

1. 研究実施計画

課題名：光マイクロマニピュレーション技術の研究

研究機関名：独立行政法人 産業技術総合研究所

任期付研究員氏名：古川祐光

①. 研究の意義、目的、必要性

(目的)

光を用いて微小物体を捕捉する技術は「光ピンセット」と呼ばれ、非接触かつ捕捉と解放が簡単に行えるマイクロマニピュレーション技術として最近脚光を浴びており、大変重要な技術となっている。本研究では、従来の透明物体だけではなく、不透明物体（特に金属物体）を捕捉する理論の構築を行い、広範な物質に適用しうるマイクロマニピュレーション技術を開発することを目的とする。さらに、光近接場（ニア・フィールド光学）技術を採り入れ、より高精度かつ広範なマイクロマニピュレーションを行うことを目的とする。

(必要性)

近年、マイクロマシニングに代表される微細加工技術の急速な進歩により、マイクロマシンの個々のパーツを製作することが可能となってきた。ところが通常の物理的なピンセットでは、これらの微小パーツをつまみ、組み立てることは容易ではない。なぜなら物理的なピンセットでは、パーツとの間で表面吸着力が生じてパーツがピンセットの先に癒着してしまったり、パーツをいろいろな方向に配向させる操作が難しく、複雑な精密作業困難にするからである。一方光ピンセットを用いれば、光のスイッチングによって捕捉と解放が簡単に行え、また配向操作が工夫によって容易になるため、物理的なピンセットの困難さを克服することが可能となる。そのためにぜひ本研究を実施する必要がある。

(意義)

本研究が目的とする金属を光で引きつけるという理論の構築および実験の遂行は、国内のみならず国外でも他に報告例が見られず新規性が高い。本研究は、金属が光で引き寄せられるという、通常の常識では考えられない新しい現象を解明したり、実現したりするためにそれ自体が大変興味深く、また学術的にも物理学上大きな意義がある。

応用としてはマイクロマシンの組立だけではなく、近い将来には動力源にも直結すると考えられるため、緊急にその理論的バックグラウンドの確立を行うことは大変意義が深い。特に、近年精力的に研究が進められているニア・フィールド光学技術の応用研究という側面も持っているため、この分野への貢献が期待できるし、また、生物学・医学で要求される光ピンセットを不透明物体・金属にも適用しうるなど、他分野への波及効果も高く、その意義は大きいと期待される。

②. 研究の概要

本研究は大きく分けて次の三つの小項目から構成される。

(1) マニピュレーション技術と光圧力関連技術に関する調査

光マニピュレーションの基礎となる光圧力関連技術に対する調査を行い、従来の光マニピュレーション技術がもつ短所を克服する手法や、新たな光マニピュレーション技術の開発可能性について検討を行う。

さらに、光によるマニピュレーション技術はもとより、機械的等の他のマニピュレーション技術に対する既存研究を調査し、それぞれの技術の特性・適用分野などを検討する。これを通じて、光学的手法と他の手法との折衷案を見出すことも考慮する。

(2) マイクロマニピュレーション実験

光圧力で物をつまむという「光ピンセット」の実現には、二次元面内での物体の移動（二次

元トラッピング)だけではなく、物体を浮上させるという動作(三次元トラッピング)や、捕捉した物体の向きを制御するという技術も必要となる。三次元トラッピングについては、光の進行方向に正に作用する力を打ち消すことが必要であるが、対向ビームや照射ビーム形状の検討により十分克服しうると考えられる。配向制御については、偏光した光の利用や、配列粒子の光近接効果等を用いて、それぞれの配向力を見積もる。

(3) 光圧力の解明と光近接場効果の検討

これまでの光ピンセットは、光の屈折に起因する反作用力を利用するため、比較的透明な誘電体にしか適用できない。そこで、本研究では吸収・反射が支配的な金属・半導体に対しても、光ピンセットを適用できる理論的研究とその実験的検証をおこなうことを目的とする。従来、金属は光を反射するために斥力が及ぼされ、捕捉することができないと言われていた。しかしながら、これまでに申請者は金属特有の表面プラズマ波を励起することによって、金属を光で捕捉できる可能性があることを見出している。このように光圧力には、従来から知られていた斥力と、今回新たに見出した引力とがあると考えられ、それぞれの現象の解明を行う。

