

# ハイブリット方式による原子重力計の振動補正

中川賢一研究室 2233057 高村海渡

## 1. 研究背景・目的

近年、量子技術は量子コンピューターや量子暗号技術、そしてセンシング分野での応用が期待されている。中でも、センシング技術においては、量子力学的特性を活用することで従来の測定機器を上回る感度を達成することが可能とされている。特に注目されているのが、冷却原子を用いた原子干渉計型重力加速度計である。この技術は、地球物理学や土木工学、資源探査、ナビゲーションなど幅広い分野での利用が期待されている。

原子干渉計型重力加速度計は、地震や火山活動など、通常では観測が困難な現象の検知に有効である。

地震の予知や火山活動の観測において、微小な重力変化を捉えることができれば、これらの自然現象の予測に大きく貢献すると考えられる。このような観測を実現するためには、測定感度として $10^{-8}g$ 以上が求められ、さらに連続的な測定能力が不可欠である。[1]

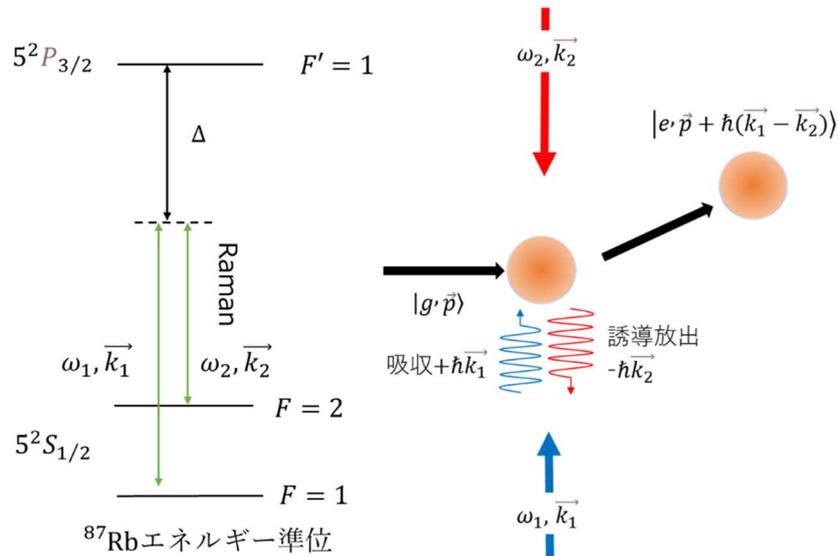
ただし、現在使用されているコーナーキューブ型の重力計には、可動部による長期測定の困難であるという問題が存在している。

本研究の目的は、可搬型原子干渉計を実験室の外に持ち出し、様々な場所で重力測定を行うことである。まず、実験室内での測定において、感度が十分かつ重力変化を捉えられるかを検証する。具体的には、時間に伴う潮汐の変動が計測可能かどうかを観測することを目標としている。

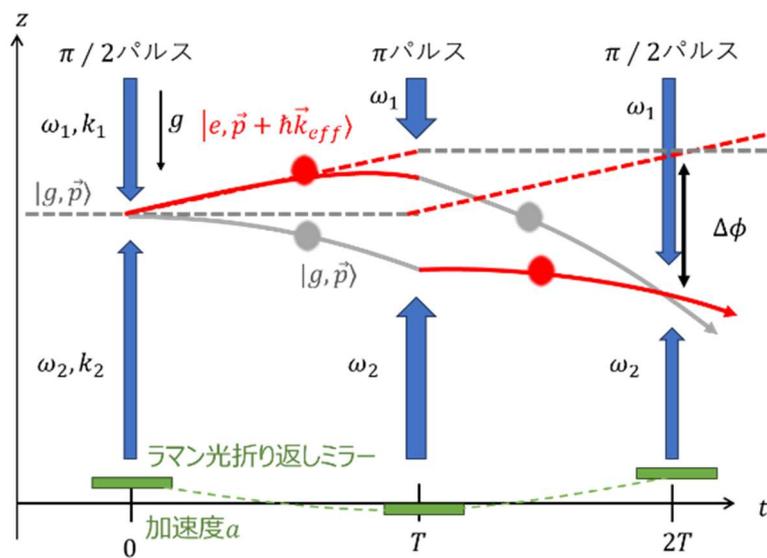
実験の測定精度は、振動によって大きな影響を受けるため、防振台の使用が不可欠である。しかしながら、防振台では低周波の残留振動を完全には抑制できないという課題がある。さらに、防振台の可搬は可能であるものの、その重量とサイズが大きいため、できれば可搬しない方が望ましいと考えられる。

