

気液二相流解析におけるレベルセット法とVOF法の特徴および計算コスト比較

静岡大学 大学院総合科学技術研究科 工学専攻 数理システム工学コース	学生会員	○中澤 克成
静岡大学 学術院工学領域 数理システム工学系列	正会員	横嶋 哲
静岡大学 大学院総合科学技術研究科 工学専攻 数理システム工学コース	非会員	石川 秀平
関西電力株式会社 技術研究所 土木技術研究室	正会員	久末 信幸

1. はじめに

自由表面の大変形や気泡・液滴の分裂・合体を伴うような複雑な界面現象は自然界にも工業装置内にも遍在し、それらを効率かつ精度良く予測可能な手法がさまざまな分野で強く求められる。レベルセット法およびVOF (Volume of Fluid) 法は、そのような問題に対して最もよく利用されてきた手法である。両手法には異なる長所・短所が存在するが、両手法を同一ベンチマーク問題に適用して、特徴を論じた例はほとんど存在しない。著者らは前報¹⁾で、レベルセット法系統のACLS (Accurate Conservative Level Set) 法²⁾とVOF法系統のCICSAM (Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes) 法³⁾の特徴を比較した。ただし前報では、Zalesak ディスク問題など単純な移流問題が中心であり、混相流解析手法としての特徴比較は、水中静止気泡問題を対象とした、界面がほとんど動かない特殊な条件下での検討にとどまっていた。そこで上記2手法に、VOF法系統の手法として評価が高いTHINC/WLIC (Tangent of Hyperbola for Interface Capturing/Weighed Line Interface Calculation) 法⁴⁾を加えた3手法を対象として、特徴が異なる複数の気液二相流問題において両手法の比較を実施した。本報では紙面の制約上、2次元気泡の上昇問題のみ取り上げる。

2. 各手法の概要

ACLS法²⁾は、レベルセット法で従来利用されてきた符号付き距離関数 ϕ の代わりに、関数

$$\psi(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2} \left(\tanh \left(\frac{\phi(\mathbf{x}, t)}{2\epsilon} \right) + 1 \right) \quad (1)$$

を導入することで、レベルセット法の利点を保ちつつ、質量保存性を改善した手法である。 ϵ は界面厚さの制御パラメータで、 $\epsilon = O(\Delta x)$ (本研究では $\epsilon = 0.5\Delta x$) とすることで、関数 ψ の値が $[0, 1]$ 間を滑らかに遷移する。CICSAM法³⁾は、代数的VOFと呼ばれる、界面再構築を要しないVOF法の一つで、幾何的VOFと比較すると計算精度は劣るものの、プログラム実装や非構造格子への拡張も比較的容易である。CICSAM法では、風下型のHyper-Cスキームと風上型のUQスキームを界面の向きに応じて適切にブレンドすることで、数値拡散と数値不安定を抑制する。THINC/WLIC法⁴⁾は幾何的VOFの一つで、WLICにより界面再構築を行う。WLICはSLICを拡張した手法であり、PLICのような高精度な幾何的VOFと比較すると計算精度は落ちるが、プログラム実装や3次元化が比較的容易である。また、THINC/WLIC法ではTHINCスキームを使用することにより、容易かつ解析的にセル界面を通過する体積流束が計算可能になる。

3. 両手法の比較と考察

2次元空間において、直径 $D = 0.5$ mの単一気泡が浮上する系を考える。課題設定の詳細は文献⁶⁾のtest case 2を参照されたいが、気液間の密度比・粘性比は通常の水と空気の場合にほぼ対応するのに対して、表面張力係数には約30倍の値が用いられ、表面張力の影響が強調される条件であることに留意されたい。ここでは文献⁶⁾と同じく、計算格子サイズ Δx を $D/20$ (coarse2と呼称)、 $D/40$ (coarse)、 $D/80$ (normal)、 $D/160$ (fine) と4通りに変化させて、時刻 $t = 3$ sまでの気泡挙動を追跡した。本研究では表面張力をCSF (Continuum Surface Force) モデルで表現する。ただし、前報¹⁾で、VOF法における表面張力の算出にVOF関数 C を用いた場合、表面張力の算出精度に課題が残った。そのため、本研究では、VOF法における表面張力の算出にS-CLSVOF

