

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2016

課題番号：25610131

研究課題名(和文)光輻射圧浮上型重力計の開発

研究課題名(英文) Development of a gravity meter using an optical spring effect inside Fabry-Perot cavity

研究代表者

三代木 伸二 (Miyoki, Shinji)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：20302680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超伝導重力計の感度(ナノガル)を超える感度を持つ、「光輻射圧浮上型重力計」の要素技術開発を行った。光輻射圧浮上型では、重力方向に配置されたFabry-Perot共振器の片方の「軽い鏡」を共振器内部で蓄積された光の輻射圧で浮上させるが、その時にFabry-Perot共振器の「Optical Spring効果」を利用する。Optical Springを発生するためには、Fabry-Perot共振器で半共振状態を実現する必要があるが、この時に発生する振動加速効果という問題に直面した。しかし、制御によりその振動を抑え、光輻射圧の効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：We developed a novel technique for a gravity meter using optical radiation pressure to obtain better sensitivity than that of a superconductive gravity meter. In this scheme, an optical Fabry-Perot(FP) cavity is set vertically and is set semi-resonant state to obtain an optical spring effect. Additionally, one of mirrors for the FP cavity is planed to be levitated by radiation pressure of a laser beam inside the Fabry-Perot cavity by setting the weight of the mirror light. Although we encountered an unstable phenomena due to the optical spring state, we succeeded to keep the semi-resonant state by a moderate feedback control system and verified the effect of the radiation pressure inside the FP cavity.

研究分野：精密長さ計測

キーワード：Fabry-Perot共振器 Optical Spring 精密長さ計測 半共振 光輻射圧

1. 研究開始当初の背景

地球物理学、測地学、火山学あるいは資源探査などの分野では、地表近くの重力のナノガル程度の変化から、地球の振動や、マグマ活動、地下に埋没する鉱物・水脈の探査を行うことが常套手段となっている。そこで利用される観測道具は、様々なスタイルの(可搬型)(絶対)重力計、超伝導重力計、重力勾配計であるが、現状、重力に対する感度が、「絶対」でマイクロガル、「相対」でナノガルが上限であることが知られている。さらに高感度な重力計測装置が存在すれば、より微小な変位や地殻内部の運動を捕えることが可能になることは明白で当分野における学術的・実用的な情報・効果は計り知れず、常に「より高感度な重力観測装置」が求められている。しかし、当分野では、長く既存の装置とその改造がなされてはいるが、感度も頭打ちの状態が続いている。

2. 研究の目的

本研究は、測地学・地球物理学で重力の変化を捕える常套的観測装置である超伝導重力計の感度(ナノガル)を超える感度を持つ、「光輻射圧浮上型重力計」の要素技術の要素技術の立証実験を行う。

従来の重力計は、ラコステ形式のように、弱いばねとの釣り合いに必要な力による計測をせいぜい5分程度間隔でダイヤルを回しながら計測したり、落下・投げ上げ物体の重力加速軌跡を、マイケルソン型干渉計の一回折り返しによる光学測定で、繰り返し機構にもよるが、数秒程度間隔で計測し、そのデータへのフィッティング処理から値を計算したり、超伝導のマイスナー効果による浮上物体の位置精密測定をSQIDなどを利用して連続的に行うなどに分かれているが、本研究は、

- (1) 鉛直配置されたFP共振器の片方の微小鏡をFP共振器内の蓄積光の輻射圧により浮上させ、
- (2) その時に「Optical Spring(光ばね)」というFP半共振状態における機械的ばね系の創出し、バネ機械系の安定化をはかり、
- (3) それを「FP共振器による多重折り返しによる信号増幅により、
- (4) kHz帯域まで連続測定する、

という点で、超伝導重力計と、「浮上物体」の位置計測という点では変わらないが、その浮上のさせ方と、FP共振器の利用により圧倒的な位置計測精度を達成する点で斬新である一方、Optical Springという特殊なバネ系を保ちつつ微小鏡を輻射圧で浮上させるという点で、まだ誰も行ったこともないことに挑戦するものである。

