

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06204・20K20286

研究課題名（和文）第三世代重力波望遠鏡用の新素材鏡開発

研究課題名（英文）New mirror substrate and coating film for the third generation gravitational wave telescope

研究代表者

三代木 伸二（MIYOKI, Shinji）

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：20302680

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、重力波の初検出を目指し、かつそれを達成した第二世代重力波望遠鏡の感度をおおよそ10倍程度改善することで、重力波波形の精密観測と、観測統計量の飛躍的増大を目指す第三世代重力波望遠鏡で想定される様々な要素技術のうち、第二世代重力波望遠鏡開発までに培われた鏡基材と薄膜製造技術を完全に刷新する技術に関する研究である。結果、第三世代重力波望遠鏡の鏡基材として想定される、高品質シリコン基材、サファイア基材の入手の可能性が高まり、かつ結晶性コーティングに関しては、現有の製造原理や手法、そして、損失の修正手法に問題はなく、大口径化に特化した大型装置の開発の必要性が改めて強く認識された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

第三世代重力波望遠鏡を実現するために必要な要素技術の内、高品質鏡基材と低熱雑音薄膜コーティング技術の見通しに関する研究が進んだことにより、その第三世代重力波望遠鏡の実現に一步近づくことができた。これにより、従来の電磁波観測では入手できない、ブラックホールという未踏未開世界からの情報をより高頻度に、より精密に計測することが可能になることで、人類の宇宙に関する知識に革新をもたらすことが期待される。

研究成果の概要（英文）：This research is aimed to completely renew techniques to produce mirror substrate and coating films in order to realize the third-generation generation gravitational wave telescope(GWT) whose sensitivity is targeted to be roughly 10 times higher than the second generation GWTs, that were constructed for the first GW detection and actually realized GW detections, for the more precise GW wave form detection and the drastic enhancement of detected GW event numbers. As a result, the availability of high-quality silicon and sapphire substrates, which are expected to be used as mirror substrates for the third-generation GWTs, was verified. Although the present manufacturing principle, technology, and loss mitigation strategy for the crystalline coating were verified to be reasonable, we need to develop a large size manufacturing machine for the large diameter crystalline coating.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 シリコン結晶 結晶性薄膜 赤外線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2015年9月14日に、史上初めて、アメリカの重力波望遠鏡(Advanced LIGO)が連星ブラックホールの合体からの重力波を検出した。これは1915年にアインシュタインの一般相対性理論で予測された重力波を直接的に検証した偉業であるとともに、ブラックホール、及び連星ブラックホールがこの宇宙に存在することの直接的証明でもある。さらに2015年12月26日にも連星ブラックホールの合体からの重力波の信号が発見され、重力波の複数検出により、非常に強い重力場における一般相対性理論の正しさが強く示唆されると同時に、そのブラックホール連星の起源に関する宇宙論的考察も活発化し、重力波による全く新しい天文学が幕を切って落とされたといつてよいだろう。この重力波の直接検出は、 10^{-22} [rms]の重力波感度を目指した第二世代の重力波望遠鏡を完成させる途上になされたため、今後数年にわたっては、Advanced LIGOにおいても、当然この目標感度を目指すさらなる開発と調整が行われ、かつAdvanced VIRGO、KAGRAも、同等の感度を目指した改良と建設が行われ、まずはネットワーク観測の実現を当面の目標にしている。しかし、その一方で、この初検出によって初めて明確になった「重力波検出が可能となる目指すべき感度」を基準に、重力波波形の精密観測を目指した、感度を10倍程度改善した究極ともいふべき第三世代重力波望遠鏡の目指すべき基本設計も模索され、しかも、それは、LIGO、VIRGO、KAGRAをはじめとする世界の重力波望遠鏡計画に携わる研究者の代表を集めたDawn会議で、共同で行おうという議論がすでに行われている。その第三世代重力波望遠鏡では、大きなテクニカルジャンプが必要ではないかと考えられており、具体的には、「望遠用の腕の長さを10km以上」とし、「レーザー波長を $1\mu\text{m}$ から $1.5\sim 2\mu\text{m}$ 」に変更し、「鏡の基材を、熔融石英やサファイアではなく、単結晶シリコン」に変更し、「コーティング薄膜を $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ ではなく、結晶化AlGaAs」などに変更し、さらに「鏡を常温ではなく低温で使用する」というものである。もちろん、40年余にわたって培われた既存の技術のさらなる改善という方針も示されたが、逆にそれだけ年月労力をかけてもなお、特に、熱雑音を低減するのに必須の「鏡基材」と「コーティング薄膜」の損失低減改質において満足に行く結果が得られていないという限界も十分認識されており、このテクニカルジャンプの模索の必要性が益々高まっている。

