

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03972

研究課題名（和文）ねじれ型重力波望遠鏡の高感度化と低周波数重力波探査

研究課題名（英文）Torsion-type gravitational wave antenna for low-frequency observation

研究代表者

安東 正樹（Ando, Masaki）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：90313197

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：ねじれ型重力波望遠鏡TOBAの開発を進めた。4Kという低温下で懸架系およびねじれ振り子を動作させることに成功し、熱雑音抑制のための重要な成果を挙げた。また、能動防振によって地面振動の影響を1/100以下に抑えること、レーザー干渉計を用いた角度センサの原理実証、ねじれ振動の熱雑音の評価研究など成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低周波数での重力波観測によって、連星合体前の情報やより重たいブラックホールの観測が可能になる。本研究はその重力波観測に向けた重要な一歩となるものである。

研究成果の概要（英文）：We developed a low-frequency gravitational wave antenna using torsion pendulum. We obtained some scientific results in a cryogenic operation of torsion pendulum, active isolation system, new-type of laser interferometric angular sensor, and Q-measurement of torsion pendulum

研究分野：重力波宇宙物理学

キーワード：重力波 ねじれ振り子 低温懸架 熱雑音 能動防振 レーザー干渉計

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

重力波は、超新星爆発や連星合体などの宇宙で最も激しい天体現象、もしくは、初期宇宙での時空の揺らぎなど、極限的な現象で生成される。電磁波が天体表面部や周辺ガスから放射されるのに対して、重力波は質量運動に起因して放射され、強い透過力を持つため、天文現象の内部を直接観測する新しい手段となり得る。このことから、電磁波と重力波で同時に観測を行うことで、高エネルギー天体現象の総合的理解が期待できる。このような科学的動機付けのもと、現在、主に数 10Hz 以上の周波数帯をターゲットとし、日本の KAGRA 計画をはじめとして、欧米においても第二世代の大型レーザー干渉計重力波望遠鏡の建設が進められ、重力波の最初の検出がなされ、「重力波天文学」が本格的に幕をあける見込みである(その後、2016 年 2 月に重力波初検出の発表がなされた)。

その一方で、研究代表者らは、低周波数帯に感度を持つ重力波望遠鏡を地上で実現する新しい手法として、ねじれ型重力波望遠鏡(Torsion-bar Antenna, TOBA)を考案し、発表している。これは、直交した方向に向けられた 2 本の棒状試験質量を、それぞれねじれ振り子として懸架し、それらの差動回転変動から重力波信号を読み取る、というものである。原理的な感度の見積もりによると、長さ 10m 程度の棒状試験質量を用いるなど、比較的現実的な装置構成で、太陽の 10 万倍の質量をもつブラックホール連星合体現象を約 10Gpc の距離まで観測することが可能である。これにより、超巨大ブラックホールや銀河の形成、初期宇宙からの背景重力波などに対して独自の科学的知見を得ることが期待できる。申請者らは、TOBA のアイデアを示すだけでなく、長さ 20cm 程度の棒状試験質量を用いた小型プロトタイプ検出器の開発とそれを用いた観測運転を進めてきた。これまでに短期間の観測によって 0.2Hz の背景重力波に対する世界で最初の上限值を与えるという成果を挙げている。また、東京と京都に設置された 2 台の装置による同時観測運転も実施し、その結果を発表している。さらには、それらの成果を受け、2012 年度からは、長さ 1m 程度の棒状試験質量を用い、低温化することで大幅に感度を高めた中型プロトタイプの開発を進めてきた。その結果、0.1 から 1Hz の周波数帯で $10^{(-10)} \text{ Hz}^{(-1/2)}$ 程度というこれまでの最高感度を実現している。さらには、光ファイバ干渉計を用いた試験マスの他自由度同時モニタとそれによる到来重力波の偏波や波源位置といったパラメータ分離の手法など、あらたなアイデアも生み出されている。その一方で、低周波数の地面振動やドリフトの影響、光ファイバ光学系に起因する雑音など、改善すべき点も明らかになっている。また、この装置では比較的簡便なデジタル制御・データ取得装置、市販のデータロガーなどが用いられており、現在建設が進められている KAGRA などを用いられている本格的な観測システムとの整合性は取れていない。

