

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287053

研究課題名(和文) 低温環境における超安定共振器の研究

研究課題名(英文) Study of stable optical cavity at low temperature

研究代表者

大橋 正健(OHASHI, MASATAKE)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：80213833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、極低温において超安定光共振器(ファブリーペロー共振器)を実現しようとするものである。ミラーコーティング(光学薄膜)の極低温における機械的 Q 値の測定が、2種類のミラーコーティング(Tiドープの有無)に対して実行された。この測定では、極低温における機械的 Q 値の低下は確認されず、ミラーを極低温に冷却することで、熱雑音を大幅に低減できる可能性が高いことが判明した。また、大口径サファイア基材を用意し、それを実際に研磨して表面形状を測定した。これにより、現在の研磨技術で高性能な長基線光共振器を構成可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to realize a ultra-stable optical cavity at low temperature. We measured the mechanical losses of optical thin films for high reflectivity mirror coating at low temperature (around 20K). We did not found any lowering of mechanical Q value at low temperature and the cooling of mirrors could reduce the thermal noise of mirrors drastically. We confirmed that a long stable optical cavity at low temperature will be realized by using current techniques.

研究分野：重力波宇宙物理学

キーワード：重力波 レーザー干渉計 極低温 光学薄膜

### 1. 研究開始当初の背景

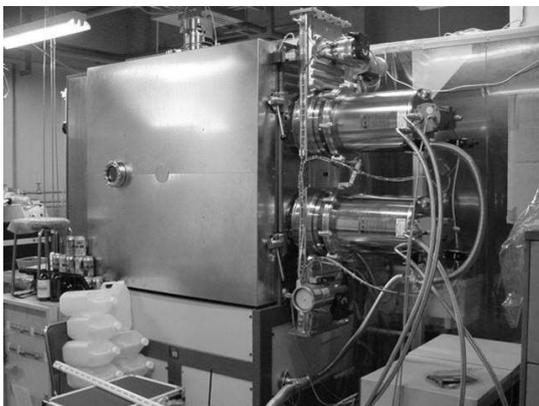
本研究は、極低温において超安定光共振器（ファブリーペロー共振器）を実現しようとするものである。これまで、世界の複数研究機関でミラーコーティング（光学薄膜）の機械的 Q 値の測定がなされてきたが、極低温における測定値に大きな乖離があった。とくに英国グラスゴー大学の測定値は、極低温で機械的 Q 値が大きく低下するというものであり、重力波望遠鏡 KAGRA においてコーティングの熱雑音が大きくなるという深刻な問題となる可能性があった。

### 2. 研究の目的

KAGRA が想定しているミラーコーティングの機械的 Q 値を低温で実測することにより、熱雑音が感度を制限するという問題を解決することが本研究の目的の一つである。また、その他の問題点についても研究を行う。

### 3. 研究の方法

サファイア薄板（円板）に誘電体多層膜をコーティングした機械損失測定用サンプルを、その製法や薄膜デザインを変えて、複数個作成する。コーティングは国立天文台が保有する IBS 装置（イオンビームスパッター装置）を利用するほか、LMA（仏の研究機関で LIGO 等のミラーを成膜している）および民間会社に依頼する。誘電体の組み合わせは SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を基本とするが、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜に Ti ドープを施すことや、薄膜デザインを周期構造からずらしたものを作成することも試す。機械損失の測定は、サファイア円板をサポート装置に装着して冷却し、温度を変化させながら可能な限り細かく測定する。測定した機械的 Q 値から、Ti ドープの有無や薄膜デザインによる影響を精査する。その中から最適な誘電体多層膜を選び出す。以上の手法で超安定光共振器を実現する。

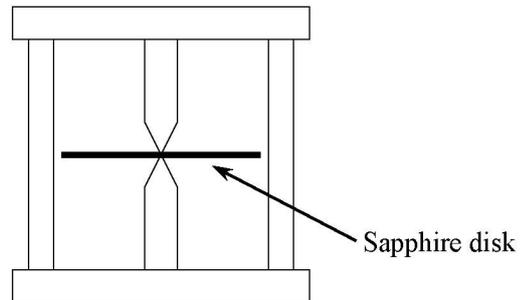


天文台 IBS 装置（200 まで成膜可能）

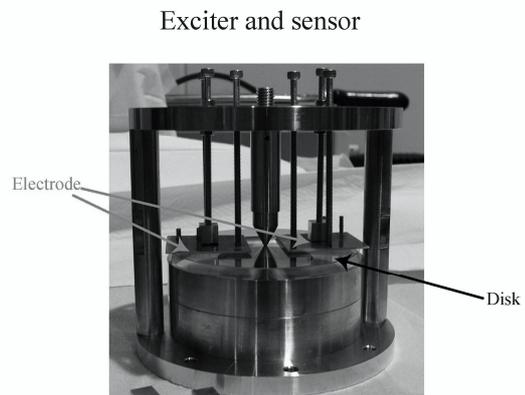
具体的には、まず、サファイア薄板（円板）に誘電体多層膜をコーティングした測定サンプルを複数個作成する。コーティングは国立天文台が保有する IBS 装置（イオンビームスパッター装置）で行う予定である。研究代

