

# 超伝導永久電流アトムチップ

向井哲哉

## Persistent Supercurrent Atom Chip

Tetsuya MUKAI

Magnetic micro trap which is a practical technique for trapping ultra-cold atoms is expected to be applicable for quantum information processing. In developing quantum information devices, the most serious problem with the magnetic micro trap is its short coherence time due to noise coming from the conductor which comprises the trap. To overcome the problem, we developed a persistent supercurrent atom chip, i.e., a magnetic micro trap which can generate a trapping potential with a persistent supercurrent running through a superconductive loop circuit. This article is an introduction of the persistent supercurrent atom chip.

**Key words:** ultra-cold atoms, persistent current, thermal switch, atom chip, superconductor

レーザー冷却によって実現する極低温原子は、学術的貢献にとどまらず、工学的応用も期待され、量子情報処理を実現するための有力候補と目されている。特に中性原子の内部状態を光などの電磁場で制御する方法は、量子力学の教科書にも説明されるように量子系として非常にシンプルで理解しやすい。また実験的にも、多数の原子の集団を1つの量子演算の単位（量子ビット）とする量子相関の実現が報告されている<sup>1)</sup>。

しかしながら、現実的な応用には不可欠とされる数的拡張性を考慮すると、技術的な困難さはあるものの、1つの原子を1つの量子ビットとする方法に将来性があると思われる。筆者らが取り組んでいる超伝導アトムチップも、単独の原子の内部状態を電磁場で制御する量子情報処理デバイスの開発を目指したもので、1つひとつの原子を固体の表面近傍の独立なポテンシャルに閉じ込める手段とすることが期待されている。

### 1. 研究の背景

マイクロ磁場トラップ、いわゆるアトムチップは、簡便かつ高速に量子縮退を生成できるなど、有効な方法として広く利用されているが、トラップと電線との距離を縮め、急峻な磁場勾配によって単一の原子を捕捉する試みは、未だ成功していない<sup>2)</sup>。その原因は、熱や電流に起因するノ

イズには、トラップされている原子の内部状態を、トラップ不可能な状態へと共鳴的に遷移させる RF 磁場成分が含まれているので、原子が電流に近づくほど、トラップの寿命が短くなるからと考えられている<sup>3)</sup>。このように、トラップポテンシャルを発生させる電流自身がノイズの原因となっていることから、原理的に電磁気的なノイズを発生しない超伝導永久電流の利用は有効と考えられる。

### 2. 超伝導アトムチップの開発

ここでは、超伝導アトムチップ<sup>4)</sup>の詳細について、実験装置、超伝導アトムチップ、永久電流での原子の捕捉、永久電流の制御の順に記す。

#### 2.1 実験装置

実験装置は図1のような形状で、原子を冷却・捕捉する高真空（ $\sim 10^{-9}$  Torr）のガラスセルと、クライオスタットを備えた超高真空（ $\sim 10^{-11}$  Torr）のチップチャンバーとを、水平方向に接続した構造をもつ。このダブルチャンバー構造には、短時間に多くの原子を捕捉できることと、バックグラウンドガスと捕捉原子との衝突確率を小さく抑えてトラップ寿命を長くできることを、真空度の差を利用して実現できる利点がある。捕捉するルビジウム原子（ $^{87}\text{Rb}$ ）は、金属の状態でガラスセル内に置かれ、ヒーターの通電加熱により単原子のガスとして供給される。これらの原子

NTT 物性科学基礎研究所（〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1） E-mail: tetsuya@nttbl.jp

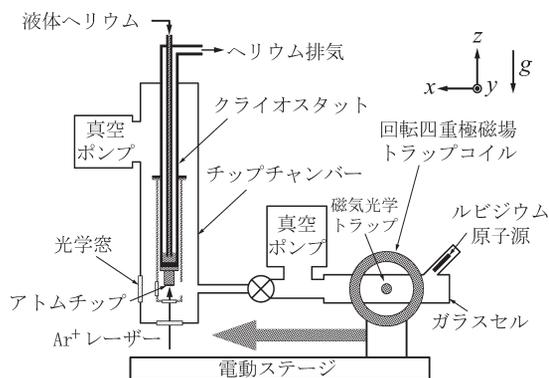


図1 超伝導アトムチップ実験装置。

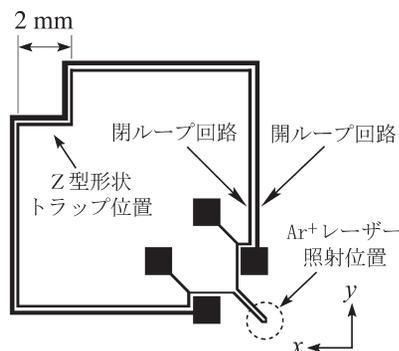
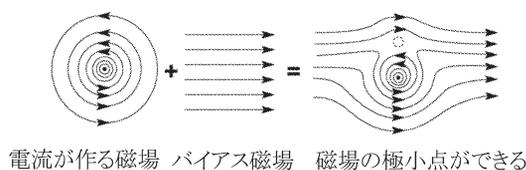


