

# 原子干渉計を用いた重力加速度計のための 可搬型レーザーシステムの開発

中川研究室 石川 悠

## 1 序論

物質が波動性と粒子性を持つことは物質が光と同じ形の干渉現象を起こす可能性があることを示している。中性原子を用いた原子干渉計においては、Kasavich と Chu により実現された誘導ラマン遷移による反跳を用いた方法 [1] が多くのグループで採用されている。中性原子は電磁場を用いて内部の量子状態を操作できるという精密な制御性と電荷を持たないため、電場や磁場といった環境からの望ましくない相互作用が小さいといった特徴があり、原子干渉計を用いた精密測定に最適である [2]。現在、原子干渉計は測地学、地球物理学、資源探査、ナビゲーションといった分野でフィールドで用いられる実用的な超精密量子慣性センサーとして開発が期待されている。

重力加速度の精密測定は地球物理学や測地学といった分野への応用が期待されており、1999 年には原子干渉計を用いて  $\Delta g/g = 3 \times 10^{-9}$  の確度で実験室内で重力加速度の測定がされている [3]。中川研究室ではフィールドで  $\Delta g/g = 3 \times 10^{-9}$  の確度でフィールドで重力加速度を長期間連続的に測定できる可搬型の装置の開発を行っている。

原子干渉計を可搬にするためには真空系、光学系、エレクトロニクスをすべてラック等に組み込み、持ち運べる形にする必要がある。本研究では 2 台の波長 1560 nm 外部共振器型半導体レーザー (ECLD) の第二高調波を用いてファイバー光学系を組むことにより、コンパクトかつ振動に強いレーザーシステムをラック上に作製した。また、このレーザーシステムを用いて原子の干渉実験を行い、重力加速度を測定した。

## 2 理論

### 2.1 誘導ラマン遷移

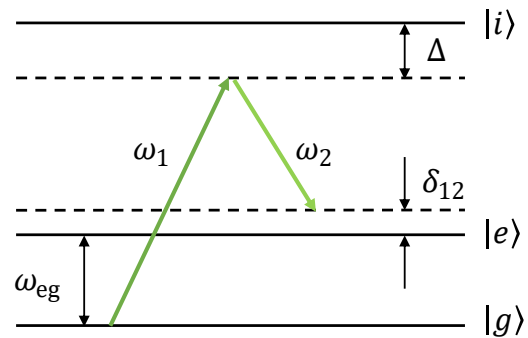
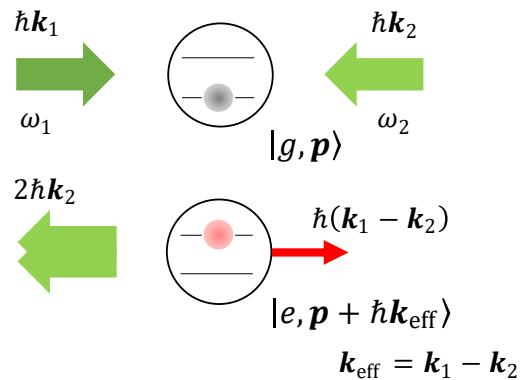


図 1: 誘導ラマン遷移原理図

原子干渉計では誘導ラマン遷移によって原子の内部状態と外部状態が同時に変化することを利用する。我々は寿命の長い  $^{87}\text{Rb}$  原子の超微細構造の基底状態間での誘導ラマン遷移を用いて原子干渉計を構成している。

