

せん断流中における単一気泡の挙動に対する界面活性剤の影響

福多 将人

1 序論

僅かに界面活性剤を含む水中を上昇する気泡は、純水中を上昇する気泡に比べて、その上昇速度が大幅に低下することが知られている。この現象は、液相中の界面活性剤分子が気泡表面へ吸着・脱離することで現れるマランゴニ効果によってそのメカニズムの説明が与えられている[1]。気泡挙動に対する界面活性剤の影響については、これまでに、実験[2]及び数値計算[2], [3]により詳細な解析が行われている。これらの研究によると、気泡表面はクリーンな状態のときにせん断応力の働かないフリースリップ面であるのに対し、界面活性剤の吸着により表面が十分に汚れたとき、滑り速度を持たないノンスリップの状態にまで変化していると考えられている。このとき、気泡は水中で剛体球のような挙動を示し、マランゴニ効果による境界条件の変化は気泡流の巨視的な流動構造にまで影響を与えることが実験により示されている[4]。実験結果から、界面活性剤の種類と濃度の違いによる気泡の壁面集積傾向の変化が観測されており、これは、界面活性剤溶液中での気泡表面における境界条件の変化と関連して、せん断流中の気泡に働く揚力が変化することに起因していると考えられている。このため、界面活性剤の吸着が気泡に働く揚力に与える影響を解明することが求められている。

以上を背景として本研究は、単純せん断流中の単一気泡を解析対象として、気泡に働く揚力がマランゴニ効果によってどのように変化するかを明らかにすることを目的とした。解析手法として、変形の効果を無視した球形気泡に関しては、気泡回りの流れ場の情報を詳細に得ることの可能な、気泡形状に沿った計算格子を生成する境界適合格子法を採用して解析している。また、変形気泡に関しては、変形量を微小と仮定して、理論解析的な手法である領域摂動法を取り入れた数値計算手法を開発し、これを用いて揚力に対するマランゴニ効果と変形の影響の解析を行っている。

2 Stagnant cap model

はじめに、気泡表面における境界条件の変化による気泡回りの流れ場の変動、気泡に働く揚力の変化について議論する。ここでは、マランゴニ効果による境界条件の変化を近似的に

表した Stagnant cap model[5]を用いて解析を行った。このモデルでは、気泡表面において界面活性剤の吸着した領域で十分に大きなマランゴニ応力が発生し、表面速度がゼロにまで低下してノンスリップ面になるとみなすことでマランゴニ効果を模擬する。これを用いて、単純せん断流中における球形クリーンバブルの表面下流側に形成されるノンスリップ面の大きさと、このときの気泡に働く揚力の関係を数値的に求めている。但し、表面においてノンスリップ面は軸対称に形成されるとしている。気泡径を代表長さとしたレイノルズ数が 100 の条件での計算結果において、表面でのノンスリップ面の拡大による揚力の低下が見られた。表面に作用する応力を圧力成分と粘性応力成分に分け、各成分の揚力への寄与を見ると、抗力に対しては、粘性応力と圧力による寄与がほぼ同じオーダーになる。これに対し、表面でフリースリップ面を有するクリーンバブルに働く揚力は圧力成分の寄与が支配的となる。ノンスリップ面が増加すると、圧力成分の寄与が減少することにより揚力が低下する傾向が得られ、これより、気泡に働く揚力に対しては慣性の効果が重要であることが分かる。また、気泡表面の半分程度の領域が界面活性剤で覆われノンスリップ面となると、揚力に対する圧力と粘性応力の寄与が釣り合うことで揚力はほぼゼロにまで低下した。さらに、表面の半分以上の領域がノンスリップ化したとき、粘性応力の寄与により、クリーンバブルの場合とは逆向きに、オーダーの一桁程度小さい揚力 (Negative lift) が発生した。

