

# ワイヤートラップによる $^{87}\text{Rb}$ 原子のボーズ凝縮体生成

電子物性工学専攻 中川研究室 堀越宗一

## [背景]

我々は基板上で自由に原子を操作できる集積原子波回路(atom chip)を開発し、原子干渉計や量子情報処理デバイスとしての応用を目指している。Atom chipとは基板上に金属パターンを張り巡らせ、金属パターンに流れる電流が作る磁場のポテンシャルで原子操作を行うものである。原子操作とは原子波のガイド、閉じ込めという簡単なものから、分岐や合成、トンネリング、衝突等の制御などを意味している。Atom chipはコンパクトでかつ低電力で動作でき、従来のようなコイルで生成することが困難な急激な磁場勾配や複雑な磁場を容易に生成できるという利点がある。また固定表面上に金属を蒸着させることにより、ポテンシャルの空間的揺らぎを抑えることができる。Atom chipは単に光でできる実験を原子波に置き換えるだけでなく、原子特有の内部状態や質量を用いることにより多くの可能性を秘めている。近年 atom chip 上で BEC の生成、ガイド等の多くの報告がされており、今日競争の激しい研究分野になっている。

## [本研究の目的]

本研究の目的は atom chip の原型であるワイヤーのパターンで原子をトラップし、その急激な磁場勾配を用いてボーズ凝縮体の生成を目指す事である。急激な磁場勾配は原子を十分に圧縮し密度を上げることができるので、高効率な蒸発冷却をもたらす。つまり短時間で蒸発冷却が可能になるために、原子の寿命を決めている超高真空状態が幾分緩和される。これにより従来のような真空を維持するための大掛かりな実験装置が簡易になる。言い換えれば、本研究の目的はワイヤートラップを用いた簡易ボーズ凝縮体生成システムの開発、研究である。

## [ワイヤートラップ]

### ・磁気トラップ

原子は磁場との相互作用によりゼーマン分裂を起こし、磁気サブレベルに分かれる。

$$U_{\text{mag}} = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = g_F \mu_B m_F |B| \quad \textcircled{1}$$

ここで  $g_F$ 、 $m_F$ 、 $\mu_B$  はそれぞれ  $g$  因子、磁気サブレベル、ボーア磁子 ( $=9.27 \times 10^{-24} [\text{J/T}]$ ) であり、 $^{87}\text{Rb}$  の  $|F=2, m_F=+2\rangle$  に注目すると  $g_F=1/2$  となり①式は、

$$U_{\text{mag}} = \mu_B |B| \quad \textcircled{2}$$

となる。つまり磁場が大きくなるほど原子の感じるポテンシャルは大きくなる。原子はポテンシャルの小さい場所を探そうと振舞うので、磁場の小さいところに集まってくる。つまり2次的に極小値を持つような磁場を用意してあげれば原子はその極小値に沿って自由発展する、つまりガイドされる。同様に3次的に極小値を持つ磁場を用いれば局所的に原子を閉じ込める、つまり磁気トラップすることができるのである。実際ガイドやトラップを行う際にはもう1つの条件を満足させるとより確実である。それは磁場の極小値が有限の値を持たせておくことである。なぜならば原子は磁場ゼロのところでは縮退してしまいスピンの回り  $|F=2, m_F=+2\rangle$  の状態から外れ、磁気トラップできない順位に落ちてしまうからである(スピントリップロス)。

### ・ワイヤートラップ

ワイヤートラップとは、導線に電流を流したときに生じる磁場を用いて原子を磁気トラップするものである。基本原理を図1に示した。基本はサイドガイドと呼ばれるものからなる。直線のワイヤーに電流を流し生じる磁場と外部バイアス磁場を足し合わせることにより2次元四重極磁場がワイヤーに沿って生成される。つまり原子はこの極小点に沿ってガイドされるのである。このサイドガイドの軸方向に磁場の曲率を与え3次的な閉じこめを行うのがワイヤートラップである。方法はワイヤーをU型かZ型に曲げることにより、また2本のワイヤーの交点を用いてもそのような磁場を生成できる(十字ワイヤートラップ)。ただし先に述べたように磁場の極小点は有限な値を持っていないといけないので、ワイヤートラップに適しているのはZ型と十字型である。本研究を行うために用いたワイヤーのパターンもZ型ワイヤーを基本に構成されている。

