気・液共存場における３次元流れに関する解析

㈱フジヤマ　正会員　○福原禄夫
同上　非会員　青嶌安弘
同上　正会員　清水雅子
同上　非会員　遠藤弘人

１．はじめに

河川・海岸には堤防のような、裏法面が急勾配の構造物が多くある。波浪・津波或は洪水時、越流が発生した場合に、堤防の裏法面の肩部の付近では流れが法面を離れ、剥離領域が発生し、剥離領域内に空気が巻き込まれる場合がある。そのため、法肩付近では、水と空気が共存する場が形成される。

空気域の存在により裏法面に働く水圧が減少することで、裏法面の護岸ブロック等が不安定になり、堤防全体の安定性は低下する。重要な防災施設としての堤防の安定性を正しく評価するには、この気・液共存場での力学的なメカニズムを明らかにすることが重要である。

２．数値解析の概要

気・液共存場に関する実験的研究が多く実施され、数値解析も様々な手法で行われている。

しかし、気・液共存場は異相境界面が大変形しており、加えて境界面の気体と液体との物性が異なり、不連続であり、特異性が存在するため、解析解が難しいことのみではなく、数値解析も困難であると思われている。

数値解析方法の殆どが液相のみに対して非圧縮性方程式により解を求め、境界面には VOF スキームが用いられている。

本文では上述したような気・液共存場には気・液の両相を統一に表す方程式を用い、注目されている数値解析手法、即ち C-CUP を用いて気・液共存場における３次元流れの解析を試みた。

３．数値解析の支配方程式

ここで用いる気・液共存場を表す３次元支配方程式、即ち流れ方程式、及び密度方程式と圧力方程式等は以下の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{1}{3}\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)+\frac{1}{\rho}F_{sx}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{1}{3}\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)+\frac{1}{\rho}F_{sy}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+\frac{1}{3}\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)+\frac{1}{\rho}F_{sz}+G_z$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t}+\frac{\partial(\phi_i u)}{\partial x}+\frac{\partial(\phi_i v)}{\partial y}+\frac{\partial(\phi_i w)}{\partial z}=0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}+u\frac{\partial P}{\partial x}+v\frac{\partial P}{\partial y}+w\frac{\partial P}{\partial z}+\rho C_s^2\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)=0$$

$$P=\rho RT$$

ここで、Øiはｉ相の密度関数、Gは重力加速度、μは粘性係数、Fsは表面張力、Csは音速、ρは密度、Rは気体定数、Tは温度、u, v, wはそれぞれx, y, z方向の流速である。

４．数値解析のアルゴリズム

本解析で C-CUP を用いるため、時間分離解析法を用いることとなる。即ち、非線形の流れ方程式を移流項と非移流項に分けて計算を行う手法である。

キーワード：気・液共存場、３次元、C-CUP 法、CIP 法
連絡先：　〒435-0013 浜松市東区天龍川町 303-６　株式会社フジヤマ　TEL. 053-426-8826

圧力に関するポアソン方程式について、反復解法として、一般的に用いられている SOR 法を採用した。

計算に用いられている各物理量はスタガード格子に配置する。

５．数値解析のモデル

水柱崩壊に伴い水柱としての液相の運動、及びそれに連行される空気の運動を解析するため、水柱を単純な四角形のモデルとして設定した。

６．数値解析の結果

解析の結果を図-1～6 に示す。

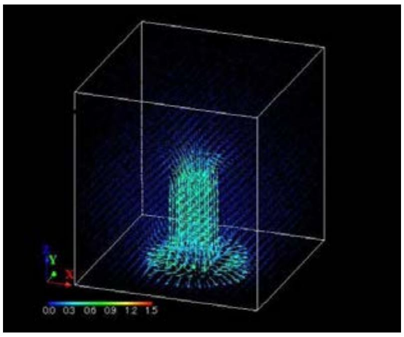
図-1～3 は崩壊した水柱と、それに連行されていく水柱の周辺の空気を同時に解析した結果の 3 次元速度ベクトル図ある。

