

近接場光を用いた原子の制御

伊藤 治彦^{*,**,*}・大津 元一^{*,**,*}

近接場光は物質表面に留まって外部には伝搬していかない光の場である。光波の全反射の際に生じるエバネセント光¹⁾が古くから知られており、ドップラーフリー分光法のひとつとしても用いられてきた。近年における関連研究の拡大と展開^{2,3)}の過程で「場の局在性」が大きな比重を占めるようになり、従来のエバネセント光（次第に消えゆく光）という名称では物理的特性を正確にいい表せないとの認識から、現在ではより適切な表現として近接場光（near field）の名称が定着している。この用語は伝搬光（far field）との対比においても便利なものになっている。

近接場光を用いる研究の基盤のひとつとなっているのは、一端をナノ寸法に尖らせた先鋭化ファイバーをつくる技術である^{2,3)}。この技術の確立によってナノ領域に局在化した近接場光をさまざまな場面で使用する可能性が開けてきた。たとえば、回折限界をはるかに超えた分解能をもつ光学顕微鏡への応用は周知であろう^{2,3)}。また、単なる顕微システムにとどまらず、量子ドットや生体試料の観測にも大きな威力を発揮している²⁾。

先鋭化ファイバーの先端近傍につくられる近接場光の局在範囲は、波長に依存せず先端の曲率半径程度であることが実験結果などから示されている^{2,3)}。すなわち近接場光は回折の影響を受けず、伝搬光の場合に現れるような空間分解能の回折限界をもたない。近接場光の局在性を利用すれば原子のような微粒子の運動も非常に高い位置精度で制御できることが期待される。本稿ではすでに確立している近

接場光を用いて原子を反射したり誘導したりする手法に触れたあと、先鋭化ファイバーによって原子を操作する可能性について筆者らの研究に基づいて概観する。

1. 近接場光による原子の反射

空間的に強度が一様でない共鳴からわずかに離調した光の場に原子が置かれているとき、強度の変化する方向に原子は双極子力⁴⁾と呼ばれる力を受ける。双極子力の強さは光強度の勾配と周波数離調に比例する。近接場光は指数関数的に強度が減衰するため、原子の熱運動を大きく変化させるほどの強い双極子力を原子に及ぼすことができる。他方、力の向きは原子の共鳴周波数と光周波数の兼ね合いによって決まる。近接場光の場合、光周波数が共鳴周波数よりも高い場合（正離調）には光の場からはじく向き（斥力）に作用し、低い場合（負離調）には光の場に引き込む向き（引力）に作用する。近接場光による原子の制御では基本的にこのような双極子力が用いられる。

図1に、近接場光によって原子を反射する方法を示す。プリズム表面でレーザー光を全反射させ表面近傍に近接場光を誘起する。このときレーザー光が正離調されていれば、近接場光領域に進入してきた原子は斥力を受けて反射される。この種の最初の実験はBalykinらによってNa原子を用いて行われた⁵⁾。その後、Aminoffらは近接場光上で重力落下するCs原子がトランポリンのように繰り返し反射されるのを観測した⁶⁾。

原子反射実験は基礎研究にも応用されている。誘電体表面近傍ではファン・デル・ワールス力が原子に働くことが知られているが、これまで基底状態の原子に対しては精密に測定する方法がなかった。Aspectらは近接場光による原子反射の実験において双極子力の強さが周波数離調にも依存することを利用して、双極子力（斥力）とファン・デ

*東京工業大学大学院総合理工学研究科電子機能システム専攻
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259 番地)
E-mail: ito@ae.titech.ac.jp