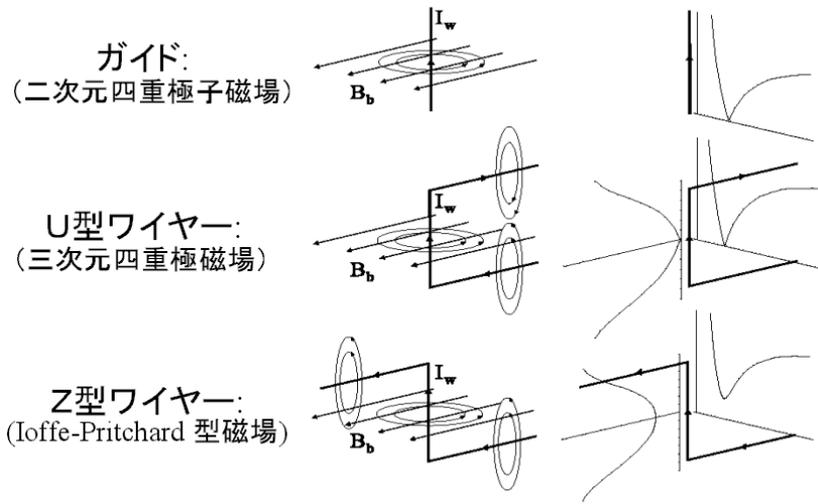


図1 ワイヤートラップの原理

・製作したワイヤー

図2に示したのが本実験で使用するために作成したワイヤーである。ワイヤーはマコールというセラミクスによって支えられている。マコールは72mm×72mm×5mmの板状のものを購入し、グラインダー、ドリル、ヤスリを用いて自分で加工した。製作したものは超音波洗浄した後用いた。マコールの支えの中心が抜けているのは、コンダクタンスを良くしガスをポンプのほうへ行きやすくするためである。ワイヤーの素材は銅である。それぞれのワイヤーは直線状のワイヤーをラジオペンチで折り曲げ、マコールの支えにはめ込んだ。Z型ワイヤーのφ=2mmのワイヤーとφ=500μmのワイヤーの接点は、φ=2mmのワイヤーにφ=800μmの穴をドリルで開け、φ=500μmのワイヤーを通した後に何重にも巻いた後にラジオペンチで穴をつぶし動かないようにした。製作したワイヤーの構造物も超音波洗浄した後用いた。それぞれのワイヤーは電流導入端子にネジ止めされている。

今回製作したワイヤーは3つの要素から構成されている。1つが一番基本となるZ型のワイヤー(Z-wire)である。このワイヤーは途中まで熱伝導を稼ぐためにφ=2mmの銅線を用いており、トラップ位置ではワイヤーからの距離を稼げるようφ=500μmのワイヤーを用いた。もう1つは圧縮ワイヤー(c-wire)である。これは軸方向の磁場勾配を大きくするために用いるものである。そして最後の1つが分岐ワイヤー(s-wire)というもので詳細は後に記してある。また分岐ワイヤーはクロスワイヤートラップにも用いることができる。圧縮ワイヤーと分岐ワイヤーはφ=1.5mmの銅線を用いている。