図 1 のような 3 準位系の原子を考える。原子に 2 つの基底状態間の差周波数だけ周波数の異なる 2 つのレーザー光を対向して入射する場合を考える。

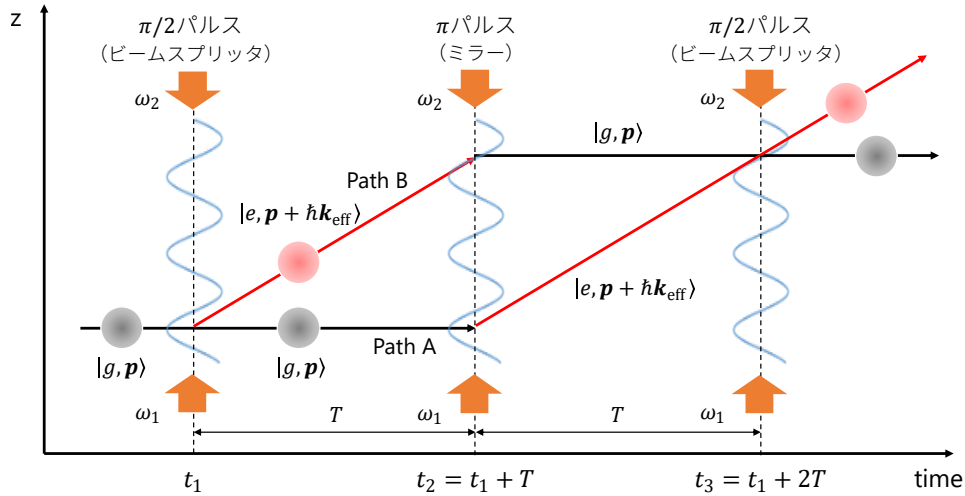


図 2: マッハツェンダー型原子干渉計

このとき、実効的な波数は  $\mathbf{k}_{\text{eff}} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$  となる。原子は基底状態間をラビ振動し、遷移する際には  $\hbar\mathbf{k}_{\text{eff}}$  だけ運動量に変化する。そのため、誘導ラマン遷移は原子の内部状態と外部状態を同時に変化させる遷移と捉えられる。

## 2.2 原子干渉計の原理

原子干渉計では、図 2 のように、基底状態に状態選択された原子に  $\pi/2 - \pi - \pi/2$  ラマンパルスを相互作用時間  $T$  だけ間隔をあけて照射する。最初の  $\pi/2$  パルスは光学干渉計でのミラーに相当し、原子を基底状態と励起状態に 1:1 に分離する。このとき、原子は内部状態だけでなく運動量状態も分離するため、時間経過とともにそれぞれの状態の原子の波束は空間的に分離する。次に、相互作用時間  $T$  経過後に  $\pi$  パルスを当て、それぞれの原子の状態を反転させる。その後、さらに相互作用時間  $T$  だけ系を時間発展させることで分離した原子の波束が空間的に重なる。最後に  $\pi/2$  パルスを当てることで、原子を干渉させている。

原子干渉計の終状態において、励起状態に原子が存在する確率は

$$P_{|e, \mathbf{p} + \hbar\mathbf{k}_{\text{eff}}\rangle} = \frac{1}{2} (1 - \cos \Delta\Phi) \quad (1)$$

で表せる。ここで、 $\Delta\Phi$  は原子干渉計の Path A と

Path B の 2 つの経路間のトータルな位相差であり、重力による位相シフト  $\Delta\phi_g = k_{\text{eff}}gT^2$ 、実験中にラマンレーザーの差周波数を掃引することによる位相シフト  $\Delta\phi_{\text{sweep}} = 2\pi\beta T^2$  を用いて

$$\Delta\Phi = \Delta\phi_g - \Delta\phi_{\text{sweep}} \quad (2)$$

と表せる。これより、干渉フリンジにおいて干渉計のトータルな位相差  $\Delta\Phi = 0$  となる掃引レート  $\beta_g$  を実験的に決定することで

$$g = \frac{2\pi\beta_g}{k_{\text{eff}}} \quad (3)$$

より、 $\beta_g$  の値から重力加速度  $g$  を決定できる。

## 3 レーザーシステム

原子干渉計に用いる光源には図 3(b) に示すような、実験中に必要となる 5 種類の周波数の光を必要なタイミングで精度よく出力できることが要求される。重力加速度を  $\Delta g/g = 10^{-9}$  の確度で測定するためには  $10^{-9}$  以上の周波数安定度が必要となる。また、可搬にするためにある程度コンパクトかつ振動に強い必要がある。そこで、2 台の波長 1560 nm 外部共振器型半導体レーザーの第二高調波を用いて、ファイバー光学系を組むことで可搬型レーザーシステムを作製した。

