曳網中のヨーイングについて—II—

高島末夫*

Yawing of Ship, with Special Reference to That
during Trawling—II.

S. Takashima

Abstract

In general, it has been observed that the ships motion under towing a trawl-net which supported by "the towing block" on the her stern at starboard side is different from the motion without the net. In this report, the auther has analysed the ships motion, especially about the effect of towing tension on the ships motion in steered condition under a state as mentioned above. And the following tendencies were found out :

(1) By the effect of towing tension on the ships motion, it is possible to make even dynamically unstable ships directionally stable without steered.

(2) Under towing a trawl-net as mentioned above, the ships drift angle when steered the rudder angle is given a meeting rudder with a combination of angular deviation and velocity control, no return to zero. And in the case of that meeting rudder is a proper quantity, the ships track slightly come back to her initial course.

(3) The ships drift angle under a state as mentioned above, increase proportionally to the towing tension of the net which supported by the towing block on the same position with uniform towing velocity.

1. 前 書

船舶が他船あるいは漁具等を曳航して、一定の張力を受けながら航行している場合には、一般の場合と若干異つた船の運動がみられる [1]。したがつて他船を曳航する機会の多い船やトロール漁船について、これらの状態における船の運動を解析するのも意義があると考えられる。ここでは被曳航体の運動には触れないものとし、その抵抗即ち張力が曳船の運動とくに操舵に伴う船体運動に与える影響を考察する。曳船が受ける張力も被曳航体が水面にある場合には波浪等の影響で、複雑な変動がみられるがトロール漁具等水中を曳航する場合は割合変動が少ない。したがつてここではほぼ一定の張力を受けて航行中のサイドトロール漁船の運動について解析する。

2. 仮 定

解析の都合上次の仮定を設ける。

- (1) 曳網中の前進速度には変化がない。
- (2) 偏角および横滑り角はいずれも2次以上の項が無視出来る程度の微小範囲に限る。
- (3) 船が旋回に入ると有効舵角は変化するが、操舵々角を有効舵角とする。

* 水産大学校（下関市吉見永田本町）

(4) 曳網張力が船首尾線に直角に働く力および張力による旋回モーメントは偏角に比例するものとする。

(5) 舵力に与えるプロペラスリップ比の影響は考慮しない。

3. 運動方程式

図1のように船の重心Gに固定した座標を定め、右舷向き力、右偏角、右まわりモーメント、右舵、右横滑りをそれぞれ正とすると運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} -m_y(u' \sin \alpha / u + \alpha' \cos \alpha) + m_x \phi' \cos \alpha &= C_N \\ n(u' \phi' / u + \phi'') &= C_M \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

(1)式の右边は船体を受ける流体力、舵の力、漁具張力等の影響を受けており仮定により次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} C_N &= C_{N\alpha} \cdot \alpha + C_{N\phi'} \cdot \phi' + C_{N\delta} \cdot \delta + f_1 \phi \\ C_M &= C_{M\alpha} \cdot \alpha - C_{M\phi'} \cdot \phi' + C_{M\delta} \cdot \delta + f_2 (1 - \frac{\phi}{K}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで(1), (2)式は次のように無次元化されている。即ち $C_N = -N / \rho/2 AU^2$, $C_M = M / \rho/2 LAU^2$, $f_1 = F / \rho/2 AU^2$, $f_2 = F_M / \rho/2 LAU^2$, $m_y = M_y / \rho/2 AL$, $m_x = M_x / \rho/2 AL$, $n = I / \rho/2 AL^3$, $L / u \phi = \omega = \phi'$ また'は d/ds を示し, $s = S/L$ である。そして $C_{N\alpha}$, $C_{M\alpha}$ 等は $\partial N / \partial \alpha$, $\partial M / \partial \alpha$ 等を表わしている。

