風圧下における被曳船の針路安定性解析

正員 安川 宏 紀* 正員 中村 暢 昭**

Analysis of Course Stability of a Towed Ship in Wind

by Hironori Yasukawa, *Member* Nobuaki Nakamura *Member*

Summary

An analysis method is presented to know whether a towed ship is stable or not in the course stability in wind. The method is based on the linearized motion equations newly derived in this paper for the towed ship. The special feature is to take the effect of hull steady condition of the towed ship in wind into account. By means of the analysis method, the wind effects on the course stability of a towed barge were investigated. The course stability recovers in the range from beam to quartering wind even if the towed barge is unstable in no wind case. Namely, the barge is stably towed with keeping the certain heading/drift angle in the beam/quartering wind. On the contrary, the course stability reduces in head and following winds with higher speed even if the towed barge is stable. We found that the course stability of the towed ship is much affected by the hull steady condition in wind. The analysis results agreed well with the simulation results by a nonlinear time domain method. The present analysis method is useful for better understanding of the course stability of the towed ship in wind.

1. 緒 言

海難事故等により航行不能となった船舶の曳航問題に関連して、曳船・被曳船の操縦性に関する問題が多くの研究者によって取り扱われている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。海難事故は、荒天下において発生することが多いため、効率的で安全な曳航作業を実行するためには、風・波中における被曳船の操縦性能を事前に把握しておく必要がある。本論文では、著者等が先に報告したシミュレーション計算法⁷⁾をベースに、風圧下における被曳船の針路安定性について議論する。

風圧下における曳船・被曳船の針路安定性に関する研究例として、貴島・和田の理論的な研究⁸⁾が知られている。貴島等は、風圧下における曳船・被曳船の運動方程式を線形化し、それを用いて運動の安定判別を行い、針路安定性に及ぼす風の影響を調べた。それによると次のような知見が得られている⁸⁾。

1. 斜め後方からの風に対して不安定となる。
2. 風が強くなるほど不安定領域が増大する。
3. 向い風、追い風において、風速が大きくなると安定化に向かう。

しかしながら、これらに対する検証は行われていないようである。

小保方等は、風と潮流下における一点係留時の船体振れまわりの水槽試験を行っている⁹⁾。それによると、潮流が船の前方から来ると同時に斜め後方から風が吹くと、振れまわり運動が抑えられるという結果を得ている。しかしこれは、斜め後方から風が吹くときに不安定になるという理論解析結果と異なるものであった⁹⁾。また、重廣等は、平水中では振れまわりを起こす被曳船が、定常風下ではある振れ角で止まって曳航されると指摘している¹⁰⁾。これは針路安定性に及ぼす船の定常状態の影響が大きいことを示すものである。小保方等の研究に見られた、風圧下における針路安定性の解析結果が水槽試験結果と良い対応を示さない理由として、定常運動の影響が考えられる。風圧下での被曳船は、定常的な釣り合い状態が存在するため、この定常状態が針路安定性に大きな影響を及ぼす可能性がある。

本論文では、定常状態の影響を考慮した風圧下における被曳船の針路安定性の判別を行う方法について述べる。曳船の運動は既知とし、曳航索は一本のトラスとみなす¹¹⁾。針路安定性の判別の結果は、著者等が先に報告したシミュレーション計算法⁷⁾による風圧下での計算結果と比較を行った。その結果、風圧下での被曳船の安定性判別の結果は、シミュレーション計算結果と良い一致を示し、本判別方法は、被曳船の針路安定、不安定の傾向をおおよそ捉えることができること、風圧下における被曳船の針路安定性には被曳船の定常的な釣り合い状態が深く関わっていることが明らかとなった。

2. 風圧下での被曳船の運動方程式

最初に、索をいわゆる 2 次元ランブドマス法で取り扱った場合の風圧下における被曳船の運動方程式⁷⁾を整理しておく。

* 広島大学大学院工学研究科

** 住友重機械 ME (研究当時、広島大学大学院工学研究科)

原稿受理 平成 19 年 10 月 5 日

2.1 座標系

Fig.1 に座標系を示す。空間に固定された座標系 $O - XY$ と、船に固定された座標系 $G - xy$ の2つを考える。図に示すように、索は N 個の集中化されたマスがピン結合されているものとし、マス間は N 個に分割された索 (トラス) で連結される。さらに索は、 $N + 1$ 番目のトラスを介して、剛体として表される船体に結合される。集中化されたマスは、索の特性を代表するものとし、例えば索に作用する流体力は、この離散化されたマスに作用するものとする。

索の端点を (X_0, Y_0) 、 i 番目の集中化されたマスの座標を (X_i, Y_i) 、($i = 1, 2, \dots, N$)、空間固定座標系における船体との連結点を (X_{N+1}, Y_{N+1}) 、船の重心位置を (X_{N+2}, Y_{N+2}) とする。なお、索と船体との結合点は、船体固定座標系では (x_T, y_T) とする。また、空間固定座標系における X 軸とトラスがなす角度を θ_i ($i = 1, 2, \dots, N + 1$)、そのトラス長を ℓ_i ($i = 1, 2, \dots, N + 1$) とする。索の連結点と船体重心位置との距離を ℓ_{N+2} 、この距離を $N + 2$ 番目のトラスとみなし、 X 軸となす角度を θ_{N+2} とする。さらに、船の方位を ψ と表す

i 番目の離散化されたマスの座標 (X_i, Y_i) 、($i = 1, 2, \dots, N + 2$) は、 θ_i と ℓ_i を介して次のように表される。

$$X_i = X_0 - \sum_{j=1}^i \ell_j \cos \theta_j, \quad Y_i = Y_0 - \sum_{j=1}^i \ell_j \sin \theta_j \quad (1)$$

