密度関数法を用いた気液混相流計算における体積補正法の開発

山口大学大学院　学生会員　○坪郷浩一
山口大学工学部　正会員　朝位孝二

1.はじめに

密度関数の移流方程式に高次精度差分スキームを使用した場合を対象にし，界面のぼやけを回避し体積を補正する手法を文献 1)において提案した．本研究では，文献１）の体積補正アルゴリズムの精度の向上を目的とする．

2.体積補正と質量補正の計算 1)

2.1 体積補正

密度関数法では，液相体積の保存の問題が生じ，液体・気体部分の体積の増加・減少することが懸念される．本研究では，これを補正する方法として，体積補正のアルゴリズム 1)を導入した．体積補正のアルゴリズムは，式（1）に示す式を用いて体積補正量 L_{Err} を求め，式（2），（3）のような操作を行って補正を行う．

$$L_{Err} = \frac{V_{Err}(t)}{A(t)} \tag{1}$$

ここで，現在時刻 t の体積誤差 $V_{Err}(t)$，計算領域内の界面セルの総体積を $A(t)$とする．

$L_{Err}<0$ の場合

$$\Phi^{n+1} = \begin{cases} \Phi^{n+1} - L_{Err} \cdots \text{界面･液相セル} \\ \Phi^{n+1} + L_{Err} \cdots \text{気相セル} \end{cases} \tag{2}$$

$L_{Err}\geq 0$ の場合

$$\Phi^{n+1} = \begin{cases} \Phi^{n+1} - L_{Err} \cdots \text{界面･気相セル} \\ \Phi^{n+1} + L_{Err} \cdots \text{液相セル} \end{cases} \tag{3}$$

補正を行うと密度関数Φが 1 以上または 0 以下になる場合がある. この場合, 1 以上の値であれば 1 に, 0 以下の値であれば 0 にする.

2.2 質量補正

体積補正法が逆に計算領域内の全質量保存を破綻させてしまう可能性がある．そこで質量補正のアルゴリズム 1)を導入した. 質量補正のアルゴリズムは, 式（4）に示す式を用いて質量補正量 M_{Err} を求め, 式（5）のような操作を行って補正を行う.

$$M_{Err} = \frac{M_{Err}(t)}{A_M(t)} \tag{4}$$

ここで，現在時刻 t の質量誤差 $M_{Err}(t)$とする．

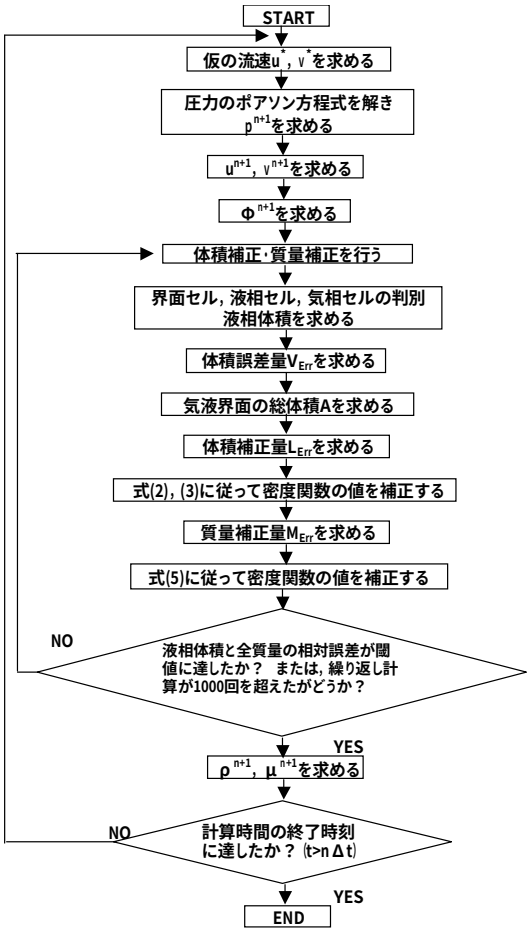


図-1　計算アルゴリズムのフローチャート

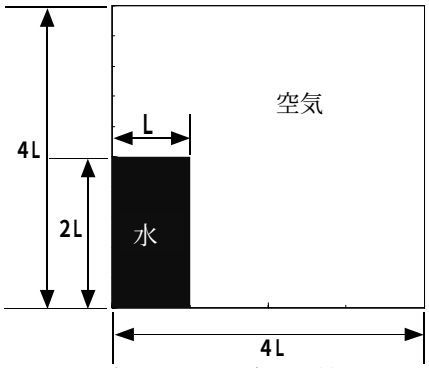


図-2　ダム破壊モデル計算の初期配置

$$\Phi^{n+1} = \Phi^{n+1} - M_{Err} \tag{5}$$

非圧縮性流体の数値解法は MAC 法系の Fractional Step 法を用いている．計算アルゴリズムのフローチ

ャートを**図-1** に示す．文献 1)では，体積補正・質量補正のアルゴリズムの繰り返し計算を 1 回しか行っていないため液相体積の保存の精度 0.26%以下，全質量の保存については， 0.02%程度の誤差を有している．そこで，本研究では，液相体積，全質量の相対誤差が 10^{-6}%に収束するまで計算を行った．ただし，繰り返し計算の回数が 1000 回を超えた場合は補正計算を終了する．

