

## 研究課題別評価

1 研究課題名： シュタルク・アトムチップによるコヒーレント原子操作

2 研究者氏名： 香取秀俊

研究員 Taro A Eichler(研究期間 平成15年4月～平成15年8月)

研究員 岸本哲夫 (研究期間 平成15年9月～平成17年8月)

3 研究の狙い：

レーザー光を用いた極低温原子の生成、その原子コヒーレンスを用いた計測技術は、この20年間に長足の進歩を遂げ、この技術的基礎となったレーザー冷却法の開発、アルカリ原子ボーズ凝縮体の生成手法の確立とその凝縮体物性の研究に対して、1997年と2001年にそれぞれノーベル賞が与えられている。このような光制御による極低温原子生成手法が確立した現在、今後の大きな課題は、この原子のコヒーレント制御とその量子性に基礎をおく、新しい工学的応用へのシードを探ることである。

従来の情報処理技術の基盤である電流(電子の流れ)、光(光子の流れ)に代わって、よく制御された“原子の流れ”を固体基板上で操作する“原子回路”実現の可能性が、1997年ころよりヨーロッパ、特にドイツ、オーストリア、イギリスの研究者らによって盛んに議論されるようになった。この技術は、電子・光子の高度な制御技術によりエレクトロニクス・フォトンクスが誕生したように、“アトムロニクス”ともいふべき新しい高度情報処理系実現の可能性を秘めている。電子・光子に比べてはるかに多様な内部・外部自由度をもつ原子のコヒーレント制御技術の確立は、将来の量子情報処理、量子コンピューティング、極限計測への大きな波及効果が期待されている。

現在までに原子回路の基本技術として、(i)基板上の導線に流す電流によって生じる磁場と原子のスピンの相互作用を用いる手法、(ii)微細電極を用いるイオントラップの手法が実現されている。本研究では、これらに代わり、交流電場を用いる新しい原子操作手法「シュタルク・アトムチップ」を提案し実証することを狙いとする。この手法では、マイクロ・ファブリケーションによるシュタルク電極の作成により、従来の集積電子回路で広く扱われている数ボルトの電圧で、レーザー冷却によって得られる極低温原子のコヒーレントな運動制御が行えることから、従来のエレクトロニクス技術とアトムロニクスをつなぐキーテクノロジーとなることが期待される。さらに、このシュタルク・アトムチップ上の単一原子レベルの原子観測を実現し、単一原子を量子ビットに対応させる量子情報処理に向けた基礎を築く。一方で、自由空間中に準備した光格子中にトラップした2準位原子のポピュレーショントランスファーの実験を行い、準安定状態を用いた量子ビットの可能性を探る。

4 研究成果：

シュタルク・アトムチップによる原子の運動操作は本研究提案の中心的課題である。(1.1)シュタルク・アトムチップの原理提案、(1.2)シュタルク・アトムチップの実証、(1.3)シュタルクトラップされた原子の顕微観測を行い、電場制御に基づく新しい原子運動操作技術の開発に成功した。一方、これと相補的なサブテーマとして、束縛ポテンシャル中でコヒーレントな電子状態操作を実現するための(2)光格子時計実験を行い、高精度分光実験を通じて実証した。

(1)シュタルク・アトムチップ

(1.1)シュタルク・アトムチップの原理の提案：

電場  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  中での中性原子のシュタルクシフトは、 $U(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2}\alpha|\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2$  と表される。基底状態または

準安定状態にある原子では分極率 $\cdot$ は正であるため、このような原子は電場の極大点に集まろうとする High field seeker として振舞う。しかし、Earnshaw の定理により自由空間中では静電場の極大点は作れないため、静的な 3 次元トラップはできない。この他いくつかの困難から、中性原子の電場トラップは長らく実現されてこなかった。

図1(a)に示すように、半径 $b$ の導体球を距離 $2a$ 離して配置し、それぞれ、 $\pm V_0$ の電位を与えることのできる双極子電場を考える。この双極子電場中では、原子の受ける電場は $yz$ 平面方向では原点に近づくほど強くなり、一方、 $x$ 軸方向では原点から遠ざかるほど強くなるため、同図に示すような鞍形のポテンシャルが形成される。トラップする原子の質量を $m$ とすると、 $y$ 軸、 $z$ 軸方向の束縛周波数は $\omega_0 = (2bV_0/d^3)\sqrt{3\alpha/m}$  で与えられる。一般に中性原子の分極率は非常に小さいため、数mmの電極間隔で行なわれた従来の実験では、原子の運動制御にはkVを超える高電圧が必要だが、この種の実験のネックの一つであった。ところが、上式で束縛周波数が $1/d^3$ に比例することに着目すれば、原子の運動制御に必要な電圧は、電極構造( $\sim d$ )の微細化によって大幅に低減できることが分かる。実際、微細加工技術を用いれば数ミクロンの電極は容易に作れるため、通常のロジックICで用いられる数ボルトの電圧で、原子 1 個の運動を直接制御する実験の実現可能性が出てくる。我々は、この 3 次元電場トラップの可能性を提案し、実証実験を開始した。