なお、 $\theta_{N+2} = \psi + \alpha$ であり、 $\alpha = \tan^{-1}(y_T/x_T)$ を意味する。

Fig. 1 Coordinate systems

2.2 基礎となる運動方程式

基礎となる式は、船の操縦運動に関する2つの運動方程式、索に関する N 個の集中化マスの運動方程式である⁷⁾。ここでは、最終的な結果だけを以下に表す。

船の質量を m 、船のヨーに関する慣性モーメントを I 、 x ならびに y 方向の付加質量、付加慣性モーメントを各々 m_x 、 m_y 、 J とし、見かけ質量ならびに見かけの慣性モーメントを $M_x = m + m_x$ 、 $M_y = m + m_y$ 、 $I_z = I + J$ と表示する。また、付加質量以外の船に作用する力と回頭モーメントを F_x 、 F_y 、 M_z と表す。そのとき、船の操縦運動に関する2つの運動方程式は次のように表される。

$$\begin{aligned} & - \sum_{j=1}^{N+2} \ell_j (M_{x1} \sin \theta_j - M_{y1} \cos \theta_j) \ddot{\theta}_j \\ & = \sum_{j=1}^{N+2} \ell_j (M_{x1} \cos \theta_j + M_{y1} \sin \theta_j) \dot{\theta}_j^2 \\ & + F_1 + F_2 + M_{x1} \ddot{X}_0 + M_{y1} \ddot{Y}_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & I_z \ddot{\theta}_{N+2} + \sum_{j=1}^{N+2} \ell_j (I_{y1} \cos \theta_j - I_{x1} \sin \theta_j) \ddot{\theta}_j \\ & = \sum_{j=1}^{N+2} \ell_j (I_{y1} \sin \theta_j + I_{x1} \cos \theta_j) \dot{\theta}_j^2 \\ & + M_1 + M_2 + I_{x1} \ddot{X}_0 + I_{y1} \ddot{Y}_0 \end{aligned} \quad (3)$$

ただし

$$\begin{aligned} M_{x1} &= M_x \sin \gamma \cos \psi + M_y \cos \gamma \sin \psi \\ M_{y1} &= M_x \sin \gamma \sin \psi - M_y \cos \gamma \cos \psi \\ M_{x2} &= M_x \cos \gamma \cos \psi - M_y \sin \gamma \sin \psi \\ M_{y2} &= M_x \cos \gamma \sin \psi + M_y \sin \gamma \cos \psi \\ I_{x1} &= r_T (M_x \cos \gamma \cos \psi - M_y \sin \gamma \sin \psi) \\ I_{y1} &= r_T (M_x \cos \gamma \sin \psi + M_y \sin \gamma \cos \psi) \\ F_1 &= -\hat{F}_x \sin \gamma + \hat{F}_y \cos \gamma \\ F_2 &= \dot{\psi} (M_x v \sin \gamma + M_y u \cos \gamma) \\ M_1 &= -r_T (\hat{F}_x \cos \gamma + \hat{F}_y \sin \gamma) + M_z \\ M_2 &= r_T \dot{\psi} (M_x v \cos \gamma - M_y u \sin \gamma) \\ T_{V1} &= \hat{F}_x \cos \gamma + \hat{F}_y \sin \gamma \\ T_{V2} &= -\dot{\psi} (M_x v \cos \gamma - M_y u \sin \gamma) \end{aligned}$$

なお

$$\begin{aligned} \hat{F}_x &= F_x + M_y v \dot{\psi}, \quad \hat{F}_y = F_y - M_x u \dot{\psi} \\ r_T &= x_T \sin \gamma - y_T \cos \gamma \\ \gamma &= \theta_{N+1} - \psi \end{aligned}$$

としている。ここで、 u 、 v はそれぞれ船体固定座標系における被曳船の前進速度、横方向の速度を表す。

次に索について考える。 i 番目の集中化マスの質量を m_i 、付加質量係数を k_{Fi} と表すとき、 k 番目 ($k = 1, 2, \dots, N$) のマスに関する運動方程式は次のように表される。

$$\sum_{i=k}^N \left\{ \sum_{j=1}^i (m_{si} \sin \theta_k \sin \theta_j + m_{ci} \cos \theta_k \cos \theta_j) \ell_k \ell_j \ddot{\theta}_j \right\}$$

$$\begin{aligned}
& + \ell_k \sin(\theta_k - \theta_{N+1}) \sum_{j=1}^{N+2} \ell_j (M_{x2} \sin \theta_j - M_{y2} \cos \theta_j) \ddot{\theta}_j \\
& = Q_{0k} - Q_{1k} - \ell_k T_{V3} \sin(\theta_k - \theta_{N+1}) \quad (4)
\end{aligned}$$

ただし,

$$\begin{aligned}
m_{si} &= m_i (1 + k_{Fi} \sin^2 \theta_i) \\
m_{ci} &= m_i (1 + k_{Fi} \cos^2 \theta_i) \\
T_{V3} &= \sum_{j=1}^{N+2} \ell_j (M_{x2} \cos \theta_j + M_{y2} \sin \theta_j) \dot{\theta}_j^2 \\
&+ M_{x2} \ddot{X}_0 + M_{y2} \ddot{Y}_0 - T_{V1} - T_{V2} \\
Q_{0k} &= -\ell_k \sin \theta_k \sum_{i=k}^N (R_{Ci} \sin \theta_i - F_{Ci} \cos \theta_i) \\
&- \ell_k \cos \theta_k \sum_{i=k}^N (R_{Ci} \cos \theta_i + F_{Ci} \sin \theta_i) \\
Q_{1k} &= \ell_k \sin \theta_k \sum_{i=k}^N \left(\ddot{X}_0 + \sum_{j=1}^i \dot{\theta}_j^2 \ell_j \cos \theta_j \right) m_{si} \\
&- \ell_k \cos \theta_k \sum_{i=k}^N \left(\ddot{Y}_0 + \sum_{j=1}^i \dot{\theta}_j^2 \ell_j \sin \theta_j \right) m_{ci} \\
&+ 2\ell_k \sum_{i=k}^N (\dot{X}_i \sin \theta_k + \dot{Y}_i \cos \theta_k) m_i k_{Fi} \dot{\theta}_i \sin \theta_i \cos \theta_i \\
&- (\dot{X}_k^2 - \dot{Y}_k^2) m_k k_{Fk} \cos \theta_k \sin \theta_k
\end{aligned}$$

