

バックステップ流れにおける気泡分裂挙動の数値的検討

日大生産工(院) ○木元 貴之 日大生産工 沖田 浩平

1. 緒言

近年、環境、農業、医療など様々な分野で微細気泡の応用が進められており、微小気泡生成に関する知見が求められている¹⁾。

先行研究では、気液二相流においてその輸送現象を明らかにするため、実験的および数値的な解析が行われてきた。しかし、気体と液体が混在する複雑な流れ場では、個々の気泡の詳細な挙動について十分明らかにされていない²⁾。

本研究では、乱流中の気泡分裂時の挙動を明らかにすることを目的に、バックステップ流れにおける気泡分裂挙動を数値シミュレーションにより評価する。そして、気泡界面の変形と分裂過程から、剪断応力の増加に伴う分裂臨界条件について検討を行う。

2. ソルバーおよび解析手法

解析に用いたソルバーについては compressibleInterIsoFoam という非混和性、圧縮性を考慮したソルバーを用いた。compressibleInterIsoFoam では、気相と液相の判別に VOF 法が用いられ、セル内に占める流体の割合を体積率 α で表し、流体1で占有されるセルを $\alpha = 1$ 、流体2で占有されるセルを $\alpha = 0$ として、界面が存在するセルが $0 < \alpha < 1$ と表現される。ここで、液相体積率 α_L を用いて混合密度を $\rho = \alpha_L \rho_L + (1 - \alpha_L) \rho_G$ と表すと、均質流を仮定した気液二相流に体する支配方程式は以下のように記述される^{3,4)}。

質量保存式は、速度 \mathbf{u} を用いると、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1)$$

となる。次に、ナビエーストックス方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) &= -\nabla p \\ &+ \nabla \cdot [\mu \{\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T\}] \\ &- \nabla \left(\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

と表される。ただし、 $\mu = \alpha_L \mu_L + (1 - \alpha_L) \mu_G$ である。ここで、単位質量当たりの全エネルギー E は、内部エネルギー e と運動エネルギー K の和として、

$$E = e + K \quad (2.3)$$

と表され、運動エネルギー K は、

$$K = \frac{1}{2} \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \quad (2.4)$$

である。これより、エネルギー方程式は、熱伝導率 k 、絶対温度 T として、応力と重力の影響を無視すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{u}) &= -\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) \\ &+ \nabla \cdot (k \nabla T) \end{aligned} \quad (2.5)$$

流体の状態方程式は、分子量 W 、気体定数 R を用いて、

$$\rho = \frac{pW}{RT} \quad (2.6)$$

と表される。

ここで、液相と気相に対する質量保存式に、各相の圧縮性の状態方程式から圧縮率 Ψ を用いて、それぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_L \mathbf{u}_L) = -\frac{\alpha_L}{\rho_L} \Psi_L \frac{DP}{Dt} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \alpha_G}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_G \mathbf{u}_G) = -\frac{\alpha_G}{\rho_G} \Psi_G \frac{DP}{Dt} \quad (2.8)$$

これら二つの式の和より、

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = -\frac{\alpha_L}{\rho_L} \Psi_L \frac{DP}{Dt} - \frac{\alpha_G}{\rho_G} \Psi_G \frac{DP}{Dt} \quad (2.9)$$

が得られ、compressibleInterIsoFoam では、この式(2.9)とナビエーストックス方程式から得られる圧力方程式が解かれる。

一方、液相体積率の輸送方程式である式(2.7)は、isoAdvector⁵⁾により高精度に時間発展される。

3. 解析モデルおよび解析条件

解析に用いたモデルを Fig.1 に示す。本解析モデルは、研究室で所有しているものと同等のものを CAD で作成した。本研究では三次元解析を行ったため、 z 軸方向に 20mm の厚さを有している。解析時の境界条件として、下部の流入入口を inlet1、上面の流出口を outlet、空気注入口を inlet2、その他の面を wall として面を設定した。解析条件は、下部流入入口から水を流入

