

審査の結果の要旨

氏名 軍司 昌秀

近年、半導体技術を応用した微細加工技術の進歩により、化学分析装置や化学反応装置を1つのチップ上に集積する μ -TAS(micro-Total-Analysis-system)と呼ばれるシステムが注目を集めている。 μ -TASにより、分析試料の低減化、反応時間の短縮、反応装置の携帯化や大量生産化などが実現し、ゲノム解析の高速化や遺伝子診断あるいはファインケミカルの合成など、今後様々な分野での応用が期待される。このようなオンチップの分析・反応システムを実現するには、チップ上での液体操作技術が必要となるが、従来の研究では、主に、閉鎖された流路中での液体を操作する手法が用いられてきた。しかしながら、このような流路内における液体操作法には、適当な流量が得られるマイクロポンプ・漏れの少ないマイクロバルブなどの作製が困難である事や、装置に投入するサンプルのうち実際に使われる割合が少ない事など、数々の問題点も存在する。

本研究は、液体試料をチップ上で液滴の形で操作し、開放された基板上で試料の分析や反応を行うシステムを実現するための、表面電界効果を用いた液体駆動に関する研究を行ったものである。

第1章では、序論として、本研究の背景、従来の研究、目的を述べている。

第2章においては、誘電泳動を用いた水溶液の操作技術を提案し、その実証および理論的解析を行っている。具体的には、基板上にパターンニングされた1対の平行ストリップ電極に電圧を印加することにより、電極間に置かれた液滴を電極間ギャップに沿って伸長できること、電圧を取り去るとこの伸長された液柱がキャピラリー不安定性によりいくつかの微小粒子に分割されること、電極に適当な間隔で凹凸を設けることによりこの液柱の分割を制御し、一様な粒径を持つ液滴を作製できること、2対の電極系を隣接して置き、作製された液滴の間に電圧を印加することにより、液滴を融合して混合できること、多数の電極系をx-y状に配置し、それらの交点に作製した液滴を融合させることにより、n x mの混合操作を一瞬にして行えること、などを示した。また、誘電泳動による液体駆動の物理モデルを作製し、熱解析を行うとともに、運動のダイナミクスを理論的に解析し、実験とよく一致することを示した。

第3章においては、エレクトロウェットティングを用いた液滴の操作技術を2つ提案し、その実証および高速度撮影による解析を行っている。第1は、液滴の進行方向に対して非対称な形状を持つFish-bone型電極を用い、ここに置かれた液滴の最低次のモードの表面自由振動に対応する周波数の交流電圧を印加することにより、液滴に電極長軸方向に沿った運動を誘起するものである。高速度撮影による解析を通じ、この運動が、交流電圧のピークと0に対応して液滴が扁平化・球形化を繰り返す過程において、扁平化が電極の非対称性により一方向に向かって起きることがそのメカニズムであることを解明した。この応用として、分岐を持つFish-bone型電極を用い、液滴のソーティングや融合による混合を実証した。第2は、単純な平行ストリップ電極を用い液滴の駆動を行う方法である。この従来の電気力学的常識に反するように見える現象を、高速度撮影による液滴界面の観察、周波数・温度依存性の計測、基板表面の抵抗率の実時間計測などにより解析し、この現象が、液滴自身の通過によって基板上に形成される水分子層による電界のシールドイングによる、self-propellingメカニズムによるものであることを解明した。

第4章においては、沿面放電を利用した微細流路内部の部分的親水化の技術を提案し、その応用について研究を行っている。すなわち、疎水性有機高分子で作られたチャンネルに隣接して電極をパターンニングしておき、ここに高周波電圧を印加することにより、チャンネル内に沿面放電を誘起し、これにより電極のパターンされた部分のみを親水化する技術を開発した。この技術の応用として、水溶液が表面張力により親水化された部分にのみ侵入することを利用して、ナノリットルオーダーの液滴を定量的に分離射出する手法を考案した。

以上要するに、本論文は、微小電極を用いた表面電界効果による基板上での液滴駆動技術に関する手法の提案・理論解析・応用の実証を行ったものである。得られた成果は、液滴操作型分析・反応システムの実現へ向けた基盤技術として、高い技術的価値を持ち、開発された解析技術は、実際の装置の設計に対する指針を与えるものである。また、平行電極による液滴駆動は、著者が発見した新現象として、学術的にも興味深い。従って、本論文は、学術的にも技術的にも貢献するところが少なくない。

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。