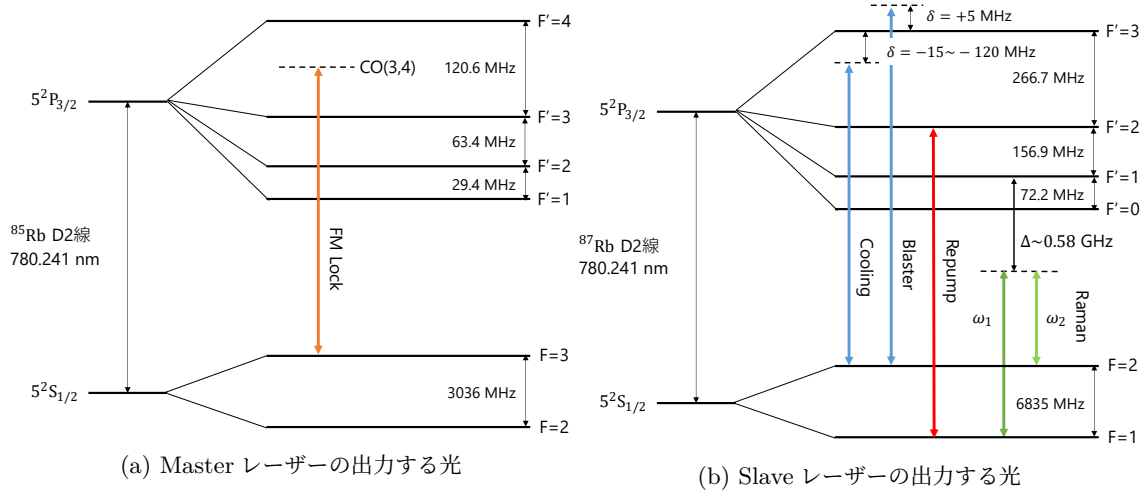


図 3: レーザーシステムの出力する光の周波数

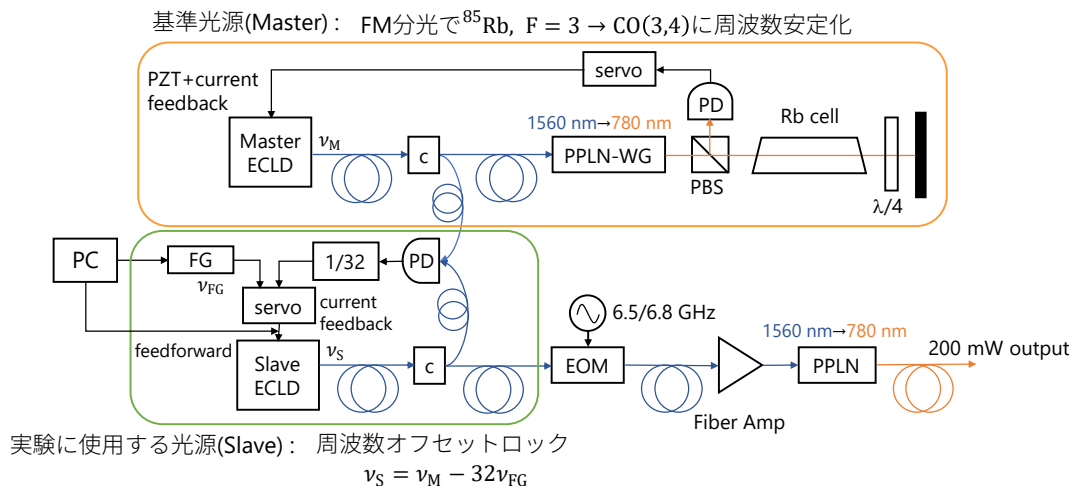


図 4: レーザーシステムの構成

作製したレーザーシステムは図 4 のような構成になっている。Master レーザーは FM 分光によって  $^{85}\text{Rb}$  の  $5^2\text{S}_{1/2}, F = 3 \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}, \text{CO}(3,4)$  に周波数安定化することで、周波数基準光源となっている。Slave レーザーは Master レーザーとのビート信号を  $1/32$  に分周し、その周波数がファンクションジェネレータの周波数と一致するように電流源にフィードバックすることで周波数安定化している。これにより、PC からファンクションジェネレータの周波数を操作することによって Slave レーザーの周波数を任意の値に高速に設定することができる。

Slave レーザーから出力した光は EOM を用いて変調することで、実験中に複数の周波数の光が同時に必要な場合に対応できるようになっている。変調した光は EDFA を用いて増幅され、780 nm に波長変換されて干渉計に送られる。現在の実験系では 200 mW まで増幅し、干渉計に送っている。

Master レーザーの周波数安定度を図 5 に示す。積分時間 1s で  $10^{-9}$  以上の周波数安定度があり、重力加速度を  $10^{-9}$  の確度で測定するのに必要な周波数安定度があることがわかる。