**科学技術振興事業団さきかけ研究 21「場と反応」領域グループ
(〒700-0904 岡山市柳町 1-1-1 住友生命岡山ビル 17 階)

***神奈川科学技術アカデミー光科学重点研究室第2研究グループ
(〒213-0012 川崎市高津区坂戸 3-2-1 かながわサイエンスパーク東棟 408 号室)

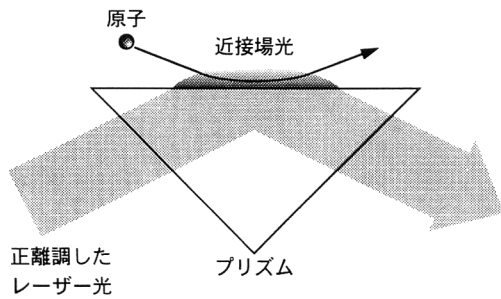


図1 正離調したレーザー光の全反射によりプリズム表面に誘起された近接場光による原子の反射。

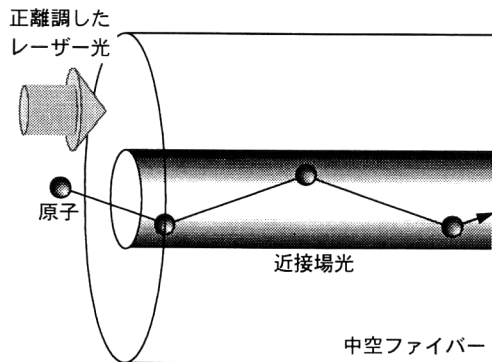


図2 中空ファイバーを用いた原子の誘導。正離調したレーザー光のコア部分への結合によって中空領域に誘起された近接場光が内壁表面に近づいてきた原子を反射する。

ル・ワールス力（引力）が釣り合い原子が反射されなくなる場合を調べ、基底準位の原子に対するファン・デル・ワールス力を見積もった⁷⁾。

2. 中空ファイバーによる原子の誘導

原子を反射する近接場光のトンネルをつくることにより、原子をその中に閉じこめて誘導することができる。図2に光を導波するコアの中心に穴がある中空の光ファイバーを用いた原子誘導路の概略を示す。レーザー光（誘導光）を中空ファイバーに結合させると伝搬モードに付随して近接場光が内壁表面を覆うようにして励起される。正離調の場合、中空領域に進入してきた原子は内壁表面に近づくと近接場光から斥力を受け、反射を繰り返しながらファイバーの中を進んでいく。

原子の誘導実験は共鳴波長780 nmのRb原子を用いて行われた^{8,9)}。図3に筆者らのグループが用いた中空ガラスファイバー（中空径2 μm 、コア厚4 μm ）の断面写真を示す。原子の誘導に適した近接場光を伴う伝搬基本モードであるLP₀₁モードが励起されている⁹⁾。図4に中空径7 μm の中空ファイバーから誘導されて出てきたRb原子（細い原子ビーム状にして中空ファイバーの中空領域に導入している）の2段階光イオン化スペクトルの一例を示す⁹⁾。ここ

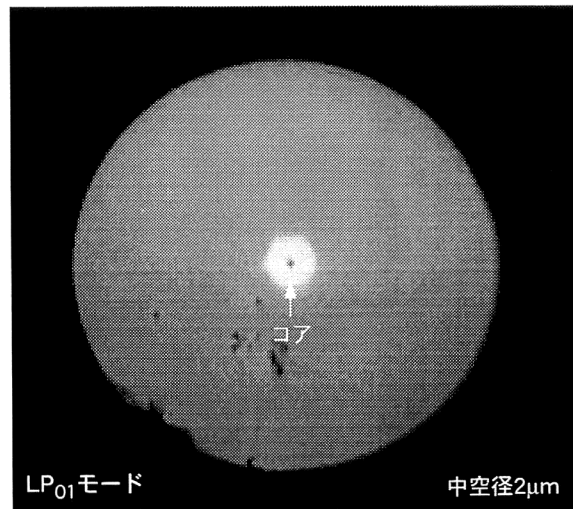


図3 中空径2 μm の中空ガラスファイバーの断面写真。中心の中空部分のまわりに厚さ4 μm のコアがあり、さらにそのまわりにクラッドがある。基本伝搬モードであるLP₀₁モードが励起されている。

