

マイクロバブルを用いた微粒子吸着機構の解明

Adsorption Mechanism of Fine Particle Using Microbubble

80716605 鈴木佳那子 (Kanakano Suzuki)

Supervisor : 菱田公一 (Koichi Hishida)

1. 緒言

近年深刻化している水質汚染を背景として、汚染物質の分離技術の研究が盛んに行われている。中でも、微粒子の懸濁液中に、直径が数十 μm のマイクロバブルを発生させ、負に帯電する気泡界面に正に帯電する微粒子が、吸着して浮上する性質が明らかとなり⁽¹⁾、高い分離効果が報告されている⁽²⁾が、そのメカニズムについてはいまだ解明されていない。

本研究では、蛍光粒子を懸濁微粒子とし、マイクロバブルによる微粒子分離効果を、透過光強度変化計測により評価した。また、分離効果が得られる条件において、気泡挙動と周囲流動場を可視化計測し、微粒子の吸着率を評価する手法を提案した。この評価手法を、大きさの異なる気泡を混入した場に適用し、気泡界面への蛍光粒子吸着効果と気泡近傍の流動構造変化の関係を明らかにすることを本研究の目的とした。

2. 実験装置および実験条件

実験装置の構成を Fig.1(a)に示す。実験流路には高さ 1m、幅 70mm、奥行き 25mm のアクリル製チャンネルを用い、マイクロバブルを含む作動流体を上向きに流し、蛍光粒子懸濁液を高さ 200mm もしくは 400mm の位置から 13l/min のポンプを通じて混入し、高さ 650mm の位置で排水を行った。マイクロバブル発生装置には、気液二相流体に対し加圧及び急減圧を行うことで微小な気泡を発生させる加圧溶解式の気泡発生装置 (ニクニ, M25NP15F04HD) (Fig. 1(b))を用い、作動流体を水および、界面活性剤 TritonX-100 を添加した水とすることで気泡径を変化させた。このとき空気流量は 2 l/min. で一定とした。まず流路内にマイクロバブルを含む水を満たし、懸濁液を 2l 混入した後、気泡流および懸濁液の混入を同時に停止して、気泡が静止液相中を浮上する様子を調べた。各実験条件を Table 1 に示す。本研究で用いた蛍光粒子の電気的性質に関しては、溶液を密閉セルに満たし、電界を印加したときの電気泳動速度を計測してゼータ電位を求め、正に帯電することを確認した。

3. 計測手法

3.1 透過光強度変化計測

気泡混入による懸濁度の変化を調べるため、高さ 535mm の位置で、レーザー光を照射し、その透過光強度変化をパワーメータにより計測した。懸濁液には 10 - 200ppm の蛍光粒子 (Lefranc et Bourgeois, FLASHÉ Painting) 溶液を用い、水のみを透過するときのレーザー光強度($I_0 = 340 \text{ mW}$)を基準として、気泡および懸濁液の混入停止後を 0 分としたときのレーザー光透過率(I/I_0)を 1 分毎に計測した。

3.2 可視化計測法

微粒子が気泡界面に吸着する際の気泡挙動と周囲流動場の関係を調べるため、Fig. 2(a)に示す可視化計測システムを適用した。流路中央にレーザーシートを照射し、励起波長($\lambda = 527\text{nm}$)を遮断するカットオフフィルタ(565nm - 700nm : $T \geq 90\%$, 532nm : $T \leq 0.05\%$)を通して撮像を行う LIF 法を用いる

ことで、気泡表面でのレーザー光散乱による CMOS 素子の飽和を防ぎ、気泡周辺の蛍光粒子の動きを可視化した。加えて、レーザーシート後方からの LED 群($\lambda = 607\text{nm}$)照射により気泡形状の同時取得を行った。高速度カメラ (Vision research, phantom V7.1) と YLF レーザ (Quantronix, 527DP) はパルスジェネレータにより同期を取り、サンプリングレートを 100Hz または 1 kHz として画像取得を行い、得られた画像対に対し PTV (Particle imaging velocimetry) 処理をして蛍光粒子の速度を算出した。また、得られた画像から、計測領域中を気泡が占める割合である局所ボイド率を算出した。

3.3 吸着率の評価法

本研究では、気泡混入による微粒子の分離効果を評価する手法を提案する。可視化計測により得られた画像から算出した速度のうち、気泡に吸着した蛍光粒子の上昇速度は、浮遊している蛍光粒子に比べ十分速いことを利用し (Fig. 2(b)), 全蛍光粒子数(N_{all})に対して気泡の上昇速度以上の速度をもつ粒子数(N_b)を評価し、その割合 $s (= N_b / N_{all})$ を吸着率と定義した。