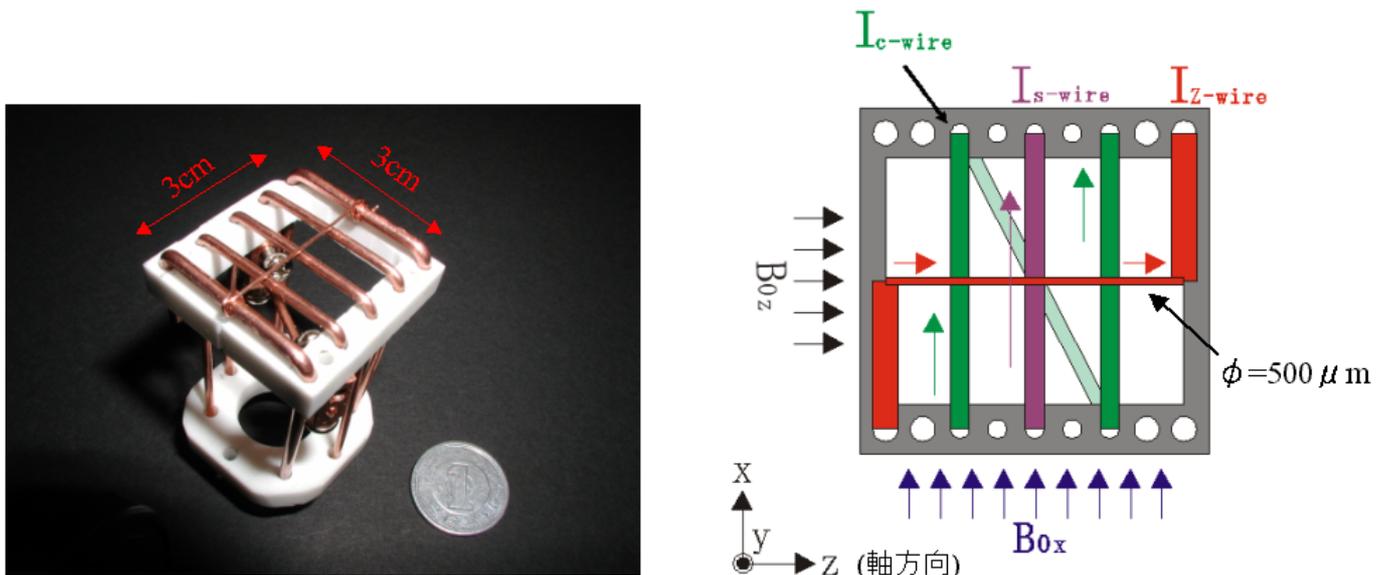


図2 製作したワイヤー

蒸発冷却時にはZ型ワイヤーに8A、x方向のバイアス磁場  $B_{0x}$  に40Gauss、圧縮ワイヤーに20A、軸方向のバイアス磁場  $B_{0z}$  に-2.5Gauss 与え、半径方向の磁場勾配  $\alpha=1000\text{Gauss/cm}$ 、軸方向の二次の曲率  $\beta=400\text{Gauss/cm}$ 、オフセット磁場 1Gauss をもつ急勾配な磁場を生成する。このとき磁場の極小点はワイヤー表面から  $150\mu\text{m}$  のところに生成される。この磁気ポテンシャルにおいて  $^{87}\text{Rb}$  は半径方向のトラップ周波数  $\nu_{\rho}=1200\text{Hz}$ 、軸方向  $\nu_z=14\text{Hz}$ 、有効トラップ周波数  $\nu \equiv (\nu_{\rho}^2 \nu_z)^{1/3}=330\text{Hz}$  を得る。我々の3コイルを用いたボーズ凝縮体生成装置は蒸発冷却時  $\nu=125\text{Hz}$  で40秒間蒸発冷却を行っている。これに比べ2.5倍の有効トラップ周波数となっているため、以前の装置に比べ蒸発冷却の効率が向上し、蒸発冷却時間の短縮が望める。(密度は  $\nu^3$  に比例する)

[実験装置]

本研究を行うにあたり図3に示す新しい装置を設計し開発した。実験はガラスセル中で行われ、各真空ポンプにより  $10^{-10}\text{torr}$  の真空度に維持されている。コイルはMOTコイル、輸送コイル、x方向のバイアスコイル、z方向のバイアスコイルと、図に示していないがガラスセルの下に位置補正コイルというものが配置されている。上の電流導入端子よりワイヤーの構造物とRb原子供給源のディスペンサーが吊り下げられている。

本研究を行うには、クーリング光、リパンプ光、オプティカルパンプ光、プローブ光の四つの周波数のレーザー光が必要である。本研究では二つの外部共振器型半導体レーザーを二つ用意し、位相変調法より周波数安定化を行い四本に分けて実験に用いた。さらにクーリング光のパワーを得るために光アンプも用いた。

実験の制御はNIのPCI-DIO-32HSという32チャンネルのデジタル出力ボードを用いた。このボードを任意のパターン、時間で自由に出力できるように図4に示したソフトをLabVIEWにより開発した。このプログラムは出力パターンをボードに送り終わった後ボードの内部クロックで出力するため、用いているPCのCPUに依存せず毎回再現良く出力可能である。

原子の観測方法としては吸収撮像法を用いた。用いたCCDカメラはApogee社のap260であり、受光面は500ピクセル×500ピクセル、1ピクセル  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  である。CCDカメラを制御するため図5に示したソフトをVBにより開発した。このソフトは図4のソフトと同時に用いることができるため、制御から観測まで一台のPCで可能である。

