

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287038

研究課題名(和文)重力波検出器KAGRAのためのクラックリング雑音の研究

研究課題名(英文)Study of crackling noise for the gravitational wave detector KAGRA

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) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：日本の重力波検出器KAGRAの防振装置に用いられている幾何学的反バネには、クラックリング雑音が発生し、KAGRAの目標感度達成を妨げる可能性がある。そこで我々は、クラックリング雑音の評価を行うため、小型の幾何学的反バネユニットからなる鏡の懸架システムを用いたマイケルソン干渉計を製作した。まず、懸架システム1台を使った干渉計を動作させ、この実験で得られた知見をもとに、懸架システムを改良し、もう一つの鏡およびビームスプリッターの懸架システムも製作した。また、クラックリング雑音のスケールリングローを理論的に導き、本実験の感度の要求値を設定した。これにより、クラックリング雑音評価の全ての準備が整った。

研究成果の概要(英文)：The geometric anti-spring used for the Japanese gravitational wave detector KAGRA could produce crackling noise, which could impair the target sensitivity of KAGRA. Thus we built a Michelson interferometer consisting of the mirror suspension systems with the small-sized geometric anti-spring units to estimate the crackling noise. First we operated the interferometer with one suspension system. Then we modified the system based on what we learned, and we built the suspension systems for the other mirror and the beam splitter. We also derived the scaling law theoretically and established the requirement of the sensitivity of the experiment. All the preparation was complete to estimate the crackling noise.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 レーザー干渉計 クラックリング雑音

1. 研究開始当初の背景

(1) 重力波検出の重要性

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ていたが、研究開始当初にはまだ直接検出はされていなかった。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、これまで見ることでできなかった様々な天体現象を観測できるようになり、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と期待されていた(図1参照)。

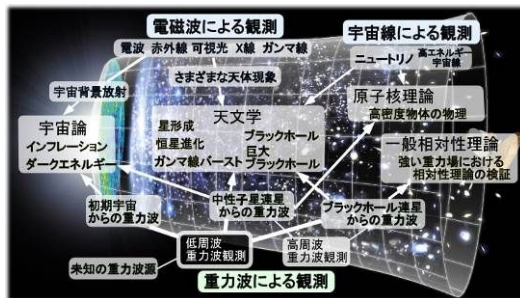


図1. 重力波天文学の創成、そして電磁波や宇宙線による観測との相補的な宇宙の理解。

(2) クラックリング雑音について

申請者らが進めている日本の大型低温重力波望遠鏡 KAGRA (図2 参照) をはじめとする第2世代重力波検出器(他に、アメリカの Advanced LIGO やヨーロッパの Advanced Virgo がある)が建設中であり、数年後には重力波の初検出がなされると期待されていた。

しかし、我々が、第1世代検出器である TAMA300 で達成した感度を向上させていく過程で、これまでは問題とならなかった新しい種類の雑音が見えてくると予想されていた。中でも、金属等にストレスがかかることによって生じるクラックリング雑音に関しては、先行研究において、磁石を用いた研究が若干なされている程度であり、そのメカニズムに関しては未だ説明されておらず、ど



図2. KAGRA (3km のアーム長を持つ低温・地下重力波検出器) のイラスト。

れだけの雑音が発生するのか、またそれをどのように低減していくのかも全く分かっていなかった。したがって重力波検出にとって必要な変位感度 10^{-20} mHz^{1/2} (100Hz 付近) の達成に困難をもたらす可能性が指摘されていた。

KAGRA においては、幾何学的反バネユニット(図3参照)を多段に吊り下げた超高防振システムを使うことになっていた。幾何学的反バネユニットは、金属ブレードを互いに押し付け合うことによって生じる反バネ効果により、系の縦振動の共振周波数を下げ、垂直方向の防振効果を高めるものである。そこで用いられる金属ブレードには強いストレスがかかるため、大きなクラックリング雑音が発生する危険性があった。

