

3次元多相流動場を対象とした数値モデルDOLPHIN-3Dの構築

大阪大学大学院工学研究科 正会員 ○川崎 浩司

大阪大学大学院工学研究科 学生員 羽田野一成

大阪大学大学院工学研究科 正会員 中辻 啓二

1. はじめに

川崎ら(2001)は、2次元多相流動場を同時に取り扱える数値モデルを構築し、様々な水理現象に適用することによりその妥当性を検証した。しかし、3次元現象を解明・把握するためには、同数値モデルを3次元に拡張する必要がある。そこで、本研究では、3次元気液多相流動場に対する数値モデルDOLPHIN-3D(Dynamic numerical model Of muLti-Phase flow with Hydrodynamic INteractions - 3 Dimension version)をCIP法および拡張SMAC法に基づいて構築する。そして、水柱崩壊問題、水と構造物の衝突問題といった3次元水理現象に適用することにより、3次元多相流数値モデルDOLPHIN-3Dの妥当性・有用性を検証する。

2. 3次元多相流数値モデルDOLPHIN-3D

基礎方程式は、3次元圧縮性流体に対する質量保存式、Navier-Stokes方程式、圧力方程式、異相間の割合を示す密度関数の保存式、バロトロピー流体に対する状態方程式である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p = -\rho C_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3) \quad \frac{\partial \phi_I}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_I \mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho = f(p) \quad (5)$$

ここで、 ρ は流体密度、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトル(u, v, w)、 p は圧力、 C_s は局所音速、 $\mathbf{F}$ は粘性項、重力項、表面張力項といった外力項、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ である。また、 ϕ_I はI相($I = 1 \sim 3$; ϕ_1 : 固相, ϕ_2 : 液相, ϕ_3 : 気相)の密度関数を示し、 $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ ($0 \leq \phi_I \leq 1$)の関係を満たす。

式(1)~(4)を移流項と非移流項に分割して計算を行う。まず、移流項では、Yabe and Aoki(1991)が提案した高精度数値スキームCIP(Cubic Interpolated Propagation)法を用いて計算を行った。つぎに、非移流項の計算では、非圧縮性流体解析法SMAC(Simplified Marker And Cell)法を圧縮性流体まで取り扱えるように展開した手法(ここでは、拡張SMAC法と呼ぶ)を用いて次の時間ステップにおける物理量を算定した。なお、Brackbill et al.(1992)が開発したCSF(Continuum Surface Force)モデルにより、気液界面での表面張力の影響を評価した。また、固相領域は剛体かつその運動形態が移動と回転であると仮定することにより、固相領域に作用する圧力等を用いて物体重心の移動速度と角速度を求め、剛体運動を解析した。

3. 計算結果と考察

(a) 気液混相場への適用: 3次元多相流数値モデルDOLPHIN-3Dを計算領域の中央部に配置された水柱の崩壊現象に適用し、その妥当性を検討する。計算領域は300cm × 300cm × 300cmとし、 x, y, z 方向のメッシュサイズを $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10.0$ cmと一定にした。計算時間間隔 $\Delta t = 0.0001$ s、水の密度 $\rho_w = 1000.0$ kg/m³、空気密度 $\rho_a = 1.25$ kg/m³、表面張力係数 $\sigma = 7.2 \times 10^{-2}$ N/m、重力加速度 $g = 9.80665$ m/s²、初期大気圧 $P_a = 1013$ hPaとした。図-1は3次元水柱崩壊シミュレーション結果であり、 x 軸中心($x = 1.5$ m)における y - z 平面での流速ベクトルも同時に図示している。計算開始直後、水柱は自重の影響によりその形状を崩し、液相部は四方へと広

