

PS-7 操縦性と耐航性の数学モデルを統合した運動方程式による波浪

中旋回時の船体運動推定

流体性能評価系 * 鈴木 良介、上野 道雄、塚田 吉昭

1. 諸言

船体動揺を含む波浪中を操縦運動時の6自由度船体運動の理論計算には、操縦運動ならびに波による漂流に伴う低周波数の応答のみを対象とした従来の操縦性能推定数学モデルと、ストリップ法に代表されるような定常直進下での高周波の波浪動揺を扱った耐航性能モデルの統合が必要となる。浜本等は、船体水面固定座標系(HBA)¹⁾において両モデルを統合した1組の運動方程式を提案し、コンテナ船の規則波中旋回運動とzig-zag運動の計算を実施した。本計算法の利点は、微小振幅波ならびに船体動揺の周波数は操縦運動に対して十分に高いという条件下で成り立ついわゆる2タイムスケール計算法(従来の両モデルを完全に分離し個別に解き、それらの解の足し合わせを波浪中の船体運動とする方法^{例えば2)})と比較して、船体動揺振幅や運動周波数に対する適用範囲に理論上制限はないという点が挙げられる。しかし、本計算法は現在のところ、旋回運動のような一般的な波浪中の操縦運動に対しては波浪動揺まで含めた実験的検証が十分になされているとはいえない。

本研究では、上述の背景から、操縦性と耐航性の数学モデルを統合した運動方程式による計算法として浜本等の計算法¹⁾を基にしなが、一般的な船型を対象に幅広い波長の範囲で適用可能なように、流体の慣性力と減衰力の取り扱いならびに波浪外力の計算法を変更することで、新たに船体動揺を含む波浪中の操縦運動計算法を提案する。また、自由航走模型試験を実施し、基礎段階としてコンテナ船の規則波中旋回運動を対象に提案する計算法の検証を行った。

2. 数値計算法

HBA¹⁾における6自由度船体運動方程式を(2.1)式で与える。

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

$$\begin{aligned}
 &= M_{f.k.} + M_{dif.} + M_{f.i.} + M_{f.d.} \\
 (I_{xx} \sin^2 \theta + I_{yy} \cos^2 \theta) \ddot{\Psi} - (I_{xx} - I_{yy}) \\
 &\quad \cdot (\ddot{\Phi} \sin \theta \cos \theta + \dot{\theta} \dot{\Phi} \cos 2\theta - \dot{\theta} \dot{\Psi} \sin 2\theta) \\
 &= N_R + N_{f.k.} + N_{dif.} + N_{f.i.} + N_{f.d.} \\
 &\quad + N_{W.D.}
 \end{aligned}$$

運動の変数と座標系の定義は文献¹⁾に従った。 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)は、平水中の操縦運動推定モデル³⁾を用いて計算した。静水圧を含むフルードクリロフ力(下添え字 $f.k.$)は、線形近似した入射波圧と静水圧を実際の入射波面と船体姿勢周りに積分して求めた。ディフラクション力(下添え字 $dif.$)は、出会い波周波数の変化の影響を準定常的に扱えるとして、また前後成分は微小としてストリップ法の1つであるSTF法を基に推定した。線形化されたディフラクション力からは、その時間平均が0となるため定常力成分は生じない。そこで、この定常波力に相当する成分として、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 $W.D.$)を別途考慮し、これは斜航と旋回の影響を考慮できる上野らの方法⁴⁾で推定した。なお、例えばEnhanced Unified Theoryならびにフルードクリロフ力同様の圧力積分により、非線形成分を考慮したディフラクション力を求めることが出来るが、それは今後の課題とした。変化する出会い波周波数に対して、船体運動の反力として働く流体の慣性力と減衰力(下添え字 $f.i.$ と $f.d.$)に、厳密にはメモリー影響を考慮する必要があるが、ここではそれらは無視できるものとして、次の通りに推定した。流体の慣性力は、西村らの計算⁵⁾に従い、その式中の付加質量については、前後とその連成成分ならびに左右・旋回の成分のみ周波数0の値で代表し、その他の成分付加質量はSTF法を基に出会い波周波数の変化の準定常的に考慮して求めた。流体の減衰力は、操縦運動に伴う低周波数の運動による成分は粘性の影響が、船体動揺に伴う高周波数の運動による成分は造波の影響が支配的と考えて、(2.2)式で与えた。

$$\begin{aligned}
 X_{f.d.} &= X_H^L \\
 Y_{f.d.} &= Y_H^L - b_{22}V^H - b_{24}\dot{\Phi}^H - b_{26}\dot{\Psi}^H \\
 Z_{f.d.} &= -b_{33}W - b_{35}\dot{\Theta}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned}
 K_{f.d.} &= K_H^L - b_{42}V^H - b_{44} * \dot{\Phi}^H - b_{46}\dot{\Psi}^H \\
 M_{f.d.} &= -b_{53}W - b_{55}\dot{\Theta} \\
 N_{f.d.} &= N_H^L - b_{62}V^H - b_{64}\dot{\Phi}^H - b_{66}\dot{\Psi}^H
 \end{aligned}$$

