

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287052

研究課題名(和文)重力波望遠鏡KAGRAの観測デッドタイムの解消

研究課題名(英文)Reduction of Observation Deadtime of Gravitational wave Telescope KAGRA

研究代表者

都丸 隆行 (Tomaru, Takayuki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授

研究者番号：80391712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：日本のオリジナル技術である極低温レーザー干渉計型重力波検出器には、クライオポンプ効果による鏡の汚染という特有の問題がある。このため、日本の重力波望遠鏡KAGRAでは1年に2ヶ月の鏡のクリーニング期間が必要となるが、突発イベントを狙う重力波検出器にとって、この観測デッドタイムは致命的であり、可能な限り短縮することが求められる。本研究では、まず、このクライオポンプ効果による鏡の汚染メカニズムを実験的に再評価し、吸着する残留ガスの主成分が水であり、その成長速度は26.8nm/dayであることを突き留めた。また、低温鏡の冷却昇温時間を、高効率熱伝導体の開発や昇温仮定の工夫で半減させる事に成功した。

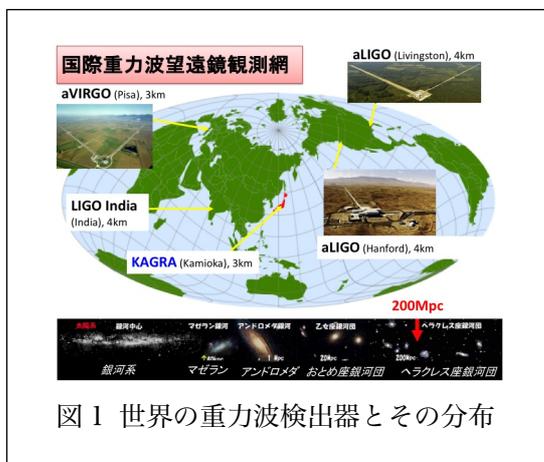
研究成果の概要(英文)：Cryogenic interferometric gravitational wave detector, which is developed by Japan, has the unique issue of mirror contamination by cryogenic pump effect. Due to this issue, KAGRA gravitational wave telescope in Japan needs maintenance term for two months in every year. This observation dead time is pretty large issue for KAGRA since a main target of gravitational wave detection is sudden astronomical events, and we need to reduce such observation dead time. In this research, we re-evaluated the contamination mechanism of mirror due to cryogenic pump effect by experiment. We concluded that the main component of mirror contamination is remaining water molecules in vacuum and its speed of growth on mirror was 26.8nm/day. And We successfully reduced cooling and warming up time to be half by the development of high performance thermal conductor and an improvement of warming up method.

研究分野：宇宙物理学実験

キーワード：重力波 極低温 超高真空

1. 研究開始当初の背景

(1) 重力波はアインシュタインの一般相対性理論で予言される時空の歪み(重力)が波動として伝搬する現象である。その間接的な存在の証明はなされているものの、未だに直接検出をなされたことは無かった。米国やヨーロッパでは、1990年代よりkmスケールの大型レーザー干渉計型重力波検出器の建設を行ってきたが、この第1世代検出器(米国LIGOおよびヨーロッパVIRGO)では重力波の検出に至らなかった。2000年代半ばに至り、第1世代より約1桁の感度向上を目指して両検出器はそれぞれadvanced LIGOおよびadvanced VIRGOへアップグレードされ、本研究実施中の2015年にはついにaLIGOによる重力波の初検出がなされた。



