

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H01135

研究課題名(和文)高精度重力波振幅・位相キャリブレーションの開発

研究課題名(英文) Development of high precise amplitude and phase calibrator of gravitational waves

研究代表者

都丸 隆行 (Tomaru, Takayuki)

国立天文台・重力波プロジェクト・教授

研究者番号：80391712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、米国・台湾との国際協力によりLIGO PCALを性能アップさせたKAGRA用PCALを2台開発し、KAGRAで重力波信号較正を実施した。また、研究分担者の富山大においてPCALで重要となる光パワー絶対値の較正システムを構築し、PCALレーザーパワーを定期的に較正することでキャリブレーション精度の信頼度を向上させた。開発したPCALを用いてKAGRAの最初の本格的観測であるO3GKにおいて信号較正を実施し、最終的な信号較正精度10%を達成した。この値は主干渉計応答関数の不定性を含む値である。その後さらにPCALのノイズ低減を実施し、O4観測での目標となる単体で3%以下の精度を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力波研究は2015年に米国LIGOによる初検出が達成されてから大きく進展しており、これまでに総計90個の重力波イベントが発見されている。これらの中には謎に満ちた天体も含まれており、重力波研究は感度を追求するばかりでなく、イベントのパラメータ決定精度も追求する必要性が出てきている。このため、本研究で開発した高性能PCALは今後の重力波天文学にとって重要なものであり、KAGRAの観測においてもなくてはならないものとなった。また、米国LIGOのPCALをアップグレードしたものであることから、国際的にも較正精度向上に貢献出来るものとなっている。このように高い学術的意義を達成出来た。

研究成果の概要(英文)：In this study, two PCALs (photon-pressure calibrator for gravitational wave signals) for KAGRA, which are higher performance versions of the LIGO PCAL, were developed through international collaboration with the United States and Taiwan, and gravitational wave signal calibration was performed at KAGRA. In addition, the co-PI in the University of Toyama developed a calibration system for absolute laser power, which is important for PCAL, and the PCAL laser power was calibrated periodically to improve the reliability of the calibrator accuracy. Using the developed PCALs, we performed signal calibration of KAGRA in O3GK, the first full-scale observation of KAGRA, and achieved a final signal calibration accuracy of 10%. This value includes the indeterminacy of the main interferometer transfer-function. After that, further noise reduction of PCALs were performed, and the target accuracy of PCALs of less than 3% was achieved for the O4 observation.

研究分野：重力波天文学

キーワード：重力波 キャリブレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 2015年に米国 LIGO で重力波の直接検出に成功して以降、重力波研究は発見を競う時代から天体の質量等を決める精度の時代に突入した。しかし、検出される重力波信号の大きさは歪み量で 10^{-24} 程度の極めて小さなものであるため、信号の較正方法は確立していない状態であった。

(2) 従来良く行われていた方法は、干渉計の鏡をレーザー波長 (1064nm) 程度振って、振幅の基準に用いるものであったが、リアルタイム較正出来ない事と信号との大きさが 18 桁も離れていることから満足のいくものでは無かった。このため米国 LIGO では、光の輻射圧を用いた新しいタイプのキャリブレータ PCAL を開発し、当時導入し始めたところであった。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、米国 LIGO の支援を受けつつ、LIGO PCAL をアップグレードした高性能 KAGRA 用 PCAL を日本・台湾の国際共同研究で開発することである。具体的には、LIGO PCAL で明らかとなっていた課題を解決するため、①より大きな S/N が取れるよう PCAL レーザーのパワーを 10 倍の 20W にする、②レーザー輻射圧で鏡にトルクを与えないようにするために 2 本の照射ビームの強度変調を独立に制御する、などである。