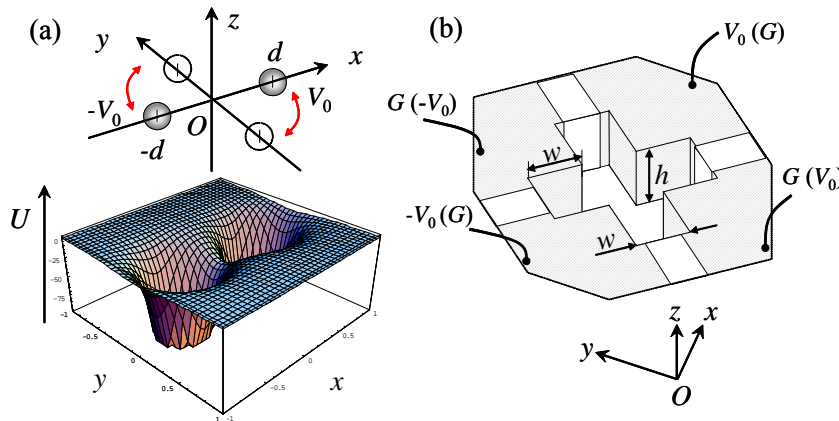


図 1: (a)振動双極子電場による 3 次元電場トラップの原理。(b)実験用電極の計算モデル。

鞍型ポテンシャルが形成できるとき、動的安定化の手法によって、安定なトラップを構成できることが知られている。上記で考えた $x$ 軸上の電極対に加え、 $y$ 軸上にも電極対を仮定する。これらの電極対によって形成されるシュタルクポテンシャル $u_x, u_y$ は高次の項を無視して、

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} \approx \frac{1}{2} m \omega_0^2 \begin{pmatrix} -\eta x^2 + y^2 + \xi z^2 - d^2/3 \\ x^2 - \eta y^2 + \xi z^2 - d^2/3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 $\eta, \xi$ はトラップの電極形状に依存するパラメーターで、図1(a)の場合には、電極の対称性から $\eta=2, \xi=1$ である。(1)式から分かるように $z$ 方向には常に静的なトラップポテンシャルが実現されているため、次式のように $x$ 軸上、 $y$ 軸上電極へ周期 $T$ で交互に電圧を印加し、 $xy$ 平面の原子運動の動的安定化を行えば、3次元トラップが実現する。

$$U(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} u_x(\mathbf{r}); & nT \leq t < (n + \frac{1}{2})T \\ u_y(\mathbf{r}); & (nT + \frac{1}{2}) \leq t < (n+1)T \end{cases} \quad (2)$$

この動的安定化の安定条件は、1 サイクルの原子運動を表す伝送行列の | 固有値 |  $\leq 1$  によ

て評価できる。しかし実際には、この動的安定化が可能な領域はシュタルクポテンシャルの高次項が入ることによってさらに狭くなるため、実験はより難しくなる。安定化領域の拡大は、鞍型ポテンシャルの反束縛を緩めること、つまり $\eta$ を小さくすることで達成できる。 $\eta \rightarrow 1$ の極限では安定領域は最も拡大するが、この結果 $\xi \rightarrow 0$ となり $z$ 軸方向の束縛は0になる。安定領域を拡大しつつ、 $z$ 軸方向の有限な束縛を残すためには、図1(a)の点電荷対の代わりに有限長の線電荷対によって実現される。これを実現するため、貫通穴加工をしたガラス基板に電極加工を行った図1(b)に示すようなモデルで、有限要素法によるトラップ電場の数値計算を行い最適形状を決定した。

### (1.2) シュタルク・アトムチップの実証

この数値計算に基づき、電極厚を $h = 100\mu\text{m}$ 、電極間隔 $50\mu\text{m}$ のシュタルク・チップを試作し、極低温ストロンチウム原子を用いてその実証実験を行った。ストロンチウム原子では、レーザー冷却のみによって容易にサブマイクロケルビンに到達できること、また、シュタルクトラップに用いる原子の基底状態の軌道角運動量が0であるために、磁気的な相互作用を排除し、シュタルク相互作用のみに注目できること、等からシュタルクトラップの最初の実証対象としては最適である。