図-4～6 は Y 軸方向（奥行方向）の中間断面における水柱と空気との流速ベクトル図である。

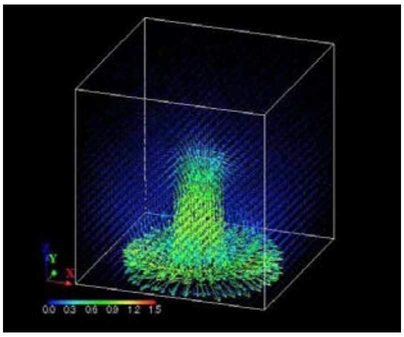
図-1～6 に示した計算結果によると、解析スキームの安定性を確認することができたことがうかがえる。

これらの解析結果により、水柱崩壊に伴い、水柱としての液相の運動、及び周辺における気相の運動を同時に解析できることが分った。

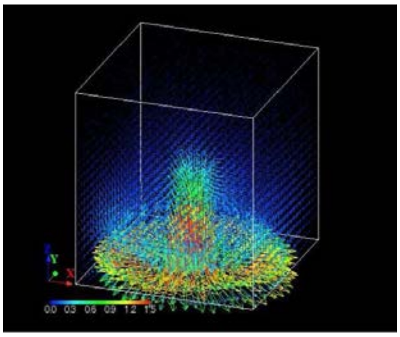
そこで、本解析は、C-CUP 解析法を用いれば、気・液共存場を統一的に計算できると考えられる。



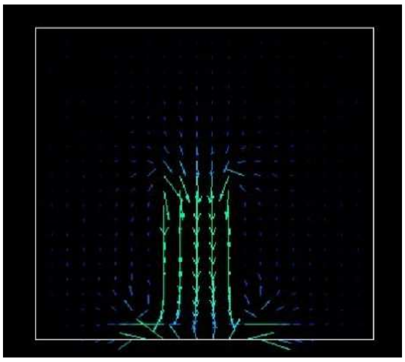
図－1　気液共存場流速ベクトル(t=0.05s)



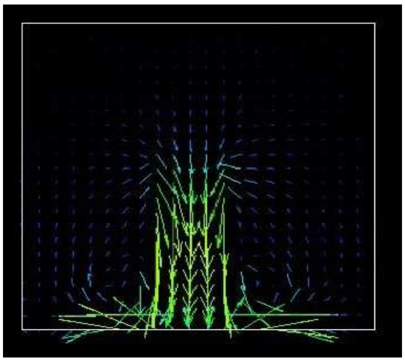
図－2　気液共存場流速ベクトル(t=0.1s)



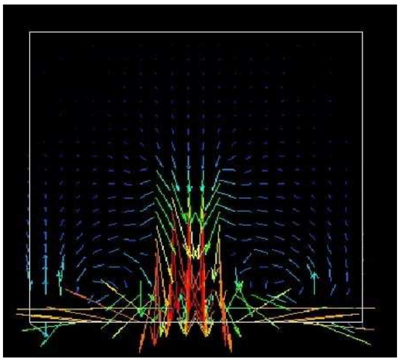
図－3　気液共存場流速ベクトル(t=0.15s)



図－4　気液共存場流速ベクトル(t=0.05s)



図－5　気液共存場流速ベクトル(t=0.1s)



図－6　気液共存場流速ベクトル(t=0.15s)

７．今後の課題

本解析モデルに関する流れ解析の精度に工夫をするとともに、3 次元流れに関する水理実験や、越流時の堤防の安定性に関する検討を加えていきたい。

参考文献

１）矢部孝・内海隆行・尾形陽一（2005）：CIP 法、森北出版株式会社、２）梶島岳夫（2007）：乱流の数値シミュレーション、養賢堂、３）越塚誠一（1997）：数値流体力学、培風館