

原子干渉計を用いた重力加速度計のための冷却原子生成システムの開発

中川賢一研究室 羽石暁

2021/3/3

1 研究背景

原子干渉計は、冷却原子にはたらく重力加速度を高精度に測定することができる。従来は光学干渉計を用いた重力加速度計が使用されていたが、原子干渉計は原理的に高精度で信頼性の高い重力加速度を測定できる利点がある。この装置を小型で可搬型にすることでフィールドでの観測が可能となり、地球物理や資源探査などの応用に期待されている。

2 研究目的

本研究では、産業に活用できるような実用的な装置を開発することが最終目標である。そのために、小型で可搬型の装置を開発することが求められる。この装置開発の課題は、可搬型装置の開発と可搬型レーザー光源の開発で、私は装置の開発を担当した。装置は、小型化を意識して自由落下型を採用して開発することを方針とした。この方針を満足するには、2つのことが課題となる。1つが冷却原子生成装置の大きさをどの程にするかである。2つ目に磁場の問題である。これらの課題に対して取り組み重力加速度計として動作する装置開発を本研究での目的とする。

3 冷却原子生成システムの構築

冷却原子生成システムの大きさは、重力加速度の感度で決まる。感度は以下の式で決定される。

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta \phi}{k_{eff} g T^2} \quad (1)$$

この式から感度は相互作用時間 T で決定し、自由落下型の場合は $x = gT^2/2$ の関係を持つ。すると、小型

にできて感度が 10^{-8} 台となる落下距離 10cm の場合、重力加速度の感度は 6.2×10^{-8} になる。目標の感度には届かないが、これは測定回数を増やすことで解決することができる。それは、統計誤差といい測定回数 n に対して、 $1/\sqrt{n}$ 倍で減少することで干渉信号の 1 点の測定を 100 回することで 10^{-8} から 10^{-9} に感度を上げることができる。

3.1 磁気シールドと全体像

落下距離から真空装置の大きさが決定した。そして、原子の落下部分を外部磁場から遮蔽する磁気シールドが必要である。ガラスセルの部分は完全に磁気シールドを行うがそのほかの部分はシールド内に収める必要はない。しかし、今回は光学系も含めて磁気シールド内に収めた。理由は、磁気シールドに穴を開けてしまうとそこから外部磁場がシールド内部に漏れ出てしまうためである。つまり、ガラスセルよりやや大きいサイズにして光学系用の穴をガラスセルの近くに開けてしまうと磁気シールドの意味がなくなってしまう。磁気シールドの穴の影響は穴の直径と同じ程度の大きさまで外部磁場の染み出しがある。それを考慮に入れて設計を行い、その結果図 1 のような構造となった。

装置は真空セルを中心に x, y 方向の光学系と MOT 用コイルが設置されている。上部には z 軸とラマン光用の光学系がある。そして外側を 2 重の磁気シールドで覆っている。本来なら内側の磁気シールドが外側の磁気シールドの中央あたりに設置するのが好ましいが、先述のステンレスの接合部があるため今回は端に設置することとなった。

