

傾斜容器内における軽量粒子群が誘起する非定常流動 Unsteady flows induced by light particles in an inclined container

- 吉岡 亮, 阪大, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, ryo.yoshioka@flow.me.es.osaka-u.ac.jp
渡村 友昭, 阪大・理研, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, tomoaki.watamura@flow.me.es.osaka-u.ac.jp
杉山 和靖, 阪大・理研, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, kazuyasu.sugiyama@flow.me.es.osaka-u.ac.jp
Ryo YOSHIOKA, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
Tomoaki WATAMURA, Osaka University-RIKEN 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
Kazuyasu SUGIYAMA, Osaka University-RIKEN 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

To clarify the mechanism of appearance of number density distribution of bubbles in a glass of Guinness beer, a numerical simulation applying Euler-Lagrange approach to the unsteady flow induced by the light particles in an inclined container was performed. The unsteady flow patterns are simulated for various bulk particle concentrations and inclined angle of the container. The scaled velocity fluctuation rapidly increases at $Fr \sim 1.5$, and then it gradually increases with increasing Fr , even for scattering of data owing to the limitation in the numerical model. We conclude that the texture for motion involves the instability of the gravity current.

1. 緒言

ギネスビールという黒ビールは他のビールに比べ、気泡径が小さいことで気泡流として非常に興味深い現象が生じることが知られている。それは、ギネスビールをコップに注ぐと、気泡の数密度分布が空間的な模様を形成し、気泡および模様が下降する現象である。静止流体中における気泡は気液間の密度差による浮力によって浮上するため、ギネスビールによる気泡の運動は物理法則に反すると錯覚してしまう。Benilov らは汎用流体解析ソフトを用いて気泡数密度の輸送方程式を解き、気泡の下降現象を次のように説明した⁽¹⁾。一般的なコップは内壁が傾斜しており、気泡の浮上に伴い傾斜壁面近傍における局所気泡数密度が低下し、気泡懸濁部と清澄層に密度差が生じる結果として密度対流⁽²⁾が生じる。このとき、気泡の浮上速度よりも高速な下降流が形成されるため、そこに取り込まれた気泡が下降する。しかし、彼らの数値計算結果からは気泡数密度分布の模様を観測できない。この原因としては Euler-Euler 型の数値計算では、気泡数密度分布がグリッドスケールで平滑化されてしまい、傾斜壁面近傍に生じ、急峻な密度変化を伴う液膜内部の流動を高い解像度で捉えることができないためと考えられる。

気泡数密度分布に模様が発生する仕組みについては、気泡の単一浮上速度と気泡群内浮上速度の差⁽³⁾や、局所気泡数密度の変化に伴う局所粘度の変化⁽⁴⁾が原因として提唱されている。我々のグループでは、傾斜矩形容器を用いた実験を行い、密度流の重力不安定との関連性を示唆する結果を得た⁽⁵⁾。しかし、上記したどの流体力学的要素が気泡数密度分布の模様の発生を決定するか未だ定かではない。本研究では、気泡の単一浮上速度と気泡群内浮上速度の差や、局所気泡数密度の変化に伴う局所粘度の変化を無視した Euler-Lagrange 型の粒子流動モデルを用いる。本モデルでは、界面変形の無い軽量粒子を扱い、傾斜容器内における非定常流動の数値計算を行う。傾斜壁面近傍における液相速度の時空間分布を基に、初期粒子体積率と容器傾斜角度の変化から模様が発生する条件について密度流の不安定に関連付けて分析する。

2. 数値計算手法

解析領域の形状および座標系を Fig. 1 に示す。幅 40 mm、高さ 200 mm の二次元矩形領域の高さ方向を x 軸、幅方向を y 軸とし、重力は y 軸と角度 β をなすように設定し、 $10 \text{ deg.} \leq \beta \leq 70 \text{ deg.}$ の範囲で変化させた。格子数はそれぞれの方向に 252×60 とした。

粒子径は実際のギネスビールの気泡径とほぼ同じ $50 \mu\text{m}$ である。計算領域に奥行方向の厚み Δz を持たせることにより、球形粒子の体積率分布を二次元計算で扱った。基礎方程式は連続相および粒子の体積率保存式、液相の運動量保存式、および分散体の並進運動式であり、それぞれ以下のように記述される。

$$\alpha + \alpha_L = 1, \quad \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) = 0, \quad \frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_L \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\alpha_L \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla \cdot [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] + \alpha_L \rho \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{y}}{dt} = \mathbf{u}(\mathbf{y}) + \mathbf{v}_{St}, \quad \mathbf{v}_{St} = \frac{\rho D_p^2 \mathbf{g}}{18\mu}, \quad (3)$$

