(昭和50年11月日本造船学会秋季講演会において講演)

被曳船の旋回

正員林 承治*

On the Turning of Towed Ships System

by Seng Tee Lim, Member

Summary

We have discussed the steady turning motion of the towed ships system in this Journal No. 137. In this paper, we discussed again the turning of the towed ships system by the parameters as used in No. 137 and the additional parameter κ (radius of gyration of ship), the results are as follows:

1. By steered the rudder of the tugboat, the effects of the fore-towing point, towing ropes' length and the towed ships to the values of A_{d0} , T_{r0} , T_{ad0} and R_{e0} are small and it can be neglected, and those values are given in equation (7).

2. The larger the rudder angle and the rudder area ratio of the tugboat are the smaller the values of A_d , T_r and T_{ad} are.

3. As the rudder angle and rudder area of the tugboat are constant,

a). the values of A_d , T_r and T_{ad} decrease, when the number of towed ship increases,

b). because of the increase of the radius of steady turning, the values of A_d , T_r , T_{ad} become larger, when the the towing points are placed apart from the centre of gravity of the towed ship, except the last towed ship,

c). the effects of the derivatives of towed ships are included in the parameter μ as given in equation (4),

d). the effect of radius of gyration of tugboat itself is large, when the value of radius of gyration of tugboat increase, the values of A_d , T_r and T_{ad} grow large, and the effect of radius of gyration of towed ship is small and negligible.

1緒 論

曳船が一定の速度で,平水中を進行中の数隻の被曳船を曳航した時,曳船のみの操舵による曳船被曳船系の定常旋回について,船の大きさ,隻数,単船としての針路安定性,前後曳航点の位置,曳索の長さ,曳船の操舵角 および舵面積比について計算を行ない,旋回半径並びに曳航限界曳索長を求めてある。

本論文では引き続き曳船の操舵による曳船被曳船系の Advances, Transfers, Reaches, Tactical diameters について,定常旋回⁵⁾の場合に考慮された諸要素の他に,船の慣動半径を変えて,研究を行なった。

2 被曳船の運動方程式

静水面において、曳船により曳航された被曳船を考える。被曳船は同型とし、同長の曳索(質量、弾性は考え ず、一直線に張られた絃とする)により、重心 G_i より前方に f_i の曳航点と後方に a_i の曳航点により連結さ れ、被曳船間の相互干渉は曳索の張力のみとし、前方船の後方船に対する伴流等の影響は無視し、問題を水平面 内における二次元平面運動と考える。

Fig.1 において、X, Y 軸は空間固定軸とし、 x_i, y_i 軸は i 隻目の被曳船に固定した軸とする。重心周りの角

* 九州大学工学部造船学教室

被曳船の旋回

速度を Ω_i ,線速度を U_i ,偏角を β_i として無次元化されたi番目の被曳船の運動方程式は次の様になる。

$$\begin{array}{c} m_{xi} \left(\frac{L_{i}}{U_{i}}\right) \cdot \left(\frac{\dot{U}_{i}}{U_{i}}\cos\beta_{i} - \dot{\beta}_{i}\sin\beta_{i}\right) - m_{yi}\omega_{i}\sin\beta_{i} = C_{xi} \\ m_{yi} \left(\frac{L_{i}}{U_{i}}\right) \cdot \left(\frac{\dot{U}_{i}}{U_{i}}\sin\beta_{i} + \dot{\beta}_{i}\cos\beta_{i}\right) + m_{xi}\omega_{i}\cos\beta_{i} = C_{yi} \\ n_{i} \left(\frac{L_{i}}{U_{i}}\right)^{2} \cdot \left(\frac{\dot{U}_{i}}{L_{i}}\omega_{i} + \frac{U_{i}}{L_{i}}\dot{\omega}_{i}\right) = C_{ni} \end{array} \right\}$$

$$(1)$$

但し、 $\omega_i = L_i \Omega_i / U_i$ を示し、 m_{xi} , m_{yi} は x_i , y_i 方向の見掛け質量を $\rho A_i L_i / 2$ (ρ は流体の密度、 A_i は中央縦断面積、 L_i は船長)で割った値を示し、 n_i は見掛け慣性能率を $\rho A_i L_i^2 / 2$ で、 C_{xi} , C_{yi} , C_{ni} は x_i , y_i 方向の力と重心周りのモーメントをそれぞれ $\rho A_i U_i^2 / 2$ 、 $\rho A_i L_i U_i^2 / 2$ で割った値を示す。

