

令和元年6月10日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04972

研究課題名(和文) フォトニッククロマトグラフィーの原理と技術創出

研究課題名(英文) Experimental development of the principle of photonic chromatography

研究代表者

庄司 暁 (Shoji, Satoru)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：20437370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：導波路を伝搬するレーザー光によって内部のナノ粒子に光圧を加える機構を原理とする、ナノ粒子ソーティングデバイスを開発した。ガラス製のチューブ状マイクロチューブ内にナノ粒子分散液を導入した状態でレーザー光を入射し、マイクロチューブ内を導波させた。流路内のナノ粒子はレーザー光を散乱して放射圧を受け、時間とともにチューブ内を移動した。流路のサイズや形状を最適化することによって、ブラウン運動や乱流の影響を最低限に抑え、効果的に光圧によってナノ粒子を運搬した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法の鍵となるマイクロガラスチューブは、通常の光導波路としては一般的な形状ではないものの、例えば人工授精やパッチクランプ法などで生体細胞応用に用いるマイクロガラスニードルとサイズや形状がほとんど同じである。ガラスチューブを加熱延伸によって細め、その中に移動層となる溶液を満たし、一方からレーザー光を導入するだけである。導波路を長く取るだけで分離精度が比例して向上する原理は非常に簡便で効果的である。チューブが微細なため、微粒子のブラウン運動や乱流の影響を受けることが無い。サイズの差が非常に僅かなナノスケールの微粒子に対して効果的な分離抽出技術であると期待できる。

研究成果の概要(英文)：A novel principle of particle sorting by means of optical radiation force was developed. Micrometer scale capillaries made of silica glass was fabricated by heating and pulling glass tube. Laser light was guided in the micro-capillaries filled with micro/nanoparticle aqueous suspensions. Since the laser light was scattered by the particles, the particles underwent optical radiation force and moved along the capillaries. By the difference of the optical force, caused by the size, the shape, or the optical properties of the particles, the particle moved with different speed. After continuous laser irradiation, the particles were gradually separated by the speed. With the developed system, the dependence between the optical force and the size/shape of particles was experimentally and analytically investigated.

研究分野：光工学

キーワード：光放射圧 光クロマトグラフィ 光導波路 サイズ効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光圧は主に、顕微鏡下でマイクロ/ナノスケールの微粒子を非接触で捕捉したり、輸送する基本原理として研究されてきた。顕微鏡対物レンズを用いてレーザー光を集光すると、微粒子に働く光圧は、光強度の空間的勾配に比例した力学的作用が粒子にかかり、集光点粒子に向かって粒子が輸送され、焦点の中心に捕捉される。特に、マイクロ/ナノ粒子を用いた微弱力計測技術や、生体細胞内の組織の操作などに、光圧による粒子の操作技術が応用されている。通常この光圧は、力に換算すると $pN \sim fN$ のオーダーでごく微弱な力であるが、粒子の分極の大きさによって決まるため、半導体ナノ粒子や金属ナノ粒子など、量子サイズ効果を示す粒子には光の波長を選択することによって強めることができる。本研究者は、この原理を用いてナノ粒子の選別を行うことを着想し、単層カーボンナノチューブや金ナノ粒子を光学特性によって選別する技術を提案し研究してきた。

2. 研究の目的

本研究は、導波路を伝搬するレーザー光によって内部のナノ粒子に光圧を加える機構を原理とする、ナノ粒子ソーティングデバイスの開発を研究の目的とした。ガラス製のチューブ状マイクロ流路を光導波路としても使い、チューブ内にナノ粒子分散液を導入した状態でレーザー光を導波する。ナノ粒子は導波するレーザー光を散乱し、その反作用として散乱力を受ける。流路のサイズや形状を最適化してブラウン運動や乱流の影響を最低限に抑え、ナノ粒子に効果的に光放射圧を印加し、粒子を駆動する。以上の原理によって、光圧によってナノ粒子を運搬し、粒子のサイズや共鳴波長の違いで精度良く分離・抽出するナノ光デバイスを創出することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、マイクロ流路と光導波路を組み合わせ、ナノ材料の光駆動・分離の原理の確認と光クロマトグラフィ技術の基礎実験を行った。以下に示す5つを大きな課題として、2ヶ年計画で遂行した。

