

# ナノの光で原子を制御する

「場と反応」領域 伊藤 治彦

## 1. 研究のねらいと目的

レーザー光が及ぼす共鳴的な力学的相互作用を用いて気体原子の熱運動を制御する技術がこの20年ほどの間に飛躍的に進歩した。気体原子は室温において数100m/s 以上もの速さでランダムに動き回っているが、レーザー光を3次元的に6方向から照射することによりその運動エネルギーのほとんどを奪い去ることができる。このようなレーザー冷却法によって超低温・超高密度原子集団の生成が達成されている。他方、原子の空間位置制御性に関しては、従来の伝搬光を主体とした手法では波動性に起因する回折の影響のために原理的な制限を受け、波長程度の精度にとどまってしまう。こうした回折限界による空間位置制御性の低さは伝搬光による原子の個別的な制御（例えば単一原子制御）を困難なものにしている。そこで本研究では、回折限界を克服しより高精度な原子の空間位置制御を行うために近接場光と呼ばれる特殊な光の場の活用を図った。

近接場光は物質表面にとどまって空間には伝搬して行かない光の場であり、光線の全反射が生じる屈折率の変化する境界面や、尖らせた光ファイバーの先端近傍などに誘起することができる。その局在範囲は物質表面の曲率半径程度であり、回折の影響を受けないことが知られている。このようなナノ寸法の光の場を利用すれば、自由な気体原子を個別的・選択的に制御・操作することが可能となり、量子力学的現象の観測や原子スケールでの結晶成長などに応用することが期待される。

## 2. 研究方法と成果

近接場光を用いた原子制御では、基本的に双極子力と呼ばれる共鳴相互作用を用いる。双極子力の強さは光の強度変化の度合いに比例し、強度が指数関数的に急激に変化する近接場光は原子の熱運動を大幅に変えるほど強い力を及ぼすことができる。一方、双極子力の作用する向きは、原子に固有の共鳴周波数からの光周波数のずれ（周波数離調）に依存する。すなわち、光周波数が共鳴周波数より高いとき（正離調）光強度が弱くなる向きに作用し、低いとき（負離調）光強度が強くなる向きに作用する。近接場光は物質表面から遠ざかるにしたがって強度が減衰するから、前者の場合は斥力（光の場からはじく）が、後者の場合は引

力（光の場に引き込む）が働くことになる。こうした双極子力の周波数特性を利用して、原子の運動を高精度に制御する。また、その共鳴性のおかげで、原子の種類や量子状態を選択することが可能である。本研究では、主に以下に述べるような3種類の近接場光デバイスの開発と応用に取り組んでいる。

## 2.1 中空ファイバーによる原子の誘導

中央部分に微小な中空領域をもった光ファイバーに近接場光を誘起することにより、原子を誘導・運搬することができる。図1にその原理を示す。中空のまわりを取り囲む光伝搬コアにレーザー光を結合させると、中空領域に近接場光が内壁を取り囲むようにしてしみだす。正離調の場合、中空領域に進入してきた原子は内壁に近づくごとに斥力を受けて反射されファイバー中を誘導されて行く。図2に原子の誘導に適する光伝搬モード（LP<sub>01</sub>モード）を誘起したときの中空径2 μmの中空ファイバーの断面写真を示す。図3にアルカリ金属の1種で共鳴波長が780nmであるルビジウム（Rb）原子の誘導に使用した実験配置を示す。真空中でRb原子ビームを同軸上に配置した中空ファイバーに導入し、誘導されて出てきた原子を半導体レーザー（波長780nm）とアルゴンイオンレーザー（波長476.5nm）を用いた2段階光イオン化法によって検出した。近接場光を中空ファイバー内に誘起するチタンサファイヤレーザーからの誘導光の周波数をRb原子の共鳴周波数近傍で変化させて正離調の場合に原子が誘導されて出てくるのを確かめた。このような原子誘導の技術は理学・工学の両面で応用することができる。