表者の大橋正健は、この装置の導入時から天文台 IBS の運用に深く関与するとともに、天文台 ATC（先端技術センター）の共同利用を 10 年以上継続してきた。この IBS では通常は反射ミラーを製作する場合、SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の組み合わせを使うが、ターゲットを交換すれば種々の酸化物の組み合わせが可能となる。Ta ターゲットに Ti 薄板を張り付けることで、Ti ドープ膜の試作も終わっており、種々の成膜をすることができる。

次に、製作した薄膜の機械的 Q 値を測定する。サファイア薄板を下図のサポート装置に固定し、低温容器に入れて冷却して機械的 Q 値の温度依存性を測定する。この測定では、多くの振動モードで節となる円板の中心のみを支持しているため、サポート自体による散逸の影響が最小である。この方法では Q 値が 10<sup>7</sup> 程度まで測定できるので、本研究の目的には十分である。また、サポート装置は熱伝導をよくするため銅でつくってある。サファイア円板の機械モードを励起するのも振動測定も静電的に行うので、円板に不要に接触する必要がなく、機械的 Q 値を損なわない。サファイア円板の振動はデータロガーに記録されるので、低温容器中で温度を変えながら細かく測定できる。これにより、特定温度（特に低温）でのピーク等を見逃すことはない。



測定円板のサポート装置（銅製）



サポート装置の写真

ここで測定するものは機械的 Q 値であるが、それをロスアングル に変換する方法は以下のとおりである。まず、コーティングによる Q 値への寄与 (  $Q_{\text{coating}}$  ) はコーティングした円板の Q 値 (  $Q_{\text{with}}$  ) とコーティングしていない円板の Q 値 (  $Q_{\text{without}}$  ) から以下のように求められる。

$$\frac{1}{Q_{\text{coating}}} = \frac{1}{Q_{\text{with}}} - \frac{1}{Q_{\text{without}}}$$

$Q_{\text{coating}}$  の逆数をとって円板全体の弾性エネルギー (  $E_{\text{disk}}$  ) とコーティング内部の弾性エネルギー (  $E_{\text{coating}}$  ) の比をかければ、誘電体多層膜のロスアングル  $\phi_{\text{coating}}$  がわかる。本研究のように円板の径が厚さよりずっと大きい場合には、 $\phi_{\text{coating}}$  は以下ようになる。

$$\phi_{\text{coating}} = \frac{1}{3} \frac{d_{\text{disk}}}{d_{\text{coating}}} \frac{E_{\text{disk}}}{E_{\text{coating}}} \left( \frac{1}{Q_{\text{with}}} - \frac{1}{Q_{\text{without}}} \right)$$

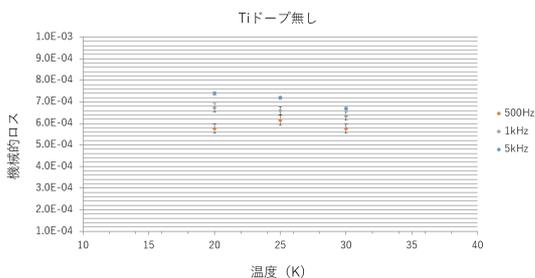
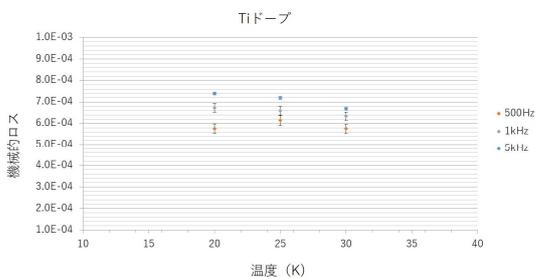
以上の計算により、機械的 Q 値を導出できる。

#### <引用文献>

K. Yamamoto, S. Miyoki, T. Uchiyama, H. Ishitsuka, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Tomaru, N. Sato, T. Suzuki, T. Haruyama, A. Yamamoto, T. Shintomi, K. Numata, K. Waseda, K. Ito, and K. Watanabe, Measurement of the mechanical loss of a cooled reflective coating for gravitational wave detection Physical Review D 74, 022002 (2006)

#### 4 . 研究成果

極低温における機械的 Q 値の測定が、2 種類のミラーコーティング ( Ti ドープの有無 ) に対して実行された。



この測定では、極低温における機械的 Q 値の低下は確認されず、ミラーを極低温に冷却することで、熱雑音を大幅に低減できる可能性が高いことが判明した。この結果を受けて、極低温ミラーの仕様が決定された。