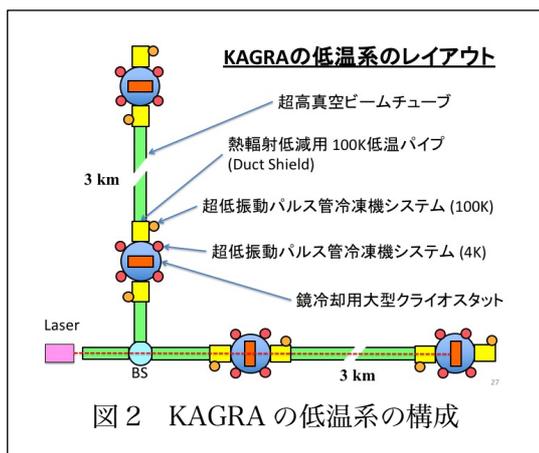
(2) 一方我が国では、2010年に最先端研究基盤事業により3km基線長の大型低温重力波望遠鏡KAGRAの建設がスタートした。KAGRAはaLIGOやaVIRGOより20年遅れで始まったプロジェクトであるが、その分最先端の技術を採用している。その代表的なものが極低温鏡である。干渉計型重力波検出器では、最も感度の高い100Hz帯を鏡およびサスペンションの熱雑音が制限してしまう。このため、鏡・サスペンションファイバーに熱雑音対策に効果的なサファイアを用い、さらに20Kの極低温まで冷却することで大幅に熱雑音を低減する。この技術は、我々のグループが20年にわたり基礎研究を続けてきたもので、第3世代の検出器では世界標準になるようとしている日本初の最先端技術である。

(3) その一方で、極低温鏡には特有の課題も存在する。その1つに、クライオポンプ効果による鏡の汚染と望遠鏡のメンテナンス時間の増加というものがある。KAGRAでは、建設コストの問題から主鏡周辺だけが極低温に冷却され、真空の大部分を占めるビームダクトは常温である。もちろん超高真空が実現されるが、それにもかかわらず、極低温まで冷却された鏡および周囲のクライオスタットに

は、室温・超高真空のビームダクト内の残留ガスがクライオポンプ効果により吸着され、重力波の超高性能鏡の性能を低下させてしまう。この現象は2000年頃に我々グループの予備実験で検証されており、おおよそ1年に1度程度、クライオスタットおよび鏡を昇温させて表面に吸着された残留ガスをクリーニングしてやる必要があると見積もられている。この作業のためには、望遠鏡を約2ヶ月にわたり停止させる必要があり、いつ起こるか分からない重力波イベントの探査では致命的になる可能性がある。

2. 研究の目的

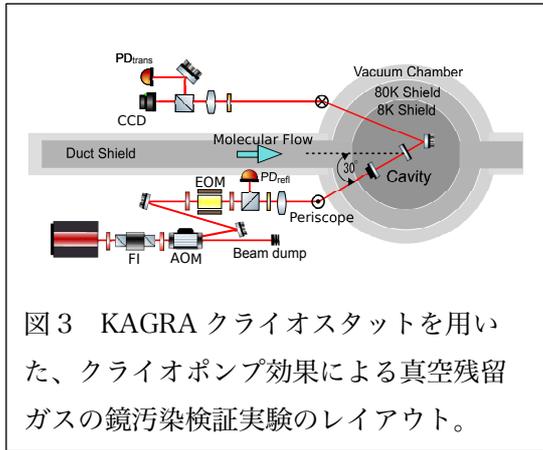
本研究の目的は、クライオポンプ効果による鏡のガス吸着汚染の影響を詳細に調べると共に、クリーニングに要するメンテナンス期間(観測の中断期間)を低減する方法を探ることである。クライオポンプ効果による鏡の汚染は、15年前にテーブルトップ実験で検証を行ったに過ぎず、現在のKAGRAの低温機器構成とはかなり異なっている。最も異なる点は、KAGRAでは輻射熱侵入低減の研究結果を反映して100K程度の低温ビームチューブがクライオスタットの前後5mほど導入されており、この低温ビームチューブによる残留ガス吸着がある程度期待出来るなどである。このため、まずは、鏡の残留ガス吸着汚染を今一度詳細に調べ、メンテナンス期間の再評価を行う。それに引き続き、吸着ガスを取り除くため、冷却時間の短縮や局所的なガス脱理などのメンテナンス方法の確立を目指す。これにより、KAGRAの観測デッドタイムを可能な限り少なくするような方法を構築する。