また,前方曳航点,後方曳航点に働く無次元化した張力を $T_{i'}, T_{i+1'}$,曳索の長さを l_i, l_{i+1} ,曳索と船体中 心線のなす角を $\epsilon_i, \epsilon_{i+1}$,船体中心線とX軸のなす角を θ_i とすれば,

$$C_{xi} = -X_{hi} + T_{i}' \cos \varepsilon_{i} - T_{i+1}' \cos (\theta_{i} - \theta_{i+1} - \varepsilon_{i+1}) - X_{Ri}' \sin \delta_{i}$$

$$C_{yi} = -Y_{\beta i}' \beta_{i} + Y_{\omega i}' \omega_{i} - Y_{\beta \beta i}' |\beta_{i}| \beta_{i} - Y_{\beta \omega i}' |\omega_{i}| \beta_{i} + T_{i}' \sin \varepsilon_{i}$$

$$+ T_{i+1}' \sin (\theta_{i} - \theta_{i+1} - \varepsilon_{i+1}) + Y_{Ri}' \cos \delta_{i}$$

$$C_{ni} = -N_{\beta i}' \beta_{i} - N_{\omega i}' \omega_{i} - N_{\beta \beta i}' |\beta_{i}| \beta_{i} - N_{\beta \omega i}' |\beta_{i}| \omega_{i} + T_{i}' \frac{f_{i}}{L_{i}} \sin \varepsilon_{i}$$

$$- T_{i+1}' \frac{a_{i}}{L_{i}} \sin (\theta_{i} - \theta_{i+1} - \varepsilon_{i+1}) - N_{Ri}' \cos \delta_{i}$$

$$(2)$$

となる。 $Y_{\beta i}$ '…等は船に働く流体力の徴係数の無次元化された値であり,Rの添字は舵関係の, X_{hi} ' は抵抗の無 次元値である。今,重心の座標を X_i , Y_i とすれば,

$$X_{i} = X_{i} - a_{i-1} \cos \theta_{i-1} - l_{i} \cos (\theta_{i} + \varepsilon_{i}) - f_{i} \cos \theta_{i}$$

$$Y_{i} = Y_{i} - a_{i-1} \sin \theta_{i-1} - l_{i} \sin (\theta_{i} + \varepsilon_{i}) - f_{i} \sin \theta_{i}$$

$$(3)$$

であり、また、曳船の重心の座標を X_0, Y_0 とすると、

$$X_{i} = X_{0} - \sum_{k=1}^{i} \left[a_{k-1} \cos \theta_{k-1} + l_{k} \cos \left(\theta_{k} + \varepsilon_{k} \right) + f_{k} \cos \theta_{k} \right]$$

$$Y_{i} = Y_{0} - \sum_{k=1}^{i} \left[a_{k-1} \sin \theta_{k-1} + l_{k} \sin \left(\theta_{k} + \varepsilon_{k} \right) + f_{k} \sin \theta_{k} \right]$$

$$(4)$$

曳船の速度を U_0 とすれば $\dot{X}_0 = U_0 \cos(\theta_0 + \beta_0)$, $\dot{Y}_0 = U_0 \sin(\theta_0 + \beta_0)$ であり, $\dot{X}_i = U_i \cos(\theta_i + \beta_i)$, $\dot{Y}_i = U_i - \sin(\theta_0 + \beta_0)$ であるから, これらを (4) 式に代入して整理すれば

