非構造格子系による規則波中を航走する船体周り流れのシミュレーション

CFD 研究開発センター　日夏 宗彦
スーパーエコシッププロジェクト　日野 孝則

1. はじめに

波浪中を航走する船舶の推進性能を推定することは船舶の長期性能を評価する上で重要である。従来、この分野の研究はポテンシャル論による波浪中の抵抗増加の研究を中心に進められてきた。しかし、推進性能を考察するためには、船舶が波浪中を航走している場合のプロペラ面における粘性流場を解析する必要がある。このような複雑な粘性流場の推定には CFD による解析が有効である。本研究ではこのような立場に立ち、規則波中を航走する船体まわりの流場シミュレーション技術の開発を目的とし、まず計算コードの開発を行った。計算対象は簡単のため Wigley 船型とし、波による船体運動を考慮した波浪中の流れを計算した。

2. 計算手法

計算手法は、将来の拡張性を考慮し、複雑形状への適用性が高い非構造格子系によった。著者の一人は擬似圧縮近似を用いた非構造格子系による定常流場の CFD コード SURF を開発し [1]、さらに非定常流れに拡張している [2]。今回はこの SURF をさらに拡張して入射波および船体運動の影響を考慮するようにした。船体運動の影響を考慮すると計算領域中の物体に適合した計算格子は運動に伴って移動する。移動する非構造格子系において、擬似圧縮近似による無次元化された支配方程式を有限体積法を用いて離散化すると、解くべき式は形式的に以下のように書ける。

$$\frac{\partial V_i q_i}{\partial t} + \frac{\partial V_i q_i^*}{\partial \tau} + \sum_{\text{faces}} (E - E^v) = 0 \qquad (1)$$

ここで、$E = \tilde{e}S_x + \tilde{f}S_y + \tilde{g}S_z$ および $E^v = e^v S_x + f^v S_y + g^v S_z$ はそれぞれ非粘性項と粘性項、(S_x, S_y, S_z) はセル表面の面ベクトルである。また、

$$q_i = \frac{\int_{V_i} q^n \mathrm{d}V}{V_i}$$

$$\begin{aligned} q &= [0, u, v, w]^T, \quad q^* = [p, u, v, w]^T \\ \tilde{e} &= [\beta u, u(u-u_g)+p, u(v-v_g), u(w-w_g)]^T \\ \tilde{f} &= [\beta v, v(u-u_g), v(v-v_g)+p, v(w-w_g)]^T \qquad (2) \\ \tilde{g} &= [\beta w, w(u-u_g), w(v-v_g), w(w-w_g)+p]^T \end{aligned}$$

e^v, f^v, g^v は粘性項である。上式の p は圧力で静水圧成分 z/F^2 を除いている。ただし F はフルード数である。(u, v, w) は速度成分、(u_g, v_g, w_g) は格子移動速度である。座標系は x が船長方向で船尾に向かって正、y は幅方向で右舷が正、z は鉛直上向きが正である。τ は擬似圧縮近似仮定による連続の条件を満たすための繰り返し計算用の擬似時間、t は実時間、β は擬似圧縮近似で現れるパラメータである。格子移動の影響により、今回の非粘性項は次のように書ける。

$$E = \begin{bmatrix} \beta U \\ u(U-U_g) + pS_x \\ v(U-U_g) + pS_y \\ w(U-U_g) + pS_z \end{bmatrix} \qquad (3)$$

$$U = uS_x + vS_y + wS_z, \quad U_g = u_g S_x + v_g S_y + w_g S_z$$

格子界面上の非粘性数値流束 は Flux Difference Splitting 法を用いて

$$E_{i+1/2} = \frac{1}{2}[E(q_R^*) + E(q_L^*) - |A|(q_R^* - q_L^*)] \qquad (4)$$

のように評価できる。ただし、A は

$$A = \frac{\partial E}{\partial q} = \begin{bmatrix} 0 & \beta S_x & \beta S_y & \beta S_z \\ S_x & (U-U_g) + uS_x & uS_y & uS_z \\ S_y & vS_x & (U-U_g) + vS_y & vS_z \\ S_z & wS_x & wS_y & (U-U_g) + wS_z \end{bmatrix} \qquad (5)$$

$$A = R\Lambda L, \quad |A| = R|\Lambda|L \tag{6}$$

のようにかけ、さらに R は次のように書ける。

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c'^{+} & c'^{-} \\ l_x & m_x & S_x + u(U - c'^{-})/\beta & S_x + u(U - c'^{+})/\beta \\ l_y & m_y & S_y + v(U - c'^{-})/\beta & S_y + v(U - c'^{+})/\beta \\ l_z & m_z & S_z + w(U - c'^{-})/\beta & S_z + w(U - c'^{+})/\beta \end{bmatrix} \tag{7}$$

