

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654094

研究課題名(和文) 周期的微小重力干渉計を用いた低周波重力波検出器の開発

研究課題名(英文) Development of a low-frequency gravitational wave detector using a repetitive microgravity interferometer

研究代表者

川村 静児 (Kawamura, Seiji)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：40301725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：第3世代重力波検出器のための周期的微小重力干渉計のプロトタイプを新たに開発した。周期的微小重力干渉計とは、鏡を周期的に自由落下させ、その距離をレーザー干渉計で測定することにより、低周波の重力波を検出する装置である。我々は、自由落下の実現に必要な鏡のクランプリリース機構を開発し、マッチドフィルターを用いたデータ解析の手法を新たに開発しこれの有効性を確かめた。また、2個の金属球をリニアモーターを用いて周期的に自由落下させ、金属球の間隔をシャドウセンサーで測定するプロトタイプ検出器を製作し、これを動かしてデータの取得・解析を行った。

研究成果の概要(英文)：We developed a prototype of a repetitive microgravity interferometer for the third-generation gravitational wave detectors. A repetitive microgravity interferometer is a low-frequency gravitational wave detector with repetitively free-falling mirrors whose distance is measured using a laser interferometer. We developed a clamp-release system that is necessary for realization of free fall. We invented a new data analysis method using a matched filter and verified its effectiveness. We also built a prototype detector where two metal spheres repetitively free-fall with a linear motor and the distance of the spheres is measured with a shadow sensor. We operated it, took data, and analyzed the data.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：相対論 重力(実験) 重力波

### 1. 研究開始当初の背景

重力波の存在は、アインシュタインの一般相対性理論により予言されたが、未だ検出されていない。もし重力波が検出できれば、ブラックホールの衝突や宇宙誕生の瞬間など、これまで見るのできなかった様々な天体現象を観測できるようになる。そして、宇宙論、天文学、物理学などを含めた広い意味での重力波天文学が創成され、電磁波や宇宙線による天文学と相補して、我々がより深く宇宙を理解することが可能になる。なかでも低周波帯では、初期宇宙のインフレーションの検証、ダークエネルギーの謎、巨大ブラックホール形成のメカニズムの解明などの他の観測手段では得ることの困難な極めて重要なサイエンスが開けていくことが期待できる。したがって重力波天文学発展の鍵は低周波の重力波観測が握っているといえる。

研究開始当初、すでに第1世代大型レーザー干渉計 (LIGO、Virgo、GEO600、TAMA300) は重力波の直接検出まであと僅かの感度で稼動しており、6~7年後には第2世代検出器 (Advanced LIGO、Advanced Virgo、KAGRA) により重力波の初検出がなされると期待されていた。しかし、これらの標準タイプの重力波検出器では、鏡等を振り子状に吊り下げて防振等を行っているため、地面振動雑音や振り子の熱雑音により、重力波天文学としてより魅力的な 10 Hz 以下の低周波領域において感度を著しく高めることは困難であった。

そこで、我々は、干渉計の鏡を周期的に自由落下させることにより、地面震動雑音と振り子の熱雑音を取り除き、10 Hz 以下の低周波領域における感度を飛躍的に高める方法を考案した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、第3世代重力波検出器へのブレークスルーとなる可能性を秘めた周期的微小重力干渉計の実現に必要な技術を新たに開発することである。これは、テストマスの周期的な自由落下状態を実現して低周波感度を高めるといふ、これまでの重力波検出器の常識を覆す、我々が独自に考案した革新的な重力波検出器である。

具体的には、図1に示すように、鏡やビームスプリッターを真空容器の中で、外部から入射されるレーザー光との間で、マイケルソン干渉計を構成するような姿勢に鏡等を囲うように配置されたフレームにクランプする。このフレームを上下に振動させ、上方にあるときには、自由落下の軌道に沿って動くように制御する。そしてフレームが自由落下領域に入った瞬間に鏡等を固定しているクランプをリリースし、実効的に鏡等を投げ上げ、鏡等が落ちてきたところで受け止め再びクランプする。この動作を繰り返すことにより約1秒刻みの周期的な微小重力干渉計が実現できる

