

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740148

研究課題名（和文） 低温重力波レーザー干渉計用鏡懸架装置の冷却期間短縮方法の開発

研究課題名（英文） Study of a cooling time reduction method for cryogenic laser interferometric gravitational wave detectors

研究代表者

内山 隆 (UCHIYAMA TAKASHI)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：60361656

研究成果の概要（和文）：本研究では、低温重力波レーザー干渉計で用いられる鏡懸架装置のために、輻射伝熱の効率を高めることによって、冷却期間の短縮を実現する手法を新たに開発した。本研究で開発された輻射伝熱を活用した冷却方法を用いる手法を、現在神岡に建設中の低温重力波レーザー干渉計 KAGRA に適応した場合、従来の手法では約 50 日を必要とする冷却時間を約 28 日までに低減出来る事を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We have developed new method to decrease time for cooling mirror suspension systems of laser interferometric gravitational wave (GW) detectors. The key point of the method is heat transferring using high efficiency radiation. If the method will be applied to the laser interferometric GW detector KAGRA which is constructing in Kamioka mine, the cooling time could be decreased to 28 days from 50 days.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
年度			
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：重力波宇宙物理学

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：重力波、レーザー干渉計、低温

## 1. 研究開始当初の背景

(1)重力波の直接検出を目指して世界中がしのぎを削っている。日本の重力波グループは「神岡地下」「低温鏡」「3km 基線長」という特徴を持つ KAGRA による検出を目指している。特に地面振動の極めて小さい「神岡地下」利用と、干渉計を構成する鏡を 20K に冷

却して熱振動を低減する「低温鏡」技術は、世界に先駆けて独自に研究開発を続けてきた。今や、これらの独自技術は「次次」世代の重力波検出器に必須の先進技術であると世界の重力波コミュニティー内で認知されるに至っている。

(2)低温を前提とする KAGRA の場合、冷却に時間がかかるため実験サイクルの長期化が懸念される。さらに鏡懸架装置の総質量も KAGRA のプロトタイプである CLIO より増大するのは明らかで、これは冷却期間を延ばす方向に作用する。このように、冷却期間の短縮は今や KAGRA・CLIO のような低温重力波レーザー干渉計にとって切実な問題になっている。

(3)この研究成果によって実験サイクルの短期化が実現できれば、KAGRA の目標感度の早期実現、ひいては重力波の第一検出の可能性を大きく引き上げる事に繋がると期待できる。

## 2. 研究の目的

(1)本研究では、「低温」重力波レーザー干渉計で用いられる鏡懸架装置の冷却期間短縮に必要な技術・手法の確立と、実証を目指す。この技術に求められる最大の制約は、干渉計の感度に影響をおよぼさないことである。

(2)冷却期間を短縮するためには、鏡懸架装置と低温シールド間の伝熱効率を増加させる事が必要である。本研究では、鏡の懸架装置と低温シールド間の「輻射伝熱」に着目し、その伝熱効率を高めることにより冷却期間の短縮することを独自に提案した。この伝熱方法は、鏡懸架装置に非接触であるため干渉計の雑音源になりにくいという大きなメリットを持っている。

(3)輻射による伝熱量が温度の 4 乗に比例することから、高い温度領域、すなわち 300K から 100K までの冷却期間の短縮に繋がる事が期待できる。この温度領域は CLIO を例に挙げると、250 時間かかった冷却時間の内、約 200 時間を占めている。この温度領域で、

冷却時間を短縮することが出来れば、大きな効果が期待できる。

## 3. 研究の方法

(1)本研究では、単結晶シリコンやダイヤモンドライクカーボン(DLC)、AlTiN の被膜を付けた純アルミニウム板の 10 ミクロン波長に対する放射率の温度依存性(50K-300K)の測定と、鏡懸架装置の冷却に伴う温度変化のシミュレーションプログラムの開発を行った。

(2)輻射伝熱の効率を高めるには、放射率の高い素材を用いることが重要である。300K の黒体輻射は、10 ミクロンの波長にピークを持つため、この波長に対する放射率の測定を行った。