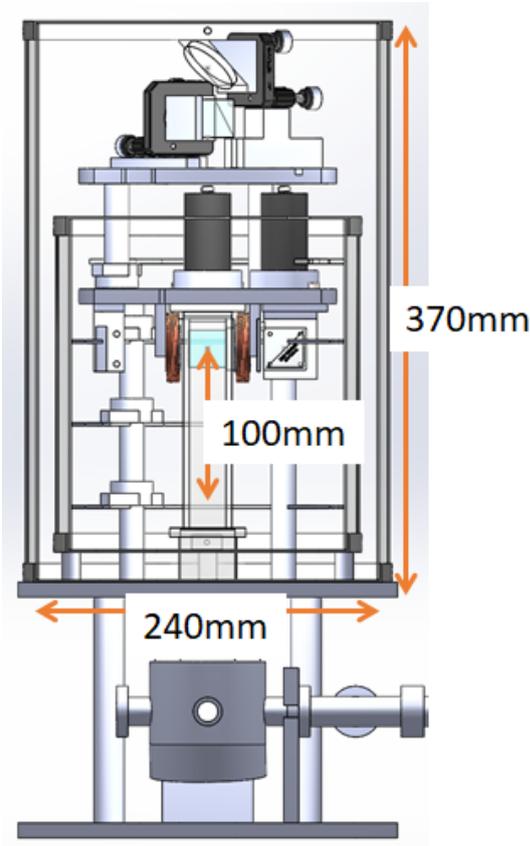


図 1: 装置全体図

3.2 MOTの光学系

MOTの光学系は x, y と z で分割している。理由は、 z 方向からはCooling光だけでなくラマン光も照射するためである。2つの光は偏光が異なり、Cooling光は円偏光、ラマン光は直線偏光である。偏光の違う光を切り替えることが1つの出射部にするのは難しい。無論不可能ではない。液晶でできた波長板を挿入すれば1つの出射口でもできなくはないが、装置が大型化してしまうため z 方向だけ分離した。

設計した光学系は図2のようになる。各光は光源から光ファイバーで送られて外側磁気シールド内でファイバー外に出る。ビーム径の設計値は15.6mmである。 x, y 方向は光軸に対して垂直に出射するため、直角プリズムで90度曲げてガラスセルに照射される。 z 方向はCooling光とRaman光をビームスプリッターで重ね合わせてガラスセルへ照射するようになっている。尚、設計当初はSiskiyou社製のミラーマウントを使用する予定であった。しかし、微調整用ネジに磁性体

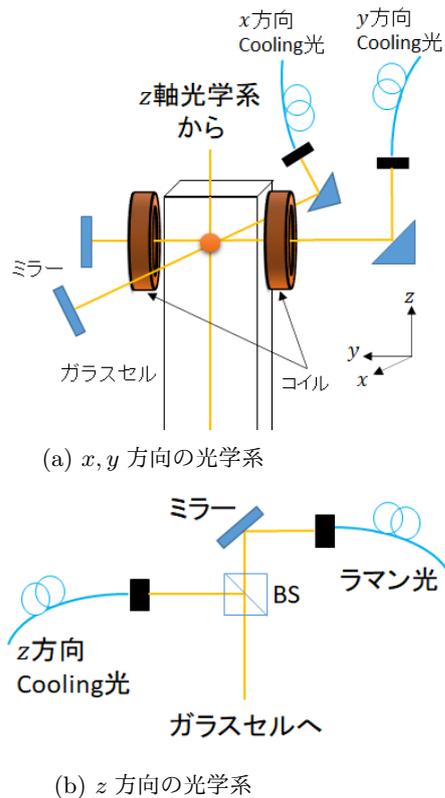


図 2: MOTの光学系

のネジが含まれていることが発覚したため使用を断念した。

3.3 アンチヘルムホルツコイル

アンチヘルムホルツコイルはMOTを構成するうえで重要な要素である。アンチヘルムホルツコイルは2つのコイル対して互いに逆向きになるように電流 I を流す。今回目標としたのは、磁場勾配で10G/cm/Aである。この条件から、設計したコイルは64回巻きで磁場勾配で9.2G/cm/Aである。また、その他の各パラメーターは以下ようになる。そして、MOT用のコイルを作製して、実際の配置で磁場を測定した。測定結果は図3のようになる。

4 冷却原子生成システム内の磁場

地磁気やエレクトロニクスが発する磁場は1次のZeeman効果が働くことで原子の準位がエネルギーシ

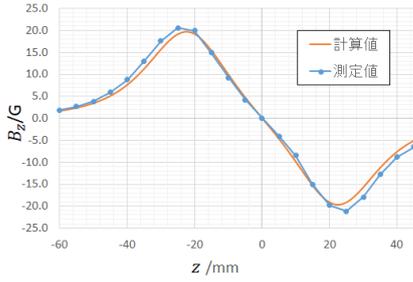


図 3: アンチヘルムホルツコイルの測定した磁場

フトを引き起こす。このエネルギーシフトがあることで Rb87 の時計遷移を利用して重力加速度を測定することができない。そこで、冷却原子生成システム全体を 2 重の磁気シールドで覆うことで影響を無くす必要がある。

