

## エバネセントフォトン力による微粒子の位置制御

梅田 倫弘・島田 正吾

### Position Control of Micrometer-Sized Particles Using an Evanescent Photon Force

Norihiro UMEDA and Shogo SHIMADA

In this review, we describe a method for controlling a position of a small particle by evanescent photon forces. Two evanescent fields are generated on prism surface by incident two laser beams from opposite side of the prism at total internal reflection angle. Using photon forces of two evanescent fields, a small particle can be moved backward and forward, and be trapped on the prism surface. The experimental result shows that a latex sphere of radius  $10\ \mu\text{m}$  can be moved automatically between two points with an error of  $9\ \mu\text{m}$ . The trapping experiment also shows a clear effect on keeping the position of a small particle against the Brownian motion and flow of water.

**Key words:** evanescent field, photon force, optical trapping, manipulation, position control, Mie particle

光が物体に圧力を与えることは、1908年に発表された夏目漱石の小説「三四郎」の記述にもあるように<sup>1)</sup>、そう目新しい話ではない。しかし、その大きさは非常に微小であったため、レーザーが登場して Ashkin らが光トラッピングやマニピュレーションとして科学的に解明し、実用可能であることを示したのが最初である。その後、光マニピュレーションはさまざまな光学系と応用が提案され、特にバイオ分野で必須な技術になりつつある。このような状況の中で、Kawata らによって非伝搬光であるエバネセント光を利用した微粒子駆動が報告された<sup>2)</sup>。この方法は、全反射界面近傍に存在する微粒子を選択的に駆動可能な技術として注目され、以後、電磁場によるフォトン力の解析<sup>3)</sup>や光導波路による一次元駆動<sup>4)</sup>などが報告されている。しかし、一次元双方向あるいは二次元面内での位置制御といったエバネセント波による高次元駆動制御の試みはない。

そこで、筆者らは、方向の異なるエバネセントフォトン力を複数組み合わせさせた微粒子の位置制御を試みている。ここでは、基本的な特性として一次元駆動制御について紹介し、今後の展望をまとめの代わりとしたい。

#### 1. 原理および装置

エバネセントフォトン力による微粒子に対する駆動力の発生原理を図1(a)に示す<sup>2)</sup>。屈折率の異なる界面に全反射角以上で入射した光によって、媒質2の界面近傍に非伝搬光であるエバネセント場が励起される。そのしみこみ深さは、おおよそ波長程度である。図のように、その場の中に微粒子がある場合、エバネセント場は散乱を受けて伝搬光になり、一部は微粒子によって屈折を受け、一部は微粒子内部で反射される。したがって、伝搬光化した媒質2における光は屈折や反射により運動量が変化するため、微粒子は放射圧を受ける。この際、図のように、入射光と同じ向きの放射圧とエバネセント場強度の指数関数的分布による勾配力の合力が微粒子に与えられる。その結果、微粒子は界面に吸い寄せられながら入射光と同じ方向に移動することになる。移動速度は、界面への入射角や光強度、媒質2の粘性、粒径などに依存する。しかし、その移動方向は一方に限り、また自在に微粒子の位置を調節することは困難である。

そこで、筆者らは、図1(b)のように微粒子に対して互いに向きが180度異なる2本のビームによるエバネセント

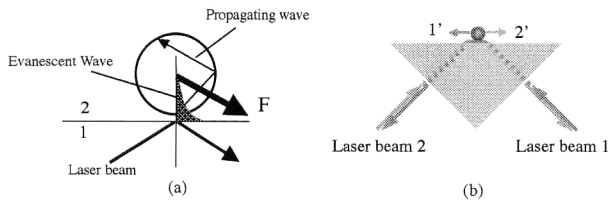


図1 (a) エバネセントフォトン力の原理, (b) エバネセントフォトン力による粒子駆動の原理.

場をつくり、直線上での微粒子の移動方向や位置決め制御することを考案した<sup>5)</sup>。たとえば、図の1のビームだけを照射させれば左の方向に粒子は移動し、2のビームだけを照射すれば右方向に移動する。移動速度はビーム強度を調節することで制御可能である。また、両方のビームを等強度にして同時に照射すれば、微粒子は大きさが等しく逆向きの力を受けるので、停止状態すなわちトラップすることができる。この際、2本のビームによる干渉縞の微粒子の運動への影響が考えられる。しかし、干渉縞の間隔はただか $0.5\ \mu\text{m}$ 程度であり、数ミクロン以上の直径の粒子を移動させるのであれば、干渉縞は平均化されて駆動に大きな影響を与えることはない。