1. ガラスの加熱延伸加工によるマイクロ流路光導波路構造の作製
2. チューブ型光導波路へのレーザー光の導波と光放射圧の確認
3. 導波光によって励起されたエバネッセント場による導波路内部の粒子の駆動
4. 光放射圧の強さと波長依存性の評価
5. 波長選択的粒子抽出システムの構築

4. 研究成果

本研究は、平成28年度～平成30年度の3カ年で行われた。主な研究成果は、以下の通りである。

1. 微粒子のソーティングを可能にするガラス製マイクロチューブの作製法の確立
2. レーザー光の導波による微粒子の駆動と選別
3. 粒子の形状、サイズ、光学特性と光圧の関係の実験的・理論的評価
4. PDMSを素材とする新規マイクロ流路の作製

平成28年度は、ガラス管の加熱延伸によってマイクロ流路光導波路の作製技術を確立した。細胞のマイクロインジェクションの実験で用いられるマイクロピペットプラーを用いて、内径約 $20\mu m$ のシリカガラス製チューブを作製した。テストサンプルとして、ポリスチレン微小球を分散した水溶液をマイクロチューブに導入した。ガラス管先端を水溶液表面に接触すると、毛細管現象によって瞬時に長さ約 $5mm$ にわたって水溶液がガラスチューブに導入された。ガラスチューブに導入された微小球を顕微鏡観察し、レーザー光を導入する前の微小球の流れを観察した。チューブの末端からの水の蒸発と液/気界面のエネルギー勾配によって、微小球がチューブの末端に流れていく様子が確認された。末端をオイルで封じることで、この流速を止めることができた。この状況で、チューブの端面からレーザー光を照射し、微小球が光圧によって駆動することを実験的に確認した。

平成29年度は、シリカガラス製マイクロチューブ内に導入した微粒子分散水溶液を、レーザー光の圧力によって駆動する実験を行った。直径約 $20\mu m$ のチューブ型光導波路へ波長 $1064nm$ の Nd:YVO4 レーザー光を入射して導波した。微粒子は、入射レーザー光の強度に依存した速度でほぼ等速直線運動でチューブ内を駆動した。微粒子の駆動は、明視野顕微鏡観察のほか、レーザー光の散乱パターンを CCD カメラでリアルタイムに観察することによって行った。駆動速度と水の粘性抵抗から、微粒子にかかる光放射圧を見積もった。光放射圧は、レーザー光強度依存性にくわえ、微粒子の粒子径、形状、吸収スペクトルによって強く依存することを実験的に確かめた。光放射圧の波長依存性の評価のため、波長可変 CW チタンサファイアレーザーを光源として用いた光学系を構築した。ガラスマイクロチューブに加えて、光放射圧による微粒子の分離・抽出を可能にする新規マイクロ流路の設計と基礎実験を行った。PDMSを材料として使い、シリコン基板上に電子ビーム描画加工によって作製したパターンを転写することで、約 $50\mu m$ 幅のマイクロ流路を作製した。シリンジポンプを用いて流路内に微粒子分散水溶液を等速で流し、側方からレーザー光を導入して微粒子に光放射圧を印加する系を設計し基礎

