

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 林 靖之

光放射圧を用いた光マニピュレーションでは、非接触に微粒子や生体物質を操作することが可能である。この技術はすでにさまざまな研究分野で活用されているが、それらの多くは単一ビームによる1粒子操作である。一方、光マニピュレーションそのものの研究は、空間的に広がった光強度分布を利用することによる複数粒子の並列操作へと近年トレンドが移っている。また、21世紀に入り、単純な捕捉や操作の域を超えた光によるマイクロレベルでの機能発現などの試みも報告されている。しかし、これらの取り組みの多くは、いまだ多点光パターンやビームの特殊モードといった限定的で柔軟性に欠ける光強度分布の利用にとどまっている。

林靖之君は、空間光変調器を用いて2次元光強度パターンを作り、これを顕微鏡光学系を用いて結像投影することにより、任意の2次元光パターンを利用した高い拡張性をもつ機能発現の実現を目指した研究を行った。さらにその応用例として、光圧ポテンシャルによる微粒子のソーティング・システムを試作し、その高性能化・高機能化を試みた。

論文は8つの章から構成されている。第1章は導入であり、この分野の研究の背景、本博士論文の目的とねらい、および論文の構成が述べられている。

第2章は一般的なレーザートラッピングにおける、光圧の発生およびそれに伴う光圧ポテンシャルの従来理論がまとめられている。粒子サイズが波長より十分小さい場合には電気双極子モデルが、逆に波長より十分小さいときには幾何光学モデルが一般的に適用される。また、それらの中間域における計算法についても触れられている。さらに、同じ2次元光強度分布に対して、作られる光圧ポテンシャルがサイズによってどのように変化するかについても述べられている。特に非対称な2つのピークを持つ光強度分布によって作られる、非対称2重井戸型光圧ポテンシャルの粒子サイズ依存性について、実際の計算例とともに詳しく述べられている。

第3章は与えられた光圧ポテンシャルの中での、微小粒子のブラウン運動についての議論である。第2章で検討された非対称2重井戸型光圧ポテンシャル中での、粒子の拡散運動によるポテンシャルの極小サイト間の粒子の遷移に関して、理論的に検討している。またサイト間のポテンシャルバリアの高さと遷移確率あるいはサイト滞在時間の関係についても定式化されている。

第4章は本論文で行った第5章以下に述べられている実験系に関する詳しい説明である。使用した倒立顕微鏡光学系、空間光変調器、サンプル形状、計測システム、制御システム等に関して述べられている。

第5章は非対称2重井戸型光圧ポテンシャルを用いた微粒子ソーティングの実験とその結果の解析である。直径1 μm と1.5 μm の2種類のポリスチレン微粒子を用い、実際にソーティングを行った。光圧ポテンシャルの実測、光パワーと光圧ポテンシャルの関係の実測、ソーティング効率の定義と計測、および理論値との比較検討を行った。また、光パターンに時間変調を加えた場合のシステム特性を数値計算によって評価した。この手法は、ブラウン運動による輸送を利用した光ソーティングの初めての報告であり、小さいブラウン粒子に対して得に有効である。

第6章では、非周期的かつ大きさの異なる3つのピークを持つ光強度パターンを用いた微粒子ソーティング方式を提案し、これを実験的に検証した。この光強度分布は、3種の直径の異なる粒子に対してそれぞれ1重、2重、3重という全く異なるポテンシャル極小値（ポテンシャルの井戸）を与えるため、確率的でない、確定的な輸送過程によるソーティングが実現される。この実験は、流れの無い系におけるサイズの異なる3種以上の粒子の並列ソーティングの初めての実証例となった。確定的プロセスであるため、第5章での手法と比べて、同レベルの光強度で処理速度が1~2桁向上した。またシステムのソーティング特性を理論および実験的に評価した。発展系として、このシステムを利用したサイズの異なる複数粒子の自動配列機能を提案し、デモンストレーションを行った。

第7章は、第6章で実証した手法を、流路内微粒子ソーティングに応用した例の検証である。この方式は、流路内でのソーティングとしては、流れによる抵抗力と光放射圧が競合関係に無い新しいタイプであり、他の方式に比べて許容される流速の範囲が格段に広いことを示した。この方式を用いれば、空間的光パターンの形状を変えることにより、3種の粒子を任意の組み合わせで3つの出力ポートに振り分けることができる。実際にマイクロ流路を製作し、平均流速 25 $\mu\text{m/s}$ における実験を行い、約 90%のソーティング成功率となることを示した。

第8章は本論文の結論とまとめが述べられている。

本論文で提案、実証されている、空間光変調器を用いた任意形状の2次元光強度分布を用いる光圧光ソーティングは、従来の微粒子の単なる集光レーザースポットあるいはごく単純な2次元光パターンを使用した方式に対し、非常に高い自由度を持ったソーティングあるいはトラッピングシステムの構築が可能であることを示したものである。これにより、光圧ポテンシャルを用いた微粒子マニピュレーションが、さらに大きな発展性を持ち、その応用範囲が格段に広がることが示された。この意味で微粒子マニピュレーション研究に与えた本論文のインパクトは大きく、光応用分野および工学の発展に寄与するところ大である。

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。