様 式 C－19、F－19－1、Z－19 （共通）

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２９ 年　 ６ 月 ２２ 日現在

機関番号： １２６０１
研究種目： 基盤研究(A) (一般)
研究期間： 2012～2015
課題番号： ２４２４４０３１

研究課題名（和文）ねじれ型望遠鏡による低周波重力波探査

研究課題名（英文）Search for low frequency gravitational waves

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）　34,100,000円

研究成果の概要（和文）：地上においても0.1-1Hzの低周波数に感度をもつ重力波望遠鏡TOBAの開発を行い、観測運転と重力波信号探査のデータ解析を行った。その結果、これまでの最高感度を更新し、探査された重力波に端する上限値を更新するという結果を得た。また、全方向に感度を持つ構成の考案と実証、能動防振装置の開発と実証、誘電型アクチュエータの開発、モノリシック光学系の開発、並進地面振動からのカップリングの理解と低減方法の考案と実証といった、新たな成果、知見を得た。

研究成果の概要（英文）：We developed a Torsion-bar Antenna, which has good sensitivity to gravitational waves at low frequency around 0.1-1Hz. We improved the sensitivity and carried out observation runs. The obtained data was analyzed for search of gravitational wave signals. As a result, we found no gravitational wave signal, and set updated upper limits on stochastic background gravitational waves, inspiral of intermediate-mass black-hole binaries. We also developed a new suspension configuration to have all-sky sensitivity, active vibration isolation system, inductive coil actuator, monolithic optical bench, reduction scheme of coupling from displacement degree of freedom.

研究分野： 重力波物理学

キーワード： 重力波　ねじれ振り子

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．これまでの天文学では，電磁波による天体観測や背景輻射観測が主な手法になっていた．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．また，重力波は，電磁波では観測する事の出来ない初期宇宙を直接観測する手段としても期待が持たれている．このような科学的な動機付けのもと，世界各国で重力波検出器の開発が進められている．現在までに，主に数 10Hz 以上の周波数帯をターゲットとした，地上での重力波検出器が開発され，観測運転が行われてきた．現在は，日本の KAGRA 計画をはじめとして，欧米においても検出器のアップグレード作業が進められている．これらの第二世代検出器は，2015 年頃から稼働する予定になっていた。実際、2015 年には米国の LIGO が重力波信号の初観測に成功し，「重力波天文学」が本格的に幕をあけた．

地上検出器の感度向上の取り組みと並行して，地面振動などの影響で地上での観測が困難な低周波数帯を，宇宙空間で観測する計画も進められている．重力波の周波数は，放射源が変動する時間スケールの逆数程度になる．従って，低周波数では，巨大ブラックホールの合体現象や初期宇宙など，大きなスケールでの現象が観測対象となり，宇宙の誕生や銀河の形成に対する科学的知見を得ることが期待できる．欧州の ESA が主導して進めている宇宙干渉計型重力波望遠鏡計画 LISA では，0.1mHz から 0.1Hz の周波数帯をターゲットとしており，2030 年代の打ち上げを目指して開発が進められている．一方，2020 年代後半での実現を目指して日本を中心に検討が進められている宇宙空間重力波望遠鏡(DECIGO 計画)では，0.1Hz 付近をターゲットの観測周波数帯としている．ただ，これらの宇宙ミッションは，全世界的な協力を必要とする大規模な科学プロジェクトとなる．そこで，技術実証を行うための前哨衛星や地上での入念な基礎研究が不可欠であり，実現には多大なリソースと時間を必要としている．

この背景のもと，申請者らは，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，10^5 太陽質量の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．究極の感度としては，干渉計の基線長を長くできることから DECIGO のような本格的な宇宙重力波望遠鏡の方が優れている．それに対して，TOBA では，本格的な低周波数重力波観測が早期に実現可能という優位性を持つ．申請者らは，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による具体的な研究開発を進めており、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値を与えるという成果を挙げていた．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，その結果を国際会議などで発表していた．

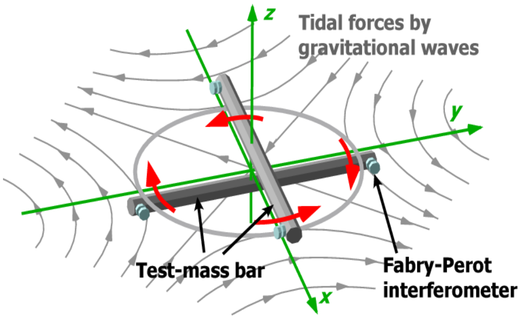

図１ ねじれ型重力波望遠鏡の原理

２．研究の目的

本研究では，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検出器を地球上に建設し，観測運転を行なうことを目的としている．将来の大型ねじれ型重力波望遠鏡のための要素技術開発とともに，その技術を用いた中型実証型望遠鏡（中型 TOBA）の建設と観測運転を行う．TOBA は，従来のレーザー干渉計型重力波望遠鏡とは異なる独自の方式であり，米国や豪州の研究者の間でも具体的な計画検討が開始されるなど，重力波研究分野における新しいブレークスルーとしての期待を受けている．0.1Hz 付近の低い周波数では豊富な科学的成果が期待されながらも，我々の小型プロトタイプでの観測までは探査された例が無かった．新しい原理による重力波望遠鏡の開発，それを用いたこれまでにない感度での重力波観測の両面で本研究の意義は大きい．