実験を開始した。

平成 30 年度は、微粒子分散水溶液を、レーザー光の圧力によって駆動する実験を引き続き行った。本研究で提案する手法を用いて、同じ体積で、形状の異なる（扁平率が異なる）回転楕円体様のマイクロ/サブマイクロ微粒子を光圧を用いて分離した。球形/回転楕円体の形状の粒子にかかる放射圧と、配向方向の依存性、アスペクト比依存性、サイズ依存性などを理論解析し、実験結果で得た分離能の評価を行った。また、ガラスチューブの中で分離した微粒子を抽出する手法を実験的に検証した。そのためのガラスチューブの加工法に改良を加え、これまでよりも微細で長いガラスチューブを連続的に加熱延伸加工するシステムを構築した。平成 29 年度に着手した、PDMS 製マイクロ流路と光圧を組み合わせた微粒子の分離・抽出システムにおいても、印加された圧力の違いによって微粒子を分離し、異なる流路に導入することに成功した。サイズの異なるマイクロ微粒子のほか、蛍光色素染色微粒子などを用いて、微粒子の光圧選別を行った。これらの実験成果は、2019 年 2 月にサンフランシスコで開催された Photonics West 2019 国際会議で発表した。

5 . 主な発表論文等

〔学会発表・招待講演〕(計 8 件)

1. 庄司暁, "光圧によるカーボンナノチューブのカイラリティ 選択" 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018)
2. S. Shoji, "Laser manipulation of single wall carbon nanotubes" ALT 2017 (International Conference on Advanced Laser Technologies) (2017).
3. 庄司暁, "光コム of ナノメカニクス応用" 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演 (2017)
4. S. Shoji, "Nanomechanics of methacrylate polymer investigated by two-photon nanolithography" APLS 2016 (Asia Pacific Laser Symposium) (2016)
5. S. Shoji, "Mechanical properties of polymer micro/nano structures fabricated by two-photon lithography" PIERS 2016 (Progress In Electromagnetics Research Symposium), (2016).
6. S. Shoji, "Excitation of polymerization reaction and optical gradient force through local surface plasmon resonance of gold nanorods" PIERS 2016 (Progress In Electromagnetics Research Symposium), (2016).
7. S. Shoji, "Chirality Selective Photo-bleaching of Single-wall Carbon Nanotubes by Femtosecond Laser", ICFPAM 2016 (International Conference on The Frontiers of Polymers and Advanced Materials) (2016).
8. S. Shoji, "Mechanical properties of nanostructured polymer", ISOT2016 (International Symposium on Optomechatronics Technology) (2016).

〔学会発表・一般講演〕(計 9 件)

1. L. Sugimoto, E. Itoh, and S. Shoji, "Motion of elongated microparticles under optical radiation pressure," SPIE Photonics West 2019(2019).
2. K. Taniuchi, T. Nishisako, and S. Shoji, "Laser screening of flowing particles in a micro fluidic channel," SPIE Photonics West 2019(2019).
3. S. Shoji, K. Matsumoto, T. Yamamoto, and K. Minoshima, "Optical sensing of viscoelastic behavior of photopolymer at micro scale by means of resonant oscillation of micro glass capillary," SPIE Photonics West 2019(2019).
4. R. Hida and S. Shoji, "Laser interference exposure lithography for fabricating super-hydrophilic pillar arrays made of polymer" ALT 2017 (International Conference on Advanced Laser Technologies) (2017).
5. K. Matsumoto, T. Yamamoto, and S. Shoji, "Optical measurement of resonant mechanical oscillation of micro glass tubes" ALT 2017 (International Conference on Advanced Laser Technologies) (2017).
6. T. Yamamoto, K. Minoshima, and S. Shoji, "Measuring resonant vibration modes of microstructures using confocal laser microscopy" APLS 2016 (Asia Pacific Laser Symposium) (2016)
7. R. Hida and S. Shoji, "Laser interference exposure lithography for fabricating super-hydrophobic arrays made of polymer" APLS 2016 (Asia Pacific Laser Symposium) (2016)
8. T. Yamamoto, K. Minoshima, and S. Shoji, "Monitoring resonant vibration modes of glass microstructures by means of confocal laser microscopy" PIERS 2016 (Progress In Electromagnetics Research Symposium), (2016).
9. R. Hida and S. Shoji, "Laser interference exposure lithography for fabricating super-hydrophobic polymer microstructures" PIERS 2016 (Progress In Electromagnetics Research Symposium), (2016).

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。