

審査の結果の要旨

氏名 陳昱中

近年、液滴を基板上で搬送する、デジタル・マイクロフレイディクスの研究が広く行われている。従来、液滴駆動には、エレクトロ・ウェッティング、液体誘電泳動などが知られているが、液滴の高速移動には表面を超撥液面とすることが有効である。本論文は、Cassie 状態、すなわち、液滴の気液界面がピラー構造により支持される場合の、静電場による不安定現象について検討し、特にピラーの導電性が与える影響について、実験および数値解析から詳細に明らかにしたものである。

本論文は5章からなっている。第1章では、液滴ベースのマイクロフレイディクスについて概観し、ピラー構造による超撥液面、およびその不安定性に関する研究のレビューを行い、それらの分析から、本研究の目的を述べている。

第2章では、ピラー構造上の気液界面形状を数値解析で求めるための3次元電場解析について、その手法の詳細と解析結果について述べている。特に、従来検討されてきたピラーが導電性を持たない場合について、界面形状が放物線で近似されるなど、これまでの結果と整合する計算結果が得られるとしている。一方、Si 基板のエッチング加工で形成される導電性を持つピラー構造の場合は、ピラー近傍の強い電場によって気液界面形状が変化し、垂直方向の静電力、気液界面形状変形量が2倍程度大きくなることを明らかにした。また、それに伴って、界面形状は指数関数で近似され、ピラー先端における接触角も増大することを示した。

第3章では、第2章の数値解析結果の実験的な検証について述べている。まず、MEMS 技術を用いたピラー構造の試作方法について記述している。Si 基板を深掘りエッチングした後、熱酸化によって SiO_2 皮膜を形成し、フッ素系 SAM 膜をつけることによって、オーバーハング構造を持つ超撥液面を形成している。また、レーザーフォーカス変位計を用いた気液界面形状と Cassie 状態が崩壊する過程について示している。そして、本研究の計測範囲のもとでは、ピンング点での接触角が前進接触角よりも大きくなることによって Cassie 状態が崩壊するモードが支配的であることを示し、その臨界電圧として、電圧印加時の前進接触角と第2章の計算結果で得られたピラー構造の接触角が一致する場合と定義した。そして、計測によって得られた界面変形および臨界電圧と比較を行い、臨界電圧が 200V 以下の場合、計測データと数値解析結果が良い一致を示すことを明らかにしている。

第4章では、ピラーが導電性を持つ場合の、界面形状および臨界電圧のモデル化について述べている。界面形状および静電気力が、ピラーの高さ、直径、ピッチ、および印加電圧によって表されることを示し、そして、垂直方向の静電気力と表面張力のバランスから、ピラーの形状と前進接触角のみのデータから、臨界電圧が予測できることを示している。

第5章は結論であり、本論文の結論をまとめている。

以上要するに、本論文は、近年、広く用いられているデジタル・マイクロfluidicsにおける液滴の高速移動に関連し、超撥液面すなわち Cassie 状態の気液界面に電場が印加された場合の不安定現象について、数値解析と計測の両面から検討した。ピラーが導電性を持つ場合は、従来研究の行われてきた誘電体ピラーの場合に比べて、臨界電圧が大きく異なることを示し、また、その予測モデルの構築を行った。本論文の成果は、マイクロ・ナノ工学、マイクロ流体工学、マイクロ生化学分析デバイス構築などの進展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。