$$U_{i} = U_{0} \prod_{k=1}^{i} \frac{\cos\left(\theta_{k-1} + \beta_{k-1} - \theta_{k} - \varepsilon_{k}\right)}{\cos\left(\varepsilon_{k} - \beta_{k}\right)} + \frac{1}{\cos\left(\theta_{i} + \beta_{i} - \theta_{i+1} - \beta_{i+1}\right)}$$

$$\times \sum_{k=1}^{i} \left\{ \left[a_{k-1}\dot{\theta}_{k-1}\sin\left(\theta_{k-1} - \varepsilon_{k} - \theta_{k}\right) - f_{k}\dot{\theta}_{k}\sin\varepsilon_{k}\right] \times \prod_{m=k}^{i} \frac{\cos\left(\theta_{m} + \beta_{m} - \theta_{m+1} - \varepsilon_{m+1}\right)}{\cos\left(\varepsilon_{m} - \beta_{m}\right)} \right\}$$

$$(5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{i} = U_{0} \prod_{k=1}^{i} \frac{\sin\left(\theta_{k-1} + \beta_{k-1} - \theta_{k} - \varepsilon_{k}\right)}{l_{k}\cos\left(\varepsilon_{k} - \beta_{k}\right)} - \frac{1}{\sin\left(\theta_{i} + \beta_{i} - \theta_{i+1} - \beta_{i+1}\right)}$$

$$\times \sum_{k=1}^{i} \left\{ \left[a_{k-1}\dot{\theta}_{k-1}\cos\left(\theta_{k-1} - \theta_{k} - \beta_{k}\right) + f_{k}\dot{\theta}_{k}\cos\beta_{k} + \dot{\theta}_{k}l_{k}\cos\left(\varepsilon_{k} - \beta_{k}\right)\right]$$

$$\times \prod_{m=k}^{i} \frac{\sin\left(\theta_{m} + \beta_{m} - \theta_{m+1} - \varepsilon_{m+1}\right)}{l_{m}\cos\left(\varepsilon_{m} - \beta_{m}\right)} \right\}$$

$$(6)$$

舵角 δi に対する舵力は、藤井の式より

$$X_{Rt}' = X_{\delta t}' \sin\left[\delta_{t} - (\beta_{t} - \frac{1}{2}\omega_{t})\right]$$

$$Y_{Rt}' = Y_{\delta t}' \sin\left[\delta_{t} - (\beta_{t} - \frac{1}{2}\omega_{t})\right]$$

$$N_{Rt}' = \frac{l_{Rt}}{L_{t}} \cdot Y_{\delta t}' \sin\left[\delta_{t} - (\beta_{t} - \frac{1}{2}\omega_{t})\right] \doteq \frac{1}{2}Y_{Rt}'$$

$$X_{\delta t}' = Y_{\delta t}' = \frac{6.13k_{Rt}}{2.55 + k_{Rt}}(1 - \omega_{t})^{2} \cdot \frac{A_{Rt}}{A_{t}}$$

$$(7)$$

但し、 k_{Ri} , A_{Ri} は舵の縦横比, 舵面積を、wは伴流係数を、 l_{Ri} は舵直圧力中心から船体重心までの距離を表わっす。前号⁵⁾ において求めた定常旋回の結果を次に示すと