4.1 遮蔽効果

磁気シールドは、強磁性体内に磁場を通すことで内部に磁場が入らないようにすることで磁場遮蔽が可能である。中空の強磁性体を設置すると、図のように外部磁場が強磁性体の物質内を経由する。そのため、入射する外部磁場が空洞内に漏れることがなく外部磁場の遮蔽が可能となる。

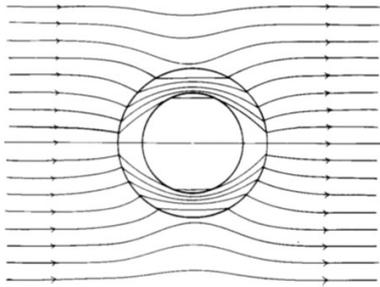


図 4: 円筒型単層磁気シールドの磁場分布 引用: T.J.Sumner, "Conventional magnetic shielding"

4.2 シールド係数

磁気シールドの遮蔽効果を評価する指標としてシールド係数がある。シールド係数は、静磁場と動磁場でそれぞれ定義が異なる。静磁場の場合のシールド係数

は、内部磁場 B_{in} に対する外部磁場 B_{out} の割合で定義でき、

$$S = \frac{B_{out}}{B_{in}} \quad (2)$$

となる。尚、単層磁気シールドの横方向、軸方向磁場に対するシールド係数 S^T, S^A は以下のように定義できる。

$$\begin{cases} S^T = 1 + \frac{\mu_1 t_1}{2R_1} & (3a) \\ S^A = 1 + S^T \left(\frac{2K}{1 + a + \alpha a^2/3} \right) & (3b) \end{cases}$$

ただし、 K は

$$K = \left(1 + \frac{1}{4a^3} \right) \beta - \frac{1}{a} + 2\alpha \left\{ \ln \left[a + \sqrt{1 + a^2} \right] - 2 \left[\sqrt{1 + \frac{1}{a^2}} - \frac{1}{a} \right] \right\} \quad (4)$$

で定義できるものとして扱う。ただし、 R_1, L_1, t_1 はそれぞれ半径、長さ、厚さで $a = L/R$ である。 α, β は蓋と側壁の磁束密度の垂直成分を実験的に測定することで決定できる定数である。

また、2 層にした磁気シールドを考えた場合、横方向と軸方向磁場に対するシールド係数 S^T, S^A は

$$\begin{cases} S^T = 1 + S_1^T + S_2^T + S_1^T S_2^T \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right] & (5a) \\ S^A = 1 + S_1^A + S_2^A + S_1^A S_2^A \left(1 - \frac{L_1}{L_2} \right) & (5b) \end{cases}$$

となる。

4.3 磁気シールド内の磁場とその条件

4.3.1 原子の磁場への要求

原子干渉計では、誘導ラマン遷移をするために $|5^2S_{1/2} F = 1, m_F = 0\rangle$ の準位に状態選択された原子が必要である。状態選択の過程で原子の縮退を解く程度の Bias 磁場が必要となる。原子は 1G あたり 700kHz/G エネルギーシフトが生じる。ラマン光のパルス幅 10ms を周波数換算すると 100kHz となるため、100mG 程度かければ縮退を解くことが可能となる。100mG 以上の大きい磁場をかけた場合でも縮退を解くことはできる。しかし、原子の磁場による加速度を表す式 (6) より磁場の大きさに比例して磁場による加速度も大きく

なる。空間的変動 (磁場勾配) を 0 にすれば問題ないが、空間的変動を完全に 0 とするのは技術的に難しい。つまり、磁場による加速度が 0 にできない。そのため、なるべく小さい磁場にして加速度を小さくする必要があるので、必要最低限の 100mG を採用した。

