

# 冷却原子を用いた原子干渉計による 重力加速度計の高感度・高精度化

中川研究室

小野田 圭吾

## 研究背景・目的

1991 年以来、中性原子の物質波による干渉計が様々な研究室で研究されてきた。原子干渉計による重力加速度計には石油や水といった地下資源の探査、万有引力定数  $G$  の測定、等価原理の検証、重力波の検出というような精密測定分野で応用が期待されている。

現在、重力加速度の測定で実用化されているものはコーナーキューブを用いる光学干渉計によるものであるが、精度が  $\Delta g/g = 10^{-8}$  で限界だといわれている。一方、原子干渉計ではセンサーが冷却原子すなわち物質波であるため、より高い感度・精度で測定ができると期待されている。現在、1 グループだけであるが光学干渉計のものを超えたと思われる精度の重力加速度計もできている ( $\Delta g/g = 10^{-9}$ ) [1]。

以前、我々の研究室でも原子干渉計の研究を行い、原理を確認した。その際の感度は  $\Delta g/g = 2 \times 10^{-6}$  であった [2]。これ以上の感度向上などを妨げた原因として床からの振動がある。図 1 にあるように相互作用時間  $T$  を長くすることで感度は向上するが、 $T$  が長くなるとコントラストが悪くなっているのが分かる。この原因が床からの振動である。また、高精度化のためには外部磁場の影響も無視できなくなってくる。そこで、本研究では装置を一新し、最大 100 ms の相互作用時間をとれる非磁性のチタン製真空チャンバー、防振台、磁気シールドなどを用いることで高感度・高精度化を図る。目標は一回の測定で干渉フリンジの一点を決定した場合に  $\Delta g/g \sim 10^{-8}$  である。それに加え、可動式の重力加速度計にすることも目標である。

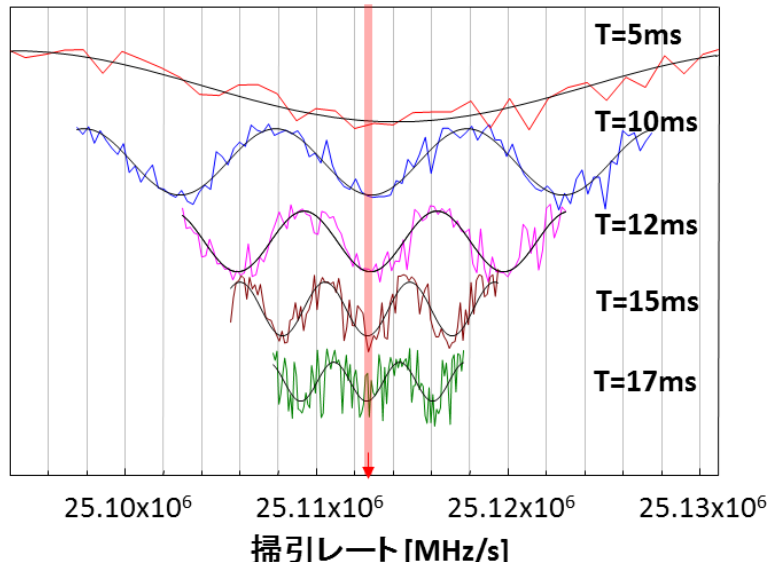


図 1. 干渉フリッジ ([2]より引用)

