

PS-1 不規則波中を旋回する船の波浪動揺と操縦運動計算法の一提案

流体性能評価系 * 鈴木 良介、塚田 吉昭

1. 緒言

実海域中の船舶の航行安全性を議論するには、水平面内を対象とした操縦性能に加えて、波浪動揺を対象とした耐航性能の両観点からの統合的な評価が必要である。これには、波浪中の船体運動を6自由度で推定することが不可欠であり、これに関する既往研究として、様々な計算法^{例えは 1)~3)}が目的に応じて提案されている。著者らも、浜本らの船体水線面固定座標系(HBA)での運動方程式²⁾をベースとした計算法を提案し、本計算法で規則波中保針航行時の船速低下や旋回時の航跡ならびにその際の波浪動揺を大略推定可能であることを示した⁴⁾。しかし、これらの研究のうち、追波中の波乗り³⁾等の特殊な操船を除く旋回運動などの通常の航行状態を対象とした計算法については、より実海域に近い不規則波中の計算にまで拡張し、検証された例は殆ど見られない。

以上の背景から本研究では、規則波中を対象に著者らの提案した計算法⁴⁾を、既存の規則波の波力成分等の線形重ね合わせ^{5),6)}や線形システムに対する運動履歴影響⁷⁾を用いることで、不規則波中の計算にまで拡張することを試みた。また、自由航走模型を用いた一方向不規則波中での旋回試験を実施し、本計算法の検証を行った。本論文では、その計算法の概要と、数値計算と水槽試験の比較結果について報告する。

2. 数値計算

2.1 運動方程式

文献4)に従い、HBA²⁾における船の6自由度運動方程式を(2.1)式で与える。なお、運動の変数と座標系の定義は文献⁴⁾に従った。

$$\left\{ \begin{array}{l} m(\dot{U} - V\dot{\Psi}) = X_0 + X_p + X_R + X_{f.k.} + X_{f.i.} + X_{f.d.} + X_{W.D} \\ m(\dot{V} + U\dot{\Psi}) = Y_R + Y_{f.k.} + Y_{dif.} + Y_{f.i.} + Y_{f.d.} + Y_{W.D} \\ m\dot{W} = Z_{f.k.} + Z_{dif.} + Z_{f.i.} + Z_{f.d.} + mg \\ (I_{xx} \cos^2 \theta + I_{yy} \sin^2 \theta) \ddot{\Phi} - I_{yy} \dot{\Phi} \dot{\Psi} - (I_{xx} - I_{yy}) \\ \cdot (\ddot{\Psi} \sin \theta \cos \theta + \dot{\theta} \dot{\Phi} \sin 2\theta + \dot{\theta} \dot{\Psi} \cos 2\theta) \\ = K_R + K_{f.k.} + K_{dif.} + K_{f.i.} + K_{f.d.} \\ I_{yy} \ddot{\Theta} + (I_{xx} \cos^2 \theta + I_{yy} \sin^2 \theta) \dot{\Phi} \dot{\Psi} \\ - (I_{xx} - I_{yy}) \dot{\Psi}^2 \sin \theta \cos \theta \\ = M_{f.k.} + M_{dif.} + M_{f.i.} + M_{f.d.} \\ (I_{xx} \sin^2 \theta + I_{yy} \cos^2 \theta) \ddot{\Psi} - (I_{xx} - I_{yy}) \\ \cdot (\ddot{\Phi} \sin \theta \cos \theta + \dot{\theta} \dot{\Phi} \cos 2\theta - \dot{\theta} \dot{\Psi} \sin 2\theta) \\ = N_R + N_{f.k.} + N_{dif.} + N_{f.i.} + N_{f.d.} + N_{W.D} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

m , I は船の質量と慣性モーメントであり、 g は重力加速度を示す。平水中船体抵抗、プロペラと舵による力(下添え字 0 ,

P , R)の計算法は、文献4)に従った。波浪外力としての静水圧を含むフルードクリロフ力(下添え字 $f.k.$)、ディフラクション力(下添え字 $dif.$)、船体の存在によって入射波が反射することで生じる高次の定常波力(下添え字 $W.D.$)は、与えた波のパワースペクトルに基づいた各規則波成分波の重ね合わせで表現する既存の方法^{5),6)}を採用しており、各成分波の計算は規則波中の計算⁴⁾と同じである。