キーワード: 固気液多相流数値モデル, 拡張SMAC法, CIP法, 3次元

連絡先: 〒565-0871 吹田市山田丘2-1 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻

Tel 06-6879-7605 Fax 06-6879-7607

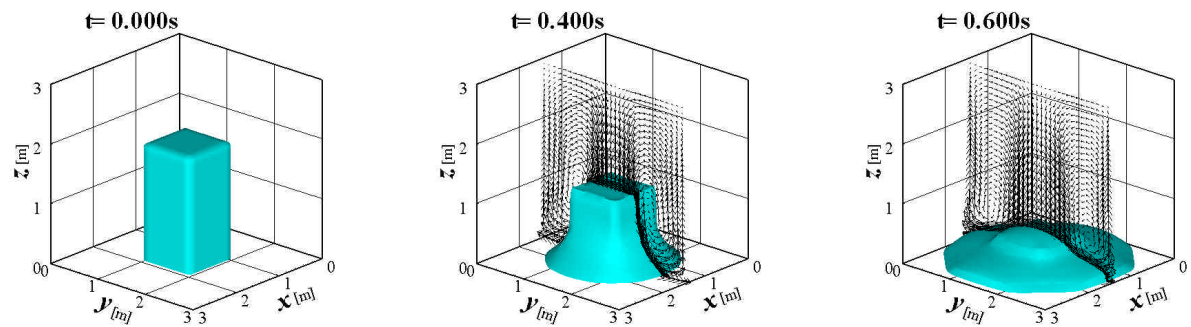


図-1 水柱崩壊数値シミュレーション結果

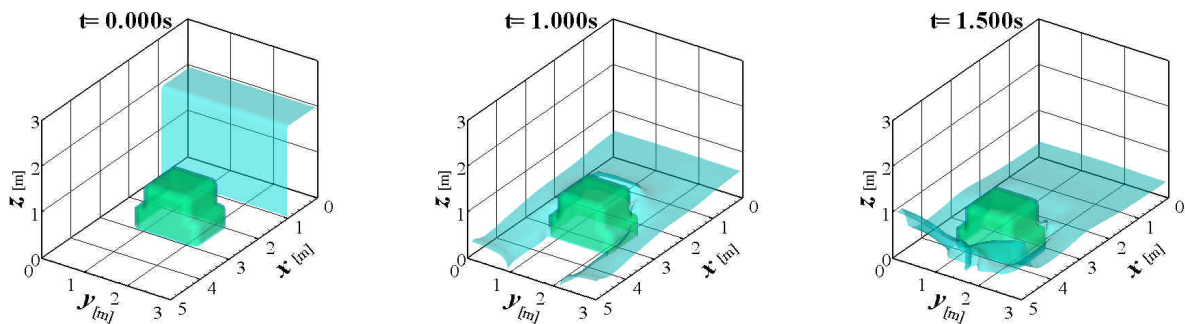


図-2 水と構造物の衝突シミュレーション結果

がっていく．一方，気相領域では水柱崩壊に伴う循環流が発生しており，液相領域の流体運動が気相領域に大きな影響を及ぼしていることが認められる．また，全計算時間を通して対称な計算結果が得られていることもわかる．以上のことから，構築した多相流数値モデルDOLPHIN-3Dは圧縮性流体（気相）と非圧縮性流体（液相）の混相流動場を安定かつ精度よく計算できるといえる．

(b) 固気液多相場への適用：固気液多相場の計算例として，水と物体の衝突問題を取り上げる．図-2の $t=0.00s$ に示すように，水柱前面部に凸型物体を配置した場合を想定した．なお，物体表面と自由水面を，それぞれ $\phi_1=0.5$ ， $\phi_2=0.5$ と定義した．同図より，水柱崩壊後，流出した水が物体に激しく衝突するが，物体はその形状を変えることなく前方に動き出す様子が認められる．また，物体の側方を通じて前面に回り込む流出水は物体の移動を弱めさせ，壁面への衝突を防いでいる．このように，DOLPHIN-3Dは固相を含む多相場の相互干渉を高精度に解析でき，波・流れと構造物の動的応答を解明する際の一手段として活用できよう．

4. おわりに

本研究では，3次元多相流動場に対する数値モデルDOLPHIN-3Dを，CIP法および拡張SMAC法に基づいて構築した．DOLPHIN-3Dの妥当性・有用性を検証するために，水柱崩壊問題，水と構造物の衝突問題の3次元水理現象に適用した．その結果，DOLPHIN-3Dは非圧縮性/圧縮性流動場を同時に取り扱えらるとともに，複雑な3次元水理現象を安定かつ精度よく解析できることが確認された．

[参考文献]

- 川崎浩司・大谷知樹・中辻啓二：固気液多相共存場に対する統一数値解法の構築と複雑水理現象への応用，海岸工学論文集，第48巻，pp.1026-1030，2001．
- Brackbill, J.U., D.B. Kothe, and C. Zemach: A continuum method for modeling surface tension, J. Computational Physics, Vol.100, pp.335-354, 1992.
- Yabe, T., and T. Aoki: A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation, Comput. Phys. Commun., Vol.66, pp.219-232, 1991.