また操舵の様子は曳網中の当て舵の項と操舵手の操舵の主流と考えられ、又は多くの自動操舵でとられている項とを併せて次のように操舵されているものとする。

$$\delta = \phi_{10} - k_1 \phi - k_2 \phi' \dots\dots\dots (3)$$

以上(2), (3)式を(1)式に代入し仮定により整理すると、曳網中の操舵に伴う船の運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} -m_y \alpha' + (m_x - C_{N\phi'} + C_{Nk_2}) \phi' - C_{N\alpha} \cdot \alpha + (C_{Nk_1} - f_1) \phi &= C_N \phi_{10} \\ n \phi'' + (C_{M\phi'} + C_{Mk_2}) \phi' - C_{M\alpha} \cdot \alpha + (C_{Mk_1} + \frac{f_2}{K}) \phi &= C_M \phi_{10} + f_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

但し $C_{N\delta} \rightarrow C_N$, $C_{M\delta} \rightarrow C_M$ と略記してある。

(4)式にて f_1 , f_2 , K が曳網張力、曳網張力による旋回モーメント、張力を受ける支点の位置の効果を表わしている。

4. 運動方程式の解および考察

(4)式にて $m = m_x - C_{N\phi'}$ とし微分オペレーター D を用いると運動方程式の特性方程式は次の行列式より求めることが出来る。

$$\begin{vmatrix} -(m_y D + C_{N\alpha}) & (m + C_{Nk_2}) D + (C_{Nk_1} - f_1) \\ -C_{M\alpha} & n D^2 + (C_{M\phi'} + C_{Mk_2}) D + (C_{Mk_1} + \frac{f_2}{K}) \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

(5)式を整理し, $D \rightarrow P$ とすると特性方程式は次のようになる。

$$P^3 + a_{11} P^2 + a_{12} P + a_{13} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

但し

$$a_{11} = q_1 + \frac{C_{Mk_2}}{n}, \quad q_1 = \frac{C_{M\phi'}}{n} + \frac{C_{N\alpha}}{m_y}$$

図1

$$a_{12} = \{q_2 + m_y(C_M k_1 + \frac{f_2}{K}) + k_2(C_{N\alpha}C_M - C_{M\alpha}C_N)\} \frac{1}{m_y n}$$

$$|q_2 = C_{N\alpha}C_{M\phi'} - mC_{M\alpha}|$$

$$a_{13} = \{C_{N\alpha}(C_M k_1 + \frac{f_2}{K}) - C_{M\alpha}(C_N k_1 - f_1)\} \frac{1}{m_y n}$$

(6)式では種々の根の状態が考えられるが、後述の数値計算の結果より1つの実根を P_1 他の2根を共役複素数 $P_{2,3} = \sigma \pm i\beta$ とすると、 $\phi = Ae^{P_1 s}$, $\alpha = Be^{P_1 s}$ とおくことにより(4)式の基本解は次のように表わすことが出来る。

$$\left. \begin{aligned} \phi_f &= A_1 e^{P_1 s} + e^{\sigma s} \sqrt{A_2^2 + A_3^2} \cos(\beta s - \gamma_\phi) \\ \alpha_f &= B_1 e^{P_1 s} + e^{\sigma s} \sqrt{B_2^2 + B_3^2} \cos(\beta s - \gamma_\alpha) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

但し $\gamma_\phi = \tan^{-1} A_3/A_2$, $\gamma_\alpha = \tan^{-1} B_3/B_2$, また A_i , $B_i (i=1, 2, 3)$ は積分常数で次の関係がある。

$$B_i = h_i A_i \dots\dots\dots (8)$$

$$h_i = \frac{(m + C_N k_2)P_i + (C_N k_1 - f_1)}{m_y P_i + C_{N\alpha}}$$

次に(4)式の特別解を $\phi_p = A_o$, $\alpha_p = B_o$ とすると結局船の運動は次式にて求めることが出来る。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= A_o + A_1 e^{P_1 s} + e^{\sigma s} \sqrt{A_2^2 + A_3^2} \cos(\beta s - \gamma_\phi) \\ \alpha &= B_o + B_1 e^{P_1 s} + e^{\sigma s} \sqrt{B_2^2 + B_3^2} \cos(\beta s - \gamma_\alpha) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで積分常数を定めるため初期条件として $s=0$ にて $\phi = \phi_2$, $\phi' = \alpha = 0$ とすれば常数は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{B_o + h_2 Z}{h_2 - h_1}, \quad A_2 = Z - A_1 \\ A_3 &= \{A_1(\sigma - P_1) - \sigma Z\} \frac{1}{\beta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