(3)測定に用いた実験装置と実験装置概念図を図 1、図 2 に示す。窓付きのクライオスタット内部にサンプルを固定し、窓の外から 10 ミクロン波長のレーザーを入射し、サンプルから反射されたレーザーを窓の外に置いたパワーメーターで測定し、反射率を評価する。「放射率=吸収率=1-反射率」と考えられるため、放射率を評価することが出来る。室温において、サンプルの放射率は、市販の放射率測定器を用いて独立に測定し、レーザーを使った測定の校正を行っている。サンプルの裏面にはヒーターがつけられ、温度を変えた放射率の測定が出来るようになっている。

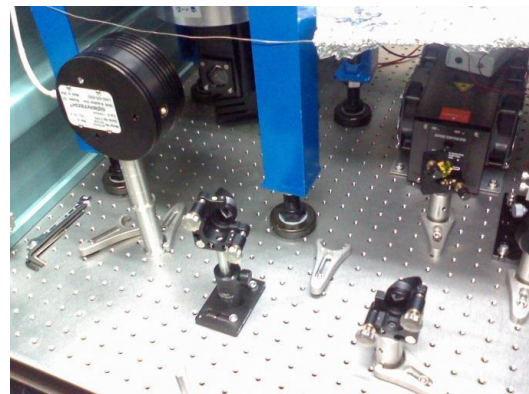


図 1 放射率測定実験装置

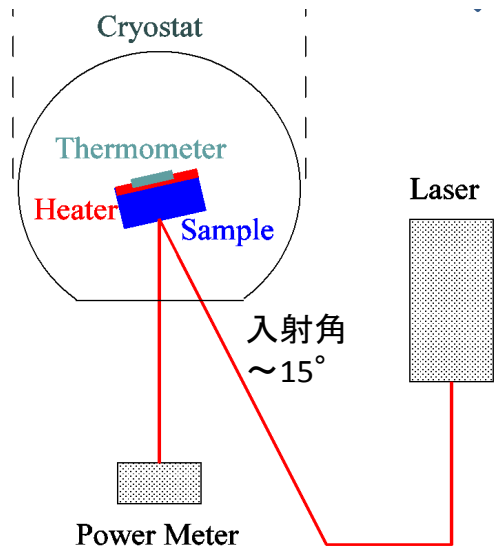


図 2 放射率測定実験概念図

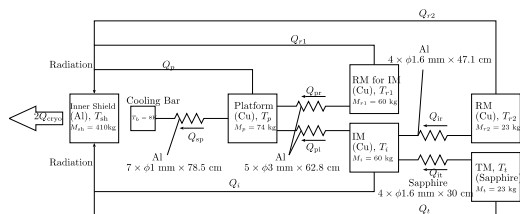


図 3 KAGRA 伝熱モデル例

(4) 数値計算による冷却シミュレーションでは、KAGRA のクライオスタット及び鏡懸架装置を元に、図 3 に示すような伝熱モデルを作成し、計算を行った。この伝熱モデルでは、伝導伝熱と輻射伝熱を考慮し、対流は含まれていない。計算プログラムの作成には、Mathematica を用いた。

#### 4. 研究成果

(1) 研究成果は、放射率測定実験の測定結果および、数値計算による KAGRA クライオスタット及び鏡懸架装置の冷却シミュレーションが挙げられる。

(2) 放射率測定には以下の 6 種類のサンプルを用意した。①単結晶シリコン板(鏡面研磨)。②純アルミニウム板(A1070)に化学研磨(CP)を施したもの。③②に DLC 被膜(0.5 ミクロン厚)を付けたもの。④②に DLC 被膜(1.0 ミクロン厚)を付けたもの。⑤②に AlTiN 被膜(0.5

測定結果(吸収率=1-反射率)