対向する2対のシュタルク電極に、 $\pm 200\text{V}$ の電圧を、 $6.4\text{kHz}$ の周波数で交互に印加することにより動的安定化を行い、およそ100個の極低温ストロンチウム原子を捕獲することに成功した。このときの実効的なトラップのポテンシャルの深さは $30 \cdot \text{K}$ で、トラップ時間は $100\text{ms}$ 程度であった。このトラップ時間は、シュタルクトラップ原子と残留気体原子との衝突によって制限されており、真空度の向上により、さらにトラップ原子の長寿命化が可能で期待される。

### (1.3) シュタルクトラップされた原子の顕微観測

シュタルクトラップをプラットフォームとした、単一原子の運動操作の実現を目指し、トラップ原子をその場観測するための顕微光学系の開発を行い、シュタルクトラップに導く原子数を積極的に減少させることで、少数レベルでの原子観測を行った。図2では、斜線で示した対向する2対のシュタルク電極の中央に、数個の原子から散乱される蛍光を観測することに成功した。この実験では、位置観測中のプローブ光による原子の過熱を最小限に抑えるために、原子観測のためのプローブ光照射時間はわずか $10\mu\text{s}$ としている。一方、トラップ原子の永年運動の振動の時定数は $1\text{ms}$ である。このため、この観測は、原子運動の時間分解観測も可能にしている。この時間分解顕微観測実験のデモンストレーションとして、シュタルクトラップ原子のマイクロモーションの観測に成功した。

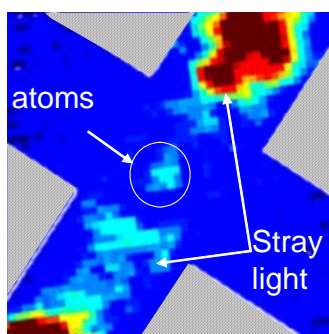


図 2: シュタルクトラップされた少数個原子の時間分解・顕微観測。斜線で示したシュタルク電極の中心にトラップされた原子に、共鳴光を照射し、共鳴蛍光により観測した。

これらの実験と数値解析の詳細な比較検討から、シュタルクトラップ条件を高精度に予測可能なシミュレーション技術を確立し、今後のより複雑な原子回路設計の指針を得た。シュタルク・アトムチップではそのトラップ電極構造の微細化に伴い、低電圧でのトラップ駆動が可能なうえ、この系では従来のアトムチップで問題になっている原子とチップ表面との相互作用を最小限に抑えられるため、原子回路の小型化、集積化が期待される。今後は、(i)原子導波路の実現、(ii)単一原子の光アクセスによる量子ビット実証、(iii)原子間相互作用を利用した量子ゲートの実現など、シュタルク・アトムチップによる量子情報処理実現に必要な原子回路素子の開発を目指す。

(2) 光格子時計: トラップポテンシャル中でのコヒーレントな電子状態操作

上述のような原子の外部自由度の制御とともに、その電子状態制御は原子を用いる量子情報処理において車輪の両輪をなすキーテクノロジーである。量子ビットは、たとえば原子の基底状態を  $|0\rangle$ 、励起状態を  $|1\rangle$  状態とする 2 状態を用いることで実現され、如何にその電子状態のコヒーレンスを保つかが量子情報実験の鍵となる。このような電子状態の制御と、そのコヒーレンスを如実に反映する実験の一つとして、我々は原子の超精密分光実験、その極致としての原子時計実験を行った。

(1)で述べたシュタルクトラップも含め、一般に原子トラップでは、原子の電子状態のエネルギー  $E_g$  を空間的に変調 ( $E_g(\mathbf{r})$ ) することによって、トラップ力  $\mathbf{F} = -\nabla E_g(\mathbf{r})$  を得ている。さらに、この電子状態の空間的なエネルギーの変調は、原子の基底状態と励起状態では、通常異なっている。このため、初期状態として、量子情報処理に不可欠な重ね合わせの状態  $|\varphi\rangle = |0\rangle + e^{i\theta}|1\rangle$  を作っても、原子はそのトラップ中の運動状態、たとえば個々の原子の運動振幅、により電子状態に応じて異なった位相を獲得し、時間発展する結果、もとの位相情報は失われてしまう。

もし、基底状態と励起状態で同一のエネルギーシフトを作り出す原子トラップができれば、同一原子では、原子の運動により獲得した位相を、2つの準位間で相殺することができる。これは、トラップ中の原子の運動が熱分布していても、そのエネルギー分布を見ないこと、つまり、不均一広がり除去につながる。このような不均一広がり除去は、超高分解能分光の中心的課題でもある。

