

# PS-3 波浪中における旋回運動と船体動揺推定法の検証

流体性能評価系 \* 鈴木 良介、塚田 吉昭、上野 道雄

## 1. はじめに

荒天下で船舶が操縦性能を確保するために必要な機関出力の暫定ガイドラインがIMOで導入され、荒天下での波浪動揺を含めた船舶の操縦性能の推定が重要となっている。

波浪動揺を含めた波浪中操縦運動推定法は近年増加傾向にあり、それらは操縦運動を扱う低周波数の運動方程式と波浪動揺を扱う高周波数の運動方程式を完全に分離し個別に解く方法<sup>1)</sup>と、それらを分離せず一つの運動方程式で解く方法<sup>2)3)</sup>の大きく2つに分類される。しかし、前者は「高周波運動から低周波運動への干渉は、波漂流力のみによって生じる<sup>4)</sup>」という微小振幅の波や運動中で成り立つ仮定のもと導出された方法であるため、荒天下における大波高中の波浪動揺と操縦運動を正確に推定できるかは疑問である。一方、後者は上述の仮定を用いていないため、大波高や大きな波浪動揺中の計算にも適用可能と考えられる。しかし、本計算法に関しては、一般的な波浪中の操縦運動に対する波浪動揺を含めた実験的検証がほとんどなされていない。数少ない例として西村ら<sup>3)</sup>の小型漁船に対する検証が挙げられるが、その検証では波の力としてフルードクリロフ力しか考慮されていないため、一般的な船に対する適用性の検証が十分とは言えない。

本研究では、荒天下の波浪動揺を含む操縦運動計算法の開発を最終目標とし、これらの背景からその適用性があると考えられる後者の手法<sup>2)</sup>をもとに、波浪中の操縦運動計算手法を提案した。また、タンカーモデルを用いた微小振幅規則波中の旋回試験を実施し、本計算法の基礎的な検証をおこなった。その結果、本計算法における波浪動揺を含む波浪中の操縦運動推定の適用性を明らかにした。

## 2. 波浪中操縦運動計算法

### 2.1 座標系

本計算では図1に示す空間固定座標系(EFA)  $O-\xi\eta\zeta$ 、船体固定座標系(GBA)  $G-x'y'z'$ 、船体水面固定座標系<sup>2)</sup>(HBA)  $G-x''y''z''$ の3つを導入する。

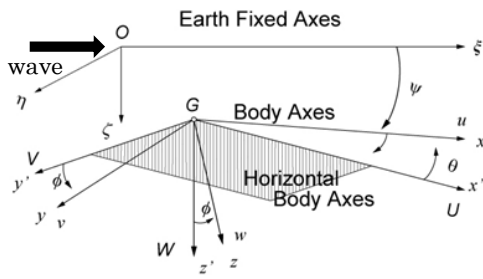


図1 座標系

### 2.2 運動方程式

操縦運動を伴う波浪中の6自由度船体運動方程式は、文献2)を基にHBAで定義した(1),(2)式を用いる。

$$m(\dot{U} - V\dot{\Psi}) = (1 - t_p)T(J) - R(U) - (1 - t_R)F_N \sin \delta + X_H + X_{F,K} + X_{W,D} \quad (1)$$

$$m(\dot{V} + U\dot{\Psi}) = -(1 + a_H)F_N \cos \delta + Y_H + Y_{F,K} + Y_{dif.} + Y_{W,D}$$

$$m\dot{W} = Z_H + Z_{F,K} + Z_{dif.} - c_{33}\zeta - c_{35}\theta$$

$$(I_{xx} \cos^2 \theta + I_{yy} \sin^2 \theta)\ddot{\Phi} - (I_{xx} - I_{yy})\ddot{\Psi} \sin \theta \cos \theta - (I_{xx} - I_{yy})\dot{\theta}\dot{\Phi} \sin 2\theta - (I_{xx} - I_{yy})\dot{\theta}\dot{\Psi} \cos 2\theta - I_{yy}\dot{\Phi}\dot{\Psi} = -z_R Y_R + K_H + K_{f.k.} + K_{dif.} - c_{44}\dot{\theta} \quad (2)$$