ここに、上添え字 L, H はそれぞれ低周波と高周波数の運動の成分を示す。 $X_H^L, Y_H^L, K_H^L, N_H^L$ は粘性減衰力であり、操縦運動の応答周波数は極めて低いので、周波数 0 の値すなわち操縦流体力として扱い、非線形のモデル³⁾で推定した。他方、造波減衰力は線形項のみ扱い、周波数依存性を準定常的に考慮して造波減衰係数 $b_{i,j}$ を STF 法で推定した。

3. 自由航走模型試験

長さ 230m のコンテナ船 KCS を対象に、縮尺 75.5 の相似模型を用いて、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）で波浪中の自由航走模型試験を実施した。本船の横方向のメタセンタ高さは実船尺度で 3.3m とした。操舵条件は左舷方向の 35° 旋回であり、模型試験での操舵速度は 20.17° /s とした。また、プロペラ回転数は平水中で設計船速 1.42m/s となる 17.1rps で一定とした。波は波高船長比 1/50、波長船長比 0.5 の規則波であり、旋回開始時に正面向波 $\chi=180^\circ$ となるようにした。旋回開始時の初期船速は、同波条件をプロペラ回転数 17.1rps でオートパイロットにより直進航行したときの定常船速 1.32m/s とした。

船の航跡と操縦運動の計測は、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。

4. 数値計算と水槽試験結果の比較

規則波中を旋回運動時の船体重心の航跡ならびに船体運動（船速、回頭角、上下・横・縦揺れ）の時系列における数値計算と水槽試験結果の比較を図-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、旋回運動や波による漂流運動に伴う船速の変化も数値が試験結果をおおよそ捉えていることがわかる。詳細に見ると、回頭角の変化が計算で遅れる傾向が確認できるが、これは平水中の比較でも確認されたため、波の考慮によるものではない。上下・横・縦揺れの船体動揺の時系列も、回頭角の遅れを考慮すれば、それぞれの成分において、数値計算は旋回運動に伴う運動振幅の変化の様子を大略捉えていることがわかる。これらは、旋回運動とともに出会い波向きや周波数が変化し、さらには波浪流体力が時々刻々変化することで生じたものである。横揺れについては、30 秒、70 秒の左舷からの横波付近で計算と実験に定性的な差が見られる。この原因は、波浪強制力ならびに付加質量の斜航や旋回による影響や、付加質量等の代表周波数の影響等が考えられるが、詳細は今のところ不明である。

5. 結言

本研究では、従来の操縦性と耐航性のモデルを統合した運動方程式による浜本等の計算法を基に、新たに船体動揺を含む波浪中の操縦運動計算法を提案した。また、模型試験との比較から、改善の余地はあるもの本計算法で規則波中旋回時の 6 自由度船体運動を大略推定できることを明らかにした。

謝辞

本研究は科研費 (17K14891) の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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 (2006), pp. 117-126.
- 3) Y. Yoshimura et. al., 2008, Analysis of Steady Hydrodynamic Forces Components and Prediction of Manoeuvring Ship Motion with KVLCC1, KVLCC2 and KCS, Proc. SIMMAN2008 workshop, Copenhagen, pp. E80-86
- 4) 上野道雄ほか: 短波長中を操縦運動する船に働く定常波力について, 日本造船学会論文集, 第 188 号 (2001), pp. 163-172.
- 5) 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 (2004), pp. 203-210.

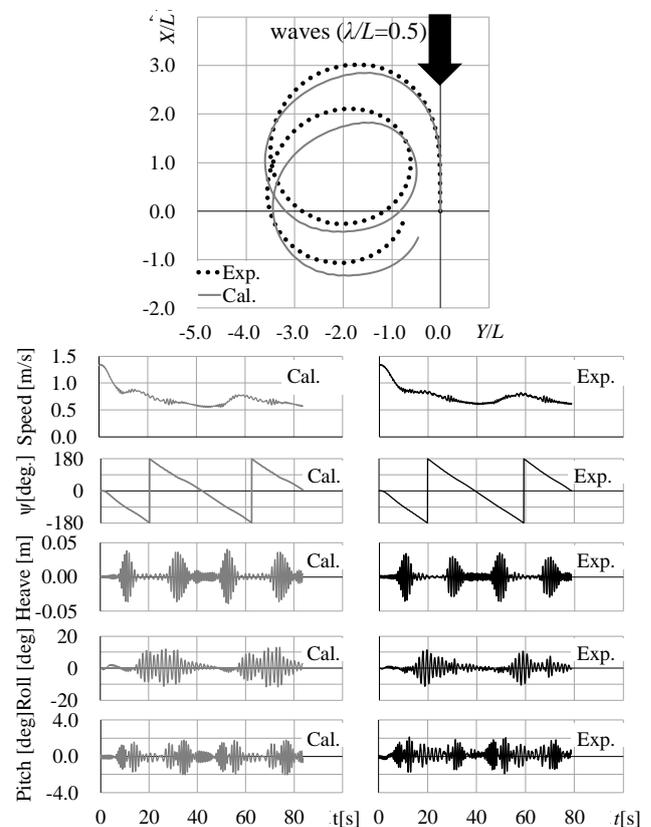


図-1 規則波中の左 35° 旋回時の航跡と船体運動時系列