3. 研究の方法

本研究では、以下の3つの項目に取り組み、そのコンビネーションで鏡汚染問題に起因する観測デッドタイムの短縮を実現する。

(1) KAGRAにおけるクライオポンプ効果による鏡の残留ガス吸着効果の再評価



上述の通り KAGRA の低温システムは以前の基礎研究と構成がかなり異なるため、実際にどの程度クライオポンプ効果で KAGRA の超高性能鏡が影響を受けるかは再評価する必要があった。そこで、図3のように小型の Fabry-Perot Cavity を KAGRA のクライオスタット内に導入して再検証実験を行った。フィネス (共振の鋭さを表す) 数万レベルの鏡を 17cm のステンレス製スペーサーに固定し、クライオスタット内でビーム軸に対して 30° の角度で設置した。これにより、常温のビームダクト内の残留ガス分子が、Cavity ミラーの 1 つの表面だけに吸着出来るようになり、その影響をキャビティのフィネスの低下として計測出来るようにした。レーザーの波長は 1064nm である。Cavity のフィネスは Acousto-Optic Modulator (AOM) をシャッターとしてリングダウン法で求めた。実験はトータルで約 70 日間行い、このうち極低温での残留ガス吸着計測期間は 37 日であった。キャビティの温度は 47K とやや高めになってしまったが、常温部での真空圧力は 6×10^{-6} Pa であった。また、ダクト部に質量分析器を設置し、残留ガス成分の特定も行った。

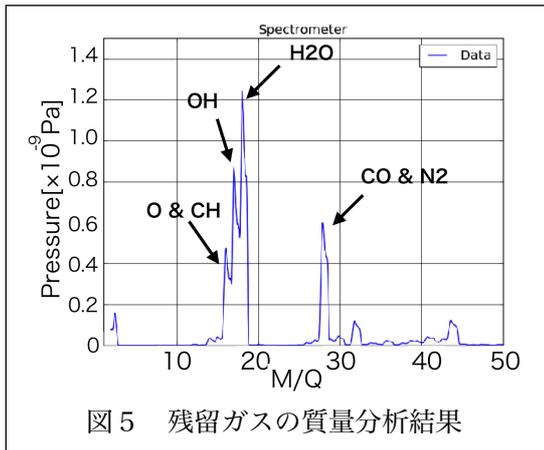
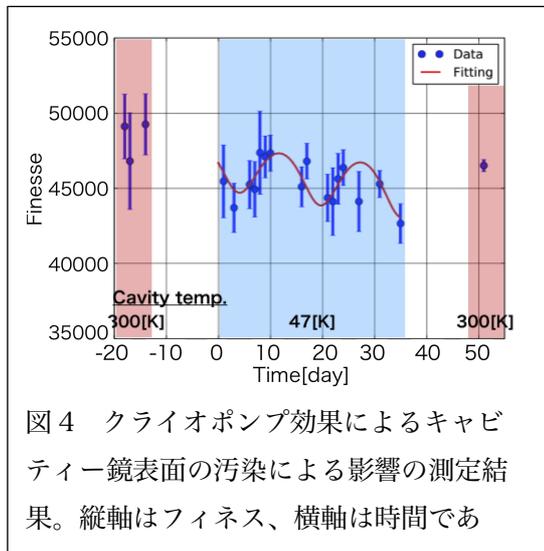
(2) 再冷却時間の短縮

鏡表面に吸着された残留ガスをクリーニングするためには、鏡を昇温させる事が有効であるが、KAGRA の冷凍システムは小型冷凍機を用いた伝熱冷却方式であるため、昇温と冷却に非常に長い時間がかかる。当初の見積では、1つの熱サイクルに2ヶ月かかると見込まれていた。

そこで、まず、熱サイクルを短くするような工夫を行った。まず、昇温については、極低温実験でよくやられる手法であるが、窒素ガスをクライオスタット内に導入して断熱を破り、昇温をスピードアップする方法を試した。また、冷却については熱伝導材料の特性に寄るところが多く、超高純度アルミニウムのヒートリンクを開発して冷却スピードの向上を試した。