(2) また、PCAL のレーザーパワー絶対値の精度は光輻射圧に直接寄与し、較正精度に大きな影響を与える。したがって、定期的に PCAL レーザーパワーの絶対値較正を行う事は較正精度を担保するために重要である。本研究では、PCAL の開発と同時に PCAL レーザーパワーの絶対値を較正するシステムを富山大の研究分担者が構築し、KAGRA PCAL の定期的な光パワー絶対値較正を実現する。

3. 研究の方法

(1) KAGRA PCAL の設計と製作: LIGO と KAGRA では PCAL のレーザー光の導入位置が異なるため、KAGRA 用 PCAL の光学設計を最初実施する必要がある。特に、光路長全体にわたってビーム径が小さくなるように設計することが重要である。詳細設計に基づいて、X-end 用、Y-end 用の 2 台の PCAL を製作する。

(2) 鏡弾性モードの特定: KAGRA のサファイア鏡の弾性モードシミュレーションを実施して固有モードの節に近い点を割り出し、PCAL レーザービームを照射した際に弾性モードを励起しにくい照射点を決定する。

(3) レーザーパワー絶対値較正装置の構築: 米国 NIST で光パワー 1 次較正を実施した LIGO の積分球型光検出器のコピーを作成し、このコピーを基準にして KAGRA PCAL のレーザーパワー絶対値を定期的に較正できるセットアップを富山大に構築する。

(4) KAGRA での運用: 実際に製作した PCAL 2 台を KAGRA にインストールし、信号較正を実施する。

4. 研究成果

(1) PCAL の開発 @KEK

図 1 は、KAGRA 用に開発した PCAL の光学レイアウト (左) と写真 (右) である。上段はレーザーの射出光学系 (Transmitter Module)、下段は主干渉計の鏡で反射して戻って来たレーザー光を受光する光検出器の光学系 (Receiver Module) である。光の輻射圧で鏡を加振するためには、レーザー光に強度変調をかける必要があり、Acousto-Optic Modulator (AOM) により実現している。鏡の弾性固有モード解析から鏡中心より半径 6.5cm ほど離れた位置が最も弾性モードを励起しにくいことがわかり、この位置の上下 2 点に PCAL ビームを照射することとした。ビームを 2 点に照射する理由は、1 点照射だと鏡にトルクを与えてしまうためである。LIGO PCAL の経験から、1 つの AOM で強度変調をかけてからビームを 2 つに分岐させて用いると 2 つのビームの僅かな強度やアラインメントの差からトルクが残ってしまうことが分かっていたため、KAGRA PCAL では 2 つのビームにそれぞれ AOM を導入

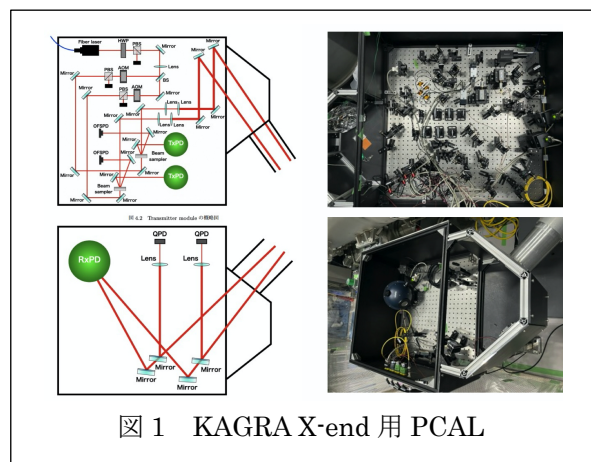


図 1 KAGRA X-end 用 PCAL

してトルクを無くすような工夫を施した。一般に AOM での強度変調はサイン波ではなく矩形波に近いので、高調波を十分低減するようなフィードバック制御を導入した。また、LIGO PCAL のレーザーパワー2W に対し、KAGRA PCAL では20W を用い、較正時の S/N を上げるように改良した。基本設計は初年度前半に完了し、後半にまず KAGRA Y-end 用 PCAL 1 台を KEK 実験室で開発した。基本性能の確認後に KAGRA にインストールし、アラインメントやノイズ調査を実施した。2 年目には X-end 用 PCAL の開発を開始し、同様に 2018 年度には KAGRA にインストールを完了した。