である。なお、式中、 R_{Ci} 、 F_{Ci} は索に作用する法線方向ならびに軸方向の抵抗を意味し、

$$R_{Ci} = -\frac{1}{2} \rho S_i C_{Di} |V_i| V_i, \quad F_{Ci} = -\frac{1}{2} \rho S_i C_{Fi} |U_i| U_i$$

と表される。ここで、 C_{Di} は索の法線方向の抵抗係数、 C_{Fi} は索の軸方向の抵抗係数、 S_i は索の側面積である。 V_i 、 U_i は次のように表される。

$$V_i = -\dot{X}_i \sin \theta_i + \dot{Y}_i \cos \theta_i, \quad U_i = \dot{X}_i \cos \theta_i + \dot{Y}_i \sin \theta_i$$

2.3 船に作用する力とモーメント

基礎式における船に作用する力とモーメント (F_x, F_y, M_z) について考える。被曳船はプロペラ、舵等はなく、自力航行は不能であるとする。そのとき、 F_x, F_y, M_z は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= X_H + X_A \\ F_y &= Y_H + Y_A \\ M_z &= N_H + N_A - x_G Y_H \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中、 X_H は斜航、旋回時の船体に作用する前後方向の流体力特性、 Y_H, N_H は斜航、旋回時の船体に作用する横力とミッドシップ周りの回頭モーメントである。また、 X_A, Y_A, N_A は風による前後力、横力、回頭モーメントである。 x_G は船体重心位置の船体長さ方向の座標値である。

X_H, Y_H, N_H は次のような微係数表示で表す。

$$X_H = -R_0 u^2 + X_{vv} v^2 + X_{vr} vr + X_{rr} r^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Y_H &= Y_v v + Y_r r + Y_{vvv} v^3 + Y_{vvr} v^2 r \\ &+ Y_{vrr} vr^2 + Y_{rrr} r^3 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} N_H &= Y_v v + N_r r + N_{vvv} v^3 + N_{vvr} v^2 r \\ &+ N_{vrr} vr^2 + N_{rrr} r^3 \end{aligned} \quad (8)$$

R_0 は直進時の抵抗係数、 r は被曳船の回頭角速度を表す。

X_A, Y_A, N_A は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} X_A &= (1/2) \rho_a A_X V_A^2 C_{XA}(\theta_A) \\ Y_A &= (1/2) \rho_a A_Y V_A^2 C_{YA}(\theta_A) \\ N_A &= (1/2) \rho_a A_Y L V_A^2 C_{NA}(\theta_A) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ただし,

$$\theta_A = \tan^{-1}(v_A/u_A) \quad (10)$$

$$V_A = \sqrt{u_A^2 + v_A^2} \quad (11)$$

$$u_A = u + U_W \cos(\theta_W - \psi) \quad (12)$$

$$v_A = v + U_W \sin(\theta_W - \psi) \quad (13)$$

ρ_a は空気密度、 A_X, A_Y は水線より上の正面ならびに側面積、 V_A は相対風速、 U_W は絶対風速、 θ_A は相対風向、 θ_W は絶対風向である。 C_{XA}, C_{YA}, C_{NA} は風圧力係数であり、相対風向 θ_A の関数である。 θ_W は、Fig.1 に示すように、空間固定系 X_0 軸に対して、0deg が向い風、180deg が追い風である。

3. 運動方程式の線形化と安定性

被曳船の針路安定性を理解する上において、上述の諸式は複雑すぎると考えられる。そこで、一本のトラスで曳航される被曳船の問題を考え、その式を線形化することによって、見通しの良い式を誘導する。そのとき、解くべき運動方程式は、 $N = 0$ とした (2)(3) の 2 式である。さらに、 $U = \dot{X}_0$ で定常的に船の中心線上を曳航するものと仮定する。すなわち、 $\ddot{X}_0, \ddot{Y}_0, \ddot{\theta}_0 = 0$ 、 $y_T = 0$ とする。そのとき $\alpha = 0$ なので、 $\theta_2 = \psi$ となる。

θ_1, ψ を定常的な速度成分と変動成分の和として

$$\theta_1 = \theta_0 + \Delta\theta, \quad \dot{\theta}_1 = \Delta\dot{\theta} \quad (14)$$

$$\psi = \psi_0 + \Delta\psi, \quad \dot{\theta}_2 = \Delta\dot{\psi} \quad (15)$$

と表す。 $\Delta\theta, \Delta\psi$ は微小と仮定する。また、

$$\gamma_0 = \theta_0 - \psi_0, \quad \Delta\gamma = \Delta\theta - \Delta\psi$$

を定義する。

3.1 力とモーメントの線形化

まず、風向に関するパラメータ (10) 式の線形化を考える。 θ_A は次のように表される。

$$\begin{aligned} \theta_A &= \tan^{-1} \left(\frac{v_A}{u_A} \right) \\ &\simeq \theta_{A0} + \theta_{Aq} \Delta\dot{\theta} + \theta_{Ar} \Delta\dot{\psi} + \theta_{A\psi} \Delta\psi \end{aligned} \quad (16)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \theta_{A0} &= \tan^{-1}(v_{A0}/u_{A0}) \\ \theta_{Aq} &= -\frac{\ell_1 \{U \cos \theta_0 + U_W \cos(\theta_W - \theta_0)\}}{u_{A0}^2 + v_{A0}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\theta_{Ar} &= -\frac{\ell_2 u_{A0}}{u_{A0}^2 + v_{A0}^2} \\
\theta_{A\psi} &= -1 \\
u_{A0} &= U \cos \psi_0 + U_W \cos(\theta_W - \psi_0) \\
v_{A0} &= -U \sin \psi_0 + U_W \sin(\theta_W - \psi_0)
\end{aligned}$$

風速の自乗 V_A^2 は次のように線形化できる。

$$V_A^2 \simeq V_{A0} + V_{Aq} \Delta \dot{\theta} + V_{Ar} \Delta \dot{\psi} \quad (17)$$

