

LES 乱流モデルを導入した気液混相流数値モデルによる水柱崩壊シミュレーション

名古屋大学大学院工学研究科 正 会 員 川崎 浩司

名古屋大学工学部

学生会員 ○袴田 充哉

1. はじめに

近年、混相流体場に支配される複雑な水理現象を解明するための手段として、気相、液相を同時解析する数値モデルがいくつか提案されている。川崎ら(2001)は、2次元多相流動場に対する数値モデルを CIP (Cubic Interpolated Propagation) 法と拡張 SMAC (Simplified Marker And Cell) 法に基づいて構築し、様々な水理現象に適用することによりその有用性を検証している。本研究では、同モデルに乱流モデル LES (Large Eddy Simulation) を導入するとともに、気液界面と流速場の時空間変化を精緻に解析できるようモデルの更なる高精度化を目的としている。そして、水柱崩壊現象に適用し、本モデルの妥当性・有用性を検証する。

2. 数値計算手法の概要

基礎方程式は、下式に示す2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、密度関数の移流方程式、バロトロピー流体に対する状態方程式から構成される。

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

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

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

ここで、 ρ は流体密度、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトル、 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、SGS (Subgrid Scale) 応力を含む外力項である。 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。

本計算では、基礎方程式(1)~(3)を、Time Splitting 法を用いて移流段階と非移流段階に分割し、流体解析を行う。まず、移流段階では、移流方程式を高精度に解くことが可能な CIP 法を使用して計算を行った。非移流段階に対しては、非圧縮性流体のみならず圧縮性流体まで解析できるように展開した拡張 SMAC 法を用い、次の時間ステップにおける各物理量を算定した。なお、式(4)に関しては、川崎ら(2001)の数値モデルと異なり、非保存形式を採用し、新しく更新された流速から密度関数を計算した。その結果、 $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ の関係を完全に満たすようになった。さらに、気液界面における表面張力の影響を、Brackbill(1992)が開発した CSF (Continuum Surface Force) モデルにより評価し、Smagorinsky モデルに基づく SGS 応力項を運動方程式の外力項に付加することにより、LES 乱流モデルを導入した。

3. 計算結果と考察

移動境界を有する流動解析の検証問題としてよく用いられる水柱崩壊問題を取り上げ、本モデルの妥当性と有用性を検討する。計算条件は、計算領域を $5.0\text{m} \times 5.0\text{m}$ とし、 x, z 方向のメッシュサイズを $\Delta x = \Delta z = 0.05\text{m}$ と一定にした。また、図-1 に示すように、水柱の初期形状としてその幅 L を 1.0m 、時間ステップ間隔 Δt を 0.0001s 、水の密度 ρ_w を 998.8kg/m^3 、空気の密度 ρ_a を 1.20kg/m^3 、表面張力係数 σ を $7.2 \times 10^{-2}\text{N/m}$ 、重力加速度 g を 9.80665m/s^2 、初期大気圧 P_a を 1013hPa とした。図-1 に、数値計算および水理実験による液相フロントの到達距離の時間変化を示す。同図から、計算結果は実験結果を精度よく再現しており、本モデルの妥当性が検証される。図-2~図-4 に、水柱崩壊による流体密度 ρ 、圧力 p 、SGS 応力モデルに基づ

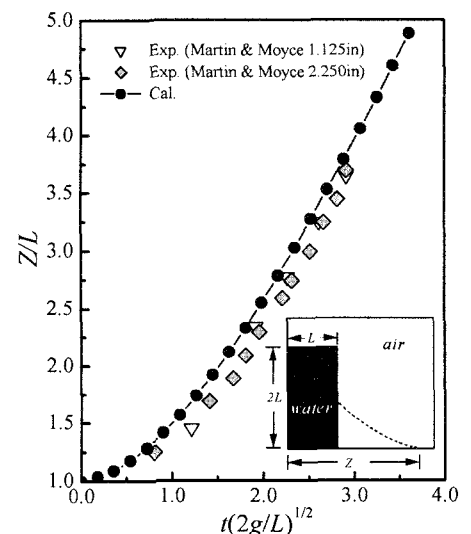


図-1

く渦動粘性係数 ν_e の時間変化をそれぞれ示す。図-2 から、水柱が崩壊した際($t=0.4s$)と、右壁に衝突した後、打ち上げられた液相が下部の液相に衝突する際($t=2.1s$)に、大規模な渦の形成が認められる。また、気液界面では数値的な拡散が発生しておらず、本モデルは流体の物性値が急激に変化する界面を高精度に捕獲・追跡可能であるといえる。図-2 と図-3 より、 $t=2.1s$ で液相に囲まれた内側の気相の圧力が大気圧より大きな値を示している。これは気体が急激に圧縮されたためであり、本モデルは圧力の時空間変化に対しても正確に解析できている。図-4 に示す乱流モデルの渦動粘性係数に関しては、特に液相同士が衝突する $t=2.1s$ で、その値が増大しており、水面への水塊の突入により波エネルギーが激しく逸散されていると考えられる。

4. おわりに

本研究では、CIP 法と拡張 SMAC 法に基づいた数値モデルに、LES 乱流モデルを組み込むとともに密度関数の取り扱い方を変更し、より精度の高い気液混相流数値モデルを構築した。そして、水柱崩壊問題に適用した結果、本モデルは気液界面の動的挙動を精度よく追跡できるとともに、気液相の流動場を精度高く数値解析できるモデルであることが実証された。

[参考文献]

Brackbill, J.U., D.B. Kothe, and C. Zemach(1992):A Continuum Method for Modeling Surface Tension, J. Computational Physics, Vol.100, pp.335-354.