我々はこのような“コヒーレンスを保存する”トラップを実現するため、(光)トラップレーザー光の波長を特定の“魔法波長”に選ぶことで、基底状態と励起状態で同一のシュタルクシフトを作ることが可能なことを指摘した。さらに、光格子によって原子を遷移波長よりも微小な領域に閉じ込めることにより、原子の熱運動に伴うドップラーシフトを排除する新しい分光手法「光格子時計」を提案した。その結果、1次元の光格子の閉じ込めたストロンチウム原子の可視の禁制遷移  $^1S_0(F=9/2) \rightarrow ^3P_0(F=9/2)$  (遷移周波数 429THz) でスペクトル幅およそ 30Hzの分光に成功し、光格子時計手法を初めて実証した。従来、原子時計では、原子に摂動を与える外場を排除することが大前提と考えられており、原子の長時間観測を可能にするトラップ技術と、外場の排除は両立し得ない課題であったが、この成功は、ポテンシャルのエンジニアリングによりこれらの両立が可能であることを初めて示すものであり、量子情報のみならず、原子分光手法としても大きな意義をもつ。

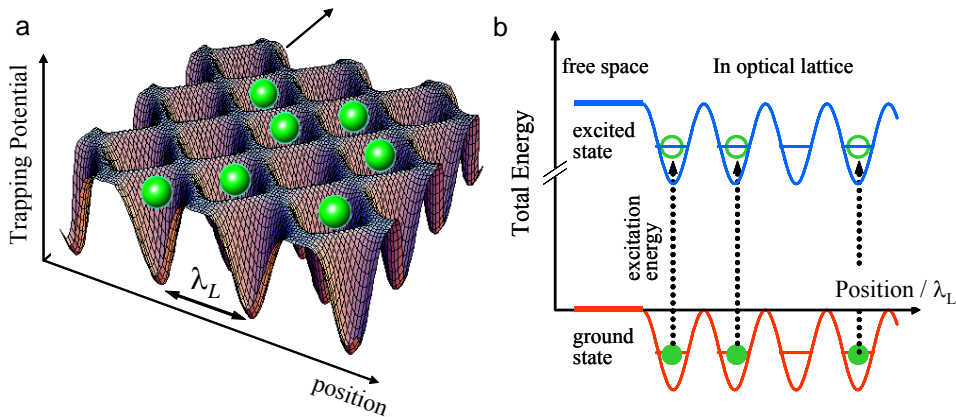


図 3: (a) 光格子時計の概念図。光格子によって、原子を遷移波長よりも小さな領域に閉じ込め、ドップラーシフトを排除するとともに、(b) 基底状態、励起状態で、空間的に同一のエネルギーシフト

トを与える。

## 5 自己評価:

さきがけ研究提案の中心課題は、量子情報処理の新たな原子デバイス: “シュタルク・アトムチップ”を提案、実証することであった。この目標に関しては、我々は、特許出願(平成15年)、提案論文(平成16年)、実証論文(平成18年)までをさきがけ研究期間中に遂げることができた。また、この“シュタルク・アトムチップ”の研究は、現在に至るまで我々のグループ以外では行われておらず、この研究成果のオリジナリティーは極めて高い。この研究の傍ら、我々は将来の原子を用いる量子情報処理技術には欠かせない、コヒーレントな原子の電子状態操作を行う仕掛け、“ポテンシャルのエンジニアリング”の手法を考案し、実際に量子ビットの $|0\rangle$ 状態から $|1\rangle$ 状態へと励起する超高分解能分光によって初めて実証した。これは、原子時計実現の新しいツール“光格子時計”として注目され、多くのグループで追試される研究となった。これら2つの成果によって、我々は、原子を用いた量子情報処理の確立に必要な原子の運動状態、電子状態のコヒーレント制御を可能にするあらたなツールを手にした。提案書後半では、シュタルク・チップのインテグレーションの実証まで想定していたが、それまでは手が回らず今後の課題となった。

本研究はポスドク参加型として行い、研究の遂行には2人のポスドクが大きな貢献をしてくれた。うち一人は研究開始まもなくNTT基礎研へ転出し、もう一人も、さきがけ研究終了半年前に国立大学助手として採用され、この研究をステップとしてよりよい研究ポストに恵まれた。本研究には、この他、さきがけ研究期間と時期を同じく研究を開始し、研究期間終了とともに博士課程を修了した博士課程学生が加わり、さきがけ研究3年間の継続性の観点からも大きく貢献してくれた。このような、博士課程学生の継続的な努力を基本としながら、1-2年のポスドクの雇用によって研究をブーストし成果を挙げていくという体制は、欧米の主力研究所の研究スタイルである。さきがけ制度の特筆すべき点は、このような環境を、若手研究者の率いる小さなグループでの実現できることにあると思われる。