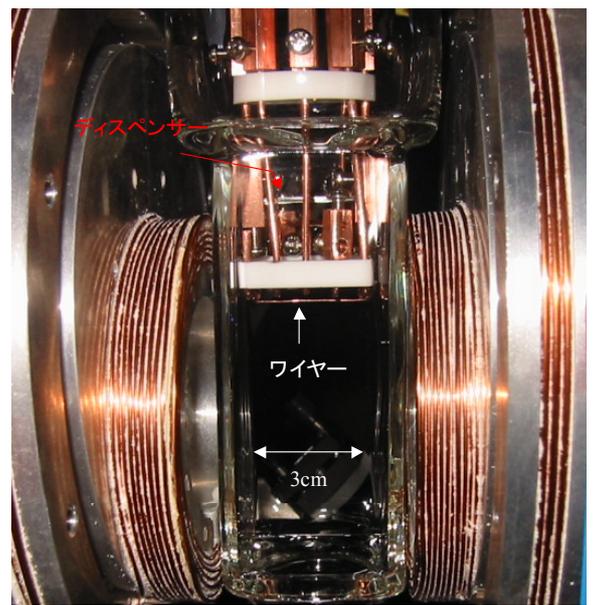
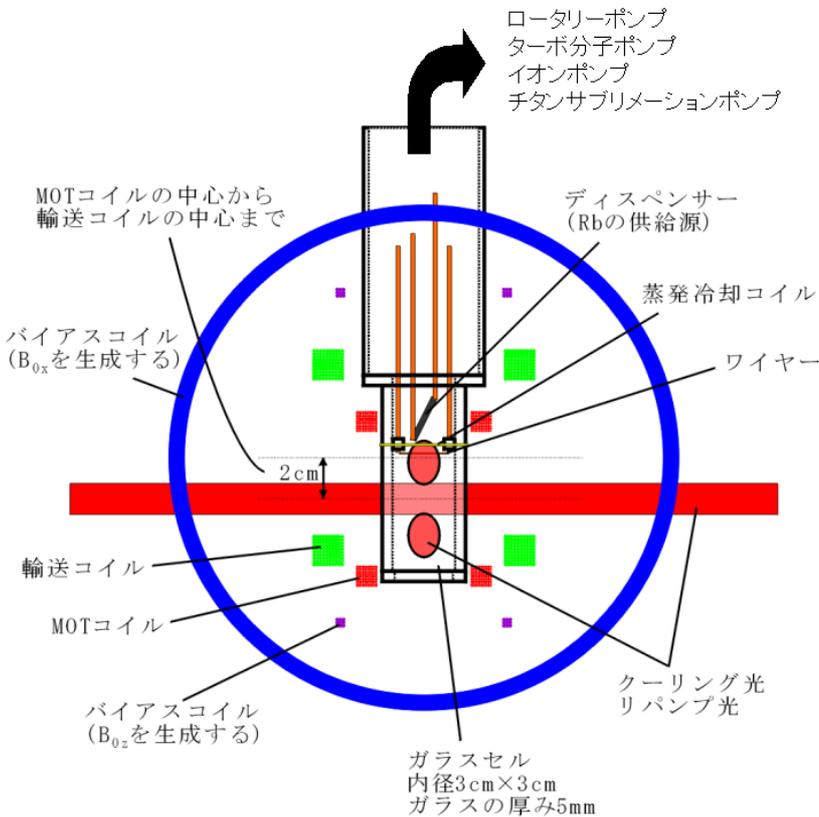


