

まえがき

様々な工学的な応用の場でマイクロバブルが話題に取りあげられるようになって久しい。マイクロバブルは比較的簡単に発生させることができあり、その特徴を理解した上でうまく利用すれば、手軽に様々な機能を、気泡を含む流体に付与することができる。例えば、上水や下水などの水処理など様々な環境装置、化学工業上の反応装置の高効率化、高機能化への応用が可能である。さらには超音波造影剤など医療分野への応用・開発が行われている。しかし、後述するように、様々なマルチスケール、マルチフィジックスの現象を含んでおり、詳細な研究と知見に基づいて技術開発を行っていく必要がある分野である。

マイクロバブルの特徴の第一は、微小粒子と同じく、体積あたりの界面面積が大きいことにある。界面面積は半径に反比例して増加する。例えば、1リットルの水に体積率1%の空気泡があるとしよう。もし気泡が一つ（直径約26.7mm）であれば表面積は $2.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ にすぎないが、100万個に分裂（直径約0.267mm）すれば表面積は 0.225 m^2 、さらに1兆個に分裂（直径約2.67μm）すれば表面積は 22.5 m^2 、およそ14畳の面積となる。1リットルの水に大きな部屋分の界面面積が存在することになる。実際には表面張力の効果で気泡は縮むので体積率、界面面積ともに減少するが、気泡径が小さくなれば、界面面積が増加する傾向は同じである。気液界面を通してのガス拡散、反応などは界面面積の大きさに比例して増大するから、気泡を小さくするほど有利に働くことになる。

次に気泡の液中での上昇速度を考えてみよう。上昇速度が遅ければ、気泡の液中での滞在時間は延びることになる。例えば、直径100μmの気泡の純水中の上昇速度は7.7mm/sであるが、10μmになると0.077mm/sとおよそ直

径の2乗に比例して小さくなる。界面活性剤を ppm オーダーの少量でも含むと、濃度マランゴニ効果により、さらに上昇速度は半減する。気泡の上昇速度は気泡ブルームの挙動など気泡流の流動構造に大きな影響を及ぼすが、気泡の大きさや気泡界面に吸着する界面活性剤は気泡に働く揚力にも大きな影響を及ぼし、管路内の流動構造に大きな変化をもたらす。その他、界面活性剤には塩と同様に気泡同士の合体を阻止する効果がある。そのメカニズムは十分に明らかにされているとはいひ難いが、気泡界面に吸着または集積している界面活性分子、イオンが気泡界面の安定化や界面同士の電気的反発を生み、気泡間の液膜の破断を抑えていると考えられる。このように、界面状態や気泡の大きさに応じて、様々な流動構造が形成される。気泡が数 mm オーダーになると流れ場との相互作用により大きな変形が起り、乱流境界層の構造に影響し、摩擦抵抗を低減することがわかっている。

周囲の圧力が高くなると気泡の体積は小さくなり、一種のバネ-マス系を構成する。気泡が振動すると音響学でいうところのモノポールとなり、音が放射される。海洋などで雨が降ると十数 kHz の強い音が観測されるが、それは雨粒が海面を叩くと液中にコンマ数ミリ程度の空気泡が取り込まれ、それが振動することによる結果であることがわかっている。半径 1 mm の気泡の固有振動数はおよそ 3 kHz であり、気泡径に反比例して増大する。半径 1 μm の気泡の固有振動数はおよそ 3 MHz となる。また、気泡振動は非線形性が強く、気泡からの放射音にはハーモニック成分やサブハーモニック成分も含まれることになる。これらを利用した超音波診断法が開発され、血管造影など様々な診断に活用されている。さらにカプセル化したマイクロバブルに薬剤を封じ込め、血管網を患部に来たところで強力な超音波で破壊し、DDS（ドラッグデリバリーシステム）として活用しようとする研究や、気泡が振動することによって音響エネルギーを熱に変換することを利用して、強力集束超音波治療を効率的に行う手法の開発なども行われている。

上記のマイクロバブルによって引き起こされる様々な現象を解明しようと思えば、連続体としての振る舞いを考えるだけでは十分な説明は不可能で、気泡の大きさが小さくなるほど、気液界面での分子スケールの現象、すなわち水分子の構造化、界面活性分子の吸着、様々なイオンの集積など、詳細にそ

の構造，様々な非平衡現象などを明らかにする必要がある．混相流としてのマルチスケール性が強く影響をもつ現象で，現在精力的に研究が進められており，今後の展開が望まれる．

本書では，まずマイクロバブルの特徴とその発生方法を示す．その後，水質浄化などに見られる気泡ブルームの物質移動現象，船舶の抵抗低減効果，天然ガスハイドレート生成技術，超音波を併用した医療応用技術，新たな微小カプセル生成技術といった様々な分野における利用について紹介する．同時に，上記に示した今後の研究の方向などにも言及している．今後，マイクロバブルに代表される，界面における種々の現象を含んだ新たな機能性が研究され，新たな技術革新が起きることを期待したい．

2009年1月

東京大学 松本洋一郎