

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20244034

研究課題名(和文) 次世代干渉計技術によるTAMA300重力波検出器の高感度化

研究課題名(英文) Sensitivity improvement of TAMA300 gravitational-wave detector by developing next-generation interferometer technology

研究代表者

藤本 眞克 (FUJIMOTO MASAKATSU)

国立天文台・光赤外研究部・教授

研究者番号：90107475

研究成果の概要(和文)：本研究では日本が進めている次世代型重力波検出器 LCGT で使用予定の次世代干渉計方式「Resonant Sideband Extraction (RSE)」を開発することにより、1 kHz以上の周波数帯域で重力波に対する感度向上を目指してきた。3年間の研究により、(1)ミラーのデジタル制御、(2)パワーリサイクリング制御、(3)変調・復調システム開発、(4)アライメント縮退問題の回避、(5)重力波観測帯域の可変性、と言った LCGT に向けた着実な進展を果たした。

研究成果の概要(英文)：This research aims to realize a sensitivity enhancement in Japanese gravitational-wave detector LCGT by adopting a resonant sideband extraction (RSE) scheme. The following achievements in the past three years were made and bring about a steady progress for the LCGT; (1) Digital mirror controls, (2) High-gain recycling control, (3) Developing of the modulation and de-modulation systems, (4) Avoidance of degenerations of the mirror alignment signals, and (5) Variable observational-band design.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	15,300,000	4,590,000	19,890,000
2009年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2010年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
年度			
年度			
総計	35,300,000	10,590,000	45,890,000

研究分野：重力波天文学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：重力波、レーザー干渉計、宇宙物理、制御工学

1. 研究開始当初の背景

【重力波】

重力波は時空の歪みが伝播する現象で、アインシュタインの一般相対性理論により1916年に予言された。その後、電波望遠鏡によるパルサー観測によってその存在が証明されたが、予言から90年を経た現在でも重力波の

直接検出は未だ達成されていない。これはブラックホールや中性子星といった大質量・超高密度の天体が発生する重力波ですら、非常に微弱な信号であるためである。しかしながら、もし重力波を検出できれば、一般相対性理論の検証となるだけでなく、新たな手段でのブラックホールや中性子星の研究や、光学

観測では見ることが出来ない初期宇宙の解明が期待されている。

【国際・国内情勢】

世界中の研究者が最先端の技術を凝らして重力波の直接検出に取り組んでおり、世界各地に干渉計型重力波検出器が建設されてきた。現在、日本の TAMA300、CLIO、独英の GEO600、仏伊の VIRGO、米国の LIGO といった第1世代の検出器が稼動中である。さらに、これらを改良し年数回程度重力波検出が可能な感度を目指す技術開発研究も推進されており、世界的に鎬を削っている。

このような中で日本の重力波グループは、地面振動の小さい地下に低温鏡をもつ次世代検出器 LCGT を建設するという特色ある計画を精力的に推し進めてきた。この次世代検出器開発の取り組みとして、世界で初めて低温鏡を採用した重力波検出器 CLIO を神岡鉱山内に建設し、2006 年秋には低温鏡での運転を開始した。その一方で国立天文台のグループでは、TAMA300 検出器によるパワーリサイクリングという光干渉技術の確立と、プロトタイプ干渉計による新たな RSE 方式の技術開発に取り組んできた。次世代 LCGT 検出器の実現に向けては多くの技術的問題に取り組まなくてはならないため、これからも CLIO と TAMA300 の2 台の検出器は連携を取りつつ相補的に技術的課題に取り組み、一刻も早い次世代検出器での観測実現を目指している。

2. 研究の目的

強い重力場をもつ天体（ブラックホールや中性子星など）が発する重力波を直接検出することで、電磁波やニュートリノによる天体観測とは別の新たな天文学が拓かれることが期待されている。このような重力波天文学の実現のため、日本の重力波研究グループでは年数回程度の重力波信号検出能力が期待される次世代重力波検出器 LCGT の建設を計画している。本研究では、国立天文台のレーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 に LCGT で用いる光干渉技術である Resonant Sideband Extraction (RSE) 方式を適用し、1 kHz 以上の周波数帯域で重力波に対する感度の向上を目指す。

3. 研究の方法

大きく分けて研究の方法は2つ。1つは TAMA300 検出器へ新しい技術を組み込み、干渉計動作を通してその性能を確認すること。もう1つは LCGT 検出器の詳細デザインの検討を行うこと、である。特に後者は、2010年6月に LCGT 計画が最先端研究基盤事業（3ヵ年）として採用されたため、従来の建設スケジュールを大幅に変更した形で建設がス

