

論文要旨

空間的制約により押しつぶされたバブルのダイナミクス
村野真由子

空間的制限を加えたバブルのダイナミクスについて議論する。空間的に閉じ込められることにより、空間的対称性の破れや特徴的長さスケールの増大、また薄膜の出現等が起き、ダイナミクスはより複雑に、しかし同時により物理的に豊かで興味深いものとなる。本論文では、空間的制限により押しつぶされたバブルのダイナミクスとして、破裂と上昇という2つの現象を取り上げる。

(1) 液体薄膜の破裂における円対称性の破れの効果

バブルが狭い空間に閉じ込められた時、破裂速度は閉じ込めによりどのように変わるかを明らかにすることを目的とした。レイノルズ数に対応する無次元量を導入し、慣性効果に比べて粘性効果が十分に大きい粘性型破裂と、逆に慣性効果が大きい場合の慣性型破裂の2つの領域にわけて破裂速度を導出した。

まず、粘性型破裂では破裂は 1 mm/s 程度の非常に遅い定速で進む。この破裂は、破裂先端にできる液だまり（リム）が成長しないという特徴を示す。これは、破裂によってなくなった薄膜部分の液体は必ず薄膜に溜められていく3次元薄膜の破裂との非常に大きな違いであり、破裂と垂直方向へ液体が逃げるという空間的な非対称性によるものである。実験的に薄膜内の流れや破裂先端の形を調べ、それを基にエネルギーバランスと力のバランスという2つの観点から破裂速度に対する法則を導いた。この法則は、破裂速度は閉じ込めサイズに比例して大きくなることを示す。

一方、慣性型破裂では、擬2次元薄膜の破裂はシャボン玉などで見られる3次元薄膜の破裂[1]と同じ速度法則を持つことがわかった。円対称性を持つ3次元破裂から、円対称性が破れた擬2次元破裂へ変わっても速度法則は不変であるというのは興味深い結果である。

破裂のコントロールは工業や生物学、環境問題など様々な分野で必要とされており、液体薄膜の破裂速度に対してはこれまで薄膜の性質や薄膜の周りの環境を変えた数多くの研究がなされてきている。本研究は、空間的な閉じ込めによる破裂速度の制御の可能性を示したものであり、様々な分野への応用も期待される。

(2) 高アスペクト比断面の流路に閉じ込められたバブルの上昇

2方向から空間的制限を受けたバブルの上昇速度について議論する。流路内でのバブル上昇は原油・天然ガスの輸送や原子力発電の冷却装置、自動車やエアコンの中で見られる Slug 流との強い関連により様々な研究が行われている。本研究では長方形断面の流路を用い、慣性力は効かず粘性力と表面張力が重要となる場合のバブル上昇について調べた。バブルや液滴の現象の理解の難しさの1つに、対象とするバブルや液滴が自由に形を変えられることが挙げられる。本研究においても、流路の中を上昇するバブルの形は未知であり、上昇

速度とバブルの形が相互関係にあることが理解を複雑にしている。そこで、まず初めに何らかの理由である幅を選択したバブルの上昇速度について議論し、次にそのバブルの幅が何によって決められているのかを調べた。上昇中のバブルが液体から受ける粘性力は複雑だが、長さスケールに対するいくつかの条件を課すことによりバブルと壁との間の流れでの粘性散逸が上昇を支配する領域を取り出すことができる。これにより上昇速度に対する新しい法則を導き、実験的にもり立つことを確認した。この速度法則より、流路内を上昇するバブルにかかる抵抗力を求めることができる。これは、3次元流体中を運動する球にかかるストークス抵抗に対応するものである。次に、上で求めた速度法則に従って上昇しているバブルの形について実験的に調べ、バブルの幅に対する式を得た。

本研究の高アスペクト比の長方形断面を持つ流路内は、横からの制限の幅を広くし壁から受ける影響を小さくすることにより、過去の研究で明らかにされたヘレショウセル内でのバブル上昇[2]へと移り変わっていく。そこで、上述の上昇速度とバブルの形について、長方形断面を持つ流路領域からヘレショウセル領域へのクロスオーバーを示した。

また本研究は viscous fingering とも深い関わりがある。viscous fingering と上昇バブルは、速度とバブル（または finger）の幅を使った簡単な変換式の基で同じ現象として扱うことができる可能性があることを示した。これより本研究で得た結果を viscous fingering の問題[3]へと転換でき、viscous fingering に新たな知見が与えられるかもしれない。

本研究では空間的な制限として1方向からの空間的制限（ヘレショウセル）と2方向からの空間的制限（長方形断面を持つセル）の2つの系を扱い、上のような閉じ込められた微小空間内でのバブルの振る舞いの一部を明らかにした。ここから得られた結果は単にこれらの系だけに即するものではなく、さらに一般化し、微小液滴の振る舞いや液体薄膜内の粘性散逸を考える上でも重要なヒントとなることを期待する。

[1] F. Culick, *J. Appl. Phys.*, **31** (1960)

[2] A. Eri and K. Okumura, *Soft Matter*, **7** (2011)

[3] P. G. Saffman and G. Taylor, *Royal Society of London A*, **245** (1958)