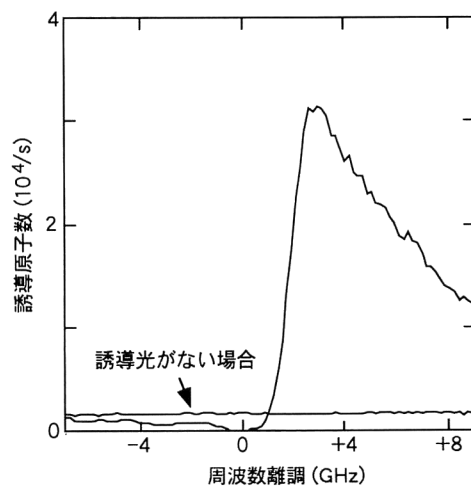


図4 中空径7 μm の中空ファイバーによって誘導されたRb原子の2段階光イオン化スペクトル。5S基底状態のRb原子を半導体レーザーによって5P状態に励起した後、波長476.5 nmのアルゴンイオンレーザーによってイオン化しチャンネル電子増倍管で検出している。

では中空ファイバーから出てきた5S基底準位にあるRb原子を波長780 nmの半導体レーザーで5P準位に励起した後、波長476.5 nmの高出力アルゴンイオンレーザーでさらにイオン化レベルに励起している。イオン化されたRb原子はチャンネル電子増倍管によって検出されている。誘導光がない場合の結果と比べると、正離調領域では原子が誘導されるため検出原子数が大幅に増加しているのがわかる。

近接場光による原子制御では共鳴的な双極子力を利用しているため、原子の種類や量子状態を光周波数によって選

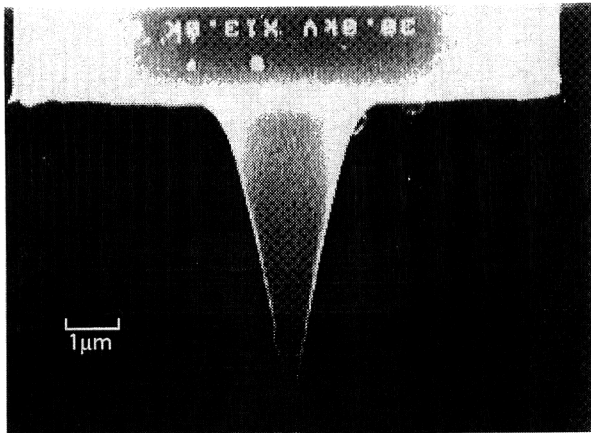


図5 化学エッチング法によって作製した先鋭化ガラスファイバーのSEM像。先端の曲率半径は2 nm (またはそれ以下) と見積もられる。

択することができる。実際、筆者らは上述の原子誘導路を用いて質量数85と質量数87の2つのRb同位体の分離を試みている⁹⁾。また、微小な中空径をもつ中空ファイバーの内部では原子と真空場との相互作用の結果生じる共振器量子電気力学効果の増大が期待されるが、原子誘導の手法を応用することによりその観測が可能になると思われる²⁾。

3. 先鋭化ファイバーによる原子の操作

光を用いた気体原子の制御に関する研究のひとつの方向が低温化と高密度化であったのに対して、もうひとつの方向は位置制御の高精度化や少数化に向けられている。後者は特に単一原子の操作を視野に入れたものであり、ナノアプリケーションへの応用に期待が寄せられている。

表面に付着した原子の操作はscanning tunneling microscopy技術を用いることによって可能になっているが、自由な気体原子の場合はどうであろうか。大津と堀らは先端をナノ寸法に尖らせた先鋭化ファイバーによって単一の気体原子を操作することができる可能性を示した^{10,11)}。また、Letokhovらは原子をトラップするための近接場光の空間分布を計算によって求めている¹²⁾。以下の3.2節では、先鋭化ファイバーを用いた原子操作の有効な方法として、先の大津と堀らによって提案されたものとは異なる機構を導入する。