ただし

$$c'^{\pm} = \frac{U_g}{2} \pm c', \quad c' = \sqrt{\left(\frac{U + U_g}{2}\right)^2 + \beta(S_x^2 + S_y^2 + S_z^2)} \tag{8}$$

また Λ は次の固有ベクトルを対角成分に持つ行列である。

$$\lambda = U', U', \frac{U + U'}{2} + c', \frac{U + U'}{2} - c' \tag{9}$$

ここで、$U' = U - U_g$ である。　時間積分は、擬似圧縮近似による擬似時間については Euler の後退差分を、実時間については、2 次精度の 2 ステップ後退差分とした。離散化式の結果のみ表すと

$$\begin{aligned} &\left[\frac{V_i}{\Delta\tau} I + \frac{3V_i}{2\Delta t} J + \sum_i \left(\frac{A_i + |A_i|}{2} + B\right)\right] \Delta q_i \\ &\quad + \sum_j \left[\left(\frac{A_i - |A_i|}{2} - B\right)\right] \Delta q_j \\ &- \left(\sum_j E^{(n+1),m}_{(j+i)/2} - \sum_j E^{v,(n+1),m}_{(j+i)/2} + V_i P\right) \end{aligned} \tag{10}$$

ただし $\Delta q = q^{(n+1),(m+1)} - q^{(n+1),(m)}$ で

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \frac{(1/R + \nu_t)}{3V} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S^2 + S_x^2 & S_x S_y & S_x S_z \\ 0 & S_x S_y & S^2 + S_y^2 & S_y S_z \\ 0 & S_x S_z & S_y S_z & S^2 + S_z^2 \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 \\ (3u_i^{(n+1),m} - 4u_i^n + u_i^{(n-1)})/2\Delta t \\ (3v_i^{(n+1),m} - 4v_i^n + v_i^{(n-1)})/2\Delta t \\ (3w_i^{(n+1),m} - 4w_i^n + w_i^{(n-1)})/2\Delta t \end{bmatrix} \tag{11}$$

である。(10) 式は Δq_i に関する方程式で、これを対称ガウスザイデル法で数値的に解く。擬似時間 $\Delta\tau$ に対する繰り返し計算終了後、実時間を 1 タイムステップだけ進行させ、非定常流を計算する。

3. 境界条件

上流側の境界条件は、一様流に正面規則波が重畳した流場で与えられる。計算領域は船の前進速度と同じ速度で移動するので、その上流境界面では、流速は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} u(t) &= u_a e^{kz} \sin(kx - kct - kd) + U_{ship}(t) \\ w(t) &= -u_a e^{kz} \cos(kx - kct - kd) \\ \zeta(t) &= \zeta_a \sin(kx - kct - kd) \end{aligned} \tag{12}$$

$U_{ship}(t)$ は静止状態から一様速度までの船速を表し、d は船が静止状態から時間 t までに進む距離を表す。すなわち

$$d = \int_0^t U_{ship}(t)\mathrm{d}t. \tag{13}$$

また k と c は入射波の波数と位相速度である。上流境界近くの流場では、(12) 式で表される流場と計算された流場の差がゼロとなるようにその差にダンピングをかけた。自由表面では自由表面条件を、下流境界では勾配ゼロの条件を課した。圧力の上流条件は勾配ゼロとした。

4. 自由表面の表現

自由表面はレベルセット法で計算した。レベルセット法では、自由表面からの符号付き距離関数 ϕ で自由表面を表現し、$\phi = 0$ が自由表面、$\phi > 0$ が水中、$\phi < 0$ が空中を表す。自由表面は ϕ に対する実質微分が 0 で与えられる方程式を解き、$\phi = 0$ の等値面を定義する事で得られる。一方、圧力条件は、自由表面高さを h とするとき $p = h/F^2$ を満たすように解く。

5. 船体運動に伴う格子移動

規則波中を進行する船は一般に運動を伴うため、それに伴って船体周りの計算格子も移動する。ここでは、船体近傍の格子は船体運動と同じだけ運動させ、それより外側の格子は船体に離れるに従って移動量を小さくし、外側境界は常に固定した。

6. 計算結果

計算はすべて Wigley 船型を用いた。計算法のチェックのため、まず平水中を静止状態から一様に加速した後、一定速度で航走するときの姿勢変化を計算し、実験結果と比較した。結果を図-1 に示す。計算は無次元時間で $t = 8$ までとし、一様速度は $F = 0.289$ とした。計算結果は実験結果とよく一致している。図-2 は船側波形の比較である。船首付近で計算結果の波高がやや小さいが、全体的にはよく一致しているといえる。