原子の冷却からラマン遷移までの間に Slave レー

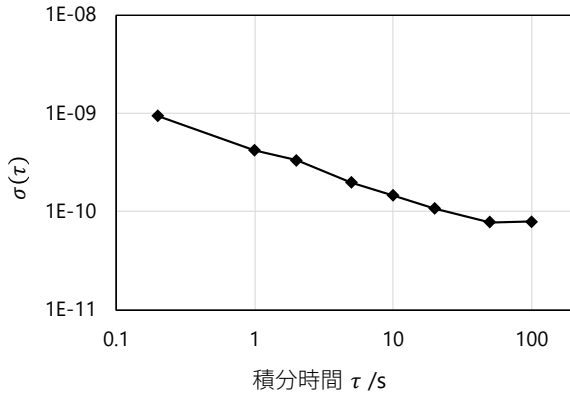


図 5: Master レーザーの周波数安定度

ザーの周波数を 1 GHz 程度変化させる必要がある。原子の最大落下時間は装置の大きさで決まってしまうため、大きな相互作用時間をとるためにはなるべく高速にレーザーの周波数を変化させなければならない。そこで、原子の冷却からラマン遷移の周波数変化時間を 5 ms 以下に抑えることを目標としてレーザーシステムを作製した。Slave レーザーの周波数を 1 GHz 変化させた際の誤差信号の応答を図 6 に示す。これより、Slave レーザーは 5 ms 以下の時間で 1 GHz 周波数を変化させることができていることがわかる。

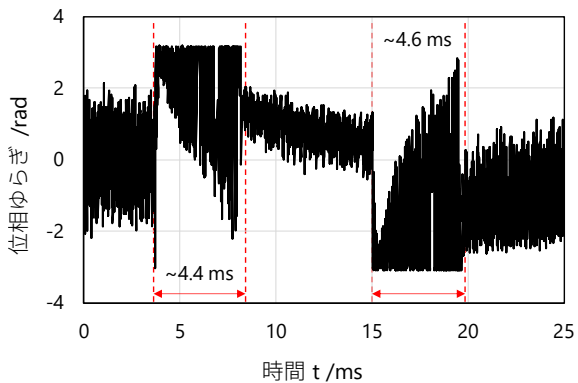


図 6: 周波数を変化させた際の誤差信号の応答

作製したレーザーシステムの外観を図 7 に示す。ラック 3 台の中にレーザー、エレクトロニクス、測定装置、電源が収まっており、光ファイバーやケーブルを切り離せば移動できるようになっている。

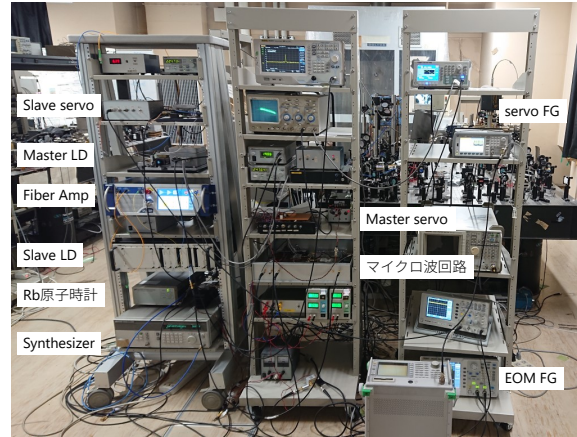
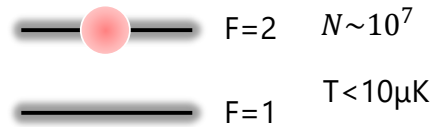


図 7: レーザーシステムの外観

## 4 実験

### 4.1 原子の状態選択

a.



b.

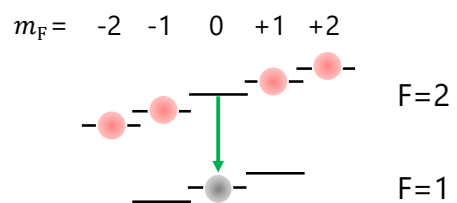


図 8: 原子の状態選択の過程

a. Optical Pumping 直後 b. マイクロ波遷移

原子干渉計では状態選択された冷却原子を用いる。状態選択の過程を図 8 に示す。実験的には磁気光学トラップ (MOT) で原子を集めつつ冷却し、偏光勾配冷却 (PGC) でさらに原子を冷却する。本実験系ではこの段階で原子数  $N = 10^7$ 、温度  $T < 10 \mu\text{K}$  程度であり、 $F = 2$  と  $F = 1$  に原子が分布している。その後、 $F = 1$  にいる原子を Optical Pumping で  $F = 2$  にくみ上げ、0.2 G 程度のバイアス磁場をかけることで磁気副準位の縮退