タートしたことに大きな影響を受けての研究計画の変更である。

(1) TAMA300 検出器へ導入された技術

- ① 変調・復調システムの再構築
- ② 鏡アライメント制御
- ③ 統合的デジタル制御

(2) LCGT 検出器の詳細デザインとして採用された技術

- ① 鏡アライメント制御の問題点を解決するため、主干渉計内へのレンズ系導入
- ② 帯域可変型 RSE 構成の採用

4. 研究成果

(1) 統合的デジタルシステムを用いた鏡アライメント制御の導入により、100 Hz 付近で約1桁感度を改善した。

ミラー防振装置改良に加えて、統合的デジタルシステムの導入により下記の様な改善を行った。

- ① デジタルシステムへ量子化雑音低減のためのアナログフィルターの導入により制御雑音の低減、
- ② 2つの腕共振器の独立アライメント制御から両共振器の同相・差動アライメント制御への変更により、干渉計感度の安定性向上、
- ③ デジタルシステムにより干渉計制御を高ダイナミックレンジ仕様から低雑音・低ダイナミックレンジ仕様への段階的移行システムを構築し、干渉計オペレーションの自動化に成功。

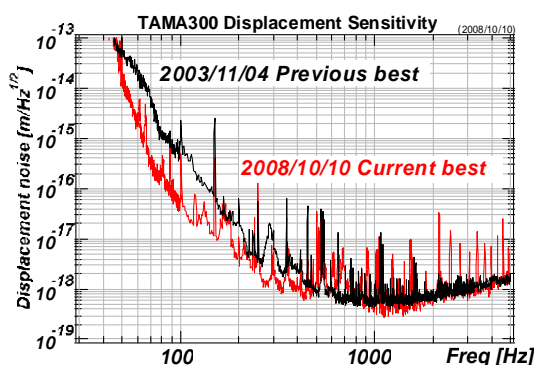


図1：100 Hz 付近で約1桁感度を改善

(2) 将来計画である LCGT と同等のリサイクリング・ミラーに更新し干渉計制御に成功した。(2009年3月)

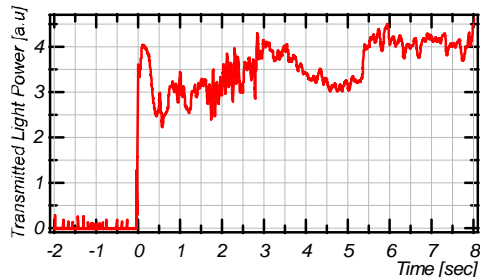


図2：LCGT と同等の設計のリサイクリング・ミラーでの干渉計制御に成功：制御により共振器内に光が蓄積されている様子を示したグラフ。

時刻 $t=0$ secで共振点への引き込み成功、その後 $t=5.5$ secでデジタルシステムにより低雑音・低ダイナミックレンジモード(ただし制御ゲインは高い)への制御切り替えが完了し、安定に光が蓄積されている。

(3) RSE 干渉計構成への変更に対応した変調・復調システムを開発した、RSE 干渉計構成では、ミラーが1枚増えることにより、ミラー間距離の制御自由度が1つ増える。これに対応して干渉計制御のための光変調を増やす必要がある。色々な変調・復調方法による干渉計制御信号の大きさと信号混合を計算し、最適な方法を模索した結果、15 MHz とその5倍波である 75 MHz の2つの位相変調を用いることとした。さらに、2つの位相変調器を直列に並べると1つ目の変調器で生じたサイドバンド光が2つ目の変調器にて、さらに変調を受けて不要な変調光を発生することで最終的に干渉計制御に悪い影響(ミラー制御信号間の混信)を生ずることが分かったので、レーザー光を二手に分けた後、それぞれ位相変調器を透過させた後に、光をコヒーレントに加算する手法を導入した。2010年4月にTAMA300検出器の10ワット・レーザー光源に上記変調システムを組み上げて、その動作を確認した。

(4) RSE 干渉計におけるミラー間のアライメント自由度の縮退問題を避けるため、主干渉計内にレンズ系を導入することを提案し、LCGT 干渉計の設計変更が了承された。

これまでの設計では、腕共振器が基線長 3 km に対して、パワーリサイクリング共振器および、シグナル・エクストラクション共振器が 10-100 m 程度と短いために、共振器を構成する2つのミラー間で曲率の差がつかない。この状況でミラー間にハイパワー・レーザーを入射するとミラーの熱吸収により生じる熱レンズ効果や熱膨張により共振器内に設計通りのパワーが蓄積されなくなってしまう可能性がある。このようなことが起こると重力波検出器として著しい能力低下が起こるため大きな問題である。また、このような状況でミラー・アライメント制御を行うと、曲率のほぼ同じミラーの区別がつかなくなってしまう(縮退が起きる)ことも問題である。[論文④参照]これを解決するには、共振器内にレンズ系を導入することが1つの解決策である。LCGT におけるレンズ系を設計してみると、レンズ曲率を 1% 以下の精度で製作し、且つレンズ間距離を 3 mm の精度で調整することが必要であることが分かった。[学会発表⑩参照]これらのメリット・デメリットを考慮した上で、現実的な LCGT 検出器へ導入するレンズ系設計を提案し、これが採用されることとなった。

(5) RSE 干渉計の感度設計について詳細検討を行い、広帯域高感度化設計と狭帯域高感度化設計を変更可能な干渉計設計(帯域可変型 RSE)を提案し、外部評価委員会の審査を経てこれが採用された。