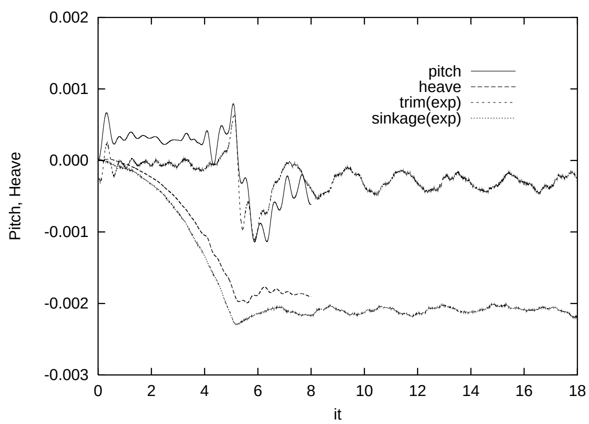

図-1　静止時から一様速度に達するまでの船体運動の比較

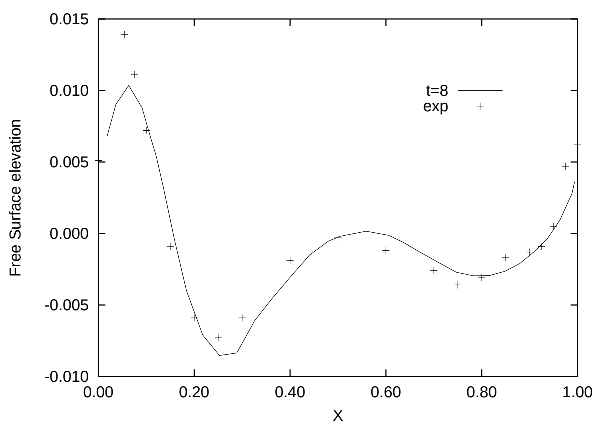

図-2　船側波形の比較 ($F = 0.289$)

次に、一様加速後一定速度で入射波中を航走する場合のシミュレーション結果を示す。入射波の波長は船長と同じとした。入射波高は船長の 1%と設定したが、上流境界では格子が粗いため数値ダンピングを受けることから、船体前方でモニターした有効入射波高は船長の 0.8% であった。図-3 に抵抗値の時間変動を示す。図には船体運動を固定して入射波中を航走する状態 (diffraction 状態) の結果も記した。Diffraction 状態では抵抗変動は静止水面を航走するときの結果を中心に振動しているが、船体運動を許すと、抵抗の平均値は平水中時より大きくなっているのがわかる。この差が抵抗増加量であり、今回の結果では $t = 5.5$ から 7.6 までの時間平均で、平水中の抵抗に比べて 1.3%増加となった。図-4 および 5 にピッチおよびヒーブの時間変動を示す。ピッチ運動は船体が一定速度に達したときに、一度オーバーシュートするが、その後小さくなる。今回得られたピッチ振幅を波傾斜で無次元化すると 0.844、また、ヒーブ振幅の波高による無次元量は 1.123 であった。ストリップ法で得られた結果はピッチ振幅が 1.285、ヒーブ振幅が 1.553 であった。いずれも今回の結果はストリップ法に比べ小さく計算されている。今後、実験結果との比較等による詳細な検討が必要である。