原理

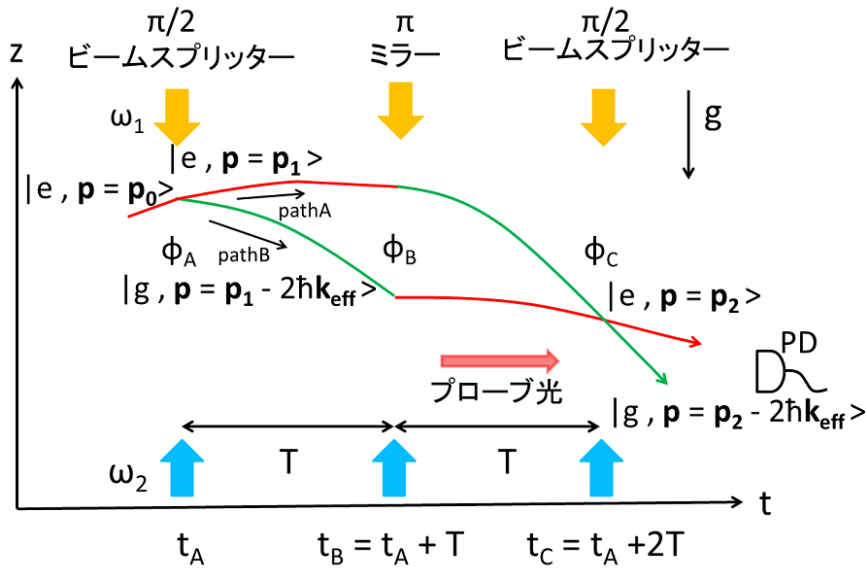


図 2. 原子干渉計模式図

図 2 のように励起状態に揃えた冷却 Rb 原子を自由落下させその間に計 3 回の干渉用パルスを当てることで干渉計を構成する。1 回目のパルスで励起状態と基底状態が 1 : 1 の重ね合わせ状態になるようにする。2 回目のパルスで状態を反転させることで再び重ね合わせる。重ね合わせたところで 3 回目のパルスを当て、重ね合わせ状態にすることで原子を干渉させる。その後、プローブ光で励起状態の原子の割合を観測し、重力加速度を算出する。原子干渉計では

原子と相互作用した時の光の位相が干渉信号の基になる。そのため、干渉信号は

$$\Delta\Phi_{tot} = k_{eff}gT^2$$

と表される。仮に、相互作用時間 100 ms の間に位相誤差が 50 mrad であった場合、干渉フリンジの 1 点を 1 回の測定で決定したときに得られる感度は  $3 \times 10^{-8}$  となる。

自由落下している原子はドップラー効果により共鳴周波数がシフトしてしまう。そのため共鳴を保つためにパルスの周波数を掃引し、釣り合う値を探すことで重力加速度を算出することができる。

## 実験装置

### (i) 光位相同期レーザー

原子干渉計では原子の内部・外部状態を操作するために誘導ラマン遷移を用いる。そのための光源として光位相同期レーザーを作製した。2 台のレーザーの間の位相揺らぎが残っていると測定回数を増やしても誤差に残ってしまうため、精度の向上を妨げる。

作製した光位相同期レーザーは 100 ms で 11 mrad の揺らぎであった[3]。許容範囲内であったが、他のノイズなどを考えるともう少し抑えられると好ましい。

### (ii) 低周波防振台 (MinusK Technology 社製)

図 1 にあったように床からの振動は干渉フリンジのコントラストを悪くする。特に相互作用時間に対応する周波数が問題となる(ex.  $T = 100$  ms とすると 10 Hz 付近の振動)。図 3 は床、光学定盤、低周波防振台の上での振動を測定したものである。床と光学定盤は 10 Hz 付近の振動を抑えられていないのに対し、低周波防振台はその辺りの振動を抑えることができているのが分かる。防振台上の振動を位相揺らぎとして計算してみたところ  $\Delta\Phi_{vib} = 700$  mrad であった。これより得られる感度は  $\Delta g/g = 4.4 \times 10^{-7}$  である。したがって、目標を達成するためにはさらに振動を抑える必要がある。そこで、防振台にフィードバックをかけることでアクティブに防振を行い、振動ノイズの低減を行っている。

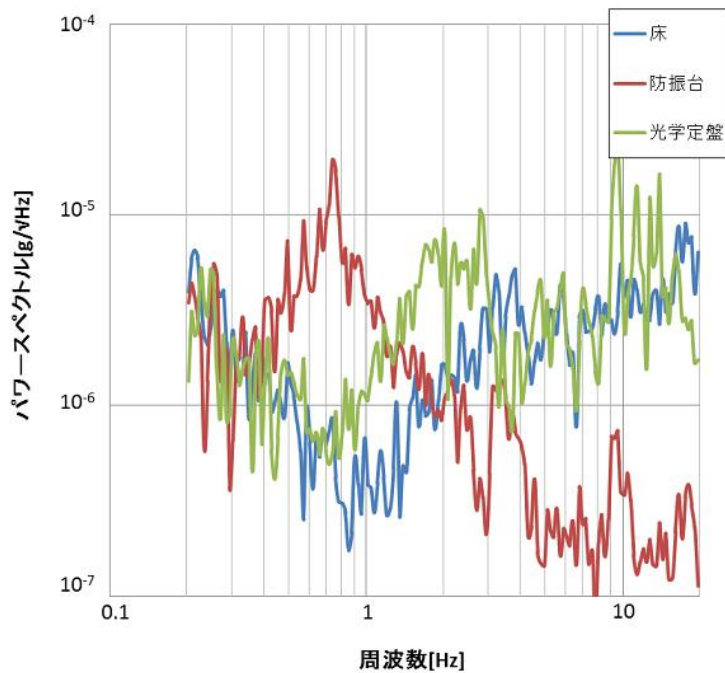


図 3. 振動の周波数特性

(iii) 磁気シールド

より高感度・高精度になってくると外部磁場の影響を無視することができない。磁場があると原子の共鳴周波数がずれてしまったり、空間的に勾配があると落下軌道がずれてしまったりする。これを防ぐために本研究では真空チャンバーを磁気シールドで覆う。図 4 はチャンバーをシールドで覆った図である。下から 330 mm までの磁場を磁気プローブを用いて測定した。その結果が図 5