日本造船学会論文集 第138号

$$\begin{array}{l}
\left\{q_{cun} = \frac{2K}{n\xi \sin 2\delta_{0}} - n\left(p - 0.50\right) \\
K = \left(N_{\rho_{0}}' - \gamma_{0} N_{\delta_{0}}'\right) \left(\varDelta + R_{0s}' + \frac{4r_{0} + r}{2T'}\right) + \frac{N_{\omega}'}{Y_{\delta_{0}}'} \\
\xi = \frac{L_{i}}{L_{0}}; r \equiv r_{1} = \cdots = r_{i} = \cdots = r_{n-1} \\
\varDelta \equiv \varDelta_{1} = \varDelta_{2} = \cdots = \varDelta_{i} = \cdots = \varDelta_{n-1} = \varDelta_{n} \\
w_{0} = w_{0s} + \frac{T'\left(\frac{1}{2} - r_{0}\right)Y_{\delta_{0}}'\sin\delta_{0}\cos\delta_{0}}{\overline{\varDelta} + 1\right)} (1 - e^{-n}) \\
\Xi = Y_{\beta}'N_{\omega}' - \left[\left(m_{x} - Y_{\omega}'\right) - nT'\left(p + q + r\right)\right]N_{\beta}' \\
w_{i} = \frac{L_{i}}{U_{i}}\partial_{i} = \xi C_{i}\omega_{0} \\
C_{i} = \frac{U_{0}}{U_{i}} = \frac{1}{\mu\cos\sqrt{\frac{\pi}{2q_{cun}}} \cdot q} (0 \le q \le q_{cun}) \\
\mu = \left(\frac{Y_{\delta_{0}}'\sin\delta_{0}}{T_{0}'} + 1\right)^{1/3}
\end{array}$$
(8)
(10)

但し、To' は曳船の推力の無次元値であり、T' は1隻の被曳船の前進抵抗の無次元値である。

3 被曳船の旋回計算

定常旋回の研究で考慮された要素,即ち,隻数 n, p, r, A, κ などを変化させて,前節の (1) 式と (2) 式 を計算し,同型船の場合の Advance, Transfer, Tactical diameter と q の関係を求めている。Fig.3~ Fig. 6 はそれぞれ1隻,2隻,3隻および4隻の同型被曳船を曳航した場合の $\dot{\theta}$, θ , β の時間に対する変化を示した ものであり,曳索が長い程,隻数が多い程定常状態に入りにくい。また,その航跡を Fig.7~ Fig.10 に示す。 今,Fig.2 に示す様に、曳船が操舵し始めた位置の曳船の重心の座標を原点に取り,原針路に沿いX軸を,これ に直角方向にY軸を取れば,各船の方位角 ϕ_i が $\pi/2$ になった時の座標 $(X_i, Y_i)_{\phi_i=\pi/2}$ を A_{di} (Advance of ith. Towed Ship) と T_{ri} (Transfer of ith. Towed Ship), $Y_i/\phi_{i=\pi}$ を T_{adi} (Tactical diameter of ith. Towed Ship) とすれば,各船の T_{ri} , R_{ei} , T_{adi} は例えば Fig.11~Fig.36 に示すごとく,次の様におくことが できる。

$$T_{r0}' \rightleftharpoons T_{r1} \rightleftharpoons \cdots \rightleftharpoons T_{ri}' \rightleftharpoons \cdots \rightleftharpoons T_{rn}' \equiv T_{r'} R_{e0}' \rightleftharpoons R_{e1}' \rightleftharpoons \cdots \rightleftharpoons R_{ei}' \rightleftharpoons \cdots \rightleftharpoons R_{en}' \equiv R_{e'} T_{adi}' \rightleftharpoons T_{r'} + R_{i'} R_{e} \rightleftharpoons A_{di}' - R_{i'}$$

$$(11)$$

但し, $T_{ri}', R_{e}', A_{di}', T_{adi}', R_{i}'$ は $T_{ri}, R_{e}, A_{di}, T_{adi}, R_{i}$ を曳船の長さ L_{0} で割った値であり, R_{e} は Reach を, R_{i} は定常旋回半径を表わす。

次に各要素と $A_{d'}$, $T_{r'}$, $T_{ad'} \sim q$ の関係について述べる。Fig.11 は被曳船の隻数について計算したもので、 nが増すと $A_{d'}$, $T_{r0'}$ は減少するが、nが大きくなるとその差は少なくなる。

