



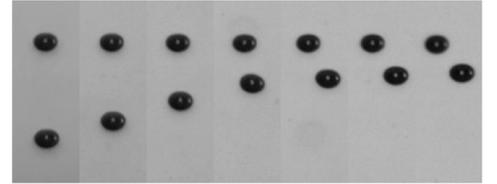
2つの気泡にはたらく力の実験・数値的解析

～スリップストリーム中の気泡の横移動現象の解明～

楠野宏明 (静岡大学)

緒言

- ✓ 物体の後方では後流によって抵抗が小さくなるが (スリップストリーム), 気泡ではどのようになるかを調査した.
- ✓ 液体中に微細な気泡が混在する流れは, 気泡塔や熱交換器などの産業機器で見られる.
- ✓ 気泡間の相互作用による気泡同士の合体や反発は, 体積増加による上昇速度の増加や面積減少による反応速度の減少を発生させるため, 流れの構造を決定づける要因の1つである.
- ✓ 本研究では, 実験と数値解析より上昇方向に並んだ気泡にはたらく力・運動予測・流動構造を検証する.
- ✓ 解析ツールとしてMATLABを使用する.

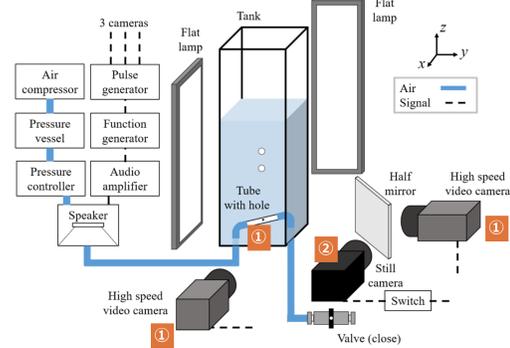


上昇方向に並んだ2気泡の相対挙動: Kusuno et al.(2019)^[1]

実験手法

Kusuno et al.(2019)^[1]

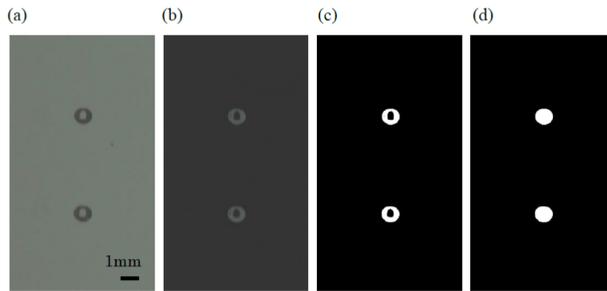
Kusuno and Sanada(2015)^[2]



- ① 気泡を2つ発生させ, 高速度カメラで挙動を撮影.
- ② スチールカメラで気泡の輪郭を拡大撮影.
- ③ 実験結果と気泡運動方程式を比較する.

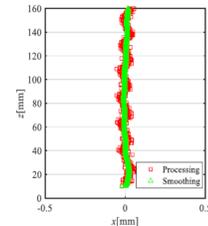
画像解析手法

① 気泡の位置 (図(a)の黒い丸) を判定するため, 画像処理を行う



(a)元画像, (b)背景処理後, (c)二値化処理, (d)スポット処理 (Image Processing Toolを使用)

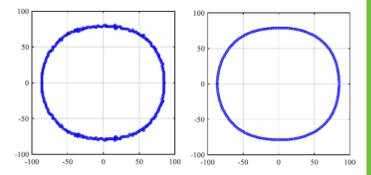
② 位置情報を3次スプラインで平滑化 (位置とは気泡中心のこと)



□: 元データ
△: 平滑化 (Curve Fitting Toolを使用)

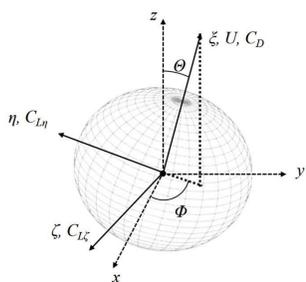
③ 気泡形状を多項式で近似

$$r(\theta) = \sum_{n=0}^8 A_n P_n[\cos\theta]$$



左: 元データ
右: 多項式近似 (Curve Fitting Toolを使用)

気泡にはたらく力の導出法



$$C_D = \frac{8a}{3U^2} \left\{ -(0.62\chi - 0.12) \frac{dU}{dt} + g \cos\theta \right\}$$

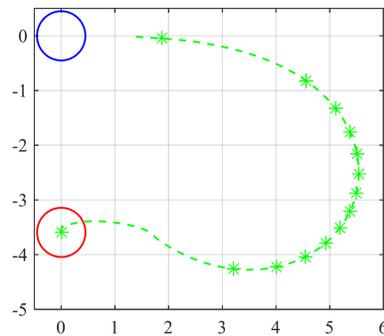
$$C_{L\eta} = -\frac{8a}{3U^2} \left\{ (0.62\chi - 0.12) U \frac{d\theta}{dt} + g \sin\theta \right\}$$

上式より抗力と揚力を導出。
※平滑化を行わないと微分項があるため, 滑らかな値が導出されない。

運動方程式による気泡運動の予測法

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = -2g_i - \frac{3}{4R} |U_i| U_i (C_{D_i} + C_{D_{int}} + C_{L_{int}})$$

