

体積力型埋め込み境界法に基づく流体・構造連成数値シミュレーションに関する一考察

名古屋大学大学院 正会員 中村 友昭
 名古屋大学大学院 正会員 水谷 法美
 名古屋大学大学院 学生会員 ○ 小池 竜

1. 緒言：流体と構造物の相互作用問題 (Fluid-Structure Interaction ; FSI) は海岸工学分野においても近年注目を集めている。例えば、川崎・袴田 (2007) は CIP 法に基づく DOLPHIN-3D により浮体の波浪応答を解析しており、東野ら (2007) は構造物の移動に伴う体積占有率の時間変化を考慮した津波・構造連成数値計算モデルの構築を行っている。また、李・水谷 (2007) は任意形状の移動境界を直交格子系で取り扱う Lima E Silva ら (2003) の埋め込み境界 (Immersed Boundary ; IB) 法を海岸工学分野に適用し、IB 法を組み込んだ VOF 法により水平円柱への作用波力の検討を行っている。この IB 法は物体表面で不透過境界条件を強制する Physical Virtual モデルを利用することにより直交座標上で高精度に任意形状の構造物を取り扱えるが、固定物体のみを対象としており移動物体への適用に課題を残している。本論では、Nakamura ら (2008) の MARS に基づく 3 次元数値波動水槽に Yuki ら (2007) を参考に構築した体積力型 IB 法を組み込み、静水中での剛体の鉛直自由振動現象を解析解と比較するとともに、浮体の波浪応答に対する本モデルの適用性の検討を行った。

2. 数値計算手法：物体表面で不透過条件を課す従来の IB 法と異なり、体積力型 IB 法では構造物を各計算格子での物体体積率で表し、その体積率を基に構造物内部の速度を強制する。物体の体積率を F_{ob} ($0 \leq F_{ob} \leq 1$)、流体の速度を v_i^f 、物体の速度を $v_i^{ob} = u_i^{ob} + e_{ijk} \omega_j^{ob} r_k^{ob}$ (u_i^{ob} : 物体の並進速度 ; ω_j^{ob} : 物体の角速度 ; r_k^{ob} : 物体重心からの相対位置ベクトル ; e_{ijk} : 置換記号) とし体積平均速度 v_i を $v_i = (1 - F_{ob})v_i^f + F_{ob}v_i^{ob}$ と定義すると、本手法の支配方程式は下記の連続式、修正 Navier-Stokes 方程式、VOF 関数 F の移流方程式のように書ける。

$$\frac{\partial(mv_j)}{\partial x_j} = q^*, \quad \left(1 + C_A \frac{1-m}{m}\right) \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial(v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i + f_i^{ob} + \frac{f_i^s}{\hat{\rho}} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\hat{\nu} D_{ij}) - R_i + Q_i - \beta_{ij} v_j, \quad \frac{\partial(mF)}{\partial t} + \frac{\partial(mv_j F)}{\partial x_j} = Fq^*$$

ただし、 p は圧力、 g_i は重力加速度、 $\hat{\rho} = (1 - F_{ob})\{F\rho_w + (1 - F)\rho_a\} + F_{ob}\rho_{ob}$ は密度、 $\hat{\nu} = (1 - F_{ob})\{F\nu_w + (1 - F)\nu_a\} + F_{ob}\nu_{ob}$ は動粘性係数、 m は空隙率、 $q^* = q(y, z, t)/\Delta x_s$ 、 $q(y, z, t)$ は造波位置でのわき出し強さ、 Δx_s は造波位置での x 軸方向の格子幅、 C_A は付加質量係数、 f_i^s は CSF モデルに基づく表面張力、 τ_{ij} はダイナミック二変数混合モデルに基づく乱流応力、 D_{ij} はひずみ速度、 R_i は抵抗力項、 Q_i は造波ソース項、 β_{ij} は減衰係数行列である。ここで、時間発展計算に SMAC 法、3 次精度 Adams-Bashforth 法、Crank-Nicolson 法を適用すると、

$$v_i^p = \left[v_i^n + \frac{\Delta t^{n+1/2}}{1 + C_A(1-m)/m} \left\{ -\frac{1}{\hat{\rho}^n} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} - g_i - \frac{1}{2} \frac{12C_{D2} \hat{\nu}^n (1-m)}{md_{50}^2} v_i^n + \left(A_0^n + \frac{\Delta t^{n+1/2}}{2} A_1^n + \frac{(\Delta t^{n+1/2})^2}{6} A_2^n \right) \right\} \right] / B^n,$$

$$v_i^{n+1} = v_i^p - \gamma^n \frac{\Delta t^{n+1/2}}{m} \left(\frac{1}{\hat{\rho}^n} \frac{\partial \varphi^{n+1/2}}{\partial x_i} - f_i^{obn} \right), \quad \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\gamma^n}{\hat{\rho}^n} \frac{\partial \varphi^{n+1/2}}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial(mv_i^p)/\partial x_i - q^{*n+1}}{\Delta t^{n+1/2}} + \frac{\partial(\gamma^n f_i^{obn})}{\partial x_i}$$