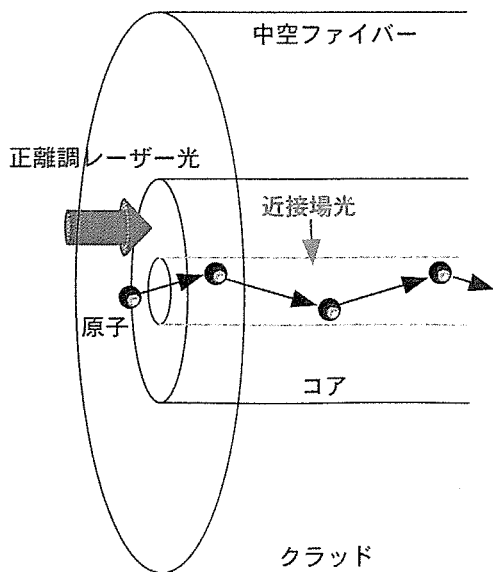


図1 中空ファイバーによる原子の誘導

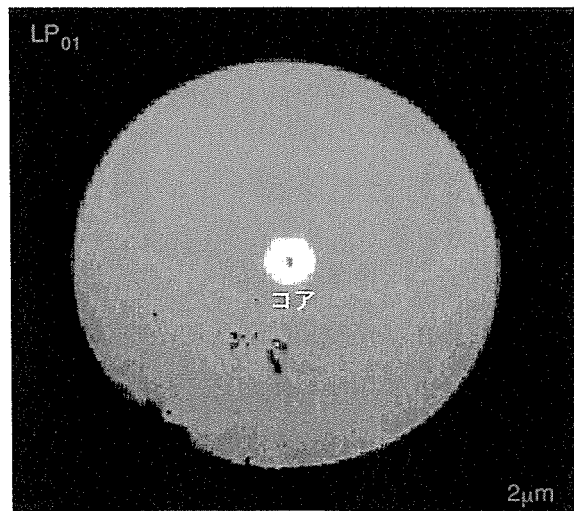


図2 LP<sub>01</sub>モード励起下の中空ファイバー

### 2.1.1 共振器量子電気力学効果の観測

真空場との相互作用の結果として原子のエネルギーがわずかに変化する。このような微小な効果は量子電気力学効果と呼ばれ引力となって現れるが、とくに狭い空間（共振器）に原子が閉じこめられている場合にはより顕著になることが知られている。その微小さゆえに共振器量子電気力学効果を見出すことは容易ではなくほとんど実験研究がなされていない。中空ファイバー中の原子もエネルギーが変化していることが期待されるため、原子誘導法を応用して共振器量子電気力学効果の検出実験を試みた。原子の誘導効率 $\eta$ は誘導光パワーに比例するが、光パワーが0になる前に誘導斥力と共振器量子電気力学効果による引力が釣り合って誘導が阻止される。これを調べたのが図4で、正離調時に誘導光のパワーを変化させて誘導原子数をプロットした。低パワー近傍を拡大した内挿図に示されているように、誘導原子数が光パワーが0になる少し手前でほぼ0になっているのが見出される。理論との大まかな比較では、平行平板型の共振器に原子が置かれたときに比べて中空ファイバー内では数倍程度の原子のエネルギーシフトが生じているものと見積もられる。