但し $Z = \phi_2 - A_o$ 。

以上によつて曳網中の船の運動は最終的に決定され、その重心の軌跡は次式から求める。即ち与えられた針路と重心の運動の接線方向とのなす角を θ とすると

$$\theta = \phi + \alpha \dots\dots\dots (11)$$

ここで同じ船でもその時受ける張力の大きさと操舵の方法で曳網中の運動が異なるのでその様子を検討してみる。

4.1 非曳網、直進中の針路安定性

(5)式にて $f_1 = f_2 = K = k_1 = k_2 = \phi_{10} = 0$ とすると(6)式は

$$P(P^2 + q_1 P + q_2) = 0 \dots\dots\dots (12)$$

となる。この場合安定であるためには $q_1 > 0$, $q_2 > 0$ であれば良く、 $|q_2|$ が大きいほど安定性が良いことは従来論及されているとおりである。

4.2 曳網中舵中央の場合

(5)式にて $k_1 = k_2 = \phi_{10} = 0$ とおくと(6)式は

$$P^3 + q_1 P^2 + (q_2 + m_y \frac{f_2}{K}) \frac{1}{m_y n} P + \{C_{N\alpha} \frac{f_2}{K} + C_{M\alpha} f_1\} \frac{1}{m_y n} = 0$$

となる。この場合の安定条件は Routh の安定判別法によると

$$q_1 > 0, \quad (q_2 + m_y \frac{f_2}{K}) > 0, \quad (C_{N\alpha} \frac{f_2}{K} + C_{M\alpha} f_1) > 0,$$

$$q_1(q_2 + m_y \frac{f_2}{K}) - (C_{N\alpha} \frac{f_2}{K} + C_{M\alpha} f_1) > 0$$

が満足されていれば良い。

したがって曳網張力の影響は $m_y f_2 / K > 0$ であるから $K > 0$ にて K の小さいほど即ち張力の支点が船尾に近いほど安定性を高める効果をもつ。また第4条件は後述の数値計算の結果通常の曳網の範囲では常に満足される。これらの条件により、船体そのものの針路安定性の良い船ほど大きい曳網張力と旋回モーメントを受けても安定であり、あるいは本来針路不安定の船でも曳網張力を船尾側に支点をもつように曳網することにより安定側に変化させることが出来る。これは船舶運用の経験的事実と一致する。

4.3 曳網中偏角に比例した操舵を加えた場合

(5)式にて $k_2 = \phi_{10} = 0$ とすると(6)式は

$$P^3 + q_1 P^2 + \{q_2 + m_y(C_M k_1 + \frac{f_2}{K})\} \frac{1}{m_y n} P + \{C_{Na}(C_M k_1 + \frac{f_2}{K}) - C_{Ma}(C_N k_1 - f_1)\} \frac{1}{m_y n} = 0$$

となる。この場合の安定条件は

$$q_1 > 0, \quad q_2 + m_y(C_M k_1 + \frac{f_2}{K}) > 0,$$

$$C_{Na}(C_M k_1 + \frac{f_2}{K}) - C_{Ma}(C_N k_1 - f_1) > 0$$

$$q_1 \{q_2 + m_y(C_M k_1 + \frac{f_2}{K})\} - \{C_{Na}(C_M k_1 + \frac{f_2}{K}) - C_{Ma}(C_N k_1 - f_1)\} > 0$$

となる。したがって第3条件は一般の船では常に満足されるので、曳網、操舵の効果は安定性を高める作用がある。 k_1 を必要以上に大きくするのは好ましくないが[2]、非曳網中と同じ程度の針路安定性を保つためには、曳網中はより小さい k_1 で良い。