2. 研究の目的

本研究では、現在 1Hz 以下の低周波数帯で世界最高感度を持つねじれ型重力波望遠鏡 TOBA の高感度化と、本格的な観測・データ処理システムを用いた観測運転を行い、KAGRA(かぐら)などの第二世代大型干渉計型重力波望遠鏡で得られたデータと組み合わせたデータ解析手法の開発研究を行う。その結果、KAGRA 等が主な観測ターゲットとしている連星中性子星合体現象に対する早期アラートの実現など、低周波数帯における多様な重力波天体現象観測の可能性を広げるとともに、低周波数帯における重力場勾配雑音の除去など、大型レーザー干渉計の低周波数感度を向上させる手法を開発することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、本格的な観測を実現する高感度重力波望遠鏡を構築することを目的としている。ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA のこれまでの開発から、その感度が低周波数の地面振動やドリフト、ファイバレーザー干渉計に起因する雑音によって制限されているという知見が得られている。それらの雑音を低減するため、本研究の最初の段階として、試験マス・光学系・懸架装置を一新する。TOBA は、懸架された棒状試験マスの回転変動をモニタすることを原理としている。しかし、回転変動以外の自由度の地面振動やドリフトが、懸架装置の非対称性や試験マス形状の誤差などとカップルして回転変動として現れてしまうことが問題になっている。そこで、本研究では、試験マスやそれを含む光学系を、モノリシック光学系に置き換えるとともに、非対称性の影響を十分に考慮した懸架系を構築する。試験マスの回転変動読み取りの際に生じる他自由度からのカップリングは、懸架点と試験マス重心のずれと試験マス表面の平坦度起因している。これは、アルミニウム製の棒状試験マスに鏡や懸架クランプを取り付けたやや複雑な構成であったことが原因であった。そこで本研究では、熔融石英製のモノリシック試験マスを用いる。表面に $1/10$ 程度の光学研磨処理を行ったうえで直接鏡コーティングを行うことで表面の平坦度を大幅に向上させることが可能になる。また、低周波数の地面振動やドリフトの影響を抑えるために、変動読み取りのための光学系も熔融石英製の光学台状に光学素子を紫外線硬化樹脂で直接接着したものをを用いる。これによって強固な光学系を実現し、地面振動に対する振動感度を大幅に低減するとともに、外界温度変動に起因する熱膨張の影響を低減することが期待できる。また、懸架装置の設計においては、3 段振り子装置のシミュレーションモデル構築し、各自由度の変動からのカップリングを系統的に評価し、クランプ位置や重心バランスといった要求値を明確にした上で製作を行う。これまでの初期段階の評価では、機械加工精度の要求値は十分に実現可能なものになる見込みである。さらに試験マスと光学台を同一の上段マスから懸架するこ

とで、地面振動や傾斜などに対する同相変動の除去も考慮する。これにより目標感度が実現できる見通しが得られている。

4. 研究成果

本研究では、長さ 35 cm の棒状マスをを用いた小型プロトタイプ (Phase-III TOBA) の開発を進め、その高感度化のために必須となる技術を確立するとともに、低温下でのねじれ振り子動作を実現した。