船体運動の反力として船体に働く流体の慣性力ならびに減衰力(下添え字 $f.i.$ と $f.d.$)は、規則波中での計算法を基にしながらも、既存の線形システムに対するメモリー影響関数⁷⁾に倣い、波浪に伴う船体動揺の高周波成分に対して運動履歴を考慮して計算した。すなわち、流体の慣性力については、規則波中の推定式において出会い波周波数 ω_e の関数として与えた付加質量を周波数無限大の値で代表することとし、流体の減衰力については、次式で推定した。

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{f.d.} = X_H^L \\ Y_{f.d.} = Y_H^L - \int_0^\infty L_{22}(\tau) V^H(t-\tau) d\tau \\ \quad - \int_0^\infty L_{24}(\tau) \dot{\Phi}(t-\tau) d\tau - \int_0^\infty L_{26}(\tau) \dot{\Psi}^H(t-\tau) d\tau \\ Z_{f.d.} = - \int_0^\infty L_{33}(\tau) W(t-\tau) d\tau - \int_0^\infty L_{35}(\tau) \dot{\Theta}(t-\tau) d\tau \\ K_{f.d.} = K_H^L - \int_0^\infty L_{42}(\tau) V^H(t-\tau) d\tau \\ \quad - \int_0^\infty L_{44}(\tau) \dot{\Phi}(t-\tau) d\tau - \int_0^\infty L_{46}(\tau) \dot{\Psi}^H(t-\tau) d\tau \\ \quad - (b_{44}^* - b_{44}[\omega_T \phi]) \dot{\Phi}(t) \\ M_{f.d.} = - \int_0^\infty L_{53}(\tau) W(t-\tau) d\tau - \int_0^\infty L_{55}(\tau) \dot{\Theta}(t-\tau) d\tau \\ N_{f.d.} = N_H^L - \int_0^\infty L_{62}(\tau) V^H(t-\tau) d\tau \\ \quad - \int_0^\infty L_{64}(\tau) \dot{\Phi}(t-\tau) d\tau - \int_0^\infty L_{66}(\tau) \dot{\Psi}^H(t-\tau) d\tau \\ L_{i,j}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_{i,j}[\omega_e] \cos(\omega_e \tau) d\omega_e \end{array} \right. \quad (2.2)$$

ここに、 $L_{i,j}$ はメモリー影響関数、 $b_{i,j}$ は造波減衰係数、 b_{44}^* は粘性影響を含む横揺れ固有周波数での横揺れ減衰係数を表す。下添え字の L と H はそれぞれ低周波成分と高周波成分を意味する。低周波数の船体運動に対する操縦流体力(下添え字 H)の計算は、規則波中での計算法⁴⁾に従った。

2.2 計算条件

長さ320mのVLCC型供試船KVLCC1^{4),8)}を対象に、縮尺1/110の相似模型に対して計算を行った。操縦運動計算に必要な係

数は全て文献 4) の値を引用した。

操舵条件は右 35° 旋回であり、プロペラ回転数は平水中で設計船速 0.76m/s となる値で一定にした。波は ISSC スペクトル型の一方向不規則波とした。有義波高 $H_{1/3}$ と平均波周期 T_{01} は、それぞれビューフォート風力階級 8 相当の 5.00cm と 0.863s とした。旋回開始時の波向きは正面向波とした。旋回開始前に自動操舵で模型船を十分直進航行させ、船速が概ね定常となった後に旋回操舵を開始した。

3. 自由航走模型試験

同縮尺模型を対象に海上技術安全研究所の実海域再現水槽(長さ 80m, 幅 40m, 水深 4.5m)で、計算法検証のための試験を実施した。船の航跡と水平面内の操縦運動の計測は、模型船を自動追尾する副台車に設置した CCD カメラによる画像解析で行い、6 自由度船体動揺は光学式ステレオカメラで計測した。その他の一般的な実験手順は、文献 4) に示された規則波中の場合と同じである。試験条件は上記計算条件に従っているが、成分波のランダム位相は必ずしも数値計算とは一致していない。

