では速力低下が大きく、そのために推進器スリップが強く、これが舵位置における横流れによる舵力減少を打ち消してしまうので、見掛上、舵の旋回抵抗が消失するからである。

ここでは多数実船資料による実績にしたがい、 35° 旋回における T' 指数として、つぎの値を用いる。

瘠型船 $\nabla/L^2d=0.10$ に対し $T'=1.2$

肥大船 $\nabla/L^2d=0.13$ に対し $T'=1.0$

また操舵機馬力を HP , 水の密度を ρ とすれば、操舵機馬力の無次元値 P は次式となる。

$$P = \frac{\alpha^{1.5}}{t_1'} = \frac{HP}{(\rho/2)LdV^3} \cdot C_P \quad \cdots(3)$$

したがって $t_1' = \alpha^{1.5}/P$ となる。

(1), (2)および(3)式からアドヴァンス D_A は

$$\frac{D_A}{L} = T' + \frac{0.0070}{[1-0.070/(\nabla/L^2d)]} \cdot \frac{1}{\alpha} + \frac{\alpha^{1.5}}{2P} \quad \cdots(4)$$

となり, D_A/L を最小ならしめる α は

$$\log \alpha = \frac{1}{2.5} \log \left[\frac{0.007}{1-0.070/(\nabla/L^2d)} \cdot P \cdot \frac{1}{0.75} \right] \quad \cdots(5)$$

となる。同じく最適操舵時間 t_1 は

$$t_1 = \left(\frac{L}{V} \right) \cdot \frac{\alpha^{1.5}}{P} \quad \cdots(6)$$

が得られる。実績にしたがい、図3、4中の表に示すように、代表的な船舶数種類をえらび、現状と同等の操舵機馬力をあたえて操舵時間 t_1 を変化し、アドヴァンスの変化の模様とそのときの α を(4), (6)式で計算すると、図3、4に点線で示す曲線群が得られる。小型船では現状よりも速い操舵と小さい舵が、大型船では現状よりもおそい操舵と大きい舵が、アドヴァンスに関するかぎり有利であるという結論が得られている。

つぎに回頭おくれについては、普通程度の操船における T' 指数は舵面積の増加とともに減少

するから、この場合には回頭おくれを最小ならしめる操舵時間と舵面積との組合せが存在する。

多数実船の $10^\circ Z$ 試験の結果を $(L^2d/\nabla) \cdot (A_R/Ld) \cdot (1/K')$ 対 $(1/T')$ および A_R/LdK' 対 A_R/Ld の形に整理した資料[3] から T' を求めると

$$T' = \frac{0.27\nabla/L^2d}{(A_R/Ld) - 0.20(\nabla/L^2d - 0.075)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。したがって $5^\circ \sim 15^\circ$ 操舵における回頭おくれの無次元値は大略次式で表わされる。

$$\left(T + \frac{t_1}{2}\right) \frac{V}{L} = \frac{0.27\nabla/L^2d}{(A_R/Ld) - 0.20(\nabla/L^2d - 0.075)} + \frac{\alpha^{1.5}}{2P} \cdot \frac{\delta_0}{35} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに t_1 は δ_0 だけ操舵するに要する時間である。アドヴァンスの場合と同様、図5中の表に示す船につき、(7)、(8)式によつて計算すると図5に点線で示す曲線群が得られる。この曲線群から、回頭おくれに関するかぎり、小型船では操舵時間を短かくし舵面積を小さくすることは得策ではない。これはアドヴァンスの方からの結論とは逆である。大型船ではアドヴァンスからの結論と同様、操舵時間を長くしても舵面積の増加をはかることが得策である。

3. アスペクト比を考慮した場合の操舵機馬力

緒言に述べた現実の条件から起るアスペクト比の変化を考慮にいれると、以上の結論には、ある程度の修正が必要となるであろう。以下にこれを検討する。

操舵機馬力 = 直圧力 × 舵軸から圧力中心までの距離 × 操舵速度 × 常数

いま舵面積を A_R 、舵高さを h = 一定とすると、舵の横幅は A_R/h となるので、舵軸から圧力中心までの距離は A_R に比例する。

直圧力の式は種々あるが、アスペクト比 λ を考慮したもの、つぎに示す岡田の式[4]がある。

$$N = \frac{\rho}{2} V^2 A_R \left\{ 2.41 \left(1.3 - \frac{1}{2\lambda} \right) (1 - w_a)^2 (1 + k \cdot s^{1.5}) \right\} \sin \alpha'$$