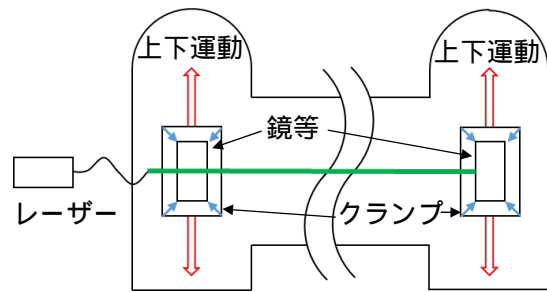


図1. 周期的微小重力干渉計

鏡等には振り子のワイヤーなどについてはおらず、自由落下している間はどこにも接触していないため、地面振動や振り子の熱雑音は存在しない。一般に、地上の重力波検出器においては図2に示すように、10 Hz 以下の低周波領域では、地面振動や振り子の熱雑音により感度が制限される。したがって、周期的微小重力干渉計を使えば、従来地上では感度を高めることが難しいとされていた 10 Hz 以下の低周波領域で重力波検出を可能にするような高感度を実現することが可能となる。

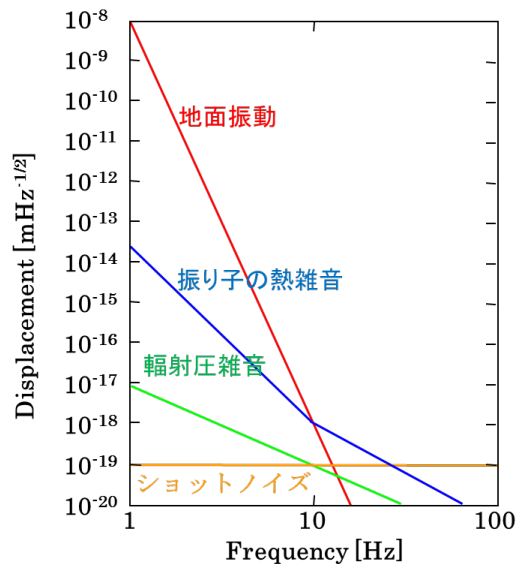


図2. 地上重力波検出器の典型的な雑音。

本研究期間においては、この周期的微小重力干渉計に必要な基礎技術を開発し、プロトタイプを製作し、その振る舞いを調べ、可能ならば 10 Hz 以下の低周波領域で重力波の観測を行なうことを目指す。本研究が成功した暁には、周期的微小重力干渉計による第3世代重力波検出器実現への大きなマイルストーンとなり、重力波天文学創成へのブレークスルーとなることが期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究では、周期的微小重力干渉計の実現のために必要な、3つの重要な新しい技術を開発する。それらの3つの技術とは、自由落下機構の開発、クランプ・リリース機

構の開発、データ取得・処理システムの開発である。以下に、それぞれの技術開発について詳述する。

#### (1) 自由落下機構の開発

リニアモーターを可動部分が縦方向に動くように設置し、上方では自由落下の軌道を取るように、下方では自由落下の上下反転軌道を取るように、可動部分を動かす。

#### (2) クランプ・リリース機構の開発

クランプ・リリース機構において重要なことはリリース時に与えられるランダムな初期速度を  $3 \mu\text{m/s}$  以下に抑えることである。これを調べるために、テストマスをワイヤーで吊り下げ、横方向にピエゾモーターでクランプする。そして、そのクランプをリリースし、その際水平方向に与える力をテストマスの動きとして位置センサーで検出し、要求値を満たすよう調整を繰り返す。

#### (3) データ取得・処理システムの開発

周期的微小重力干渉計においては、毎回の自由落下状態において初期位置と初期速度がランダムに現れ、これらが重力波信号に比べて圧倒的に大きいため、我々はこれらを除去する方法をすでに考案していた。このデータ解析の手法を理論およびシミュレーションにより開発し、その有効性を確認する。

これら3つの要素技術の開発の後、周期的微小重力干渉計のプロトタイプを製作し、これを動作させ、その振る舞いを調べ、そしてデータを取得し、データ解析を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 要素技術の開発

