

平成 21 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18204021

研究課題名(和文) 神岡レーザー干渉計によるバースト重力波探査

研究課題名(英文) Search for gravitational wave bursts with the laser interferometer in the Kamioka mine

研究代表者

大橋 正健(OHASHI MASATAKE)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：80213833

研究成果の概要：基線長 100m の神岡低温レーザー干渉計 CLIO にデータ収録・解析装置を組み込み、重力波観測を行った。都市部に比べ地面振動が 2 桁以上小さい地下環境でデータを取得し、ガウス性の高い良質なデータが得られていることを確認した。これはバースト重力波探査に適している。また、低周波では他の観測装置に比べて感度が優れているので、Vela パルサーで発生していると予想される 22Hz の重力波に対して上限値を算出し、査読付論文を出した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	16,100,000	4,830,000	20,930,000
2007 年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2008 年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
年度			
年度			
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

研究分野：重力波宇宙物理学

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：宇宙物理、高性能レーザー、地球観測、超精密計測、重力波

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 1999 年に我が国の TAMA300(国立天文台)によって開始された本格的レーザー干渉計による重力波観測が、その後の km スケールの大型レーザー干渉計 LIGO(米国)の完成で一層発展し、2003-2005 年には長期観測が実行された。

その間に、次世代レーザー干渉計に向けた技術開発のために、神岡坑内(スーパーカミオカンデ近隣)に基線長 100m の低温レーザー干渉計 CLIO が設置された。真空・低温テストは既に終了しており、2005 年度中に全体の運転が成功した。CLIO は地下設置であるために、その低振動環境の恩恵で特に低周波域の感度が高く、TAMA と LIGO の共同観測で積

み上げられてきたレーザー干渉計の運転・観測技術を応用すれば、観測装置としては小さいながらも、科学的に意義のある重力波観測を行えると予想できた。また、データ解析に関しても、TAMA300 のデータについてバースト重力波解析が進められており、これを適用すれば良い状況であった。

(2) CLIO とトンネルを共有する地球物理観測用のレーザー伸縮計が 2 年間にわたり観測を続けていた他、超伝導重力計なども設置されており、重力波の研究のみならず、地球物理研究との連携が可能であった。実験研究環境も整っており、データ収録・解析装置を設置すれば、無人運転も視野に入れた重力波観測

が可能な状況であった。

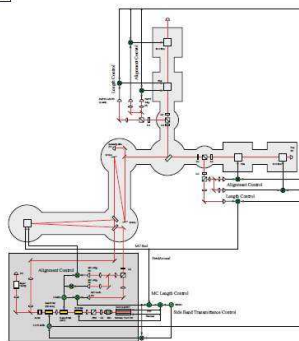
## 2. 研究の目的

(1) 本計画研究の目的は、2005 年度に完成した基線長 100m の神岡低温レーザー干渉計 CLIO に、観測に必須であるデータ収録・解析装置を組み込み、天の川銀河内で発生する重力波イベントをとらえるために長時間連続観測を行うことである。人的活動に起因する外来雑音も小さな地下環境では、地表検出器には不可能と思われる良質なデータが蓄積できることが最大のメリットである。何故ならば、非常に微弱な重力波イベントは、通常は地面振動などの様々な雑音にかき消されたり、またはパルス状の外来雑音と区別できないからである。神岡が観測適地であることは既に実証済である。

(2) 地上レーザー干渉計が受け持つ 100 ~ 1500Hz の観測帯域には、連星中性子星合体時に発生するチャープ重力波があり、またブラックホール形成時に発生するバースト重力波があるため、非常に重要である。本研究では、その中でもバースト重力波に焦点を絞った観測・データ解析を行う。近年、ALF (Alternative Linear Fit) フィルターの手法を用いれば比較的短時間にバースト波解析が可能であり、環境データなどを veto に利用すれば結果が改善されることがわかってきたからである。TAMA で行われた解析では、レーザーの出力雑音を veto に使ったが、もしさらに良い情報を見つけることができれば偽信号を激減させることが可能である。