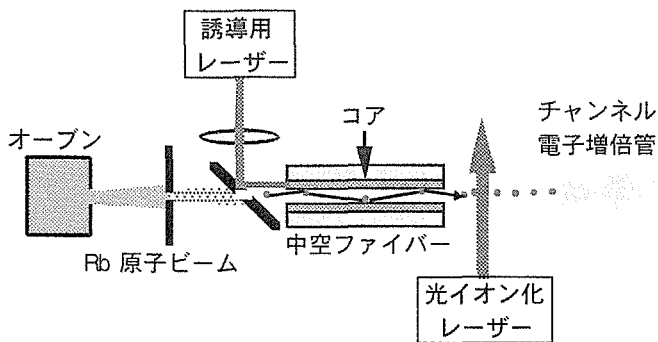


図3 光イオン化実験

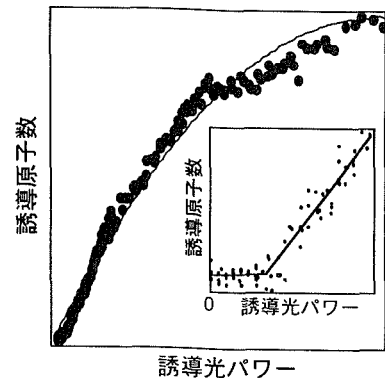


図4 誘導原子の誘導光パワー変化

### 2.1.2 光制御原子堆積に向けて

中空ファイバー原子誘導法により原子の横位置制御性が格段に向上した。この誘導は原子種を光周波数によって高精度に選択できるという利点がある。例えば2種類の原子が混ざって中空ファイバー内に進入してきたような場合、一方の原子に対しては正離調となるように他方に対しては負離調となるように誘導光周波数を選ぶことによって一方の原子だけを誘導して取り出すことができる。原子フィルターとして使うことによって同位体分離などにも応用することができる。本研究では、概念的に図5に示したような高い位置制御性と原子選択性を併せ持った新しい原子堆積法の開発に取り組んでいる。図6は中空径7  $\mu\text{m}$  の中空ファイバーによって誘導されて出てきた Rb 原子ビームの空間分布を熱ワイヤ表面イオン化法によって調べたもので、このような結果の解析から堆積レートなどの見積りを行っている。

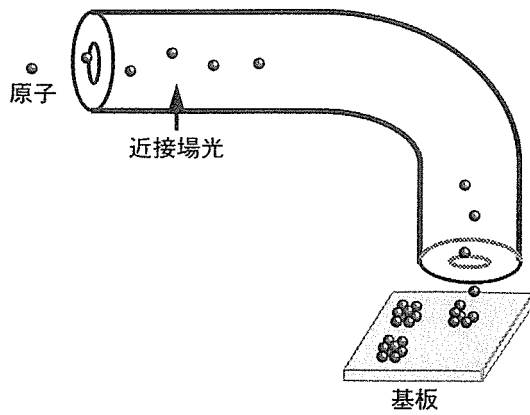


図5 光制御原子堆積

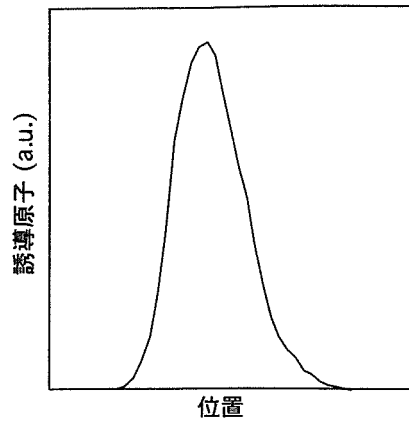


図6 熱ワイヤによる誘導原子の空間分布測定

## 2.2 先鋭化ファイバースロープによる原子の操作

より高精度に原子の制御を行うためにはナノ領域に局在した近接場光を用いる必要がある。このような近接場光はナノ寸法に尖らせた光ファイバー（ファイバースロープ）の先端近傍に誘起することができる。本研究では、ファイバースロープを用いた原子の制御・操作の可能性を理論的に調べた。また、原子操作用のファイバースロープの設計・製作に向けて、ファイバースロープ先端近傍の近接場光の空間強度分布測定実験を行った。