3.1 先鋭化ファイバー先端近傍の近接場光

先鋭化ファイバーの作製技術の進歩のおかげで、使用目的に応じて種々の大きさや形状をもったものがつくられるようになっている。図5に化学エッチング法によって作製した先鋭化ファイバー^{2,3)}のSEM像を示す。先端の曲率半径は2 nm (またはそれ以下) と見積もられる。その先端だけを残して側面は金などでコーティングすることにより伝搬

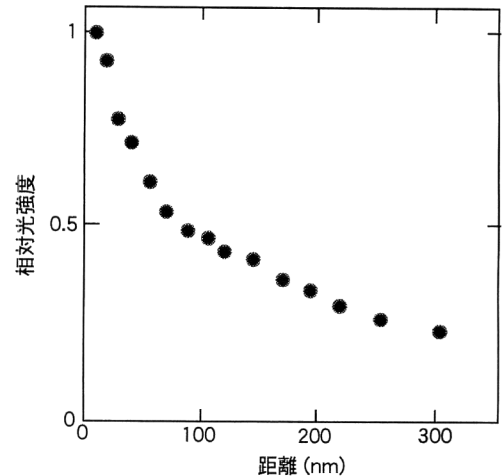


図6 曲率半径200 nmの先鋭化ファイバー先端近傍の光強度分布 (波長780 nm)。曲率半径40 nmの金コート先鋭化ファイバーを用いて、散乱光強度を近接場光をつくらせている先鋭化ファイバー先端からの距離の関数として測定している。

光成分を除去している。

先鋭化ファイバー先端近傍の光強度分布は別の先鋭化ファイバー (プローブとして使用) の先端を近づけたときに散乱される光をそれ自身でピックアップすることにより調べることができる。図6に先端曲率半径 ($=a$) が200 nmの先鋭化ファイバーに波長780 nmの光を結合させたときに生じる先端近傍の光強度分布の測定結果のひとつを示す。ここでは $a=40$ nmの先鋭化ファイバーをプローブとして用いて得た光強度を、近接場光を生じている先鋭化ファイバーの先端表面からの距離 ($=r$) の関数として描いている。なお、光強度は $r=10$ nmの位置での値で規格化されている。図6では $r=100$ nm程度までが近接場光成分と考えられ、それよりも遠いところでは伝搬光成分が混ざってきている。この場合、先端近傍の近接場光の強度分布は式 $I(r) = I_0 \exp(-1.85 r/a)$ で近似的に表すことができる。

近接場光の強度分布は原理的にマクスウェル方程式を数値的に解いて求めることができるが、物理的直感と結びついたものとして湯川型の強度分布式が提案されている。すなわち湯川型ポテンシャル

$$\phi(r) = \iint \frac{\exp\left(-\frac{r}{a}\right)}{r} dS$$

から強度分布を

$$I(r) \sim \left| \nabla \phi(r) \right|^2 + \frac{1}{a^2} \left| \phi(r) \right|^2$$

の形で与える^{3,11)}。最近、小林らは湯川型ポテンシャルが近接場光の3次元強度変化をよく表すことを理論的に導出

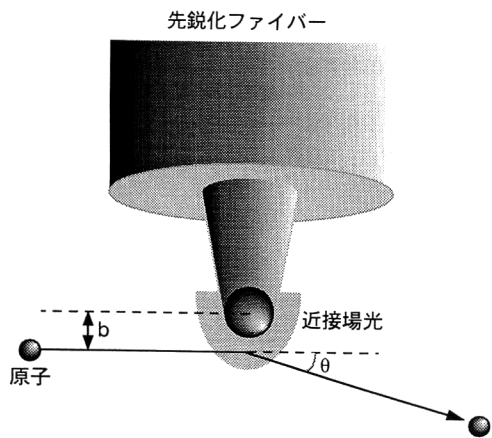


図7 先鋭化ファイバーを用いた原子の運動の偏向.