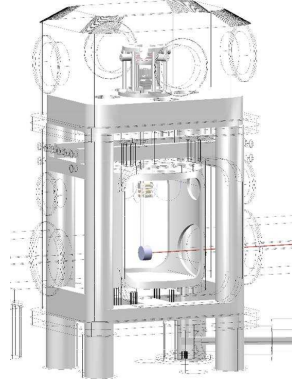
## 3. 研究の方法

(1) 神岡レーザー干渉計 CLIO の感度向上とその感度を安定に保つための調整を行う。感度向上については、懸架系・電気系で発生する過剰雑音の把握とその対策を行い、可能な限り高い感度を実現する。光学系は、下図のようにシンプルな構成を維持する。同時に、低振動環境を損なわないような伝熱系を低振動タイプ冷凍機も含めて最適化し、サファイアミラーの冷却時間の短縮を図る。



CLIO の光学系デザイン

(2) 高い感度を安定に保つための対策を講じる。重力波アンテナの心臓部である 4 枚の鏡は、それぞれ多段振り子で懸架され、地面振動から防振されながら 2 本のファブリーペロ共振器を構成している。干渉計の基線長を実効的に伸ばすことにより、重力波の効果を増幅して検出する仕組みになっている (CLIO の場合 2000 倍程度)。そのため、ファブリーペロ共振器の共振状態を保つための懸架された鏡の位置制御はもちろん、その鏡の縦揺れや横揺れを制御するアライメントコントロールの導入が必須である。



CLIO のミラー懸架系

(3) 長期かつ安定な運転のためには、地面振動の長周期ドリフト (潮汐・気圧変動などを含む) を補うだけの大きなダイナミックレンジを取ることが必要であるが、一方、大きなダイナミックレンジは電気系から大きな雑音を導入させるため、トレードオフをうまく見つけて制御系を開発することが重要である。ここで、CLIO には全く同じ位置に地球物理用のレーザー伸縮計が存在するという他に類のない条件が備えられており、常にその地面のドリフトをモニターしている。したがって、その正確なデータをもとに鏡の懸架位置にドリフトを打ち消す制御をかければ (フィードバック) 鏡自身に加える制御力やダイナミックレンジは低減され、導入される電気雑音による感度の悪化を防ぐことができる。レーザー伸縮計のデータから神岡鉱山における地殻ひずみの理論的予測が 90% 以上的一致で可能となっているため、フィードフォワードによるドリフト制御の可能性も考えられる。それらを順次試行し、よりよい結果を得られるものを選択する。

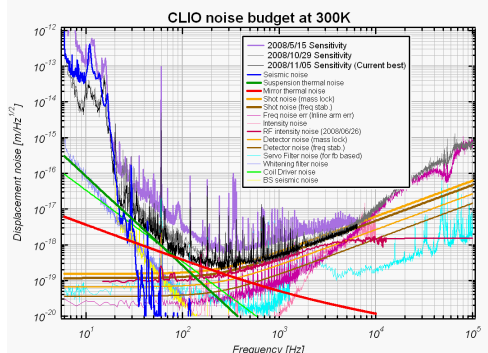
(4) 最後に、データ取得・解析装置を設置する。完全無人運転とデータ取得の予備運転を目指す。地下の安定・静謐な環境といえども、近郊における地震や遠方の大きな地震によって地殻に永久ひずみステップが発生することがレーザー伸縮計の観測からわかっており、その場合には干渉計の制御が破綻する。

よって、迅速にその破綻状態から観測状態に復帰するシステムが、無人運転には必須となる。

#### 4. 研究成果

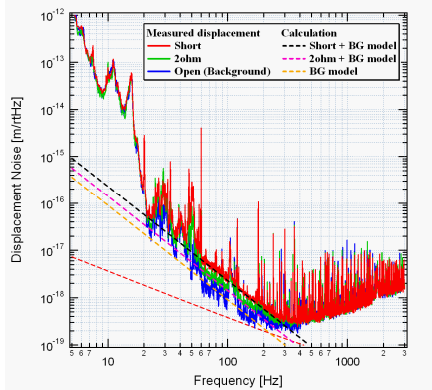
(1) 本研究開始までに、CLIO のサファイア鏡を目標としている 20K 以下にまで冷却することに成功していたが、干渉計感度が室温での目標感度に到達しておらず、特に 30Hz ~ 400Hz にかけては、周波数のマイナス 2 乗に比例した未解明のノイズが存在していた。これについて本研究期間内に 2 つの重要な成果を得た。

