

中性原子の微小磁気トラップに関する研究

量子・物質工学科 清水(和)研究室 鈴木 信也

1.背景・目的

本研究室では atom chip の研究を行っている。atom chip とは基板上のワイヤーに電流を流し、電流の作る磁場のポテンシャルで原子を閉じ込めるなど原子を操作しようというものである。atom chip は、急激な磁場勾配や複雑な磁場を容易に実現できるという利点がある。レーザー冷却された原子を不均一磁場でトラップして量子演算を行わせることを目指している。そのためには

各原子は決まった位置にトラップしなければならない。

2つの原子間で相互作用されるために距離を近づけたり離したりしなくてはならない。

無限に細い直線セグメント電流が作る磁場を計算によって確かめる。また大きさ、曲がり角などのある系でどのような振る舞いをするか調べるために、導管で回路を作り磁場を測定する。

2 1.磁気トラップ

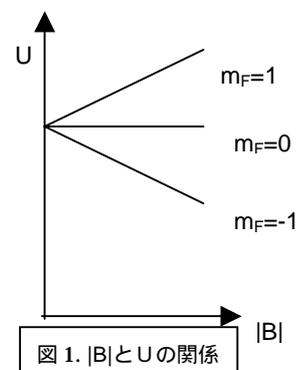
磁気トラップは不均一磁場と原子の磁気モーメントの相互作用によって原子をトラップする。磁束密度 $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r})$ 、原子の磁気モーメント $\vec{\mu}$ によって原子はポテンシャル U をもつ。

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = g_F \mu_B m_F |B|$$

(g_F : g 因子、 μ_B : ボーア磁子、 m_F : 磁気量子数)

原子の磁気モーメント $\vec{\mu}$ の磁束密度 \vec{B} 方向成分を μ_z とすると原子はポテンシャル $U = -\mu_z B$ をもつので $\vec{F} = \nabla(\vec{\mu} \cdot \vec{B}) = \mu_z \nabla B$ になる。 $\mu_z = -\mu$ ($\mu > 0$) のとき原子は磁束密度の極小点に向かうような力を受けるので磁束密度の極小点で原子をトラップするのである。しかし磁束密度の極小値 $B_{\min} = 0$ の場合、原子の磁気モーメント $\vec{\mu}$ が変化しトラップから外れてしまうので、原子をトラップするためには $B_{\min} \neq 0$ になるような磁場を作らなくてはならない。図 1 で磁場が増加するにつれてポテンシャルが増大する $m_F = 1$ の原子は、磁場の極小点方向に力 \vec{F} をうける。よって磁場 B の極小点で原子をトラップすることができる。ただし $B_{\min} = 0$ だと $m_F = 0$ や $m_F = -1$ の状態に移りトラップされなくなってしまうので $B_{\min} \neq 0$ でなくてはならないということである。

磁場中での原子のポテンシャル
角運動量 $F=1$ の場合



2. 磁場による3次元トラップ

3次元的に原子をトラップするためにはy方向の電流とx方向のBiasに加え、x方向の電流でy方向に不均一な磁場を作る。図2に示すように電流 I_t により、y方向をトラップ、Biasと I_G によってx、z方向をトラップし、原子を図中の赤で示したところで3次元的にトラップすることが出来る。原子はワイヤー上方でトラップされるのでトラップ位置で磁場のy成分により極小値 B_{\min} は有限な値をもつ。また、ジグザクのワイヤーを用いることで3本のワイヤーでのトラップを、1本で実現することが出来る。3本から1本にしたことによってトラップには影響を及ぼさない。我々はジグザグワイヤーを用いる。ジグザグワイヤーで計算において $I_1 = I_3 = 30[A]$ で、電流 I_2 を徐々に増やしていくと磁場は図3のように変化していく。色が濃い場所が磁場の極小領域である。これより I_1 と I_3 の導線上にあった2つの磁場の極小点が I_2 を徐々に増やしていくにつれて、 I_2 の導線上に近づいていき磁場の極小点は1つになることがわかる。すなわち2ヶ所でそれぞれトラップされた原子を1ヶ所に集めることができる。