4.4 曳網中偏角と角速度に比例した舵を加えた場合

この場合は $\phi_{10} = 0$ とすると前述(6)式のようになり安定条件は、 $a_{11} > 0$, $a_{12} > 0$, $a_{13} > 0$, $a_{11}a_{12} - a_{13} > 0$ であれば良い。したがって $q_1 > 0$ なる一般の船では k_2 の頃が加わり、全ての条件が満たされて安定性は良くなる。しかし最終的に落着く偏角、横滑り角の大きさ方向は4.3の場合と同じである。

4.5 曳網中当て舵と偏角、角速度に比例した操舵を加えた場合

この場合安定条件は4.4と同じであるが、最終的に落着く姿勢は異なる。即ち曳網直進中静的に平衡する当て舵の量は(4)式にて $\phi_{10} = -f_2 / C_M$ にて求められ定常状態になったときの偏角、横滑り角は次式で決定出来る。

$$\phi = \frac{\phi_{10}(C_{Na}C_M - C_{Ma}C_N) + C_{Na}f_2}{C_{Na}(C_M k_1 + \frac{f_2}{K}) - C_{Ma}(C_N k_1 - f_1)}$$

$$\alpha = \frac{-C_N \phi_{10}(C_M k_1 + \frac{f_2}{K})}{C_{Na}(C_M k_1 + \frac{f_2}{K}) - C_{Ma}(C_N k_1 - f_1)}$$

しかし後述の実例計算で示すように当て舵量を ϕ_{10} とした場合には大きすぎて一度針路にかく乱が生じるとその後定常状態になっても船はもとの針路に落着かず、船の重心は左舷側に変位して行く。そこで曳網中の針路かく乱後も船の重心移動方向をもとの針路に一致させるための当て舵量は次式により求められる。

$$\phi_{11} = \frac{-f_2 C_{N\alpha} - f_2 (C_N k_1 - f_1)}{(C_{N\alpha} C_M - C_{M\alpha} C_N) + C_M (C_N k_1 - f_1) - C_N (C_M k_1 + \frac{f_2}{K})}$$

しかし実例計算の範囲では $C_M (C_N k_1 - f_1) - C_N (C_M k_1 + f_2/K) \approx 0$ であつたので ϕ_{11} は結局次式で十分である。

$$\phi_{11} = \frac{-f_2 (C_{N\alpha} + C_N k_1 - f_1)}{C_{N\alpha} C_M - C_{M\alpha} C_N} \dots\dots\dots (13)$$

5. 数値計算と検討

以上解析的に考察した結果を端的にみるため二三の計算を試みる。手元に実船の資料がないので L. J. Rydill の論文 [3] 中のものを使用する。また計算は便宜上 $L = 65\text{m}$ のサイドトロール船が4ノットの速力で曳網している場合に換算し、曳網張力は2.5トン、5.0トン、7.5トン、10.0トンの場合を想定した。 k_1 は曳網中の実測値 [1] より4.0とし、 $k_2 = 0.1$ と仮定、また風波の影響については考慮していない。

5.1 曳網中舵中央の場合

(12)式により資料を計算した結果A船は本来針路安定の良い船、C船は安定の悪い船、B船は不安定であつたので、この3隻について曳網中舵を中央にした場合の船の運動を計算し、結果を図

図2 曳網中舵を中央にした場合

2-A, B, Cに示す。以下A, B, Cはそれぞれの船を表わすものとする。偏角、横滑り角は(9)式の如く非周期性減衰項と周期性減衰項および定数項が一次結合したもので、船本来の性質により曳網中の運動も異なる。

