

II-166

表面張力を考慮した自由液面解析コードの開発

(財)電力中央研究所 正員 米山 望
(財)電力中央研究所 守屋祥一

1. はじめに

現在、実証炉の設計作業中の高速増殖炉(FBR)では、冷却剤に液体ナトリウムを用いることになっている。現在、その設計のために様々な実験が行われているが、液体ナトリウムの取り扱いが難しいため、試験流体には水を用いることが多い。そのため、実験から実機の現象を予測するためには、流体の物性値が流れにどのような影響を与えるかを把握しておく必要がある。特に、実証炉に予定されている「トップエントリー方式」では、原子炉等の容器内に自由液面が存在するため、液面現象に影響を与える表面張力の効果を正しく評価する必要がある。

著者らは、液面現象を精度良い再現をめざしたVOF法をベースにした自由液面解析コード(FRESH-2D)を開発し、ダムブレイク現象等に適用しその妥当性を確認しており[1]、本研究は、そのFRESH-2Dに表面張力モデルを導入し、その検証のため、表面張力の影響が大きく現れる「毛管現象」の解析を試み、理論解と比較することにより、導入した表面張力モデルの妥当性を確認するものである。

2. 毛管現象の理論解

液面に挿入した細管内を流体が上昇する「毛管現象」は、表面張力の効果が大きく現れる現象である。毛管内の液面形は理論的に求めることが出来る。すなわち、流体内の液位を z とすると、

$$z = a\sqrt{A - \cos \xi} \quad (1)$$

となる。ここに、 a ；毛管定数($=\sqrt{2\sigma/\rho g}$)、 σ ；表面張力係数、 ρ ；密度、 g ；重力加速度であり、 A は次式を解いて得られる式である。

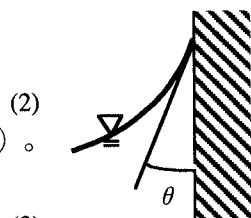
$$d = \int_0^{\pi/2 - \theta} \frac{\cos \xi}{\sqrt{A - \cos \xi}} dx \quad (2)$$

ここに、 d ；毛管直径、 θ ；流体と壁面との接触角である(図1参照)。

また、最大液面差 ΔH は、

$$\Delta H = a(\sqrt{A - \sin \theta} - \sqrt{A - 1})$$

と表せる。



(3) 図1 接触角

3. 計算法

FRESH-2Dは、液面での応力境界条件を次式で定義し、液面近傍での流体圧力 p_{surf} を求め、液面での圧力境界条件としている。

$$\left[-(p_{\text{surf}} - p_{\text{atm}} - T_{\text{surf}}) \delta_{ij} + v \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \cdot n_j = 0 \quad (i=1,2) \quad (4)$$

ここに、 n_j ；表面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ の成分、 u_i ；流速ベクトル $\mathbf{u}$ の成分、 p_{atm} ；大気圧、 T_{surf} ；表面張力、 v ；動粘性係数である。(ただし、本研究では、 p_{atm} を常に0にしている。)

T_{surf} は表面張力係数 σ 及び曲率半径 R を用いて、

$$T_{\text{surf}} = -\sigma/R \quad (5)$$

と表せる。従って、表面張力を導入するには、液面の曲率半径を精度よく求める必要がある。

表面の位置を表面セルの向きとF値から各セルごとに一点ずつ求め、それらを補間して曲率を求めた。本研究では、補間法として、2次関数、および3次スプライン関数を用いて計算を行った。3次スプライン関数を用いた補間は、2階微分までの連続性が保証されるため、なめらかな液面形状を得ることが出来る。また、2次関数を用いた補間は、連続性や再現性は低い計算アルゴリズムが単純であり、簡便に液面形を表現できる。

補間を行う際の液面の壁境界条件は以下のようにした。2次曲線補間の場合、壁での表面位置 z_w を求める必要があるため、壁にもっとも近い表面位置から壁への勾配が接触角と同じになるように z_w を定めた。また、3次スプライン関数を用いた場合に必要になる両端の勾配は、 $\pm \tan\theta$ とした。

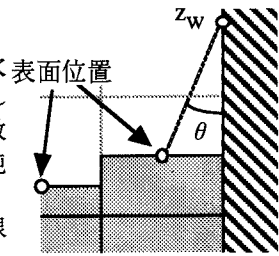


図2 液面境界条件

4. 検証解析と考察

毛管現象の検証計算を行った座標系を図3に示す。座標系は直交鉛直2次元、移流項は保存形式、流速の壁境界条件をnon-slipとした。また、液面と壁面との接触角 θ を毛管内壁で 30° 、その他で 90° とした。計算は毛管内の液位が等しいときから始め、液面の変動が止まるまで行った。流体は水を想定しており、表面張力係数 $\sigma = 72.5 [\text{mN/m}]$ とした。

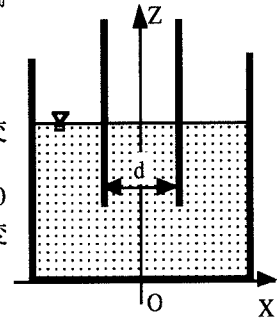


図3 座標と初期条件

図4は、十分時間が経過した後の液面形を等圧力線図とあわせて示したものである。毛管内の表面近傍での圧力が負になっているのは、表面張力と釣り合っているためである。また、図5は毛管内の液面形状の理論解と解析解の比較をしたものである。両者はほぼ一致し、二次関数補間および3次スプライン補間の比較でも、大きな違いがみられず、このように静かな液面では、2次関数近似も十分使えることが分かった。

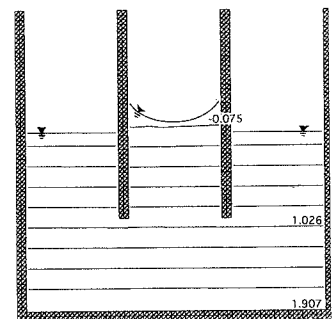


図4 液面形と等圧力線
($P / \rho g d$)

5. まとめ

VOF法を用いた自由液面解析コード(FRESH-2D)に表面張力モデルを導入し、表面張力の効果が大きく現れる「毛管現象」の解析を試みた。解析結果を毛管現象の理論解と比較したところほぼ一致し、導入したモデルの妥当性が確認された。今後は、越流などで発生するより複雑な液面形での解析を試みるとともに、モデルの3次元化、並列化を行う予定である。

参考文献

- [1]B.D.Nichols,他2名;Volume of Fluid(VOF) method for the Dynamics of Free Boundary,LA-8355,1980.
- [2]米山、守屋; VOF法を用いた自由液面の数値解析法,水工学論文集,第39巻,pp373-378,1995.
- [3]ランダウ、リフシッツ; 流体力学,pp258-260,1970.

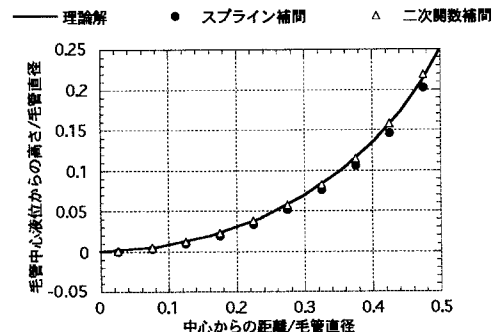


図5 液面形の理論解との比較