

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14735

研究課題名（和文）低温重力波望遠鏡の鏡懸架系の高感度化に向けた接合の機械的散逸に関する研究

研究課題名（英文）Study on mechanical loss of bonding for improvement of a cryogenic payload of Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope

研究代表者

牛場 崇文 (Ushiba, Takafumi)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：00810805

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）：本研究の目的は日本の岐阜県飛騨市神岡町に建設された重力波検出器KAGRAの熱雑音低減を目指し、サファイア同士の種々の接合手法における機械的散逸の大きさを定量的に測定することである。熱雑音とは鏡やその懸架装置を構成する原子の熱振動に起因する雑音で、重力波検出器における原理的な測定限界を決める雑音の一つである。この熱雑音は機械的散逸と呼ばれる系のエネルギーの散逸速度を表すパラメータが小さいほど小さくなることが知られている。そこで、本研究ではKAGRAで使用されているサファイアの接合手法である、スミセラムおよびガリウムを用いたサファイアの接合サンプルの機械的散逸を世界で初めて測定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は重力波検出器KAGRAの熱雑音低減を目指して、KAGRAで使用されている種々の接合手法による機械的散逸の測定を行った。これによって重力波検出器KAGRAの熱雑音が低減できれば、KAGRAが検出できる重力波イベントの数が増大し、宇宙物理学や天文学へのさらなる貢献が可能となる。また、本研究で低減を目指す熱雑音は、重力波検出器に限らず、多くの超精密計測において原理的な測定限界を与えるものである。したがって、熱雑音の低減手法を模索する本研究は原子時計に代表される時間標準分野などへも波及効果のある研究となっている。

研究成果の概要（英文）：A goal of our research is that measuring mechanical loss of several bonding method for reducing thermal noise of a gravitational-wave detector, KAGRA, which located in Kamioka, Hida, Gifu, Japan. Thermal noise, which is caused by Brownian motion of atoms, is one of the fundamental noise sources for gravitational-wave detectors. The thermal noise can be reduced by making mechanical loss of the system smaller. So, in this research, Mechanical loss of the bonding sapphire samples that are bonded by using SUMISERAM and Gallium, which are used for the KAGRA sapphire suspension, for the first time.

研究分野：重力波物理学

キーワード：低温工学 低温物性 重力波検出器 熱雑音

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

重力波の初検出により幕をあけた重力波物理学・天文学のさらなる発展に向け、重力波検出器の高感度化は必要不可欠である。そこで、本研究では日本に建設された重力波検出器 KAGRA の高感度化に向け、KAGRA で使用されている接合による熱雑音の低減に着目して研究を行った。

熱雑音とは重力波検出器を構成する鏡やその懸架系を構成する原子の熱振動に起因する雑音である。この雑音は機械的散逸と呼ばれる系のエネルギーの散逸の速さを表すパラメータに比例するため、機械的散逸の小さなものを用いて鏡とその懸架系を構成することが重要となる。そこで、KAGRA では鏡の基材および懸架線としてサファイアが用いられているが、各サファイアパーツを接合する接合面での機械的散逸に関する研究が十分とは言えない。そこで、本研究では KAGRA で使用されている種々の接合による機械的散逸の測定を定量的に行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は KAGRA で用いられているサファイア同士の接合部の機械的散逸の大きさを精度よく測定する実験セットアップを構築し、種々の接合における接合部の機械的散逸の大きさを定量的に評価することである。

3. 研究の方法

本研究では二枚のサファイアウェハーをスミセラム接合およびガリウム接合によって接合したサンプルの機械的散逸を測定する。機械的散逸の測定においてはサンプルの支持による機械的散逸を十分に低減する必要があるため、本研究では接合したウェハーの中心を挟み込むように支持する測定系を設計・製作した。サファイアウェハーを用いる手法はサファイアウェハーの体積に占める接合部の体積が大きいという特徴があり、機械的散逸を高精度に測定可能なセットアップとなっている。また、ウェハーの中心を上下から挟み込む支持法は、サンプルの固有振動モードに与える影響が原理的にはゼロとなる支持方法であり、効率よく支持系の影響を低減することが可能である。