図2 超伝導永久電流アトムチップのパターン。内側の閉ループ回路を流れる超伝導永久電流に、この図の上下方向のバイアス磁場を重畳することで、トラップポテンシャルを発生する。

ガスを磁気光学トラップ (MOT) で捕捉後、偏光勾配冷却により  $10 \mu\text{K}$  程度にまで冷却する。次に、磁場の弱いほうへと力を受ける  $|F=2, m_F=+2\rangle$  状態へと光ポンピングを行った後、回転四重極磁場トラップ (QMT) で再捕捉する。この QMT コイルは電動ステージに取り付けられ、原子を捕捉した状態のまま、ガラスセルからアトムチップの位置まで滑らかに移動できる構造となっている。チップ冷却用のクライオスタットは冷却能力  $2\text{ W}$  の液体ヘリウムフロー型で、クライオスタットの下端に接着されたチップの温度を  $4.2\text{ K}$  に冷却する。

## 2.2 超伝導アトムチップ

超伝導材料には、超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が高く、 $4.2\text{ K}$  において、高い電流密度が期待できる MBE 成長のホウ化マグネシウム ( $\text{MgB}_2$ ) の薄膜 (膜厚:  $1.6 \mu\text{m}$ ) を用いている。図2は実験に使用しているチップのパターンで、閉ループ回路 (線幅:  $100 \mu\text{m}$ ) と、その外側に隣接する開ループ回路 (線幅:  $200 \mu\text{m}$ ) により構成され、1か所にトラップ用の Z 型形状をもっている。この開ループ回路は、今回の実験では超伝導転移を確認するセンサーとして用いたが、局所的な磁場を発生させるなどの将来的な応



電流が作る磁場 バイアス磁場 磁場の極小点ができる

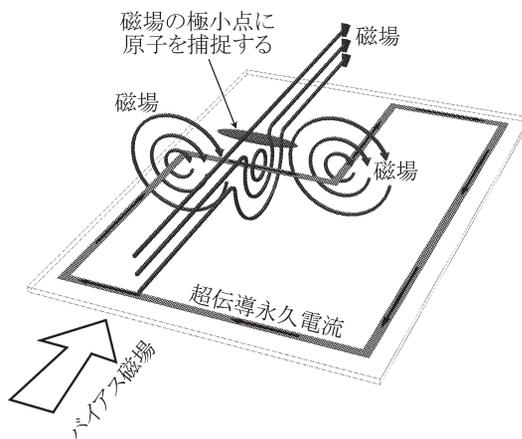


図3 超伝導永久電流とバイアス磁場がつくるトラップポテンシャルの模式図。(この図ではチップ表面を鉛直上向きに表示しているが、実験ではチップの表面は鉛直下向きで用いる。)

用を考慮した回路である。

閉ループ回路への超伝導永久電流の駆動は、次のように行う。はじめにチップ全体を  $T_c$  以下の  $4.2\text{ K}$  に冷却した後、チップの法線方向の磁場を加える。次に閉ループ回路の一部に  $0.7\text{ W}$  の  $\text{Ar}^+$  レーザーを  $100$  ミリ秒程度照射して、回路の一部を一時的に  $T_c$  以上にまで加熱する。その後、再び回路全体が  $T_c$  以下になるまで待った後、法線方向の磁場を切る。これで閉ループ回路を貫く磁束を保存するように超伝導永久電流が駆動される。この電流値は、法線方向の磁場の大きさで制御できる。

## 2.3 超伝導アトムチップによる原子の捕捉

永久電流が流れているアトムチップの位置に QMT により運搬された原子は、永久電流の磁場にバイアス磁場を重畳して完成する図3のような磁場ポテンシャルで再捕捉される。このポテンシャルにより捕捉された原子の吸収画像が図4 (a) である。チップポテンシャルの計算値 (図4 (b)) との比較から、超伝導永久電流は  $2.5\text{ A}$  と推定された。また、チップ表面から  $300 \mu\text{m}$  離れた位置に捕捉された原子の数と温度は、 $100$  ミリ秒後では  $6 \times 10^5$  個、 $200 \mu\text{K}$  であったが、 $1$  秒後には原子数が約  $30\%$  減少し、温度は  $100 \mu\text{K}$  に低下した。これは、自然な蒸発冷却によるものと考えられる。 $1$  秒後以降のトラップの温度はほぼ一定で、寿命は  $80$  秒以上と計測された。また、最近の実験から、チップの表面から  $30 \mu\text{m}$  の位置にまで原子を近づけたときのトラップ寿命は  $10$  秒程度であり、常伝導アトム

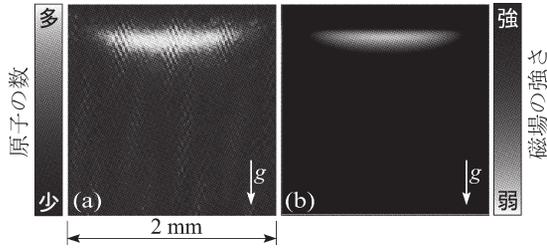


図4 (a) 超伝導永久電流のポテンシャルに捕捉された原子の吸収画像 (画像範囲:  $2 \times 2$  mm). 画像の上端がチップ表面に相当. (b) 2.5 A の永久電流と 15 G のバイアス磁場から計算される磁場ポテンシャルの形状.