2. 研究の目的

本研究では、第三世代レーザー干渉計型重力波望遠鏡に求められる、連星ブラックホールからの重力波を検出可能な感度(3×10^{-22} [rms])よりも約10倍改善された変位感度を可能にすると思われる、第二世代重力波望遠鏡開発までに培われた基盤技術とは全く異なる鏡基材とコーティング素材を利用したレーザー干渉計の可能性を探る研究である。鏡基材として、従来の合成石英やサファイアではない「単結晶シリコン」を採用し、コーティング素材として、「 $1.5\sim 2\mu\text{m}$ の新しいレーザー波長」に対応した、機械的損失を従来の $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 層よりも改善した、Alの含有率を調整したAlGaAs多層膜を採用し、基線長が100メートル程度のFabry-Perot型レーザー干渉計で要求される鏡サイズ、すなわち直径100ミリ程度の大きさで鏡を作成し、その光学的性質を明らかにすることを目的とする。

この研究による鏡基材とその薄膜コーティングの損失性能の向上により、重力波波形の精密計測を目指す第三世代重力波望遠鏡が目標とする感度のうち、特に感度向上において大きく立ち回る鏡の熱雑音の低減に寄与する基盤技術を提供し、第二世代重力波望遠鏡よりさらに大型の鏡を必要とする第三世代重力波望遠鏡の鏡の実現への道筋を明らかにする。

3. 研究の方法

初年度は、まずは、結晶AlGaAsの反射膜としての高反射率性能、及び、光学損失性能を評価するために、直径1インチ程度のサンプル鏡(曲率Flatと1m程度)をCMS社とその可能な限り高い反射率(99.99%以上)を打ち合わせながら、調達する。その反射率と光損失測定のため、その二枚の鏡で構成されるFabry-Perot共振器を構成し、その光滞在時間の計測、強度変調伝達関数測定を行い、反射率(R)推定を行う。一方、透過率(T)の測定も強度変調法など複数の方法により行い、1-T-Rから光学ロスを見積もることとする。そのための光学系を右に示す。新規に、波長 $1.5\sim 2\mu\text{m}$ で、周波数が高速調整可能なファイバーレーザー、アイソレーター、偏向素子、全反射鏡、レンズ、それらのホルダーや微調位置調整機器、EOM、AOMを用意し、組み上げる。光共振器の共振制御は、Pound-Drever-Hallで行い、AOMによる1次光遮断によるFP共振器透過光の光量減衰の時定数の測定から求まるフィネスから反射率を計算する。強度変調伝達関数測定では、AOMを用いて行いFabry-Perot共振器への光強度に変調をかけ、前後の光強度の

伝達関数を計測し、その1次ローパスフィルター特性からフィネスを推定し、同様に反射率を求める。透過率の測定は、単純に入射前後のレーザー光量の比較の他にその比較をkHz帯域の強度変調成分の比較によっても行い、精度を確認する。反射率や損失の測定は、面内の一カ所ではなく、FP共振器を構成する平面側の鏡を上下左右にスライドさせ、最初は数mm間隔で移動しながら面内反射率・損失分布測定を行い、その分布状況に応じて、間隔を狭めることも考える。これらの測定により、AlGaAsコーティングの大型化に向けた基礎的データの収集を行う。これらの測定は、全く同様の計測システムで、1064nm用鏡のダストによる反射率劣化測定を行っている博士課程の学生に行ってもらおう予定である。その一方、テストコーティング用の大口径薄型基材とウェハ型基材の調達を行う。結晶シリコンは、信越化学工業から調達することを想定している。