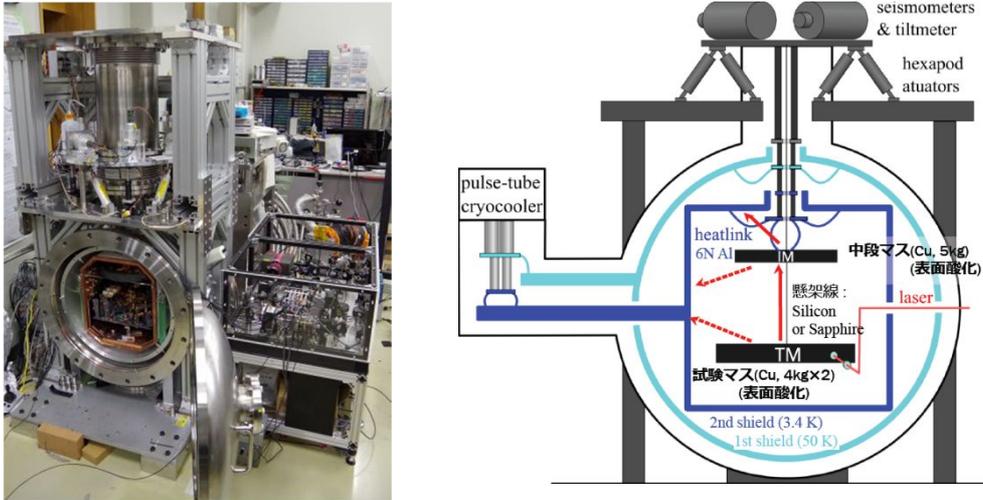


図 1: 中型低温 TOBA の外観(左)と概略図(右).

4.1 低温ねじれ振り子動作の達成

目標感度達成において最も障害となる雑音の一つが懸架ワイヤの熱的な揺らぎ (サスペンション熱雑音) であり、雑音を十分に低減するためには(1) 懸架ワイヤの低温化 (目標温度: 4 K) および (2) 低エネルギー散逸ワイヤの開発 (目標 Q 値: 10^8) が求められる。この低温化の開発を進め、プロトタイプねじれ振り子を 4.8 K まで冷却することに成功した。さらに低温下での振り子回転計測を実現し、その信号をもとに低温ねじれ振り子の雑音調査なども行った。35 cm スケールのねじれ振り子に対して低温化・雑音調査が行われた先行研究はなく、これらは本研究で初めて達成された。

雑音調査では冷却された振り子に対して外部磁場変動や温度変動を印加し応答を調べるなどした。その結果、低温下では磁場変動に対する応答が増大してしまうことが明らかになったが、これは振り子材質の無酸素銅の電気伝導度が増大し、誘導電流を介した電磁力が大きくなっているためだと解釈されている。これらの結果は将来的に磁気シールドの導入などが必要となることを示しており、今後の TOBA の高感度化に向けて技術的に重要な知見を与えるものとなった。

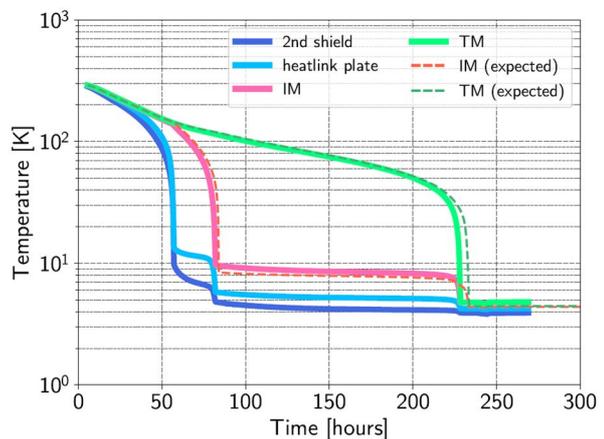
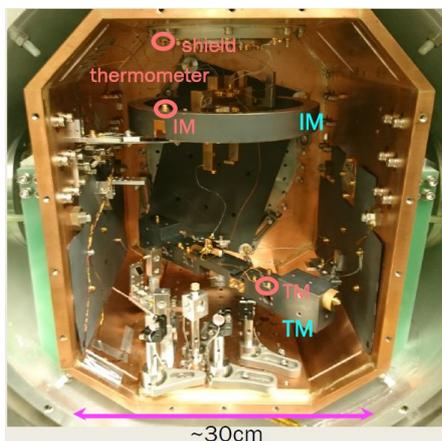


図 2: TOBA クライオスタット内部写真(左)と実現された冷却曲線 (右).

