

鉛直線上で相互作用する 2 気泡挙動の数値計算

Numerical calculation on motion of two bubbles initially positioned inline

- 楠野 宏明, 静大院, 静岡県浜松市中区城北 3-5-1, E-mail:kusunohiroaki.17@shizuoka.ac.jp
真田 俊之, 静大, 静岡県浜松市中区城北 3-5-1, E-mail:sanada.toshiyuki@shizuoka.ac.jp
Hiroaki KUSUNO, Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku
Naka-ku Hamamatsu Japan
Toshiyuki SANADA, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku Naka-ku Hamamatsu Japan

We calculated motion of two buoyancy driven bubbles initially positioned inline using Basilisk⁽¹⁾ where Galilei number and Bond number were ranged $20 < Ga < 40$ and $0.57 < Bo < 1.25$, respectively. The trailing bubble felt a vertical attractive force and a lift force. The leading bubble felt a repulsive force when the leading bubble was in the vicinity of the trailing bubble. We observed symmetric vorticity behind each bubble when two bubbles migrated toward opposite direction, and the symmetric vorticity of the leading bubble has an opposite sign to that of the trailing bubble. These vorticity are similar to the shear induced vorticity. The lift force acting on the trailing bubble can be explain as the wake induced lift force, however, that on the leading bubble can not be done.

1. 緒言

気泡流中に発生する気泡クラスタはコヒーレント構造よりも大きい場合、単相流と異なる乱流構造の要因である⁽²⁾。よって気泡クラスタの予測が気泡流予測の精度を上げる。気泡クラスタが発生する重要な因子の 1 つに気泡間相互作用がある。

最も素な相互作用である 2 気泡間相互作用の研究が複数行われてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。著者らの先行研究⁽⁵⁾では、実験的にレイノルズ数が $20 < Re < 60$ の領域において、鉛直線上で相互作用する 2 気泡挙動を導出した。従来の理論・数値結果と比較して、後方気泡には前方気泡の後流起因の引力と揚力が、前方気泡には気泡同士が近接した場合のみポテンシャル効果による反発力がはたらくと結論付けた。しかし、著者らの実験では周囲流体の速度及び圧力場が不明であったこと、また従来の数値計算⁽⁶⁾では抗力係数及び揚力係数が議論的であったため、気泡周りの流れを比較し物理現象を理解するには至っていない。本研究では鉛直線上に位置する 2 気泡を数値計算し、実験との比較検証および流れ場の圧力・速度から 2 気泡の相対運動メカニズムを議論する。気泡の特性はガリレイ数が $20 < Ga < 40$ 、ボンド数が $0.57 < Bo < 1.25$ の範囲内である。

2. 計算手法

本研究では、オープンソースの adaptive volume-of-fluid solver である Basilisk⁽¹⁾を用いる。支配方程式は非圧縮性の連続の式、運動方程式および VOF 方程式である。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} + \sigma \kappa \nabla f, \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}f) = 0. \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u} は速度場、 ρ は密度、 p は圧力、 μ は粘度、 \mathbf{g} は重力、 σ は表面張力、 κ は界面曲率、 f は密度関数である。運動方程式は投影法を用いて解かれる。運動方程式及び VOF 方程式の移流項は Bell-Collela-Glaz の移流スキームによって陽的に解かれる⁽⁷⁾。このスキームでは式(4)のガウスの定理より、各保存量がセルの面を通る流束を評価して計算される。

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) d\Omega = \int_{\Sigma} \mathbf{u}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) d\Sigma. \quad (4)$$

次に拡散項は Poisson-Helmholtz 方程式より陰的に解かれる。その

後、重力及び表面張力による加速度項を解く。最後に投影された速度場から次の時刻の速度場及び圧力を求める。VOF 方程式は onto-cell implicit linear mapping 法より流束を用いて求める⁽⁸⁾。詳細は Basilisk⁽¹⁾を参照のこと。