図3 実験装置

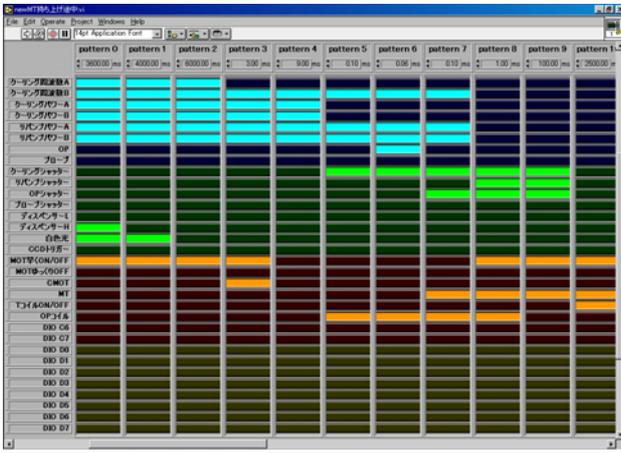


図4 デジタルボード制御ソフト

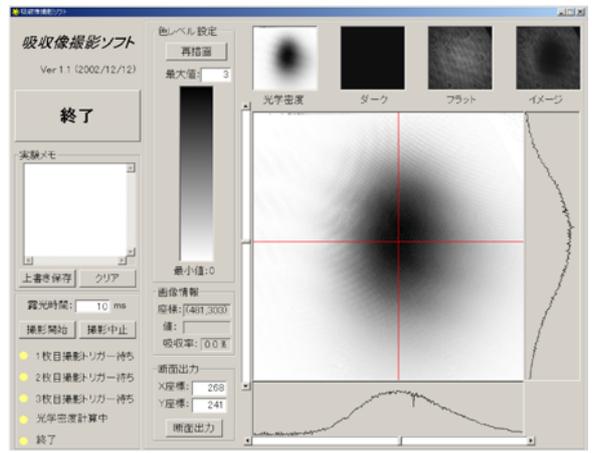


図5 CCDカメラ制御ソフト

[実験]

・実験手順

ボーズ凝縮体までの実験手順を図6に示した。①ディスペンサー、光誘起脱離によりRb原子を一時的に放出させ、磁気光学トラップ(MOT)により原子を冷却、捕獲する。原子を磁気光学トラップで捕獲した後、真空度が回復したところを見計らい、磁場勾配を倍にし圧縮MOTで密度を上げ、偏光勾配冷却により原子をさらに冷やす。②偏向勾配冷却によってさらに冷やされた原子は、磁気トラップを行うためオプティカルパンプ光により $|F=2, m_F=+2\rangle$ の状態にそろえられる。状態をそろえた後、原子はMOTコイルが作る四重極磁場により最捕獲される。③原子をMOTコイルで磁気トラップした後、輸送コイルによりワイヤー近傍まで原子を輸送する。MOTコイルの中心と輸送コイルの中心は2cm離れている。まず始めに輸送コイルにゆっくり電流を流していき、MOTコイルの作る磁場を変化させ、両コイルの中心に磁場のミニマムを作る。つまりこのとき原子は1cm持ち上げられる。④次にMOTコイルに流す電流をゆっくりと下げていき、輸送コイルのみで原子を捕獲する。これにより原子はさらに1cm持ち上げられ、ワイヤー近傍に持ち上げられる。⑤ワイヤー近傍に原子を持ち上げた後、輸送コイルの電流を瞬時に切り一時的に原子を解放する。⑥それとほぼ同時にZ型ワイヤーとx方向の均一磁場を生成するコイルに電流を流し、ワイヤーが生成する磁場によって際捕獲する。ここからがワイヤートラップである。⑦原子をワイヤートラップで捕獲した後、圧縮し蒸発冷却を行い凝縮体を生成する。

