

ニアフィールドフォトン工学

— 光導波路の上を走る微小機械 —



技術解説

河田 聡*

Optical Near-field Photon Engineering

— Optical Micromachine Driven on an Optical Wave Guide —

Key Words : Near-Field Optics, Photon Pressure, Optical Wave Guide, Evanescent Photon, Micromachine

1. ニアフィールド光学とフォトン工学 - 古くて新しい光のテーマ

センサー表面の吸着分子を見る光センサー(表面プラズモンセンサー)や表面の物質の分布を波長を越えて観察する顕微鏡(ニアフィールド顕微鏡),あるいは3次元構造体の内部を見るレーザー顕微鏡(コンフォーカル顕微鏡)や光メモリ(フォトリフラクティブ光メモリ)などの研究をしているうちに,図1のような光導波路の上を走る微小機械(電車というよりは光車!?)を作ってみたくなった。

この思いつきの背景には,物質の表面の近くを扱うニアフィールド光学とフォーカスビーム

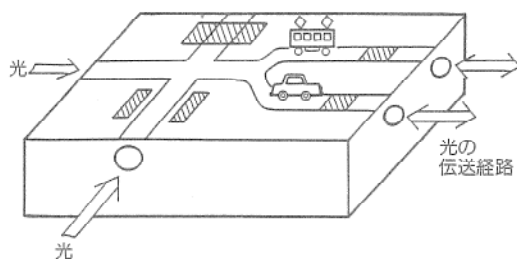


図1 光導波路の上を走る微小機械(光車)の概念図

* Satoshi KAWATA

1951年10月1日生

1974年大阪大学工学部応用物理学科卒業

1979年大阪大学工学研究科応用物理学専攻博士課程修了

現在,大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻,教授,工学博士,

光学,分光学,計測学

TEL 06-879-7845



の3次元光学の研究に加えて,フォトンの運動量変化を微小物体の運動制御に利用するフォトン工学の研究経験があった。フォトン工学の研究は,レーザークーリングやレーザートラッピングとして,最近では多くの研究者の知られるところとなってきたが,特に μm サイズの粒子をレーザービームで捕まえる研究は,基礎工の柳田敏雄教授グループ(生物物理)が早くに興味を持たれ,当時新技団の増原宏教授(現在,工学部)のグループとわれわれのグループが共に巻き込まれてきて,阪大が日本をリーディングする形になった。

ついでながら,この光導波路を走る微小機械の光学は,光学的ニアフィールドにある複数の粒子(双極子)が作る強い電磁相互作用の可視化問題としても面白い。理屈は昔からわかっているが,机上の空論であったことが,最近の光エレクトロニクス技術とナノメトリック制御機構の進歩,さらには各種の機能を満足するレーザーとシミュレーション用コンピュータの高性能化によって,現実になる過程を体験することは愉しく,先端技術による実験を通してのフォトンについての再発見,再認識を経験できる時代が来たといえる。

2. フォトンの持つ力 - フォトン工学

さて,光の粒であるフォトンには,質量は持たないが運動量 $p = \hbar k$ を持っている。そこで,光が物質にぶつかると,フォトンの運動量を受け取って物質は動く(図2)。たとえば,赤い

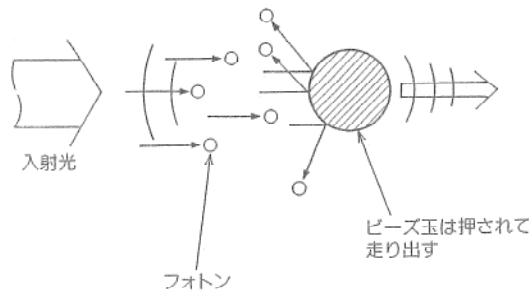


図2 光(光子)の放射圧

光子が1000個あれば、100nm径の微粒子を1 μ m/secで走らせることができるし、もっと軽い粒子、例えばナトリウム原子1個は、波長590nmの光子1個によって、その運動速度を3cm/secだけ変化させられる。原子の熱運動を、光子を繰り返しぶつけることによって抑えていくと、原子を絶対0度近くまで冷却をすることもできる¹⁾。光子を1個や1000個などと、ケチなことをいわずに、例えば0.3mWのレーザーパワーを使えば、10 μ m径の赤血球を重力に抗して浮上させることも可能である²⁾。このように、生物細胞や生体分子程度の大きさや重さのものを動かすのに、レーザーが発する光子の持つ力はちょうど適当な大きさであり、また光のリモートアクセス機能と試料に対する非破壊性から、細胞工学や生物物理の研究に、光子力学は特に活発に利用されてきている。