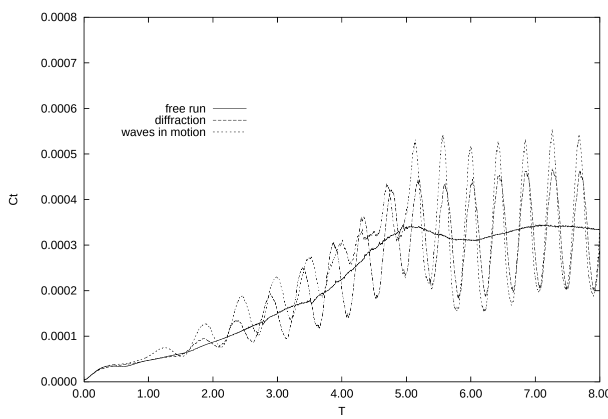

図-3　抵抗値の比較

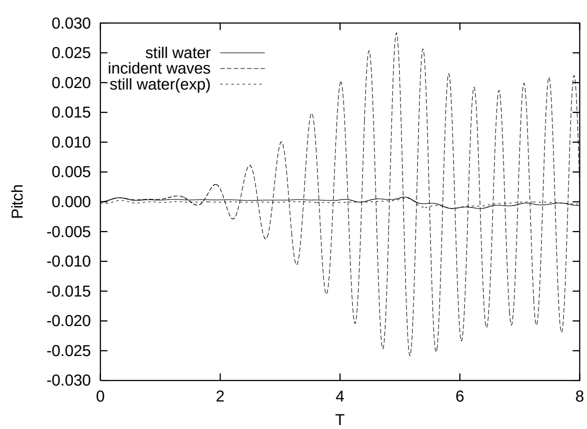

図-4　ピッチ角の比較

図-6 に伴流 $(1 - w)$ の時間変動を示す。ここでは仮想のプロペラディスクとして、船尾端より船

長の1%後部、喫水の1/2位置に中心をおいた、喫水の80%の直径を持つ円盤を想定して伴流値を計算した。船体運動を伴うとき、伴流の時間平均は平水中に比べ大きい。一方、船体運動を拘束したdiffraction 状態における時間平均値は平水中の値とほぼ同じである。平水中を強制運動させたときも伴流の増加が計算されていることから [3]、規則波中を航走する船体で観測される伴流の増加は船体運動に起因する部分が大きいといえよう。

図-7 に入射波中を航走する船体周りの自由表面形状を示す。入射波のクレストに対し船首が突入し、大きな船首波を形成している状況がシミュレートされている。

7. まとめ

規則波中を航走するときの船体周り流場のシミュレーションコードを開発した。今後は、より細かな計算格子による計算や大波高時の計算を行っていく予定である。

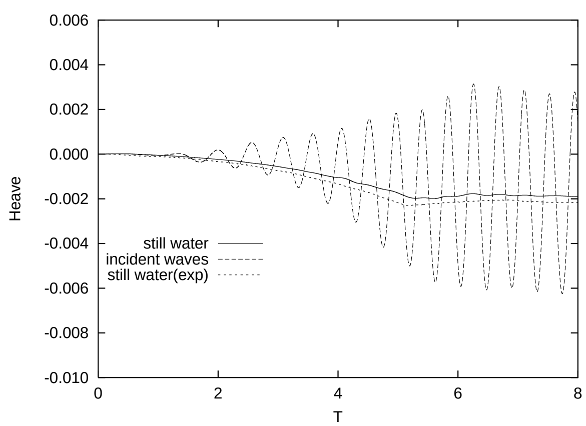

図-5　ヒーブ量の比較

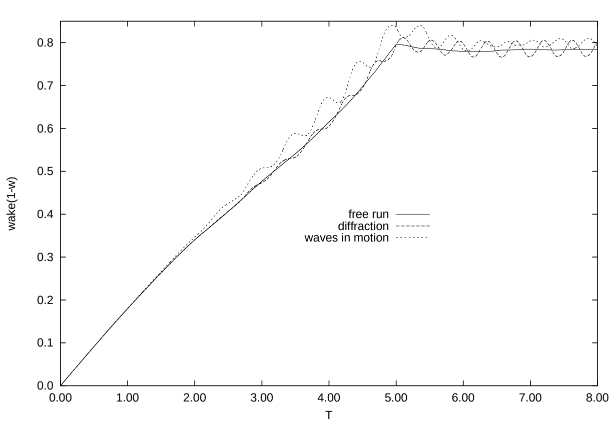

図-6　伴流値の比較

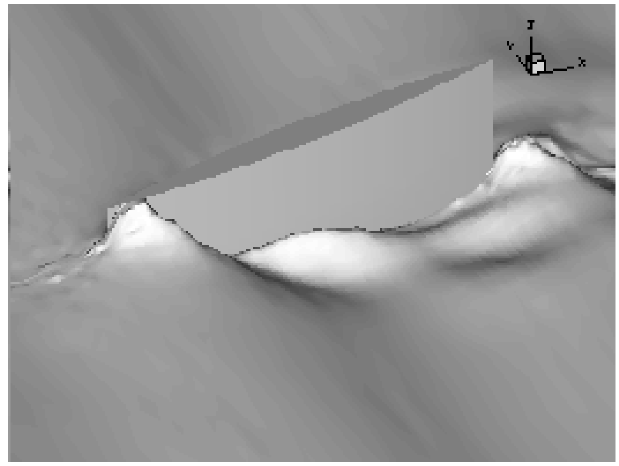

図-7　入射波中を航走する船体周り流れの一例

参考文献

[1] Hino,T, JSNAJ,Vol.186, (1999)
[2] Rhee.S.H, Hino,T., Proc. 4thICHD (2000)
[3] Hinatsu,M., Proc. OC2002 (2002)