ここで、 α は粒子の局所体積率、 α_L は液相の体積率、 \mathbf{u} は液相の速度ベクトル、 ρ は液相の密度、 μ は液相の粘度、 D_p は粒子の直径、 \mathbf{y} は粒子の位置ベクトル、 \mathbf{g} は重力ベクトルを表す。液体の物性値はギネスビールと同様の値を用いるが、計算コストの制約により初期粒子体積率 $\langle \alpha \rangle$ は実際のギネスビールの 1/10 程度以下となる $0.008 \% \leq \langle \alpha \rangle \leq 1.000 \%$ の範囲で変化させた。式 (2) において、分散体の存在による実効粘性は考慮しない。式 (3) において、本研究で扱う粒子は十分小さく液相の速度への追従性が高いため、粒子の運動は液相の速度にストークス浮上速度のみを足したものをを用いた。また、粒子同士および粒子-壁間の衝突を扱う four-way coupling モデルとそうでない two-way coupling モデルで気泡数密度分布の発生および伝播速度にはほぼ差異は見られなかったため、本研究では簡易的なモデルである two-way coupling モデルを採用した。

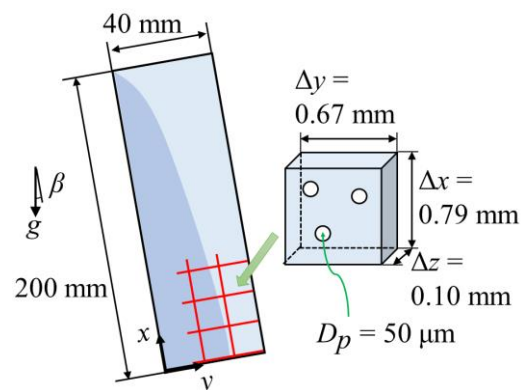


Fig. 1 Schematic of simulation domain and configuration.

3. 結果および考察

Fig. 2 は $\langle \alpha \rangle = 0.125\%$ とした際の $t = 10\text{ s}$ における瞬時の x 方向液相速度の空間分布である。図の各パネルの傾斜角度は (a) $\beta = 10\text{ deg.}$, (b) $\beta = 20\text{ deg.}$, (c) $\beta = 45\text{ deg.}$, (d) $\beta = 60\text{ deg.}$ である。図より傾斜角度の増加に伴い、傾斜壁面近傍における液相速度が増加することが分かる。また、いずれの角度も容器の下側の傾斜壁面近傍では下降流が、上側の傾斜壁面近傍では上昇流が生じており、Boycott 効果⁽²⁾による密度対流⁽¹⁾が再現できていると言える。Fig. 3 は、傾斜壁面近傍 ($0\text{ mm} \leq y \leq 4\text{ mm}$) における速度の時空間分布であり、(a) 液相速度の x 方向成分 u_x , (b) 3 次関数近似した液相速度の x 方向成分 $u_{x, \text{base}}$, (c) 液相速度の x 方向変動成分 $u_{x, \text{fluc}}$ を示す。ここで、 $u_x = u_{x, \text{base}} + u_{x, \text{fluc}}$ である。Fig. 3 (a-ii) より液相の速度は時間経過に伴い増加することが確認できる。また、Fig. 3 (a-iii) より液相速度が時間経過と共に変動することが分かる。このとき傾斜壁面近傍では、粒子体積率が低い液体塊が高速に落下することを確認しており、速度変動の原因とされる気泡の少ない流下現象⁽⁶⁾と類似しているため、現象を再現できていると言える。一方、Fig. 3 (a-iii) と Fig. 3 (b-iii) を比較すると、後者の方が速度変動が小さいことが確認でき、このとき粒子体積率が低い液体塊が落下しておらず、速度変動から流体塊が非定常に落下することを判断できる。

Fig. 4 は、傾斜壁面近傍の流動状態を二流体にモデル化した模式図である。壁面近傍において、清澄部と懸濁部に分離し、下降流が発生していることを示す。ここで、液相速度の x 方向成分が最小値となる点と壁面との距離を液膜高さ h と定義する。岩坪らのモデル⁽⁶⁾を拡張し、本研究で用いる二流体モデル系において、流体

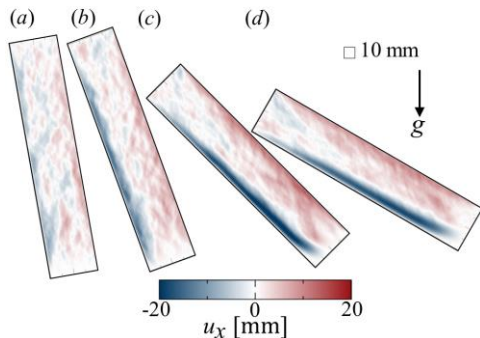


Fig. 2 Instantaneous distribution of velocity component along the longitudinal wall for $\langle \alpha \rangle = 0.125\%$. (a) $\beta = 10\text{ deg.}$, (b) $\beta = 20\text{ deg.}$, (c) $\beta = 45\text{ deg.}$, (d) $\beta = 60\text{ deg.}$