チップよりも桁違いに安定であることを確認している.

## 2.4 永久電流の制御

超伝導永久電流は、本来非常に安定な電流であるが、これをダイナミックに制御できれば、超伝導アトムチップの可能性を大きく広げることになる。そのために筆者らは、レーザーによる超伝導回路の局所加熱により永久電流を高速で定量的に減少させる技術を開発した。図5は、超伝導閉ループ回路に2.5 Aの超伝導永久電流を駆動して初期状態とし、光強度一定 (0.7 W) の  $\text{Ar}^+$  レーザーの照射時間を変えて、残留する超伝導永久電流の値を測定したものである。この測定結果から、超伝導永久電流は、レーザーの照射時間が10ミリ秒までは一定値を保っているが、10~20ミリ秒の間で減少し、約20ミリ秒で消失していることが確認された。また、このとき加熱されている領域は、直径1 mm程度であることが別の測定から確認されており、同様の閉ループ回路を1つのチップ上に複数作り、1 mm以上離れた部分をレーザーで加熱すれば、それぞれの回路を独立に制御できることは明らかである。このような複数の回路を1つのチップ上に実装する場合は、図2のように閉ループ回路の外側に隣接した開ループ回路があれば、各回路に駆動する永久電流値を独立に設定できる等の応用が期待できる。

超伝導永久電流アトムチップは、電磁気的なノイズの影響がきわめて小さいと考えられることから、電流近傍の強い磁場勾配を利用した単一原子のトラップや、単一モードの原子導波路の実現が期待される。アトムチップでつくる単一原子のトラップは、チップのパターンを調整することで任意の原子間隔をつくることのできるため、例えば、10  $\mu\text{m}$ の間隔で  $100 \times 100$  の10000個の原子による二次元配列をつくると、ねらった原子だけと相互作用する光と、すべての原子を内包する共振器モードの光とを利用して、数的拡張性をもつ量子演算の実現が期待できる。また、光の

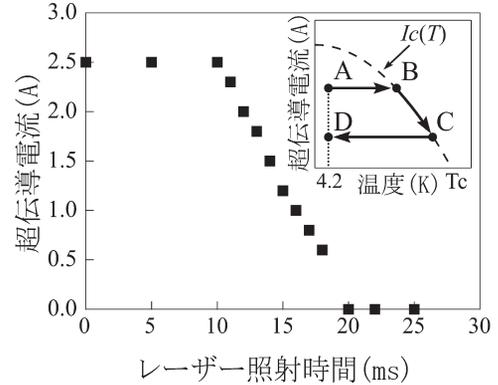


図5 レーザー照射後に残留する超伝導永久電流. 右上図は超伝導臨界電流値の温度依存性を模式的に表しており、この実験では、A-B-C-Dと電流が変化していると考えられる.

シングルモードファイバーに相当する単一モードの原子導波路を実現すれば、同一サイズの光干渉計の100倍高感度といわれる原子干渉計を構成し、重力波検出や地下資源探査などへの利用が期待できる。

一方、電流近傍の強い閉じ込めとは異なる視点であるが、トラップポテンシャルをつくる超伝導永久電流は巨視的量子状態のひとつであり、捕捉されている原子集団もまた、ボース凝縮という巨視的量子状態を生成できるので、異種の巨視的量子状態が強く結合している系を実現できると考えられる。このような異種結合巨視的量子系は学術的な興味のほか、量子メディア変換へと利用することも期待できるだろう。また、超伝導量子干渉計 (SQUID) を組み込んだ応用など、超伝導アトムチップへの興味は尽きない。

超伝導アトムチップは、まだ超伝導永久電流で原子集団を捕捉したばかりの初期段階に過ぎないが、超伝導と冷却原子を融合した新しい可能性へ期待の膨らむ技術である。

この研究は、NTT-JST CREST 共同プロジェクトの一環として、Christoph Hufnagel 氏 (NTT 研修生: ウィーン大学), Alexander Kasper 博士 (元 NTT), 清水富士夫教授 (NTT リサーチプロフェッサー: 電気通信大学) との共同研究の成果である。超伝導アトムチップの作製に関し、目野氏 (NTT-AT), 東田博士 (元 NTT), 内藤教授 (東京農工大学), 仙場グループリーダー (NTT) のご協力に感謝いたします。

## 文 献

- 1) B. Julsgaard *et al.*: Nature, **413** (2001) 400.
- 2) R. Folman *et al.*: Adv. At. Mol. Opt. Phys., **48** (2002) 263.
- 3) M. P. A. Jones *et al.*: Phys. Rev. Lett., **91** (2003) 080401.
- 4) T. Mukai *et al.*: Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 260407.

(2008年2月7日受理)