

壁面上泡沫流における排水効果の再現

田原 宏都 藤代 一成
慶應義塾大学 理工学部情報工学科

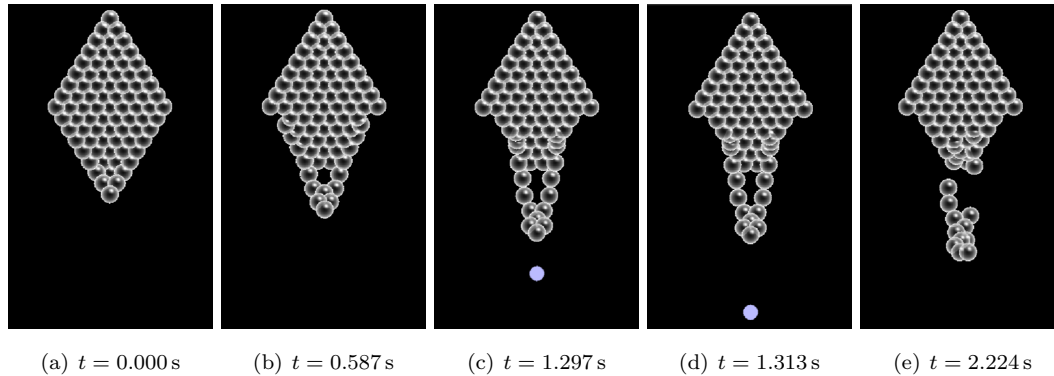


図 1: 提案手法によるシミュレーションの実行例. 発生した液体粒子の位置を水色の球で示した. 時刻 $t = 1.297\text{s}$ から $t = 1.313\text{s}$ にかけて, ピンチオフの発生と泡沫から分離した液体粒子の流下が確認できる. また, 時刻 $t = 2.224\text{s}$ で泡沫が二つの塊に分離する様子が見られる

1 背景と目的

泡沫は, 多数の気泡が密集して塊を形成した状態であり, 洗剤や食品, 泡消火など日常生活のあらゆる場面で観察される. 泡沫のビジュアルシミュレーションに関しては, Busaryev らの手法 [1] や Cleary らの手法 [2] など種々提案されてきた. これらの先行研究は, 気泡を構成する液体量の違いが泡沫の挙動に及ぼす影響を考慮している一方で, 泡沫に含まれる液体の分布を大きく変化させる排水効果や, その影響で泡沫下端に溜まった液体が千切れるピンチオフ (pinch-off) などの泡沫特有の現象を考慮していない.

そこで本研究では, 排水の影響を考慮することで, ピンチオフを含む壁面上泡沫流の挙動を再現するビジュアルシミュレーション手法を提案する. 泡沫を構成する液体が特定の境界 (Plateau 境界) を通じて流れる様子を, 気泡間の液体の授受としてモデル化することで, 壁面上を流れる泡沫の複雑な挙動を簡単にシミュレーションすることを試みる. 実際にシミュレーションを実行し生成された画像列を図 1 に示す.

2 泡沫の物理的特性

泡沫内の気泡間には液膜が存在し, その液膜は Plateau 境界とよばれる液体の流路に接続している. Plateau 境界内の液体は重力の影響を受けて泡沫内を流れており, この現象は排水とよばれる. 排水の効果によって, ある体積の泡沫中に含まれる液体の体積分率 (液体分率) の分布が変化する. 時間が経過するほど泡沫上部の液体分率は減少し, 泡沫下部の液体分率は増加する.

泡沫の挙動はその液体分率に大きく影響を受ける. 泡沫は, 液体分率が高いときには流体的な性質を示し, 液体分率が低くなるにつれて弾性的な性質に変化する.

排水効果によって泡沫下端に溜まった液体は, 毛管力の影響で泡沫下端にとどまる. 溜まった液体の質量が増加して重力の影響が毛管力の影響を上回ると, 溜まった液体が泡沫から千切れ落ちる. この現象がピンチオフである.

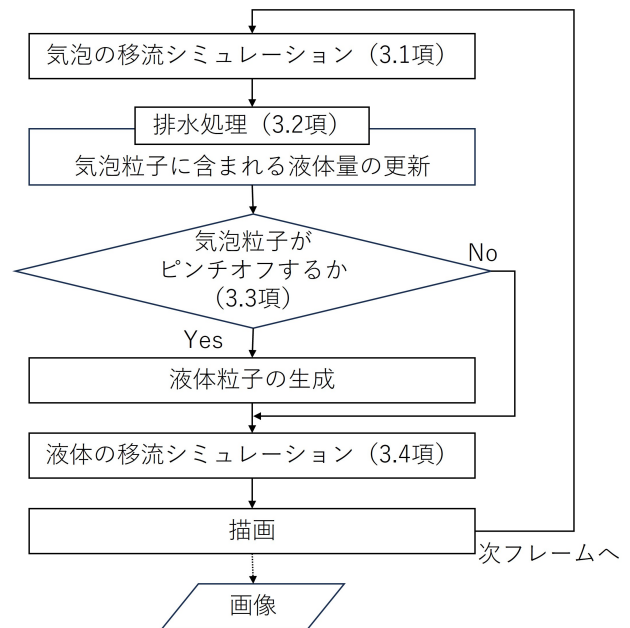


図 2: 提案手法の概要

3 提案手法

図2に本手法の計算の流れを示し、以下にその手順を述べる。本手法では、壁面に沿って粒子が移動すると仮定し、鉛直断面上でシミュレーションする。

3.1 気泡の移流シミュレーション

本手法では、泡沫内に含まれる壁面に付着した単一の気泡を一つの粒子として扱い、体積は変化しないと仮定して運動方程式を解く。気泡粒子にかかる力として、重力、気泡間の相互作用力、壁面への付着力、壁面との摩擦力を考慮する。ここで、気泡間の相互作用力は Busaryev ら [1] の強い相互作用力と同様に計算する。