3. エバネッセント光子は重くて進まない？ —ニアフィールド光学

ところで、光を普通に進行することのできない状態にすると、非放射な場が形成され、遠く(ファーフィールド)へ放出できない光子がそこに存在する。このような電磁場はエバネッセント場と呼ばれ、このような光子はエバネッセント光子と呼ばれる。「普通に進行できない状態」は、図3に示すように、光が屈折することのできない角度から光を入射したり、回折する方向を失うぐらい細い(波長より細い)間隔を持つ格子に光を入射したり、あるいは波長より十分小さな穴に光を入射したりするとき生じる。このような状態では、光波は波が伝播のための分散関係をそのまま満足することがで

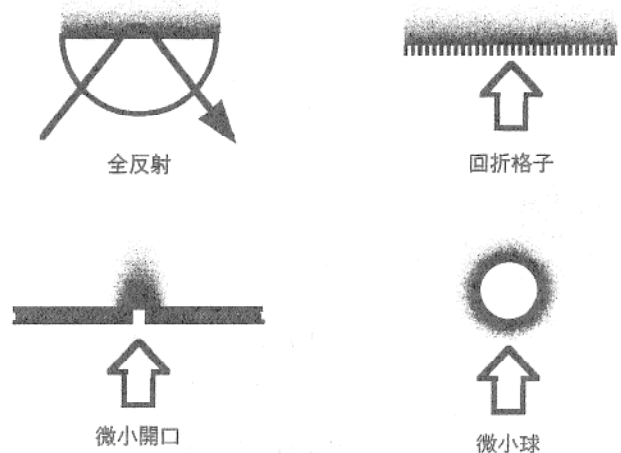


図3 エバネッセント光子の発生方法

きず、伝播方向には通常の波数より大きな波数と運動量をもち(すなわち、重い光子といえることができるかもしれない)、直行する方向には虚数の波数と運動量をもつ(そこで仮想光子と呼ぶ人もいる)。

このようなエバネッセント光子が支配する光学は、ニアフィールド光学と呼ばれ、光子の表面局在性や超短波長性あるいは表面電場増強機能を活かして、高感度の表面センサや表面分析法あるいは超解像顕微鏡^{3,4)}や超解像光メモリへの応用研究が活発に行われている⁵⁾。エバネッセント光子の持つ運動量は、物質から離れる方向には虚数であるので、その方向へは伝搬していかないはずだが、そこに微粒子が存在すると、光子は粒子にトンネリングして散乱され、運動量の変化が生じる。その結果、微粒子は動く(あるいは止まる)ことになる^{6,7)}。

4. 光導波路の上を走る微粒子

エバネッセント光子は、光導波路の周囲にも生じる。光子が導波路内部を伝播するとき、その周囲では屈折率の違いから伝播の分散関係が満足されないため、そこで光子はエバネッセント化する。図4のように、基板表面に浅く埋められたチャンネル導波路上に微粒子が存在すると、法線方向には、導波路との間に引力斥力が働き⁸⁾、チャンネルを切る方向には、導波モードがつくる電場勾配によって、比屈折率が1を越える粒子なら、導波路上に引

