

1. 緒 言

流体中に気泡を含む流れは、原子炉炉心内や化学反応器など工業上様々な分野において見受けられる。これら気泡を含む流れの流動特性は、液相を介して互いに干渉ながら運動する個々の気泡の挙動、及び気泡間の流動構造の変化に大きく依存する。そのため、気泡間の相互干渉と周囲流動構造の変化に関する知見を得ることが流体機器の安全設計、高効率化にとって不可欠である。しかし、現在までに単一気泡の挙動に関する知見は多く得られているが、複数気泡間の相互干渉、及び周囲流体の三次元的な流動構造変化についての明確な結論は得られていない。

そこで本研究では、液中を上昇する2つの気泡について三次元数値解析を行い、液相を介して二気泡間に作用する相互干渉、及び気泡周囲の三次元的な流動構造の詳細を明らかにする事を目的とする。

2. Front-Tracking 法⁽¹⁾

本研究では時間的に多様な変化をする気液界面を精度良く追跡し、かつ数値的に安定といわれている Front-tracking 法を使用する。気液界面は直交固定格子内を移動する別個の非構造格子により陽に表現され Lagrange 的に追跡される。

支配方程式を以下に示す

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \int \boldsymbol{\sigma} d(x-x^f) \delta \quad (2)$$

表面張力は界面上($x=x^f$)でゼロでないデルタ関数 $d(x-x^f)$ によって付加項として取り込まれる。添え字 f は界面上の値であることを示す。

3. 計算条件

本研究ではモルトン数 $Mo=1.97 \times 10^{-3}$ の流体中を上昇するエトベス数 $E_o=10.59$ の気泡を対象とした。

図1に本研究における計算領域を示す。格子数は気泡球等価直径 D_e に対して 20cell と与え、計算領域内は $96 \times 512 \times 96$ とした。境界条件は y 方向、 z 方向は周期境界条件とし、 x 方向の境界は滑りなしの壁条件とした。このとき x 方向の両壁が静止することで静止流動場、それぞれが $V_{wall}, -V_{wall}$ で常に動き続ける事により一様せん断流動場を形成した。

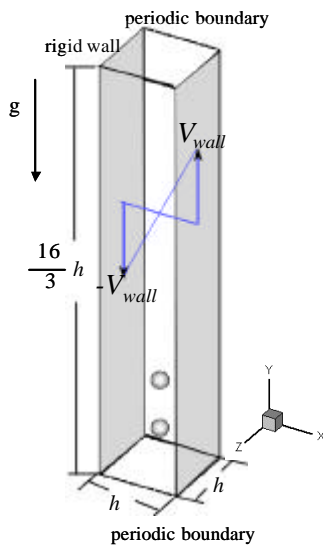


図 1 計算領域

本研究では静止流体中に直列に配置された2つの気泡について、図2-aに示すように追従気泡の先行気泡に対する初期重心位

置が $\Delta y_c = -2.0D_e, -3.0D_e, -4.0D_e$ となる条件それぞれについて計算をおこなった。さらに、せん断率 $k=3.0s^{-1}$ の一様せん断流中において、図2-bに示すように追従気泡の y 方向の初期相対重心位置を $\Delta y_c = -2.0D_e$ とし、 x 方向の初期相対重心位置をそれぞれ $\Delta x_c = -0.5D_e, +0.5D_e$ とした2つの条件についても計算をおこなった。

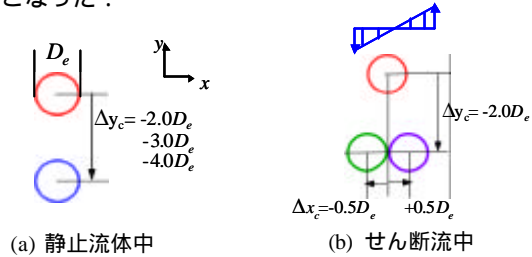


図 2 初期気泡配置

4. 計算結果及び考察

4.1 静止流体中の直列二気泡

図3に $\Delta y_c = -3.0D_e$ の条件における静止流体中の直列二気泡の上昇の様子を示す。直列に配置された2つの気泡は共に垂直に上昇し、追従気泡の上昇速度が増加することにより接近、接触した。このとき追従気泡がある程度接近すると先行気泡の速度も増加しはじめる事が確認された。ここで、先行気泡の速度増加の要因を調べるため、先行気泡下部における圧力 P_{least} の時間変化と先行気泡に働く力の鉛直方向成分 F_y 時間変化との関係性を調べた(図4)。図より、先行気泡の速度増加は、追従気泡が先行気泡に接近することにより先行気泡下部の圧力が回復し、先行気泡に働く力の鉛直成分が増加するために起こることがわかる。