二年度目は、引き続き、前半半期は2017年度の内容の続きを行う。並行して、前年度に入手した大口径薄型基材(15mm厚)の超平滑平面研磨と150m曲率研磨試験を行う。目標とする局所的表面粗さは1以下(目標0.5)表面形状は理想平面・曲面に対し1/50以下(目標1/100)とする。2011年、申請者が東大宇宙線研究所・共同利用研究費で某社が試行したアモルファスシリコンに関して行った簡易研磨性能試験では、表面形状1/20、粗さ3が達成されている。さらに、シリコンはもともと柔らかい基材のため、結晶性シリコンという素材の違いはあるが、目標は十分達しようとする。表面形状を計測するためのZYGO装置や探針接触型表面形状測定装置は、国立天文台の共同利用申請を行うことにより使用可能なので、それを利用する。表面性能が確認された後、AlGaAsコート前の表面の光散乱量の測定を、積分球を用いて行う。本実験は修士課程の学生一人をあてがうことにより進める。一方コートするAlGaAsの機械的損失測定は、大口径ウェハ型シリコン基材(1mm厚)のコート前後でのウェハの機械的Q値(損失値の逆数)の比較から導く常套手段により行う。そのためのウェハ支持機構、ウェハ共振振動励起及び振動検出装置、及びそれらを格納する真空タンク一式は東大宇宙線研に既にあるため、それを利用する。本実験は修士課程の学生一人をあてがうことにより進める。一方、100mFP共振器用の大口径鏡基材の調達を開始する。

それ以降の年度は、前年度用意された、大口径薄型基盤にAlGaAsをコートし、コートされた表面散乱測定を、再度積分球を用いて行い、要請を満たしているかどうか確認する。

前年度に調達された100mFP共振器用の大口径鏡基材の研磨を行う。求める性能は、薄型と同じで、局所的表面粗さは1以下(目標0.5)表面形状は理想平面・曲面に対し1/50以下(目標1/100)とする。研磨終了後、AlGaAsコーティングを行う。この大口径鏡基材で作成された鏡二個は、東大宇宙線研が所有する低温重力波望遠鏡プロトタイプ(CLI0)の基線長100mの腕を利用してFP共振器を構成し、そこで、フィネス等の測定を行う予定であるため、そのCLI0で新たに必要となる大口径の赤外線用光学素子とそのホルダー関係を新たに調達する。前年度の用意された大口径基材鏡の透過率測定を行う。その後、この鏡を利用し、CLI0100でFP共振器制御を行うための入射光学系の構築を行う。CLI0のビームスプリッター以降の光学系は、CLI0のInline側の片腕を利用してFP共振器を構成する。鏡は、既存の防振懸架振り子の末端に装着し、その鏡のアライメントは懸架装置の最上部にある微調モーターのついたステージで行う。FP共振器の共振制御は、PDH法で行い、レーザー周波数への帰還で行う。光滞在時間測定、伝達関数測定を行い、大きなビーム径での反射率測定を行い、損失の見積もりを行う。

4. 研究成果

結晶AlGaAsの反射膜としての高反射率性能、及び、光学損失性能を評価するために必要な鏡基材のレーザー波長別吸収量評価実験、及び吸収量解析を行った。結果、準備される基材のメーカーやそのメーカーの製造条件により、予期しなかった吸収量のばらつきが見られたため、予定より多くの鏡基材サンプルを収集した上で評価実験、解析を再度行う必要が生じたため、シリコン基板の性能調査を継続した。同時に、波長1.5μmで、周波数が高速調整可能なファイバーレーザー、アイソレーター、偏向素子、全反射鏡、レンズ、それらのホルダーや微調位置調整機器、EOM、AOMを用意し、二枚の鏡によってFabry-Perot共振器を形成し、その反射率特性、ロス測定の計測系を構築した。光共振器の共振制御は、Pound-Drever-Hallで行い、AOMによる1次光遮断によるFP共振器透過光の光量減衰の定数測定から求まるフィネスから反射率を計算するシステムを構築した。強度変調伝達関数測定では、AOMを用いて行いFabry-Perot共振器への光強度に変調をかけ、前後の光強度の伝達関数を計測し、その1次ローパスフィルター特性からフィネスを推定し、同様に反射率を求める系となっている。透過率の測定系として、入射前後のレーザー光量の比較の他にその比較をkHz帯域の強度変調成分の比較によっても行い、精度を確認する系を構築した。反射率や損失の測定は、面内の一カ所ではなく、FP共振器を構成する平面側の鏡を上下左右にスライドさせる系も構築した。