のように予測段階と修正段階に分割でき、第 n ステップでの相互作用力 f_i^{obn} 、 γ^n 、 B^n は次のように書ける。

$$f_i^{obn} = F_{ob}^n \frac{v_i^{obn} - v_i^p}{\gamma^n \Delta t^{n+1/2} / m}, \quad \gamma^n = \frac{m}{1 + C_A(1-m)/m} / B^n, \quad B^n = 1 + \frac{\Delta t^{n+1/2}}{1 + C_A(1-m)/m} \frac{1}{2} \frac{12C_{D2} \hat{\nu}^n (1-m)}{md_{50}^2}$$

ただし、 $\Delta t^{n+1/2}$ は時間刻み幅、 C_{D2} は線形抵抗力係数、 d_{50} は透過性材料の中央粒径である。なお、 f_i^s 、 τ_{ij} 、 R_i 、 Q_i 、 β_{ij} および Adams-Bashforth 法に関する A_0^n 、 A_1^n 、 A_2^n の式形は Nakamura ら (2008) を参照されたい。

本論では、物体の位置の更新に際して、まず物体を高粘性流体と仮定して上述の計算を行い、MARS による F の移流計算を行った。その後、物体内部の圧力を用いて作用力を算出する Xiao ら (1997) の手法により物

キーワード 流体・構造連成解析, 体積力型埋め込み境界法, 浮体の波浪応答, MARS, 数値波動水槽

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Tel 052-789-4630

体の並進・回転運動を計算し、最後にそれに基づいて F_{ob} の更新を行った。ただし、並進・回転運動の時間発展には Xiao ら (1997) と異なり Newmark の β 法を採用し、また物体の位置からの F_{ob} の算出には Yuki ら (2007) の \tanh 関数による近似ではなく平面からなる物体に適した算定法を用いて物体の総体積の増減を抑えた。

3. 剛体の鉛直自由振動: 静水中での高さ H 、幅 L の剛体の鉛直自由振動現象を取り上げる。各方向の格子数は $100 \times 1 \times 50$ 、格子幅は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.0 \text{ cm}$ とした。また、水槽の前後左右および底面は不透過境界とし、上面には圧力一定条件を課した。ここでは、初期条件として $L = 2\Delta x$ なる初速度ゼロの剛体の底面を水深 30.0 cm の静水面と一致させ、 $H = 10\Delta z$ 、 $15\Delta z$ と変化させたときの剛体の最大振幅 z^{\max} を調べた。図-1 に z^{\max} の解析解 (Xiao ら, 1997) との比較を示す。同図より、計算結果は解析解の導出過程で無視している水面変動や粘性などの影響により解析解よりも若干小さいが、その傾向は非常によく一致していることが確認できる。したがって、本モデルでの物体の取り扱いに問題がないことが示された。

4. 浮体の波浪応答: ここでは、岸沖両端に減衰領域を設けた本モデルによる数値波動水槽を用いて浮体の 3 次元波浪応答を解析した。減衰領域を除く領域の格子数を $75 \times 40 \times 60$ 、格子幅は $\Delta x = \Delta y = 2.0 \text{ cm}$ 、 $\Delta z = 1.0 \text{ cm}$ とし、水槽の前後および底面には不透過境界条件、岸沖両端には Sommerfeld 放射条件、上面には圧力一定条件を課した。浮体は $20.0 \times 40.0 \times 8.0 \sim 12.0 \text{ cm}$ のサイズを有し、密度は $\rho_{ob} = 0.8(\rho_w - \rho_a) + \rho_a$ (喫水: 10.0 cm) で一定とした。また、係留なしの浮体を対象とし、波向きに対して直角および斜め (70 度) に設置した 2 ケースの計算を行った。静水深 30.0 cm 、周期 1.0 s 、波高 5.0 cm の周期波を作用させたときの浮体の動揺を図-2 に、その際の重心位置の移動を図-3 に例示する。同図より、入射波の作用により浮体が大きく動揺し、重心位置が岸側に移動する様子が確認できる。また、設置角度による x 軸方向の変位の差はあまり認められないが、斜め設置時には浮体が徐々に奥側に移動していることも確認できる。