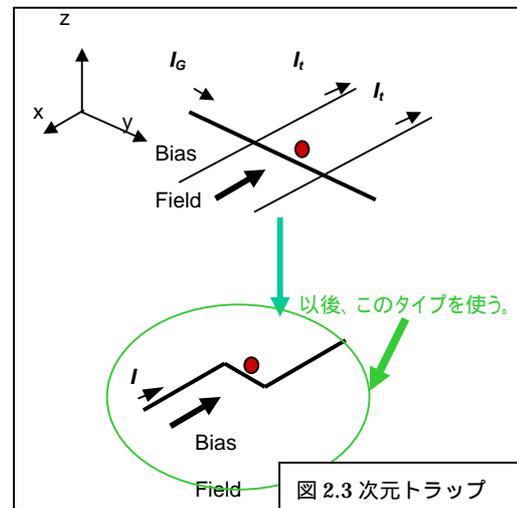


図2.3次元トラップ

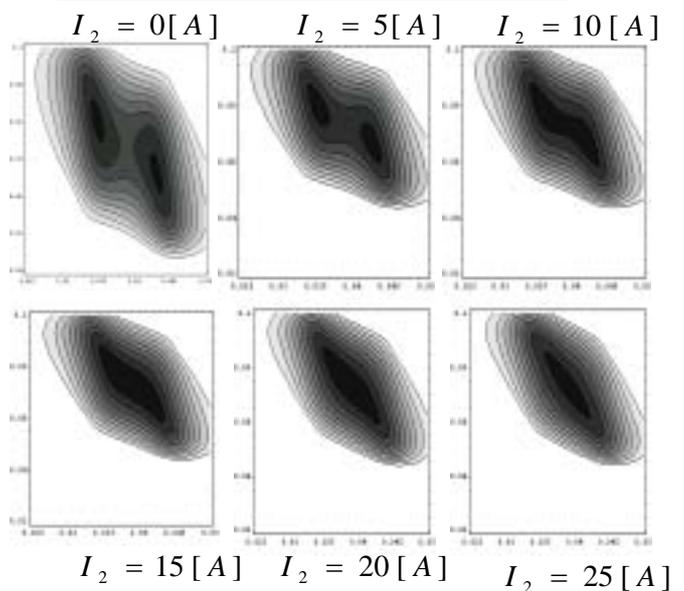


図3.磁場の極小領域の変化

3. 装置

太さと曲がり角をもつ回路を作製するために図4のように直径3.18[mm]、内径1.8[mm]の導管を一边45[mm]、曲率半径10.2[mm]で曲げた。またBias磁場をつくるためにコイルを作製した。半径75[mm]で7巻きしコイル間の距離は

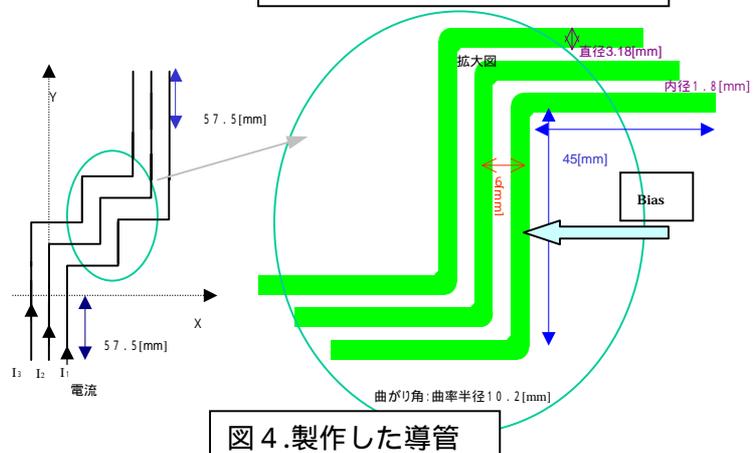


図4.製作した導管

150[mm]にした。Bias 磁場は中心付近で 18[G]発生させた。また測定により図 4 に示す測定領域においてコイルによる磁場は一様とすることが出来ることがわかった。またコイルは磁場の向きを - x 方向にするように図 5 のように配置した。またこの回路には数十[A]の電流を流すので、送風によって発熱を抑える。電源は 30[A]の場合 30.0 ± 0.2[A]の精度である。