Fig.12~Fig.14 は前方曳航点 p の影響を示しているが、その差は小さい。

Fig.15~Fig.17 は後方曳航点 r の影響を示しており、後方曳航点を重心から離すと R_i' が大きくなり、 $A_{a'}$ 、 $T_{ri'}$ などは大きくなる。

Fig.18~Fig.23 は曳船の舵面積比 A_r/A_s と操舵角 δ_0 の影響を示している。舵ききが良ければ,船は小さい 半径で旋回するから, A_a' , T_r' , $T_{aa'}$ などの値は小さくなる。即ち, δ_0 の増大と A_r/A_s の増大はこれらの値を 小さくする。

Fig. 24~Fig. 27 は単船としての針路安定性が良い船と悪い船を曳船と被曳船とした場合を示している。 A_{d0}' と T_{r0}' は被曳船の船型による影響は小さく、曳船の船型によって左右され、安定性の良い曳船程、 A_{d0} 、 T_{r0}' が 大きくなる。

Fig.28~Fig.31 は被曳船の大小および慣動半径 κ による影響を示している。 κ が大きければ R_e' が大きくな

被曳船の旋回

るので、 A_{d}', T_{r}', T_{ad}' は大きくなる。また被曳船が大きくなれば、 T_{r}', R_{e}' は小さくなる。

以上の諸計算をまとめて、 簡単に計算するために、 Fig. 32 の様に被曳船を系から切り離して、その代りに後 方曳航点 r_0 に曳船と $\varphi(t)$ なる曳航角をなす曳索に張力 T_0 を加えた場合の曳船の運動方程式を考えてみる。 即ち

$$m_{y0} \left(\frac{L_0}{U_0} \right) \dot{\beta}_0 + Y_{\beta_0} \beta_0 + (m_{x0} - Y_{\omega0}) \omega_0 = Y_{\delta0} \delta_0 - T_0 \varphi(t)$$

$$n_0 \left(\frac{L_0}{U_0} \right) \dot{\omega}_0 + N_{\omega0} \omega_0 + N_{\beta_0} \beta_0 = -N_{\delta0} \delta_0 + T_0 r_0 \varphi(t)$$

$$(12)$$

定常旋回を考え、 $T_0' \varphi(t)$ の一定値を $T_0' \varphi_0$ とすれば

$$\omega_0 = \omega_{0s} - \frac{r_0 Y_{\beta_0}' + N_{\beta_0}'}{\Delta_0} \cdot T_0' \varphi_0$$
(13)

が得られる。また(9)式は

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \omega_{0s} \left[1 + \tau \left(1 - e^{-n} \right) \right] \\ \tau &\equiv T' \left(\frac{1}{2} - r_0 \right) \frac{Y_{\delta 0}' \sin \delta_0 \cos \delta_0}{\bar{A} \cdot \omega_{0s}} \end{aligned}$$
 (14)

となるから

$$T_{0}'\varphi_{0} = -\tau \frac{\omega_{0s}\Delta_{0}}{r_{0}Y_{\beta0}' + N_{\beta0}'} (1 - e^{-n})$$

$$\equiv \nu \cdot \sin \delta_{0} \cos \delta_{0}$$

$$\nu \equiv -T'(1 - e^{-n}) \frac{\left(\frac{1}{2} - r_{0}\right)Y_{\delta0}'\Delta_{0}}{(\tau_{0}Y_{\beta0}' + N_{\beta0}')\overline{\Delta}}$$
(15)

また,

$$R_{0}' = \frac{1}{\omega_{0}} = R_{0s}' [1 - \tau (1 - e^{-n})]$$
(16)