３．研究の方法

申請者らが考案したねじれ型重力波望遠鏡(Torsion-bar Antenna，TOBA)の原理を図１

に示す．円柱棒状の2つの試験質量を，互いに直交する向きに配置し，それぞれねじれ振り子として懸架支持する．重力波の効果は潮汐力変動としてこれらの試験質量に作用するため，2 つの棒状試験質量は，入射重力波に反応して差動回転をすることになる．この微小な差動回転をレーザー干渉計によって読み取ることで重力波の観測を行う，というのがこの望遠鏡の原理である．ここで，ねじれ振り子の水平面内の回転自由度については，共振周波数は 1mHz 程度になり，それよりも高い周波数の重力波に対して感度を持つことになる．従来のレーザー干渉計型重力波望遠鏡では，試験質量となる鏡は共振周波数 1Hz 程度の振り子で懸架され，それより低い周波数帯には原理的な感度を持たないのに対し，TOBA は 10mHz から 1Hz の間の低い周波数帯にも感度を持つことができるのである．変動読み取り時の標準量子限界は，棒状試験質量の慣性モーメントの平方根に反比例し，より長く，より大きな質量を用いた方が原理的な感度は向上することから，TOBA は可能な限り大型化することが望ましい．

本研究では，この原理に基づく中規模のねじれ型重力波望遠鏡 (中型 TOBA)の開発を進めた．棒状試験質量の長さは 0.2m ほどである．棒状試験質量の材質としては，機械的損失が小さい溶融石英を用い，熱雑音の影響を低減する．棒状試験質量は共通プラットホームからねじれ振り子として懸架される．この懸架系は，地面振動などの外来変動を同相除去できるよう，対称性良く組み上げることに配慮する．棒状試験質量・ねじれ振り子とプラットホームは，冷却のためにクライオスタット内に収められる．また，棒状試験質量の差動回転変動は，レーザー干渉計によって読み取られる．光源としては波長 1550nm のファイバレーザを用いる．

レーザー光は光ファイバーを用いてクライオスタット内へ導入する．一方、プラットホームは低熱伝導性のワイヤで常温部に設置された能動防振装置から懸架される．これは、ヘキサポッドと呼ばれる 6 自由度駆動ステージと速度センサで構成され、100mHz 以上の周波数帯で地面振動の影響を抑圧するように設計される．以上の構成で、中型 TOBA の原理的な感度(量子雑音と熱雑音で決まる感度)は 0.1Hz の周波数帯で $10^{-15}\mathrm{Hz}^{-1/2}$ 程度と見積もられる．これは、これまでに達成されたこの周波数帯での感度を 6 桁向上させるものであり、我々の銀河系内での連星ブラックホール合体現象からの重力波を捕えるのに十分な感度に相当する．

４．研究成果

本研究の結果、TABA プロトタイプの開発とそれを用いた観測運転、データ解析を進め、低周波数帯の重力波信号に対する上限値を与えるなどの成果を得た。またその過程で、複数自由度の同時観測による全天カバー観測という新たな可能性も提示した。大きく分けて、2014 年までは Phase-II TOBA, 2015 年以降は Phase-IIITOBA として開発を進めた。以下、特筆すべき成果を挙げる。

(1) Phase-II TOBA

Phase-II においては、2 本の棒状試験マスを懸架し、その差動変動を観測する方式での装置の開発を進めた。懸架振り子装置の高性能化の再設計、能動防振装置、光ファイバセンサ、電磁誘導型アクチュエータといった新たな要素を開発し、組み込んだ。その結果、1-5Hz 付近の周波数帯で以前の感度を更新した。さらにその感度で 24 時間の観測運転を行い、重力波信号探査のデータ解析を行った。

この装置での特筆すべき点は、2 本の棒状試験マスの全自由度の変動をコンパクトな光ファイバセンサで読み取っていたことにある。そのことによって、重力波の到来方向に対して死角がなくすことが可能となる。また、重力波の偏波の分離や、地面振動などに起因する雑音の除去に対しても有効なデータを得ることが可能となった。