(2) レーザーパワー絶対値較正システムの開発 @富山大

図 2 は、富山大に構築した光パワー絶対値較正装置のレイアウトと写真である。GSK および WSK は積分球型光検出器であり、WSK は NIST で 1 次較正した LIGO の積分球型光検出器のコピー、GSK は WSK で較正した後に定期的に KAGRA PCAL へ持ち込み PCAL レーザーパワー絶対値の較正に用いる積分球である。積分球較正用のレーザーは PCAL とは独立に専用のものを富山大に設置した。

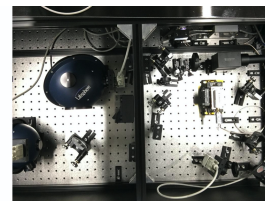
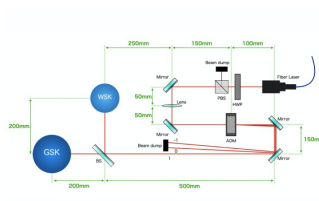


図 2 富山大に構築したレーザーパワー絶対値較正（積分球型光検出器較正）システム

最終的に構築した富山大の積分球較正装置の較正精度は 0.3% であった。この値は最終的な KAGRA での較正精度よりも十分小さなものである。一方、本研究の途上で NIST 等国際標準機関での 1 次標準値に最大 4% のバラツキがあることが判明し、光パワー絶対値にはバイアスがある可能性が分かった。これは今後の研究課題である。

(3) KAGRA での運用

KAGRA 自身の建設スケジュールの遅れと新型コロナの世界的蔓延による第 3 期国際重力波観測 (O3) の短縮により KAGRA の初観測は O3 に間に合わなかったが、2020 年 4 月にドイツの GEO600 と国際共同観測 (O3GK) を実施し、本研究で開発した PCAL を用いた信号較正を実現した。残念ながら Y-PCAL は故障してしまい運用できなかったため、X-PCAL のみを用いた較正を行った。図 3 は、O3GK 時に PCAL での較正信号を注入した KAGRA の感度曲線の一部である。感度曲線を計算する際に主干渉計の異なる伝達関数を用いる必要があり、それぞれの伝達関数領域 (図 3 では 29.5Hz、79.7Hz、859.7Hz) に較正信号を注入した。O3GK 時の KAGRA の感度は連星中性子星合体レンジで 1Mpc と米国 LIGO の 1/100 に過ぎなかったが、20W のハイパワーレーザーを導入したおかげで十分な S/N で PCAL 信号を注入することが出来た。この時の最終的な信号較正精度は、振幅で 10%、位相で 10° 程度であった。これは主として主干渉計の伝達関数が不安定であることから来ており、PCAL 自身の較正精度は 3% 程度であった。