一つ目は、CLIO の室温での目標感度の達成である。ノイズ同定実験を繰り返し実行し、興味ある大域においてすべての雑音寄与を把握することができた(下のグラフを参照)。



CLIO 感度の雑音解析

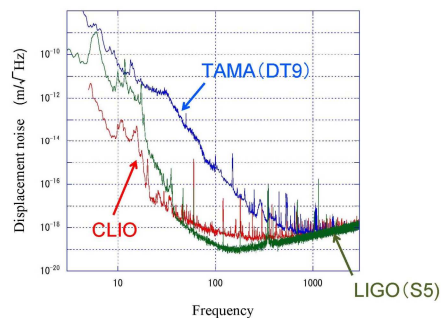
二つ目は振り子の熱雑音の同定である。重力波検出器は観測帯域付近において 2 つの熱雑音が問題となる。それは干渉計を構成する鏡の熱雑音と、防振のために鏡を懸架する振り子の熱雑音である。振り子の共振付近から離れた観測帯域での熱雑音は、低周波で微弱な量であるため同定されたことがなかった。2008年6月に30Hz~400Hzの未解明の雑音領域が劇的に改善されたのだが、このときに疑われた雑音源が、鏡の位置制御に用いられるコイルマグネットアクチュエーターを支えるコイルホルダー(アルミニウム製)に生じる渦電流による振り子の熱雑音であった。この成果については論文を準備中である。



熱雑音の変化と CLIO 感度の関係

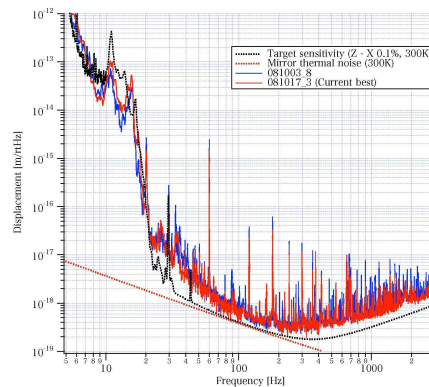
(2) 感度向上作業と平行して、短期間のテスト観測を行い、57時間の観測データを取得した。このデータを使用して、Vela パルサーからの連続重力波に対する解析を行った。Vela パルサーのスピン周波数は 11Hz (重力波は 22Hz) という低周波であるため、今までほとんど解析が行われていなかったからである。22Hz における CLIO の感度は基線長 4km の LIGO の感度を上回っていたため、Vela パルサーからの重力波に対して上限値をえることができた。この結果は査読付論文として出版された。

#### 鏡の揺れに換算した雑音スペクトル



CLIO と他の干渉計の感度比較

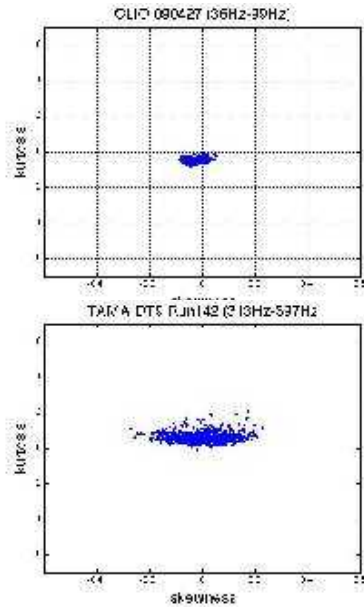
(3) CLIO の感度は着々と上がり、2008 年末には特筆すべき進展があった。100Hz 付近の感度が、サファイアミラーや振り子の熱雑音で制限されると予想できる領域に達したのである。これまでに、ミラーの熱雑音で決まる感度をもつレーザー干渉計は存在したが、ミラーと振り子の熱雑音を同時に見たとすれば、おそらく世界で初めてのことである。これについては、様々なパラメータを精査した後に論文投稿する予定である。