4.2 能動防振系の開発

TOBA の主要な雑音の一つが地面振動雑音である。地面振動雑音は、地面の回転振動がねじれ振り子を揺らす回転地面振動と、地面の並進振動が振り子の何らかの非対称性を介してねじれ方向の信号にカップルするカップリング雑音に大別される。先行研究によって、Phase-III TOBA においては地面の並進振動が振り子の非対称性を介してねじれ方向の変動を引き起こすカップリング雑音が特にカップリング雑音が支配的であることが明らかになっており、目標感度実現のためにはこれを低減する必要がある。カップリング雑音は、系の非対称性に起因するカップリング係数と並進地面振動の積で与えられる。そこで我々は、能動防振により並進地面振動の低減することを目指した。地面振動の防振には一般に受動防振が用いられているが、TOBA の観測帯域である 0.1 Hz 付近を受動防振するのは一般には容易ではない。我々は、フィードバック制御を用いて地面振動を低減する、能動防振系の開発を進めた。その結果、防振系が設置されているフレームをより強固なものに変更することで機械共振による制御の安定性を高めることに成功し、並進 3 自由度の同時制御に成功した。また低周波数帯に余分な振動を導入する傾斜変動を読み取る傾斜計の開発を進め、懸架系の構築が完了した。

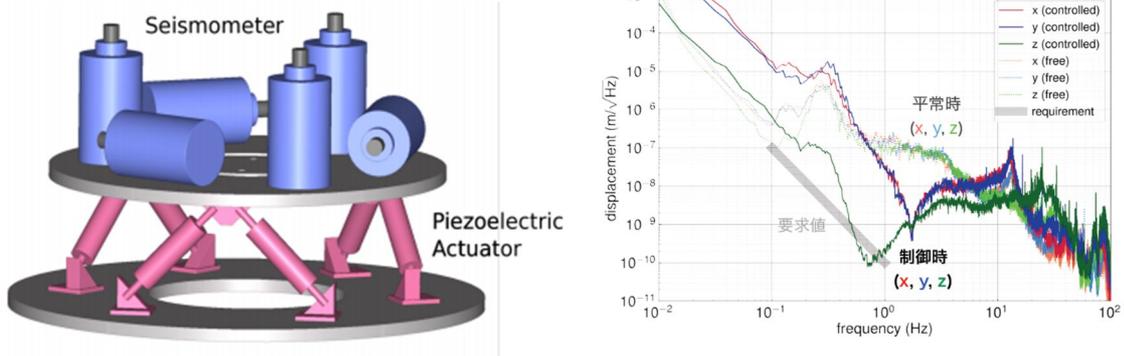


図 3: 懸架点の能動防振計の概略図 (左)と実現された能動防振性能 (右)。

4.3 地面振動カップリングの低減

地面の回転が伝達され振り子が回転する回転地面振動雑音と、地面の並進が何らかの非対称性を介して振り子の回転信号に伝達される並進地面振動カップリング雑音、に大きく分けることが出来る。後者のカップリング雑音低減のためには、非対称性の適切な低減手法を懸架系に組み込む必要がある。この雑音の低減実証の研究をすすめた

TOBA では懸架した試験マスの両端を鏡面として干渉計を構成し、干渉信号によって両端の差動 (= 回転) を読み取る構成となっている。このような構成でのカップリングの経路には、(1) 重心位置や質量分布のズレによるマスの傾き、(2) 試験マス上の干渉計用の鏡面の傾き、(3) 干渉計のビームスポットの高さズレ、などがある。(1)の経路に関して、現在開発を進めている Phase-III TOBA ではマスの傾きを 2.5 nrad の精度で調整する必要があり、これを実現するため懸架系に質量分布調整機構と傾き微調整用のアクチュエータを導入した。(2)の低減のためには試験マス両端の鏡面が約 1 μ rad の精度で平行である必要があり、このため側面を一体研磨・コーティングした試験マスを製作した。(3)に関してはビームスポットの傾きを約 1 μ rad の精度で調整する必要があり、ピコモーターによるビームスポット調整機構を導入した。

これらの要素を組み込んだ懸架系を構成してカップリング伝達関数の計測・低減実験を行った。計測結果は(1)~(3)から計算される伝達関数と概ね一致しており、上記の経路でカップリングが説明できることが確認された。また、質量分布調整とアクチュエートによってマスの傾きを調整することでカップリングが低減できることもそれぞれ実証された。調整量から計算されるカップリングの変化量も計測結果と一致しており、低減手法に関しても理論通りであることが確認された。