3 マランゴニ効果の直接数値計算

次に、界面活性剤の気液界面への吸着・脱離過程を考慮して、マランゴニ効果を直接的に扱った数値計算を行うことで、現象に対してより詳細な解析を行う。気泡表面において界面活性剤は、流体力学的作用である移流、拡散に加えて、液相からの吸着、脱離による輸送量がつり合うことで濃度分布が決定される。吸着・脱離過程に関しては、Langmuir kinetics に基づいた Langmuir-Hinshelwood の式[6]を採用した。求めた表面濃度分布から接線方向に作用するマランゴニ応力を算出し、これと釣り合うせん断応力が表面に発生するように気泡回りの流れ場の変動を求めている。このときの流れ場の変化が気泡に働く揚力に対してもたらず変化を数値的に解析することを目的とする。気泡レイノルズ数は前章と同じとし、本研究では特に、界面活性剤の吸着量と脱離量の比を表すラングミュア数の影響の解明に重点を置いた。これは、吸着・脱離特性を表す吸着平衡定数が界面活性剤の種類によって大きく異なり (例えば Chang & Franses[6], Table1), この違いが気泡の表面濃度分布の決定に大きく関わっているためである。ラングミュア数をパラメーターとした数値計算の結果、表面からの脱離量の低下は、

定常状態において気泡表面における界面活性剤吸着量の増加をもたらす、高い表面濃度及び表面濃度勾配が得られるため、表面に大きなマランゴニ応力が作用する。そのため、表面速度が低下し、Stagnant cap model の場合と同様、揚力が低下した。このときの揚力に対する圧力、粘性応力の寄与に関しても、Stagnant cap model の場合と同様の傾向を示しており、揚力の発生には慣性の効果が大きく影響することが分かった。また、脱離量が十分小さい条件においては、汚れた気泡に対してもマランゴニ効果により Negative lift が発生するという結果が得られた。ラングミュア数が大きくなり、表面下流側でノンスリップ面が現れたとき、気泡表面は Stagnant cap model と類似の境界条件で表すことができる。そこで、計算結果から気泡表面のフリースリップ面とノンスリップ面の境界位置を算出し、ノンスリップ面の大きさとこのときの気泡に働く揚力の関係を求め、結果を Stagnant cap model と比較した。これより、本章での計算により得られた揚力は、同程度のサイズのノンスリップ面を有する Stagnant cap model の場合より最大で 2 倍程度大きくなるという結果が得られた。これは濃度分布の非軸対称性に起因する現象と考えることができる。気泡表面に吸着した界面活性剤は流れのせん断により非軸対称な濃度分布を形成し、流れ場の非対称性を増大させる。これにより揚力に対する圧力の寄与が大きくなり、軸対称濃度分布を仮定した Stagnant cap model に比して大きな揚力を生み出す結果となった。

4 変形気泡に働く揚力

最後に、界面活性剤溶液中の変形気泡に働く揚力について議論する。ここでは、気泡の変形量は微小と仮定して気泡の形状を球面調和関数を用いて近似的に記述し、変形気泡表面における境界条件式を球面上で展開する。導出した境界条件式を用いて、変形により現れる流れ場の擾乱を数値的に算出した。この結果、レイノルズ数 100 においては気泡に対して軸対称の変形モードが大きく現れ、流れ場のせん断と干渉して揚力が増加することが分かった。気泡の非軸対称な変形モードは揚力の低下をもたらすが、せん断率の小さい条件においては非軸対称モードの変形量は小さくなり、揚力低下の効果は小さくなった。また、界面活性剤溶液中では、気泡表面への吸着量が増加して大きいマランゴニ応力が発生することにより、軸対称モードの変形がもたらす揚力増加の効果は小さくなる傾向にあることを示した。

5 結論

本研究では、せん断流中の気泡に働く揚力に対する界面活性剤の影響を解明することを

目的とし、単純せん断流中の気泡回りの流れに関する直接数値計算を行った。その結果、球形とみなせる気泡に関して、有限なレイノルズ数領域でのマランゴニ効果による揚力の低下を示した。また、変形の効果については、非軸対称な変形が揚力を低下させる効果を持つのに対し、軸対称な扁平は揚力を増加させる効果があることが分かった。

参考文献

- [1] A. Frumkin & V. Levich, *Zhur. Fiz. Khim.*, **21**, 1183, 1947.
- [2] 高木, 宇田, 渡邊, 松本, *機論 B 編*, **69**, 2192, 2003.
- [3] B. Cuenot, J. Magnaudet & B. Spennato, *J. Fluid Mech.*, **339**, 25, 1997.
- [4] 小笠原, 高木, 松本, *混相流研究の進展*, **1**, 9, 2006.
- [5] P. Savic, *Tech. Rep. MT-22*. Natl Res. Council. Can., Div. Mech. Eng., 1953.
- [6] C. H. Chang & E. I. Franses, *Colloids Surf. A*, **100**, 1, 1995.