RSE 技術による感度向上と言っても、以下に挙げる2つの相反する方針が取りうる。1つは最高感度では劣るものの 50-300 Hz 帯域で広く感度が向上する設計、もう1つは 100 Hz 付近で最高感度を追求する設計である。

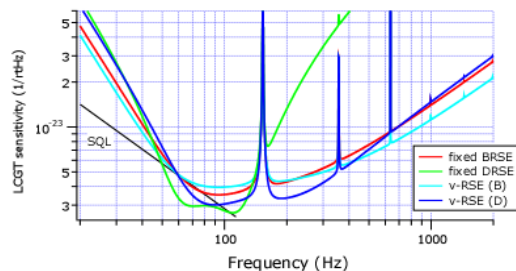


図3：LCGT 検出器の設計感度、BRSE は広帯域に感度が良い設計、DRSE は 60-100 Hz 帯域でのみ良い感度が得られる。v-RSE は今回

提案された帯域可変型設計での感度である。

後者は一番有力な重力波源とされる中性子連星合体からの重力波探査に特化した設計を採用することで“世界初の重力波検出”の可能性を高めることが出来る。一方でその他の重力波信号に対して感度を損なうデメリットを持つ。そこで干渉計を構成する鏡の位置を大きく変更せずとも、上記2つの干渉計感度設計を変更可能な構成について技術検討を行った。その結果を研究グループ外部の審査委員会に提案し、“帯域可変型 RSE 構成”を採用することが決まった。

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 12 件)

- ① K. Arai, R. Takahashi, D. Tatsumi, K. Izumi, Y. Wakabayashi, … (全 30 名), Status of Japanese gravitational wave detectors, *Class. Quant. Grav.*, 26 (2009) 204020, 査読有
- ② K. Arai on behalf of the TAMA collaboration, Recent progress of TAMA300, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 120 (2008) 32010, 査読有
- ③ D. Tatsumi, TAMA300 interferometer development, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 120 (2008) 32011, 査読有
- ④ F. Kawazoe, …, S. Kawamura (10 人中 9 番目), Experimental investigation of a control scheme for a tuned resonant sideband extraction interferometer for next-generation gravitational-wave detectors, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 122 (2008) 12017, 査読有
- ⑤ S. Sato, S. Kawamura, Alignment signal extraction of the optically degenerate RSE interferometer using the wave front sensing technique, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 122 (2008) 12025, 査読有
- ⑥ F. Kawazoe, …, S. Kawamura (11 名中 7 番目), Experimental investigation of a control scheme for a zero-detuning resonant sideband extraction interferometer for next-generation gravitational-wave detectors, *Class. Quant. Grav.*, 25 (2008) 195008, 査読有
- ⑦ K. Kokeyama, …, S. Kawamura (6 名中 5 番目), Development of a signal-extraction scheme for resonant

sideband extraction, *Class. Quant. Grav.*, 25 (2008) 235013, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① 麻生洋一、LCGT の干渉計制御、日本物理学会、2011 年 3 月 27 日、新潟大学
- ② 辰巳大輔、干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XXIV (干渉計開発)、日本物理学会、2010 年 9 月 14 日、九工大
- ③ 大橋正健、地上重力波検出器の現状、日本天文学会、2010 年 9 月 22 日、金沢大
- ④ 西田恵里奈、重力波検出用レーザー干渉計のロックアキュイジション、日本物理学会、2010 年 3 月 22 日、岡山大
- ⑤ 和泉究、レーザー干渉計制御のデジタル化(6)、日本物理学会、2009 年 3 月 30 日、立教大
- ⑥ 高橋竜太郎、干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XXIV (観測)、日本物理学会、2009 年 3 月 30 日、立教大
- ⑦ 辰巳大輔、干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XXIII (干渉計開発)、日本物理学会、2009 年 3 月 30 日、立教大
- ⑧ 新井宏二、TAMA300 の現状(22)、日本天文学会、2009 年 3 月 27 日、大阪府立大
- ⑨ 和泉究、レーザー干渉計制御のデジタル化(5)、日本物理学会、2008 年 9 月 23 日、山形大
- ⑩ 辰巳大輔、干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XXII (観測)、日本物理学会、2008 年 9 月 23 日、山形大
- ⑪ 新井宏二、干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XXI (干渉計開発)、日本物理学会、2008 年 9 月 23 日、山形大
- ⑫ 高橋竜太郎、TAMA300 の現状(21)、日本天文学会、2008 年 9 月 11 日、岡山理科大

[その他]

ホームページ等

<http://tamago.mtk.nao.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 眞克 (FUJIMOTO MASAKATSU)
国立天文台・光赤外研究部・教授
研究者番号：90107475

(2) 研究分担者

高橋 竜太郎 (TAKAHASHI RYUTARO)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号：60270451
辰巳 大輔 (TATSUMI DAISUKE)
国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号 : 70333276
新井 宏二 (ARAI KOUJI)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号 : 50321584
(H20→H21. 8. 27 辞退)

(3) 連携研究者

川村 静児 (KAWAMURA SEIJI)
国立天文台・光赤外研究部・准教授
研究者番号 : 40301725