まず、3つの要素技術の開発についての成果を述べる。

##### 自由落下機構の開発

リニアモーターの可動部の上部にフレームを取り付け、そのフレームの中に金属球をテフロンリングの上に鎮座させる。そして、コンピュータに組み込んだ専用ボードを用いて動きを制御するための信号を専用のドライバーに送り、そこからの信号を受けて、リニアモーターを図3に示すように動かす。具体的には、自由落下の上下反転運動から自由落下運動に移る直前にフレームを一旦停止させ、少し遅れて自由落下運動に移るようにすることにより、可動域の上部において金属球がテフロンリングから離れて自由落下させることができる。実験においてはスローモーションビデオカメラで金属球とフレームの動きを録画することにより、金属球の自由落下の動きが実現されていることを確認した。

ただし、リニアモーターの動きに関しては完全に制御しきれていない部分があり、その原因については現在調査中である。

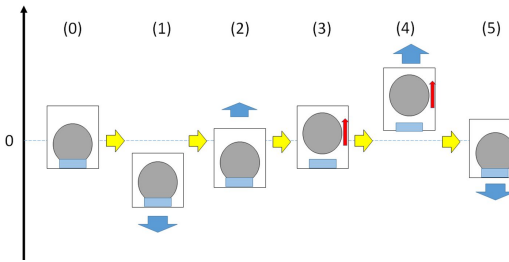
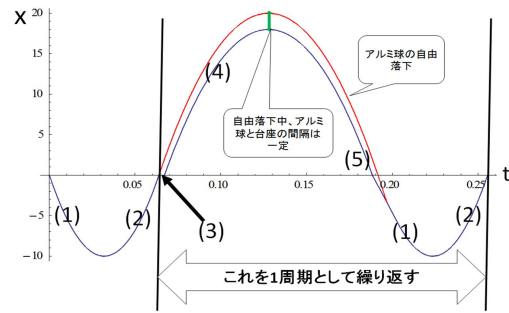


図3. リニアモーターと金属球の動き。

#### クランプ・リリース機構の開発

図4にクランプ・リリース機構によって与えられる初期速度の測定装置を示す。まず測定用定盤はスプリングの付いたワイヤー4本で吊り下げられており、液体ダンパーにより共振周波数での揺れを減衰した形で防振されている。定盤の上にはフレームが設置されておりそのフレームの上部からテストマスが吊り下げられている。テストマスはアクチュエーターにより、フリーの状態から一定の量だけ押しされ、瞬時にリリースされる。その際のテストマスの動きを位置センサーでモニターする。位置センサーはLEDと光検出器を使った反射型のものである。アクチュエーターはピエゾモーターが使われている。また、定盤の上には吊り下げられたテストマスがもう1セット搭載されており、定盤の揺れによる影響をキャンセルできるようになっている。

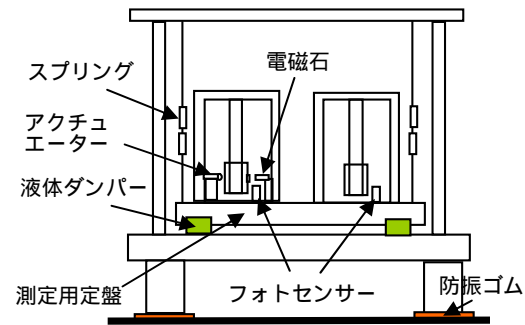


図4. クランプ・リリース測定装置。

本装置を用いてクランプ・リリース機構によって生じる初期速度を測定したところ、 $1.4 \mu\text{m/s}$  程度であることが分かり、要求値を満たすことが確認された。

### データ取得・処理システムの開発

周期的微小重力干渉計においては、毎回の自由落下状態において初期位置と初期速度がランダムに現れるため、取得できる鏡等の変位データは図5(a)のようになる。そこで各サイクルのデータの平均位置と平均速度を計算し、それをデータから差し引く処理、いわゆる“detrend”を施すことにより(b)のようなデータが得られる。