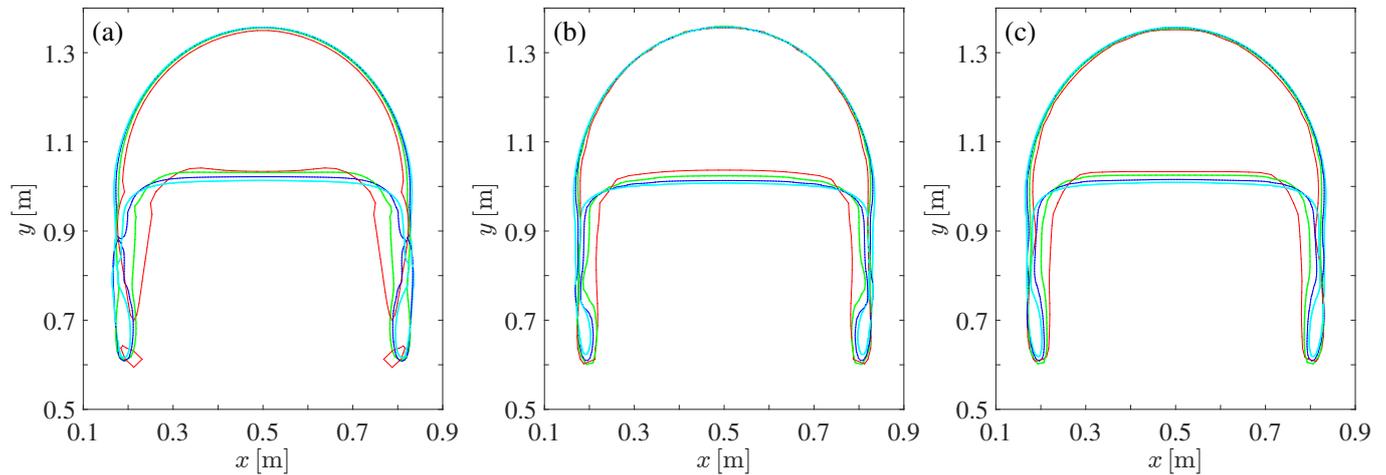


図-1 $t = 3$ sにおける2次元気泡の形状: (a) ACLS, (b) CICSAM, (c) THINC/WLIC. 赤 - coarse2; 緑 - coarse; 青 - normal; シアン - fine.

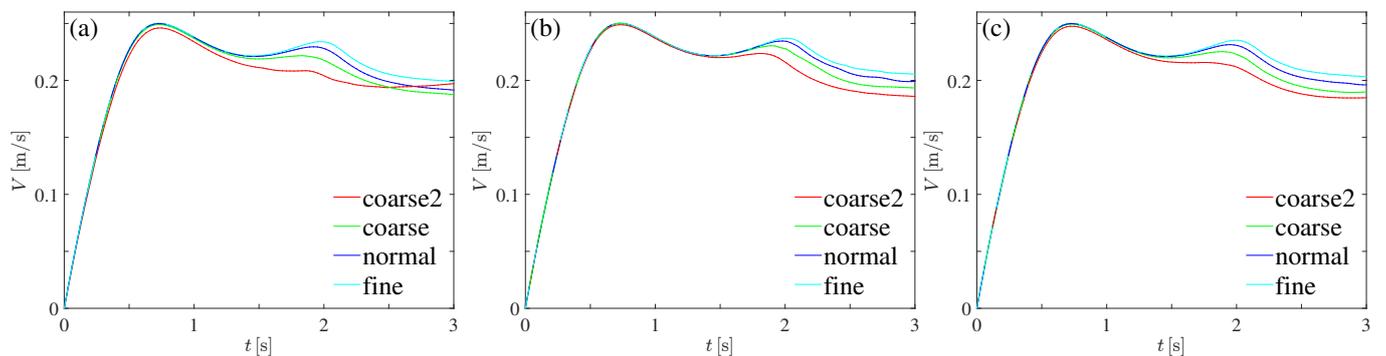


図-2 2次元気泡の上昇速度の経時変化: (a) ACLS, (b) CICSAM, (c) THINC/WLIC.

法⁵⁾を使用した. S-CLSVOF法とは, VOF関数 C の分布から符号付き距離関数 ϕ を構築し, 得られた ϕ を用いて表面張力を算出する手法である.

$t = 3$ sのときの気泡形状を図-1に, 気泡上昇速度の経時変化を図-2に示す. 気泡形状は, 特に $\Delta x = D/160$ (fine)の場合には手法間による差異がほとんど見られず, また, 信頼性が高いと考えられるALE法に基づくシミュレーション結果⁶⁾と形状の特徴がよく一致した. 空間解像度が低下するにつれて, ACLS法とVOF法系統の2手法の結果に相違が生じ, ACLS法の数値解には残りの2手法と比べてやや強い空間解像度依存性が認められた. 気泡上昇速度の経時変化においても図-1と同様の傾向が見受けられ, 特に $\Delta x = D/20$ (coarse2)の条件下でのACLS法の結果は, 他の2手法と比べて定性的にも少し異なる点は注意を要する. 以上の結果から, VOF法系統のCICSAM法およびTHINC/WLIC法のいずれでも, S-CLSVOF法を導入することで, ACLS法と比べて遜色ない結果が得られることを確認した. すなわち, これは, 界面法線ベクトルや界面曲率の正確な算出において, 符号付き距離関数 ϕ を用いることの有用性が改めて実証されたとも言える.

計算コストの比較では, 単純な移流問題(Zalesak's disk問題)を対象とした場合, ACLS法はVOF法系統の2手法と比較して3倍程度のコストを要した. 他方, 流体ソルバーと連成した上記の2次元気泡の上昇問題では, いずれの空間解像度でもACLS法がVOF法系統の手法と比べて計算負荷が高いものの, 流体ソルバーが計算コストの大半を占めるため, その差は最大でも15%程度にとどまり, 大きな差異は生じなかった.

参考文献: 1) 石川, 横嶋, 久末, 早瀬川, 土木学会論文集 A2 (応用力学), **76**(2), I_439, 2020. 2) Chiodi & Desjardins, *J. Comput. Phys.*, **343**, 186, 2017. 3) Ubbink & Issa, *J. Comput. Phys.*, **153**, 26, 1999. 4) Yokoi, *J. Comput. Phys.*, **226**, 1985, 2007. 5) Albadawi, Donoghue, Robinson, Murray & Delauré, *Int. J. Multiph. Flow*, **53**, 11, 2013. 6) Hysing, Turek, Kuzmin, Parolini, Burman, Ganesan & Tobiska, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, **60**, 1259, 2009.