

論文の内容の要旨

チャンネル内上昇気泡流乱流のマルチスケール構造に対する界面活性剤の影響

小笠原 紀行

1. 緒言

気泡流は、化学プラントや水質浄化施設の曝気槽、熱交換器などを代表例として幅広い工業装置に応用されている。さらに、マイクロバブルを用いた船舶推進抵抗低減の技術など、低い環境負荷やシステムの簡便性といった点で注目を集めている。しかしながら、気泡流のもたらす数々の効果に関するメカニズムには依然として不明瞭な点が多く残されている。物質・熱交換の促進や壁面摩擦抵抗の低減など産業的利用価値の高い効果のメカニズムの解明には、乱流場に気泡が存在する場合の乱流変調に関する普遍的かつ詳細な理解が求められる。また、個々の気泡運動の微視的な流動構造と流動場全体の巨視的な乱流構造の相関については未解明であり、これら異なるスケール間における相互作用を的確に捉えられる実験に基づいたより深い物理現象の理解が気泡流研究に求められる最大の課題となっている。

濃度マランゴニ効果で説明される水道水中における気泡の終端速度の低下で知られるように、水中における気泡挙動は液相に含まれる微量の界面活性剤に大きく影響される。単一気泡を対象とした従来の研究では水中に含まれる不純物の影響が不可欠なパラメータとして設定され、上昇過程の気泡変形や非定常挙動、三次元運動の安定性などに関する考察がされている。また、球体が受ける流体力に関しても理論解析や高精度な数値解析の進展による多くの知識の蓄積がある。そこで、本研究では液相に混入する界面活性剤を実験条件として設定した上で気泡群の挙動を個々の気泡運動に着目して解析し、気泡-液相間の相互作用を明らかにすることを目的として実験を行った。気泡流の大域的な構造特性を解析する際、気泡表面における界面活性剤分子の存在やそれに伴う気泡-液相間の相互作用の変化など、気泡流のマルチスケール構造を強く意識した上で内在する力学の理解に努める点が本研究の特色である。

2. 実験装置・条件

実験対象として、高さ 2.5m、断面が 40mm×400mm の鉛直チャンネル内における上昇気泡流を採用した。気泡は内径 0.1mm のステンレス細管 474 本から構成した気泡発生装置から空気を加圧することにより発生させた。測定領域は、単相時に完全発達乱流が得られる気

泡発生装置より 2.0m 下流とした。液相には水道水、添加する界面活性剤には 1-Pentanol, 3-Pentanol と Triton X-100 を用いた。実験条件としては、バルクレイノルズ数 (10100, 7700, 4600, 1350), 平均ボイド率 (1%以下), 界面活性剤の種類・濃度をパラメータとして設定した。計測手法及び計測対象は、高速度カメラによる気泡挙動の撮影及び、レーザードップラー流速計 (LDV) による液相流速の計測である。また、各条件における界面活性剤溶液中でのマランゴニ効果の強度を評価するために、静止流体中において単一上昇気泡実験を行い気泡の抗力係数を測定した。

3. チャンネル内上昇流中における気泡の壁面方向への移動傾向と界面活性剤の影響

図に界面活性剤溶液の種類別 (1-Pentanol 20ppm, TritonX-100 2ppm) にそれぞれの気泡流の様子を示す。まず、界面活性剤の添加による気泡合体の抑制効果により、どちらの場合も平均気泡径 1mm 程度の単分散の微小球形気泡群が得られる。しかしながら、1-Pentanol 20ppm 溶液では気泡が壁面近傍へ著しく集積し気泡クラスタを形成しているのに対して、TritonX-100 2ppm 溶液中では気泡がチャンネル全体に一様に分散しており、全く異なる流動構造を呈している。前者のような壁面ピーク型の局所ボイド率分布は、過去にも多くの報告がなされている (例えば Serizawa et al. 1975, Wang et al. 1987, So et al. 2002) が、その因子に関しては不明な点が多い。

単一上昇気泡の抗力係数の測定から、低濃度の Pentanol 溶液と Triton X-100 2ppm のそれぞれの条件では気泡に引き起こされるマランゴニ効果の強度が異なり、前者では表面がハーフスリップの状態であるのに対し、後者ではほぼノースリップの状態になっていることがわかった。従来の数値計算結果から、表面が滑りなしの剛体球と自由に滑ることができるクリーンな気泡とでは、周囲のせん断に起因する揚力の大きさが異なることが示されている (Legendre & Magnaudet 1998, Bagchi & Balachandar 2002)。これらから、マランゴニ効果による気泡表面の境界条件の変化がせん断に起因する揚力に影響を及ぼし、ノースリップの気泡表面に近づくにつれて揚力が減少した結果、壁面集積傾向が弱まったものと考えられる。また、チャンネル内上昇層流内に 1mm 程度の単一気泡を導入する実験を行い、Pentanol 濃度を増大することで気泡の揚力係数が減少して壁面方向への移動傾向が弱まり、ノースリップ状態になる Triton X-100 2ppm の場合には気泡がせん断の影響をほとんど受けずに鉛直に上昇する様子を確認した。マランゴニ効果による気泡表面の固体化に伴う揚力の減少は Fukuta et al. (2007)による高精度な単一気泡の数値計算結果とも定性的な一致を見ている。以上より、本研究における気泡の壁面方向への移動傾向は平均せん断に起因する揚力がメカニズムの要因であると考えられ、水中の界面活性剤の存在に多大な影響を受けるもとの判断できる。(Takagi et al., 2008)

