

論文内容の要旨

論文題目：表面形状が変化する液滴上の微小構造の回転運動

武居 淳

1. 序論

本研究の目的は、液体と接触している微小構造が液体から受けるトルクを解明し、液体上の微小構造の回転運動を解明することである。液体の表面張力がおよぼす動的特性を解明することは微小領域でのセルフアライメントやハンドリングに対しては広い応用が期待できる。従来研究が扱っているのは構造が軸対称の場合や構造と接触している液体が微量である場合に限定されている。また液体と接触する微小構造にくわわる静的な力や安定性が多く論じられている反面、液滴上で運動する微小構造を詳しく説明したものは少ない。また、液滴と微小構造の力学を明らかにすれば表面張力を用いたマイクロアクチュエーションの設計指針となりうる。

2. 構造物の形状と液体が及ぼすトルクの関係

液滴が微小構造に挟まれる場合に液滴が及ぼすトルクの大きさを実験的および理論的に考察した。微小構造の形状を円板に周期的な変位が加わっていると考え、構造の形状とトルクを理論的に求めた。液滴が及ぼすトルクは摂動の大きさに比例し、摂動の波長が短くなると著しく減少する。また液体の量が減ると平板間の距離が減少し発生するトルクが増大することが確認できた。理論値と実験値は2倍程度の誤差はあるものの 10^{-10} Nm のオーダーは一致した。また、理論は多角形のような一般的な形状にも応用できることを確認した。

3. 構造物に挟まれた液体の慣性および粘性

液滴に浮かぶ板に変位をあたえることで液滴が与える慣性モーメントおよび粘性項をしらべた。慣性モーメントは液滴上に浮かぶ板だけでなく液体自体の質量も寄与していることがわかった。代表長さが 1000 μm の場合、液滴のもつ慣性モーメントは $2.2 \times 10^{-13} \text{ kg m}^2$ であった。粘性項の影響は代表長さの約3乗に比例し、代表長さが 1000 μm のときに $5.63 \times 10^{-12} \text{ kg m}^2/\text{s}$ であることを確認した。

4. 微細加工技術を用いた回転素子の提案

液滴上に浮かぶ構造の動的特性を求めた。液体が接触している構造物との境界を連続的に変化することができれば、微小構造の回転運動も可能となる。エレクトロウェットングを用いて、基板の親水性、疎水性を制御することにより液滴状の構造の連続回転を実現した。直径2mmの板を2.5 μl の水滴にのせた場合、電氣的に液体を支える基板の表面を変化させることで最大で720 rpmの回転を実現した。また、ステップ応答を取ったところ角周波数は $\omega=116$ となった。この値は液体の形状とトルクの関係および動的特性の計測よりもとめた理論から算出される値とほぼ一致した。また、この回転素子は素材が全て透明なもので製作可能なので光学素子としての応用も可能である。回転素子がある程度の重さを持った構造物でも機能する利点もっている。この利点を用いて本章の最後でプリズムを回転素子に組み込みスキャナとして機能することを確かめた。

5. 結論

液体に浮かぶ構造物に働くトルクの理論を確立した。また液体上の板が動いたときに液体がどのような慣性および粘性をおよぼすかを実験的に求めた。論文の最後では、得られた知見を活かし、エレクトロウェットングと組み合わせることで構造物の連続回転を実現した。回転の挙動は理論と整合性がとれ、本研究で得られた知見がマイクロマニピュレーションに応用できることを示した。