計算の予備試験として以下の 2 点を調査した。

1. 運動境界層の速度がどの程度の分解能で収束するか。
2. 境界を直接格子点で表現できる精度の高い境界適合格子の結果と一致するか (ただし、球形の気泡)。

詳細は省略するが、計算格子の大きさは最小で気泡直径に対して $\Delta = d/48$ とした。計算条件を Fig. 1 に示す。

3. 結果

Figure 2 に $Ga = 40$ 、 $Bo = 1.25$ の相対位置の時間変化を示す。鉛直列に位置する気泡において、まず後方の気泡には引力がはたらいた。その後、気泡同士が近づくと前後両方の気泡に鉛直方向及び水平方向の斥力がはたらいた。数値結果は実験結果⁽²⁾と比較して、より気泡同士が近い距離まで近づいた。Figure 3 に気泡直径の 0.1 倍だけ水平方向に位置する、ほぼ鉛直列気泡の時間変化を示す。Figure 3 の条件では Fig. 2 と比べて気泡同士が遠方に位置する場合でも後方気泡に揚力がはたらいた。このことから、実験では完全な鉛直列から僅かに外れていたことが示唆された。また揚力の方向は初期に、水平方向にずれていた方向である。一方で前方気泡には相互作用ははたらかなかつた。

4. 考察

Figure 4 に各々の気泡の後方部の渦度 ω_z を示す。条件は Fig. 2 の $t = xx$ である (2 つの気泡に水平方向の斥力がはたらいた時)。まず、Fig. 4(b) より後方気泡の後方部では対称の渦度 ω_z が生成されている。これは、一様せん断流中に揚力がはたらいた際に発生する流れと似ている⁽⁹⁾。気泡後流は、気泡表面で生成された渦度が運ばれるため、一様せん断流同様に渦度 ω_x (または ω_y) が存在する。前方気泡の後流領域に存在する後方気泡は、この揚力を受けたと考えられる。一方で、前方気泡は他の気泡の後流領域内に位置しないにもかかわらず、Fig. 4(a) より前方気泡の後方部では後方気泡と符号が逆の対称の渦度 ω_z が確認された。後方気泡と逆符号のため、水平方向の進行方向は前方と後方の気泡で逆になったと考えられる。ポテンシャル効果のみならずせん断流中の揚力と似ているため、従来研究の内容からさらなる検討が必要である。

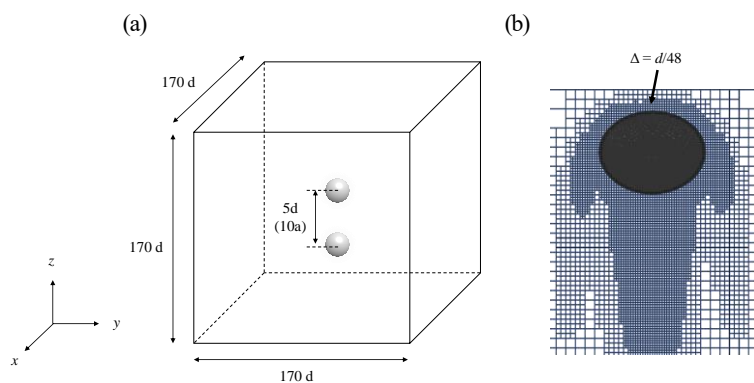


Fig. 1. Computational domain (a) and spatial resolution (b). The computational domain is greater enough to neglect the wall effect. Initial vertical distance between bubbles is $5d$. The spatial resolution Δ is $d/48$.