そこで、本研究では、よりコンパクトで軽量の加速度計を用いた振動補正の有効性を実証することで、新たな振動補正方法の可能性を探求する。これにより、実験室外での高精度重力測定の実現を目指す。

## 2. 原理



2.1 誘導ラマン遷移



2.2 原子干渉計の原理

誘導ラマン遷移とは、三準位原子系において基底状態間の量子状態を制御する手法である。原子には基底状態の他に、高いエネルギー準位としての励起状態が存在する。通常、基底状態から励起状態へ直接遷移させるには、その遷移に対応する周波数のレーザー光を照射する。しかし、誘導ラマン遷移では2つのレーザー光を用いて、仮想的な中間準位を介した遷移を引き起こす。

具体的には、図 2.1 のように2つのレーザー光の周波数差を、2つの基底状態のエネルギー差に一致させる。すると、一方のレーザーにより基底状態から仮想準位へ励起され、他方のレーザーにより仮想準位から別の基底状態へ遷移するという2段階の過程が生じる。

この際、レーザーの周波数を適切に離調させることで、実際の励起状態への遷移は避けられる。

この過程においてラビ振動が生じ、2つの基底状態間の量子状態を連続的に制御できるようになる。レーザー光の強度や照射時間を調節することで、任意の基底状態の重ね合わせ状態を準備できる。

この誘導ラマン遷移を応用したのが原子干渉計である。原子干渉計では、まず冷却された原子を完全に基底状態にそろえた後、ラマン遷移による  $\pi/2$  パルスを照射する。これにより原子波が2つの経路に分割され、空間的に分離される。次に、 $\pi$  パルスを照射して原子波の運動量を反転させ、最後にもう一度  $\pi/2$  パルスを照射して原子波を再結合させる。この過程で2つの経路を進んだ原子波は干渉を起こし、干渉縞の位相から様々な物理量を高精度で測定できる特に、原子の落下による加速を受けた2つの経路の位相差から、高精度な重力加速度の測定が可能になる。

この時に得られる干渉信号は、以下の式で表されることから、この結果から重力加速度を求めることができる。

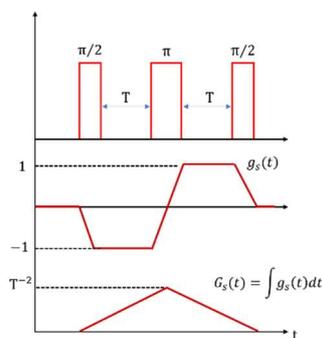
$$P_{(F=2)} = \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\phi) = \frac{1}{2}\{1 - \cos k_{\text{eff}}gT^2\}$$

しかしながら、折り返しミラーの振動がレーザー光にドップラーシフトを与えると、上式は以下のようなになる。

$$P_{(F=2)} = \frac{1}{2}\{1 - \cos (k_{\text{eff}}(g + \Delta\phi_{\text{vib}})T^2)\}$$

このとき、 $\Delta\phi_{\text{vib}}$ が干渉信号に影響を及ぼすため、重力加速度を求めることが困難になる。そのため、機械式加速度計をミラー近傍に設置することで、振動による影響 $\Delta\phi_{\text{vib}}$ を直接的に測定する。