### 2.2.1 原子の運動の偏向

ファイバースロープの先端近傍に誘起した近接場光からの双極子力を微調して、原子の運動方向を高精度に制御し任意の位置に原子を運ぶ。図7は正離調条件下での原子の偏向を模式的に表したものである。ファイバースロープ先端近傍の近接場光領域では双極子力の他に van der Waals 引力が原子に作用する。双極子斥力が van der Waals 引力に勝るようなある条件下で、速度  $1 \text{ m/s}$  のやや遅い原子の偏向角  $\theta$  を衝突径数  $b$  の関数として見積もった一例を図8に示す。ここでの最大偏向角はおよそ  $0.5$  度で、これは  $10 \text{ cm}$  後方で  $100 \mu\text{m}$  の変位を与え、市販の粒子検出器の持つ分解能で検出可能である。より正確な量子力学的計算によっても偏向角の見積もりを行っている。

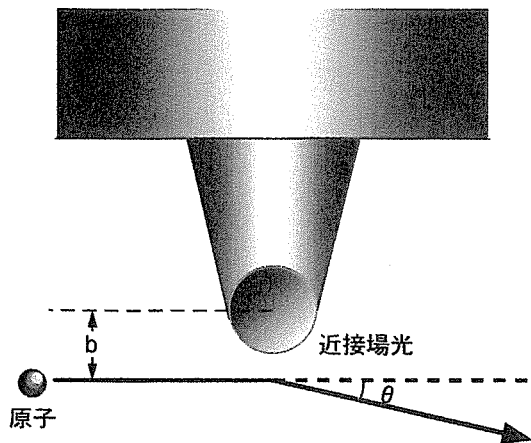


図7 原子の偏向

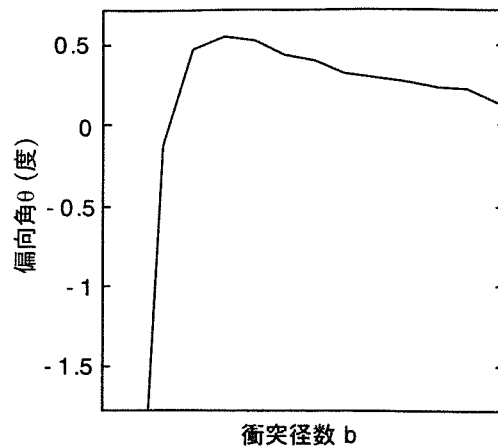


図8 偏向角の見積り

### 2.2.2 原子のトラップ

ナノ領域に局在化した近接場光を用いる最大の利点の一つは、個別的に原子にアクセスできることである。図9に単一原子操作のためのファイバースローブを用いた原子トラップの原理を示す。ここでは斥力の双極子力と引力の van der Waals 力をバランスさせて原子を捕まえる。図10に Rb 原子をトラップするためのポテンシャルを先端表面からの距離の関数として表した一例を示してある。Rb 原子は量子数  $F=3$  と  $F=4$  でラベルされる2つの超微細基底準位を持っている。両基底準位において、Rb 原子は双極子力による斥力ポテンシャルと van der Waals 引力ポテンシャルの合成によってつくられたトラップポテンシャル内に生じる量子振動準位 ( $n$  でラベル) の一つにトラップされることになる。図10の例では、最低振動準位 ( $n=0$ ) には温度換算にして  $30 \mu\text{K}$  程度の運動エネルギーを持つ Rb 原子が捕まえられることになる。