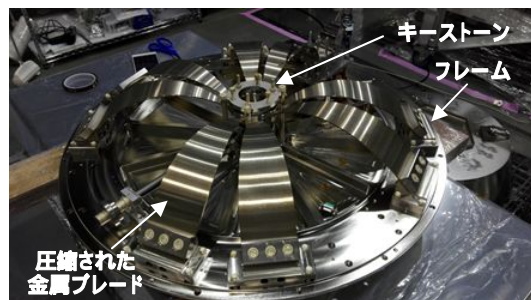


図3. 幾何学的反バネユニット。圧縮された金属ブレード数枚、中心部のキーストーン、金属ブレードを固定するフレーム等からなる。

(3) 着想に至った経緯

2011年の夏、カリフォルニア工科大学で LIGO の推進を中心となって行っている Rana Adhikari 教授を訪ねた際、Advanced LIGO では防振装置に金属ブレード(幾何学的反バネユニットではなく通常の金属ブレード)を使用することから、クラックリング雑音の危険性が認識されており、測定実験を立ち上げたと聞かされた。その後、2013年の夏、再びカリフォルニア工科大学を訪れた際、Adhikari 教授とクラックリング雑音に関する共同研究の可能性を議論し、その結果、KAGRA と Advanced LIGO に共通した、非常に重要な雑音源であるクラックリング雑音についての相補的な共同研究を立ち上げるということで合意を得た。

2. 研究の目的

(1) 目的

クラックリング雑音に関する実験を立ち上げ、クラックリング雑音の測定を行い、そのメカニズムを解明する。そして、スケールローを理論的に考察し、それを実験的に確認する。そうして得られたスケールローを用いて、KAGRA において発生するであろうクラックリング雑音の大きさを評価する。また、クラックリング雑音の低減技術として、焼鈍や高周波変調による雑音のアップコンバージョン技術を試し、いかなる方法

が有効であるかを見極め、クラッキング雑音が KAGRA の目標感度達成を妨げることが判明した場合は、それらの技術を KAGRA の防振システムにフィードバックする。

(2) スコープ

本実験では、できるかぎりシンプルにかつ容易にクラッキング雑音を測定することができる測定装置を構築する必要がある。そうすることにより、KAGRA で発生するクラッキング雑音の大きさを評価することが可能となる。そこで、小型の幾何学的反バネユニットを作成し、その垂直方向の振動をマイケルソン干渉計を用いて測定することとした。

KAGRA の防振装置で生じるクラッキング雑音は垂直方向の変位雑音を引き起こす。その垂直方向の変位雑音が干渉計に存在するさまざまな要因により、重力波検出器として重要な水平方向の変位雑音へと転化される。本実験においては、垂直方向の振動を直接測定する。そしてその垂直方向の変位雑音を水平方向の変位雑音へと理論的に転化させる。こうすることにより、KAGRA に生じるクラッキング雑音の評価という観点からは、より感度の高い装置を構成することができる。

(3) 本研究の特色

カリフォルニア工科大学では、Advanced LIGO で用いられる通常の金属ブレードに生じるクラッキング雑音の測定実験を行っている。一方、我々は KAGRA の防振装置に用いられる幾何学的反バネユニットに生じるクラッキング雑音の測定実験を行っている。幾何学的反バネユニットには、通常の金属ブレードより強いストレスがかかるため、より大きなクラッキング雑音が発生する可能性がある。したがって、我々の実験の方が実際にクラッキング雑音を測定できる可能性が高いと言える。

3. 研究の方法

(1) 最終的な実験装置の構成

本実験は、最終的にはレーザー、2 台の小型鏡懸架システム、および小型ビームスプリッター懸架システムで構成されるマイケルソン干渉計からなる。小型鏡懸架システムは小型幾何学的反バネユニットにより吊り下げられたエンド鏡付きマスと、同じフレームから、別の小型幾何学的反バネユニットにより吊り下げられた折り返し鏡付きマスからなる。折り返し鏡は、水平方向のビームを垂直方向に折り返すために必要な光学系である。エンド鏡と折り返し鏡は、小型幾何学的反バネユニットにより吊り下げられているため、水平方向、垂直方向ともに防振される。また、ビームスプリッター付きマスは、通常の方法（小型幾何学的反バネユニットなし）で懸架されており、水平方向にのみ防振

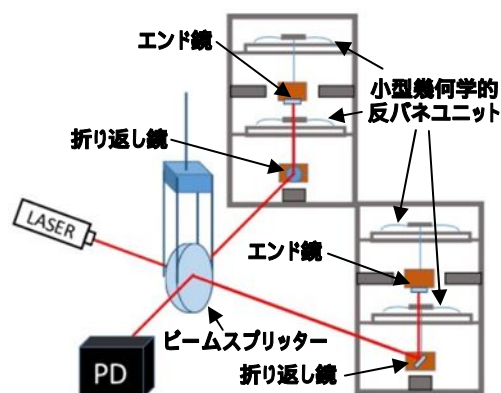


図4．幾何学的反バネユニットのクラッキング雑音計測のためのマイケルソン干渉計の構成。

される。これは、ビームスプリッターにやってくるビームは水平方向であるため、垂直方向の防振は必要ないためである。それぞれのマスは、磁石と金属の間に生じる渦電流ダンピングにより共振周波数あたりでの揺れが抑えられる。

