

不純物を含む水中における単一上昇気泡の挙動 The Behavior of a Single Rising Bubble in Contaminated Water

渡邊 祐二, 東大院, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, watanabe@fel.t.u-tokyo.ac.jp
 宇田 東樹, 東大学, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, touki-u@fel.t.u-tokyo.ac.jp
 高木 周, 東大工, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, takagi@mech.t.u-tokyo.ac.jp
 松本 洋一郎, 東大工, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, ymats@mech.t.u-tokyo.ac.jp

Yuji WATANABE, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN
 Touki UDA, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN
 Shu TAKAGI, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN
 Yoichiro MATSUMOTO, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN

The effect of the contaminant on a single bubble rising through water is analyzed. Polar-type grid system is used as a boundary-fitted grid, and the full Navier-Stokes equation is solved coupled with an equation of surfactant concentration. Marangoni effect due to adsorption of the contaminant is taken into consideration as the boundary condition. In order to evaluate temporal evolution and steady state of the flow around a bubble, numerical simulation has been executed for several conditions. And then we have investigated the sensitivity of a bubble behavior to the variation of physical properties or volume concentration of contaminant. The evolution of drag coefficient of the bubble qualitatively agrees with experiment.

1. 緒言

気泡流は、曝気槽、不純物の界面への吸着を応用した水質浄化、気液の混合反応など、幅広い分野で応用されている。これらの機器の性能評価や運転条件の最適化のためには、流速分布や乱れなど、流れ場全体の物理現象だけでなく、個々の気泡運動についても時間スケールを正確に把握することが重要である。

微量の界面活性剤などの不純物が混入した水中では、気泡の上昇速度が純水中のものから大幅に低下することが知られているが、この現象は気泡表面への不純物の吸着によるマランゴニ効果で説明できる⁽¹⁾。マランゴニ効果による気泡の上昇速度変化の時間スケールは、不純物の吸着性、脱離性といった物性で評価できると考えられるが、最近の研究⁽²⁾では、不純物を含む系における気泡運動の時間スケールが、液相の不純物のバルク濃度に依存するという報告もなされている。このように不純物の濃度や物性が気泡の挙動に与える影響は複雑であり、十分に解明されているとは言えない。

そこで本研究では、不純物の濃度や吸着・脱離に関する物性値をパラメータとして数値計算を行い、これらが気泡の定常・非定常挙動に与える影響について知見を得ることを目的とする。

2. 計算手法

2.1. 基礎方程式

計算コードは Takagi ら⁽³⁾のものを用いる。基礎方程式は質量保存式(1)、運動量保存式(2)、不純物濃度の輸送方程式(3)である。

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

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \frac{1}{r} \nabla p + \mathbf{n} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \quad (3)$$

と表される。ここで \mathbf{u} は速度ベクトル、 r は液相密度、 p は圧力、 \mathbf{n} は液相の動粘性係数、 D は拡散係数、 C は不純物濃度を表す。

本計算では気泡が一定の終端速度で上昇していると仮定し、流れ場、濃度場の収束解を求める定常計算と、Cuenot ら⁽⁴⁾と同様に不純物を含まない系での定常解を初期条件と

し、一定の終端速度 u_∞ で上昇すると仮定して流れ場や濃度場の時間変化を計算する、擬似非定常計算をおこなう。定常計算の際には、(2)(3)式の時間微分項を除いて用いる。

2.2. 境界条件

流れ場についての境界条件は

$$\mathbf{u}_\infty = \text{const.} \quad (4)$$

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (5)$$

と表される。ここで、 \mathbf{u}_∞ は無限遠方の速度ベクトル、 \mathbf{n} は気泡表面における法線ベクトルを表す。本計算では、気泡を基準にした座標系を考えるため、(4)式は無限遠で流速一定となることを表す。本計算では、定常計算だけでなく擬似非定常計算においても、気泡が一定の終端速度で上昇すると仮定するため、どちらの計算においても(4)式の境界条件が課される。また、(5)式は、球形気泡を仮定しているため、気泡表面で速度の法線方向成分が 0 であることを表す。