本研究における CLIO の最終感度 (常温目標感度にほぼ一致している)

(4) 光軸調整を自動的に行うアライメント制御系など、無人運転のための準備が進んだ。その状態で非常に短時間ではあるが、CLIO の最高感度で観測データを取得した。残念ながら、そのデータでバースト重力波解析する

ところまではいかなかったが、下記のように統計性（データのガウス分布）が良いことが初期解析で明らかになっている。



観測データのガウス性  
上：CLIO、下：TAMA

以上のように研究は順調に進んでおり、重力波に関連した国際会議からはCLIOの講演依頼もあるため、客観的に見ても十分な成果が出たと判断できる。

#### 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 9 件)

S. Miyoki, T. Uchiyama, K. Yamamoto, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Akutsu, S. Kamagasaki, N. Nakagawa, M. Tokunari, K. Kasahara, S. Telada, T. Tomaru, T. Suzuki, N. Sato, T. Shintomi, T. Haruyama, A. Yamamoto, D. Tatsumi, M. Ando, A. Araya, A. Takamori, S. Takemoto, H. Momose, H. Hayakawa, W. Morii and J. Akamatsu, The CLIO Project, 査読有, *Class. and Quantum Grav.* **23**, 8 (2006) S231-237.

S. Takemoto, H. Momose, A. Araya, W. Morii, J. Akamatsu, M. Ohashi, A. Takamori, S. Miyoki, T. Uchiyama, D. Tatsumi, T. Higashi, S. Telada, Y. Fukuda. A 100m laser strainmeter system in the Kamioka mine, Japan, for precise observations of tidal strains, 査読有, *Journal of Geodynamics*, **41**, 1-3 (2006) 23-29.

K. Yamamoto, S. Miyoki, T. Uchiyama, H. Ishitsuka, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Tomaru, N. Sato, T. Suzuki, T. Haruyama, A. Yamamoto, T. Shintomi, K. Numata, K. Waseda, K. Ito, K. Watanabe, Measurement of the mechanical loss of a cooled reflective coating for gravitational wave detection, 査読有, *Physical Review D* **74** (2006) 022002.

T Akutsu, M Ando, N Kanda, D Tatsumi, S Telada, S Miyoki, M Ohashi and the TAMA Collaboration, Analysis of gravitational wave bursts in TAMA300 data using an ALF filter, 査読有, *Class. Quantum Grav.* **23**, 19 (2006) S715-S722.

D. Tatsumi, R. Takahashi, K. Arai, N. Nakagawa, K. Agatsuma, T. Yamazaki, M. Fukushima, M.-K. Fujimoto, A. Takamori, A. Bertolini, V. Sannibale, R. DeSalvo, S. Marka, M. Ando, K. Tsubono, T. Akutsu, K. Yamamoto, H. Ishitsuka, T. Uchiyama, S. Miyoki, M. Ohashi, K. Kuroda, N. Awaya, N. Kanda, A. Araya, S. Telada, T. Tomaru, T. Haruyama, A. Yamamoto, N. Sato, T. Suzuki and T. Shintomi, Current status of Japanese detectors, 査読有, *Class. Quantum Grav.* **24**, 19 (2007) S399-S403.

A. Araya, W. Morii, H. Hayakawa, A. Takamori, T. Uchiyama, I. Yamada, S. Telada and S. Takemoto, Broadband Observation with Laser Strainmeter and a Strategy for High Resolution Long-term Strain Observation Based on Quantum Standard, 査読有, *Journal of the Geodesic Society of Japan*, **53**, 2 (2007) pp81-97.