次年度においては、延長して行った、多くのシリコン鏡基材の吸収率調査の結果、本実験のために必要な低吸収量を均一に持つ基材の入手が可能となり、シリコン基材の研磨技術の開発段階に移行した。一方従来の低温における鏡機材であるサファイア基材を参照とするため、サファイア基材の研磨も同時に行うこととした。シリコン基材の研磨に関しては、比較的柔らかい基材であるため、当初目標の表面研磨制度を得ることができたが、一方サファイア基材に関しては、研磨に関してより精密な研磨性能が必要であることが明らかとなった。研究遂行上、この高い性能を実現する高度な研磨技術の確立と保証を得るために、サファイア基材の研磨性能の検討を行ったうえで研磨性能調査を再開することとした。並行して、表面散乱計測装置を構築し、上記のミクロなレベルでの表面研磨性能（散乱測定）に用い、計測を継続した。さらに、ZYGO 波面計測装置を用い、グローバルな領域での英面研磨性能の評価を継続した。

次々年度には、この用意されたサファイアの複屈折量が想定以上に大きいことも判明した。それにより、入射するレーザー光が直線偏光であった場合、その 10%程度が、入射直線偏光と直行する成分に変換されてしまうことも判明した。将来の鏡基材としては、これも問題であるため、数社の製造会社を調査し、問題が解決しうる製造法があるかどうかの検討が必要となり、調査を行い、一部はサンプルを取り寄せ、性能評価とフィードバックを行ってきた。

さらに翌年度には、結晶性薄膜コート鏡の作成の検討にもはいった。直径が 1 インチ程度の大きさであれば、その損失を ppm レベルに抑制可能であることは判明したが、2 インチまで大きくすると、ディフェクトなどの影響で、大面積領域では、薄膜形成時の損失増加により、期待される低損失性能が得られないことが判明した。研究遂行上、目的とする結晶性コーティング鏡は期待される低損失性能を有することが必要不可欠なため、このディフェクトの除去のさらなる除去のための方策について、検討が必要となった。薄膜の機械的損失の計測のための実験装置のウェハ支持機構、ウェハ共振振動励起及び振動検出装置、及びそれらを格納する真空タンク一式を準備した。その後、サファイアの複屈折に関しては、特定のメーカーにおいては、直径 10cm 厚み 6cm の基材の大きさレベルにおいては、十分複屈折を抑えることが可能であることが分かった。結晶性薄膜コート鏡の作成においては、このディフェクトの内、ストレス応力によるディフェクトのロスへの影響は小さいことが判明した。それ以外のディフェクトによるロスへの影響の解明を進めている。さらに、将来の 30cm を超えるレベルの結晶性コーティング作成の道筋についても検討したが、現状の 20cm レベルの作成装置を一新し、かなりの投資を伴って進めなければならないことも判明した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ushiba Takafumi, Shinji Miyoki, 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
1. 著者名 Akutsu T, Miyoki S, et al	4. 巻 38
2. 論文標題 Vibration isolation systems for the beam splitter and signal recycling mirrors of the KAGRA 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 065011 ~ 065011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/abd922	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
1. 著者名 Akutsu T, Miyoki S, et al	4. 巻 2020
2. 論文標題 Application of independent component analysis to the iKAGRA data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 053F01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa056	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
1. 著者名 B. P. Abbott, S. Miyoki, et al	4. 巻 23
2. 論文標題 Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Living Reviews in Relativity	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41114-020-00026-9	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

1. 著者名 Tomohiro Yamada, Shinji Miyoki, and on behalf of theKAGRA Collaboration	4. 巻 1468
2. 論文標題 KAGRA Cryogenic Suspension Control toward the Observation Run 3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012217	査読の有無 無
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

1. 著者名 Koseki Miyo, Shinji Miyoki and on behalf of theKAGRA Collaboration	4. 巻 1468
2. 論文標題 Global control using a laser strainmeter for KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012217	査読の有無 無
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

1. 著者名 T. Akutsu, and KAGRA Collaboration	4. 巻 2018
2. 論文標題 Construction of KAGRA: an Underground Gravitational Wave Observatory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013F01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx180	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 -