A船は初め曳網旋回モーメントにより右旋回に入り左横滑り角を増しながら航行する。しかし時間経過に伴なつて偏角は増し、曳網張力による旋回モーメントは減少しはじめ減衰項が消滅して定常状態になる。A船では振幅 0.4° で周期40秒のヨーイングが現われるが $1.5L$ くらいの航行でほとんど減衰し、運動の主流をなす減衰の悪い非周期性の偏位が残る。なお最終状態は $\phi = 6.9^\circ$ (右), $\alpha = 1.8^\circ$ (左)で左滑りしながら船の重心はもとの針路より $\theta = 5.1^\circ$ (右)の方向に運動する。

B船は本来不安定な船で直進中針路にかく乱を受け操舵をしない場合は、その姿勢は落ち着くところがない。しかし船尾側の支点到曳網張力を受けている曳網効果により針路安定側に移り、図2-Bに示す如く過渡状態の後には一定の姿勢に落ち着く。A船と違って非周期性減衰項は $1.5L$ くらいでは

とんど減衰するが、運動の主流をなす周期性減衰項は周期 240 秒の振幅の大きい減衰の悪いヨーイングとなつて現われる。しかしもはや不安定ではなく最終状態では $\phi=6.^\circ 3$ (右), $\alpha=1.^\circ 5$ (左) で左横滑りしながら重心はもとの針路より $\theta=4.^\circ 8$ (右) の方向に航行する。

C 船は A 船より B 船に近い船であるが周期 123 秒で、B 船より減衰の速い周期性減衰項からなるヨーイングが運動の主流をなし、非周期性減衰項は $1.5L$ くらいの航行でほとんど減衰する。最終的には $\phi=10.^\circ 0$ (右), $\alpha=3.^\circ 3$ (左) でやはり左滑りの状態で落着き重心は $\theta=6.^\circ 7$ (右) で右に偏位して行く。

以上この状態における A, B, C 各船の運動をみると本来不安定の船ほど周期の大きい減衰の悪いヨーイングが現われる。換言するとこの場合の船の運動は本来安定の良い船から悪い船になるほど、運動の主流が減衰の悪い非周期性から周期性のヨーイングに変わる。

5.2 曳網中操舵を加えた場合

偏角に比例した操舵を加えた場合を図 3—A, B に、偏角と角速度に比例した操舵の場合の運

図 3 曳網中偏角に比例した操舵を加えた場合

図 4 曳網中、偏角、角速度に比例した操舵を加えた場合

動を図 4—A, B に示す。偏角に比例した操舵の場合 A 船は操舵の効果で運動の主流をなす非周期性減衰項の減衰は速くなり、周期性減衰のヨーイングは周期が 34 秒と短くなる。B 船は周期性減衰項は減衰が速くなり周期 100 秒の短い周期のヨーイングとなる。これが運動の主流であるが非周期性減衰項は 5.1 の場合より減衰が悪くなる。操舵による運動は偏角に比例した操舵の影響が大きく図 4—A, B に示すように $k_2=0.1$ 程度の角速度比例操舵ではその効果は大きく現われず、幾分運動の減衰が速くなるようである。一方最終的に落着く姿勢は A, B 船ともに $\phi=1.^\circ 3 \sim 1.^\circ 8$ (右), $\alpha=1.^\circ 4 \sim 1.^\circ 9$ (左) で左横滑りしながら落着き、船の重心の移動方向はもとの針路に完全に一致せず $0.^\circ 1$ 以下の角度で A 船は右に、B 船は左に偏位する。また最終状態にも $\phi=0$ とならず舵が中央で安定することはない。比較のため非曳網中偏角に比例した操舵を加えた場合の運動を図 5 に示す。

図5 非曳網中偏角に比例した操舵を加えた場合

5.3 曳網中当て舵と偏角，角速度比例操舵を併わせて加えた場合

曳網直進中操舵手のとる舵の動きをみると適当な当て舵をとっているのが認められる。従つてここでは前述の ϕ_{10} の当て舵を方程式に入れた場合の経過を図6—A, Bに示す。その結果 ϕ_{10}