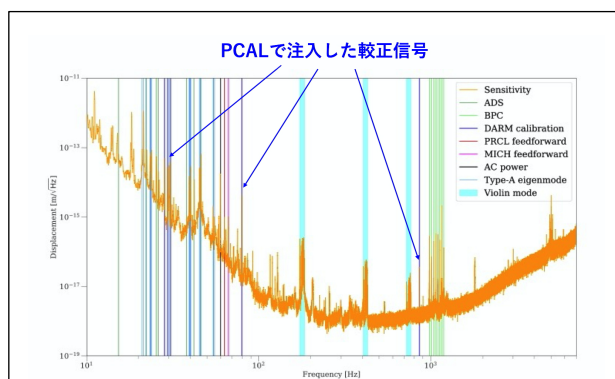


図 3 O3GK 時に PCAL での較正信号を注入した KAGRA の感度曲線の一部。

しかし、この PCAL の較正精度およびノイズレベルは第 4 期国際重力波共同観測 (O4) における KAGRA の目標感度 (最大 25Mpc 程度) に対しては不十分であり、2020-2021 年度には O4 へ向けた PCAL の改造を実施した。まず、Y-PCAL の修理を実施し、X-, Y-PCAL ともに運用出来る体制とした。これは、両 PCAL を差動で動かす事により重力波の模擬信号を生成出来るようになったことを意味し、純粋な較正だけでなくデータチェックでも有用となった。次に PCAL レーザービームの光学ロス改善し、X-PCAL で 6%、Y-PCAL で 3% を実現した。このロスの較正精度へのインパクトはそれぞれ 2%、1% で、目標とする 3% 較正精度を実現出来る見込みである。また、PCAL の高調波および制御ノイズの低減を実施し、10-100Hz において KAGRA の最終目標感度よりはやや大きいものの O4 目標感度よりは 1 桁小さな値を実現した。

このように、本研究で開発した PCAL および光パワー絶対値較正システムは当初目標を十分に達成する成果を上げ、今後の重力波観測で重要な役割を果たすことができるようになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Takafumi Ushiba, Takayuki Tomaru 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 Class. Quantum Grav.	6. 最初と最後の頁 85013
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 KAGRA collaboration	4. 巻 2021
2. 論文標題 Overview of KAGRA: Calibration, detector characterization, physical environmental monitors, and the geophysics interferometer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 1-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab018	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 KAGRA collaboration	4. 巻 2020
2. 論文標題 Overview of KAGRA : Detector design and construction history	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa125	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 KAGRA collaboration	4. 巻 2021
2. 論文標題 Overview of KAGRA : KAGRA science	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 1-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa120	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 LIGO-Virgo-KAGRA collaboration	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 1-69
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 KAGRA collaboration	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 Prog. Theor. Exp. Phys.	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 KAGRA collaboration	4. 巻 37
2. 論文標題 An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Class. Quant. Grav.	6. 最初と最後の頁 35004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab5c95	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 Akutsu T, et.al, KAGRA collaboration	4. 巻 36
2. 論文標題 First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 165008-165008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab28a9	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 KAGRA collaboration	4. 巻 3
2. 論文標題 KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 35-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-018-0658-y	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 Yuki Inoue, Sadakazu Haino, Nobuyuki Kanda, Yujiro Ogawa, Toshikazu Suzuki, Takayuki Tomaru, Takahiro Yamamoto, and Takaaki Yokozawa	4. 巻 98
2. 論文標題 Improving the absolute accuracy of the gravitational wave detectors by combining the photon pressure and gravity field calibrators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 22005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.022005	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 都丸 隆行	4. 巻 120
2. 論文標題 KAGRAにおける極低温鏡懸架システム	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会誌	6. 最初と最後の頁 -
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 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 -