図2は、エバネセントフォトン力による微粒子の一次元駆動実験の光学系である。光源には、波長 $1.064\ \mu\text{m}$ の連続発振YAGレーザーを用いている。レーザーを2分割して直角プリズムに全反射角以上で入射させ、レンズを用いてプリズム表面に集光する。それぞれのビームは、パルスモーターに取り付けられた回転NDフィルターによって強度調節される。駆動する粒子は、プリズム表面に設けられたリング内の水の中に分散されている。粒子は、プリズム上面から倍率20倍の長焦点対物レンズを通してCCDカメラで観測される。また、微粒子の位置決め制御のためにPCによる画像処理によって駆動粒子の重心位置が逐次算出される。算出された位置座標は、PCによって目標座標との差分や速度が算出され、回転NDフィルターの回転角制御が行われる。また、必要に応じてカメラ出力はビデオテープに記録保存される。

## 2. 駆動実験

図2の実験装置を用いて、1本のビームにおける微粒子の光強度に対する移動速度を求めた。実験に用いた微粒子は、直径 $10\ \mu\text{m}$ 、屈折率1.59のポリスチレンラテックス球である。その結果を図3に示す。図から、移動速度は光強度に比例することがわかる。典型的な速度は、レーザー強度 $200\ \text{mW}$ に対して毎秒 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ であった。

次に、2本のビーム(各出力 $240\ \text{mW}$ )を同時に照射させたときの微粒子のトラップ特性を求めた。図4は、レーザービームを照射させないときと照射させたときの単一ラテ

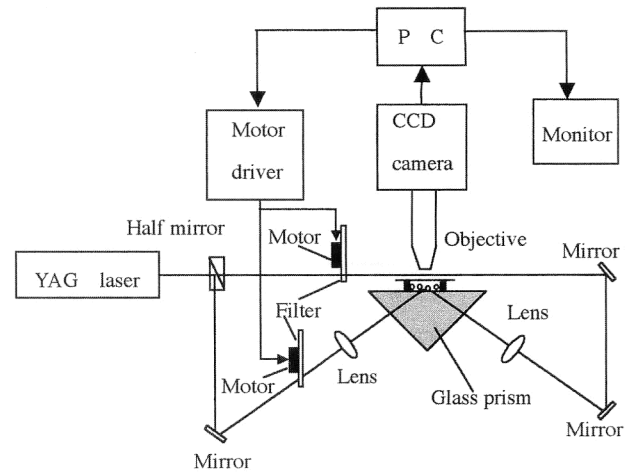


図2 エバネセントフォトン力による微粒子駆動のための実験装置.

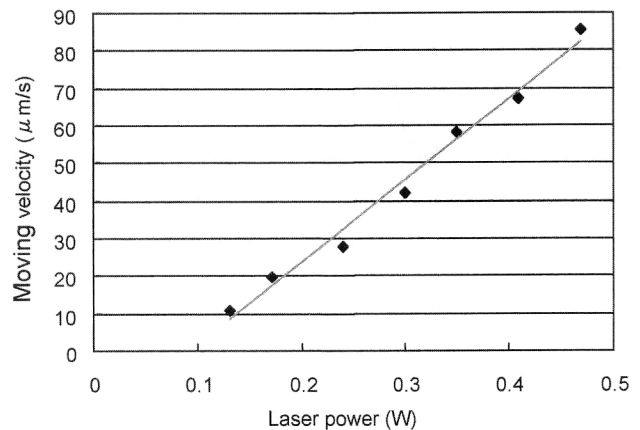


図3 レーザー強度に対するラテックス粒子の移動速度.

ックス球の位置の時間変化である。照射させない場合には、6分で $X$ 方向に $2\ \mu\text{m}$ 、 $Y$ 方向に $8\ \mu\text{m}$ 以上移動している。これに対して、同時にビームを照射させると、 $X$ 、 $Y$ 方向とも $1\ \mu\text{m}$ 以内の変動に抑えられ、トラッピングが実現されているのがわかる。ここで両図にみられる急激な位置変動は、使用した画像処理装置の画素分解能の制限によるためである。

また、2本のビーム(各出力 $140\ \text{mW}$ )を交互に照射させて2点間を移動させ位置制御したときの微粒子位置の時間変化を図5に示す。ここで、2地点のうち、図の下側の目標点Aは同一の場所、上方の目標点Bは逐次Aに対して $10\ \mu\text{m}$ ずつ近づけている。これから、2点間を往復しながらだいにB点がA点に近づいている様子が見取れる。その位置決め精度は、最大 $9\ \mu\text{m}$ 以内の誤差に収まっている。また、水の粘性により粒子速度は静止した状態から徐々に上昇しはじめ、ある時間経過後定常値になっているのが、2点間を結ぶ移動曲線の勾配変化からわかる。