T. Tomaru, M. Tokunari, K. Kuroda, T. Uchiyama, A. Okutomi, M. Ohashi, H. Kirihara, N. Kimura, Y. Saito, N. Sato, T. Shintomi, T. Suzuki, T. Hayuyama, S. Miyoki, K. Yamamoto and A. Yamamoto, "Conduction Effect of Thermal Radiation in a Metal Shield Pipe in a Cryostat for a Cryogenic Interferometric Gravitational Wave Detector", 査読有, *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 3 (2008) 1771-1774.

K. Yamamoto, H. Hayakawa, A. Okada, T. Uchiyama, S. Miyoki, M. Ohashi, K. Kuroda, N. Kanda, D. Tatsumi and Y. Tsunesada, "Effect of energy deposited by cosmic-ray particles on interferometric gravitational wave detectors", 査読有, Phys. Rev. **D78**, 022004 (2008).

T. Akutsu, M. Ando, T. Haruyama, N. Kanda, K. Kuroda, S. Miyoki, M. Ohashi, Y. Saito, N. Sato, T. Shintomi, T. Suzuki, H. Tagoshi, H. Takahashi, D. Tatsumi, S. Telada, T. Tomaru, T. Uchiyama, A. Yamamoto and K. Yamamoto, "Search for continuous gravitational waves from PSR J0835-4510 using CLIO data", 査読有, Class. Quantum Grav. 25 184013 (2008)

〔学会発表〕(計 18 件)

我妻一博、低温レーザー干渉計 CLIO(20)、日本物理学会、2009 年 3 月 30 日、立教大

宮川 治、低温レーザー干渉計 CLIO(19)、日本物理学会、2009 年 3 月 30 日、立教大

三代木伸二、低温レーザー干渉計 CLIO(18)、日本物理学会、2009 年 3 月 30 日、立教大

内山 隆、Current Status of CLIO、日本物理学会、2009 年 3 月 29 日、立教大

大橋正健、神岡低温レーザー干渉計 CLIO、日本天文学会、2009 年 3 月 27 日、大阪府立大学

我妻一博、低温レーザー干渉計 CLIO での入射系ドリフトの制御、日本物理学会、2008 年 9 月 23 日、山形大

内山 隆、低温レーザー干渉計 CLIO(17)、日本物理学会、2008 年 9 月 23 日、山形大

大橋正健、神岡レーザー干渉計による重力波観測、日本天文学会、2008 年 9 月 11 日、岡山理科大

我妻一博、低温レーザー干渉計 CLIO への WFS の導入、日本物理学会、2008 年 3 月 24 日、近畿大

大橋正健、低温レーザー干渉計 CLIO(16)、日本物理学会、2008 年 3 月 24 日、近畿大

内山 隆、低温レーザー干渉計 CLIO(15)

- 低温・低周波感度 -、日本物理学会、2007 年 9 月 22 日、北大

寺田聡一、低温レーザー干渉計 CLIO(14)  
- 現状 -、日本物理学会、2007 年 9 月 22 日、北大

内山 隆、低温レーザー干渉計 CLIO (13)  
日本物理学会、2007 年 3 月 27 日、首都大

寺田聡一、低温レーザー干渉計 CLIO (12)、  
日本物理学会、2007 年 3 月 27 日、首都大

阿久津朋美、低温鏡干渉計型重力波検出器 CLIO のデータ取得システムとオンラインモニターの構築、日本物理学会、2006 年 9 月 21 日、奈良女子大

粟家律親、レーザー干渉計 CLIO のデジタルアラインメントコントロール I、日本物理学会、2006 年 9 月 21 日、奈良女子大

内山 隆、低温レーザー干渉計 CLIO(XI)、  
日本物理学会、2006 年 9 月 21 日、奈良女子大

寺田聡一、低温レーザー干渉計 CLIO(X)、  
日本物理学会、2006 年 9 月 21 日、奈良女子大

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/gr.html>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

大橋 正健 (OHASHI MASATAKE)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号：80213833

(2) 研究分担者

内山 隆 (UCHIYAMA TAKASHI)  
東京大学・宇宙線研究所・助教  
研究者番号：60361656

(3) 連携研究者

森井 互 (MORII WATARU)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号：30221633