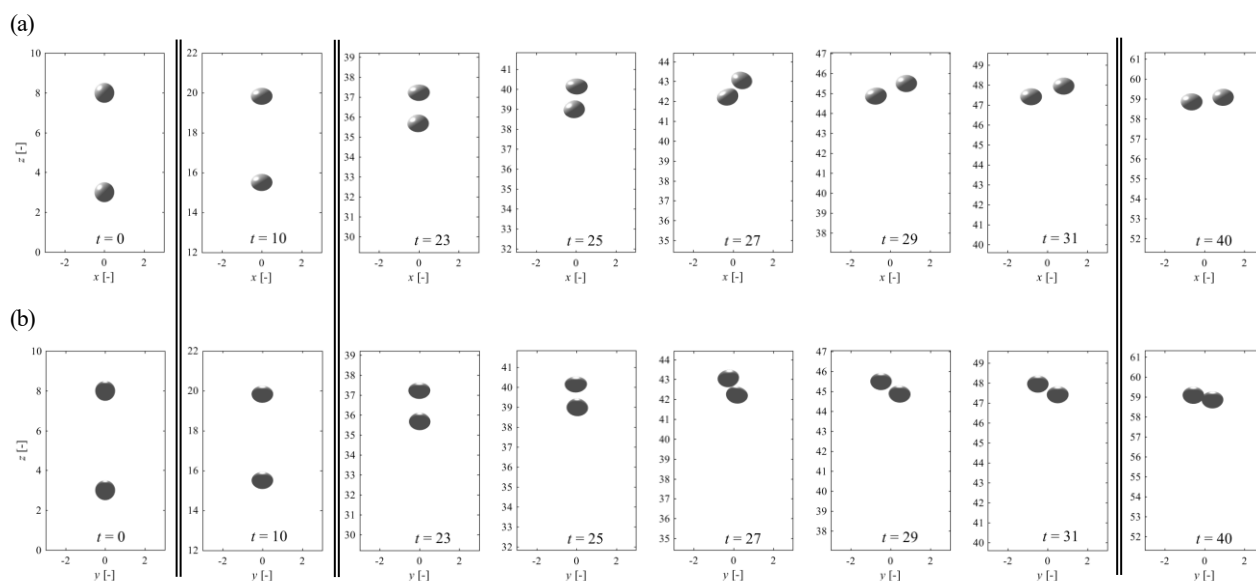


Fig. 2. Path of bubbles initially positioned inline ($Ga = 40$, $Bo = 1.25$): a, x - z view; b, y - z view. For $0 < t < 23$, the trailing bubble has felt accelerate interaction force. And then, two bubbles feel repulsion interaction force.

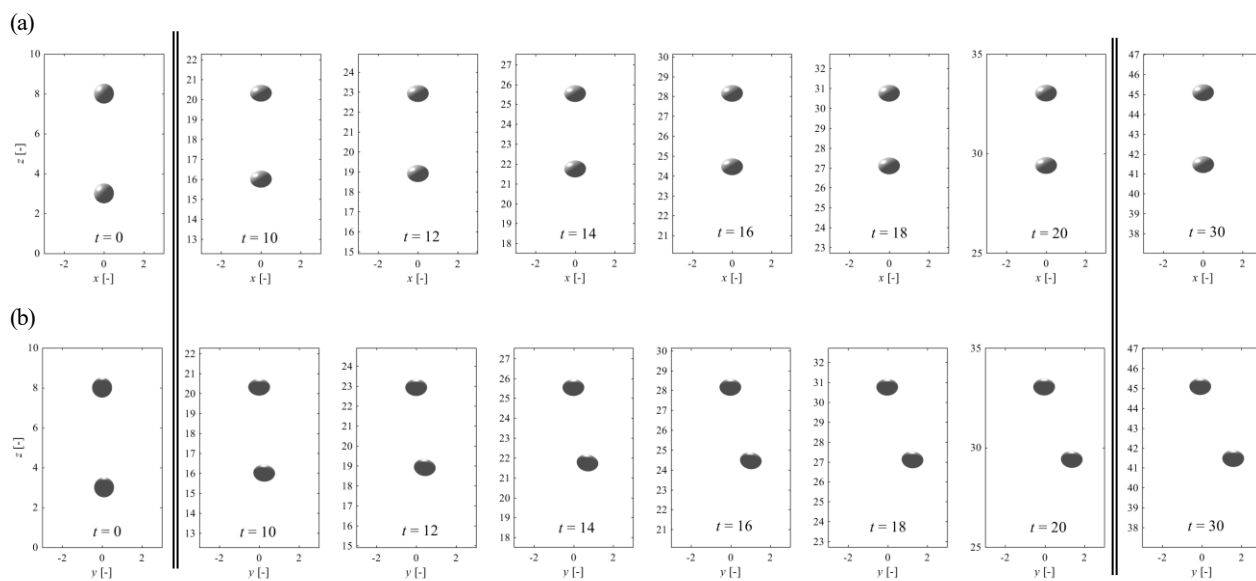


Fig. 3. Path of bubbles initially positioned slightly off inline ($Ga = 40$, $Bo = 1.25$, the trailing bubble $y_0 = 0.1$): a, x - z view; b, y - z view. Only the trailing bubble feels interaction force. The trailing bubble migrated laterally faster than condition Fig. 2.