5. 結論: 体積力型 IB 法を組み込んだ MARS に基づく 3 次元数値波動水槽を構築し、浮体の自由振動・波浪応答現象に適用することでその有用性を確認した。今後、水理実験などとの比較を行うことでさらに精度検証を行う計画である。なお、本研究は (財) 漁港漁場漁村技術研究所の研究助成により行われたことを記して、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献: [1] 李・水谷 (2007), 海工論文集, 54, pp. 821-825. [2] 川崎・袴田 (2007), 海工論文集, 54, pp. 31-35. [3] 東野・富田・有川・本多 (2007), 第 62 回年講, 2-290, pp. 579-580. [4] Lima E Silva et al. (2003), J. Comp. Phys., 189, pp. 351-370. [5] Nakamura et al. (2008), Coastal Eng. J., in press. [6] Xiao et al. (1997), Comp. Phys. Communications, 102, pp. 147-160. [7] Yuki et al. (2007), J. Fluid Science Tech., 2(1), pp. 1-11.

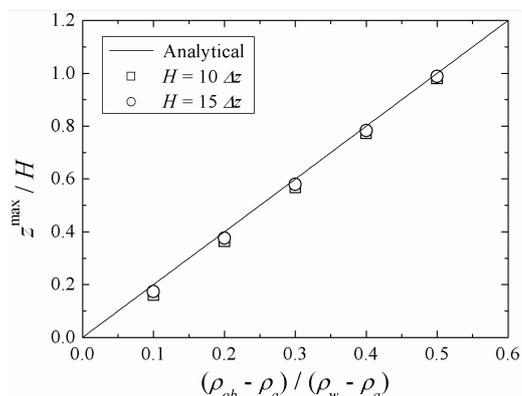
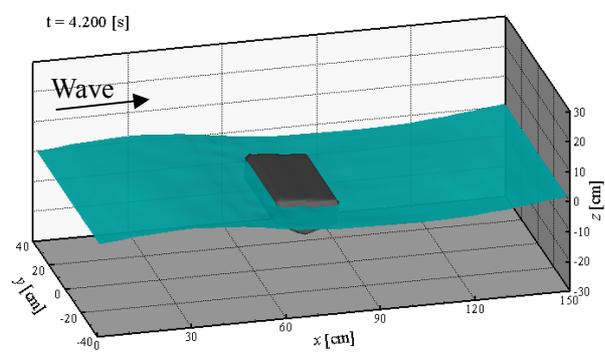
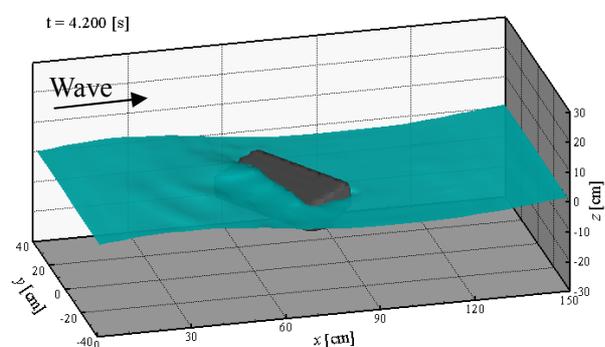


図-1 剛体の鉛直自由振動の比較



(a) 直角設置時



(b) 斜め設置時

図-2 浮体の波浪応答の一例

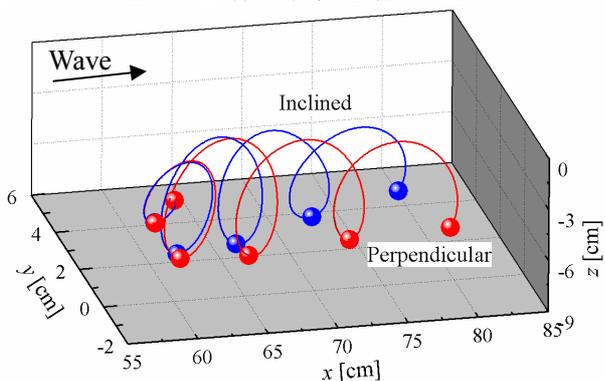


図-3 浮体の重心位置の移動
(プロット間隔: 1.0 s)