$$I_{yy}\ddot{\Theta} + (I_{xx} \cos^2 \theta + I_{yy} \sin^2 \theta)\dot{\Phi}\dot{\Psi} - (I_{xx} - I_{yy})\dot{\Psi}^2 \sin \theta \cos \theta = M_H + M_{f.k.} + M_{dif.} - c_{53}\zeta - c_{55}\theta$$

$$(I_{xx} \sin^2 \theta + I_{yy} \cos^2 \theta)\ddot{\Psi} - (I_{xx} - I_{yy})\ddot{\Phi} \sin \theta \cos \theta - (I_{xx} - I_{yy})\dot{\theta}\dot{\Phi} \cos 2\theta + (I_{xx} - I_{yy})\dot{\theta}\dot{\Psi} \sin 2\theta = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta + N_H + N_{f.k.} + N_{dif.} + N_{W,D}$$

$\dot{\Phi}, \dot{\Theta}, \dot{\Psi}$ はHBAの各軸回りの角速度である。下添え字のHは船体運動による流体反力の慣性成分と減衰成分であり、(3),(4)式で計算する。

$$\begin{aligned} X_H &= -m_x \dot{U} - m_x z_H \ddot{\theta} + m_x U \dot{\theta} - m_x z_H \dot{\theta}\dot{\psi} - m_{33}^{oe} W \dot{\theta} - m_{35}^{oe} \dot{\theta}^2 \\ &\quad - m_y z_H \dot{\theta}\dot{\psi} + X_{\beta\beta} \beta^2 + (X_{\beta r} - m_y) \beta \dot{\psi} + X_{rr} \dot{\psi}^2 + X_{\beta\beta\beta} \beta^4 \\ Y_H &= -m_y \dot{V} + m_y z_H \ddot{\theta} - m_y W \dot{\theta} + m_y z_H \dot{\theta}\dot{\psi} + m_{33}^{oe} W \dot{\theta} \\ &\quad + m_{35}^{oe} \dot{\theta}\dot{\psi} - m_x z_H \dot{\theta}\dot{\psi} + Y_{\beta\beta} \beta + (Y_r - m_x) \dot{\psi} + Y_{\beta\beta\beta} \beta^3 \\ &\quad + Y_{\beta\beta r} \beta^2 \dot{\psi} + Y_{\beta r r} \beta \dot{\psi}^2 + Y_{r r r} \dot{\psi}^3 \\ Z_H &= -m_{33}^{oe} \dot{W} - m_{35}^{oe} \dot{\theta} - m_{33}^{oe} U \dot{\theta} + m_{33}^{oe} V \dot{\theta} - m_{35}^{oe} \dot{\theta}\dot{\psi} + m_x U \dot{\theta} \\ &\quad + m_x z_H \dot{\theta}^2 - m_y V \dot{\theta} + m_y z_H \dot{\theta}^2 - b_{33}^{oe} \dot{\zeta} - b_{35}^{oe} \dot{\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} K_H &= -m_{42}^{oe} \dot{V} - m_{44}^{oe} \ddot{\phi} - m_{46}^{oe} (\dot{\psi} - \dot{\theta}\dot{\phi}) + m_{44}^{oe} \dot{\theta}\dot{\psi} - J_{zz} \dot{\psi}\dot{\theta} \\ &\quad + m_x z_H U \dot{\psi} + m_{33}^{oe} W \dot{\psi} + m_{55}^{oe} \dot{\theta}\dot{\psi} - m_{33}^{oe} W V - m_{35}^{oe} \dot{\theta} V \\ &\quad + m_y V W - m_y z_H \dot{\phi} W - z_{yH} Y_H - b_{44}^{oe} \dot{\phi} \\ M_H &= -m_x z_H \dot{U} - m_{53}^{oe} \dot{W} - m_{55}^{oe} \ddot{\theta} + m_{53}^{oe} V \dot{\theta} - m_{55}^{oe} \dot{\theta}\dot{\psi} + J_{zz} \dot{\psi}\dot{\theta} \\ &\quad - m_{42}^{oe} V \dot{\psi} - m_{44}^{oe} \dot{\theta}\dot{\psi} - m_{46}^{oe} \dot{\psi}^2 - m_x W U - m_x z_H \dot{\theta} W \\ &\quad + m_{33}^{oe} U W + m_{35}^{oe} \dot{\theta} U - b_{53}^{oe} \dot{\zeta} - b_{55}^{oe} \dot{\theta} \\ N_H &= -J_{zz} (\dot{\psi} - \dot{\theta}\dot{\phi}) + m_{42}^{oe} V \dot{\theta} + m_{44}^{oe} \dot{\phi}\dot{\theta} + m_{46}^{oe} \dot{\psi}\dot{\theta} - m_x z_H U \dot{\theta} \\ &\quad - m_{53}^{oe} W \dot{\theta} - m_{55}^{oe} \dot{\theta}\dot{\phi} + m_y z_H \dot{\phi} U + m_x z_H \dot{\theta} V + N_{\beta\beta} \beta + N_{r\beta} \dot{\psi} \\ &\quad + N_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N_{\beta\beta r} \beta^2 \dot{\psi} + N_{\beta r r} \beta \dot{\psi}^2 + N_{r r r} \dot{\psi}^3 - x_G Y_H \end{aligned} \quad (4)$$