機械的散逸は系の固有振動モードに蓄えられたエネルギーの減衰時間を測定することで見積もることができる。機械的散逸の小さい系では系に加えられたエネルギーの減衰が遅いため、非常に長い時定数を持つ。一方で、機械的散逸の大きい系ではエネルギー減衰の時定数が短くなる。本研究では指示したサファイアウェハーの固有振動モードを静電型アクチュエーターによって励起し、その振動の減衰時間から機械的散逸の大きさを見積もる。

4. 研究成果

(1) 測定系の開発

本研究の肝となるのは非常に小さい機械的散逸を精度よく測定することのできる測定装置の開発である。特に、本研究では極低温環境下における機械的散逸を測定するため、サンプルと支持系の熱接触は十分に確保される必要がある。しかしながら、支持系による機械的散逸を低減するためには、サンプルと支持系の接触を可能な限り少なく必要があり、これら二つのトレードオフを解消するような支持系を構築しなければならない。そこで、本研究では開発した支持系の冷却性能及び機械的散逸の測定精度の評価を行った。

(A) 測定系の冷却性能の評価

図 1 は支持系の冷却曲線の一例である。赤線が測定サンプルの温度、緑線が支持系の温度、青線が測定系を囲む輻射シールドの温度を表している。本研究では重力波検出器 KAGRA に対する影響の見積もりのために、サンプルの温度が 20K で測定を行う必要がある。そのため、最終到達温度は 20K 以下でなければならないが、支持系の温度が 4.3K に対してサンプルの温度が 6.9K となっており、十分に要求を満たす熱接触が確保できていることが確認できた。

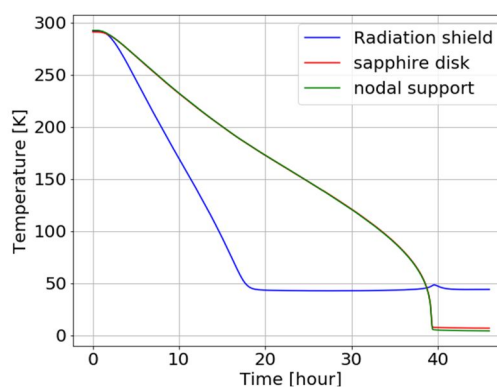


図 1：冷却曲線

(B)測定系の機械的散逸の測定精度の評価

次に、この支持系を用いてサファイアウェハー単体(無接合のサンプル)の機械的散逸を測定した。単体のサファイアの機械的散逸はおよそ 10^{-7} - 10^{-8} 程度の値が報告されており、本研究の支持系はこの程度の値が測定可能であれば十分な性能を持っていると言える。図2は製作した支持系を用いて測定した、サファイアウェハーの固有モードの振幅減衰である。青線が実測データ、オレンジ線がフィッティングに用いたデータ範囲、緑線がフィッティングした線を表す。このフィッティングからサファイアウェハーの機械的散逸を評価すると、 $\approx 1.3 \times 10^{-8}$ という結果が得られた。先述の通り、サファイア単体の機械的散逸は 10^{-7} - 10^{-8} 程度が報告されているため、十分な性能を持つ機械的散逸測定装置の開発ができたと言える。

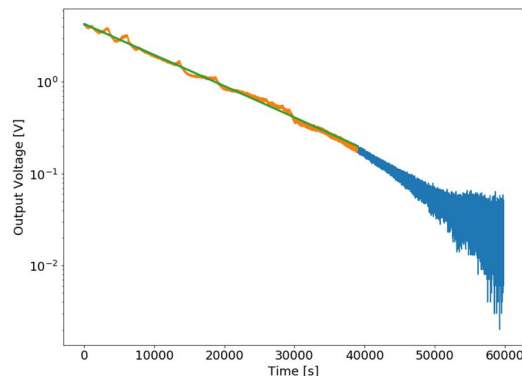


図2：減衰曲線

(2)スミセラム接合の機械的散逸測定

前項で評価を行った支持装置を用いて、スミセラムで接合されたサファイアウェハーの半円の機械的散逸測定を行った。図3は測定に用いたサンプルの写真である。このサンプルを用いて、極低温環境下におけるサンプルの機械的散逸を測定した。その結果 20K での接合サンプルの機械的散逸は $\approx 1.4 \times 10^{-5}$ 程度となり、無接合のサンプルに比べて約 2 桁大きな機械的散逸の値を得た。