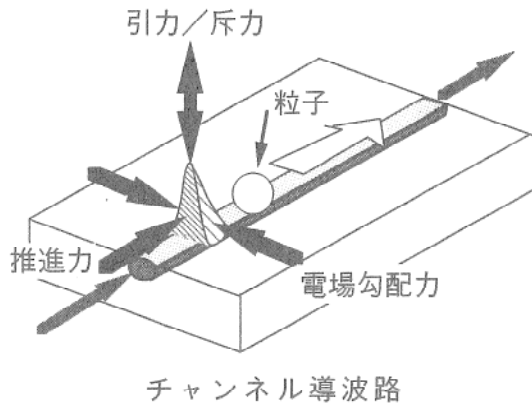
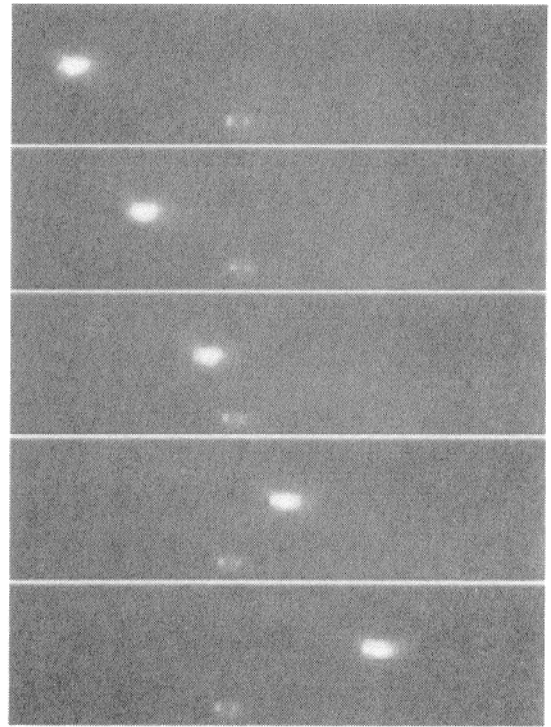


図4 チャンネル導波路上のエバネッセントフォトンによって生じる3次元の力

き寄せられる力が働く。導波路の軸方向には、エバネッセントフォトンはその運動量は普通の伝搬光のそれより大きな値を持つ重いフォトンであることより、普通のフォトンより大きな推進力を得る。この3次元的な力の場により、チャンネル導波路上の近くにある粒子は、溝もないのにチャンネルの上に引き寄せられ、チャンネルから外れることなく走る。

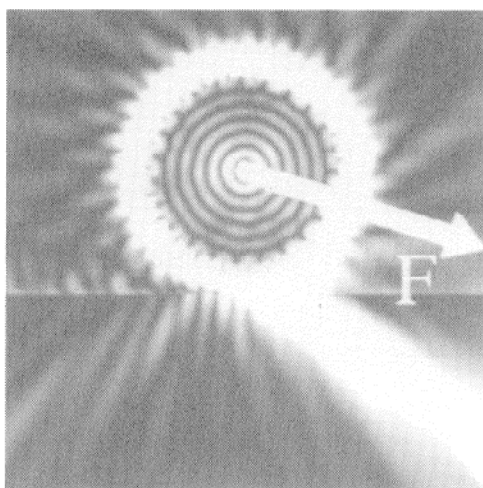
図5は、上に水を張ったチャンネル導波路上を5 μm 直径のポリスチレンラテックス球が、エバネッセントフォトンと相互作用して走る様子を、その上方から顕微鏡対物を用いて観察した、写真シリーズである⁹⁾。導波路は、ファー



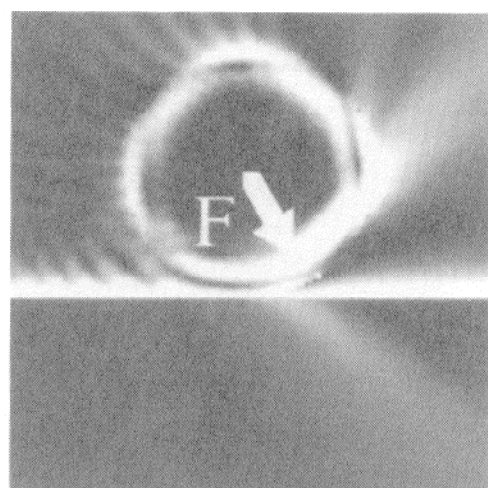
20 μm

図5 チャンネル導波路上をポリスチレン球(5 μm 径)がエバネッセントフォトンの力を受けて走る様子。5秒毎の連続写真。光は左側から導波路に導入されている。

フィールドではもちろん見えることはないが、その上の微粒子は、導波路を走るフォトンを散乱させるので、観察することができる。



(a)