レーザービームはビームスプリッターで2つの方向に分けられ、それぞれ折り返し鏡により垂直方向に反射され、エンド鏡に導かれる。それぞれエンド鏡で反射されたビームは再び折り返し鏡で水平方向に戻され、ビームスプリッターに戻る。アラインメントが取れていると2つの光は干渉し、一方の干渉光は光検出器に導かれる（図4参照）。そして、動作点が常にミッドフリンジに維持されるように、干渉計の両腕の光路長差を制御する。具体的にはビームスプリッター付きマスに取り付けた磁石と外部コイルの間の電磁力によりビームスプリッターの位置を制御する。

この状態で、両方のエンド鏡を吊りしているキーストーンに電磁力を用いて垂直方向の同相信号を加える。同相信号の周波数としては数 Hz 以下のゆっくりとしたものを想定している。そして、出現するクラッキング雑音の強度や頻度と同相信号の位相との相関を調べる。

(2) プロトタイプ実験 1

本実験を行うに先立ち、まずは小型幾何学的反バネユニットにより吊り下げられたエンド鏡付きマスのみで構成される小型鏡懸架システムのプロトタイプ（図5参照）1台を使ったマイケルソン干渉計を組み上げる。折り返し鏡ともう1つのエンド鏡、ビームスプリッターは光学定盤に固定する。光学定盤は防振のため十分に長くバネ定数の小さいバネで吊り下げる。こうすることにより、数 Hz でも比較的大きな防振効果が得られる。この状態で、エンド鏡付きマスを電磁力で制御し、動作点をミッドフリンジに制御し、小型鏡懸架システムのプロトタイプの問題点の洗い出しを行う。

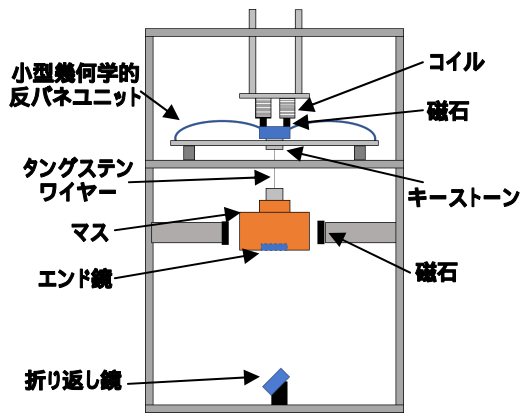


図5. 小型反バネユニットにより吊り下げられたエンド鏡付きマスのみで構成される小型鏡懸架システムのプロトタイプ概念図。

(3) プロトタイプ実験2

プロトタイプ実験1で得られた結果をもとに、小型鏡懸架システムに改良を加える。また、小型幾何学的反バネユニットにより吊り下げられた折り返し鏡付きマスを組み込み、最終形の小型鏡懸架システムを製作し、この小型鏡懸架システム1台を使ったマイケルソン干渉計を組み上げる。もう1つのエンド鏡、ビームスプリッターは光学定盤に固定する。この状態で、エンド鏡付きマスを電磁力で制御し、動作点をミッドフリンジに維持することにより、小型鏡懸架システムがきちんと動作することを確認する。