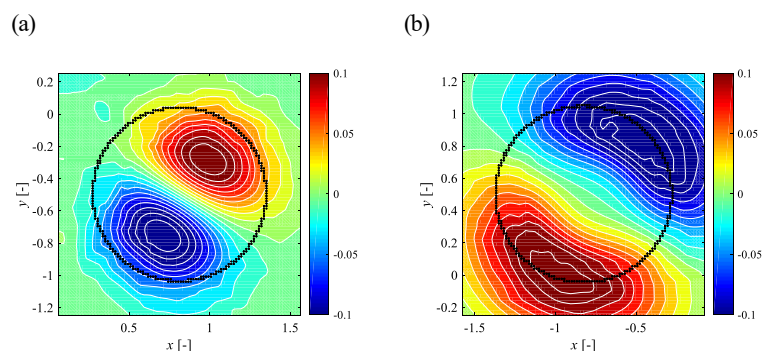


Fig. 4. Vorticity (ω_z) distribution behind the bubble at $t=31$ (conditions as in Fig. 2(a)): a, the vorticity distribution of the leading bubble; b, the vorticity distribution of the trailing bubble. The vorticity of (a) has an opposite sign to that of (b), namely the flow direction is opposite on x - y plane.

5. 結言

Adaptive VOF 法を用いて鉛直線上で相互作用する 2 気泡の数値計算を行った。後方の気泡には上昇方向の引力と水平方向への揚力がはたらく。前方の気泡には、気泡同士が近づいた場合のみ、後方の気泡に対して上昇方向及び水平方向への斥力がはたらく。いずれの気泡の後方にも対称の渦度 ω_z が存在することから、一様せん断流中の揚力に似た力がはたらくと考えられる。前方気泡の後流がせん断流を模擬するため、後方気泡の揚力は後流起因だと考えられる。しかし、前方気泡は後流領域内に位置しないため、後流後方気泡と同様の要因とは限らない。よって今後さらなる検討が必要である。

参考文献

- (1) <http://basilisk.fr/>
- (2) Takagi, S. and Yoichiro, M., "Surfactant effects on bubble motion and bubbly flows." *Annual Review of Fluid Mechanics* 43 (2011): 615-636.
- (3) Yuan, H., and Prosperetti, A., "On the in-line motion of two spherical bubbles in a viscous fluid." *Journal of Fluid Mechanics* 278 (1994): 325-349.
- (4) Legendre, D., Magnaudet, J. and Mougin, G., "Hydrodynamic interactions between two spherical bubbles rising side by side in a viscous liquid." *Journal of Fluid Mechanics* 497 (2003): 133-166.
- (5) Kusuno, H., Yamamoto, H. and Sanada, T., "Lift force acting on a pair of clean bubbles rising in-line." *Physics of Fluids* 31.7 (2019): 072105.
- (6) Hallez, Y. and Legendre, D., "Interaction between two spherical bubbles rising in a viscous liquid." *Journal of Fluid Mechanics* 673 (2011): 406-431.
- (7) Bell, J. B., Colella, P. and Glaz, H. M., "A second-order projection method for the incompressible Navier-Stokes equations." *Journal of Computational Physics* 85.2 (1989): 257-283.
- (8) Weymouth, G. D. and Yue, D. K. P., "Conservative volume-of-fluid method for free-surface simulations on cartesian-grids." *Journal of Computational Physics* 229.8 (2010): 2853-2865.
- (9) Legendre, D., and Magnaudet, D., "The lift force on a spherical bubble in a viscous linear shear flow." *Journal of Fluid Mechanics* 368 (1998): 81-126.