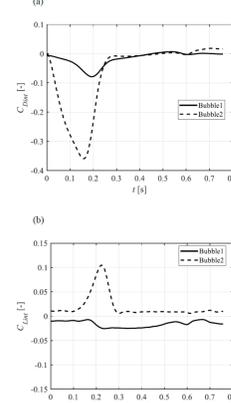
上式で表される常微分方程式 (ODE) を解く。
U: 速度, g: 重力, R: 気泡半径, C_D: 抗力係数, C_L: 揚力係数



2つの気泡の相対挙動予測の例
-: 気泡1, -: 気泡2, -: 相対挙動
気泡は横に周ってから近づく。

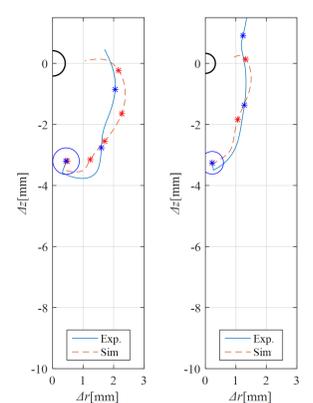
実験による気泡にはたらく力と気泡運動予測の検証

① 気泡にはたらく力



(a) 抗力係数, (b) 揚力係数 (横軸) 時刻
後ろの気泡(Bubble2)は抗力が小さい
だけでなく, 揚力 (横方向の力) も働く。

② 気泡運動予測の検証



-: 実験の相対挙動, -: 運動予測の相対挙動
気泡運動予測は実験結果と定性的に一致。
(気泡は横に周ってから近づく)

画像解析・曲線近似・常微分方程式によって実験結果を検証!

気泡の数値計算手法

Kusuno and Sanada(2021)^[3]

	Volume of Fluid (VOF)	Adaptive Mesh Refinement (AMR)
計算格子の図	0.9 0.4 0.0	
	1.0 0.8 0.0	
	1.0 0.95 0.05	
特徴	格子内の気体-液体率によって格子内の流体特性を決定する手法。 気体-液体を連続的に扱う。幾何形状で気泡を表現可能。複数気泡で有効。	計算精度が必要な箇所格子解像度を上げる手法。 計算負荷を大幅に減らすことができる。 境界が移動する場合やスケールの異なる流れで有効。

VOF+AMRを用いて, 運動方程式 (Navier-Stokes方程式) を解く。

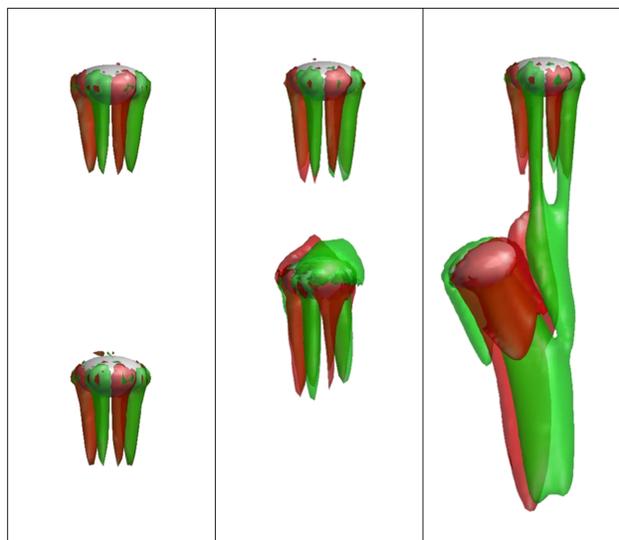
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

$$\rho[\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}] = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{D}) + \sigma \kappa \delta \mathbf{n} + \rho \mathbf{g}$$

2つの気泡が列で上昇する場合を模擬し, 数値計算を行う。

数値計算による流動構造の可視化結果

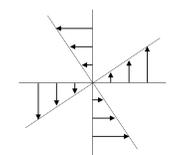
① 数値計算で得た気泡周りの流動構造可視化



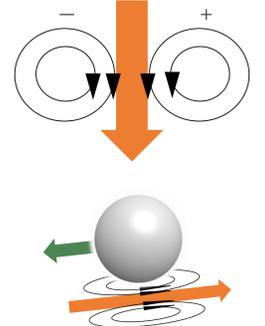
気泡と渦度の等値面 (Isosurface) の3Dデータを可視化。
後ろの気泡が横に動く時, 面対称の渦度対 (赤と緑) が発生する。

② 気泡が横に動く原理

渦度とは回転のこと



渦度対が存在すると矢印方向の流れが発生する。(右図は上から見た場合)



対称の渦度によって液体が排出される。その反作用によって気泡が横に動く。

流れの可視化によって物理現象を把握!

参考文献

- [1] Kusuno, H., Yamamoto, H., & Sanada, T. (2019). Lift force acting on a pair of clean bubbles rising in-line. *Physics of Fluids*, 31(7), 072105.
- [2] Kusuno, H., & Sanada, T. (2015). Experimental investigation of the motion of a pair of bubbles at intermediate Reynolds numbers. *Multiphase Science and Technology*, 27(1).
- [3] Kusuno, H., & Sanada, T. (2021). Wake-induced lateral migration of approaching bubbles. *International Journal of Multiphase Flow*, 139, 103639.

結言

上昇方向に並んだ2気泡について実験検証・数値計算を行った。

- ① MATLABを用いて実験データの画像解析, データの曲線近似, 常微分方程式を解くことで実験データを整理した。
- ② MATLABを用いて数値計算結果の流動構造を可視化することで物理メカニズムを把握した。
- ③ 実験的・理論的・数値的にスリップストリーム中の気泡が接近後, なぜ横方向にずれるかを明らかにした。