本研究は、光科学の最先端技術を導入している点で独創的であるが、その中でも、特に異色なのが、「Optical Spring(光ばね)」と

いう疑似機械系である。Fabry-Perot共振器は、光格子時計や超精密光周波数標準のような揺らぎが 10^{-16} レベルの超精密時刻標準の獲得や、一般相対性理論の予測する重力波による空間の 10^{-22} [m rms]という極限的に小さな伸縮を計測する分野で用いられる究極の精密測定装置であるが、通常、FP共振器に入射したレーザー光が共振器内で最大に増幅される条件で使用される。ところが、わざとこのFP共振器の共振からある一方向にずれた「半共振の状態」にし、かつこの状態で重力と共振器内部の輻射圧が釣り合うようにしておけば、鏡が上昇すれば、共振が小さくなり輻射圧が弱まり、鏡の復元力になり、逆に鏡が下降すれば、輻射圧が共振に近づくことで高まり、結果輻射圧で押し戻されるという、まさに「光のバネ系」が成立する。この状態をうまく利用することで、鏡の浮上を自己復元力で安定化させることができ、かつ、FP共振器への入射レーザーパワーの調整で位置調整でき、そのパワー調整フィードバックから、外力としての重力の変化を精度よくとらえることができる。しかしその「輻射圧浮上」自身が今まで行われてない技術であるため、大きな挑戦項目となっている。

3. 研究の方法

光輻射圧浮上型重力計の開発の内、特に挑戦項目となっている「光輻射圧浮上」技術の開発に集中した研究を行う。光輻射圧浮上実験装置として、地面に固定された真空タンクの中に、共振軸を鉛直方向に配置したFabry-Perot共振器を構成し、そのFP共振器を構成する二枚の鏡の内、1枚は真空タンク下方に固定するが、一枚は、重量をミリグラムスケールにし、真空タンク上方に配置し、そのFP共振器に対し強力な安定化レーザーを下方から入射し、共振、または半共振状態で、そのミリグラム鏡の浮上制御を行う。初年度は、FP共振器を格納する真空タンクや入射するレーザーの光学系の製作を行い、次年度に、共振状態で「鏡に制御外力(静電力)を付加する」形での浮上制御に挑戦し、さらに半共振状態で、「外力を極力弱めた、レーザーパワーのパワー制御」に依存した浮上制御に挑戦する。

4. 研究成果

1年目は、微小鏡を垂直方向に配置したFabry-Cavityを構成する一つの鏡とした時の、共振付近から、微小に鏡の姿勢が変位することによる、共振器内部パワーと光軸変化に伴う輻射圧力学の共振器構成鏡パラメータ(鏡の曲率)依存性を調査した。結果、Fabry-Perot Cavityで常套的に採用される、平面一凹面や、凹面一凹面共振器は姿勢の傾きをさらに拡大する不安定性がある一方、浮上側の鏡の曲率が凸面の時は逆に姿勢の傾きを修整する輻射圧がかかるという知見を得た。一方、波長1064nm単一周波数単一横

モード 15W レーザーに位相変調と、外部 EOM による高周波周波数の周波数制御を行うための光学系を構築した。

2 年目は、前年度の研究でえられた知見をもとに、高反射率微小鏡の設計を行った。微小鏡の曲率表面形状及び粗さが、予定の 99.99% 反射率を満たせるぎりぎりの研磨技術上の限界から、直径 8mm、厚み 2mm とした。この鏡を片方の鏡とする Fabry-Perot 共振器を構築するための真空系を構築した。レーザー光を導入する AR 窓の取り付け、信号導入端子、および、ターボポンプ系の装着を行い、必要とされる真空度 $\cdot 10^{-6}$ mbar の真空度が得られ、リークもないことが確認された。さらに、この微小鏡を片方の鏡とする縦型 FP 共振器の構造設計を行った。基本素材は、Al5052 とし、入射側の鏡、微小鏡とも、3 個のピコモーター（粗調整用）で駆動可能な直進ステージとそれに固定される PZT（微調整用）を組み合わせた位置調整機構の先端に乗せた鏡支持用のボール（入射側鏡）およびワイヤーアーム（微小鏡）の上に乗せられることにより姿勢制御可能な形とした。一方、この微小鏡を利用した Fabry-Perot 共振器を共振させるために必要な光検出器および制御電気回路系を準備した。光検出器は、変調周波数に共振を持つタイプとし、高効率化、低雑音化を図った。光検出器からの信号を変調周波数で復調し、余計な高周波成分を除いた後、すべての信号を、レーザーの周波数を調整する制御端子および、外部位相変調器に帰還する制御系により、大きな鏡を利用した仮に構築したダミー FP 共振器の共振制御が可能であること、及び、制御に使用するエラー信号にオフセットをかけることにより、半共振に追い込むことも可能であることが確認された。

