

審査の結果の要旨

氏名 吳 天准

本論文は、「エレクトレット上の液体誘電泳動を用いた超撥液表面における液滴操作に関する研究」と題し、6章より成っている。近年、マイクロスケールでの生化学分析や化学反応が注目され、特に平板上で液滴を輸送、合体、分離などを行うことにより所定の目的を達成するデジタル流体デバイスの研究が多く行われている。従来、電解液についてはエレクトロウェッティング、絶縁性液体については液体誘電泳動による駆動が提案されているが、一般に駆動電圧が高いという問題があった。本論文では、エレクトレットの電位を用いた液体誘電泳動により低電圧で液滴を駆動する新しい手法を提案するとともに、液滴速度向上のための超撥液面のモデリングと試作を行い、液滴駆動の性能評価を行うことを目的としている。

第1章は、「序論」であり、従来の関連研究を概観し、本研究の目的を述べている。マイクロ流体技術、特に液滴を用いるデジタル流体デバイスについてのレビューが行われ、液滴の運動を決定する濡れ性、電場による流体駆動方法、超撥水・超撥液面について述べられている。また、そして、低電圧で液滴を駆動する手法の開発、液滴速度向上のための超撥液面の試作、超撥液面の濡れ性モデルの構築、液滴駆動の性能評価、という本論文の目的が述べられている。

第2章は、「エレクトレット上の液体誘電泳動」と題され、新たな液滴駆動方法として提案する、エレクトレットによる電場を用いた液体誘電泳動の原理、モデリング、実験結果、および数値計算結果について述べられている。エレクトレットと2枚の電極を対向させ、その間に絶縁性液体の液滴を置き、外部コンデンサを接続する電極を低電圧動作のスイッチによって切り替えることによって、液滴を2枚の電極間で移動させる。MEMS技術を用いてプロトタイプを試作し、実際に5Vで駆動されるリレーを用いて液滴が駆動できることを明らかにした。しかし、移動速度は0.1mm/s程度と低く、その原因を探るためにモデル化を行った。マクスウェル応力を用いて液滴に加わる電気力を算出し、接触角ヒステリシスおよび粘性力を考慮した液滴の運動方程式により、シミュレーションを行った。その結果、静的な接触角ヒステリシスが最も大きな減衰力として働いており、より高速の駆動に

は接触角ヒステリシスを低減可能な超撥液面の使用が必要であることを明らかにした。

第3章は、「超撥液面」と題され、表面張力の小さい有機溶媒についても接触角が極めて大きく保つことのできる超撥液面の設計法と試作・評価結果について述べられている。オーバーハング構造を用いることによって超撥液面が維持できること、またその安定性の限界がラプラス圧力で与えられることを示した。MEMS技術により試作したデバイスでは、水とヘキサデカンの双方において158度の接触角と8度以下の接触角ヒステリシスが得られることを明らかにした。

第4章は、「濡れ性の一般理論」と題され、古典的なカシーの式に代わる、より一般的な静的および動的接触角に関するモデル構築と実験データに基づく検証について述べられている。表面エネルギーの最小化の観点から議論を進め、従来考慮されていなかった固体側の角度が最大・最小のピン止め角に及ぼす影響を定式化し、静的接触角の一般モデルを導出している。また、微細加工面上で接触線が進行する際に生じる、先行する薄液膜、スリップ、ロールなどの現象を議論し、動的接触角の一般モデルを導いている。そして、得られた新しいモデルの特殊な場合として古典的モデルが得られることを示している。さらに、本論文で試作した超撥液面上を用いて計測した、静的接触角および前進・後退接触角の実験データが本モデルで良く再現できることを明らかにしている。

第5章は、「超撥液面とエレクトレット上の液体誘電泳動に向けて」と題され、エレクトレット上の液体誘電泳動に用いるための電極を有する超撥液面の試作と評価、モデル計算による予測結果について述べられている。寄生容量を減らすため、ガラスウェハに接合された薄いシリコンウェハ上に、突起直径8ミクロン、突起間の間隔24~72ミクロンの微細構造を持つ超撥液面が形成され、接触角、接触角ヒステリシスが実験的に評価された。また、試作デバイスが製作され、液滴の安定性の評価が行われ、電場が印加される場合にはサブミクロン構造が有用であることが示された。また、モデル計算により、超撥液面と組み合わせることによって、エレクトレット上の液体誘電泳動による液滴速度が大幅に向上し、数mm/s程度までが実現可能であること、また、寸法が大きいほどその効果が大きいことが示された。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果がまとめられている。

以上要するに、本論文では、マイクロ流体デバイス上で液滴を低電圧駆動する新しい手法として、エレクトレットの電位を用いた液体誘電泳動を提案し、プロトタイプデバイスでそれを実証した。また、液滴速度向上のために、あらゆる液体に対して大きな接触角を与えることのできる超撥液面のモデリングを行い、MEMS技術により試作を行って、実際に

極めて大きな接触角と小さな接触角ヒステリシスを得た。さらに、古典的な濡れ性理論に代わる、静的および動的接触角に関するより一般的なモデルを初めて構築した。そして、エレクトレット上の液体誘電泳動と超撥水面を組み合わせた液滴駆動デバイスを試作し、新しい液滴駆動方法としてその性能をモデル計算により評価した。従って、本論文は、新しい液滴の電場駆動方法を提案するとともに微細加工表面の濡れ性理論に関する新たな知見を加えるもので、熱流体工学における学術的価値とともに工業的な利用価値が極めて高く、機械工学の上で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。