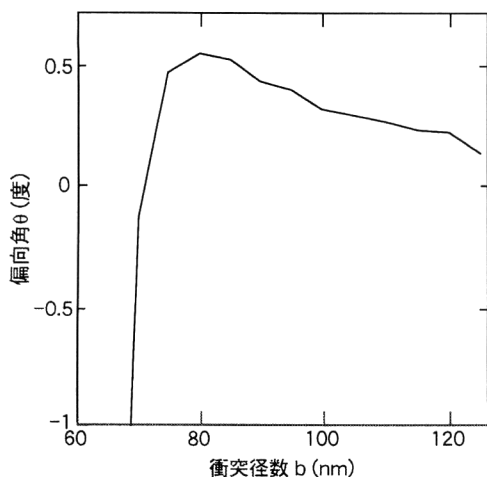


図8 曲率半径 50 nm の先鋭化ファイバーによる速度 10 m/s の Rb 原子の偏向 (計算). 先鋭化ファイバーへの結合光パワーから見積もった先端近傍における近接場光パワーを 50 nW としている.

している¹³⁾. 前述した先鋭化ファイバー先端近傍の強度分布の測定結果は湯川型強度分布に近いものになっている.

3.2 原子の運動の偏向とトラップ

湯川型強度分布に基づいて, 先鋭化ファイバーによる原子の操作として偏向とトラップの2つの場合を考えることにする²⁾. 図7に正離調した近接場光からの双極子力(斥力)による原子の運動の偏向を示す. 近接場光領域に進入した原子はファン・デル・ワールス力と双極子力を受けるが, 光強度が十分に強い場合には双極子力が勝り, 先端からはじかれる向きにその運動が曲げられる. 図8は $a=50$ nm の場合に速さ 10 m/s で飛来した Rb 原子の偏向角 θ を衝突径数 b の関数として数値的に見積もったものである. ここでは Rb 原子を散乱または偏向するポテンシャル障壁となる双極子力の光ポテンシャルを湯川型強度分布式から算出している (周波数離調 +1 GHz, 近接場光パワー

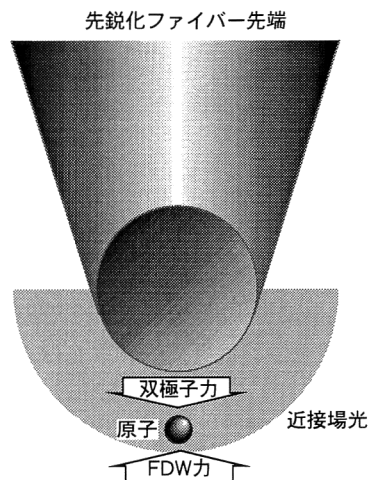


図9 先鋭化ファイバーによる原子の捕獲. 斥力の双極子力と引力のファン・デル・ワールス (FDW) 力の釣り合いによってトラップが形成される.

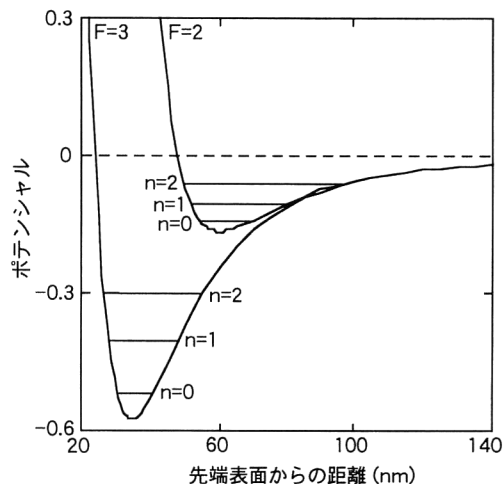


図10 曲率半径 20 nm の先鋭化ファイバー先端近傍に誘起されたトラップポテンシャル(周波数離調 +1 GHz, 近接場光パワー 600 nW). ⁸⁵Rb 原子の2つの超微細基底準位 $F=2$ および $F=3$ に対して示す. 原子は量子振動単位 (n でラベル) にトラップされる.