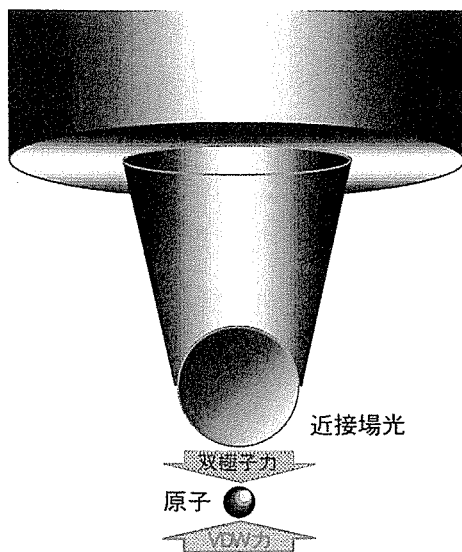


図9 原子トラップ

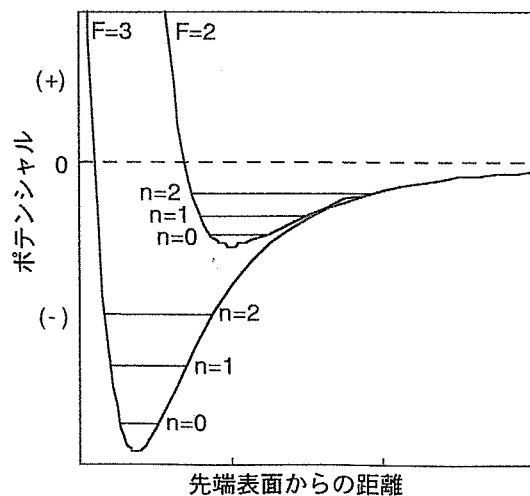


図10 トラップポテンシャル

### 2.2.3 ファイバークローブ先端近傍の近接場光強度分布の測定

すでに種々の形状や先端径を持ったファイバークローブを化学エッチング法などによって作製することが可能となっている。原子操作用ファイバークローブの設計では、先端径や形状、光パワーや周波数離調などを操作する原子の種類に応じて選択しなければならない。また光子の自然放出などに伴う影響をできるだけ避ける必要がある。そのために製作した原子操作用ファイバークローブの評価を行うことが重要となる。本研究では、手始めとしてファイバークローブ先端近傍に誘起された近接場光の空間強度分布を別のファイバークローブで測定するシステムを組み、試作したファイバークローブを用いて測定実験を行った。図11にプローブ対プローブ実験の配置を示す。圧電素子で位置制御したファイバークローブの先端にやはり圧電素子で制御した別のより先端径の小さい金コートファイバークローブを近づけ、生じた散乱光をその金コートファイバークローブで捉える。波長780nmのレーザー光を結合させたときの先端径200nmの近接場光誘起ファイバークローブ先端表面からの距離の関数として光強度分布をプロットしたものを図12に示す。金コートファイバークローブの先端径は40nmである。ここでは光フィードバックをかけた shear force 法によって距離の測定を行っている。図12において100nm程度までが近接場光成分と考えられ、それより遠方では伝搬光成分が混ざってきている。この測定結果を解析することにより、原子トラップの可能性などを見積もることができる。