このほか藤井の式[5]がある。藤井の式は岡田の式のなかの $2.41 \left(1.3 - \frac{1}{8\lambda} \right)$ が $6.13 \frac{\lambda}{\lambda + 2.25}$ となつてゐる。試みに両者を比較してみたところ、図1に示すような差が出た。そこで両者の結果を、アスペクト比のことなる各種の舵について行なつた Fischer の実験結果[6]と比較してみた。岡田の式は、 λ が0.8, 1のような小さいところで、藤井の式は λ が2, 3, 5のような大きいところで、比較的よく合うことがわかつた。そこで式の形は、あとで用いるのに便利のため、岡田の式の形をとり、 $1.00 \leq \lambda \leq 2.50$ で両者よりも、さらに Fischer の結果とよく一致する式を、あらたに求めた。結果は図1の実線で示したものであり、次式となる。

$$3.88 \left(0.99 - \frac{1}{2\lambda} \right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

(9)式を用いると操舵機馬力は次式となる。

第1図 アスペクト比と直圧力の係数

$$HP = \frac{\rho}{2} V^2 A_R \left\{ 3.88 \left(0.99 - \frac{1}{2\lambda} \right) (1 - w_a)^2 (1 + k \cdot s^{1.5}) \right\} \sin \alpha' \\ \times \frac{Ld}{A_R} \cdot \frac{A_R}{Ld} \cdot C_1 \cdot A_R \cdot \frac{Ld}{Ld} \times \frac{C_2}{t_1'} \left(\frac{V}{L} \right) \times \text{const}$$

ここで $\frac{1}{\lambda} = \frac{A_R}{h^2}$ であり, また $3.88(1 - w_a)^2(1 + k \cdot s^{1.5}) \sin \alpha' = C_N'$ とおくと

$$HP = \frac{\rho}{2} V^2 A_R C_N' \left(0.99 - \frac{A_R}{2h^2} \right) \times \frac{Ld}{A_R} \cdot \frac{A_R}{Ld} \cdot C_1 \cdot A_R \cdot \frac{Ld}{Ld} \times \frac{C_2}{t_1'} \left(\frac{V}{L} \right) \times \text{const} \\ = \frac{\rho}{2} V^3 \cdot \frac{L^2 d^2}{L} \cdot 0.99 C_N' \cdot C_1 \cdot C_2 \times \frac{\alpha^2}{t_1'} \times \text{const} \\ - \frac{\rho}{2} V^3 \cdot \frac{L^3 d^3}{L} \cdot \frac{C_N' \cdot C_1 \cdot C_2}{2h^2} \times \frac{\alpha^3}{t_1'} \times \text{const}$$

ここで $0.99 C_N' \cdot C_1 \cdot C_2 \times \text{const} = 1/C_{P1}$ とおくと

$$HP = \frac{\rho}{2} L d^2 V^3 \cdot \frac{1}{C_{P1}} \cdot \frac{\alpha^2}{t_1'} - \frac{\rho}{2} L d^2 V^3 \cdot \frac{1}{C_{P1}} \cdot \frac{Ld}{1.98 h^2} \cdot \frac{\alpha^3}{t_1'}$$

あるいは

$$t_1' = \frac{\rho}{2} L d^2 V^3 \cdot \frac{1}{HP \cdot C_{P1}} \cdot \alpha^2 - \frac{\rho}{2} L d^2 V^3 \cdot \frac{1}{HP \cdot C_{P1}} \cdot \frac{Ld}{1.98 h^2} \cdot \alpha^3 \dots\dots\dots(10)$$