(b)

図6 エバネッセントフォトン場中の粒子近傍に形成される電場分布のコンピュータシミュレーション結果。(a) 共鳴状態 (size parameter 18.08) と (b) そこからわずかにずれた状態 (size parameter 18.58) での結果。

レーザーは $1.047 \mu\text{m}$ の Nd:YLF レーザーを用いた。粒子がエバネッセント光子によって受ける力は、Navier-Stokes の定理に従って、媒質(水)の粘性と粒子の粒径、速度の関係から求めることができる。たとえば、80mW のレーザーパワーが導波路に入射したとき、 $5 \mu\text{m}$ 径ポリスチレン粒子の受ける力は、速度が $14 \mu\text{m/s}$ であったことより 0.86N であることが求まる⁹⁾。

図6は、エバネッセント場にある粒子が作る光散乱の様子をコンピュータシミュレーションした結果である。この例では粒子は空気中にあるとした。図6(a)では、粒子内での光子の閉じ込め効果が大きく、微小球が光子のマイクロキャビティーとして働き、強い表面電場(エバネッセント場)が微小球の周りに形成され、それによって大きな力を得ていることがわかる。図6(b)はマイクロキャビティーの共鳴条件から少しはずれたサイズパラメータを持つ粒子が作る電場分布である。このような球の内部と表面場は、当然、レンズなどを用いてもファーフィールドでは観察できないので、コンピュータシミュレーションが重要である。

5. 複数の粒子を駆動する

さて、導波路上に2つ以上の粒子が存在する

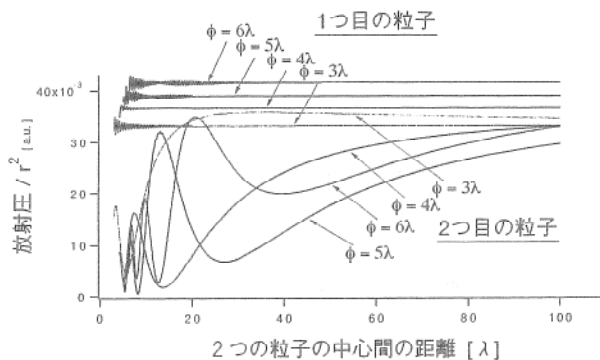


図7 2つの同じ大きさの粒子 ($n=1.2$) 間の距離に対する、2つの粒子の受ける放射圧の大きさ。2つ目の粒子はそのサイズと距離によって放射圧は大きく変化する。

と、それぞれの粒子に働く力はどう変わるだろうか？ 図7は、2粒子間の距離を横軸にとって、2つの粒子に働く力を示したグラフであり、特に2番目の粒子の受ける力が、距離に対して振動しながら大きく変化していることがわかる。また、粒径が 4λ 以上では2粒子は次第に近づいていき、 3λ 以下では離れていくことも示されている。図8は2つの粒子が作る電場分布を計算した結果である¹⁰⁾。(a)と(b)は、ふたつの粒子間の距離が違うだけであるが、(a)の場合、1つ目の粒子(左側)によるMie散乱場の前方散乱成分が、2つ目の粒子によってレンズ効果を受け、さらに前方散乱しているのに対し、