ただし,

$$\begin{aligned}
V_{A0} &= U^2 + U_W^2 + 2UU_W \cos \theta_W \\
V_{Aq} &= 2\ell_1 \left[\sin \gamma_0 \left\{ U_W \cos(\theta_W - \psi_0) + U \cos \psi_0 \right\} \right. \\
&\quad \left. - \cos \gamma_0 \left\{ U_W \sin(\theta_W - \psi_0) - U \sin \psi_0 \right\} \right] \\
V_{Ar} &= -2\ell_2 \left\{ U_W \sin(\theta_W - \psi_0) - U \sin \psi_0 \right\}
\end{aligned}$$

以上を踏まえ, 風による力と回頭モーメント (X_A, Y_A, N_A) を $F_A^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3$) と表すとき, 次のように線形化される。

$$F_A^{(k)} \simeq F_{A0}^{(k)} + F_{Aq}^{(k)} \Delta \dot{\theta} + F_{Ar}^{(k)} \Delta \dot{\psi} + F_{A\psi}^{(k)} \Delta \psi \quad (18)$$

ただし,

$$\begin{aligned}
F_{A0}^{(k)} &= \frac{1}{2} \rho_a A^{(k)} C_A^{(k)} (\theta_{A0}) V_{A0} \\
F_{Aq}^{(k)} &= \frac{1}{2} \rho_a A^{(k)} \left\{ C_A^{(k)} (\theta_{A0}) V_{Aq} + \frac{\partial C_A^{(k)} (\theta_{A0})}{\partial \theta_A} \theta_{Aq} V_{A0} \right\} \\
F_{Ar}^{(k)} &= \frac{1}{2} \rho_a A^{(k)} \left\{ C_A^{(k)} (\theta_{A0}) V_{Ar} + \frac{\partial C_A^{(k)} (\theta_{A0})}{\partial \theta_A} \theta_{Ar} V_{A0} \right\} \\
F_{A\psi}^{(k)} &= \frac{1}{2} \rho_a A^{(k)} \frac{\partial C_A^{(k)} (\theta_{A0})}{\partial \theta_A} \theta_{A\psi} V_{A0}
\end{aligned}$$

なお, $A^{(1)} = A_X$, $A^{(2)} = A_Y$, $A^{(3)} = A_Y L$, $C_A^{(1)} = C_{XA}$, $C_A^{(2)} = C_{YA}$, $C_A^{(3)} = C_{NA}$ としている。

次に, 船体に作用する力とモーメントの線形化を考える。この力とモーメント (X_H, Y_H, N_H) を $F_H^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3$) と表すとき, その線形表示は, (6)~(8) 式から, 次のようになる。

$$F_H^{(k)} \simeq F_{H0}^{(k)} + F_{Hq}^{(k)} \Delta \dot{\theta} + F_{Hr}^{(k)} \Delta \dot{\psi} + F_{H\psi}^{(k)} \Delta \psi \quad (19)$$

ただし,

$$\begin{aligned}
F_{H0}^{(1)} &= -U^2 (R_0 \cos^2 \psi_0 - X_{vv} \sin^2 \psi_0) \\
F_{Hq}^{(1)} &= 2\ell_1 U (X_{vv} \sin \psi_0 \cos \gamma_0 - R_0 \cos \psi_0 \sin \gamma_0) \\
F_{Hr}^{(1)} &= U \sin \psi_0 (2\ell_2 X_{vv} - X_{vr}) \\
F_{H\psi}^{(1)} &= 2U^2 \sin \psi_0 \cos \psi_0 (X_{vv} + R_0) \\
F_{H0}^{(2)} &= -Y_v U \sin \psi_0 - Y_{vvv} U^3 \sin^3 \psi_0 \\
F_{Hq}^{(2)} &= -\ell_1 \cos \gamma_0 (Y_v + 3Y_{vvv} U^2 \sin^2 \psi_0) \\
F_{Hr}^{(2)} &= Y_r + Y_{vvr} U^2 \sin^2 \psi_0 \\
&\quad -\ell_2 (Y_v + 3Y_{vvv} U^2 \sin^2 \psi_0)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{H\psi}^{(2)} &= -U \cos \psi_0 (Y_v + 3Y_{vvv} U^2 \sin^2 \psi_0) \\
F_{H0}^{(3)} &= -N_v U \sin \psi_0 - N_{vvv} U^3 \sin^3 \psi_0 - x_G F_{H0}^{(2)} \\
F_{Hq}^{(3)} &= -\ell_1 \cos \gamma_0 (N_v + 3N_{vvv} U^2 \sin^2 \psi_0) - x_G F_{Hq}^{(2)} \\
F_{Hr}^{(3)} &= N_r + N_{vvr} U^2 \sin^2 \psi_0 \\
&\quad -\ell_2 (N_v + 3N_{vvv} U^2 \sin^2 \psi_0) - x_G F_{Hr}^{(2)} \\
F_{H\psi}^{(3)} &= -U \cos \psi_0 (N_v + 3N_{vvv} U^2 \sin^2 \psi_0) - x_G F_{H\psi}^{(2)}
\end{aligned}$$

以上をまとめると, 船に作用する力とモーメント (F_x, F_y, M_z) を $F^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3$) と表すとき, その線形表示は次のようになる。

$$F^{(k)} \simeq F_0^{(k)} + F_q^{(k)} \Delta \dot{\theta} + F_r^{(k)} \Delta \dot{\psi} + F_\psi^{(k)} \Delta \psi \quad (20)$$

ただし,

$$\begin{aligned}
F_0^{(k)} &= F_{H0}^{(k)} + F_{A0}^{(k)}, \quad F_q^{(k)} = F_{Hq}^{(k)} + F_{Aq}^{(k)} \\
F_r^{(k)} &= F_{Hr}^{(k)} + F_{Ar}^{(k)}, \quad F_\psi^{(k)} = F_{H\psi}^{(k)} + F_{A\psi}^{(k)}
\end{aligned}$$

ここで, $F_0^{(k)}$ は定常的な力 (もしくはモーメント), $F_q^{(k)}$ は $\Delta \dot{\theta}$ に比例する係数, $F_r^{(k)}$ は $\Delta \dot{\psi}$ に比例する係数, $F_\psi^{(k)}$ は $\Delta \psi$ に比例する係数であり, それぞれ船体に作用する流体力と風圧力から来る成分の和として表される。