(3) 汚染鏡の局所的加熱

クライオスタット全体を昇温・再冷却させると非常に長い時間を要するため、残留ガス吸着で汚染した鏡表面だけを局所的に加熱し、残留ガスを除去する手法の開発を試みた。当初プランでは CO₂ レーザーを用いて鏡部分だけを局所的に昇温させる方法を模索したが、この方法だと CO₂ レーザーパワーが 100W 必要になり、クライオスタット内へレーザーを導入する窓の熱破壊などのリスクが生じるため、光刺激脱離の検討を行った。この方法では、(1)の結果から明らかとなった残留ガスの主成分である水分子の内部振動モードに着目し、この吸収線である 3 μ m のレーザーで水分子を強制振動・脱離させようというものである。本研究については、残念ながら理論的検証を行ったのみで、実験的検証までは到達出来なかった。



4. 研究成果

上記の3つの項目ごとに達成された研究成果を述べる。

(1) KAGRAにおけるクライオポンプ効果による鏡の残留ガス吸着効果の再評価

図4は KAGRA クライオスタットを用いた Fabry-Perot cavity 鏡表面へのガス吸着汚染の影響を調べたものである。横軸は時間

(日)、縦軸はキャビティーのフィネスである。フィネスは鏡反射率の関数で表されるため、汚染による反射率の変化を反映していると考えて良い。また、図5はこの実験中の残留ガスの質量分析結果である。この結果から、鏡の表面を汚染する残留ガスの主成分は水分子であることが分かる。図4の赤いラインは、水分子が鏡表面に吸着された場合の表層反射率をモデル化し、フィッティングしたものである。残念ながら極低温での水分子の波長1064nmにおける屈折率のデータはあまり存在しないようで、これに関してもフリーパラメータとした。図4で観測されたフィネスの振動は、水分子層が鏡表面に堆積していった結果、光路長が波長の1/4になったところで弱め合い、1/2になったところで強め合う干渉効果を反映している。このフィッティング結果から水分子層の成長スピードは $26.8 \pm 0.02 \text{ nm/day}$ と結論づけられた。

さらに、この結果をKAGRA望遠鏡に当てはめると、パワーリサイクリングゲインという光の増幅効率が1年で11から9に減少し、何らかの対策が必要なが分かった。

本研究成果は、本研究終了後の2018年6月の国際会議で発表済みで、現在Physical Review D誌へ投稿準備を進めているところである。

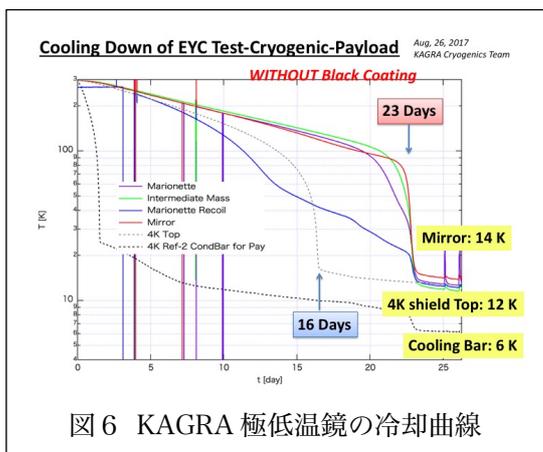


図6 KAGRA 極低温鏡の冷却曲線

(2) 再冷却時間の短縮

図6は、超高純度アルミニウムヒートリンクを用いた場合のKAGRAクライオスタットの冷却曲線である。当初冷却だけで40日かかる設計であったが、超高純度アルミの導入により23日まで短縮することに成功した。また、この図には載っていないが、窒素ガスをクライオスタットに1Pa程度注入することで断熱真空を破ることを試したところ、昇温時間が4~5日まで短縮することが出来た。以上から、現在のKAGRAクライオスタットのオペレーションの工夫で、1回の熱サイクルを1ヶ月程度と半減させる事に成功した。