4. 局所ボイド率分布の相違による液相乱流構造の変化

以上までに、マランゴニ効果によるせん断に起因する揚力の変化が気泡の壁面方向への

移動傾向に大きく関与し、低濃度の Pentanol 溶液中では壁面ピーク型の局所ボイド率分布をとるのに対し、Triton X-100 2ppm 溶液中には一様型をとることが示された。さらにこの両者に対して 2 次元 LDV を用いて液相流速の測定を行い、速度の二次の相関項までの評価を行った。

局所ボイド率分布が壁面ピーク型となる 1-Pentanol 20ppm の場合、チャンネル中央部の広い領域において平均速度分布の平坦化、変動速度分布（主流方向、壁面垂直方向共に）の減少と平坦化が確認された。このときレイノルズ応力は单相流と比較して著しく減少しており、これらの傾向は平均ボイド率が増加するほど顕著になった。これは、壁面近傍では集積した気泡群が壁面せん断によって生産される乱れエネルギーのチャンネル中央部への伝達を遮蔽するのに対して、チャンネル中央部では気泡運動に由来する乱れ、いわゆる擬似的な乱流が変動速度の強度を支配するためであると考えられる。このとき、壁近くで形成される気泡クラスタのspan方向の最大サイズは z^+ で 500 ($Re_{\tau}=300$ のとき 40mm に相当) 程であり、单相乱流における壁近傍の縦渦や低速ストリークに代表される準秩序的構造が大きな変調を受けていることが示唆される。一方、局所ボイド率分布が一様型となる Triton X-100 2ppm の場合、单相流と比較して平均流速分布は変化せず、主流方向の変動速度分布はさらに増大する。これに対して壁面垂直方向の変動速度は極僅かに増加する程度であるが、これはほぼ鉛直に上昇する気泡が誘起する乱れの非等方性による。また、レイノルズ応力分布も单相流とほぼ同様となる。つまり、気泡が一様に分散している場合には单相乱流の構造が維持され、その上にさらに気泡運動によって生産される擬似的な乱れが加算されるような乱流構造となっている。

壁乱流における気泡混入による乱流変調は気泡が壁面近傍に極度に集積することによって効果的に引き起こされるわけであるが、その過程において気泡クラスタの果たす役割は非常に大きい。気泡クラスタ生成の詳細なメカニズムについては未解明の点が残されているが、壁面近傍に集積した気泡が二次元的な面内でその運動を拘束されるという、気泡運動に対する幾何学的な拘束条件が重要であると考えられる。

5. 結言

チャンネル内上昇気泡流乱流では局所ボイド率分布の相違により気泡混入によってもたらされる乱流変調が大きく異なる。特に壁面ピーク型のボイド率分布を取る場合、気泡クラスタに象徴される壁面近傍に極度に集積した気泡群により壁面せん断による乱れのエネルギーがチャンネル中央に伝わりにくくなる乱れの遮蔽効果が生じ、单相乱流とは全く異なった流動構造となる。これらの巨視的な乱流変調のメカニズムには、水中に含まれる界面活性剤によるマランゴニ効果という微視的な影響が深く関与している。本研究では、この微視的な影響が気泡に働く揚力という言葉ばメゾスケールの気泡-液相間相互作用を介して大域的な流動構造の変化へとつながる過程を明らかにした。

参考文献

- Bagchi, P. & Balachandar, S., *Phys. Fluids*, **14**, 2719-2737. (2002)
- Fukuta, M. et al., *Phys. Fluids*, **20**, 040704. (2007)
- Legendre, D. & Magnaudet, J., *J. Fluid Mech.*, **368**, 81-126. (1998)
- Serizawa, A. et al., *J. Fluid Mech.*, **2**, 235-246. (1975)
- So, S.-H. et al. *Exp. Fluids*, **33**, 135-142. (2002)
- Takagi, S. et al., *Phil. Trans. R. Soc. A*, **366**, 2117–2129. (2008)
- Wang, S. K. et al., *J. Multiphase Flow*, **13**, 327-343. (1987)