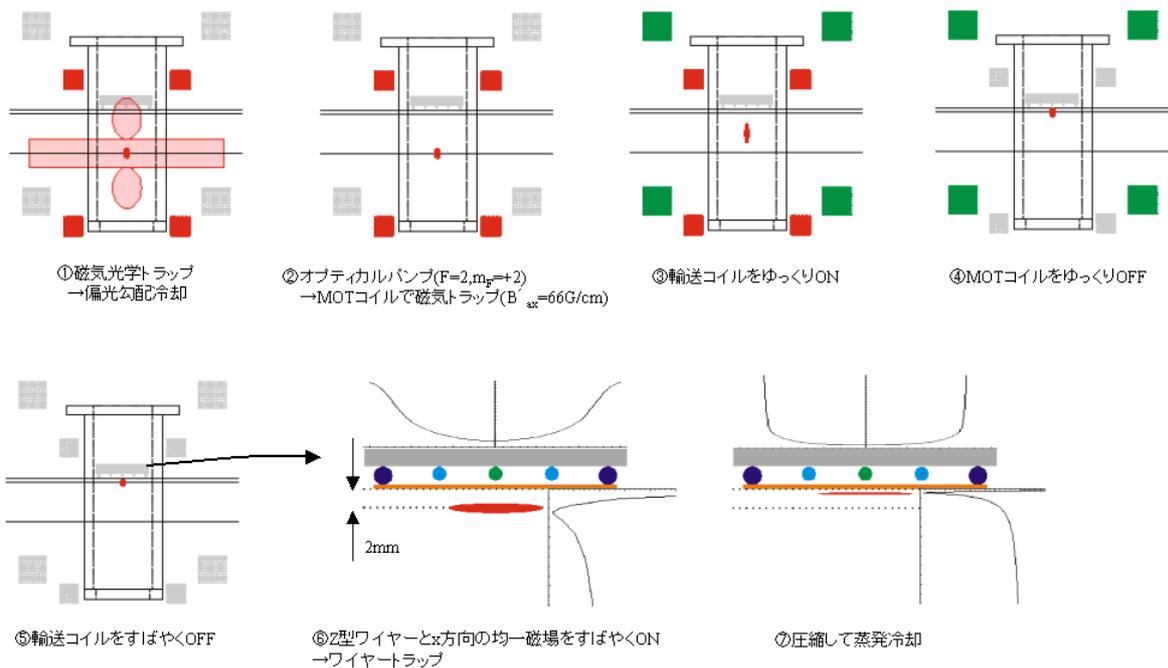


図6 実験手順

・実験結果

① 磁気光学トラップ(MOT)、偏光勾配冷却(PGC)

磁気光学トラップはクーリングの離調を $-15\text{MHz}$ にし、ビーム系 $\phi=15\text{mm}$ 、パワー密度 $I=6\text{mW}/\text{cm}^2$ で、磁場は軸方向の磁場勾配が $15\text{Gauss}/\text{cm}$ (重力方向は $7.5\text{Gauss}/\text{cm}$ )の磁場勾配で行った。原子を捕獲時にディスペンサーを $0\text{A}$ から $3.6\text{A}$ に立ち上げ、同時に白色光を照射し光誘起脱離を起こす。ディスペンサーと光誘起脱離の時定数が異なるために、時間差をつけてOFFにする。まずディスペンサーを $3.4$ 秒後にOFFにし、その後 $3$ 秒待った後白色光もOFFにする。その後真空が元の状態に戻るまで $3$ 秒待機する。これにより得られた冷却原子の個数は $2 \times 10^7$ 個であり、温度は $170\mu\text{K}$ であった。

MOTのあと偏光勾配冷却を行うのだが、その前に密度を上げるために圧縮MOT(CMOT)を行った。方法は磁場勾配を倍にし、離調を $-45\text{MHz}$ にとって行った。CMOTは $3\text{ms}$ で最適とした。

CMOTのあと瞬時に磁場を切り偏光勾配冷却を行った。クーリングの離調はCMOT時と同じで $-45\text{MHz}$ で行い、レーザー光の強度はクーリング、リパンプ共にMOT時と変えないで行った。PGCは $9\text{ms}$ 行い、PGC後に得られた冷却原子は個数は $2 \times 10^7$ 個であり、温度は $40\mu\text{K}$ であった。

② MOTコイルによる磁気トラップ(MT)

磁気トラップを行うために、オプティカルパンプ(OP)により原子の状態を $|F=2, M_F=+2\rangle$ にそろえた。方法は瞬時に $1\text{Gauss}$ の均一磁場を与えゼーマン分裂させ量子化軸を決め、そこに $|F=2\rangle \rightarrow |F'=2\rangle$ に共鳴するレーザー光を $\sigma+$ の円偏光にして照射してあげる。OPは $60\mu\text{s}$ で最適とした。

OPを行った後MOTコイルに電流を流し、軸方向の磁場勾配が $66\text{Gauss}/\text{cm}$ (重力方向 $33\text{Gauss}/\text{cm}$ )である四重極磁場を瞬時に立ち上げ磁気トラップを行う。ここで注意しなければならないのは、まずMOTの中心とMTの中心が合っていないとうまく磁気トラップされない。そのためMOT時にMTの磁場を立ち上げ、しっかり中心に圧縮されていくことを確認して位置合わせを行った。さらにOPで $|F=2, M_F=+2\rangle$ にそろえた後、OPで用いた $1\text{Gauss}$ の磁場とMTの四重極磁場を $1\text{ms}$ 位重ね合わすようにすることでスピニングがうまく追従し、うまくMTに移行できた。