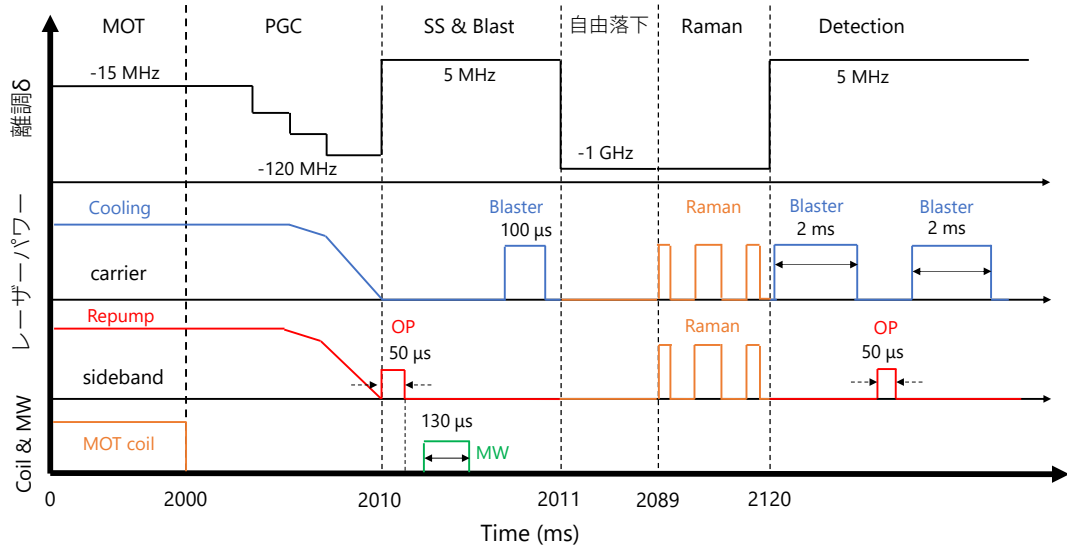


図 9: 原子干渉計の実験のタイムシーケンス

をとく。そこに  $F = 2, m_F = 0 \leftrightarrow F = 1, m_F = 0$  にだけ共鳴する周波数のマイクロ波を照射することで、 $F = 1, m_F = 0$  に原子を遷移させることができる。最後に  $F = 2$  に残った原子を Blaster 光を用いてまとめて吹き飛ばすことで  $F = 1, m_F = 0$  に状態選択された冷却原子をつくることができる。

#### 4.2 誘導ラマン遷移による原子の温度測定

原子の温度  $T$  は原子の干渉実験に用いる誘導ラマン遷移の半値半幅  $\sigma_D$  を用いて

$$T = \frac{m}{k_B k_{\text{eff}}^2} (2\pi \times \sigma_D)^2 \quad (4)$$

と表すことができる。ここで、 $k_B$  はボルツマン定数、 $k_{\text{eff}}$  はラマン光の実効的な波数であり、現在の実験条件では  $k_{\text{eff}} = 1.61057 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  である。

原子干渉計の実験のタイムシーケンスを図 9 に示す。2 s かけて MOT で原子を集め、10 ms かけて PGC で原子をさらに冷却している。その後、1 ms 程度で原子の状態選択を行い、自由落下させている。ある程度落下した段階でラマンパルスを照射し、最後に蛍光観測によって原子の終状態を観測している。実験全体では 2.2 s 程度かかっている。なお、誘導ラマン遷移の測定では、図 9 の Raman の部分のラマンパルスが  $\pi$  パルス 1 回になっている。

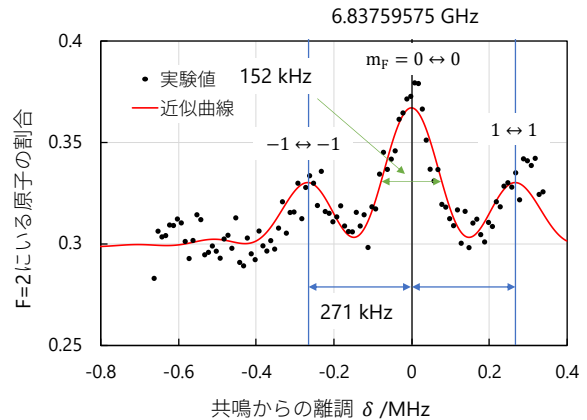


図 10: 誘導ラマン遷移の周波数依存性

観測した誘導ラマン遷移の周波数依存性を図 10 に示す。これより、バイアス磁場をかけたことによって磁気副準位の縮退がとけていることがわかる。また、誘導ラマン遷移の半値半幅  $\sigma_D = 76 \text{ kHz}$  と観測できた。式 (4) から原子の温度を計算すると、 $T = 9.2 \text{ } \mu\text{K}$  と算出された。