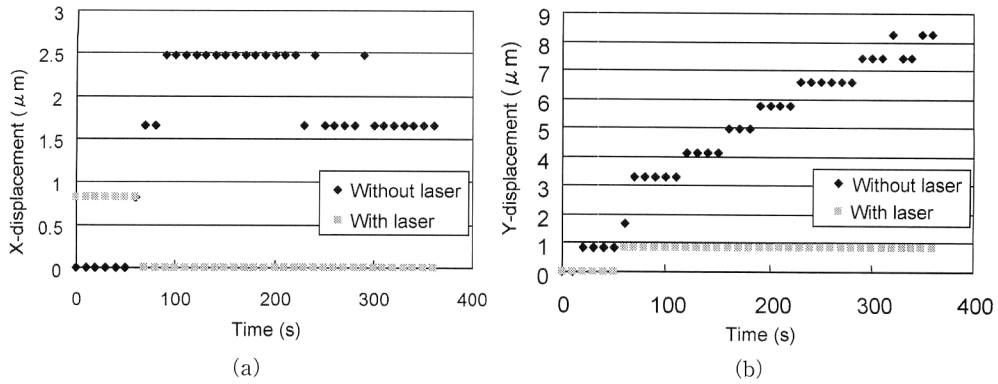


図4 2本の対向入射ビームによる微粒子のトラッピング実験。(a) X位置の時間変化, (b) Y位置の時間変化。

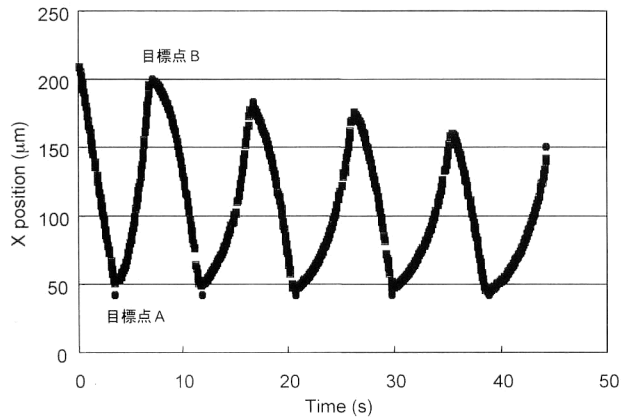


図5 ラテックス粒子の一次元駆動および位置制御実験。

さらに、図1(b)において、追加の2本のレーザービームを直交する方向から対向入射させて、微粒子に直角な4方向の面内光子力を与えることにより、二次元位置の駆動制御の予備実験を試みた。得られた微粒子移動の連続分解写真を図6に示す。各写真は2秒おきに撮影されている。(a)~(c)は左方向に移動するように対応する1本のビームを入射させることで30 μmあまり移動し、(c)から(d)にかけては上向き方向に移動するように1本のビームを入射させることで上向きに移動している。

以上、筆者らが最近試みている、エバネセント光子力による微粒子の位置制御の原理といくつかの実験結果を紹介した。この方法は、従来の対物レンズなどによるマニピュレーションに比べ、機械的操作が不要で、かつ全反射界面近傍の物体だけを選択的に操作できるのが特徴である。現在のところ、二次元的操作は予備実験の段階であり、PCによる自動位置決め制御などの実験を進めて、本手法の有効性を実証していきたい。

最後に、本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研

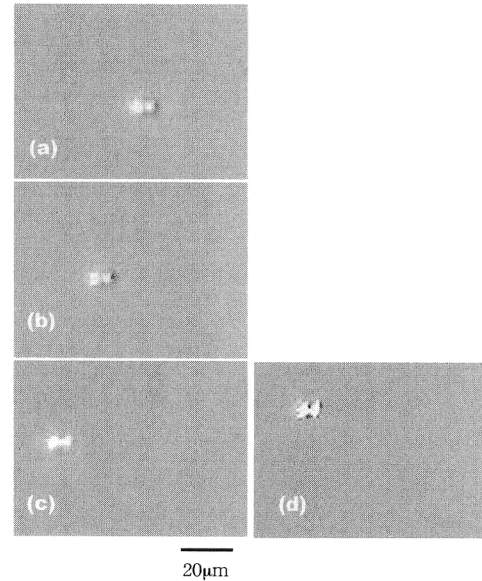


図6 ラテックス粒子の二次元駆動の時間分解写真。各写真は2秒間隔で撮像。

究Bの援助によって行われた。

## 文献

- 1) 大津元一：光科学への招待（朝倉書店，1999）。
- 2) S. Kawata and T. Sugiura: "Movement of micrometer-sized particles in the evanescent field of a laser beam," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 772-774.
- 3) E. Almass and I. Brevik: "Radiation forces on a micrometer-sized sphere in an evanescent field," *J. Opt. Soc. Am. B*, **12** (1995) 2429-2438.
- 4) S. Kawata and T. Tani: "Optically driven Mie particles in an evanescent field along a channeled waveguide," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1768-1770.
- 5) S. Nam, N. Umeda and A. Takayanagi: "Position control of micrometer-sized particle with evanescent photon force," *Proc. SPIE*, **4456** (2001) 1-7.

(2002年6月3日受理)