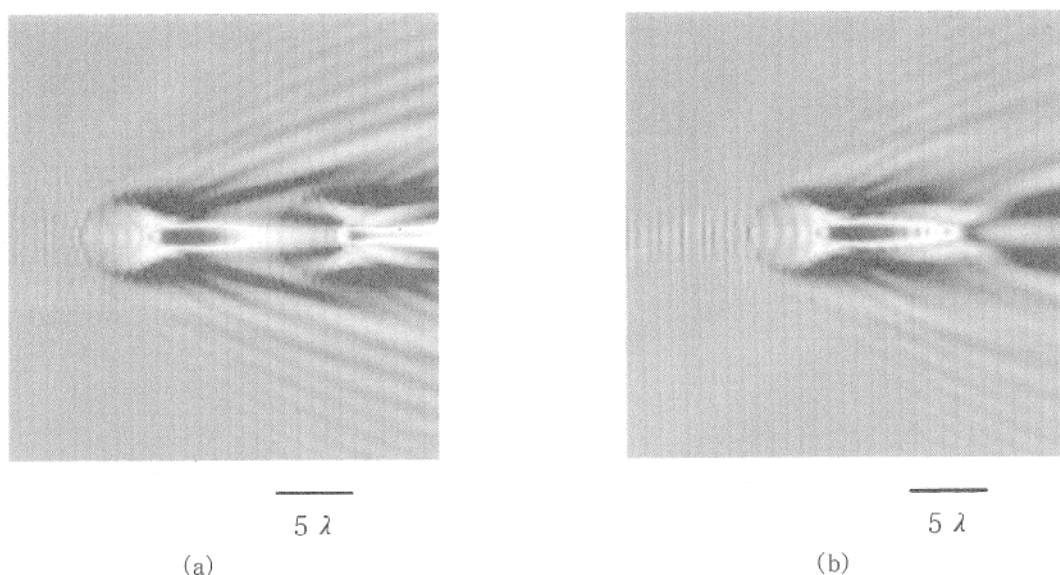
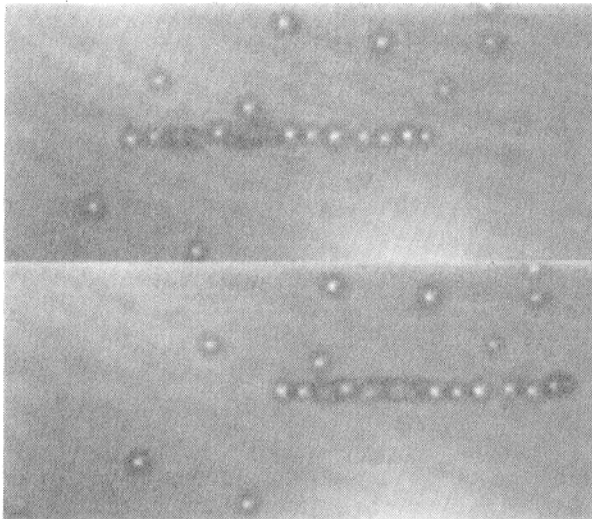


図8 連続して並ぶ2つの球(直径 5λ 、比屈折率 1.2) に左側から平面波が入射したときの電場分布。(a)は2粒子間の距離が 13.05λ 、(b)は 8.25λ 離れた場合。(a)では2つ目の粒子は1つ目による散乱光子を受けて、前方に強い場を形成している。

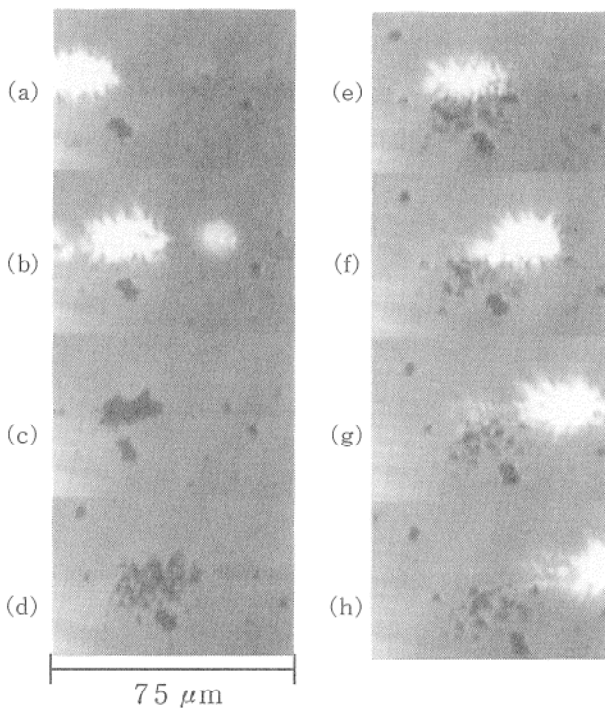


20 μm

図9 複数の粒子のチャンネル導波路上の駆動の様子 (6秒間隔). 導波路上のエバネッセント光子により, 一列になって走る.