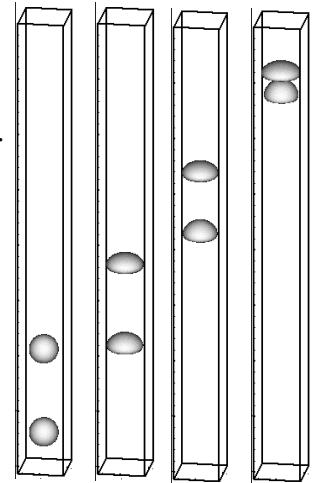


図 3 気泡の上昇の様子 ($\Delta y_c = -3.0D_e$)

初期気泡間距離が異なる条件を比較したところ、初期気泡間距離が小さい条件ほど早い時刻で上昇速度、気泡形状の変化が起きる事が確認された。このように気泡同士の相互干渉によって個々の気泡が受ける影響の大きさは、2つの気泡間の距離に関係すると考えられる。そこで、各条件について、2つの気泡の重心間距離 D_c と各気泡に働く力の y 方向成分の大きさ F_y との関係性を調べた(図5-a,5-b)。図より気泡に働く力の y 方向成分の大きさは気泡間距離に応じて、どの条件においても同様の変化をすることがわかる。これより、気泡間の相互干渉によって気泡に働く力の大きさは、2気泡間の距離に大きく依存する事がわかった。

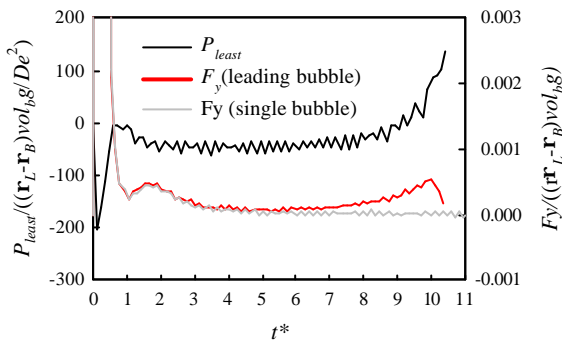
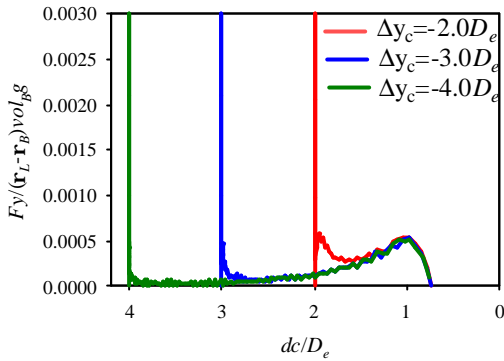
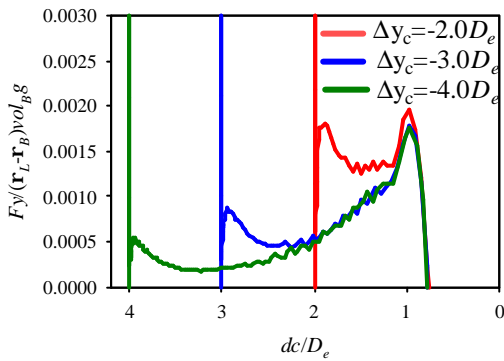