4. 数値計算と自由航走模型試験結果の比較

数値計算による一方向不規則波中旋回時の船体重心航跡ならびに船体運動(前進船速, 回頭角, 上下・横・縦揺れ)の時系列の推定値を、水槽試験結果と比較して図-1 に示す。本図より、旋回航跡が波下側に漂流する傾向を実験と計算から確認でき、両者でこれらが定量的によく一致していることがわかる。また、操舵や波による漂流に伴う船速や回頭角の変化も、数値計算が実験結果をおおよそ捉えていることがわかる。船体動揺の時系列を見ると、上下・横・縦揺れの極値間振幅が時々刻々変化していることが、実験と計算の両方から確認できる。これは、不規則波中において出会い波が空間・時間的に変化することに加えて、旋回運動に伴う船速や回頭角の変化に従い、出会い波の向きと周波数も変化することで生じたものである。そのため、出会い波(成分波のランダム位相)が異なる実験と計算の比較では定量的な評価は難しいが、その違いはあっても各船体動揺の推定結果は大略実験結果を捉えていることを本図から確認できる。

5. 結言と展望

本研究では、著者らの提案した規則波中操船時の 6 自由度船体運動計算法⁴⁾を不規則波中の計算にまで拡張し、水槽試験による検証を行った。その結果、本計算法によって一方向不規則波中旋回時の水平面内操縦運動と波による船体動揺を大略推定できることを明らかにした。ただし、これは数値計算と実験で出会い波の異なる 1 条件間での比較によって得られた定性的な結論であるため、今後成分波のランダム位相を変更した計算と実験を幅広く行い、計算精度の定量的な評価をすることが今後の課題である。更には、他の船型や操縦運動状態、海象での検証も必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 安川広紀: 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(2006), pp.117-126.
- 2) 浜本剛実, 金潤洙: 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(1993), pp.209-220.
- 3) Ayaz Z. et al.: Manoeuvring behaviour of ships in extreme astern seas, Ocean Engineering, Vol. 33, No. 17-18(2005), pp. 2381-2434.
- 4) Suzuki R. et al.: Numerical simulation of 6-degrees-of-freedom motions for a manoeuvring ship in regular waves, Applied Ocean Research, Vol.113(2021), paper No. 102732.
- 5) 山内保文(監修): 船舶・海洋技術者のための不規則現象論, 海文堂 (1986 初版).
- 6) 丸尾孟: 波浪中の船体抵抗増加に関する研究 (第 2 報 抵抗増加の本質について), 造船協会論文集, 第 108 号(1960), pp.5-13.
- 7) W.E. Cummins: The impulse response function and ship motion, Hydrodynamics laboratory research and development report, report 1661 (1962).
- 8) <http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC1/tanker1.html>

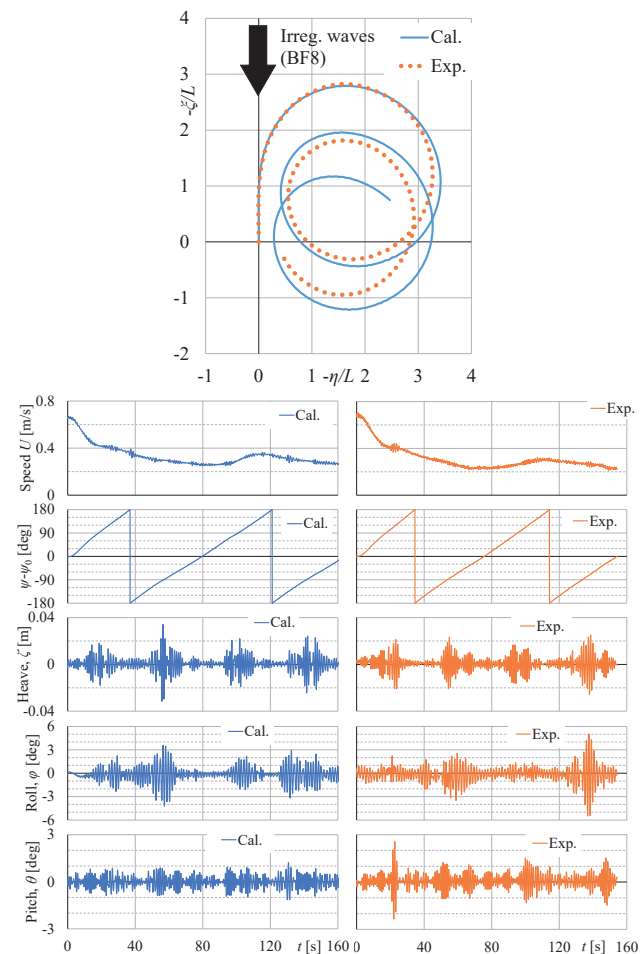


図-1 一方向不規則波中の右 35 度旋回時の航跡と船体運動時系列