4. 研究成果

(1) プロトタイプ実験1

まず、小型幾何学的反バネユニットにより吊り下げられたエンド鏡付きマスのみで構成される小型鏡懸架システムのプロトタイプ1台を製作した(図6参照)。これを使っ

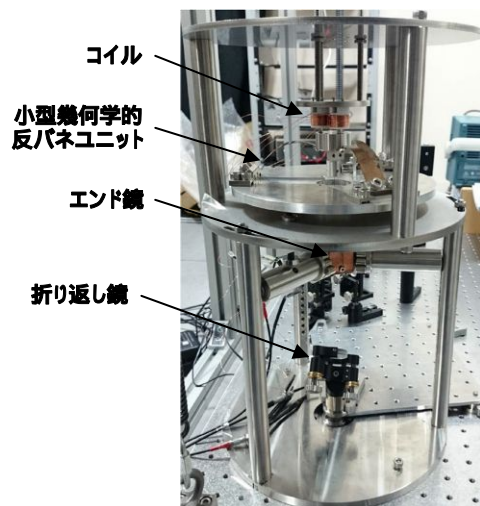
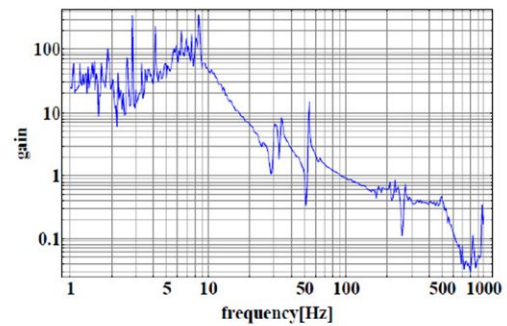
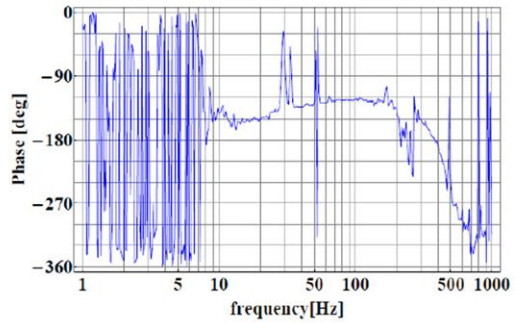


図6. 小型反バネユニットにより吊り下げられたエンド鏡付きマスのみで構成される小型鏡懸架システムのプロトタイプの写真。



(a) Gain



(b) Phase

図7. プロトタイプ実験1における制御のループ伝達関数。上がゲイン、下が位相である。

たマイケルソン干渉計においてミッドフリンジへのロックに成功した。その際、小型幾何学的反バネユニットに存在する機械的共振により制御が不安定になる現象が見られた。そこでこれを回避するため、制御フィルタにノッチフィルタを組み込むことにより、安定な制御を実現した。制御システムのループ伝達関数のユニティーゲイン周波数は90 Hzであり、位相余裕は60°であった。(図7参照)

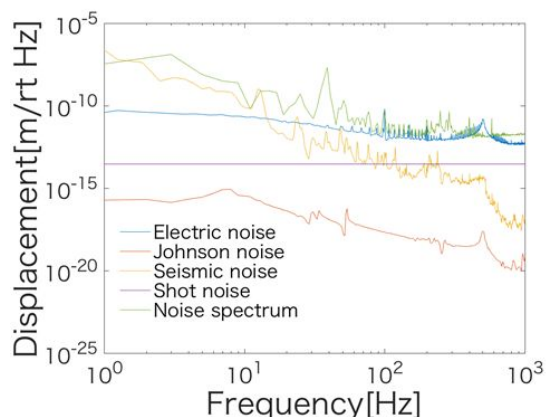


図8. プロトタイプ実験1における変位感度と各種雑音の予想曲線。

得られた感度は、100 Hzで $3 \times 10^{-11} \text{ m Hz}^{-1/2}$ 程度であり、この感度は光学定盤の振動によって制限されていた。これは、一方のエンド鏡とビームスプリッターが光学定盤に固定

されていたためである。これ以外にも、ショットノイズ、制御の電気ノイズ、アクチュエーターの直列抵抗の熱雑音などの評価が行われた（図8参照）。

この実験により様々な知見が得られ、小型鏡懸架システムおよび実験装置に以下のような改良が行われた。

- ・小型幾何学的反バネユニットにより吊り下げられた折り返し鏡付きマスを組み込んだ。
- ・金属ブレードの位置を調整できる機構を組み込んだ。
- ・金属ブレードの材質をKAGRAで使われるマルエージング鋼に変更した。
- ・エンド鏡付きマスとキーストーンにおけるワイヤーのクランプ点を重心に近づけて機械的共振周波数を下げた。
- ・実験装置を風防で覆った。
- ・ケーブルのマウント方法を改善した。

(2) プロトタイプ実験2

最終形の小型鏡懸架システムを製作し（図9参照）、この小型鏡懸架システム1台を使ったマイケルソン干渉計において、エンド鏡付きマスを電磁力で制御し、動作点をミッドフリンジに制御することに成功した。制御システムのループ伝達関数のユニティーゲイン周波数は50 Hzであった。また、小型鏡懸架システムおよび実験装置に関して行われたさまざまな改良により、干渉計の感度の改善が確認された（図10参照）。