川崎浩司・大谷知樹・中辻啓二(2001): 固気液多相共存場に対する統一数値解析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.

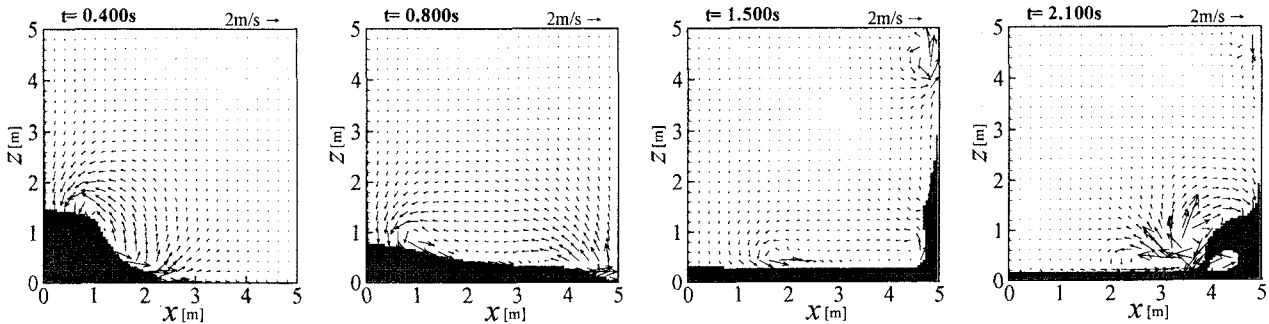


図-2 流体密度と流速ベクトルの時間変化

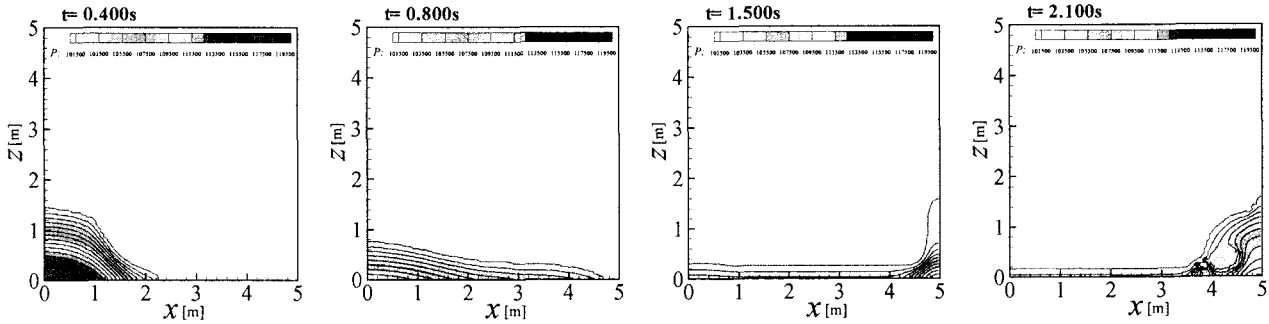


図-3 圧力分布の時間変化

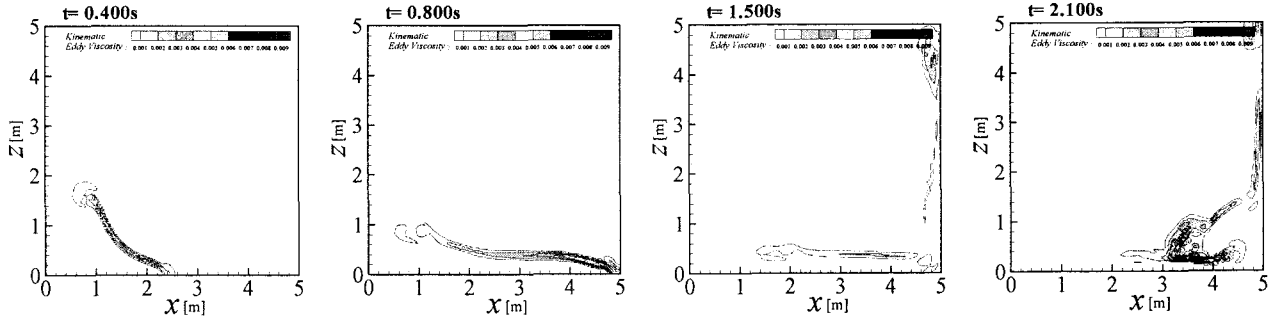


図-4 渦動粘性係数の時間変化