磁気トラップの移行効率と寿命測定の結果を図6に示した。図を見ての通りMTへの移行効率はほぼ $100\%$ であるといえる。磁気トラップの寿命は指数でフィットしたところ、初期個数の $1/e$ になる時間は $7$ 秒であった。 $10$ 秒の寿命を目指していたのだが、十分蒸発冷却は可能であると今のところ考えている。磁気トラップ $1$ 秒後の温度は $90\mu\text{K}$ であり多少加熱されているが問題ない。

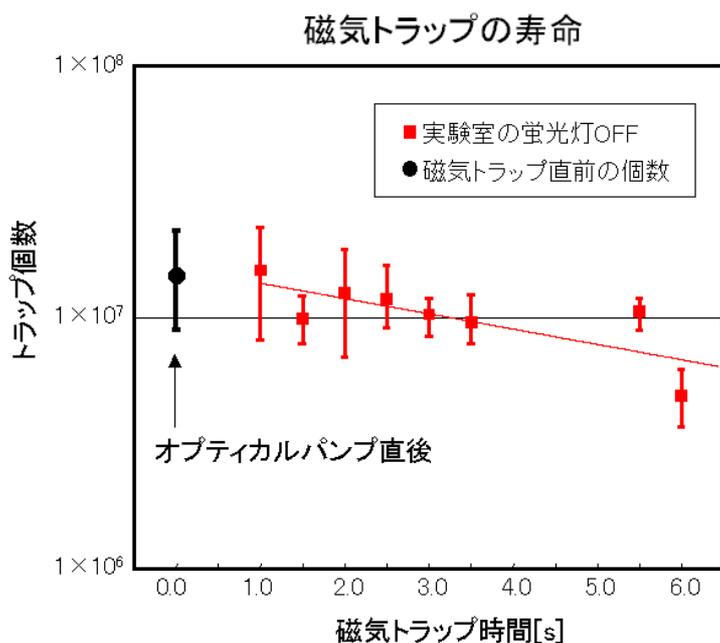


図6 磁気トラップの寿命測定

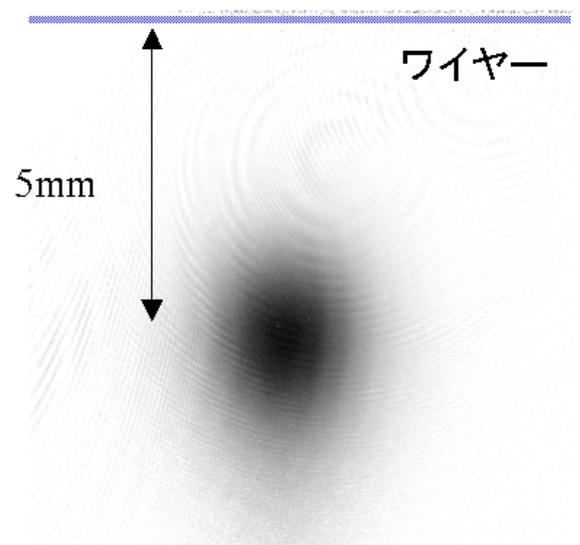
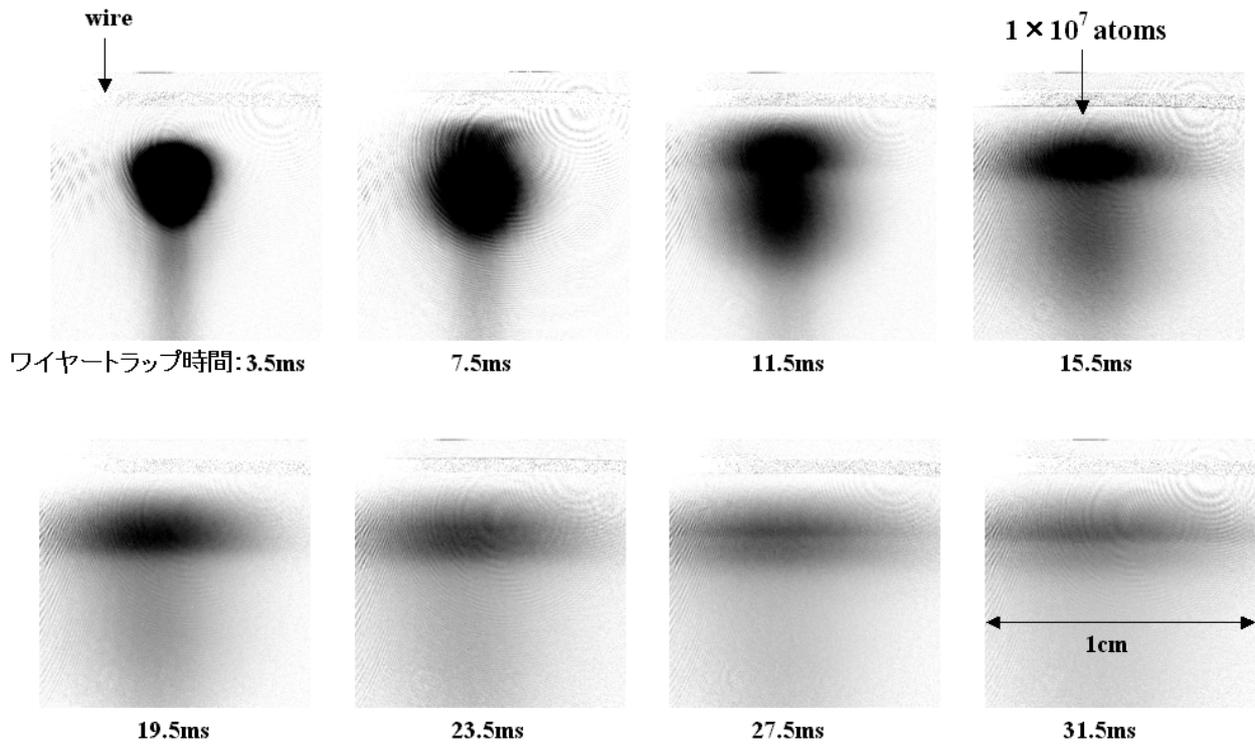