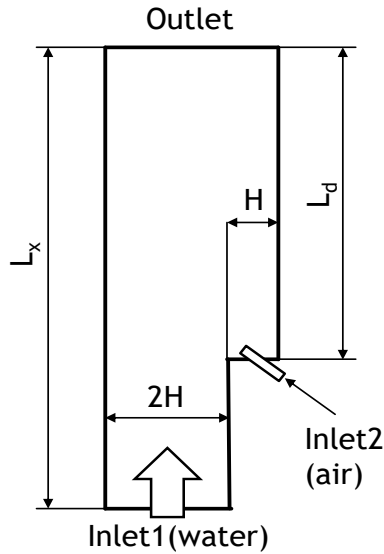


Fig.1 解析モデル

させ、上部より流出させるものである。また、 $L_x=380\text{mm}$ 、 $L_d=214\text{mm}$ 、ステップ高さは $H=10\text{mm}$ である。内径 0.12mm 、外径 0.16mm のニードルから空気を注入し、気液二相流状態を形成した。壁面条件は流体速度がゼロになる滑りなし条件を適用した。物性値は、ニュートン流体を仮定し、水の温度を 288K 、密度 $1.51 \times 10^{-5}\text{kg/m}^3$ 、動粘度 $1.14 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ とした。空気に関しては、温度 288K 、密度 1.225kg/m^3 とした。流速条件は、水の流入速度を y 軸方向に 1.0m/s 、空気の流入速度を y 軸方向に 0.5m/s とした。最初の解析では、レイノルズ数を約 8800 とした。

4. 結果および考察

現段階では解析に必要な格子生成までを行った。解析を実施するにあたり、まず基礎となるメッシュであるblockMeshを作成した。このメッシュは格子サイズを 1mm として生成した。しかし、このメッシュだけでは解析対象の物体形状に適合するメッシュを生成することができない。そこで、STLファイル等の形状データを基にほぼ六面体セルによるメッシュを半自動的に生成し、構造格子状のメッシュを物体形状に適合させるsnappyHexMeshを用いてメッシュの作成を行った。Fig.2にsnappyHexMeshにより気泡を注入するニードル周辺の形状に適合させたメッシュを示す。snappyHexMeshを用いることで、物体の境界形状に適合したメッシュを生成できるが、メッシュの作成が未だ不十分で格子が粗いなどの理由のため解析が破綻していると考えられる。

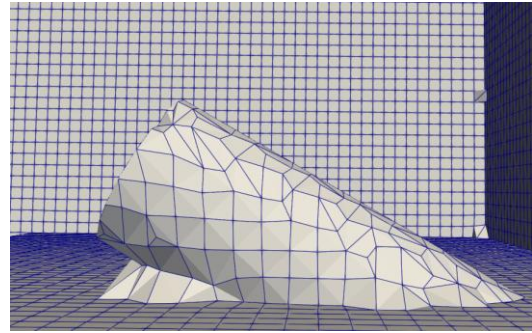


Fig.2 ニードル周りのメッシュ

5. 結言

現時点では、解析を実施する前段階としてメッシュの作成までを行っている段階である。講演では、OpenFOAMにおける二流体の圧縮性を考慮したcompressibleInterIsoFoamを用い、バックステップ流れにおける気泡分裂挙動の数値的検討について発表する。さらに、解析時に作成する格子解像度による影響や、レイノルズ数の変化による影響についても検討を行い発表する。

参考文献

- 1) 産業構造審議会産業技術環境分科会，研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループファインバブル基盤技術研究開発事業事前評価報告書，平成25年8月。
- 2) 松浦章裕，榊原久雄，平岡節郎，多田豊，加藤禎人，気液2相流の速度変動シミュレーション，日本機械学会東海支部第53期総会講演会講演論文集，2004。
- 3) 春日悠，今野雅，一般社団法人オープンCAE学会編，OpenFOAMによる熱移動と流れの数値解析第2版，森北出版株式会社，p.44，pp.134-136。
- 4) 人見大輔，株式会社テラバイト，OpenFOAMライブラリリファレンス，森北出版株式会社，pp.643-644。
- 5) J Roenby, H Bredmose and H Jasak, A computational method for sharp interface advection, Roya Society Open Science, <https://doi.org/10.1098/rsos.160405>, 2016.