

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 **Functional particle manipulation system using two dimensional optical potential landscape** (二次元光圧ポテンシャルを用いた高機能微粒子操作)

氏名 林 靖之

本研究は 2005 年 4 月から現在までに東京大学生産技術研究所黒田・志村研究室において黒田教授、志村教授の指導のもとに行われたものである。研究テーマの選定から始め、実験器具の選定および発注、計算プログラムの作成、光学実験まで一貫して行ったことは本研究の特徴のひとつである。

#### 1. 背景

光トラップ技術ではレーザービームを用いて光放射圧による光圧ポテンシャルを形成し、微粒子を 2 次元および 3 次元的に捕捉することができる[1,2]。約 40 年前に Ashkin によって報告されて以来、これまでにさまざまな研究が行われてきた[3,4]。捕捉可能な物質は数十 nm~数十 $\mu\text{m}$  サイズの誘電体粒子、金属粒子、および細胞やウイルスなどの生体試料である。近年、従来の単一ビームと比べてより空間的に広がった光強度分布を用いた微粒子マニピュレーションが脚光を浴びている[5]。このタイプの光トラップ技術では複数粒子の並列操作および動的な操作が可能となり、単なる捕捉の枠を超えたマイクロレベルの機能発現が可能となる。これまでに、位相変調器によって形成されたホログラム多点光パターンを用いた複数粒子配列操作、特殊光モードによる光駆動型マイクロポンプ、そして光による微粒子ソーティングなどが報告されている[5,6]。しかし、これら新たな取り組みはいまだ発展途上にあり、多くは限定的な光パターンを利用したものである。より自由度の高い 2 次元光パターンを利用した機能発現化が発展として期待されている。

#### 2. 目的

本研究の目的は次のように設定した。自由度の高い光強度分布によって形成される 2 次元光圧ポテンシャル下の粒子の運動特性を調べる。そして拡張性の高い機能を有した微粒子操作を提案する。

#### 3. 研究内容

2 次元光パターンの基本構成要素として非対称二重ピーク光強度分布を想定し、対応する 2 次元光圧ポテンシャル下での微粒子の運動特性を調べた。また、複数のピークを有する非対称非周期光強度分布に光パターンを拡張させて運動特性を調べた。光強度分布は強度変

調モードの空間光変調を用いて形成した。それぞれの光パターンを利用することでソーティング機能および配列機能が発現可能であることを実証した。非対称二重ピーク光強度分布を用いたシステムでは、ブラウン運動によるポテンシャル井戸間遷移を利用したソーティングを提案し特性を初めて明らかにした[7]。非対称非周期光強度分布システムでは、異なるサイズを 3 種類含む混合粒子に対する並列ソーティングおよび配列処理を流れの無い状態で初めて実証した[8]。さらに、発展として流路内でのソーティング方法を提案し実験検証した。詳細を以下に示す。

### 3.1. 非対称二重ピーク光強度分布内微粒子操作

トラッピング面内の光強度分布を非対称二重ピークストライプ構造とし、光放射圧によって微粒子に誘起される光圧ポテンシャルおよび粒子の運動特性について調べた。強度分布のピーク間距離は粒子サイズよりも長く設定した。この場合、溶媒よりも高い屈折率を有する誘電体に誘起される光圧ポテンシャルは、光パターンの長軸方向に垂直な断面で非対称二重井戸構造となる。準安定サイト A と安定サイト B の間に存在するポテンシャルバリアは物質のサイズ、光パワー、ピーク間距離の増加とともに高くなる。溶媒中に存在する物質はブラウン運動によりサイト A と B を確率的に行き来する。サイト B を A と比べて十分に深くすると、初期状態としてサイト A に存在する粒子は最終的に大部分サイト B に存在することとなる。移動のタイミングはバリア障壁の高さ、すなわち粒子サイズに依存する。研究では以上の機構を実験かつ理論的に明らかにした。また、この機構を利用した微粒子ソーティング方式を提案し、その特性を評価した。本方式では、要求された条件に応じて最適な光強度分布が存在する。これに対し、ソーティングの高性能化を目的として時間変調を有する光パターンを導入し、特性評価を行った。サイズ差の小さい粒子のソーティングや高純度なソーティングを目的とした場合、定常光パターン方式と比べて時間変調光パターンによる方式が有利になることが示された。

### 3.2. 非対称非周期光強度分布内微粒子操作

本方式では三重ピークストライプ構造の光強度分布を使用した。ピークは 1 方向に順に高くし、間隔を不均一かつ対象粒子サイズ程度のオーダーにした。この場合、2 つのピーク間距離と粒子サイズの関係に応じて構造の異なる 3 タイプの光圧ポテンシャルが形成される。いずれのピーク間距離よりも小さい粒子には 3 重井戸構造、2 つのピーク間距離の間のサイズをとる粒子には 2 重井戸構造、そしていずれのピーク間距離よりも大きい粒子には単一非対称井戸ポテンシャルが形成される。このようなポテンシャル下での粒子の運動は光放射圧による確定的な輸送とブラウン運動による確率的な輸送の組み合わせとなる。強度の一番低い極大位置に粒子を導入した場合、粒子はそれぞれ隣接する準安定サイトに確定的に輸送され、その後確率的な井戸間遷移によってより安定なサイトへ移動する。研究ではこのような運動特性を実験かつ理論的に検証した。そしてソーティングや自動配置システムとしての機能性を提案し、特性評価を行った。本方式では光強度を調整し、バリア障壁を熱エネルギーと比べて十分に高くすることで確定輸送のみによる微粒子の仕分け作業が行われる。これにより 3.1 方式と比べて作業速度の高速化が実現された。また、非対

称三重ピーク光強度分布を用いているため 3 種類の粒子の並列ソーティングが流れの無い状態で可能となる。本方式ではサイズごとに粒子の到達位置が指定される。この機構を利用して本方式と従来の配置システムを融合させてサイズ認識型自動配置機能を実証した。

### 3.3. 流路内ソーティングシステム

非対称非周期光強度分布によるソーティング方式のマイクロ流路デバイスへの適用可能性を調べた。流路内ソーティングでは、光パターンの長軸方向を流れに平行に配置し、粒子を指定位置に導入するための 2 次元光パターンを新たに付け加えた。このようなシステム構成を用いて連続的なソーティング処理を実験的に実証した。また、光強度分布のピーク間隔を調整することで、他の組み合わせでの分配処理も可能であることを実証した。本方式では、流れによる抵抗力と光放射圧が垂直に微粒子に作用するため、流速に対して広帯域なソーティングが可能となる。

## 4. まとめ

本研究では自由度の高い光強度分布によって微粒子に形成される 2 次元光圧ポテンシャルについて調べ、2 次元光圧ポテンシャル下の粒子の運動特性を明らかにした。そして、得られた知見を元に 2 タイプのオリジナルなソーティングシステムを提案し、実証した。さらに、発展系としてサイズ認識型自動配置機能や流路内ソーティング処理を提案し、実証した。

## 参考文献

1. A. Ashkin, Phys. Rev. Lett. **24**, 156 (1970).
2. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, Opt. Lett. **11**, 288 (1986).
3. A. Ashkin, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **6**, 841 (2000).
4. K. C. Neuman and S. M. Block, Rev. Sci. Instrum. **75**, 2787 (2004).
5. D. G. Grier, Nature **424**, 810 (2003).
6. M. P. MacDonald, G. C. Spalding, and K. Dholakia, Nature **426**, 421 (2003).
7. Y. Hayashi, S. Ashihara, T. Shimura, and K. Kuroda, Opt. Commun. **281**, 3792 (2008).
8. Submitted.