図7 輸送コイルによる原子の輸送



Z-wire:25A、バイアス磁場:35.7Gauss、 $r_0=1.4\text{mm}$ 、TOF:2ms

図8 ワイヤートラップ

### ③ 輸送コイルによる原子の輸送

MOT コイルでの MT の後、輸送コイルによる原子の輸送を行った。実験はまず輸送コイルを 300ms かけて ON(重力方向 33Gauss/cm)にし、続いて MOT コイルを 300ms かけて OFF にした。このときに撮った吸収像が図 7 である。輸送コイルにより原子をワイヤーの 5mm 下に輸送できた。この時の移行効率もほぼ 100%であり、容易に原子輸送が行えた。コイルを立ち上げる時間を色々変えて実験してみたが、短くしすぎると輸送過程でロスが生じ、長くしすぎると寿命でロスが生じることが分かりこの値に最適化した。

輸送コイルで輸送した後、位置補正コイルにより重力方向の位置補正を行った。位置補正コイルにより原子の位置をワイヤーから 0~5mm の範囲で自由に選ぶことができる。

### ④ ワイヤートラップ

位置補正を行った後コイルの磁場を瞬時に OFF にし、その後瞬時に Z 型ワイヤーに電流を流し、均一磁場を与えワイヤートラップに移行した。その様子を図 8 に示した。時間が経つにつれ徐々にワイヤーのポテンシャルに移行されていく様子がわかる。現在この過程の最適化を行っている段階である。

[まとめと今後の予定]

私はワイヤートラップの実験を行うための新しい装置を開発した。制御系、観測系が 1 台の PC から制御できるようなシステムを構築した。Rb 供給源としてディスペンサーと光誘起脱離を用いた。磁気トラップの寿命は 7 秒であった。ワイヤー近傍に  $2 \times 10^7$  個の原子を高効率に輸送した。 $1 \times 10^7$  個の原子をワイヤートラップできた。

今後は半径方向、軸方向の圧縮を行い蒸発冷却によりボーズ凝縮体の生成を試みる予定である。

[参考文献]

- [1] H. Ott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 230401 (2001)
- [2] D. Cassettari *et al.*, Appl. Phys. B (2000) / Digital Object Identifier (DOI) 10.1007/s003400000297
- [3] J. Reiche *et al.*, Appl. Phys. B (2000) / Digital Object Identifier (DOI) 10.1007/s003400000460
- [4] Fortagh *et al.*, Appl. Phys. **84**, 6499 (1998)
- [5] B. P. Anderson *et al.*, Phys. Rev. A **63**, 023404 (2001)