(3) 汚染鏡の局所的加熱

吸着水分子の光脱離による除去を検討したが、残念ながら実験までは到達出来なかった。しかし、波長 $3 \mu\text{m}$ 、パワー密度 375 kW/cm^2 のレーザー照射でこれが達成出来ることは計算から求められた。

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)

〔雑誌論文〕 (計 4件)

- ① 「KAGRAにおける極低温鏡懸架システム」, 都丸隆行, 機械学会誌
- ② “Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope: KAGRA”, T. Tomaru, Proceedings of Moriond conference 2015: Gravitation”
- ③ “KAGRA-Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope-”, T. Tomaru, Proceedings of 12th International Conference of Gravitation and Cosmology
- ④ 「一般相対性理論誕生100周年 重力波望遠鏡 KAGRA の真空と低温」, 都丸隆行, 真空ジャーナル (2015年7月)

〔学会発表〕 (計 13件)

- ① “Study of molecular adlayer on cooled mirrors”, K. Hasegawa, S. Miyoki, T. Tomaru et al., Gravitational wave Advanced Detector Workshop, Alaska, USA, (2018.6)
- ② 「重力波検出器 KAGRA における腕共振器用低温サファイア鏡への残留ガスの吸着とその解消法の開発(2)」, 長谷川邦彦, 三代木伸二, 都丸隆行 他, 物理学会第73回年次大会 (2018.3)
- ③ “Cryogenics in KAGRA”, T. Tomaru, CERN-GW Joint Meeting, CERN (2017.9)
- ④ 「重力波検出器 KAGRA における腕共振器用低温サファイア鏡への残留ガスの吸着とその解消法の開発(1)」, 長谷川邦彦, 三代木伸二, 都丸隆行 他, 物理学会秋期大会 (2017.9)
- ⑤ 「重力波と技術」, 都丸隆行, 第13回日本加速器学会 (2017.9) (招待講演)
- ⑥ “KAGRA Cryogenic System”, T. Tomaru, the 3rd international workshop on KAGRA, (2017.5)
- ⑦ “Present Status of KAGRA cryogenic systems”, T. Tomaru, the 2nd international workshop on KAGRA, (2016.11)
- ⑧ “KAGRA Status”, T. Tomaru, the 1st international workshop on KAGRA, (2016.6)

- ⑨ “Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope: KAGRA”, T. Tomaru, Optics & Photonics International Congress 2015 / Conference on Laser Energetics 2015, Yokohama (招待講演)
- ⑩ “Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope: KAGRA”, T. Tomaru, Moriond conference 2015: Gravitation, La Tuile, Italy (招待講演)
- ⑪ “KAGRA-Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope-”, T. Tomaru, 12th International Conference of Gravitation and Cosmology (2015.7)
- ⑫ 「重力波望遠鏡 KAGRA の観測デッドタイムの解消」, 都丸隆行, 日本物理学会 2014 年秋季大会
- ⑬ 「重力波天文学」, 都丸隆行, 電子情報通信学会、宇宙・航行エレクトロニクス研究会 (2014.6) (特別講演)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

都丸 隆行 (TOMARU Takayuki)
高エネルギー加速器研究機構・
超伝導低温工学センター・准教授
研究者番号：80391712

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

鈴木 敏一 (SUZUKI Toshikazu)
高エネルギー加速器研究機構・
超伝導低温工学センター・教授
研究者番号：20162977

木村 誠宏 (KIMURA Nobuhiro)
高エネルギー加速器研究機構・
超伝導低温工学センター・准教授
研究者番号：10249899

斉藤 芳男 (SAITO Yoshio)
高エネルギー加速器研究機構・
加速器研究施設・教授
研究者番号：00141979

高田 卓 (TAKADA Suguru)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号：30578109

(4)研究協力者

長谷川 邦彦 (HASEGAWA Kunihiko)
東京大学大学院理学系研究科