$m_x, m_y, J_{zz}$ は出会い波周波数  $\omega_e=0$  における付加質量・慣性モーメントである。 $X_{\beta\beta}, Y_{\beta\beta}, N_{\beta\beta}$ 等は  $\omega_e=0$  における減衰係数で、

いわゆる操縦流体力として扱われる粘性による減衰成分を意味する。他方、 $m_{ij}^{\omega_e}$ ,  $b_{ji}^{\omega_e}$  は  $\omega_e$  の関数として扱われる付加質量と主に造波に起因する減衰係数である。本来これらにはメモリー影響を考慮する必要があるが、ここでは準定常的に扱えるものと仮定し、ストリップ法を基に求めた。

下添え字  $W.D.$  は波漂流力であり文献 5) の方法で計算する。 $f.k.$  と  $dif.$  はそれぞれフルードクリロフ力とディフラクション流体力であり、線形のストリップ法を基に計算する。文献 2) と比較して本計算法の特徴を以下にまとめる。

- ・ 波の力として、フルードクリロフ力とディフラクション力の線形成分ならびに波漂流力を考慮している。
- ・ 操縦運動に支配的な前後、左右、船首揺れ運動に関する流体反力としての慣性力と減衰力は  $\omega_e=0$  の値で代表し、その他の上下、横、縦揺れ成分は  $\omega_e$  の変化を準定常的に考慮する。
- ・ 縦揺れ角  $\theta$  の微小仮定を用いていない。

### 3. 波浪中操縦性能模型試験

#### 3. 1 試験方法と模型船

模型試験は海上技術安全研究所の実海域再現水槽で実施した。試験項目は規則波中の  $35^\circ$  旋回試験である。平水中で設計速力となるプロペラ回転数で波浪中の試験を行った。試験開始時の船速は、上記のプロペラ回転数で所定の波条件を直進したときに得られる定常値を目標にした。船体の 6 自由度波浪動揺は光ファイバージャイロ(FOG)で計測した。航跡と船速は模型船を自動追尾する台車に設置された CCD カメラで計測をした。

対象船は垂線間長 2.91m、縮尺 1/110 の満載状態のタンカー KVLCC1<sup>6)</sup> とした。計算に必要な本船の流体力微係数等は弊所での実験結果ならびに文献 6) の値を用いた。

#### 3. 2 模型試験結果と数値計算結果の比較

$\lambda/L=0.5$ ,  $H/L=1/100$ ,  $\chi=180\text{deg.}$  の規則波における  $+35^\circ$  旋回試験時の航跡と船体運動を、実験と計算とで比較して図 2 に示す。本図より、実験で生じた波の影響で航跡が波下方向流される傾向は計算でも確認できる。定量的にも近いが、計算では僅かに  $\eta$  軸正方向にも航跡が流される傾向にあることが確認できる。この差は波漂流力の推定精度が主な原因であると考えられる。船体運動の時系列を比較するとどの運動も波浪動揺の大きくなる時刻とその振幅が定量的に実験と近く、操縦運動による低周波の変化もよく一致していることが確認できる。なお、実験ではトリム角が生じているが、これは FOG の特性による計測誤差である。