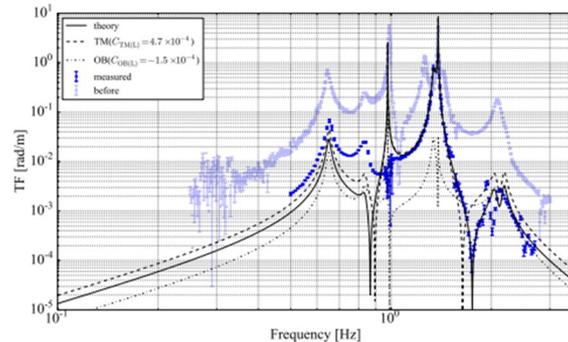
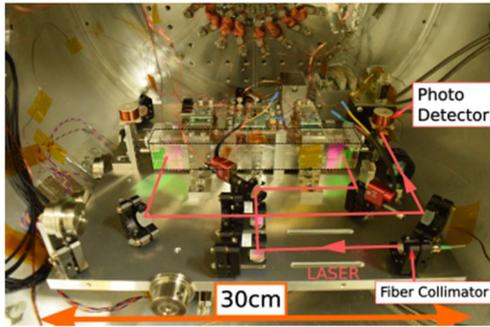


図 4: 地面振動カップリング雑音低減セットアップ(左)と低減実証結果 (右).

4.4 改良型角度センサの開発

Phase-III TOBA の目標感度を達成するためには、試験マスの差動回転を読み取る際の角度読み取り雑音を 5×10^{-16} rad/Hz^(1/2) より小さくすることが要求される。これを満たす角度センサとして Coupled 共振器を用いた Wave Front Sensor (Coupled WFS) が考案されている。レーザーの基本モードである TEM00 モードの光を鏡に入射すると、鏡が傾いている場合に光の一部が TEM10 モードに変換されて反射する。この TEM10 モードの光が読み取るべき角度信号である。試験マスの差動回転を高感度で読み取るには両モードを光共振器 (Wave Front Sensor; WFS) で共振させて増幅することが望ましい。しかし両モードの間には Gouy 位相差があるため通常の二枚鏡光共振器では同時共振を実現できないという問題があった。これを解決するために改良されたものが Coupled WFS である。Coupled WFS は、試験マスに取り付けられた鏡と他の二枚の鏡が同じ軸の上に向かい合っており、並んだ形をしており、二つの光共振器を構成している。後ろの光共振器の長さに応じて TEM00 モードと TEM10 モードの光の間に異なる位相を与えることができ、Gouy 位相を打ち消して角度信号を増幅する。Coupled WFS は角度信号を増幅だけでなく、一本のレーザーで角度が読み取れることから試験マスの並進運動からのカップリングを低減することが容易であり、周波数雑音も小さいことが特長である。その一方、2つの光共振器が連なっていることから、光共振器の長さ制御が比較的困難という問題を抱えている。そこで Coupled WFS の原理実証や制御の実現を目的として原理実証を行なった。その結果、試験マスの差動回転に対する角度信号は、WFS に比べて 2.1(5) 倍増幅できることを実証した。また同時に、Coupled WFS の制御が実現可能であることも確認できた。これによって Coupled WFS の定性的な原理実証は完了したと言える。

4.5 低損失なねじれ振り子ワイヤーの開発

TOBA では、ねじれ振り子の懸架ワイヤの熱雑音が原理的な感度を制限する。そのため、振り子を低温に冷却するとともに、機械損失の小さな (Q 値の高い) 懸架ワイヤを用いる必要がある。一方、ねじれ振動に対する機械損失については先行研究は少なく、本研究で系統的な開発研究を進めた。特に、直径 1mm のファイバファイバに注目し、そのねじれ振動モードに対する Q 値の測定を行った。その結果、常温下で 1.5×10^5 という Q 値を実現した。これは我々の知る限り、ファイバファイバのねじれモード振動の測定結果としては世界最高の値である。また、ワイヤクランプ部の損失、ファイバ表面での損失など、Q 値に影響を与える重要な要因の理解を進めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 0件）