4.3.2 原子干渉計への影響とその条件

原子干渉計では縮退を解く程度の磁場をかける必要がある。2 次の Zeeman 効果を考えると、

$$\mathbf{a} = \frac{1}{m} \nabla (h\alpha B^2) = \frac{h\alpha}{2m} \mathbf{B} \frac{dB_z}{dz} \frac{\mathbf{z}}{|z|} \quad (6)$$

だけ原子はわずかに加速される。この式から磁場 B と磁場勾配 dB_z/dz があると重力加速度に影響を与えることが分かる。しかし、磁場 B は Bias 磁場をかける都合上 0 とならない。このことから磁場の変動を排除しなければならないことが分かる。式 (6) より内部の磁場と内部磁場の磁場勾配の積で原子に追加にかかる加速度が決定する。感度 $\Delta g/g$ が 10^{-9} 、 $B = 0.1\text{G}$ としたら、磁場勾配 dB_z/dz は 0.1G/m となる。これは、1cm で 1mG の勾配ならば目標の感度に対して許容範囲となることがいえる。

4.4 磁気シールド内の磁場

磁気シールド内の磁場がどのようになっているかをまとめると、以下のように書き表せる。

$$B_{in} = B_{Bias} + B_{residual} + B_{material} \quad (7)$$

B_{Bias} は Bias 磁場である。状態選択の際に縮退を解いておくため、100mG 程度かける予定である。

$B_{residual}$ は磁気シールド内の残留磁場である。磁気シールドは外部磁場を完全に遮蔽することはできない。そのため、ある程度外部磁場が染み出して残留磁場を形成する。実際に作成した磁気シールドの残留磁場は 1mG 以下にしている。

最後の $B_{material}$ は常磁性体による残留磁場である。常磁性体は磁化した場合、磁場を生じさせる。磁気シールド外の磁性体に関しては、外部磁場として磁気シールドで遮蔽できるが、内部に設置してしまうと残留磁場が影響を及ぼす。

4.5 磁気シールドの残留磁場

4.5.1 磁気シールドの設計

磁気シールド内の残留磁場の大きさは、シールド係数を決めることで決定する。設計する装置は、2重磁気シールドを採用するため、式 (5) を利用して計算することで求めることができる。目標値は、内部磁場 100mG の空間的変動の平均値が 100mG の 1% の 1mG 以下とした。シールド係数に変換すると、外部磁場 500mG にしたら $S = 500$ になる。各のパラメータを決定して元に式 (3) と式 (5) を用いて計算した。結果は以下の表になる。

表 1: 磁気シールドのシールド係数

層	S^T	S^A
内側	61	49.8
外側	51	33.9
全体	1063.6	769.3

一方で残留磁場の影響する範囲は、シールドにあける穴の大きさによっても決定する。磁気シールドの内部に光学系を構築する都合上、磁気シールドに穴を開けなければならない。穴が開くことで外部磁場の染み出して遮蔽効果の低下を招いてしまう。今、開放端の円筒型磁気シールドがある。外部磁場 B_0 は穴から中心に向かって指数関数的に低下していく。内部の磁場 B_{in} を式で示すと以下ようになる。

$$B_{in} \approx B_0 \exp\left(-\frac{\beta z}{D_{op}}\right) \quad (8)$$

ただし、 D_{op} は穴の直径、 z は穴からの距離、 β は係数で横方向は 7.0、軸方向は 4.5 になる。また、直径分だけ内部 ($z = D_{op}$) での磁場は元々の磁場に対して横方向は 10^{-3} 、軸方向は 10^{-2} 倍に減衰される。以上から穴の影響は無視できないがガラスセルを内部に設置する予定であった。そのため、ガラスセルの入る 52mm の穴を中央に設置した。