1. 著者名 M Ando, Y Aso, R Flaminio, T Kajita, S Kawamura, N Kimura, K Kuroda, F Matsushima, N Mio, O Miyakawa, S Miyoki, Y Moriwaki, M Ohashi, K Somiya, T Suzuki, T Tomaru, T Uchiyama and KAGRA Collaboration et al.,	4. 巻 1
2. 論文標題 Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013F01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Akito Araya, Akiteru Takamori, Wataru Morii, Kouseki Miyo, Masatake Ohashi, Kazuhiro Hayama, Takashi Uchiyama, Shinji Miyoki and Yoshio Saito	4. 巻 69
2. 論文標題 Design and operation of a 1500-m laser strainmeter installed at an underground site in Kamioka, Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth, planets, and space	6. 最初と最後の頁 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 中野雅之, 三代木伸二, KAGRA Collaboration,
2. 発表標題 KAGRAの現状
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横澤孝章, 三代木伸二, KAGRA Collaboration,
2. 発表標題 重力波検出器KAGRAの現状
3. 学会等名 日本物理学会2021年春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿久津智忠, 三代木伸二, KAGRA Collaboration,
2. 発表標題 大型低温重力波望遠鏡KAGRA: 全体報告
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta MICHIMURA, Shinji MIYOKI, KAGRA Collaboration
2. 発表標題 Status of KAGRA: Instrument Updates for O4
3. 学会等名 LIGO-VIRGO-KAGRA Collaboration Meeting (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki KANDA, Shinji MIYOKI, KAGRA Collaboration
2. 発表標題 Status of KAGRA
3. 学会等名 The 14th International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC14) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三代木伸二
2. 発表標題 重力波望遠鏡KAGRAとネットワーク活用
3. 学会等名 学術情報基盤オープンフォーラム2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinji Miyoki
2. 発表標題 精密時空時計測が拓く重力波天文学
3. 学会等名 日本学術会議公開シンポジウム「新しい国際単位系(SI)重さ、電気、温度、そして時間の計測と私たちの暮らし」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.Miyoki.
2. 発表標題 Pioneering of new physics fields with technologies and knowledge obtained for gravitational wave detectors.
3. 学会等名 Second international workshop "Particles, Gravitation and the Universe" (PGU 2018) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.Miyoki, and KAGRA Collaboration
2. 発表標題 Experiences with the underground facility for KAGRA Site
3. 学会等名 Gravitational Wave Advanced Detectors Workshop (GWADW) 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinji Miyoki and KAGRA Collaboration
2. 発表標題 Present Status of KAGRA
3. 学会等名 13th International Conference on Gravitation, Astrophysics, and Cosmology (ICGAC13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三代木伸二
2. 発表標題 重力波望遠鏡に必要とされるレーザー干渉計とその周縁技術
3. 学会等名 強光子場科学研究懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川邦彦, 阿久津智忠, 井上優貴E, 木村誠宏, 三代木伸二, 鈴木敏一, 都丸隆行, 上田綾子, 斎藤芳男
2. 発表標題 重力波望遠鏡KAGRAにおける腕共振器用低温サファイア鏡への残留ガス吸着とその解消法の開発(1)
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川邦彦, 阿久津智忠, 井上優貴E, 木村誠宏, 三代木伸二, 鈴木敏一, 都丸隆行, 上田綾子, 斎藤芳男
2. 発表標題 重力波望遠鏡KAGRAにおける腕共振器用低温サファイア鏡への残留ガス吸着とその解消法の開発(2)
3. 学会等名 日本物理学会 2018年春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 両角達彦, 阿久津智忠, 三代木伸二, 都築俊宏, 道村唯太, 麻生洋一, 浦口史寛, 大淵喜之, 池之上文吾, 福島美津広, 齊藤栄
2. 発表標題 大型低温重力波望遠鏡KAGRAにおけるTransmission Monitor Systemの開発III
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 越智聡郎, 山元一広, 三代木伸二, 鈴木敏一, 木村誠宏, 小池重明, 都丸隆行, KAGRA Cryogenic Payload Group
2. 発表標題 KAGRAサイトにおけるクライオスタットの振動測定II
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 越智聡郎, 山元一広, 三代木伸二, 鈴木敏一, 木村誠宏, 小池重明, 都丸隆行, KAGRA Cryogenic Payload Group
2. 発表標題 KAGRAサイトにおけるクライオスタットの振動測定III
3. 学会等名 日本物理学会 2018年春季大会
4. 発表年 2018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
---------	---------