〔学会発表〕 計44件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Dan Chen
2. 発表標題 重力波望遠鏡KAGRAのための較正手法の開発
3. 学会等名 春季日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dan Chen
2. 発表標題 Status of KAGRA calibration toward O4
3. 学会等名 7th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koki Ito
2. 発表標題 Calibration of PCal Laser Power with O3GK
3. 学会等名 7th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hsiang-Yu Huang
2. 発表標題 Improvement of calibration error method with higher order harmonics
3. 学会等名 7th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Honglin Lin
2. 発表標題 Study of the frequency domain analysis method to estimate calibration errors
3. 学会等名 7th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koki Ito
2. 発表標題 重力波望遠鏡 KAGRA におけるレーザーの輻射圧を用いた較正 2
3. 学会等名 日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Sawada
2. 発表標題 KAGRA観測運転における低遅延パイプライン
3. 学会等名 秋期日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Sawada
2. 発表標題 KAGRA-Calibration at O3GK
3. 学会等名 LIGO-Virgo-KAGRA meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田崇広, KAGRA collaboration
2. 発表標題 重力波望遠鏡KAGRAにおける重力波信号再構成と較正
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大柿航 他
2. 発表標題 レーザー波長を用いたKAGRA干渉計の光学利得較正(1)
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Tomaru
2. 発表標題 ADVANCED TECHNOLOGIES IN KAGRA; -LARGE-SCALE CRYOGENIC GRAVITATIONAL WAVE TELESCOPE-
3. 学会等名 天文台技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Tomaru
2. 発表標題 Cooling System of KAGRA
3. 学会等名 Gravitational wave science and technology symposium 2019 (GRASS209) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 都丸隆行
2. 発表標題 重力波望遠鏡KAGRA
3. 学会等名 KAGRA完成記念シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Tomaru
2. 発表標題 Cryogenic Mirror System in KAGRA
3. 学会等名 13th Amaldi Conference on Gravitational Wave, Valencia, Spain (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Tomaru
2. 発表標題 LARGE-SCALE CRYOGENIC GRAVITATIONAL-WAVE TELESCOPE: KAGRA
3. 学会等名 24th Science in Japan Forum, Washington DC, US (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Tomaru
2. 発表標題 Future Plan in/from KAGRA
3. 学会等名 Vacuum Fluctuation at Nanoscale and Gravitation conference, Sardinia, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Tomaru
2. 発表標題 KAGRA Status -Gravitational wave telescope in Japan-
3. 学会等名 Vacuum Fluctuation at Nanoscale and Gravitation conference, Sardinia, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤田崇広
2. 発表標題 KAGRAにおける光輻射圧を用いた重力波波形注入試験
3. 学会等名 物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富上由基
2. 発表標題 KAGRAにおける光輻射圧較正レーザー照射位置測定のための画像解析
3. 学会等名 物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大柿航
2. 発表標題 KAGRAにおける光輻射圧キャリブレーションの制御回路改良後の性能評価
3. 学会等名 物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本尚弘
2. 発表標題 KAGRA本格観測に向けたキャリブレーション、キャリブレーション手法の開発
3. 学会等名 物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神田展行
2. 発表標題 キャリブレーションの系統誤差効果を考慮したKAGRAシミュレーションデータ
3. 学会等名 物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤田崇広
2. 発表標題 bKAGRA phase 1 における較正精度の見積もり
3. 学会等名 物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小坂井千紘
2. 発表標題 KAGRA における光輻射圧キャリブレーションの開発
3. 学会等名 物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土田怜
2. 発表標題 重力波検出器KAGRAにおける伝達関数測定とモデル作成
3. 学会等名 物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本尚弘
2. 発表標題 低温干渉計KAGRAの試験運転におけるキャリブレーション
3. 学会等名 物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu-Kuang Chu
2. 発表標題 Development of KAGRA Photon Calibrator
3. 学会等名 4th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上優貴
2. 発表標題 Progress of the Large-Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope KAGRA
3. 学会等名 2018年台湾物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Bin-Hua Hsieh
2. 発表標題 Development and Characterization of Optical Follower Servo of Photon Calibrator for KAGRA Gravitational Wave Observation
3. 学会等名 2018年台湾物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu-Kuang Chu
2. 発表標題 Application of Photon Calibrator in Hardware Injection Test for Kagra Gravitational Wave Detector
3. 学会等名 2018年台湾物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Inoue et al.
2. 発表標題 Calibration of bKAGRA
3. 学会等名 3rd KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Shishido et al.
2. 発表標題 Beam position monitor system of KAGRA Photon Calibrator
3. 学会等名 KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Inoue et al.
2. 発表標題 KAGRA calibration and waveform accuracy
3. 学会等名 Gravitational wave Physics and Astronomy Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 穴戸 高治 他
2. 発表標題 KAGRAにおける輻射圧キャリブレーションのためのレーザー位置評価システムの開発
3. 学会等名 物理学会2017秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上 優貴 他
2. 発表標題 重力波干渉計KAGRAのための輻射圧キャリブレーションの開発と評価
3. 学会等名 物理学会2017秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Bin-Hua Hsieh et al.
2. 発表標題 Development and Characterization of Optical Follower Servo for Photon Calibrator
3. 学会等名 物理学会2017秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 穴戸 高治 他
2. 発表標題 大型重力波干渉計KAGRAの低温懸架系における冷却時の鏡の位置変動のモニタリングとフィッシングロッドの動作試験との比較
3. 学会等名 物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上優貴
2. 発表標題 重力波干渉計KAGRAのためのキャリブレーションシステムの構築
3. 学会等名 物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Bin-Hua Hsieh
2. 発表標題 Development and Characterization of Optical Follower Servo for Photon Calibrator for KAGRA Gravitational Wave Observation
3. 学会等名 物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 都丸 隆行
2. 発表標題 重力波検出と技術
3. 学会等名 第14回日本加速器学会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takayuki Tomaru
2. 発表標題 Cryogenics in KAGRA
3. 学会等名 CERN-GW Joint Meeting（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yu-Kuang Chu
2. 発表標題 Application of Photon Calibrator in Hardware Injection Test for Kagra Gravitational Wave Detector
3. 学会等名 2018年台湾物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Bin-Hua Hsieh
2. 発表標題 Development and Characterization of Optical Follower Servo of Photon Calibrator for KAGRA Gravitational Wave Observation
3. 学会等名 2018年台湾物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上優貴
2. 発表標題 Progress of the Large-Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope KAGRA
3. 学会等名 2018年台湾物理学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 伊藤光希	4. 発行年 2021年
2. 出版社 富山大学大学院理工学研究科教育部物理学専攻 修士論文	5. 総ページ数 56
3. 書名 重力波望遠鏡KAGRAにおけるレーザーの輻射圧を用いた較正	