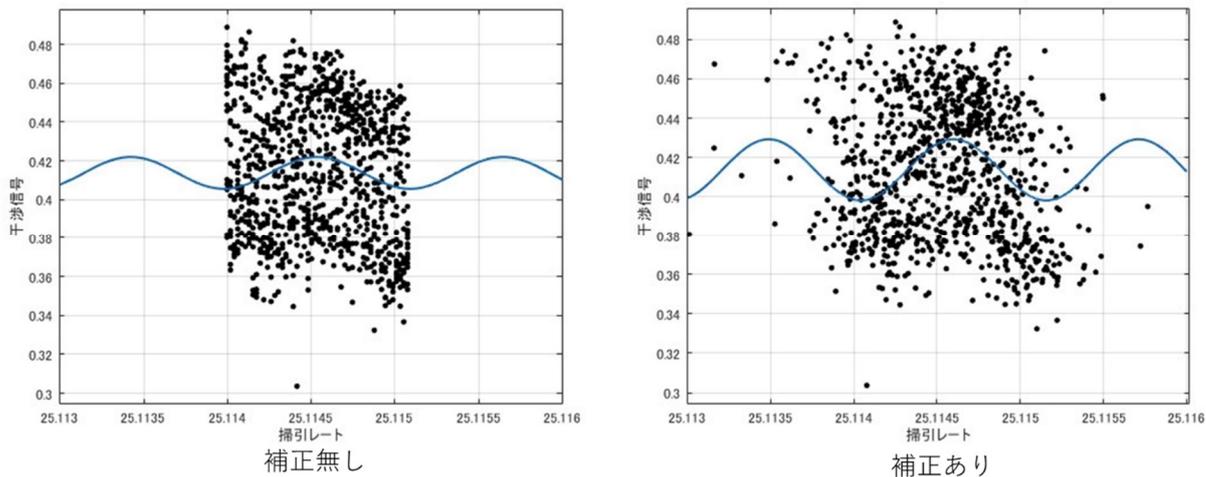
具体的には、機械式加速度計で検出した振動データから、ラマン光のドップラーシフトを算出する。このドップラーシフトは、機械式加速度計の出力と応答関数 $g(t)$ の積分から求められる。[2]



2.3 重みづけ関数

### 3. 結果

#### 3.1 ハイブリット方式による干渉信号の補正



#### 3.1 非防振時の振動補正による干渉信号

加速度計を用いた非防振状態での位相補正を検証した結果を示したものが 図 3.1 である。

この実験により、位相補正の有無による比較を行ったところ、コントラストが約 2 倍向上した。また、位相補正前と後で重力加速度の測定感度は $1.2 \times 10^{-6}$ から $6.6 \times 10^{-7}$ と約二倍向上した。