図3：スミセラム接合サンプル

測定装置は 10^{-8} 台の非常に小さな機械的散逸を測定可能であることが確認できているため、この値はスミセラムによる接合による影響であると考えられる。この結果からスミセラムの機械的 Q 値(機械的散逸の逆数)を見積もったものが図4である。この結果はサファイア単体の機械的散逸(約 $\approx 10^{-8}$)よりも非常に大きな値となっているため、KAGRA のサファイアファイバーに使用されているスミセラムが熱雑音の悪化に大きく寄与していないかどうかを検討する必要がある。

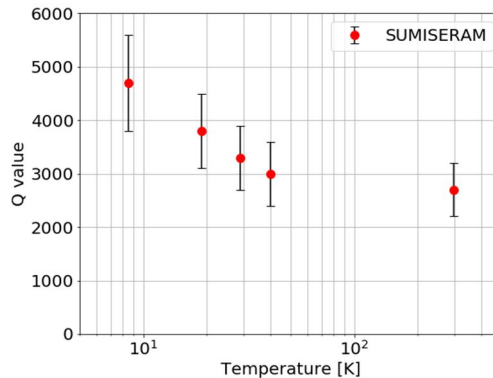


図4：スミセラムの機械的 Q 値

KAGRA のサファイアファイバーに使用されるスミセラムの量は 45mm^3 である。一方で、サファイアファイバーの体積は 2800mm^3 である。したがって、一様なストレス分布を考えると 1.2×10^{-5} 程度の機械的散逸となることが見積もられる。この結果はサファイアファイバーの機械的散逸に対する要求値($\approx 1.5 \times 10^{-7}$)に比べて約 2 桁大きい値となっており、スミセラム接合が KAGRA の熱雑音に与える影響は大きい可能性があることが初めて示唆された。

(3)ガリウム接合の機械的散逸測定

スミセラムで接合したサンプルに行われたものと同様の測定をガリウム接合によって接合したサンプルに対しても行った。その結果、ガリウム接合によって接合したサンプルの機械的散逸は $\approx 1.1 \times 10^{-5}$ と見積もられる。ガリウムのヤング率が低温環境下においても常温と同程度であることを仮定すると、ガリウムの機械的散逸の大きさは $\approx 10^{-2}$ 程度と見積もられる。スミセラムの場合と同様に KAGRA の熱雑音への影響を考えると、KAGRA で使用されるガリウムの量は 10mm^3 程度であるので、KAGRA のサファイアファイバーの機械的散逸への寄与は $\approx 8.9 \times 10^{-7}$ 程度となり、スミセラムよりは小さいものの KAGRA のサファイアファイバーの性能を制限する要因の一つとなりうるということが初めて示唆された。

(4)まとめ

本研究により、KAGRA で使用されているスミセラム接合及びガリウム接合が KAGRA のサファイアファイバーの熱雑音を悪化させ、感度を制限する可能性があることが確認された。これらの接合の影響は定量的に確認された例がなく、本研究によってはじめて得られた成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Ushiba Takafumi et al. | 4. 巻 38 |
| 2. 論文標題 Cryogenic suspension design for a kilometer-scale gravitational-wave detector | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity | 6. 最初と最後の頁 085013 ~ 085013 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6382/abe9f3 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 牛場崇文 |
| 2. 発表標題 KAGRA低温系の現状(鏡の冷却と制御) |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 牛場隆文 |
| 2. 発表標題 KAGRA低温系の現状IX(低温懸架系の制御) |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|