図4 気泡下部の圧力と気泡に働く力の大きさの時間変化



(a) 先行気泡



(b) 追従気泡

図5 気泡間距離と気泡に働く力の関係

4.2 せん断流中の二気泡

せん断流中を上昇する2つの気泡は、どちらの条件においても、変形を伴いながら上昇し、接近接触した。このとき、先行気泡はせん断流の影響をうけてx軸正の方向へ移動し、追従気泡は先行気泡の後流に取り込まれるように移動した。図6-a,6-bにそれぞれの条件において、2気泡間の距離が $1.75D_e$ となる時刻での気泡重心位置を通るxy平面における気泡周囲の流れ場の様子を示す。ここで図の流れ線は先行気泡速度に対する周囲流体の相対速度に沿って描かれている。図6-aでは、左下方の追従気泡の存在により気泡先行下流部の流れが時計回りとなり、図6-bでは、右下方の追従気泡の存在により反対に時計回りとなっていることがわかる。図7にそれぞれの条件における先行気泡界面まわりの循環の値の時間変化を示す。単一上昇時と比較して、循環の値がそれぞれの条件で増加、減少していることがわかる。これは、図6でみられた気泡間の液相の流れの向きの変化によるものであると考えられる。このように気泡間の液相の流動構造は2つの気泡の相対位置によって変化することがわかった。

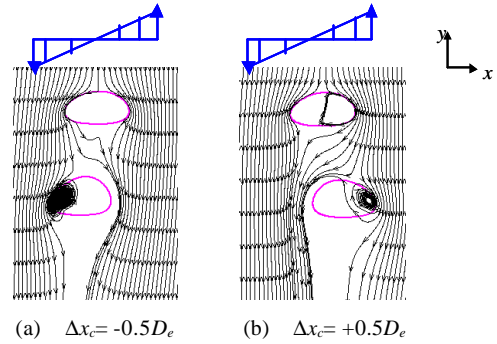


図6 気泡周囲の流動構造

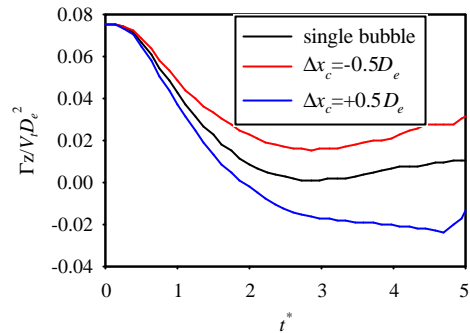


図7 先行気泡まわりの循環の時間変化

4.3 気泡周囲の三次元流動構造の変化

気泡の相対的な位置関係による3次元の流動構造の変化を調べるために、単一上昇時には液相中にほとんどみられなかったy軸方向の渦度 w_y の分布の様子を調べた。図8-a,8-b,8-cに、2気泡間の距離が $1.75D_e$ となる時刻における気泡周囲流動場の3次元渦度等値面図を示す。直列に上昇する条件では、単一上昇時と同様に気泡間に w_y の分布はみられないが、気泡同士の相対的な位置関係によって気泡間の液相に流動構造の変化がみられた。せん断流中の条件では、2つの気泡間の液相に w_y の分布がみられ、3次元的にも流動構造が変化していることがわかった。

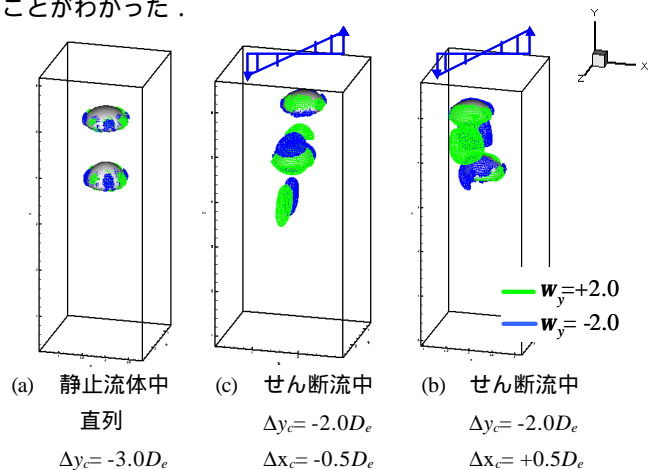


図8 気泡周囲の渦度等値面

5. 結言

2つの気泡が液相を介してお互いに与える力の大きさは気泡間距離に大きく依存することがわかった。2気泡間の相対的な位置関係の違いによって、3次元の流動構造の変化が生じることが分かった。

参考文献

(1)G.Tryggvason et al.,*J Comput.Phys.*,100,(1992),25