3.数値解析と解析結果

初期条件として，**図-2** のように水柱左端から水柱右端までの長さを L=0.15m，右壁面を水柱左端から 4L，水柱高さを底面から 2L の位置に設定し，0.6×0.6m の水槽内における水柱破壊現象を崩壊開始から 3 秒後までをシミュレートした．各物性値を**表-1** に示す．計算条件としては格子間隔が $\Delta x=\Delta y=0.015$m，時間刻みは $\Delta t=0.0001$sec で一定値とした．境界はすべて滑りありの固体壁とした．空気と水を想定したため，気液二相流の密度比は 800，粘性比は約 67 となる．本研究では，使用した移流項計算スキームは運動方程式および密度関数移流方程式ともに 3 次精度 TVD-MUSCL 法（以後 TVD 法）または 3 次精度保存形式 6-point 法(以後 3C6P 法)である． ２つのスキームとも液相体積の相対誤差は 10^{-6}%以内に収まり，全質量の相対誤差も 10^{-14}%以内である．

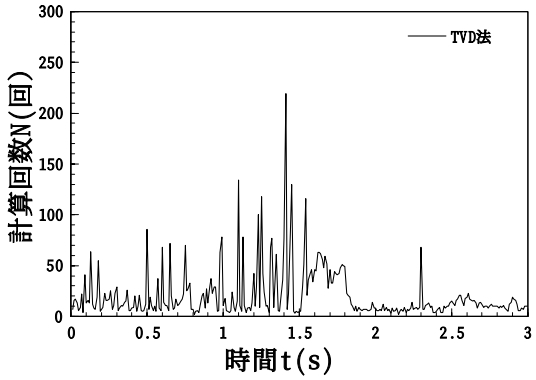
この２つのスキームの液相体積，全質量の相対誤差が閾値に収束するまでの計算回数を**図-3(a)，(b)** に示す．TVD 法の方が初期体積との相対誤差が**図-3(b)**と比べて少ない．しかし，**図-4** のように先端速度が遅く，水柱破壊現象のダイナミックさに欠ける．一方，3C6P 法の場合は，先端位置も実験値とほぼ一致しており実現象に近い挙動を再現している．

4.おわりに

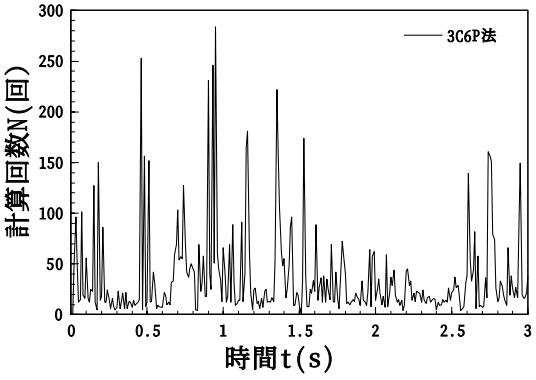
文献１）の体積・質量補正のアルゴリズムを改良した結果，液相体積と全質量の相対誤差が大幅に改善された．今後は，本モデルを流出・流入境界条件への適用を行い，その妥当性を検討する．

表-1　モデル計算で使用した物性値

物性	値
水の密度	1000kg/m^3
空気の密度	1.25 kg/m^3
水の粘性係数	1.0×10^{-3}(Pa･s)
空気の粘性係数	1.5×10^{-5}(Pa･s)
重力加速度	9.80(m/s^2)



(a)　3 次精度 TVD-MUSCL 法



(b)　3 次精度保存形式 6point 法

図-3　各スキームの計算回数

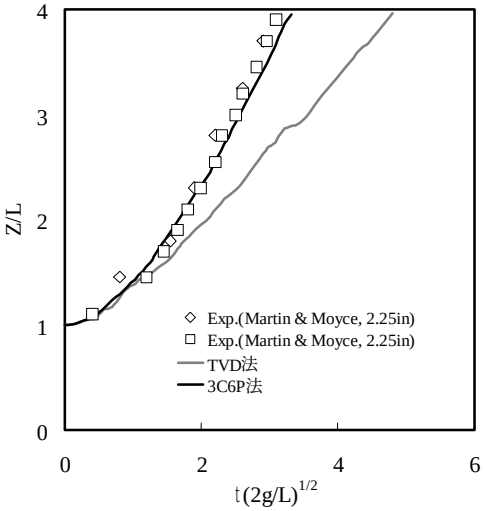


図-4　水柱先端位置の時間変化

参考文献

1) 坪郷浩一，朝位孝二：密度関数法による自由水表面流れ解析のための体積補正法の開発，水工学論文集，第 49 巻，2005.（印刷中）