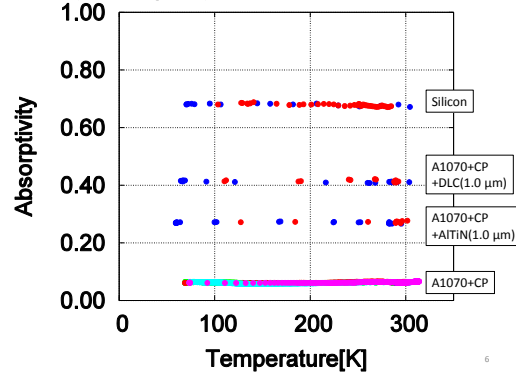


図 4 吸収率(放射率)測定結果

ミクロン厚)を付けたもの。⑥②に AlTiN 被膜(1.0 ミクロン厚)を付けたもの。

(3) 図 4 に測定された 6 種類のサンプルの吸収率(放射率)の温度依存性のグラフを示す。測定結果より、50K-300K の間で温度依存性は見られなかった。サンプル①、サンプル③がそれぞれ 0.67、0.41 という高い放射率を持つ事が分かり、クライオスタットや鏡懸架装置に用いることで輻射伝熱の効率を上げることが期待できる。

(2) 放射率の測定結果を受けて、輻射伝熱の硬化を確認するために、数値計算による冷却シミュレーションを行った。図 5 にシミュレーションの結果得られた温度変化のグラフを示す。放射率を高めるために、クライオスタット内部の低温シールド及び、鏡懸架装置の各重りの表面に放射率 0.41 を持つ DLC 被膜のある場合と無い場合について計算した例を示す。計算の結果、細かいモデルによる違いはあるが、DLC 無い場合で 49.1-51.5 日の冷却時間が必要であるのに対して、DLC 被膜を付けて、輻射伝熱の効率を高めた場合には、27.9-28.7 日に冷却時間を短縮できることが可能である事が分かった。これは約 45% の時間短縮で有り、高い効果が期待できる。

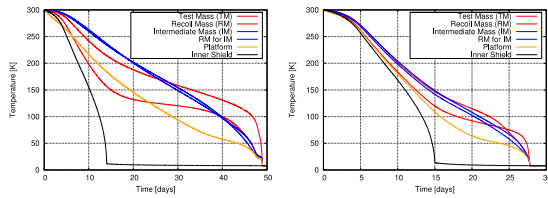


図 5 KAGRA クライオスタット及び鏡懸架装置の冷却予想曲線。左が DLC 被膜無し。右が DLC 被膜有り。赤実線が鏡の温度を示す。DLC 被膜を付けて輻射伝熱の効率を高めたことで冷却時間の短縮が可能である事を示している。

(3) 本研究は、熱輻射というそれまであまり重要視されてこなかった熱輸送法に着目し、KAGRAの大きな課題である冷却時間を短縮する技術の開発に貢献した。本研究の成果はKAGRAのクライオスタットや低温鏡懸架装置の設計に反映され、KAGRAによる重力波の第一検出に寄与する事が期待される。

## 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)

- (1) 内山隆、三代木伸二、低温鏡の実証、低温工学、査読有り、46、2011、392-399、[DOI: 10.2221/jcs.j.46.392](https://doi.org/10.2221/jcs.j.46.392)
- (2) 榎原祐介(他 14 名、6 番目に掲載)、大型重力波望遠鏡 (LCGT) 熱シールド用金属の低温における波長 10 $\mu\text{m}$  での反射率測定、低温工学、査読有り、46、2011、434-440、[DOI: 10.2221/jcs.j.46.434](https://doi.org/10.2221/jcs.j.46.434)

[学会発表] (計 2 件)

- (1) 内山隆、低温重力波レーザー干渉計 CLIO の技術成果、春季第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 15 日、早稲田大学
- (2) 内山隆、CLIO の反射鏡低温化技術、春季第 58 回応用物理学関係連合講演会、2011 年 3 月 24 日、神奈川工科大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内山 隆 (UCHIYAMA TAKASHI)  
 東京大学・宇宙線研究所・助教  
 研究者番号：6 0 3 6 1 6 5 6

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：