50 nW). 図8では $b=80$ nm において最大の偏向角 0.5 度が得られているが, この値は 10 cm 後方で原子の位置が入射方向から 100 μ m 程度変位することを示す (市販されている粒子検出器の分解能で検出可能).

先鋭化ファイバー先端近傍で原子に作用する双極子斥力とファン・デル・ワールス引力とを釣り合わせて (図9), 原子をトラップするためのポテンシャルを形成することができる. 図10に $a=20$ nm の場合において2つの超微細基底準位 $F=2$ と $F=3$ にある ⁸⁵Rb 原子に対して見積もったトラップポテンシャル (光ポテンシャルとファン・デル・ワールス・ポテンシャルの和) を示す. ここで周波数離調は基底下準位 $F=2$ に対して +1 GHz となるように取ら

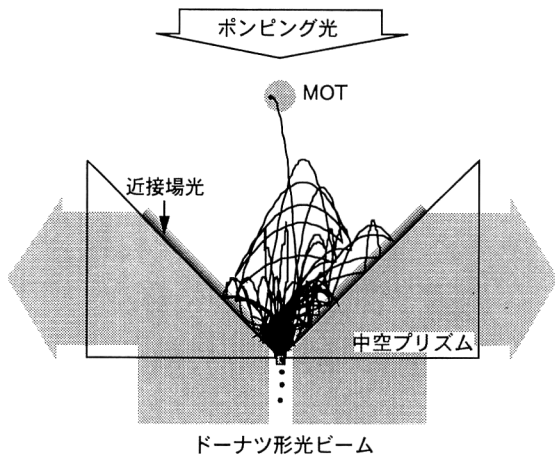


図 11 近接場光を用いた原子ファネル。磁気光学トラップ (MOT) から落下する冷却原子は中空プリズムの内壁に誘起された近接場光によって反射されると同時に運動エネルギーをも失い、冷却原子ビームとして出射される。

れている (近接場光パワー 600 nW)。Rb 原子はこのポテンシャル内につくられる量子振動準位 (図 10 に n でラベルした) のひとつにトラップされうる。たとえば基底上準位 $F=3$ に対するポテンシャル内の $n=0$ 振動準位には温度換算で $30 \mu\text{K}$ の ^{85}Rb 原子がトラップされる。

先鋭化ファイバー先端には完全に球形の光近接場がつくられるわけではなく、またナノメートルのオーダーの距離変化では重力ポテンシャルも原子を捕まえておくには十分でない。したがって図 9 に示したような場合でも鉛直上方に原子が逃げる可能性がある。より安定なトラップのためには複数の先鋭化ファイバーを組み合わせたものが必要となると考えられるが、そのひとつは正四面体の各面の重心に 4 つの先端を配置することにより実現される²⁾。

4. 近接場光ファネル

先鋭化ファイバーによる原子の操作では、ナノ寸法の近接場光と原子との間に相互作用が生じるためには原子の運動の速さが遅いことが必要となると同時に、効率よく近接場光領域に原子を送り込まなければならない。そこで冷却した原子ビームをそのソースとして使用することが考えられる。図 11 に筆者らが提案している磁気光学トラップ (MOT) からの冷却原子集団を原子ビームに変換する近接場光で構成した光ファネル (漏斗) を示す¹⁴⁾。中空のプリズムの鉛直下方からドーナツ形の正離調した光ビームを照射し内表面で全反射させて近接場光を誘起する。MOT から落下してきた原子は近接場光からの斥力を受けて反射され、プリズム下部に設けた出射口に集められビーム状になって出ていく。

