

大阪大学大学院工学研究科 正会員 川崎 浩司
 大阪大学工学部 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、固気液多相場に対する2次元数値モデルを開発し、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) をCIP法および拡張SMAC法に基づいて構築するとともに、3次元水柱崩壊現象に適用することにより、DOLPHIN-3Dの妥当性・有用性を検証する。

2. 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、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。

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

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

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

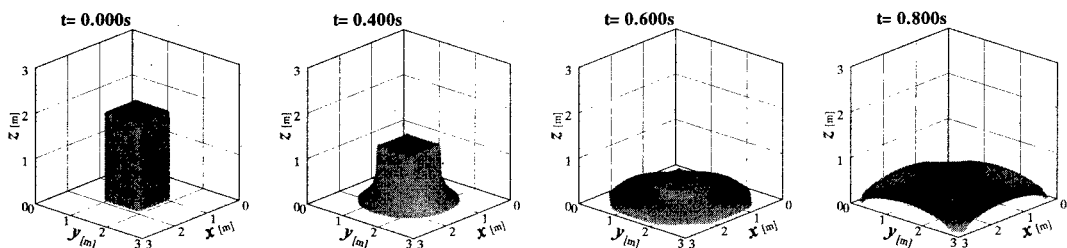
ここで、 ρ は流体密度、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトル(u, v, w)、 p は圧力、 C_s は局所音速、 $\mathbf{F}$ は粘性項、重力項、表面張力項といった外力項を示す。また、 ϕ_I はI相($I = 1 \sim 3$; ϕ_1 : 固相, ϕ_2 : 液相, ϕ_3 : 気相)の密度関数であり、 $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ ($0 \leq \phi_I \leq 1$) の関係を満たす。なお、ここでは固相を取り扱わないため、 $\phi_1 = 0$ とした。

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。

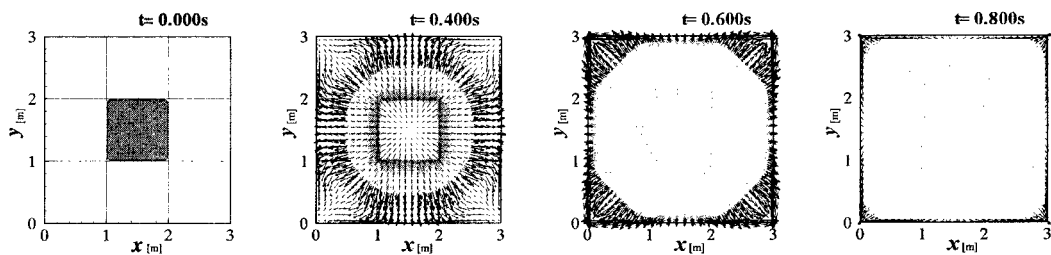
3. 計算結果と考察

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。また、時間ステップ間隔 Δt を0.0001s、水の密度 ρ_w を1000.0kg/m³、空気密度 ρ_a を1.25kg/m³、表面張力係数 σ を 7.2×10^{-2} N/m、重力加速度 g を9.80665m/s²、初期大気圧 $P_a = 1013$ hPaとした。

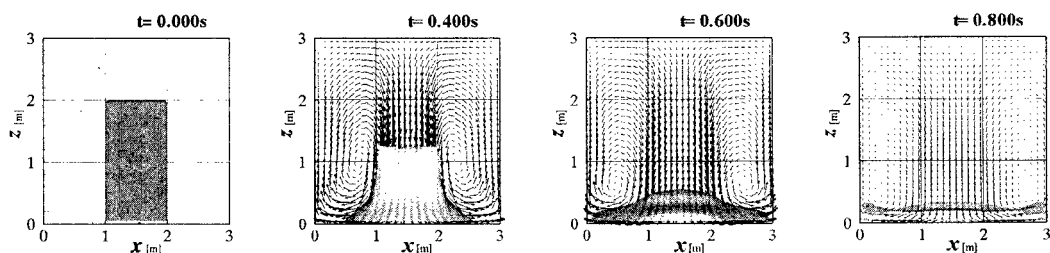
図-1は3次元水柱崩壊シミュレーション結果を示す。ここで、(a)は立体表示した気液界面の挙動、(b)、(c)はそれぞれ z 軸方向、 y 軸方向からみた気液界面の挙動と気液両相における流速ベクトルを同時に図示したものである。計算開始直後、水柱は自重の影響によりその形状を崩し、液相部は四方へと広がっていく。そして、図-1(c)からわかるように、気相領域では水柱崩壊に伴う循環流が発生し、液相領域の流体運動が気相領域に大きな影響を及ぼしていることが確認できる。また、気液界面付近での流動場は滑らかに変化しており、本数



(a) 立体表示



(b) x - y 平面表示



(c) x - z 平面表示

図-1 3次元水柱崩壊数値シミュレーション結果

値モデルは圧縮性流体（気相）と非圧縮性流体（液相）の混相流動場を精度よく解析しているといえる。さらに、図-1(b), (c)より、全計算時間を通して四方あるいは左右に対称な計算結果が得られていることがわかる。以上のことをまとめると、構築した数値モデルDOLPHIN-3Dは3次元多相空間に対して精度よく安定した計算を行うことができることがわかり、その妥当性・有用性が確認できる。

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。3次元水柱崩壊シミュレーションに適用することにより、DOLPHIN-3Dが気液界面の挙動および気液相の流動場を精度よく数値解析できることを確認した。

【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.