3.2 排水処理

気泡粒子は単一気泡中に含まれる液体の体積のデータを持ち、各気泡粒子間における液体の流入量を計算することによって Plateau 境界内の液体の流れを近似する。

以下、二つの気泡粒子 i , j 間での排水処理について考える。このとき、気泡粒子 i の中心座標は気泡粒子 j の中心座標より高いとする。二つの気泡粒子 i , j が接している場合に排水処理が実行され、気泡 i から気泡 j へ液体が流出する。気泡 i から気泡 j へ単位時間あたりに流出する液体の体積 V_{ij}^{drain} の計算式は、文献 [3] を参考にし、粘性力と重力の影響を考慮して次のように表す：

$$\frac{dV_{ij}^{\text{drain}}}{dt} = \frac{k\phi_i^3 r_i^4 \phi_{ij}^{\text{ratio}}}{\nu} \frac{\mathbf{g}_T \cdot \hat{\mathbf{d}}_{ij}}{|\mathbf{g}_T|},$$

ここで、 k , ν は順に排水係数、粘性係数、 ϕ_i , r_i は気泡 i の液体分率、半径、 \mathbf{g}_T , $\hat{\mathbf{d}}_{ij}$ は重力の壁面接線方向成分、気泡 i から気泡 j に向かう単位方向ベクトルであり、 $\phi_{ij}^{\text{ratio}} = \min(1, \phi_i/\phi_j)$ である。

泡沫下端の気泡 i では、気泡外への液体流出を考慮し、溜まった液体の体積 V_i^{bottom} を保持しておく。

3.3 ピンチオフ判定

ピンチオフは、気泡の下側に溜まった液体の質量が増加し、溜まった液体にはたらく重力が毛管力を上回った場合に発生する。ここで、気泡 i の下側に溜まった液体の質量 m_i^{bottom} は液体密度 ρ と溜まった液体の体積 V_i^{bottom} を用いて次式で表現する：

$$m_i^{\text{bottom}} = \rho V_i^{\text{bottom}}.$$

ピンチオフが発生する条件は文献 [4] を参考にし、溜まった液体にはたらく毛管力が気泡粒子の半径に依存すると仮定して次のように表す：

$$m_i^{\text{bottom}} > \frac{\alpha r_i \gamma}{|\mathbf{g}_T|},$$

ここで、 α , γ は順にピンチオフ係数、表面張力係数である。気泡粒子 i がこの条件を満たしたとき、質量が m_i^{bottom} となるように、気泡の下側に液体粒子を発生させる。

3.4 液体の移流シミュレーション

液体の移流シミュレーションでは、重力に加え、液体と壁面間の作用として、壁面の親水性による付着力と、壁面に垂直な力の大きさに比例する摩擦力を考慮する。

4 実行結果

図1に本手法を用いたシミュレーションの結果を示す。本稿で示す結果は、二次元空間内でシミュレーションした結果を三次元的に描画したものである。時刻 $t = 1.297\text{s}$ で泡沫下端の気泡がピンチオフの発生条件を満たし、溜まった液体が流れ落ちる様子が確認できる。また、時刻 $t = 2.224\text{s}$ で泡沫が二つの塊に分離することから、排水効果による液体分率の分布の変化の影響で、各気泡粒子の挙動が変化することが確認できる。

5 結論と今後の課題

本稿では、気泡間で流入出する液体量を計算することによって、排水効果を考慮した壁面上泡沫流シミュレーション手法を提案した。本手法により、排水で液体分率の分布が変化することによる泡沫の挙動の変化と、排水効果によって発生するピンチオフを表現できた。

今後の課題として、シミュレーションの三次元空間への拡張、より正確な泡沫形状の表現による写実性の向上が挙げられる。また、泡沫を水で流すようなシーンを再現するため、液体粒子と気泡粒子間の相互作用を考慮することが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、令和5年度科研費基盤研究(A)21H04916の支援により実施された。

参考文献

- [1] Oleksiy Busaryev, Tamal K. Dey, Huamin Wang, and Zhong Ren: "Animating Bubble Interactions in a Liquid Foam," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 4, pp. 63:1–63:8, July 2012.
- [2] Paul W. Cleary, Soon Hyoung Pyo, Mahesh Prakash, and Bon Ki Koo: "Bubbling and Frothing Liquids," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 26, No. 3, pp. 97:1–97:6, July 2007.
- [3] 野口 駿:「泡のはなし(2)」, 化学と生物, 10巻, 2号, 100–105頁, 1972年2月.
- [4] Marie Tani and Rei Kurita: "Pinch-Off from a Foam Droplet in a Hele-Shaw Cell," *Soft Matter*, Vol. 18, No. 11, pp. 2137–2142, February 2022.