(2) Phase-III TOBA

Phase-III TOBA においては、並進方向の地面振動が試験マスの回転変動にカップルする影響を低減すること、光学系のモノリシック化を中心に開発を進めた。懸架装置を再設計して一新し、また試験マスとして棒状の溶融石英を研磨し、ミラーコーティングしたモノリシック試験マスを用いる構成にした。並進地面振動のカップリングに関しては、懸架振り子の非対称性を考慮に入れた機械系のダイナミクスを、理論面と実験面の双方から系統的に研究をすすめた。その結果、カップリング経路の理解とその低減方法の考案に至り、従来より 3 桁以上、カップリングを低減することに成功した。それに伴って重力波に対する感度も向上し、ほぼ全周波数帯において TOBA におけるこれまでの最高感度を実現した。

以上の成果は、投稿論文や博士論文、修士論文としてまとめられている。また、学会発表でも多数発表されている。

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　7 件）（すべて査読有り）

[1] Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Masaki Ando, Kazunari Eda, Kodai Tejima, Yoichi Aso, and Yousuke Itoh: Ground-based low-frequency gravitational-wave detector with multiple outputs, Phys. Rev. D 95, 082004 (2017). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.082004

[2] Y.Kuwahara, A.Shoda, K.Eda, et al.:

Search for a stochastic gravitational wave background at 1-5 Hz with a torsion-bar antenna, Phys.Rev.D 94, 92003 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevD.94.042003
[3] 安東正樹: 重力波望遠鏡を用いた地震速報, 日本物理学会誌 71 636 (2016). http://doi.org/10.11316/butsuri.71.9_636
[4] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Yousuke Itoh and Masaki Ando: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 011F01. DOI: 10.1093/ptep/ptv179
[5] K. Eda, A. Shoda, Y. Itoh, M. Ando: Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar Antennas, Phys. Rev. D, 90, 064039 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevD.90.064039
[6] A. Shoda, M.Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, Phys. Rev. D, 89, 027101 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevD.89.027101
[7] K. Nakamura, M. Ando: Torsion-bar antenna in the proper reference frame with rotation, Phys. Rev. D, 89, 064008 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevD.90.064008

〔学会発表〕(計 27 件)

[1] 有冨尚紀, Donatella Fiorucci, 下田智文, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発 (6) : 変位センサ雑音および磁場雑音の低減, 日本物理学会第72回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学 (大阪府吹田市)).
[2] 下田智文,有冨尚紀,桑原祐也,道村唯太,正田亜八香,麻生洋一,高橋竜太郎,山元一広,安東正樹: "ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発(5):地面振動カップリング雑音の低減", 日本物理学会第72回年次大会(2017 年 3 月 19 日, 大阪大学(大阪府吹田市)).
[3] Tomofumi Shimoda, Naoki Aritomi, Masaki Ando: Current Status of TOBA experiment at Univ. of Tokyo, E-GRAAL (Earthquake GRAvity ALerts) 2nd meeting (Oct. 4th, 2016, Institut de physique du globe de Paris, Paris (France)).
[4] N. Aritomi, T. Shimoda, K. Komori, Y. Kuwahara, Y. Michimura, A. Shoda, Y. Aso, R. Takahashi, K. Kazuhiro, M. Ando: Coil-Coil Actuator for reduction of magnetic noise, GWADW2016 (May 24th, 2016, Elba (Italy)).
[5] Tomofumi Shimoda, Naoki Aritomi, Yuya Kuwahara, Yuta Michimura, Ayaka Shoda, Yoichi Aso, Ryutaro Takahashi, Kazuhiro Yamamoto, Masaki Ando: Reduction of Seismic Coupling Noise for TOBA, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (May 24th, 2016, Elba (Italy)).
[6] 有冨尚紀, 下田智文, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発 (4) : 変位センサ雑音および磁場雑音の低減, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学 (宮崎県宮崎市)).
[7] 下田智文,有冨尚紀,桑原祐也,道村唯太,正田亜八香,麻生洋一,高橋竜太郎,山元一広,安東正樹:ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発(3):地面振動カップリング雑音の低減, 日本物理学会 2016 年秋季大会(2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学(宮崎県宮崎市)).
[8] Naoki Aritomi: Monolithic Optics and Coil-Coil Actuator, Low Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 3rd, 2016, Canberra (Australia)).
[9] T. Shimoda, M. Ando: Design of New TOBA - Vibration Isolation Systems, Low Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 3rd, 2016, Canberra (Australia)).
[10] M. Ando: Torsion Bar Antenna Experiments, Low-Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 2nd 2016, ANU, Canberra (Australia)).
[11] Y. Kuwahara, A. Shoda, K. Eda, and M. Ando: Search for stochastic gravitational wave background at 1-3 Hz with Torsion-bar Antenna, GWPAW2015 (June 17-20, 2015, (Osaka, Osaka)).
[12] M. Ando, A.Shoda, K. Yamamoto, Y. Aso, R. Takahashi: Lessons learned and the next steps of Torsion-Bar Antenna experiments, GWADW2015 (May 19th, 2015, Alaska (USA)).
[13] A. Shoda: TOBA experience and future plans, 2015, E-GRAAL kickoff meeting (March 15th, 2015, Paris (France)).
[14] 下田智文, 有冨尚紀, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA の開発(1), 日本物理学会 第71回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学 (宮城県仙台市)).
[15] 有冨尚紀, 下田智文, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA の開発 (2), 日本物理学会