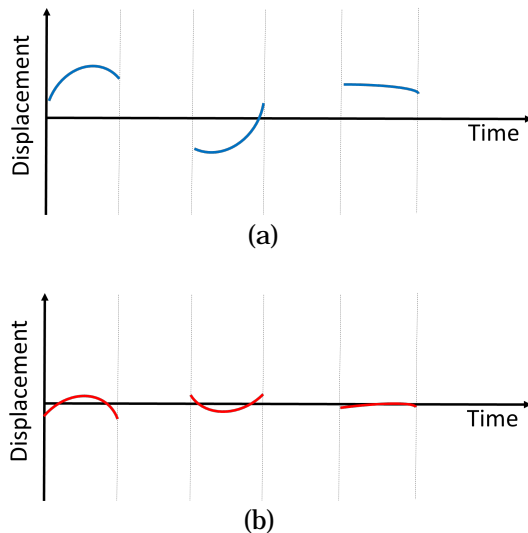


図5 .“detrend” 前後のデータ。

しかし、“detrend”の処理により、特に低周波領域の重力波信号の一部も取り除いてしまうため感度の評価が難しくなり、またデータが断続的となるため通常の高周波フーリエ変換による感度の評価も適さない。そこで、我々は重力波信号にも“detrend”の処理を施し、その“detrend”されたデータと“detrend”された重力波信号との間で相関を取る、いわゆるマッチドフィルタの手法を使うことにより感度の評価を可能にした。

具体的には、変位信号にホワイトな雑音を加え、そこに初期位置と初期速度をランダムに印加する。さらに各周波数においてモノクロマティックな重力波信号も加える。そして、“detrend”の処理を施した後、マッチドフィルタによる相関解析を施す。サイクル時間が1秒間の場合の結果を、図6に示す。

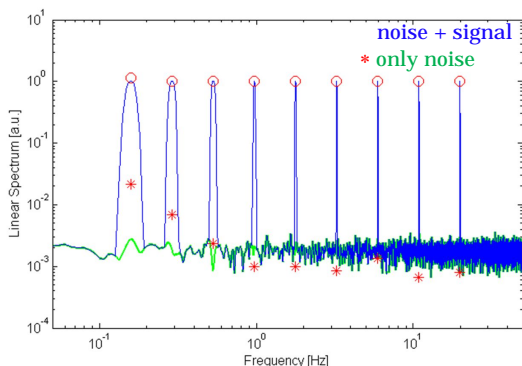


図6 . マッチドフィルタによる評価。

このシミュレーションの結果、サイクルタイムの逆数で決まる周波数より高い領域では、信号雑音比が通常の干渉計と同様に決まることが確認された一方で、低い周波数領域では信号雑音比が周波数のマイナス2乗に比例して悪くなることを確認された。この原因は“detrend”により、低周波領域の重力波信号の一部も取り除いてしまうためと考えられ、シミュレーションを行う前の我々の予想通りであった。

### (2) 周期的微小重力干渉計プロトタイプ

周期的微小重力干渉計の実現に必要な3つの要素技術がほぼ確立したので、それらを統合した総合試験である、プロトタイプを製作した。

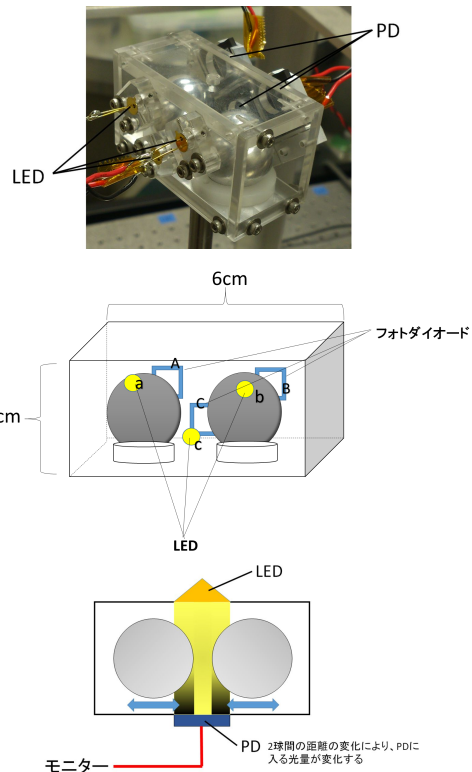


図7 . 2個の金属球とセンサー

装置は、上下運動により自由落下運動を実現するためのリニアモーターの可動部の上端に、2個の金属球を搭載したアクリルケースを取り付けたものである。図7に示すように2個の金属球はテフロンリングの上に鎮座しており、金属球が自由落下運動に移った際にはテフロンリングから浮かび、自由落下運動を終えた時には再びテフロンリングの上に着地する構造になっている。また、金属球がテフロンリングから浮いているのか着座しているのかの状態を知るために、金属球の上部をかすらせるようにアクリルケースの側面に取り付けたLEDの光を入射しそれを、アクリルケースの逆サイドの側面に取り付けたフォトダイオードで受け、いわゆるシャドウセンサーとして金属球の垂直方向の位置を検出している。同様に、2つの金属球の