ここで操舵機馬力の無次元値 P_1 を次式のようにおく。

$$P_1 = \frac{HP \cdot C_{P1}}{\rho/2 \cdot L d^2 V^3} \dots\dots\dots(11)$$

よつて

$$t_1' = \frac{1}{P_1} \left(1 - \frac{Ld}{1.98 h^2} \alpha \right) \alpha^2 \dots\dots\dots(12)$$

また α は, 操舵機馬力 P_1 が与えられたとき, 操舵時間 t_1' を変化すると, それに対応した値が次式から求められる。

$$\frac{1}{1.98} \cdot \frac{Ld}{h^2} \cdot \frac{1}{t_1'} \alpha^3 - \frac{1}{t_1'} \alpha^2 + P_1 = 0 \dots\dots\dots(13)$$

4. アドヴァンスを最小にする舵面積比

アドヴァンスは(1), (2)および(12)式からつぎのようになる。

$$\frac{D_A}{L} = T + \frac{0.0070}{[1 - 0.070/(\nabla/L^2 d)]} \cdot \frac{1}{\alpha} + \frac{t_1'}{2} \\ = T + \frac{0.0070}{[1 - 0.070/(\nabla/L^2 d)]} \cdot \frac{1}{\alpha} + \frac{\alpha^2}{2P_1} - \frac{Ld\alpha^3}{3.96 h^2 P_1} \dots\dots\dots(14)$$

よつて D_A/L を最小にする α は次式から求められる。

$$\frac{Ld}{1.32 h^2 P_1} \alpha^4 - \frac{1}{P_1} \alpha^3 + \frac{0.0070}{[1 - 0.070/(\nabla/L^2 d)]} = 0 \dots\dots\dots(15)$$

5. 回頭おくれを最小にする舵面積比

回頭おくれは(7), (12)式からつぎのように示される。

$$\left(T + \frac{t_1'}{2} \right) = \frac{0.27 \nabla / L^2 d}{\alpha - 0.20 (\nabla / L^2 d - 0.075)} + \frac{1}{2P_1} \cdot \frac{\delta_0}{35} \left(1 - \frac{Ld}{1.98 h^2} \alpha \right) \alpha^2 \dots\dots\dots(16)$$

よつて $\left(T + \frac{t_1'}{2} \right)$ を最小にする α は次式から求められる。

$$\begin{aligned}
& \frac{Ld}{1.32h^2P_1}\alpha^4 - \left\{ \frac{1}{P_1} + \frac{Ld}{3.3h^2P_1}(\nabla/L^2d - 0.075) \right\} \alpha^3 \\
& + \left\{ \frac{0.4}{P_1}(\nabla/L^2d - 0.075) + \frac{Ld}{33h^2P_1}(\nabla/L^2d - 0.075)^2 \right\} \alpha^2 \\
& - \frac{0.04}{P_1}(\nabla/L^2d - 0.075)^2 \alpha + \frac{35}{\delta_0} \times 0.27 \times \nabla/L^2d = 0 \dots\dots\dots(17)
\end{aligned}$$

6. 数 値 計 算

(13), (14)および(15)式は係数 Ld/h^2 が定まらなると計算はできない。そこで $Ld/h^2 = (d/h)^2 \times (L/d)$ とし, d/h および L/d を多数の実船資料から求めることとした。 L/d は次式に示す海難防止協会報告書のものを用いた。

$$\left. \begin{aligned} \log 20 \cdot d/L &= 0.59 - 0.23 \log L & 200 \geq L \geq 10 \\ 2 \cdot d/L &= 0.114 & 300 \geq L \geq 200 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

d/h はないので, 約 150 隻の実船資料を集めた。それが図2である。図2から標準として次式が求まった。

$$h/d = 0.635 + 6.14/L \dots\dots\dots(19)$$

(13)および(19)式を用いることによつて, (13)式から各 t_1' に対応する α を, さらに(15)式から D_A/L を最小にする α を求めることができた。

(13), (14)および(15)式から求めたアドヴァンスの計算結果は, 図3, 4の実線群である。また(16)式から求めた回頭おくれの計算結果は図5の実線群である。