不純物の影響は、Cuenot ら⁽⁴⁾と同様のモデルを用いて評価される。気泡表面でのせん断応力 t は Frumkin の吸着式(6)で評価される表面張力 s から(7)式のように求められる。

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}_0 + R_g T G_{max} \ln(1 - \frac{G}{G_{max}}) \quad (6)$$

$$\mathbf{t} = \nabla_s \mathbf{s} \quad (7)$$

\mathbf{s}_0 は純粋液体の表面張力、 R_g は気体定数、 T は絶対温度、 G は気泡表面に吸着した不純物の濃度、 G_{max} は G の飽和濃度で、(7)式の添え字 s は接線方向の微分を表す。この t を用いて気泡表面における接線方向速度を決定する。

また、 G は気泡表面内の移流・拡散および表面・液相間の拡散についての式

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \nabla_s (u_s G) = D_s \nabla_s^2 G - D \nabla C_s \quad (8)$$

$$- D \nabla C_s = k_a C_s (G_{max} - G) - k_d b G \quad (9)$$

から求められる。 u_s は気泡表面の速度、 D 、 D_s はバルクおよび表面での拡散係数、 C_s は気泡表面近傍の不純物濃度、 k_a は吸着係数、 b は脱離係数を表す。(9)式で右辺第 1 項は液相から気泡表面への吸着流束、右辺第 2 項は気泡表面から液相への脱離流束を表す。

不純物濃度の境界条件は無限遠方でバルク濃度 C_g が一定であること、および対称軸上で C 、 G の勾配が 0 となることである。勾配が 0 となるのは、本計算では軸対称な系を仮定

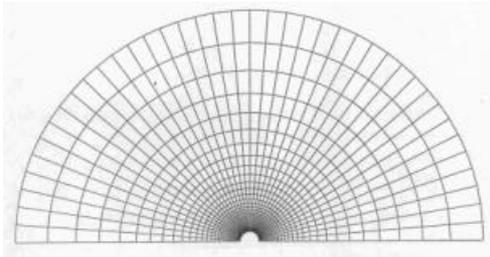


Fig.1 Numerical grid

しているためである。

3. 計算条件

不純物が気泡表面に吸着することにより、(6)式から表面張力が変化し、気泡の形状が球形から変化する可能性がある。しかし本計算では、水のように表面張力の大きい液体を仮定し、不純物吸着によっても表面張力が気泡の形状変化を引き起こすほどは小さくならないと仮定して、気泡形状は球形であると仮定し、表面張力の勾配のみを考慮する。

不純物として界面活性剤 1-プロパノール、1-ブタノール、1-ペンタノール、Triton X-100 を仮定し、各物質のバルク濃度をパラメータとして計算をおこなう。各物質の吸着・脱離に関する物性値を Table 1 に示す。

定常計算は、1-プロパノール、1-ブタノール、1-ペンタノールを用い、水温 $T=298\text{K}$ 、気泡直径 $d=0.62\text{mm}$ 、終端速度 $u_8=0.146\text{m/s}$ とする。このとき代表長さを d 、代表速度を u_8 としたレイノルズ数は 100 となる。

また、擬似非定常計算では、定常計算に用いた 3 種類の界面活性剤のほかに Triton X-100 も想定した。3 種類の界面活性剤については、定常計算と同一の条件で計算をおこなう。Triton X-100 を用いた擬似非定常計算では、実験結果⁽²⁾から気泡径 $d=1.4\text{mm}$ 、 $u_\infty=0.15\text{m/s}$ とする。このとき代表長さを d 、代表速度を u_∞ としたレイノルズ数は 200 である。