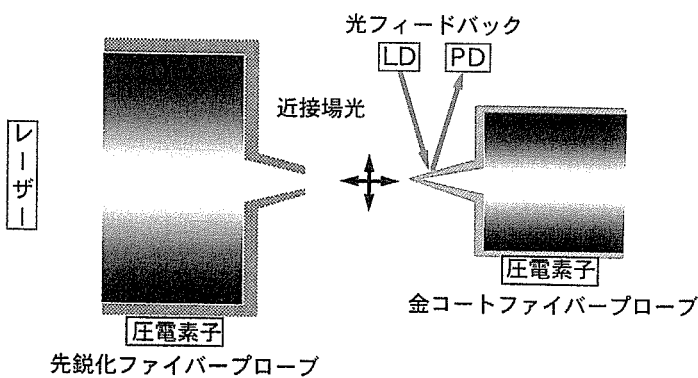


図11 近接場光強度分布の測定実験

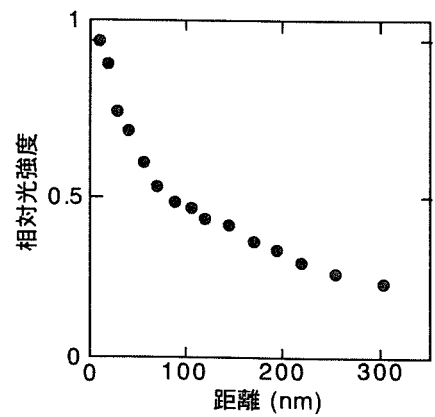


図12 先端近傍での光強度変化

### 2.3 近接場光ファネルによる冷却原子ビームの形成

ナノ寸法の光の場で原子を制御するためには、原子の運動の速度は十分遅くなければならない。また、実験を行うに当たってナノ領域に頻りに原子がやってくるのが望ましい。したがって原子操作用には冷却原子ビームが適する。本研究では、近接場光を用いた原子ファネル

ル（漏斗）によって冷却原子ビームをつくることに取り組んでいる。図13に中空のプリズムで構成した原子ファネルの概念図を示す。プリズム上方にレーザー冷却法によって冷却原子集団をつくりファネル内に落下させる。プリズム下方からは正離調したドーナツ型の光ビームを照射してプリズム内壁で全反射させ表面近傍に近接場光を誘起する。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ることになる。この過程では原子は反射を繰り返す度に運動エネルギーも失い次第にプリズム下部に集められ、出射用の小穴からビーム状になって出ていく。図13にはモンテカルロシミュレーションによって求めた Rb 原子の軌跡も描かれている。図14は設計・製作した実験用真空システム内部に配置した逆三角錐型ファネルの上方でトラップした冷却 Rb 原子集団を CCD カメラで捉えたものである。

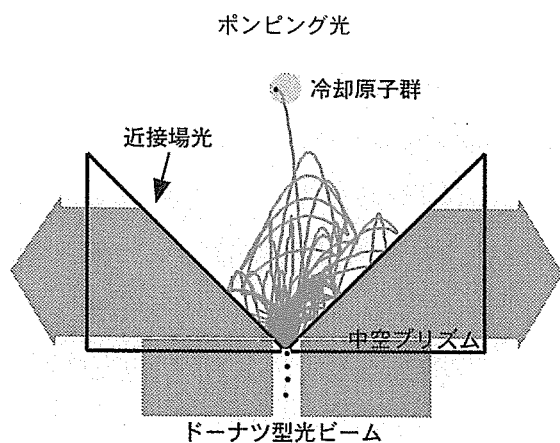


図13 原子ファネル

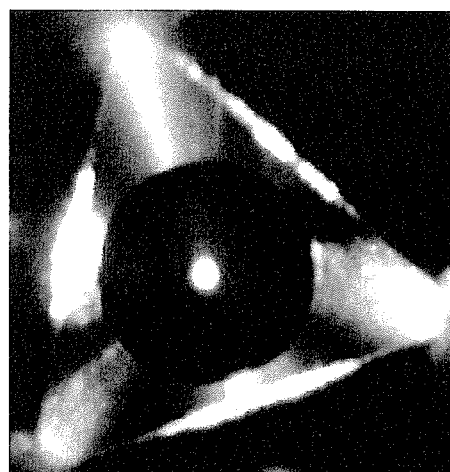


図14 逆三角錐型ファネル上部に捕らえた冷却原子群

### 3. 今後の展望

本研究期間中には、中空ファイバーを用いた光制御原子堆積実験用の超高真空システムおよび原子ファネル実験用真空システムの主要部分を設計・製作した。今後、これらの実験システムの整備を行い、所期の結果を得るべく実験を進めていく予定である。さらに、今回行った先鋭化ファイバースコープによる原子操作の理論解析に基づいて超高真空装置の開発に取り組む実験的実現を目指す。一方、これらの解析を通じて現行の近接場光理論の不備も判明してきた。特に近接場光を含む系の量子化は原子操作にとって重要であるにも関わらず不十分な状況にあり、今後さらに研究を進めていく必要がある。先鋭化ファイバースコープによる原子偏向の技術は原子の運動制御のみならず、原子をプローブとして使うことにより近接