3 年目は、前年度に仕様を決めた、合成石英基材を利用した、直径 8mm、厚み 5mm の微小鏡基盤を用意し、片面に曲率 1m の曲面、もう片面は平面を形成し、曲率面に対しては、1064nm の光に対して、99.99% 反射率を持つ薄膜コーティング、反対側の平面に対しては、無反射コートをした鏡を二個準備した。片方をこの微小鏡を利用し、片方は、大きな通常の鏡を利用した、垂直方向に光軸を持つ Fabry-Perot 共振器を構成した。その時、微小鏡のほうは、水平面で 120 度を成す角で放射状に配置されたタングステン製の細いワイヤーの先端に乗せて接着剤で固定するだけの柔らかい支持構造とし、鏡の姿勢は、その各ワイヤーが固定されている PZT とピコモーター付きステージで行った。最初は、入射パワーを 10mW 程度に絞り、そのファブリーペロー共振を Pound-Drever 法により、レーザーの周波数をレーザー内部の結晶に張り付けている PZT 素子と結晶の温度制御装置の二つに帰還することにより、安定的に共振制御できることを確認した。そのうち、制御信号の一部にオフセット信号をわざと加え

ることで半共振状態にしたところ、特定の共振周波数での振動が増幅され制御が不安定になる現象が見られた。入射レーザーパワーを増やしても同じような現象が見られた。

4 年目は、前年に引き続き、片方に極小鏡を利用した、垂直方向に配置された Fabry-Perot 共振器の半共振制御実験を行った。通常の共振制御は問題なく行えたが、共振からオフセットした半共振の位置で Optical Spring が発生している状態での制御では、入射レーザー光線のパワーを増やしていくと、制御中に特定の共振周波数で発振が起き始めた。これは、半共振状態では、半共振の位置としては正バネ状態が実現できていても、動的つまり、鏡が動いている実際の状況では、光が動いている鏡にあたっている時に反射光に発生するわずかな周波数ドップラーシフトをした光が「見る」共振器の共振線幅位置が、それが起きていない鏡が見る共振線幅の位置からずれてみえ、その共振線幅の位置のずれがちょうどその鏡の動きを増幅する方向に力が加わる効果（反ばね効果）につながることで、結果、発振現象が発生すると理論的に解釈できることが分かった。この振動を抑えるために、この共振周波数だけを特に低減する最適化されたアクティブなフィードバック制御をおこなうことにより、共振を安定化させることができた。これにより、より大きなレーザーパワーを入射して、半共振制御が可能となった。さらに入射パワーの増大による光輻射圧の増大で鏡が押し上げられる効果への追従を表すと思われるフィードバック制御信号内の DC 成分の増大も観察され、浮上には至っていないが、十分共振器内レーザー光量の高まりを確認できた。以上により、本実験の目指した、光浮上型重力計に必要な、垂直型の共振器の半共振制御が原理的に可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

なし

〔学会発表〕（計 10 件）

- ① 三代木伸二，“極限計測技術で探る時空と巨視的量子性”，日本光学会・シンポジウム「光共鳴トラッピングと物質マニピレーション」，奈良・日本，2013 年 11 月 13 日。（招待講演）
- ② 宮川治，KAGRA Collaboration，“計算機を利用した KAGRA の制御（VI）”，日本物理学会，佐賀大学・佐賀市・佐賀県，2014 年 9 月 20 日。
- ③ 麻生洋一，KAGRA Collaboration，“大型低温重力波望遠鏡（KAGRA）プロジェクトの現状”，日本物理学会，佐賀大学・佐賀市・佐賀県，2014 年 9 月 20 日。
- ④ 内山隆，KAGRA Collaboration，“大

型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) プロジェクトの現状, 日本物理学会, 大阪市立大学・大阪市・大阪府, 2015 年 9 月 27 日.

- ⑤ 高橋 竜太郎, KAGRA Collaboration, “大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) プロジェクトの現状”, 日本物理学会, 大阪市立大学・大阪市・大阪府, 2016 年 3 月 21 日.
- ⑥ 宮川 治, KAGRA Collaboration, “計算機を利用した KAGRA の制御 (VII)”, 日本物理学会, 大阪市立大学・大阪市・大阪府, 2015 年 9 月 27 日.
- ⑦ 鈴木 利一, KAGRA Collaboration, “KAGRA の現状”, 日本物理学会, 大阪大学・豊中市・大阪府, 2017 年 3 月 17 日.
- ⑧ 道村 雄太, KAGRA Collaboration, “大型低温重力波望遠鏡 KAGRA プロジェクトの現状”, 日本物理学会, 宮崎大学・宮崎市・宮崎県, 2016 年 9 月 21 日.
- ⑨ S.Miyoki and KAGRA Collaboration, “KAGRA Present Status”, NTSC AnnualTheory Meeting, Shintiku-city, Taiwan, Dec. 6-9. 2016. (招待講演)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三代木 伸二 (MIYOKI, Shinji)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号: 20302680