各方程式を 2 次元軸対称直交曲線座標系で離散化し、境界適合格子を用い、SIMPLER 法により計算する。計算格子の例を Fig. 1 に示す。定常計算、擬似非定常計算とも、計算領域は気泡半径の 25 倍とし、格子点数 61×61 点とした。このとき、濃度場の計算において格子解像度が不足するため、拡散係数を実際よりも大きくし、Takagi ら⁽³⁾にならって代表長さを d 、代表速度を u_8 としたペクレ数を 100 として計算した。

4. 計算結果および考察

4.1. 定常計算

Fig.2 に定常状態での気泡の抗力係数を示す。実線は不純物を含まない系での気泡の抗力係数⁽⁵⁾

$$C_D = \frac{24}{Re} \left\{ \frac{2}{3} + \left[\frac{12}{Re} + 0.75 \left(1 + \frac{3.315}{\sqrt{Re}} \right) \right]^{-1} \right\} \quad (10)$$

を表し、破線は剛体球の抗力係数⁽⁶⁾

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.1935 Re^{0.6305}) \quad (11)$$

を表す。不純物の十分多い系では、気泡の抗力係数は剛体球の抗力係数に近づくことが知られているが、各物質とも、濃

Table 1 Physical properties of contaminant

	1-propanol	1-butanol	1-pentanol	Triton X-100
$k_a [\text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{s}]$	0.508	1.70	5.08	50
$b [\text{mol}/\text{m}^3]$	179	62.5	21.7	6.6×10^{-4}
$k_a b [1/\text{s}]$	90.9	106	110	3.3×10^{-2}
$G_{\max} [\text{mol}/\text{m}^2]$	5.9×10^{-6}			2.9×10^{-6}

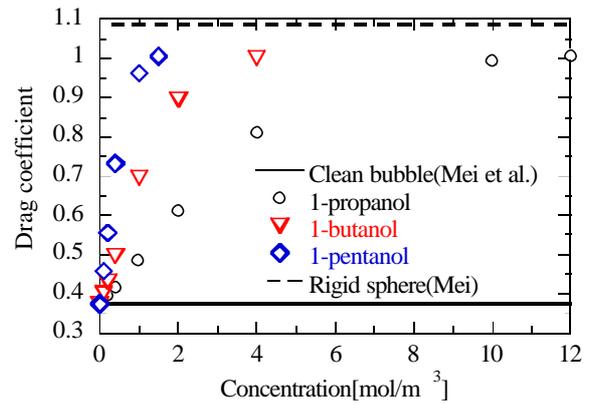


Fig. 2 Drag coefficient of a bubble

Table 2 Volume concentration of contaminant (above) and drag coefficient of a bubble (below)

$k_a C [1/\text{m} \cdot \text{s}]$	1-propanol	1-butanol	1-pentanol
0.508	1mol/m ³ 0.484	0.3mol/m ³ 0.463	0.1mol/m ³ 0.458
1.70	2mol/m ³ 0.611	0.6mol/m ³ 0.566	0.2mol/m ³ 0.555
5.08	10mol/m ³ 0.994	3mol/m ³ 0.971	1mol/m ³ 0.962

度が高くなると抗力係数が剛体球のものに近づくことが確認できる。しかし、同じバルク濃度で比較すると物質によって抗力係数が異なる。

界面活性剤の液相から気泡表面への吸着流束は、(9)式右辺第 1 項で評価されるように、吸着係数 k_a と気泡表面近傍のバルク濃度 C_s の積に比例する。そのため、 k_a が小さい 1-プロパノールは気泡表面への吸着がおこりにくく、抗力係数の濃度依存性が小さいと考えられる。また、界面活性剤の気泡表面から液相への脱離は(9)式右辺第 2 項で評価される。定常状態の濃度分布を厳密に予測することは困難なので、 C_s を無限遠方のバルク濃度 C で近似し、 $k_a C$ が一定になるようにバルク濃度 C を設定した場合の気泡の抗力係数を Table 2 に示す。上段に C 、下段に抗力係数が示されている。Table 2 より、 $k_a C$ が等しいときに、抗力係数は 1-プロパノール、1-ブタノール、1-ペンタノールの順に小さくなることがわかる。また、最大で $k_a C=1.70$ のときに 1-プロパノールと 1-ペンタノールの抗力係数が約 10% 異なることがわかる。1-ペンタノールよりも 1-プロパノールの $k_a b$ が小さく、界面からの脱離がおこりにくいため、界面活性剤の影響をより強く受けるためだと考えられる。