場光を非破壊的に調べることができる。このような実験を行うことによって近接場光の量子化の問題などの研究に役立てることが期待される。また、原子トラップの技術は原子スケールで微小構造物をつくったりするのに非常に有用であり、究極的な結晶成長技術の一つになりうるものと期待される。

#### 4. 発表リスト

1. H. Ito, K. Sakaki, W. Jhe, M. Ohtsu, Atom guidance using evanescent waves in small hollow optical fibers and its applications, Atom Optics, M. G. Prentiss, W. D. Phillips, eds., Proceedings of SPIE, **2995**, 138-145 (1997).
2. 伊藤治彦, 大津元一, 原子を導く光のトンネル-エバネッセント光による原子の制御-, 現代化学 **311**, 49-55 (1997).
3. H. Ito, K. Sakaki, M. Ohtsu, W. Jhe, Evanescent-light guiding of atoms through hollow optical fiber for optically controlled atomic deposition, Appl. Phys. Lett. **70**, 2496-2498 (1997).
4. M. Ohtsu, H. Ito, K. Sakaki, Guiding atoms by optical near-field and manipulation for atomic-level deposition, European Workshop on Microtechnology and Scanning Probe Microscopy (1997).
5. H. Ito, K. Sakaki, M. Ohtsu, Evanescent light guiding in hollow optical fibers for atom deposition, Quantum Electronics and Laser Science Conference, 1997 OSA Technical Digest Series, **12**, 126-127 (1997).
6. H. Ito, K. Sakaki, W. Jhe, M. Ohtsu, Atomic funnel with evanescent light, Phys. Rev. A **56**, 712-718 (1997).
7. H. Ito, K. Sakaki, W. Jhe, M. Ohtsu, Evanescent-light induced atom guidance using a hollow optical fiber with light coupled sideways, Opt. Commun. **141**, 43-47 (1997).
8. H. Ito, K. Sakaki, M. Ohtsu, Evanescent-light atom guidance in the sub-wavelength region beyond the diffraction limit Quantum Electronics and Laser Science Conference/Pacific Rim 1997, Technical Digest, 10-11 (1997).
9. K. Sakaki, H. Ito, M. Ohtsu, Lateral light-coupling for evanescent-field guiding of cold atoms Quantum Electronics and Laser Science Conference/Pacific Rim 1997, Technical Digest, 29-30 (1997).



10. 大津元一, 伊藤治彦, 力学的作用の応用 (3) 原子,  
近接場ナノフォトニクスハンドブック, 208-212 (オプトロニクス社, 1997).
11. 伊藤治彦, 大津元一, 光近接場を用いた原子の誘導, レーザー研究 **25**, 682-686 (1997).
12. H. Ito, K. Otake, M. Ohtsu, Near-field optical guidance and manipulation of atoms,  
Far- and Near-Field Optics: Physics and Information Processing, S. Jutamulia,  
T. Asakura, eds., Proceedings of SPIE, **3467**, 250-257 (1998).
13. H. Ito, M. Ohtsu, Near field optical atom manipulation: toward atom photonics,  
Near Field Nano/Atom Optics and Technology, M. Ohtsu, ed., 217-266 (Springer-  
Verlag, 1998).
14. H. Ito, M. Ohtsu, Deflection and Trap of Atoms with Sharpened Fibers Technical  
Digest of the 5th International Conference on Near Field Optics, 268-269 (1998).
15. H. Ito, A. Takamizawa, H. Tanioka, M. Ohtsu, Precise control of atoms with  
optical near fields: deflection and trap, Proceedings of SPIE, **3791**, 2-9 (1999).
16. 伊藤治彦, 大津元一, 近接場光を用いた原子の制御, 光学 (1999).
17. M. Ohtsu, K. Kobayashi, H. Ito, G. H. Lee, Nano-fabrication/atom-manipulation  
by optical near field and relevant quantum optical theory, Proceedings of the  
IEEE (2000).