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
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/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 KAGRA Collaboration	4. 巻 36
2. 論文標題 Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 95015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1361-6382/ab0fcb	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 T. Shimoda, Naoki Aritomi, Ayaka Shoda, Yuta Michimura and Masaki Ando	4. 巻 97
2. 論文標題 Seismic cross-coupling noise in torsion pendulums	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 104003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.104003	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 KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration	4. 巻 21
2. 論文標題 Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA	5. 発行年 2018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） https://doi.org/10.1007/s41114-018-0012-9	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 Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer	4. 巻 97
2. 論文標題 Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 102001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.102001	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 Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, Masaki Ando	4. 巻 97
2. 論文標題 Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 122003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.122003	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 Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, Kazuhiro Hayama	4. 巻 98
2. 論文標題 Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 22008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.022008	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
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/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 KAGRA Collaboration	4. 巻 36
2. 論文標題 Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 95015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-6382/ab0fcb	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 T. Shimoda, Naoki Aritomi, Ayaka Shoda, Yuta Michimura and Masaki Ando	4. 巻 97
2. 論文標題 Seismic cross-coupling noise in torsion pendulums	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 104003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.104003	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 KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration	4. 巻 21
2. 論文標題 Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA	5. 発行年 2018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) https://doi.org/10.1007/s41114-018-0012-9	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 Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer	4. 巻 97
2. 論文標題 Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 102001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.102001	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 Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, Masaki Ando	4. 巻 97
2. 論文標題 Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 122003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.122003	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 Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, Kazuhiro Hayama	4. 巻 98
2. 論文標題 Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 22008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.022008	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 Eda, Kazunari; Shoda, Ayaka; Kuwahara, Yuya; et al.	4. 巻 1
2. 論文標題 All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 011F01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptv179	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 Nakamura, Takashi; Ando, Masaki; Kinugawa, Tomoya; et al.	4. 巻 9
2. 論文標題 Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS	6. 最初と最後の頁 930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw127	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 Kawahara, Yuya; Shoda, Ayaka; Eda, Kazunari; et al.	4. 巻 94
2. 論文標題 Search for a stochastic gravitational wave background at 1-5 Hz with a torsion-bar antenna	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 42003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.042003	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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Recent results of gravitational wave
3. 学会等名 Higgs Couplings 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 DECIGO : Gravitational-Wave Observation from Space
3. 学会等名 The 15th MG Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 TOBA: Torsion-Bar Gravitational-Wave Antenna
3. 学会等名 The 15th MG Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Recent results of gravitational wave
3. 学会等名 Higgs Couplings 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 DECIGO : Gravitational-Wave Observation from Space
3. 学会等名 The 15th MG Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 TOBA: Torsion-Bar Gravitational-Wave Antenna
3. 学会等名 The 15th MG Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 KAGRA : a Gravitational-Wave Antenna in Japan
3. 学会等名 Korean Physical Society Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 重力波天文学の幕開けと将来 The First Direct Detection of Gravitational Wave
3. 学会等名 Space Science Colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Space Gravitational-Wave Antenna: DECIGO and Pre-DECIGO
3. 学会等名 GWPAW2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 KAGRA : a Cryogenic Interferometric Gravitational-Wave Antenna
3. 学会等名 Gravitational Wave Astronomy with Present and Future Detectors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 安東 正樹
2. 発表標題 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO
3. 学会等名 第17回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Observation of Gravitational Waves
3. 学会等名 Physics in LHC and the Early Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 重力波天文学入門
3. 学会等名 第23回 ICEPPシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 安東正樹	4. 発行年 2016年
2. 出版社 講談社ブルーバックス	5. 総ページ数 317
3. 書名 重力波とはなにか	

1. 著者名 国立天文台 編	4. 発行年 2017年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 1104
3. 書名 理科年表 重力波の初観測と重力波天文学の幕開け	

〔産業財産権〕

〔その他〕

安東研究室

<http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ja/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----