7. 結 論

アドヴァンスに関しては, 図3, 4からアスペクト比を考慮にいれた場合は, いれない場合に比べ, つぎのことが言いうる。

(1) L が 30, 50, 80,

第2図 船の長さとお水に対する舵高さの比

第3図 操舵機馬力一定の条件下で操舵時間がアドヴァンスにおよぼす影響

100 のような小さい船では、アドヴァンスの最小値は、さらに小さくなる。しかし L が 150, 200, 250 の大きな船では、きわめてわずかな差はあるが、大きくなる。

- (2) アドヴァンス最小値になるときの操舵時間 t_1 の値は、 L が 30, 50, 80, 100 の船の場合は小さくなるが、150, 200, 250 の船では大きくなる。

- (3) α の値は、現行規程 $t_1=15$ 秒より小さいところでは、何れの船でも大になるが、 $t_1=15$ 秒より大きいところでは、 L が 30, 50, 80, 100 の場合は小さくなるが、150, 200, 250 の場合は、大きくなる。このことは(2)にあるようにアドヴァンスが最小値になる時の t_1 の値が、大になることから当然である。

第4図 操舵機馬力一定の条件下で操舵時間がアドヴァンスにおよぼす影響

第5図 操舵機馬力一定の条件下で操舵時間が回頭おくれにおよぼす影響

以上のようにアスペクト比を考慮にいれると、いれないときにくらべ、定量的には若干の差異は出るが、操舵時間とアドヴァンスに関しては、定性的には同じ結論となる。すなわち現行規程15秒に対し、小型船は操舵速度を大、舵面積を小にし、大型船では操舵速度を小、舵面積を大にした方が有利である。

回頭おくれに関しては、図5からアスペクト比を考慮にいれた場合は、いれない場合にくらべ、つぎのことが言いうる。

- (4) L が 50 の小型船については、現行規程 $t_1=15$ 秒より小さいところでは回頭おくれは小さくなるが、 $t_1=15$ 秒より大きいところでは一般に大きくなる。しかしその差はわずかである。
- (5) L が 100 の船については、差はわずかであるが、 L が 200 の船は t_1 が大になるにしたがつて差は大きくなる。 L が 100 の船については t_1 を 45 秒、 L が 200 の船については t_1 を 39 秒で計算を打ち切つたのは、 t_1 がそれぞれ 40 秒、35 秒になると、 λ が 1 以下になり、(9)式の精度が低下するからである。

以上回頭おくれに関しては、アスペクト比を考慮にいと、いれないときにくらべ、小型船では若干の差異はあるが、定性的には同じである。大型船では実状にそくした操舵時間の範囲内——例えば50秒以内——では回頭おくれの最小値は存在しないと考えられる。

なおアスペクト比一定という条件のもとでは、操舵時間 t_1 を次第に大にするにしたがつて舵面積を増大すると、やがてキールラインより下に舵が出てくる。このようなことは実状にそくしていないので、実現不可能であると考えてよい。したがって日本海難防止協会報告書にある図3, 4の点線の曲線は、ある t_1 値のところで打ち切りになるべきものと考えられる。つまり操舵時間を現行15秒より大にし、舵面積を大にし、アドヴァンスや回頭おくれの最小値を実現しようとする大型船に関しては、舵がキールライン下に、はみ出す可能性が大である。

小型船については、アドヴァンス、回頭おくれともアスペクト比を考慮に入れても入れない場合に比べ、定量的には若干の差異はあるが、定性的には同じで、現行規程15秒よりも操舵速度を大にし、舵面積を小にした方が有利である。

最後にこの研究に関し、終始懇篤なる御指導をたまわつた大阪大学工学部造船学科野本助教授に対し、深甚なる感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] 日本海難防止協会：航海設備等の基準および改善に関する研究報告書，昭和41年
- [2] 宝田直之助：実船解析による旋回性能の研究，造船協会論文集，110，111，昭和36，37年
- [3] 野本謙作：船の操縦性，造船協会誌，424
- [4] 岡田正次郎：船の背後に置かれた舵の性能に関する実験結果について，造船協会論文集，105
- [5] 藤井 斉：舵特性に関する実験的研究，大阪大学提出学位論文，昭和36年
- [6] Fischer H：“Berechnung der Ruderkraft” W.R.H. 1938