図6 曳網中当て舵 ϕ_{10} と偏角，角速度に比例した操舵を加えた場合

では動的には大きすぎて両船ともとの針路より左側に進出し，船の重心も左側に移動して好ましくない。そこで横滑りの状態で着くのは好ましくないが，(13)式による ϕ_{11} の当て舵を加えると船の重心移動方向はもとの針路に復原する。その結果を図7—A, Bに示す。これより ϕ_{10} に

図7 曳網中当て舵 ϕ_{11} と偏角，角速度に比例した操舵を加えた場合

比べ ϕ_{11} ではヨーイングの振幅も小さく減衰も速い。

5.4 曳網張力変化の影響

ここでは偏角に比例した操舵を加えているとき，曳網張力が変化した場合の運動をみる。A船についての張力を変化させた結果を図8に示す。ここでは船の速力を一定にして張力の大きさのみ

図8 曳網張力の変化と ϕ , α の関係(A船)

図9 曳網張力の変化と船の重心軌跡(A船)

を変化させた。図より明らかなように張力のないとき即ち非曳網のときは操舵の効果で十分時間がすぎると船の重心移動方向も姿勢ももとの針路に復原し、当然船首方向に直進する。これに比べてA船の運動の主流である非周期性減衰項は張力の増加に伴って減衰は速くなり、 $1.5 \sim 2.5L$ くらいで減衰する周期性減衰項は減衰が悪くなり、ヨーイングの周期は短くなる。このとき船の重心軌跡は図9に示すように、張力の増加につれて僅かではあるが右偏位から左偏位に変わる。また張力0以外は右偏角左横滑りの状態で定常状態となり、 $\phi \neq 0$ から舵は常に左舵にとられている。

6. 後 書

以上船舶が船尾舷側に曳網張力を受け航行中の操舵に伴う運動を解析し、若干数値計算を試みたがその結果を要約すると次のようである。

(1) 船尾舷側に曳網張力の支点をもつように曳網すると、船の直進中の針路安定性を増す。

(2) 曳網中の運動は船体そのものの針路安定性が良い場合は非周期性減衰項が主流となり、悪い場合は周期性減衰項が主流となる。

(3) 操舵を加えても微小偏角をもつ横滑りの状態で落ち着き、針路かく乱後重心の移動方向ももとの針路に完全に復原しない。

(4) 適当な当て舵により針路かく乱後の重心移動方向を元の針路に復原することが出来る。

(5) 曳網張力が増すと偏角、横滑り角を増して定常状態になるが、船の重心移動方向は元の針路から幾分偏位する。

この報告では仮定により曳網中のスリップ比の影響を考慮していない。しかし実際には実船における非曳網中の操縦性にもスリップ比の影響が認められる〔4〕ので、今後の問題としてこのスリップ比の影響を考慮に入れて運動を解析し、併せて最近船型の大型化を続けている船尾トロール漁船の運動について解析したい。終りに終始御指導を賜った本学杉原喜義教授に深く感謝し御礼申し上げます。

記 号

N ……船体に働く垂直力	L ……船の長さ
M ……重心まわりのモーメント	U ……直進速度
M_x, M_y …… x, y 方向の船の質量(含附加質量)	S ……重心の動いた距離
I …… z 軸まわりの慣性能率(含附加慣性能率)	ρ ……水の密度
A ……中央縦断面積	F ……曳網張力

F_M ……直進中の張力による旋回モーメント ϕ ……偏角 α ……横滑り角 K ……曳網張力の支点に関する角 ϕ_{10}, ϕ_{11} ……当て舵量 k_1, k_2 ……操舵比例常数 (正)

参 考 文 献

- [1] 高島末夫他：曳網中のヨーイングについて，日本航海学会誌，30号（1963）
- [2] 谷 初蔵：船の保針性と操舵の効果について，造船協会論文集，91号（1956）
- [3] L. J. Rydill : A Linear Theory For The Steered Motion of Ships in Waves, T. I. N. A, Vol. 101 (1959)
- [4] 高島末夫：可変ピッチ推進器船の操縦性について—I, 日本航海学会誌，34号（1965）