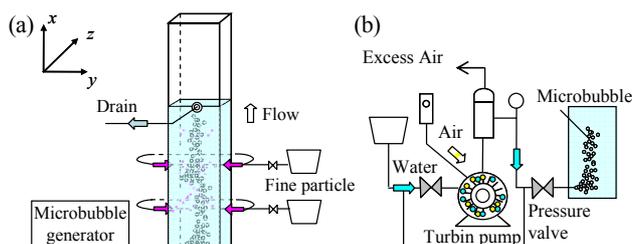


Fig. 1 Schematic diagram of (a) experimental apparatus. (b) microbubble generator.

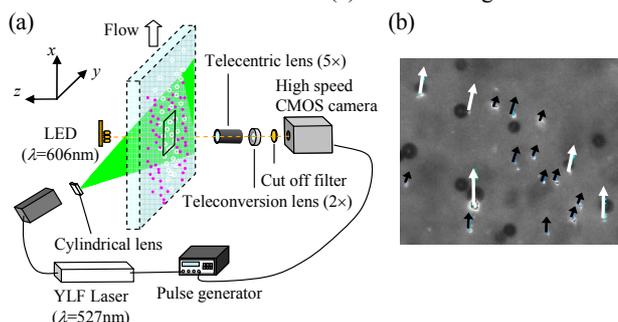


Fig. 2 (a) Schematic diagram of optical setup. (b) The example of captured image with PTV vectors.

Table 1 Experimental conditions

Liquid / Gas phase	Water / Air
Channel size	1000mm × 70mm × 25mm
Liquid velocity : v	Static
Bubble diameter : d_m	Tap water : 50 - 60 [μm] Triton X-100 (1ppm) : 20 - 30 [μm]
Bubble rise velocity : u_b	0.569 - 4.22 [mm/s]
Bubble Reynolds number : Re_b	$1.65 \times 10^{-2} - 3.06 \times 10^{-1}$
Fine particle	Fluorescent particle : 10 - 200 [ppm]

4. 結果および考察

4.1 気泡混入による懸濁度変化

Figure 3 に 100 および 50ppm の蛍光粒子溶液と水中に発生させた気泡を混入した場合の透過光強度変化を示す。図には、気泡および懸濁液のみを混入した場合の結果も示した。どちらの濃度においても気泡群の通過後に、懸濁液のみの透過率を超える結果となり、気泡混入による蛍光粒子の浮上分離効果が確認された。

10ppm の蛍光粒子溶液に対して、水中および界面活性剤 TritonX-100 を 1ppm 添加して発生させた気泡を混入した場合の結果を Fig. 4 に示す。前者は、時間が十分経過した後も懸濁液の透過率を超えなかったのに対して、後者は約 8 分後には懸濁液の透過率に近づいている。界面活性剤を添加して発生させた気泡は、添加しない場合に比べて直径が約半分程度になることから、気泡による浮上分離効果は、気泡径が小さい方が大きくなることが確認された。

4.2 可視化計測結果

蛍光粒子溶液 10ppm を用いたときの、懸濁液混入位置から 135mm, 180mm, 225mm 上流で得られた画像から求めた吸着率と時間経過の関係を、二種類の大きさの気泡を混入した場合について Fig. 5 に示す。両者とも時間経過に伴い、吸着率が一定もしくは増加し、その効果は気泡径が小さいときに向上することが確認された。これは気泡が吸着した微粒子を剥離することなく浮上することを示している。

懸濁液混入位置から 135mm 上流における、吸着率と局所ボイド率の関係を Fig.6 に示す。どちらの大きさの気泡を混入した場合においても、局所ボイド率の増大に伴い吸着率が増加することが確認され、さらに、同じ局所ボイド率の場合、気泡径が小さくなると吸着率が増加する傾向がみられた。これは気液混合相中の空気の体積分率が等しい条件下で気泡径が半分程度になったことで、比表面積が約 2 倍に増加し、気泡と微粒子の接触確率が高くなったために同じ局所ボイド率においても、吸着効果が促進したと考えられる。