4.5.2 磁気シールド内の残留磁場の測定

磁気シールドの残留磁場の測定結果は図 5 になる。1mG 以下の磁場となっているのは外側シールドの入口から 10cm ($z = 10$) の箇所から内側となった。シールド

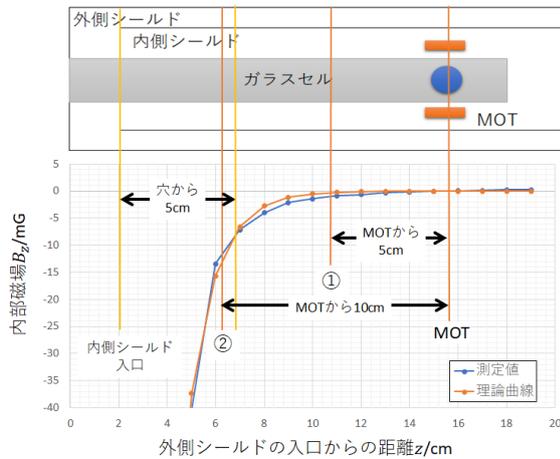


図 5: 磁気シールド内の残留磁場の測定結果

の蓋の穴が 52mm 空いていることから、その穴から外部磁場の染み出しが原因である。穴の影響は式 (8) で決まる。 z は内側シールドを 0 として計算したところ、測定値は理論曲線通りの結果がみられた。MOT ($z = 16$) から落下距離 10cm ($z = 6$) と 5cm ($z = 11$) の場所で磁場勾配を計算すると、以下の表のようになる。

表 2: シールドの残留磁場測定結果

落下距離	磁場勾配
5cm	0.0246G/m
10cm	0.135G/m

落下距離 5cm は目標値を十分満たしているが、10cm は満たしていない結果となった。実際には Bias 磁場を加えるため、このデータから判断することはできないが、落下距離 10cm をとると残留磁場の空間的変動が大きく目標の感度を得るには難しいことが分かった。

4.6 Bias 磁場

4.6.1 鏡像効果

鏡像効果とは、磁気シールド内の磁場が磁性体の表面に対して対称となる位置にコイルが設置されている場合と等しくなるような効果である。この効果は、境界条件で比透磁率 μ_r が十分大きいとき磁性体に対して垂直に入射することで生じる。図 6 は $z = 0$ にコイルを置いた場合、イメージコイルが $z = b$ にあるシ

ールドの表面に対して対称の位置 $z = 2b$ にあることを表している。この効果があるため磁気シールド内の磁場を解析する必要がある。

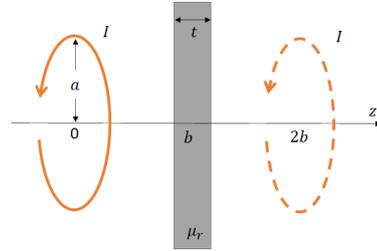


図 6: 鏡像効果

4.6.2 Bias 磁場の解析

コイル 4 個を設置して間隔を変化させた場合の磁場は図 7 のようになる。

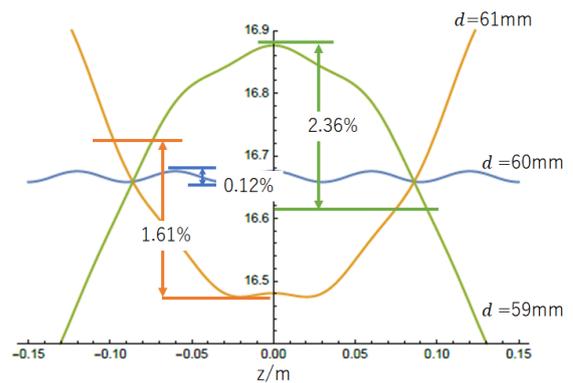


図 7: コイルの配置を変えた場合のシールド内磁場

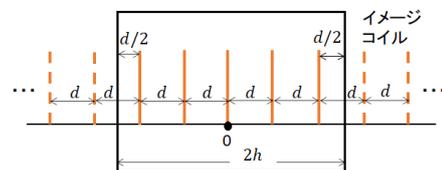


図 8: コイルの配置

図 7 より間隔を 1mm ずらしただけで変動が大きく変化することが分かる。逆に間隔が 60mm のときは変動が抑えられていることが分かる。この理由としては、シールドの側面とコイルの間隔の関係性を考えることで解決する。シールドの側面からコイルの距離が $d/2$