(b)では2つ目の粒子から1つ目の粒子へ再び戻る光子のカップリング効果が大きく, 2粒子間において強い相互作用を示している.

図9は, このシミュレーションを検証する実験で, 粒径が 5λ (すなわち2粒子は引き寄せられる筈)の複数の粒子が, それぞれが導波路上にトラップされた後, 互いの距離が近づき,



75 μm

図10 導波路上を走る金属粒子の写真

最終的には一体となって一列で導波路上を進む様子が示されている.

6. 金属粒子も線路を走る

金属物体も, 導波路上を外れずに走る⁹⁾. これは, 金属が1より小さな屈折率を持っていることから考えると矛盾することだが, その複素誘電率を考えると, 電場勾配によって導波路に引き寄せられてその上を走ることになる. 図10は, たくさんの白金の微粒子 ($1\mu\text{m}$ 径) が, 凝集して走る様子を示した写真である. (a)から(b)まで, 白金の粒子は一团となって移動を続け, (c)においてレーザービームを止めると(d)でブラウン運動を起こして拡散していく様子が観察できる. (e)で再びレーザー光を導波路に入射すると, (h)に至るまで導波路上に乗っていた粒子だけが駆動し, 他は線路からおりたかのように取り残されてしまう.

7. 夢と現実 - ニアフィールド光学と光子力学の未来

ここで示したマイクロ光(電)車の具体的な応用としては, セルソーターやマイクロカプセルによる薬物輸送, マイクロセンサ, マイクロ・アクチュエータなどを挙げることができるかもしれないが, それはあくまでも最初の思いつき(図1)の中の話. テーマはもっともっと大きく広げたい. たとえば, 微小なプローブを光子の力で制御する超解像ニアフィールド顕微鏡¹¹⁾も, ニアフィールド光子力学の我々の大きな研究成果である.

光学的ニアフィールドにおいて光子と物質中の電子が相互作用を繰り返すと, 様々な物理伝達情報が交換される. フォトンの放射圧の影響も大きい. 情報メッセンジャーである光子や, ポラリトン, エキシトンなどのみならず, 試料やプローブなど, 物質そのものが働くなら, そのやりとりを総合的にとらえる物理の認識が必要である. 新しいモデリング, そしてそれを用いた計測データからの逆問題の解法の確立が持たれる.

エバネッセント光学とレーザーの放射圧という二つの古典光学の利用は, 新しい科学技術を

展開してくれるかもしれない。たとえば、メゾスコピックサイズの物理や表面薄膜などの物理、それらに応用したデバイス、材料技術、その生物学、化学、機械学などへの応用など広範な先端科学技術分野に、研究分野が展開かつ融合されていくことを期待したい。

研究室では、一人1テーマを基本としているが、この研究は、谷武晴君(修士2年)の研究の成果である。

文 献

- 1) W. D. Phillips, J. V. Prodan & H. J. Metcalf : J. Opt. Soc. Am. B. 2 (1985) 1751
- 2) 河田 : エレクトロニクス 38 (1993) 56
- 3) Y. Inouye & S. Kawata : Opt. Lett. 19 (1994) 159
- 4) 河田 : 光学 21 (1992) 766
- 5) 河田 : OPTRONICS No.156, 104 (1994)
- 6) S. Kawata & T. Sugiura : Opt. Lett. 17 (1992) 772
- 7) 河田 : 応用物理 64 (1995) 1211
- 8) T. Sugiura & S. Kawata : Bioimaging 1 (1993) 1
- 9) 谷, 河田 : 日本光学会近接場光学研究グループ第3回研究討論会予稿集 (1995) 44
- 10) S. Kawata & T. Tani : Proc. OSA. Annual meeting ThAAA3 (1995) 168
- 11) S. Kawata, Y. Inouye & T. Sugiura : Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) L1725