極低温ミラーの製作において、次に問題となるのが、研磨である。最終的には基線長が 3 km にもおよぶ光共振器を構成するためには、ミラーの表面形状が設計どおりで、かつ極めて滑らかでなくてはならない。この問題についても解決するために、大口径サファイア基材を用意し、それを実際に研磨して表面形状を測定した。これにより、現在の研磨技術で高性能な長基線光共振器を構成可能であることを確認した。

#### 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 )

##### [ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

Eiichi Hirose, Kieran Craig, Hideki Ishitsuka, Iain W. Martin, Norikatsu Mio, Shigenori Moriwaki, Peter G. Murray, Masatake Ohashi, Sheila Rowan, Yusuke Sakakibara, Toshikazu Suzuki, Kouichi Waseda, Kyohei Watanabe, and Kazuhiro Yamamoto Mechanical loss of a multilayer tantala/silica coating on a sapphire disk at cryogenic temperatures: Toward the KAGRA gravitational wave detector Physical Review D 有 90 (2014) 102004 <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.90.102004>

Hirose, D. Bajuk, G. Billingsley, T. Kajita, B. Kestner, N. Mio, M. Ohashi, B. Reichman, H. Yamamoto, and L. Zhang Sapphire mirror for the KAGRA gravitational wave detector Physical Review D 有 89 (2014) 62003 [10.1103/PhysRevD.89.062003](http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.89.062003)

##### [ 学会発表 ] ( 計 9 件 )

山元一広, Kieran Craig, 梶田隆章, 宮本昂拓, 田中宏樹, 萩原綾子, 木村誠宏, Rahul Kumar, 鈴木敏一, 都丸隆行, KAGRA Cryogenics Subgroup KAGRA

##### 低温系の現状 II

日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 22 日 宮崎大学 ( 宮崎県宮崎市 )

##### Kazuhiro Yamamoto

Cryogenic Payload Issues

ELiTES: 4th general meeting ( 招待講演 ) ( 国際学会 ) 2015 年 12 月 02 日 Tokyo Institute of Technology

山元一広, A. Khalaidovski, 宮本昂拓, 榊原裕介, 田中宏樹, 内山隆, 阿久津智忠, 萩原綾子, 木村誠宏, R. Kumar, 久米達哉, 小池重明, 村上巖, 鈴木敏一, 寺嶋眞一, 都丸隆行, 豊田恵嗣, 陳たん, R. DeSalvo, E. Majorana KAGRA 用低温懸架装置の開発 VI

日本物理学会第 70 回年次大会 2015 年 3 月 22 日 早稲田大学 (東京都新宿区)

山元一広 The ELiTES Collaboration, Japanese viewpoint

ELiTES: 3rd general meeting 2015 年 2 月 9 日駐日欧州連合代表部(東京都港区)

J. Katayama, K. Craig, K. Yamamoto and M. Ohashi

Measurement of coating mechanical loss

ELiTES: 4th general meeting (国際学会) 2015 年 12 月 02 日 Tokyo Institute of Technology

廣瀬榮一, GariLynn Billingsley, 梶田隆山元一広, 高橋竜太郎, 田中宏樹, 宮本昂拓, 小野謙次, 関口貴令, 榊原裕介, 上泉眞裕, 廣瀬榮一, A. Khalaidovski, R. Kumar, 内山隆, 三代木伸二, 阿久津智忠, 石崎秀晴, 鈴木敏一, 麻生洋一, 宗宮健太郎 KAGRA 用低温懸架装置の開発 V

日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 20 日 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)

廣瀬榮一, GariLynn Billingsley, 梶田隆章, 三尾典克, 大橋正建, 山本博章 A, Liyuan Zhang KAGRA 重力波検出器の低温鏡系の開発

日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

山元一広, 高橋竜太郎, 小野謙次, 関口貴令, 榊原裕介, 東谷千比呂, 上泉眞裕, 岩崎詩子, 廣瀬榮一, A. Khalaidovski, R. Kumar, 内山隆, 三代木伸二, 大橋正健, 阿久津智忠, 石崎秀晴, 鈴木敏一, 木村誠宏, 小池重明, 坪野公夫, 麻生洋一, 牛場崇文, 柴田和憲, 陳タン, 大前宣昭, 宗宮健太郎他 KAGRA 用低温懸架装置の開発 IV

日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

山元一広 Overview of KAGRA cryogenic payload development

ELiTES: 2nd general meeting 2013 年 12 月 4 日駐日欧州連合代表部(東京都港区)

【その他】

東京大学宇宙線研究所 KAGRA ホームページ  
<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大橋 正健 (OHASHI, Masatake)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号: 80213833

### (2) 研究分担者

山元 一広 (YAMAMOTO, Kazuhiro)

富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・  
准教授

研究者番号: 00401290

内山 隆 (UCHIYAMA, Takashi)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号: 603616566