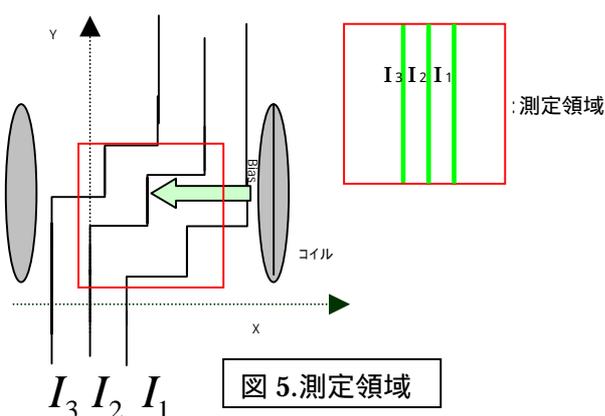


図 5.測定領域

4.実験

磁場の測定

$$I_1 = I_3 = 0[A], I_2 = 30[A]$$

$$I_1 = I_3 = 30[A], I_2 = 0[A]$$

$$I_1 = I_3 = 30[A], I_2 = 15[A]$$

$$I_1 = I_3 = 30[A], I_2 = 30[A]$$

それぞれ Bias は 18[G]

図 6 に示すように、

磁場の成分 Bx,By,Bz の測定は

プローブ位置 y、z を固定し、

x 方向にプローブを移動させて測定した。

次に位置 y、z を変えて、同じように x 方向にプローブを移動させる測定の方法をとった。

測定結果の一部と対応する計算結果を以下に示す。

$$I_1 = I_3 = 0[A], I_2 = 30[A]$$

B z 位置 y = 73.5[mm], z = 4.5 [mm]

下図は磁場の B z 成分の計算結果と測定結果。

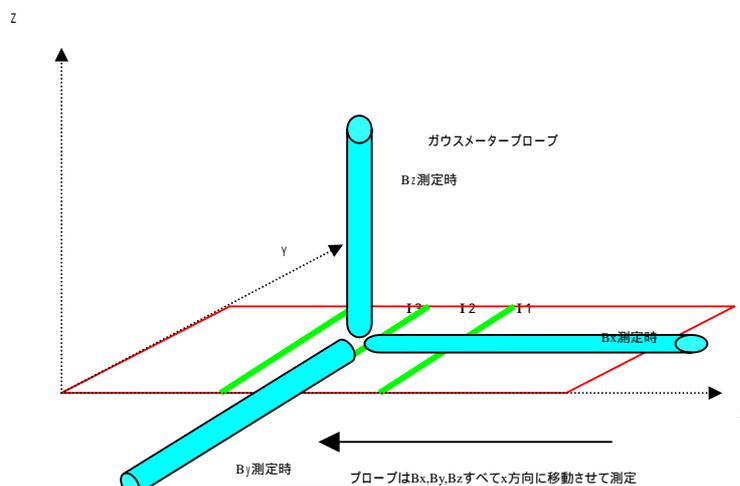
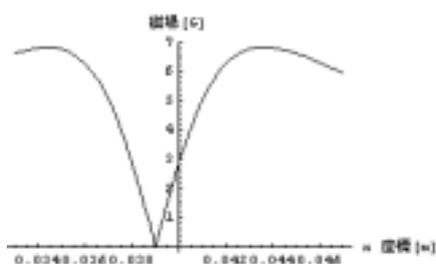
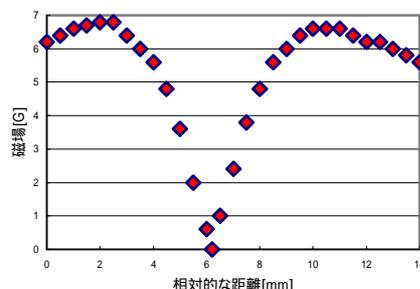