1. 著者名 Tomohiro Yamada	4. 発行年 2021年
2. 出版社 University of Tokyo, PhD thesis	5. 総ページ数 144
3. 書名 Low-Vibration Conductive Cooling of KAGRA Cryogenic Mirror Suspension	

1. 著者名 大柿航	4. 発行年 2020年
2. 出版社 東京大学修士論文	5. 総ページ数 77
3. 書名 重力波望遠鏡KAGRAにおけるレーザー波長を用いた重力波信号の較正	

〔産業財産権〕

〔その他〕

国立天文台重力波プロジェクト https://gwpo.nao.ac.jp 富山大学理学部物理学科レーザー物理学研究室 http://www.sci.u-toyama.ac.jp/phys/5ken/KAGRA https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp
--

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
研究分担者	鈴木 敏一 (Suzuki Toshikazu) (20162977)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・ダイヤモンドフェロー (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分担者	森脇 喜紀 (Moriwaki Yoshiki) (90270470)	富山大学・学術研究部理学系・教授 (13201)	

	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
研究 協力者	井上 優貴 (Inoue Yuki)		
研究 協力者	謝 秉樺 (Hsieh Bin-Hua)		
研究 協力者	小坂井 千紘 (Kozakai Chihiro)		
研究 協力者	澤田 崇広 (Sawada Takahiro)		
研究 協力者	ユウカン チュウ (Chu Yu-Kuang)		
研究 協力者	宍戸 高治 (Shishido Takaharu)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	富上 由基 (Tomigami Yuki)		
研究協力者	大柿 航 (Ogaki Wataru)		
研究協力者	伊藤 光希 (Ito Koki)		
連携研究者	陳 たん (Chen Dan) (20888086)	国立天文台・重力波プロジェクト・特任研究員 (62616)	
連携研究者	山本 尚弘 (Yamamoto Takahiro) (00796237)	東京大学・宇宙線研究所・助教 (12601)	

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