### 4. まとめ

浜本の方法を基に、浪中操縦運動計算手法を提案した。タンカー模型を用いた微小振幅規則波中の旋回試験を実施し、本計算法の基礎的な検証をおこなった。その結果、本計算法の妥当性を明らかにした。波高や船体運動が大きくなった場合や他船型への適用性を検証することを本研究の今後の課題とする。

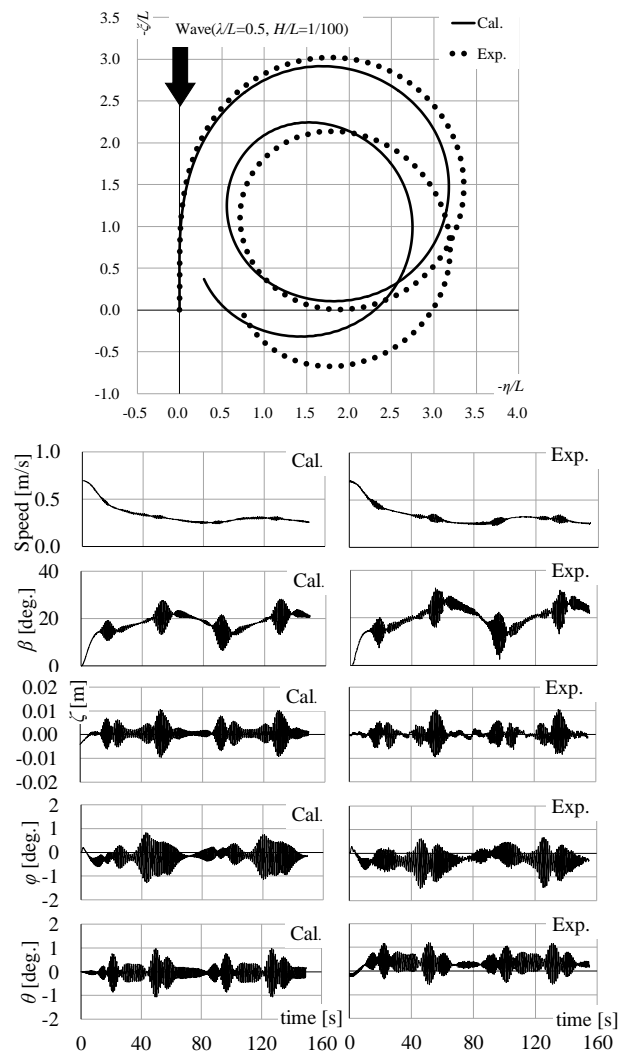


図 2 規則波( $\lambda/L=0.5$ ,  $H/L=1/100$ ,  $\chi=180\text{deg.}$ )中  $+35^\circ$  旋回試験結果

### 参考文献

- 1) 安川宏紀：旋回する船の波浪動揺シミュレーション、日本船舶海洋工学会論文集 第 4 号 pp.117-126, 2006.
- 2) 浜本剛実ほか：波浪中の操縦運動を記述する新しい座標系とその運動方程式、日本造船学会論文集 第 173 号 pp.209-220, 1993.
- 3) 西村浩二ほか：小型船の大波高中動揺・操縦運動時間ベース計算法の一提案、日本造船学会論文集 第 195 号 pp.203-210, 2014.
- 4) 野中晃二：波浪中の操船運動について、西部造船会会報 第 80 号 pp.73-86, 1990.
- 5) M. Ueno et. al.: Estimation Program for Steady Wave Loads on Ships at Zero Forward Speed Using Database, 海技研報告, 第 16 巻 第 3 号 pp.43-52, 2016.
- 6) Y. Yoshimura et. al.: Analysis of steady hydrodynamic force components and prediction of manoeuvring ship motion with KVLCC1, KVLCC2 and KCS, Proc. of SIMMAN2008 part E pp.E80-E86, 2008