となっている。すると、鏡像効果でイメージコイルと実物のコイルが無限に等間隔に並ぶこととなる。

つまり、コイルの設置個数 N 、間隔 d 、全長 $2h$ としたら

$$Nd = 2h \quad (9)$$

の関係となれば空間的変動を抑えることができる。

4.6.3 Bias 磁場の測定

Bias コイルを 4 個設置して、電流 0.2A を流しシールド内部の磁場を測定した。測定方法は残留磁場の時と同じである。このときのシールド内部の磁場の測定結果は図 9 のようになる。結果より、 $z = 11$ 辺りで最大値をとって減少している。磁場勾配の計算をすると、MOT($z = 16$) から落下距離 6cm($z = 10$) の場合 0.142G/m ($\Delta g/g = 1.4 \times 10^{-8}$) となり、目標値を満たすことはできなかった。尚、 $z = 9$ 以下の範囲の磁場の減衰は残留磁場が穴から染み出していることに起因するものである。

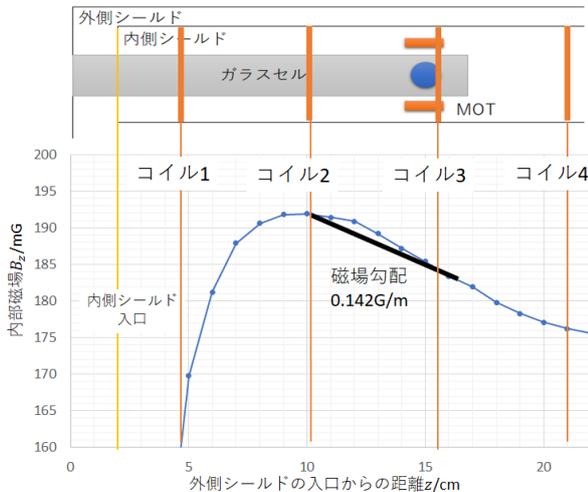


図 9: Bias 磁場を加えたシールド内の磁場の測定結果

原因として考えられることは 2 点ある。1 つはコイルの設置間隔の精度である。コイルの設置間隔は 1mm 違おうと大きく変動する。しかし、これ以上の精度向上を行うのは難しいため、改善することは難しい。もう 1 つは、コイル 4 の影響が小さいことである。コイルの間隔を現在よりも狭くすれば、結果的に磁場の変動が小さくなり、空間的に一様となる。そのため、最上

部のコイル 4 をコイル 3 に近づければ $z = 10$ 以下がっている磁場を持ち上がり磁場勾配を小さくできる。

5 まとめと今後の展望

今回原子干渉計を用いた重力加速度計の開発にあたり、「小型化」というテーマのもと自由落下型重力加速度計を採用し、冷却原子生成システムの構築を行った。原子の落下距離を 10cm に設定して、冷却原子生成を行う光学系とコイルの設計を行った。

磁気シールド内の磁場は、空間的に一様になるように、落下距離 10cm の取れるよう設計した。シールドの残留磁場は、入口から 10cm で 1mG 以下になった。ガラスセルの接合の都合上、穴の影響が大きく原子の落下距離 10cm ぎりぎりを満たしている。Bias 磁場を加えた時は、磁場勾配の条件を満たすことができなかったが、最上部のコイルを下にずらすことで磁場勾配を緩和できた。

現在は、ステンレスでガラスセルを接合している。これをインジウムで真空封じをすることで真空チェンバーまでシールドで覆うことができ、残留磁場を劇的に改善できると期待できる。