3.2 運動方程式の線形化

運動方程式 (2) を線形化すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}
& -\ell_1 (M_{x0} \sin \theta_0 - M_{y0} \cos \theta_0) \Delta \ddot{\theta} \\
& -\ell_2 (M_{x0} \sin \psi_0 - M_{y0} \cos \psi_0) \Delta \ddot{\psi} \\
& = \left(-F_q^{(1)} \sin \gamma_0 + F_q^{(2)} \cos \gamma_0 \right) \Delta \dot{\theta} \\
& + \left[U (M_y - M_x) (\cos \psi_0 \cos \gamma_0 + \sin \psi_0 \sin \gamma_0) \right. \\
& \quad \left. + F_r^{(2)} \cos \gamma_0 - F_r^{(1)} \sin \gamma_0 \right] \Delta \dot{\psi} \\
& - \left(F_0^{(1)} \cos \gamma_0 + F_0^{(2)} \sin \gamma_0 \right) \Delta \theta \\
& + \left[(F_0^{(1)} + F_\psi^{(2)}) \cos \gamma_0 + (F_0^{(2)} - F_\psi^{(1)}) \sin \gamma_0 \right] \Delta \psi \\
& - F_0^{(1)} \sin \gamma_0 + F_0^{(2)} \cos \gamma_0 \quad (21)
\end{aligned}$$

同様に, 運動方程式 (3) を線形化すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}
& \ell_1 (I_{y0} \cos \theta_0 - I_{x0} \sin \theta_0) \Delta \ddot{\theta} \\
& + \left\{ I_z + \ell_2 (I_{y0} \cos \psi_0 - I_{x0} \sin \psi_0) \right\} \Delta \ddot{\psi} \\
& = -x_T \left(F_q^{(1)} \sin \gamma_0 \cos \gamma_0 + F_q^{(2)} \sin^2 \gamma_0 - F_q^{(3)} / x_T \right) \Delta \dot{\theta} \\
& - x_T \left\{ U \sin \gamma_0 (M_y - M_x) (\sin \gamma_0 \cos \psi_0 - \sin \psi_0 \cos \gamma_0) \right. \\
& \quad \left. - F_r^{(3)} / x_T + F_r^{(1)} \sin \gamma_0 \cos \gamma_0 + F_r^{(2)} \sin^2 \gamma_0 \right\} \Delta \dot{\psi} \\
& + x_T \left\{ F_0^{(1)} (\sin^2 \gamma_0 - \cos^2 \gamma_0) - 2F_0^{(2)} \sin \gamma_0 \cos \gamma_0 \right\} \Delta \theta \\
& - x_T \left\{ \sin \gamma_0 (F_\psi^{(1)} \cos \gamma_0 + F_\psi^{(2)} \sin \gamma_0 - 2F_0^{(2)} \cos \gamma_0) \right.
\end{aligned}$$

$$+F_0^{(1)}(\sin^2 \gamma_0 - \cos^2 \gamma_0) - F_\psi^{(3)}/x_T \} \Delta\psi \\ -x_T \sin \gamma_0 \left(F_0^{(1)} \cos \gamma_0 + F_0^{(2)} \sin \gamma_0 \right) + F_0^{(3)} \quad (22)$$

ただし

$$\begin{aligned} M_{x0} &= M_x \sin \gamma_0 \cos \psi_0 + M_y \cos \gamma_0 \sin \psi_0 \\ M_{y0} &= M_x \sin \gamma_0 \sin \psi_0 - M_y \cos \gamma_0 \cos \psi_0 \\ I_{x0} &= x_T (M_x \cos \gamma_0 \cos \psi_0 - M_y \sin \gamma_0 \sin \psi_0) \sin \gamma_0 \\ I_{y0} &= x_T (M_x \cos \gamma_0 \sin \psi_0 + M_y \sin \gamma_0 \cos \psi_0) \sin \gamma_0 \end{aligned}$$

これらの式は、次元を持っているので、(21) 式は $(1/2)\rho L d U^2$ で、(22) 式は $(1/2)\rho L^2 d U^2$ で割って無次元化する。ここで、 L, d は被曳船の船長、喫水である。また、 $x_T > 0$ と仮定し、そのとき $\ell_2 = x_T$ となることを利用する。さらに、これらの式は定常項と非定常項に分離できることを考慮すると、次式が得られる。

定常項：

$$F_0^{(1)} \sin \gamma_0 - F_0^{(2)} \cos \gamma_0 = 0 \quad (23)$$

$$\ell_2 \left\{ F_0^{(1)} \cos \gamma_0 + F_0^{(2)} \sin \gamma_0 \right\} \sin \gamma_0 - F_0^{(3)} = 0 \quad (24)$$

非定常項：

$$a_1 \Delta \ddot{\theta}' + b_1 \Delta \ddot{\psi}' + c_1 \Delta \dot{\theta}' + d_1 \Delta \dot{\psi}' + e_1 \Delta \theta + f_1 \Delta \psi = 0 \quad (25)$$

$$a_2 \Delta \ddot{\theta}' + b_2 \Delta \ddot{\psi}' + c_2 \Delta \dot{\theta}' + d_2 \Delta \dot{\psi}' + e_2 \Delta \theta + f_2 \Delta \psi = 0 \quad (26)$$