図 6.測定方法



計算結果

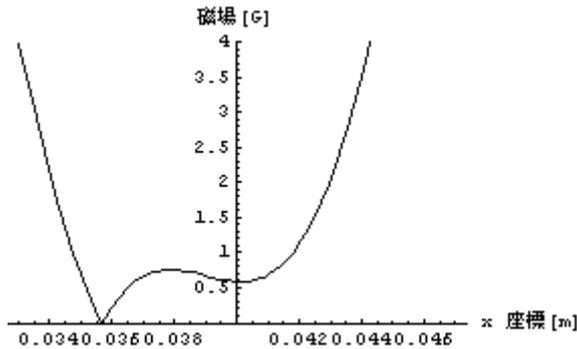


測定結果

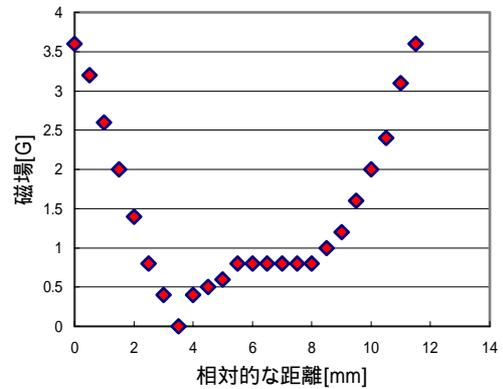
$$I_1 = I_3 = 30[A], I_2 = 0[A]$$

B z 位置 $y = 7.7 [mm], z = 5.4 [mm]$

下図は磁場の B z 成分の計算結果と測定結果。



計算結果

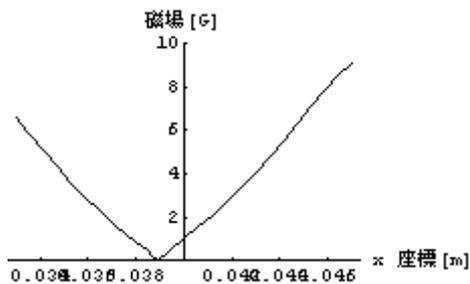


測定結果

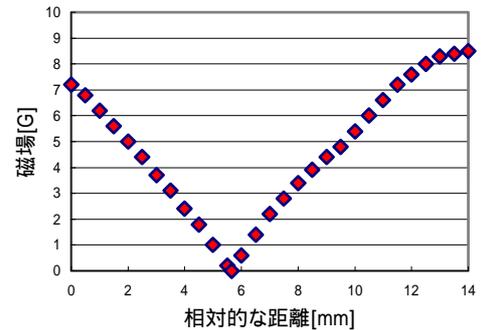
$$I_1 = I_3 = 30[A], I_2 = 15[A]$$

B z 位置 $y = 73.5 [mm], z = 6.5 [mm]$

下図は磁場の B z 成分の計算結果と測定結果。



計算結果



測定結果

5.まとめ

- ・ 太さと曲がり角を考えないジグザグワイヤー3本が実験と同様に配置しているとして磁場を3次元的に計算し、トラップ領域の磁場の変化を図に示した。
- ・ 太さや曲がり角をもたせるため導管を用いジグザグワイヤーの回路を作製した。
- ・ コイル間の中心からの距離 7.5[mm]において 18[G]の様な Bias 磁場をかけるコイルを作製した。測定領域内では一様である。
- ・ 実際に電流値を変化させて磁場を測定した。

測定と計算を比較し、測定した磁場は計算した磁場と同じ分布をしていることがわかった。また磁場の絶対値より、プローブの導管中心からの高さがわかった。今回の測定精度では、導管のもつ大きさや曲がり角が計算とどのような違いを生じるかどうかということは確かめられなかった。今後の課題としてコイルをヘルムホルツ型にして精度の高いガウスメーター用いより細かく測定していくことである。