多数の物体が存在するところに光を照射すると、近接効果あるいは光多重散乱によって、光圧力や光散乱場の状態が単一物体の場合とは異なる。そこで、近接効果が光圧力に対して及ぼす影響について、理論および実験の両面から評価する。

③. 研究目標

(1) マニピュレーション技術と光圧力関連技術に関する調査

光マニピュレーションの基礎となる光圧力関連技術に対する調査を行い、従来の光マニピュレーション技術がもつ短所を克服する手法や、新たな光マニピュレーション技術の開発可能性について検討することを目標とする。

さらに、光によるマニピュレーション技術はもとより、機械的等の他のマニピュレーション技術に対する既存研究を調査し、それぞれの技術の特性・適用分野などを検討する。この過程のなかで複数の分野の専門家と交流し、相互理解を深め、光学的手法と他の手法との相補案を見出すことを目標とする。

(2) マイクロマニピュレーション実験

金属物体を浮上させるだけの光圧力を、重力および溶媒の粘性に逆らって、働かせ得るかを実験によって明らかにする。光圧力の効率は、光照射の条件に依存するので、効果的な浮上・配向を行うための実験条件を調べることを目標とする。

(3) 光圧力の解明と光近接場効果の検討

金属物体に及ぼされる光圧力が、引力となる条件および斥力となる条件を調べ、効率的なマイクロマニピュレーションの基礎を築くことを目標とする。さらに、光散乱過程を調べることにより、どのような物理現象がそれぞれ引力および斥力に作用しているかを明らかにすることを目標とする。

光マイクロマニピュレーション技術の研究

従来の機械的マニピュレーション

捕捉しにくい
物体を放しにくい
(マニピュレーターへの吸着)

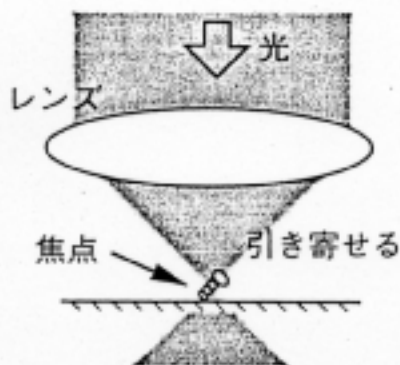


長時間の作業
作業者の負担大

他技術の導入による機械基盤技術のブレークスルー



光マイクロマニピュレーション



捕捉が容易
光圧力が引力
→ 焦点に引きつける
放すことが容易
光照射の停止 → 解放
非接触・反作用力を受けない等

早急に、高効率化・高度化を進めることが求められる。



金属に対する
光圧力理論の構築



なぜ金属が捕捉できるのか。



浮上・配向手法の確立



高精度化



ニア・フィールド
光学技術の導入

2. 研究成果の概要

①研究成果

従来では、金属物体は光を反射するために、金属表面に斥力が及ぼされ、捕捉することは困難であると考えられてきた。光が金属の表面で反射すると、金属粒子は光によって斥力が及ぼされ弾かれることになるため、従来は光で金属を捕捉することができないと考えられてきた。そこで、金属表面では、プラズマ振動と呼ばれる自由電子振動が光と相互作用することに着目した。光が粒子のエッジ辺りを通過するとき、プラズマ振動と相互作用することによって、光は粒子の存在する方向に曲げられる。この方向は、反射の場合とは逆方向であるため、粒子に作用する力も逆方向の引力となる。この原理を用いて、金属粒子の捕捉を試みた。