#### 4.3 干渉フリッジの観測

図 9 のタイムシーケンスで実験を行い、原子に  $\pi/2 - \pi - \pi/2$  パルスを照射して干渉させることで図 11 に示す干渉フリッジを観測した。本研究では  $T = 13 \text{ ms}$  まで干渉フリッジを観測することができ

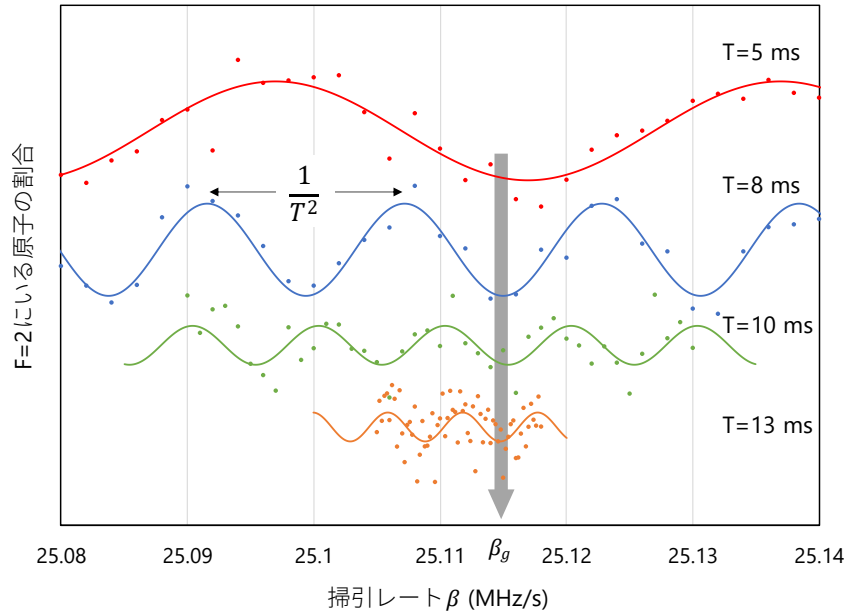


図 11: 観測された干渉フリンジ

た。図 11 より、相互作用時間  $T$  が増加するとともにフリンジの間隔が狭くなり、SN 比とコントラストが低下していることがわかる。重力加速度の測定感度は  $T^2$  に比例するが、本研究では相互作用時間の増加に伴う SN 比の低下により、 $T = 8$  ms 以上の測定感度はほとんど変化していない。

干渉フリンジから、相互作用時間  $T$  を変化させても位相が 0 のまま変化しない掃引レート  $\beta_g$  が存在することがわかる。 $T = 8$  ms の干渉フリンジから、フリンジの中心を  $\beta_g = 25.11500 \pm 0.00038$  MHz/s と決定した。これより、式 (3) を用いて重力加速度を  $g = 9.7979 \pm 0.0001$  m/s<sup>2</sup> と 5 桁の感度で算出した。

## 5 まとめ

本研究では可搬型原子干渉計に用いるための可搬型レーザーシステムを作製した。また、このレーザーシステムを用いて原子の干渉実験を行い、干渉フリンジを観測することで重力加速度を 5 桁の感度で測定した。これにより、本研究の実験系で重力加速度が測定できることを確かめた。

本研究での測定感度は以前の研究 [4] の測定より

も 1 桁悪い。この原因としては外部磁場の補正精度の差や、以前の研究よりも原子の温度が高いことなどが考えられる。また、今後さらに測定感度を向上するためにはセンサー部分全体の磁気シールドやレーザーのパワーの安定化、防振システムを用いて地面振動の影響を小さくするといったことを行っていく必要がある。

## 参考文献

- [1] M. Kasevich and S. Chu, Applied Physics B **54**, 321 (1992).
- [2] K. Bongs et al., Nature Reviews Physics **1**, 731 (2019).
- [3] A. Peters et al., Nature **400**, 849 (1999).
- [4] 小田悠介, “原子干渉計を用いた高精度な重力加速度計の開発”, 修士論文 (電気通信大学, 2005).