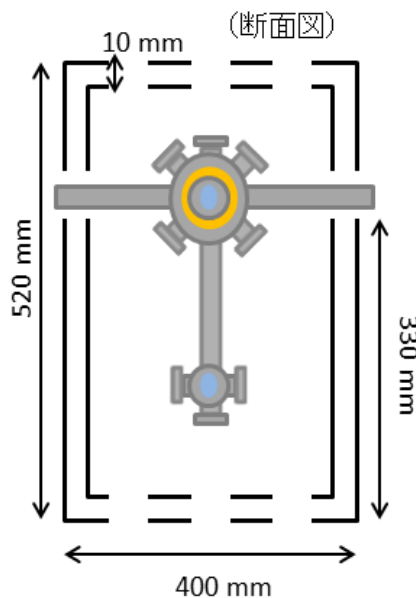


図 4. 磁気シールド断面

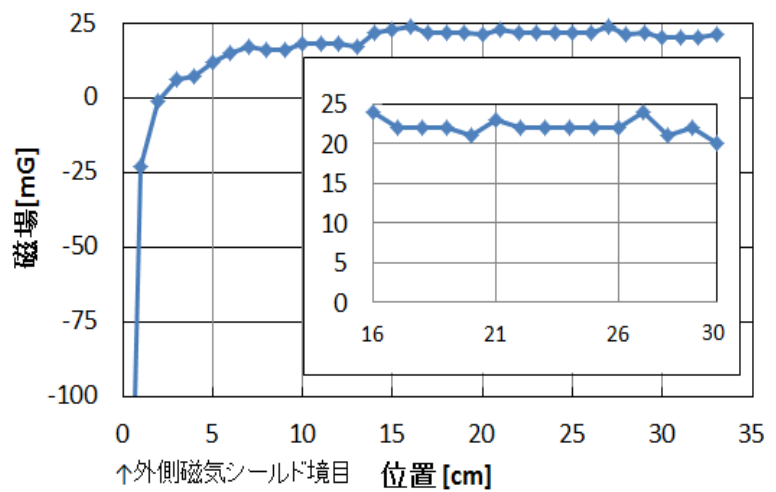


図 5. 磁気シールド特性

である。穴から磁場が侵入してしまっているが約 5 cm で約 22 mG で一定になっている。揺らぎは約 3 mG くらいである。実際、この磁場が測定にどのくらい影響を与えるかを見積もるのは難しい。ちなみに Rb のゼーマンシフトは 0.7 MHz/G であるため 3 mG の揺らぎの場合、共鳴周波数は約 2 kHz シフトする。現在でも磁場はかなり抑えられているが、目標の感度・精度を得るためには絶対値を 10 mG 程に抑える必要があるかもしれない。

上記の装置などはまだ目標感度・精度を得るにはまだ改良が必要だが、達成できる見込みがあることが分かった。

## 実験

原子干渉計において感度などの限界を決めるのはショットノイズである。これは原子数に依存するノイズである。原子数を  $N$  とするとショットノイズは  $\Delta\Phi_{\text{shot}} = 1/\sqrt{N}$  で表される。

原子干渉計では測定の前に MOT(磁気光学トラップ)を用いて、原子を冷却しつつ、集める。現在、ローディング時間を 2 sec として原子を約  $2 \times 10^8$  個集めることができている (図 6)。しかし、このままではまだ原子温度が約 100  $\mu\text{K}$  と高いため、偏光勾配冷却も行う。その後の温度を TOF によって測定したものが図 7 である。理論曲線と重ねてみると約 6  $\mu\text{K}$  まで冷却されていることが分かった。しかし、重力方向にはまだ温度が高いため、その方向の数十 nK の原子のみを切り出す。その際の原子数の減少を見積もったものが図 8 である。これは 5  $\mu\text{K}$  から 10 nK の原子を切り出したものであるが、その際原子数は元の 5% となっている。すなわち、現在の原子数から速度選択をして原子を切り出すと  $10^6$  オーダーの個数になる。ショットノイズは  $\Delta\Phi_{\text{shot}} = 1 \text{ mrad}$  となる。この個数での感度限界は  $\Delta g/g = 10^{-10}$  となる。したがって、原子数に関しては目標の条件を満たしている。