アルゴンレーザー（波長515nm）あるいは、YAGレーザー（波長1064nmあるいは532nm）からの光は、レンズを通して顕微鏡鏡筒内に導かれ、顕微鏡対物レンズを通じて、試料中に焦点を結ばせている。ここで用いた対物レンズでは、レーザービームを弱く収束させる。これは、粒子の表面に表面プラズマ波による力を生じさせるには、ビームを強く収束させる必要が無いためである。そこで対物レンズの開口数は $NA=0.25\sim 0.6$ 程度の小さなものを用いた。入射光は、ビームエキスパンダー等で広げることなく、ガウシアンビームを直接対物レンズに入射させたため、実効的な開口数はさらに小さなものとなっており、0.2以下になっていると考えている。試料の観察にも同じ対物レンズを利用しており、試料の下方から照明したランプで、CCDで試料の様子を観察する。試料は金の微粒子や希土類金属色素粒子（直径0.5~3.0ミクロン）などを用いており、これを水中に分散させている。レーザー光を照射して、金粒子を捕捉する。この粒子にレーザーを照射し続けながら、試料を手前に約15ミクロン程度移動させた時にも、捕捉している粒子だけは移動することなく、安定に捕捉されている。この他、様々な直径の金属粒子（約0.5~5.0ミクロン）に対しても、安定に光捕捉できることを確認した。

また、本研究の遂行過程において、光を含む電磁波の解析手法に着手し、その高速化に努めた。光の散乱過程を解析するのは、複雑な計算と時間とを必要とするため、従来ではスーパーコンピュータ規模の計算機が必要となっていたが、本研究においてアルゴリズムの見なおしを図り、計算時間を大幅に短縮することが可能となった。この研究では、有限のビーム径をもつ入射光に対して、光の放射圧力を知る必要があるため、任意の入射波に対応できるように、拡張されたMie散乱理論を用いた。

金粒子が、光軸の近傍（ $0 < d < 1.5\lambda$ ）に置かれているときは、光軸から離される方向へ力を受ける。このときは、金属表面での反射光が支配的であり、金粒子に斥力を与えて

いると考えている。一方、それより、外側の $1.5\lambda < d < 3\lambda$ 付近では、光軸に引きつける方向へ力を受ける。これは、境界回折波が増加し、それによる光軸方向への引力が、反射波による斥力を上回ったためである。

計算では、ビーム照射位置と、金粒子のトラップされている位置とにずれが生じる可能性のあることがわかった。この結果、粒子の安定点は、レーザーの焦点からやや離れた円状の分布を取ることが示唆された。計算結果によると、安定点は完全な円形ではなく、楕円形状である。これは境界回折波の発生が、入射光の偏光に対して依存性をもつためである。

レーザー光によって励起された金表面のプラズモンは、金属表面を伝搬し、伝搬の途中でエネルギーの一部を、再び光として再放出する。このため、金属表面でのプラズモン伝搬のあいだだけ光が曲げられることになることができるが、金属曲面に対するプラズモンの励起効率は、光の偏光方向によって異なるため、金属面の位置によって境界回折波の効率が異なっていると思われる。

ここでの理論では理想的な球を想定してきたが、実験では金属片などの球形ではない微粒子についても捕捉可能であることを確認している。金属における境界回折波の発生では、曲率半径の小さいものほど有利に働くため、真球でなくても、エッジを有するような金属片などには適用しうると考えられる。