## 6 研究総括の見解:

エレクトロニクスとフォトニクスを超えて、“アトムロニクス”ともいうべき新しい高度情報処理系の実現を旨とした野心的な提案であった。これに対して、(1)シュタルク・アトムチップの原理提案とその実証に成功し、(2)光格子時計をトラップポテンシャル中で実現し、量子情報のみならず原子分光手法にも大きなインパクトを与えた。これらの貢献に対して国際的な2つの賞と国内の賞も1つ受賞し、内外で高い評価を得ている。この研究はCRESTに受け継がれているので、アトムデバイスまで進化し、“アトムロニクス”を創出し、発展されることを期待している。

## 7 主な論文等

発表件数 論文 11 件、特許 1 件、受賞 3 件、招待講演 15 件

### 論文発表(11件)

1. T. Kishimoto, H. Hachisu, J. Fujiki, K. Nagato, M. Yasuda, and H. Katori, Electrodynamic trapping of spinless neutral atoms with an atom chip, *Phys. Rev. Lett.* 96, 123001 (2006).
2. Masami Yasuda, Tetsuo Kishimoto, Masao Takamoto, Hidetoshi Katori, Photoassociation spectroscopy of  $^{88}\text{Sr}$ : reconstruction of the wave function near the last node, *Phys. Rev. A* 73, 011403R (2006).
3. M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, An optical lattice clock, *Nature* 435, 321-324 (2005).
4. H. Katori, M. Takamoto, T. Kishimoto, H. Hachisu, J. Fujiki, R. Higashi and M. Yasuda,

Engineering Stark Potentials for Precision Measurements: Optical Lattice Clock and Electrodynamic Surface Trap, Proceedings of the 19th International Conference on Atomic Physics 2004 (ICAP2004), CP770, Atomic Physics 19, edited by L. G. Marcassa, V. S. Bagnato, and K. Hermerson (American Institute of Physics, New York, 2005) p.112-122.

5. Hidetoshi Katori and Tomoya Akatsuka, Electric manipulation of spinless neutral atoms on a surface, Jpn. J. Appl. Phys. 43, 358-361 (2004).

#### 特許出願(1件)

研究期間累積件数: 1件(注; 国内、海外で出願中)

発明者: 香取秀俊

発明の名称: 原子デバイス 特願 2003-68764

出願人: 科学技術振興機構

出願日: 平成 15 年 3 月 13 日

#### 受賞(3件)

1. 2005 年 3 月 22 日  
独立行政法人日本学術振興会, 第1回 日本学術振興会賞  
授賞の対象となった研究業績: 「光格子を用いた超高精度・原子時計の開発」
2. 2005 年 3 月 21 日  
French Society of Chronometry and Piezo Electricity, European Time and Frequency Award  
授賞の対象となった研究業績: Optical metrology,  
周波数標準分野における革新的技術開発
3. 2005 年 10 月 17 日  
Julius Springer Prize for Applied Physics,  
受賞理由: 超精密光時計開発における先駆的な貢献

#### 国際会議招待講演(15 件)

1. (Plenary talk) “An Optical Lattice Clock: towards Frequency Measurement at 10-18 Level”, Hidetoshi Katori, EPS13 – General Conference of the European Physical Society “Beyond Einstein – Physics for the 21st Century”, University of Bern, Switzerland, 11 – 15 July 2005.
2. “SIMULATE ION TRAPS WITH NEUTRAL ATOMS: STARK ATOM CHIP AND OPTICAL LATTICE CLOCK”, H. Katori, 17th International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS05), Cairngorms National Park, Scotland, 19th – 24th June 2005.
3. “Engineering Stark Potentials for Precision Measurements: Optical Lattice Clock and Electro-dynamic Surface Trap”, Hidetoshi Katori, XIX INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATOMIC PHYSICS, Rio de Janeiro, Brazil, July, 25-30, 2004
4. “Ultrastable Optical Clock with Neutral Atoms in an Engineered Light Shift Trap”, Hidetoshi Katori, Conference on Lasers and Electro-Optics / International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC), San Francisco, California, May 16-21, 2004.
5. “Neutral-Atom Based Optical-Clock in an Engineered Light Shift Trap,” Hidetoshi Katori, Japan-US seminar, Yatsugatake Royal Hotel, 17-19 Sept. 2003.