4.2. 擬似非定常計算

Fig. 3 に、Triton X-100 の不純物濃度を変えたときの、気泡の抗力係数の時間変化を示す。横軸は無次元時間を表す。各濃度とも、定常状態の抗力係数は剛体球のものとなるが、抗力係数がきれいな気泡のものから剛体球のものに遷移して定常状態に至るまでの時間スケールが、濃度によって大きく異なる。(9)式右辺第 1 項で表される不純物の吸着流束が C_s に比例するのに対し、第 2 項で表される脱離流束は G に比例するが C_s によらないため、バルク濃度が高いと、 G の小さい初期段階では吸着が支配的となり、剛体球の抗力係数への遷移が速く進むと考えられる。

無次元時間と終端速度の積で定常状態に達するまでの気泡の上昇距離を評価し、実験結果⁽²⁾との比較をおこなった結果を Table 3 に示す。各条件とも、本計算で評価した上昇距離結果が実験結果と定性的に一致している。このことから、擬似非定常計算により、不純物吸着の時間スケールのオーダーを評価することが可能であることがわかる。実験結果との差は、実験では、不純物の吸着による抗力の変化によって気

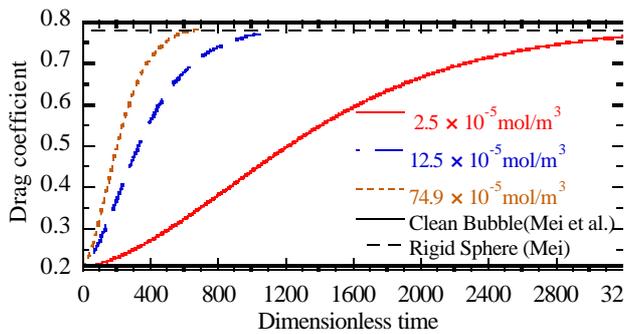


Fig. 3 Time evolution of drag coefficient of a bubble

Table 3 Comparison of distance between experiment and numerical simulation

Concentration[mol/m ³]	2.5×10^{-5}	12.5×10^{-5}	74.9×10^{-5}
Experiment ⁽²⁾	0.44m	2.3m	3.7m
Numerical	1.0m	1.6m	>4.5m

泡の上昇速度が変化するのに対し、本計算では、気泡の上昇速度が常に一定であるためだと考えられる。

Fig. 5に、定常計算をおこなった3種類の物質について、抗力係数の時間変化を示す。横軸は、経過時間と終端速度から算出した、気泡の上昇距離を表す。Triton X-100と比較して、定常状態に達するまでの移動距離が短いことがわかる。吸着係数や脱離係数が異なると、抗力係数の時間変化が異なることが予想されるが、1-プロパノールの12mol/m³、1-ブタノール4mol/m³、1-ペンタノール1mol/m³を比較すると、移動距離と抗力係数の関係はほぼ等しいことから、今回の計算範囲においては、定常状態の抗力係数が等しい場合、時間変化もほぼ等しいことが示唆される。また、濃度が高い場合、Cuenotら⁽⁴⁾と同様に、抗力係数が最大値をとった後に減少し、定常解に達するという傾向が見られた。

今後は、界面での吸着量の時間変化の解析などにより、より詳細な解析をおこなう。また、不純物の種類を変えた数値計算や、実験との比較により、界面活性剤が気泡の挙動に与える影響についてより詳細な解析をおこなう。