ただし、

$$\begin{aligned} a_1 &= -\ell_1' \left(M_{x0}' \sin \theta_0 - M_{y0}' \cos \theta_0 \right) \\ b_1 &= -\ell_2' \left(M_{x0}' \sin \psi_0 - M_{y0}' \cos \psi_0 \right) \\ c_1 &= F_q^{(1)} \sin \gamma_0 - F_q^{(2)} \cos \gamma_0 \\ d_1 &= - \left[(M_y' - M_x') (\cos \psi_0 \cos \gamma_0 + \sin \psi_0 \sin \gamma_0) \right. \\ &\quad \left. + F_r^{(2)} \cos \gamma_0 - F_r^{(1)} \sin \gamma_0 \right] \\ e_1 &= F_0^{(1)} \cos \gamma_0 + F_0^{(2)} \sin \gamma_0 \\ f_1 &= -(F_0^{(1)} + F_\psi^{(2)}) \cos \gamma_0 - (F_0^{(2)} - F_\psi^{(1)}) \sin \gamma_0 \\ a_2 &= \ell_1' \left(I_{y0}' \cos \theta_0 - I_{x0}' \sin \theta_0 \right) \\ b_2 &= I_z' + \ell_2' \left(I_{y0}' \cos \psi_0 - I_{x0}' \sin \psi_0 \right) \\ c_2 &= \ell_2' \sin \gamma_0 \left(F_q^{(1)} \cos \gamma_0 + F_q^{(2)} \sin \gamma_0 \right) - F_q^{(3)} \\ d_2 &= \ell_2' \sin \gamma_0 \left\{ (M_x' - M_y') (\sin \psi_0 \cos \gamma_0 - \sin \gamma_0 \cos \psi_0) \right. \\ &\quad \left. + F_r^{(1)} \cos \gamma_0 + F_r^{(2)} \sin \gamma_0 \right\} - F_r^{(3)} \\ e_2 &= -\ell_2' \left\{ F_0^{(1)} (\sin^2 \gamma_0 - \cos^2 \gamma_0) - 2F_0^{(2)} \sin \gamma_0 \cos \gamma_0 \right\} \\ f_2 &= \ell_2' \left\{ \sin \gamma_0 (F_\psi^{(1)} \cos \gamma_0 + F_\psi^{(2)} \sin \gamma_0 - 2F_0^{(2)} \cos \gamma_0) \right. \\ &\quad \left. + F_0^{(1)} (\sin^2 \gamma_0 - \cos^2 \gamma_0) \right\} - F_\psi^{(3)} \end{aligned}$$

(23)(24) 式から被曳船の定常状態 θ_0, ψ_0 が求まり、この結果をもとに (25)(26) 式から、被曳船の非定常運動が計算される。なお、(25)(26) 式において、風圧力係数を 0 にすると、重廣が導いた式¹¹⁾ に一致する。無次元化は次式に従っている。

$$\begin{aligned} M_x', M_y', M_{x0}', M_{y0}' &= \frac{M_x, M_y, M_{x0}, M_{y0}}{(1/2)\rho L^2 d} \\ I_{x0}', I_{y0}' &= \frac{I_{x0}, I_{y0}}{(1/2)\rho L^3 d}, \quad I_z' = \frac{I_z}{(1/2)\rho L^4 d} \\ F_0^{(1)}, F_0^{(2)}, F_\psi^{(1)}, F_\psi^{(2)} &= \frac{F_0^{(1)}, F_0^{(2)}, F_\psi^{(1)}, F_\psi^{(2)}}{(1/2)\rho L d U^2} \\ F_q^{(1)}, F_q^{(2)}, F_r^{(1)}, F_r^{(2)} &= \frac{F_q^{(1)}, F_q^{(2)}, F_r^{(1)}, F_r^{(2)}}{(1/2)\rho L^2 d U} \\ F_0^{(3)}, F_\psi^{(3)} &= \frac{F_0^{(3)}, F_\psi^{(3)}}{(1/2)\rho L^2 d U^2}, \quad F_q^{(3)}, F_r^{(3)} = \frac{F_q^{(3)}, F_r^{(3)}}{(1/2)\rho L^3 d U} \\ \Delta \ddot{\theta}', \Delta \ddot{\psi}' &= \frac{\Delta \ddot{\theta}, \Delta \ddot{\psi}}{(U/L)^2}, \quad \Delta \dot{\theta}', \Delta \dot{\psi}' = \frac{\Delta \dot{\theta}, \Delta \dot{\psi}}{U/L} \end{aligned}$$

ℓ_1', ℓ_2' は ℓ_1, ℓ_2 を船長 L で無次元化したものである。

3.3 風圧下における被曳船の針路安定性

被曳船の非定常運動について考える。(25)(26) 式は $\Delta \theta$ と $\Delta \psi$ の連成を考慮した振動の式となっている。そこで、

$$\Delta \theta = C_1 e^{\sigma t}, \quad \Delta \psi = C_2 e^{\sigma t}$$

とおくと、次の特性方程式が得られる。

$$D_0 \sigma^4 + D_1 \sigma^3 + D_2 \sigma^2 + D_3 \sigma + D_4 = 0 \quad (27)$$

ただし

$$\begin{aligned} D_0 &= b_1 a_2 - b_2 a_1 \\ D_1 &= b_1 c_2 - b_2 c_1 + d_1 a_2 - d_2 a_1 \\ D_2 &= b_1 e_2 - b_2 e_1 + d_1 c_2 - d_2 c_1 + f_1 a_2 - f_2 a_1 \\ D_3 &= d_1 e_2 - d_2 e_1 + f_1 c_2 - f_2 c_1 \\ D_4 &= f_1 e_2 - f_2 e_1 \end{aligned}$$

これをフルビッツの安定判別法により安定、不安定を調べる。(27) 式が安定であるための条件は次の二つである。

$$D_0, D_1, D_2, D_3, D_4 > 0 \quad (28)$$

$$D_5 \equiv D_1 D_2 D_3 - D_1^2 D_4 - D_0 D_3^2 > 0 \quad (29)$$

これを満たせば、微小攪乱は減衰し、振れまわりは起こらない。すなわち、 D_0 等を実際に計算してその符号を調べれば、被曳船の振れまわり運動の発生が予測できる。

4. 針路安定判別に関する計算結果

4.1 対象船

本論文では、文献⁷⁾ で使用されたバージ船型を横に 2 つ並べた船 ("2B" と呼ぶ) を対象とした。Table 1 にその要目を示す。船尾ステグを有するものと有しないものの 2 状態について解析を行った。風圧面積 A_X, A_Y は、石炭等を輸送するバージを想定し、Grunthaner の論文¹²⁾ を参考にして決定した。Table 2 に