#### 3.2 実験室外での重力加速度の測定

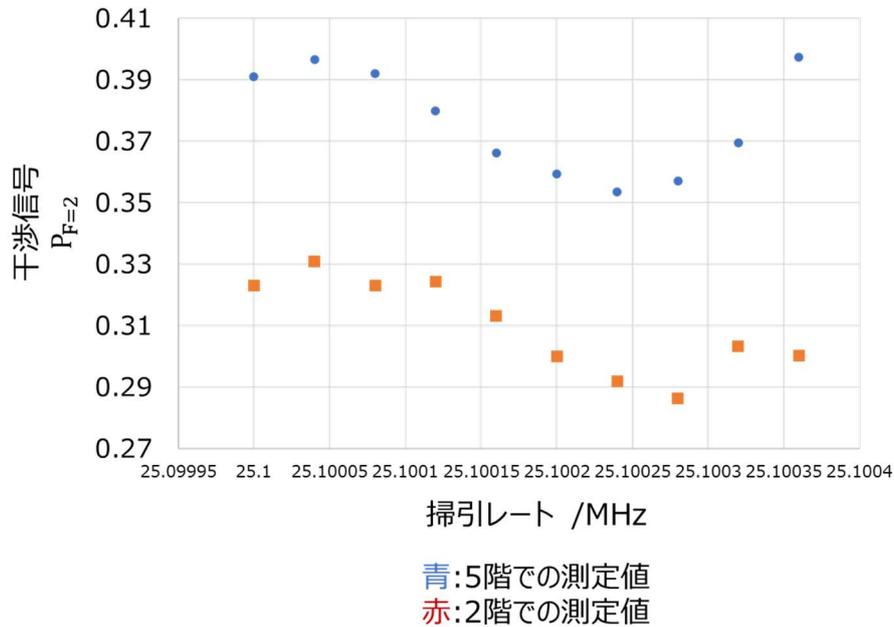


5階



2階

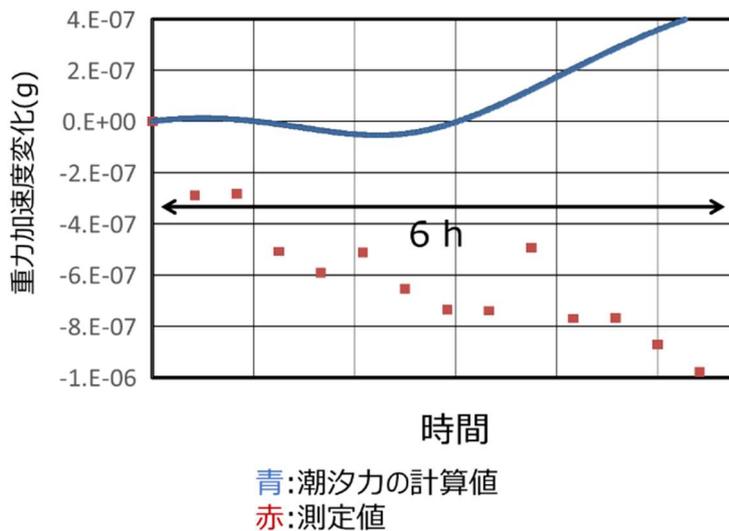
今回、普段実験を行っているレーザー棟の 5 階から、レーザー棟の 2 階に装置を移動させ干渉信号の変化を観測した。その結果が、以下の図である。



### 3.2 実験場所の変化による干渉信号の変化

また、得られた干渉信号から重力加速度の変化を計算したところ、5階での重力に対して、2階の重力は $1.6 \times 10^{-6}g$ 低いことがわかった。この時、2階と5階では高度として10mの差があると仮定すると、二地点の重力加速度の差は $3.2 \times 10^{-6}g$ であることから、測定高度の変化による重力加速度の変化を検出することができた。

### 3.3 長時間測定による重力加速度の変化



### 3.3 重力加速度の時間変化の測定

潮汐の影響を見るために、13~19時の間連続測定を行い、重力加速度の変化を観測した。こ

の時、相互作用時間 $T = 50\text{ms}$ で、1回あたり1500点の測定を行った。その後、得られた干渉信号から重力加速度の変化を計算した。

測定日時の潮汐の影響による重力加速度の変化の理論値と、原子干渉計から得られた重力加速度の変化を比較したものが図3.3である。これらを比較すると、潮汐による重力加速度の変動は $1.5 \times 10^{-7}g$ ほどの変動があるが、干渉計の測定値は $8 \times 10^{-7}g$ の変動であり、大きく異なる。そのため、潮汐の影響は見えていないと考えられる。この原因としては、温度変化による実験パラメータの変動が予想される。

#### 4. まとめと今後の展望

機械式加速度計により、干渉信号のコントラストの向上を達成することができた。一方で、先行研究以上の感度の向上を達成することが出来なかった。原因としては、原子の感じる振動の応答と、機械式加速度計が感じる振動が異なる可能性が考えられる。そのため、機械式加速度計から得られるデータに対して適切なフィルターを導入することで、より正確に干渉信号の補正が可能になると考えられる。

実験室外での測定に関しては、測定地点の高度の変化による重力加速度の変化を観測することができることを確認できた。一方で、時間経過による測定値のドリフトが存在することも判明した。今後は、ドリフトしている実験パラメータを特定することが求められる。

#### 参考文献

[1] Geospatial Information Authority of Japan. (2024). 地上で重力を測る [Measuring Gravity on the Ground].

参照元: [https://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/grageo\\_gravitysurvey.html](https://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/grageo_gravitysurvey.html). 参照日: 2024年1月29日.

[2] Che, Hao; Li, An; Zhou, Zhu; Gong, Wenbin; Ma, Jinxiu; Qin, Fangjun. "An Approach of Vibration Compensation for Atomic Gravimeter under Complex Vibration Environment." *Sensors* 23, no. 7 (2023): 3535. DOI: 10.3390/s23073535. ISSN: 1424-8220. PubMedID: 37050595. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/7/3535>]