5. 結言

不純物を含む水中の上昇気泡について、界面活性剤の気泡表面への吸着によるマランゴニ効果を考慮した数値計算を行い、抗力係数が定常状態に達するまでの時間スケールが界面活性剤濃度に強く依存するという、実験結果と定性的に一致する結果を得た。また、界面活性剤の種類を変えて計算をおこない、吸着係数や脱離係数が、定常状態の気泡の抗力係数に与える影響について、定性的な評価をおこなった。

参考文献

- (1) Frumkin, and Levich, Zhur. Fiz. Khim, **21** (1947), pp.1183.
- (2) Y. Zhang, and J. A. Finch, "A note on single bubble motion in surfactant solutions," J. Fluid Mech., **429** (2001), pp.63-66.
- (3) S. Takagi, A Yamamoto, and Y. Matsumoto, "Numerical analysis of a rising bubble in a contaminated liquid," Proc. ASME FEDSM '99, (1999), FEDSM99-7102 (in CD-ROM).
- (4) B. Cuenot, J. Magnaudet, B. Spennato, "The effects of slightly soluble surfactants on the flow around a spherical bubble," J. Fluid Mech., **339** (1997), pp.25-53.
- (5) R. Mei, J. F. Klausner, and C. J. Lawrence, Phys. Fluids, **6** (1994) pp.418-420.
- (6) R. Mei, Int. J. Multiphase Flow, **19** (1993), pp.509-525.

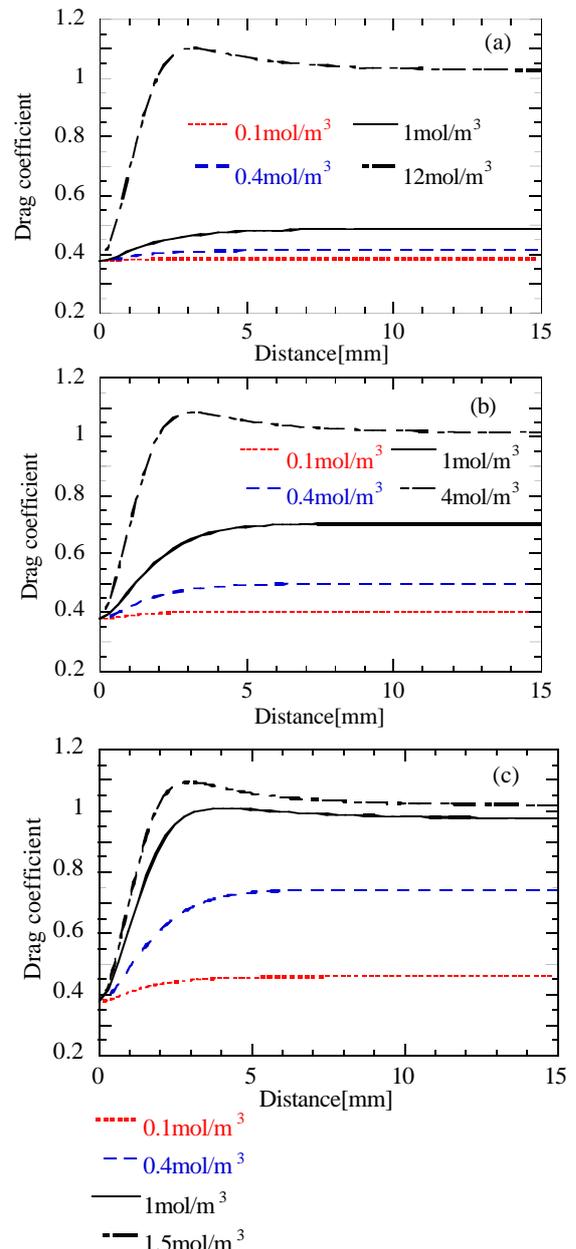


Fig. 4 Time evolution of drag coefficient of a bubble (a)1-propanol, (b)1-butanol, (c)1-pentanol