計算に用いた被曳船の操縦流体力特性を示す。これらは、拘束模型試験結果⁷⁾をベースに決めたものである。表中 C は針路安定性指数を表す。スケグを取り付けることによって安定化しているのがわかる。索の取り付け位置は $\ell_2 = 0.5L$ とした。風圧力係数は、重廣等の論文¹⁰⁾を参考に次のように設定した。

$$C_{XA}(\theta_A) = -0.6 \cos \theta_A \quad (30)$$

$$C_{YA}(\theta_A) = -1.0 \sin \theta_A \quad (31)$$

$$C_{NA}(\theta_A) = -0.15 \sin(2\theta_A) \quad (32)$$

Table 1 Principal dimensions of "2B"

	Fullscale
Ship length L (m)	60.96
Breadth B (m)	21.34
draft d (m)	2.74
Volume(m^3)	3292.4
lcb from AE(m)	29.44
Block coeff. C_b	0.924
A_X (m^2)	77.5
A_Y (m^2)	250.5

Table 2 Resistance coefficient, hydrodynamic derivatives and added mass coefficients

symbol	w/o skegs	with skegs
R'_0	0.0635	0.0641
X'_{vv}	-0.0188	-0.1152
$X'_{vr} + m'_{xy}$	0.2265	0.3266
X'_{rr}	-0.0272	-0.1311
Y'_v	-0.4027	-0.4373
$Y'_r - m'_{xy}$	0.0177	0.0964
Y'_{vv}	-0.2159	-0.7265
Y'_{vr}	0.4840	0.3263
Y'_{rr}	0.4950	-0.2424
Y'_{rrr}	-0.8469	-0.4167
N'_v	-0.1160	-0.0491
N'_r	-0.0237	-0.0742
N'_{vv}	0.0458	-0.0067
N'_{vr}	-0.0578	-0.2486
N'_{rr}	0.2099	0.0360
N'_{rrr}	-0.0982	0.0000
m'_x	0.0391	0.0391
m'_y	0.2180	0.2180
J'_z	0.0124	0.0124
C	-0.251	0.023

4.2 定常解

Fig.2に、スケグ無し、船速 7kn, $U_W/U = 2, 4, 6$ と変化した場合の、被曳船の定常解 (船の方位角 ψ_0 と索の成す角 θ_0) を示す。風向は 0deg が追い風, 180deg が追い風である。定常解は、(23)(24) 式を解くことによって求まる。(23)(24) 式から分かるように、定常解は索長 ℓ_1 とは無関係に決定される。斜め後方から風が吹くとき (150deg 付近), 定常解の絶対値が最も大きくなる。風速が速くなると、追い風, 追い風 (150deg 付近) において不安定領域が現れる。追い風, 追い風において不安定領域が現れる理由は、 $D_0 \sim D_4$ は正であるにも関わらず、(29) 式で表される D_5 だけが負になるためである。 D_5 は無風状態において負になることはほとんどないようであるが、 D_5 が負になり針路不安定となるのは、風圧下の問題を考えるとときの独特の現象である。

4.3 安定判別

被曳船が針路不安定の場合と針路安定の場合に分けて解析結果を示す。

Fig. 2 Steady solutions of 2B without skegs in wind

(1) 被曳船が針路不安定の場合 (スケグ無し)

Fig.3に、 $U_W/U = 2, 4, 6, 8$ それぞれにおいて、風向と索長を変化させたときの針路安定、不安定の変化を示す。白い部分が安定領域である。 $U_W/U = 5$ を越え、風が強くなると斜め後方からの風向 ($\theta_W = 120\text{deg}$ 付近) で安定領域が増えていく。安定領域が増える斜め後方という風向は、定常解の絶対値が最も大きくなる領域でもある。定常解の絶対値が大きくなると針路安定性が改善されるが、数値計算により分かっている。その理由を以下に簡単に述べる。本船の場合、無風時には被曳船の方位に関する減衰項 d_2 が負、方位に関する復原項 f_2 が正であり、その結果 D_2 が負となり、針路不安定となる。風速が大きくなり、定常解の絶対値が大きくなると、 d_2, f_2 が正に変化する。これは、被曳船の方位に関する減衰力や復原力が増加したことを意味し、その結果、 D_2 は正に変化する。このように、風圧下における被曳船の針路安定性に定常解が深く関わっていることが確認された。

本解析より、「斜め後方からの風に対して、風が強くなるほど安定領域が増大する」という知見が得られた。一方、貴島等は、「斜め後方からの風に対しては不安定となり、風が強くなるほど不安定領域が増大する」と指摘している⁸⁾。結果が異なっているのは、貴島等の計算法では定常解を考慮していないためであると考えられる。

(2) 被曳船が針路安定の場合 (スケグ有り)

Fig.4に、 $U_W/U = 2, 4, 6, 8$ それぞれにおいて、風向と索長を変化させたときの針路安定、不安定の変化を示す。同様に、白い部分が安定領域である。無風状態では安定しているものの、風速が速くなると、追い風, 追い風 ($\theta_W = 0, 180\text{deg}$ 付近) において不安定領域が現れる。追い風, 追い風において不安定領域が現れる理由は、 $D_0 \sim D_4$ は正であるにも関わらず、(29) 式で表される D_5 だけが負になるためである。 D_5 は無風状態において負になることはほとんどないようであるが、 D_5 が負になり針路不安定となるのは、風圧下の問題を考えるとときの独特の現象である。

Fig. 3 Stable and unstable zone on course stability of 2B without skegs. Black area means unstable zone.

Fig. 4 Stable and unstable zone on course stability of 2B with skegs. Black area means unstable zone.