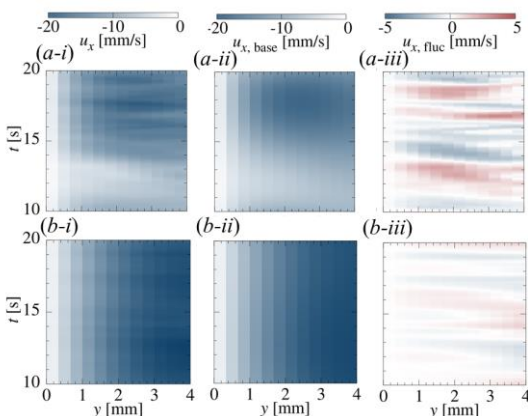


Fig. 3 Spatio temporal distribution of velocity near the inclined wall at $x = 100\text{ mm}$. (a) $\langle \alpha \rangle = 0.125\%$, $\beta = 10\text{ deg.}$, (b) $\langle \alpha \rangle = 0.125\%$, $\beta = 60\text{ deg.}$ (i) Original velocity, (ii) Third-order approximated velocity, (iii) fluctuational velocity.

の慣性力と重力の比を表すフルード数 Fr を以下の式で導入する。

$$Fr = \frac{|\langle \bar{u}_x \rangle_{y < h}|}{\sqrt{(\langle \alpha \rangle - \langle \bar{\alpha} \rangle_{y < h})hg \sin \beta}} \quad (4)$$

ここで、 $\langle \cdot \rangle_{y < h}$ は $y < h$ における平均値を、 $\bar{\cdot}$ は時間平均を示す。

Fig. 5 は、速度変動 $u_{x, \text{RMS}}$ の最大値を時間平均した液相速度の最小値で規格化した $u_{x, \text{RMS, max}} / |u_{x, \text{mean, min}}|$ を Fr により整理した結果を示す。サンプルは $10\text{ s} < t < 20\text{ s}$ を採用しており、 $u_{x, \text{mean, min}}$ は時間平均した液相速度の x 方向成分 $u_{x, \text{mean}}$ の最小値である。図より、粒子同士および粒子-壁間の衝突や分散体の存在による実行粘性などを考慮していないことにより、データは散乱しているが、 Fr の増加に伴い、RMS 値が増加しており、 $Fr \sim 1.5$ で急激に増加することが確認できる。流下液膜の不安定は $Fr > 2$ で生じる⁽⁶⁾ことから、気泡数密度分布の発現は粒子の分離に伴う密度流の不安定と類似していると言える。

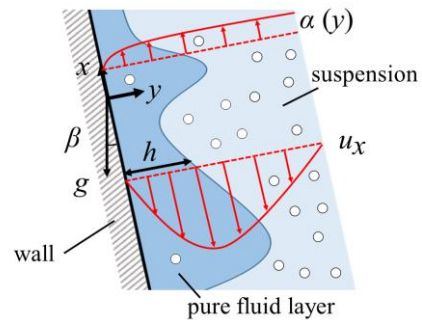


Fig. 4 Schematic of flow pattern near the inclined wall.

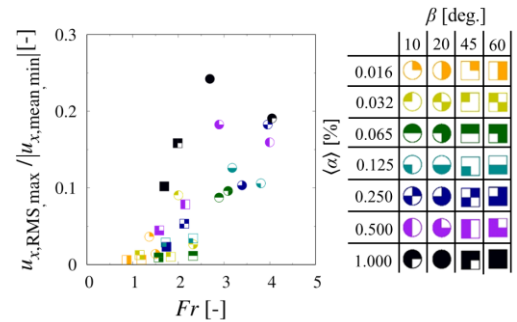


Fig. 5 Scaled maximum velocity fluctuation intensity vs. Fr .

4. 結言

ギネスビールの気泡数密度分布が発生する条件を考察するため、Euler-Lagrange 型の数値計算モデルを用い、傾斜容器内における非定常流動をシミュレートした。液相速度の時空間分布から液相速度の変動強度を取得し、気泡数密度分布の発生の有無をフルード数で整理した。その結果、モデルの限界によりデータは散乱しているが、 Fr の増加に伴い、 $u_{x, \text{RMS, max}} / |u_{x, \text{mean, min}}|$ が増加し、 $Fr \sim 1.5$ で急激に増加することが分かった。我々は、気泡数密度分布の発現は重力波の不安定性に関与すると結論付けた。

謝辞 本研究で用いた計算結果の一部は、理化学研究所情報システム部の Hokusai Great Wave を用いて得た。

参考文献

- (1) Benilov *et al.*, *Am. J. Phys.* **81**, 88-91 (2013).
- (2) Boycott, *Nature* **104**, 532 (1920).
- (3) Manga, *J. Geophys. Res.* **101**, 457-165 (1996).
- (4) Robinson *et al.*, *Phys. Fluids* **20**, 067101 (2008).
- (5) Iwatsubo *et al.*, *Jpn. J. Multiphase Flow* **32**, 124-131 (2018).
- (6) Needham & Merkin, *PRSL A* **394**, 259-278 (1984).