間隔を同様な LED とフォトダイオードのペアからなるシャドーセンサーで検出している。

この装置を動かし、金属球がテフロンリングから浮き上がり自由落下運動をしていることを確認した。自由落下している期間は 0.1 秒でいどであった。そしてこの装置を 50 秒動作させ 2 つの金属球の間隔のデータを取得した。得られた生データを図 8 に示す。なお、シャドウセンサーの較正は金属球の位置を台座ごと動かし、変位と出力の関係を計測することにより求めた。

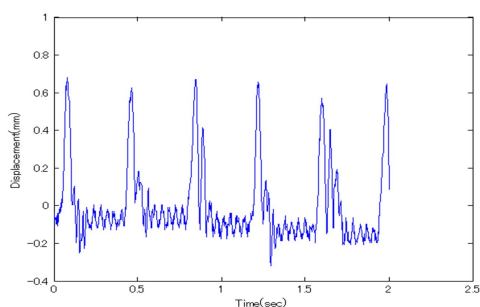


図 8 . プロトタイプの実出力データ。

次に、金属球が自由落下運動をしている時だけのデータを抜き出すよう、適当な窓関数を掛けたのち、“detrend”を行った。また、重力波信号の方も同様な“detrend”の処理をし、それらの間の相関を取ることで、図 9 の結果が得られた。

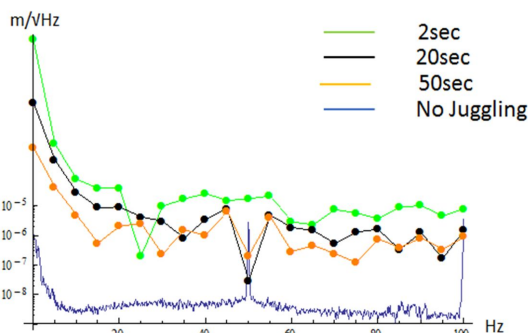


図 9 . プロトタイプの感度

この結果は感度としてはまだまだであるが、周期的微小重力干渉計プロトタイプの実作に初めて成功したことに対する意義は大きい。

今後は、リニアモーターの垂直運動のより正確な制御を中心に研究を進めていく。

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 3 件)

Daniel Friedrich , Hinata Kawamura , Shigeki Hirobayashi , and Seiji Kawamura , “ Juggling interferometer for the detection of gravitational waves II ” , 日本物理学会 , 2013 年 9 月 22 日 , 高知大学

D. Friedrich, H. Kawamura, S. Hirobayashi, and S. Kawamura, “ Juggling Interferometer for the Detection of Gravitational Waves ” , 10th Amaldi Conference on Gravitational Waves, 2013 年 7 月 11 日 , Uniwersytet Warszawski, Warsaw, Poland

Daniel Friedrich, Hinata Kawamura , and Seiji Kawamura , “ Juggling interferometer for the detection of gravitational waves ” , 日本物理学会 , 2013 年 3 月 26 日 , 広島大学

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

川村 静児 (KAWAMURA, Seiji)  
 東京大学・宇宙線研究所・教授  
 研究者番号 : 40301725

### (3)連携研究者

阿久津 智忠 (AKUTSU, Tomotada)  
 国立天文台・光赤外研究部・助教  
 研究者番号 : 40564274

鳥居 泰男 (TORII, Yasuo)  
 国立天文台・光赤外研究部・研究技師  
 研究者番号 : 50227675

田中 伸幸 (TANAKA, Nobuyuki)  
 国立天文台・光赤外研究部・主任技術員  
 研究者番号 : 60413978

佐藤 修一 (SATO, Shuichi)  
 法政大学・理工学部・准教授  
 研究者番号 : 30425409