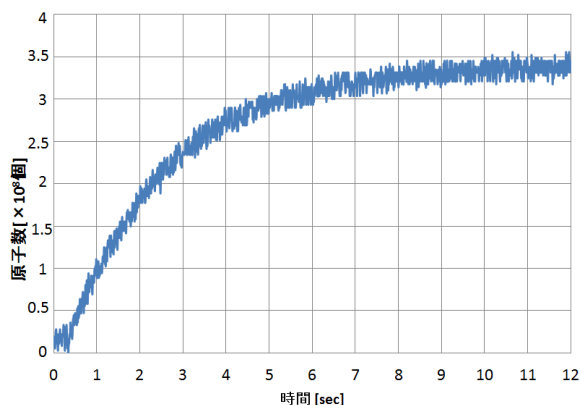


図 6. 原子のローディング

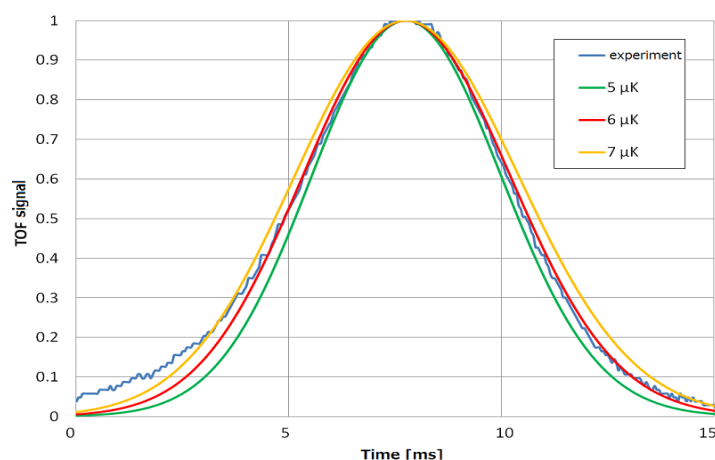


図 7. TOF による温度評価

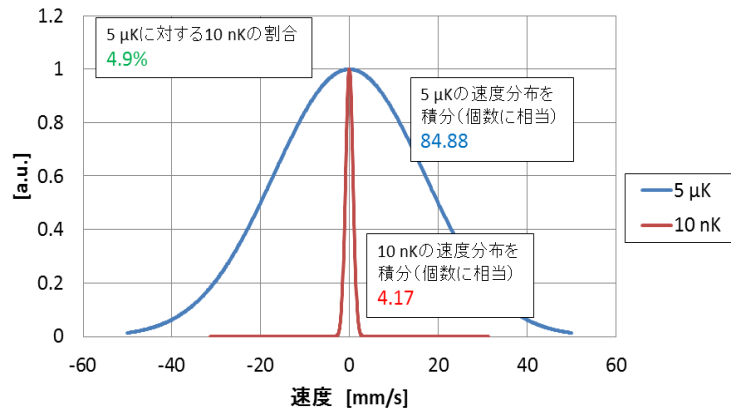


図 8. 速度選択前後の原子数の見積もり

### まとめ・今後の展望

本研究の現在の目標感度・精度は干渉フリンジの1点を1回の測定で決定した際に $\Delta g/g \sim 10^{-8}$ を得ることである。そのために、最大 100 ms の相互作用時間を得られる真空チャンバーを用い、感度・精度向上を妨げる要因を減らすように取り組んだ。光位相同期レーザーの位相揺らぎは許容範囲内であった。振動による位相揺らぎは低周波防振台によってある程度抑えることができた。しかし、感度などを見積もってみると目標よりも1桁悪いためアクティブな防振にも取り組んでいる。磁気シールドに関してはほぼ外部磁場を遮断できていることが分かった。実際に測定をしてみても残留磁場による影響が残っているかを確かめる必要がある。これらの装置では改良を行えば目標に到達できそうなことが分かった。

原子数に関しては速度選択を行い数が減ったとしても目標の感度・精度を得るには十分な数であることが分かった。

今後の予定としては誘導ラマン用パルスを原子にアクセスするところまではできているため、誘導ラマン遷移の確認を行い、干渉信号の測定に入りたい。また、防振台や磁気シールド等の改良や実験系への組みこみも並行して行う。

### 参考文献

- [1] A. Peters, K. Y. Chung and S. Chu, *Metrologia*, 2001, 38, 25-61
- [2] 修士論文 小田悠介 中川研究室” 原子干渉計を用いた高精度な重力加速度計の開発” 電気通信大学大学院(2006)
- [3] 卒業論文 渡邊直登 中川研究室 ” 原子干渉計用高精度光位相同期レーザーの開発” 電気通信大学 (2011)