Fig. 5 Trajectories of 2B without skegs in wind ($\theta_W = 120^\circ$, $\ell_1/L = 2$, $U = 7\text{kn}$)

Fig. 6 Trajectories of 2B with skegs in wind ($\theta_W = 0^\circ$, $\ell_1/L = 2$, $U = 7\text{kn}$)

る。ただ、(29) 式が複雑であるため、詳細なメカニズムは不明である。なお、ある風速以上の向い風、追い風において針路不安定となる現象は、風圧下を航行する通常船舶の針路安定性に関する知見¹³⁾¹⁴⁾と同じである。

本解析より、「風速が大きくなると、向い風、追い風において不安定領域が現れる」という知見が得られた。この知見は、「風速が大きくなると、向い風、追い風において安定化に向かう」という貴島等の結果⁸⁾とは異なっている。

4.4 シミュレーション計算結果

以上の解析結果を検証するため、著者等が示したシミュレーション計算法で風圧下における被曳船の挙動を計算し、針路安定性の判別結果と比較した。

Fig.5に、スケグ無し、曳航速度 $U = 7\text{kn}$ 、索長 $l_1 = 2L$ 、斜め後方からの風 ($\theta_W = 150\text{deg}$) における 20 秒ごとの索と被曳船の航跡を示す。 $U_W/U = 0, 2, 4$ のときには、振れまわり運動は発生するものの、 $U_W/U = 6$ のときには振れまわり運動が抑えられる。そのとき、被曳船が風上側に流され、その状態でほぼ安定的に曳航される様子が分かる。この計算結果は先の安定判別結果と定性的に一致している。

なお、安定判別結果の精度確認のため、スケグ無し、曳航速度 7kn 、索長 $l_1 = 2L$ 、 $U_W/U = 6$ 、 $\theta_W = 80, 90, 160, 170\text{deg}$ の場合について、被曳船の運動シミュレーション計算を行った。安定判別の解析結果では、 $\theta_W = 80, 170\text{deg}$ の場合に不安定になるというものであったが、シミュレーション計算でも $\theta_W = 80, 170\text{deg}$ において振れまわり運動が発生し、その風向が一致した。

最後に、Fig.6に、スケグ有り、曳航速度 $U = 7\text{kn}$ 、索長 $l_1 = 2L$ 、向い風 ($\theta_W = 0\text{deg}$) における索と被曳船の航跡を示す。風が強くなると針路不安定性が強くなり、風によって振れまわり運動が発達していく様子が分かる。安定判別の解析結果によると、 $U_W/U = 7$ 以上において不安定になるというものであったが、シミュレーション計算では、 $U_W/U = 6$ のときから顕著な不安定となった。安定判別の解析結果は、シミュレーション計算よりも、針路安定な速度の範囲をやや高めに見積もる傾向のあることが分かった。

以上の結果から、本論で述べた風圧下での被曳船の安定性判別の方法は、針路安定、不安定の傾向をおおよそ捉えることが分かった。

5. 結 言

本論文では、定常運動の影響を考慮した風圧下における被曳船の針路安定性の判別を行う方法について述べた。バージ船型を対象とした針路安定性の判別の結果は、著者等が開発したシミュレーション計算法⁷⁾による風圧下での計算結果と良い一致を示し、本判別方法は、被曳船の針路安定、不安定の傾向をおおよそ捉えることが分かった。さらに、風圧下における被曳船の針路安定性には被曳船の定常的な釣り合い状態が深く関わっていること、この定常状態を考慮して得られる被曳船の針路安定性に関する知見は、従来のものとは異なることが示された。

風圧下における被曳船の針路安定性について得られた新しい知見は次の通りである。

1. 被曳船が針路不安定であっても、斜め後方から強い風が吹くときには、風圧力に釣り合った定常状態のままで曳航され、振れまわり運動が抑えられる場合がある。

2. 被曳船が針路安定であっても、正面風や追い風が強くなると不安定となり、振れまわり運動が発生する場合がある。

今後は、本解析結果の妥当性を確認すべく、水槽試験による検証を実施する予定である。また、本論文では、曳船の運動を既知として取り扱っており、今後は、曳船の操縦運動との連成を考慮する必要があると考えられる。

謝 辞

本研究の実施に当たり、広島大学名誉教授小瀬邦治先生から貴重な御助言を賜った。心よりお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 湯川和浩, 星野邦弘, 原 正一, 山川賢次: 転覆した船に働く流体力とその曳航法に関する研究, 日本造船学会論文集 第 186 号 (1999), pp.145-156.
- 2) 原 正一, 山川賢次, 星野邦弘, 湯川和浩: 損傷船舶の曳航に関する研究, 関西造船協会誌 第 233 号 (2000), pp.71-78.
- 3) 原 正一, 山川賢次, 星野邦弘, 湯川和浩: 損傷船舶の曳航に関する研究 (その 2) — 波浪中の索張力増加とふれまわり運動 —, 関西造船協会誌 第 234 号 (2000), pp.147-154.
- 4) 貴島勝郎, 古川芳孝, 岸本 隆: 損傷船舶の曳航に関する研究, 日本造船学会論文集 第 188 号 (2000), pp.191-199.
- 5) 岸本 隆, 貴島勝郎: 損傷船舶の曳航に関する研究 (第 2 報), 日本造船学会論文集 第 191 号 (2002), pp.77-85.
- 6) 湯川和浩, 星野邦弘, 原 正一, 山川賢次: 荒天下における折損タンカーの曳航について, 日本造船学会論文集 第 191 号 (2002), pp.87-96.
- 7) 安川佐紀, 平田法隆, 中村暢昭, 松本之良: 被曳船の振れまわり運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集 第 4 号 (2006), pp.137-146.
- 8) 貴島勝郎, 和田洋二郎: 風圧下における被曳船の針路安定性, 日本造船学会論文集 第 153 号 (1983), pp.117-126.
- 9) 小保方 準, 佐々木紀雄: 一点係留時の船体振れまわり運動とその安定性について (第 2 報), 関西造船協会誌 第 190 号 (1983), pp.25-33.
- 10) 重廣律男, 上田耕平, 有井俊彦, 中山 博: 風圧下での高速曳航いけすの針路安定性能, 関西造船協会誌 第 228 号 (1997), pp.167-174.
- 11) 重廣律男: 曳航・被曳航船系の操縦運動モデル, 関西造船協会誌 第 230 号 (1998), pp.153-164.
- 12) Grunthaner, G. L.: Commercial Transportation on the Inland Waterways, Trans. SNAME, Vol.70 (1962), pp.84-127.
- 13) Eda, H.: Low-Speed Controllability of Ships in Wind, Journal of Ship Research, Vol.12, No.3 (1968), pp.181-200.
- 14) 小川陽弘: 外力を受ける船の操縦運動の計算 (その 1) — 様々な風と流れの中の直進および旋回 —, 日本造船学会論文集 第 126 号 (1969), pp.107-120.