第71回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学 (宮城県仙台市)).
[16] A. Shoda: Torsion-bar Antenna for low-frequency gravitational wave detection, GWADW (May 20th, 2014, (Takayama, Gifu)).
[17] 正田亜八香, 桑原祐也, 枝和成, 麻生洋一, 道村雄太, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器(Phase-II TOBA)の開発(4), 日本物理学会 2015 年春季大会 (2015年3月23日 早稲田大学 (東京都新宿区)).
[18] 桑原祐也, 正田亜八香, 枝和成, 道村唯太, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器(Phase-II TOBA)を用いた背景重力波探査, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015年3月23日, 早稲田大学(東京都新宿区)).
[19] 桑原祐也, 正田亜八香, 枝和成, 小森健太郎, 麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発(2), 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014年9月21日, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)).
[20] 正田亜八香, 桑原祐也, 枝和成, 小森健太郎, 麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器(Phase-II TOBA)の開発(3), 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 21 日, 佐賀大学(佐賀県佐賀市)).
[21] A. Shoda: Torsion-bar Antenna and Its Collaboration with Interferometers, Italy-Japan Workshop (April 19th, 2013 (Chiyoda, Tokyo))
[22] A. Shoda: Torsion-bar Antenna and Its Collaboration with Interferometers, 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves, (August 14th, 2013, Pohang (Korea))
[23] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, Y. Aso, K. Tsubono: A New Setup for Torsion-bar Antenna, Amaldi10/GR20 (July 10th, 2013, Warsaw University, Warsaw (Poland))
[24] 正田亜八香、手嶋航大、桑原祐也、小森健太郎、麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器(Phase-II TOBA)の開発, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学 (神奈川県平塚市))
[25] 桑原祐也, 小森健太郎, 正田亜八香, 麻生洋一,安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器(TOBA)に向けたファイバー干渉計の開発,日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014年3月27日, 東海大学(神奈川県平塚市))
[26] 小森健太郎, 桑原祐也, 正田亜八香, 麻生洋一, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器(TOBA)のためのアクチュエーターの開発, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014年3月27日, 東海大学(神奈川県平塚市))
[27] 正田亜八香、安東正樹、石徹白晃司、岡田健志、麻生洋一、坪野公夫:「次世代ねじれ振り子型重力波検出器(Phase-II TOBA)の基本概念設計」,日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013年9月23日, 高知大学 (高知県高知市))

〔図書〕(計 1件)

[1] 安東正樹: 重力波とはなにか, 講談社ブルーバックス (2016) 327頁.

[その他]

[1] 有冨尚紀: ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA のためのモノリシック干渉計の開発, 修士論文 (2017年3月).
[2] 下田智文: ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA のための 地面振動雑音低減法の研究, 修士論文 (2017年3月).
[3] 正田亜八香: Development of a High-Angular-Resolution Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observation, 博士論文, 2015年3月.
[4] 手嶋 航大: ねじれ型重力波検出器 TOBA のための懸架システムの開発, 修士論文 (2014年3月).

6. 研究組織

(1)研究代表者
安東 正樹 (ANDO, Masaki)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：90313197

(2)研究分担者
山元 一広 (YAMAMOTO, Kazuhiro)
富山大学・理学部・准教授
研究者番号： 00401290

高橋 竜太郎 (TAKAHASHI, Ryutaro)
国立天文台・重力波プロジェクト推進室・助教
研究者番号: 60270451

麻生 洋一 (ASO, Yoichi)
国立天文台・重力波プロジェクト推進室・准教授
研究者番号: 10568174

(4)研究協力者
正田亜八香 (SHODA, Ayaka)
小森健太郎 (KOMORI, Kentaro)
桑原祐也 (KUWAHARA, Yuya)
中村康二 (NAKAMURA, Koji)
有冨尚紀 (ARITOMI, Naoki)
下田智文 (SHOMODA, Tomofumi)

道村唯太 (MICHIMURA, Yuta)
Donatella Fiorucci
枝 和成 (EDA, Kazunari)
手嶋 航大 (TEJIMA, Kodai)
伊藤 洋介 (ITOH, Yousuke)