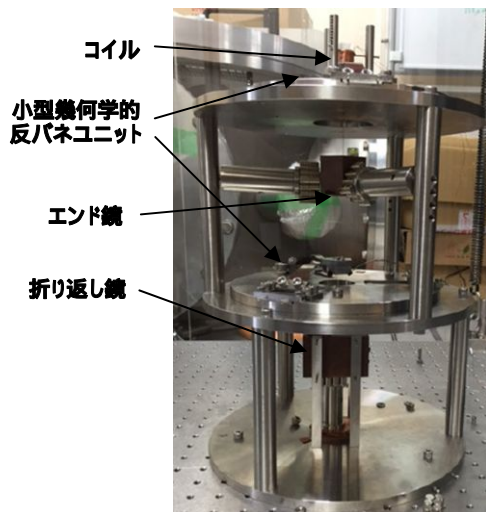


図9．最終形の小型鏡懸架システムの写真。エンド鏡付きマスと折り返し鏡付きマスはそれぞれ独立な小型反バネユニットで吊り下げられている。

(3) 小型鏡懸架システムの製作

プロトタイプ実験2で、最終形の小型鏡懸架システムの動作が確認できたので、もう一つのエンド鏡と折り返し鏡用の小型鏡懸架システムを製作した。また、ビームスプリッター付きのマスの懸架システムも製作した。これにより、クラックリング雑音の測定実験に必要な装置の全てが揃った。

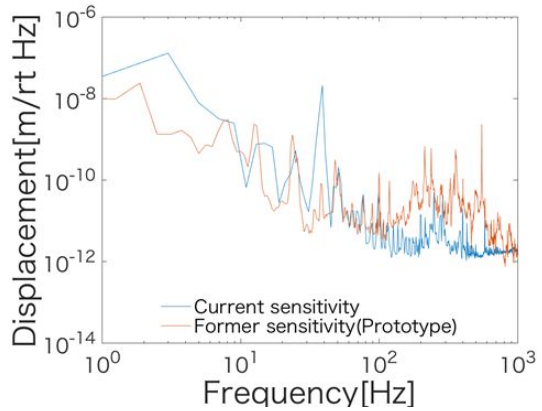


図10．プロトタイプ実験2における変位感度。比較のためプロトタイプ実験1における感度も記載している。

(4) スケーリングローの理論的考察

本実験で用いられた幾何学的反バネは、KAGRAで実際に用いられるものより、小さく、また負荷は軽い。本実験で計測される雑音の大きさから、KAGRAで出現するであろう雑音の大きさを評価するためには、スケーリングローの確立が必要である。本研究ではこれを理論的に考察した。

まず、金属ブレードの形を薄長方形で近似し、一方の端を固定、もう一方の端は自由端に質点が付いているという仮定のもと、古典的な弾性理論を使って、弾性モードを計算した。次に、クラックリング事象がランダムに起こると仮定し、クラックリング事象の頻度と体積が比例すると仮定した。この仮定のもと、クラックリング雑音の大きさは金属ブレードの体積のルートに比例し、荷重に反比例するということが導かれた。これは予備的な結果であり、実験的に確認する必要がある。

また、このスケーリングローが正しいと仮定して、KAGRAで発生するクラックリング雑音がKAGRAの感度を損なうものであるかどうかを判断するために、本実験で要求される感度が求められた。

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)

劉英涛, 山中祐治, 川村静児, 高橋竜太郎, “Investigation of crackling noise in the vibration isolation system of KAGRA gravitational wave detector (1)”, 物理学会, 東北学院大学, 2016年3月19日~3月22日

劉英涛, 桐井真, 川村静児, 高橋竜太郎, “Investigation of crackling noise in the vibration isolation system of KAGRA gravitational wave detector (2)”, 物理学会, 宮崎大学, 2016年9月21日~9月24日

桐井真, Yingtao Liu, 川村静児, 高橋竜太郎, “KAGRA 重力波検出器のためのクラックリング雑音の研究 (3)”, 物理学会, 宮崎大学, 2016年9月21日~9月24日

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

(2) 連携研究者

高橋 竜太郎 (TAKAHASHI Ryutaro)

国立天文台・重力波プロジェクト推進室・

助教

研究者番号: 60270451

(3) 研究協力者

山中祐治 (YAMANAKA Yuji)

劉英涛 (LIU Yingtao)

桐井真 (KIRII Shin)