このファネルでは反射だけでなく、その際に原子の冷却

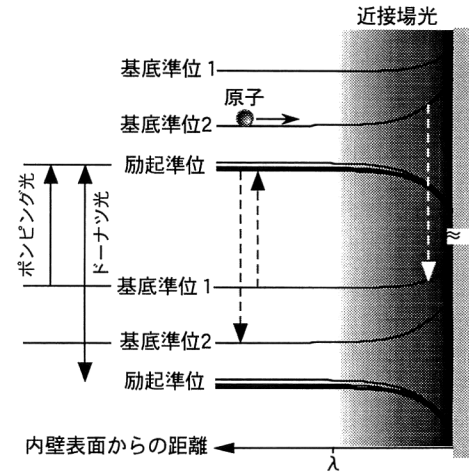


図 12 近接場光誘起 Sisyphus 冷却の原理。近接場光との相互作用の結果として表面近傍で原子のエネルギー準位が変化する。その変化分 (エネルギーシフト) は光ポテンシャルとほぼ等価であり、おおよそ光強度に比例し周波数離調に反比例する。Rb 原子のようなアルカリ金属原子は 2 つの超微細基底準位をもっており、両準位に対して正離調となるように光周波数を選んでおく (ドーナツ光と書いた矢印)。このとき、反射の際に両準位間の遷移が起きる (白破線矢印) と、周波数離調の違いから生じる両準位間の光ポテンシャルの差の分だけ原子の運動エネルギーが失われることになる。この過程はポンピング光によって繰り返される (黒破線矢印)。

が行われる点に特徴がある。図 12 にその原理を示す。近接場光領域に原子が進入してくると双極子相互作用によってエネルギー準位が光強度に比例して変化するが、Rb 原子のように 2 つの基底準位をもつ場合、両方の準位に対して正離調となるように光周波数を選んでやる (ドーナツ光と書いた矢印参照) と下準位 (基底準位 2) の方が離調が小さいためエネルギーシフトが上準位 (基底準位 1) より大きくなる。このようなエネルギーシフトは光ポテンシャルと等価である。そこで、基底準位 2 にいた原子が反射の際に基底準位 1 に遷移する (白破線矢印) と両基底準位間のポテンシャルエネルギーの差の分だけ運動エネルギーを失うことになる。この過程はファネルの鉛直上方から弱いポンピング光を照射することによって原子を基底準位 1 から 2 に戻してやれば (黒破線矢印) 繰り返させることができる (Sisyphus 冷却¹⁵⁾)。図 11 には平均温度 $10 \mu\text{K}$ のマクスウェル・ボルツマン分布をもつ MOT から落下する ^{85}Rb 原子のモンテカルロシミュレーションによって求めた軌跡のひとつを示してある。ファネル実験は現在進行中である。

先鋭化ファイバーを用いた原子操作技術は、伝搬光を主体とした従来の原子光学技術では不可能と思われていた位置制御性をわれわれに提供してくれるものと期待される。実際に実験を行う上での克服すべき課題が多く残されてい

るものの、その実現によってもたらされる成果を考えるならば取り組む価値の高いものであろう。たとえば、先鋭化ファイバーで捕まえた原子を所望の位置にまで運び、光周波数を負離調にして放してやれば atom-by-atom に結晶成長を行うことが可能となるかもしれない。

湯川型光強度分布式を用いた評価では伝搬光理論から得られた光ポテンシャルの表式をそのまま使用している。また、ファン・デル・ワールス・ポテンシャルもマイクロメートル領域で得られた結果を援用している。これらが近接場領域で本当に成り立つかどうかは理論的にも残された問題である。特に光子の概念を直接結びつけられない近接場光と原子の相互作用に関する理論的研究もまだこれからの課題である。Sisyphus 冷却では光子数状態に基づいた dressed atom 理論が用いられているが、近接場の場合にこれが正確にはどのようなになるか明らかとはいえない。このような点においても近接場光を含む場の量子化の問題は重要な未解決課題となっている。