次に各船の $A_{di'}$, $T_{ri'}$, $R_{e'}$, $T_{adi'}$ については,先ず曳船単船の場合 δ_0 に対する $A_{d'}$, $T_{r'}$, $R_{e'}$ を $T_{ad'}$ をそ れぞれ $A_{d0s'}$, $T_{r0s'}$, $R_{e0s'}$ と $T_{ad0s'}$ とした時,曳航の場合は線型理論 (12) 式において, $T_0'\varphi(t) = T_0'\varphi_0$ と仮 定して, Davidson & Schiff⁶) の方法で計算すると $R_{e0'}$, $A_{d0'}$, $T_{r0'}$ が求まる。

$$A_{d0} = \begin{bmatrix} A_{d0s}' - \tau (1 - e^{-n}) \cdot \frac{N_{\omega0}' - r_0 (m_{x0} - m_{y0} - Y_{\omega0}')}{r_0 Y_{\beta_0}' - N_{\beta_0}'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - \tau (1 - e^{-n}) \end{bmatrix}$$

$$R_{e0}' = \begin{bmatrix} R_{e0s}' - \tau (1 - e^{-n}) \cdot \frac{N_{\omega0}' - r_0 (m_{x0} - m_{y0} - Y_{\omega0}')}{r_0 Y_{\beta_0}' - N_{\beta_0}'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - \tau (1 - e^{-n}) \end{bmatrix}$$

$$T_{\tau0}' = T_{\tau0s}' \begin{bmatrix} 1 - \tau (1 - e^{-n}) \end{bmatrix}$$

$$T_{ad0}' = T_{ad0s}' \begin{bmatrix} 1 - \tau (1 - e^{-n}) \end{bmatrix}$$

$$(17)$$

が得られる。然るに、 $A_{di'}$ などは (11) 式の様に与えられているから、(17) 式と (10) 式を用いれば求められ る。これらから求められた値は Fig. 33~Fig. 36 に示す如く、 q_{cun} 附近を除けば、殆ど一致する。従って (17) 式と (10) 式により、 $A_{d'}$ 、 $T_{r'}$ 、 $R_{e'}$ 、 $T_{ad'}$ が計算できる。

4 結 論

以上により得られた結果は次の様である。

(1) 曳船の操舵による A_{d0}', T_{r0}' は被曳船の船型,前方曳航点と曳索の長さによる影響が少なく,その値は (17) 式で与えられる。

(2) 曳船の操舵角,並びに舵面積比が大きい程, A_a', T_r', T_{aa}' は小さくなる。

(3) 曳船の操舵角と舵面積比一定の場合は

- (i) 隻数が増すと $A_{a'}, T_{r'}, T_{ad'}$ は小さくなる。
- (ii) 最後尾船を除き、後方曳航点が重心から離れる程、 $A_{d'}$ 、 $T_{r'}$ 、 $T_{ad'}$ 等の値は大きくなる。
- (iii) 単船としての微係数の影響はτに含まれ、 A_{ao} 、 T_{ro} 、に与える影響は小さい。
- (iv) κ が大きい程, $A_{d'}$, $T_{r'}$, $T_{ad'}$ は大きくなる。

最後に本研究に関して、終始変らぬご指導を賜った井上正祐教授に深甚の謝意を表わします。

参考文献

- 1) 井上正祐他:被曳船の進路安定,西部造船会々報,第42号(1971年7月),p.11~25.
- 2) 井上正祐,林 承治:被曳船の進路安定(続),西部造船会々報,第42号(1972年3月), p.35~44.
- 3) 井上正祐,林 承治:被曳船の進路安定 (索の質量を考えた時),西部造船会々報,第44号 (1972年8 月), p.129~145.
- 4) 井上正祐,林 承治:被曳船の進路安定(制限水路並びに曳航点の影響),西部造船会々報,第46号 (1973年8月), p.15~31.
- 5) 林 承治:被曳船の定常旋回,日本造船学会論文集,第137号(1975年5月),p.181~189.
- S. M. Davison & L. I. Schiff : Turning and Cowse-Keeping Qualities, SNAME, Vol. 54 (1946), p. 152~200.



被曳船の旋回



а А. • • • • • • • • • • • • • • • •

日本造船学会論文集 第138号





NII-Electronic Library Service