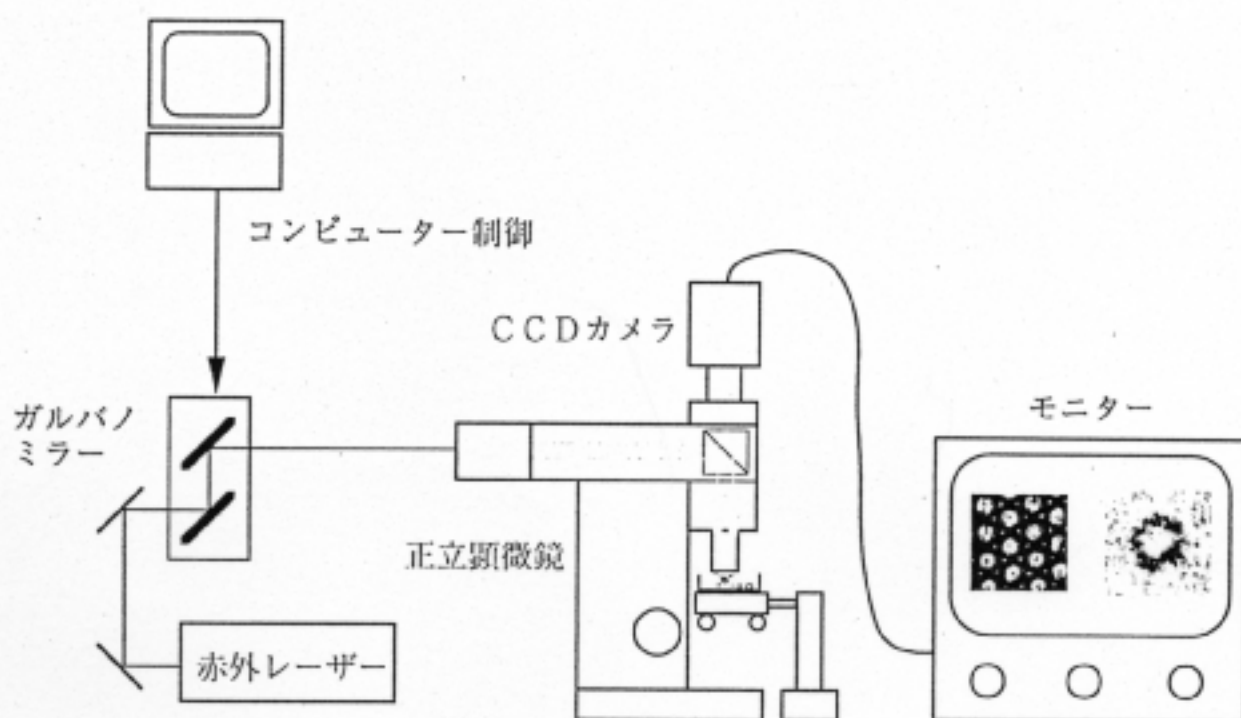
②波及効果、発展方向、改善点等

本研究で、新しい光放射圧の発生方法を見出し、その物理現象の解明と、定量的な見積もりを行う手法の考案・実現をおこなった。光ピンセットでは比較的透明な物質しか扱えないと従来は考えられてきたが、ここで金属粒子を捕捉する研究について述べた。以前では、光の波長よりも小さいレーリー粒子に対しては、G. Roosenらの研究[G. Roosen and C. Lambert, Opt. Commun., 26, 432 (1978).]で光圧によって捕捉可能であることが知られている。これに対し、面内での捕捉(2次元トラッピング)であるが、サブミクロンから数ミクロン程度のMie粒子が、光ピンセットによって捕捉され、それが引力になっていることを明らかにした。その結果、従来の光ピンセット理論とは全く異なる物理現象によって、マイクロ物体の捕捉が行われていることを確認した。実験では金属片などの球形ではない微粒子についても捕捉可能であることを確認している。金属における境界回折波の発生では、曲率半径の小さいものほど有利に働くため、真球でなくても、エッジを有するような金属片などには適用しうると考えられる。

近年、光ピンセットは、生物学・医学でも細胞操作・DNA操作における重要なツールとして用いられてきているが、不透明物体・金属にも適用できることによって、応用範囲も一層広がると考えている。

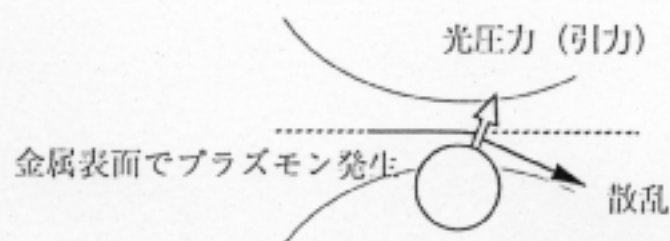
光マイクロマニピュレーション

金属粒子をはじめ、様々な物体を配列することが可能となった。



理論計算

金属を引きつける力について、原因を解明



光が粒子を迂回するときの電場分布 (計算結果)