近接場光の強度分布を知ることは原子操作の先鋭化ファイバーを設計する上で重要であるが、本稿でも述べた先鋭化ファイバー同士による測定では場を大きく乱して測定しているために正確な情報が得られていないと考えるべきである。先鋭化ファイバーによる偏向技術は原子の運動を高精度に制御できるばかりでなく、近接場光そのものの研究においても有用である。すなわち原子をプローブとして用いることにより近接場光をより非破壊に近い状態で調べることができる。これは湯川型光強度分布の検証にも役立つであろう。

文 献

- 1) 諸 元鑑, 堀 裕和: “エバネッセント波とは何か?”, *パリティ*, Vol. 11, No. 12 (1996) 14-22.
- 2) *Near-Field Nano/Atom Optics and Technology*, ed. M. Ohtsu (Springer-Verlag, Berlin, 1998).
- 3) M. Ohtsu and H. Hori: *Near-Field Nano-Optics* (Kluwer/Plenum, New York, 1999).
- 4) J. P. Dowling and J. Gea-Banacloche: “Evanescent light-wave atom mirrors, resonators, waveguides, and traps,” *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics Vol. 37*, eds. B. Bederson and H. Walther (Academic Press, San Diego, 1996) pp. 1-94.
- 5) V. I. Balykin, V. S. Letokov, Yu. B. Ovchinnikov and A. I. Sidorov: “Quantum-state-selective mirror reflection of atoms by laser light,” *Phys. Rev. Lett.*, **60** (1988) 2137-2140.
- 6) C. G. Aminoff, A. M. Steane, P. Bouyer, P. Desbiolles, J. Dalibard and C. Cohen-Tannoudji: “Cesium atoms bouncing in a stable gravitational cavity,” *Phys. Rev. Lett.*, **71** (1993) 3083-3086.
- 7) A. Landragin, J.-Y. Courtois, G. Labeyrie, N. Vansteenkiste, C. I. Westbrook and A. Aspect: “Measurement of the van der Waals force in an atomic mirror,” *Phys. Rev. Lett.*, **77** (1996) 464-467.
- 8) M. J. Renn, E. A. Donley, E. A. Cornell, C. E. Wieman and D. Z. Anderson: “Evanescent-wave guiding of atoms in hollow optical fibers,” *Phys. Rev. A*, **53** (1996) R648-R651.
- 9) H. Ito, T. Nakata, K. Sakaki, M. Ohtsu, K. I. Lee and W. Jhe: “Laser spectroscopy of atoms by evanescent waves in micron-sized hollow optical fibers,” *Phys. Rev. Lett.*, **76** (1996) 4500-4503.
- 10) M. Ohtsu, S. Jiang, T. Pangaribuan and M. Kozuma: “Nanometer resolution photon STM and single atom manipulation,” *Near-Field Optics*, eds. D. W. Pohl and D. Courjon (Kluwer, Dordrecht, 1993) pp. 131-139.
- 11) H. Hori: “Quantum optical picture of photon STM and proposal of single atom manipulation,” *Near-Field Optics*, eds. D. W. Pohl and D. Courjon (Kluwer, Dordrecht, 1993) pp. 105-114.
- 12) V. V. Klimov and V. S. Letokhov: “New atom trap configurations in the near field of laser radiation,” *Opt. Commun.*, **121** (1995) 130-136.
- 13) K. Kobayashi and M. Ohtsu: “Quantum theoretical approach to near-field optical system,” *J. Microscopy*, **194** (1999) 249-254.
- 14) H. Ito, K. Sakaki, W. Jhe and M. Ohtsu: “Atomic funnel with evanescent light,” *Phys. Rev. A*, **56** (1997) 712-718.
- 15) J. Söding, R. Grimm and Yu. B. Ovchinnikov: “Gravitational laser trap for atoms with evanescent-wave cooling,” *Opt. Commun.*, **119** (1995) 652-662.

(1999年6月30日受理)