気泡および懸濁液の混入停止直後(30 秒後)の渦度分布を Fig. 7 に示す。界面活性剤を添加したとき、添加しない場合に比べて渦の動きが大きくなることが確認された。これは気泡の小型化によって浮上速度が遅くなり、数密度が高くなったことで浮上する気泡と静止液相との相対運動により生じる後流が、気泡周囲流動場を乱す作用が大きくなったためと考えられる。本研究で用いた蛍光粒子が気泡表面へ吸着する効果は、混入する気泡径が小さく、局所ボイド率が高いときに向上することが確認され、浮上する気泡の周囲流動場を乱す作用が増大して微粒子との接触確率が高くなったことが気泡の微粒子吸着を促す原因となったと考えられる。

5. 結言

蛍光粒子の懸濁液と大きさの異なる二種類の気泡を混入した場に、透過光強度変化計測および可視化計測を適用し、以下の知見を得た。

- 100ppm および 50ppm の蛍光粒子溶液の懸濁度が、気泡混入により低減し、気泡の浮上に伴う微粒子分離効果が確認された。
- 混入する気泡径が約 20-60 μm の場合、気泡径が小さく、局所ボイド率が高いとき、微粒子吸着効果が向上することが確認された。

参考文献

- (1) Ohnari, H. et al. Journal of Visualization, **23**(2003), pp.105-106
- (2) 寺坂宏一ら, 混相流, **21** 巻 1 号(2007), pp77-83

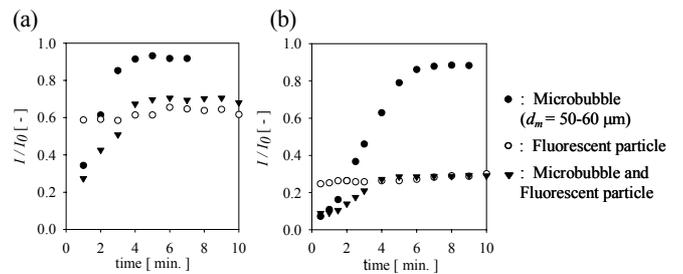


Fig. 3 Time variation of light Intensity in case of fluorescent particle (a) 100 ppm and (b) 50ppm.

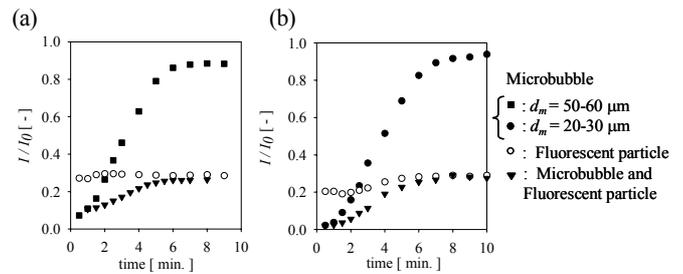


Fig. 4 Light intensity variation with fluorescent particle 10 ppm and microbubble generated in (a) tap water or (b) surfactant 1ppm.

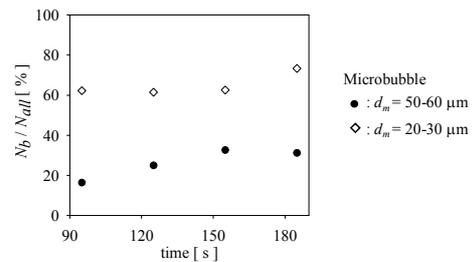


Fig. 5 Adsorption effect with both microbubbles.

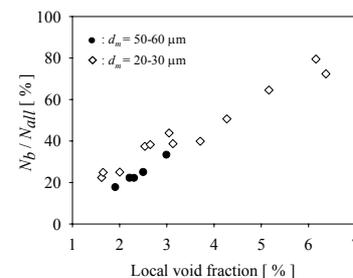


Fig. 6 Adsorption effect and local void fraction.

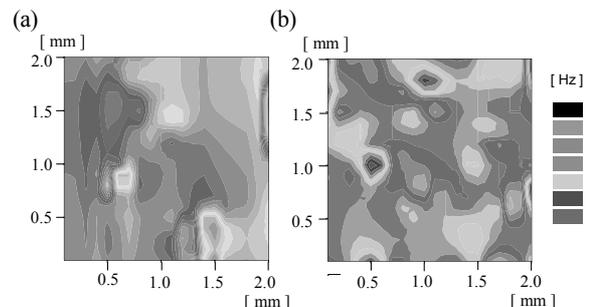


Fig. 7 Vorticity distribution map with microbubble generated in (a) tap water or (b) surfactant 1ppm.