

機関番号：12601
 研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21740163
 研究課題名 (和文) デジタル制御を利用した重力波検出器の開発
 研究課題名 (英文) Development of gravitational wave detector using digital control

研究代表者
 宮川 治 (MIYAKAWA OSAMU)
 東京大学・宇宙線研究所・助教
 研究者番号：90532680

研究成果の概要 (和文)：

米国 LIGO グループとの国際協力で重力波検出器のためのデジタル制御システムを共同開発し、神岡坑山内に設置されたプロトタイプ重力波検出器 CLIO に一部システムを導入した。複雑な制御に絶え得るシステムを構築し、信号の入出力及びフィルター設計の調整など、実際の重力波干渉計の制御に十分耐え得るシステムを作り上げた。

研究成果の概要 (英文)：

We developed a digital controls system for the gravitational wave detector by an international collaboration with LIGO group in the U.S and installed it into a prototype gravitational wave detector CLIO located in Kamioka-mine. We implemented the system that able to control an actual complicated interferometer control topology by sensing and actuating signals digitally filtered and adjusted.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

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、重力波、計算機システム、超精密計測、制御工学

1. 研究開始当初の背景

1916年、一般相対性理論からの帰結として、波として光速で伝わる時空の歪みが存在することが、A.Einsteinによって予測された。これを重力波と呼び、その存在は長らく理論上のものではなかったが、J.H.Taylorらの連星パルサーPSR1913+16の周期変化の観

測により間接的にではあるが重力波が存在することが確かめられた。J.H.Taylorらはその功績により1993年、ノーベル賞を受賞している。しかしながら重力波と物質との相互作用は非常に微小なため、未だに直接検出には至っていない。重力波の直接検出はこれまでの電磁波による天文学では得ることのできなかった宇宙からの情報をもたらすと考

えられ、新たな重力波天文学という分野を創設する可能性を持っている。

このような背景のもと、近年、大型レーザー干渉計を用い直接検証を試みようという気運が国際的に高まっている。米国、仏伊では数 km の干渉計が稼働し、日本でも LCGT と呼ばれる基線長 3 km の低温型干渉計が計画されている。現在日本には TAMA 及び CLIO と呼ばれる基線長がそれぞれ 300m 及び 100m の 2 台の主力干渉計が存在する。しかしながら 100m クラスの干渉計では欧米の km クラスの干渉計に到底太刀打ちできず、欧米グループと対等に渡り合うために km スケールの LCGT を建設することは日本の重力波グループの悲願である。そのためには現存する TAMA、CLIO の感度を向上させることが最重要課題であり、特に LCGT の建設予定地と同じサイトである神岡鉱山にある CLIO の感度向上は、LCGT 実現への最短の近道と認識している。

大型干渉計を建設する際、近年急速に重要度を増してきて未だ日本のグループが手つかずになっている要素技術の一つが、計算機を利用したデジタルシステムによる干渉計の制御である。研究代表者である私が 2008 年 10 月まで在籍していた米国 LIGO グループでは、早くからその重要性を認識し、デジタル制御を導入することで世界最高感度の干渉計を計 3 台有するに至っている。この複数台の同程度の最高感度というのもデジタルシステムの重要な結果の一つである。例えば、制御に要するフィルター等はすべてソフトウェアで書かれているので、一カ所で開発した技術を全く同じ性能で他の場所に複製できるという利点を持っている。長期観測まで視野に入れた干渉計の調整やノイズハンティングを含めて、デジタルシステムは干渉計の開発期間を大幅に短縮でき、到達可能感度も大きく向上する可能性を持っている。

Km クラスの大型干渉計は、これまで日本のグループが経験しているスケールの干渉計よりはるかに多くの自由度を持ち、その制御トポロジーは非常に複雑になってくるので、デジタルシステムの導入による干渉計パラメータの調整やオペレーション管理は現在日本のグループが考えなければならない最重要課題の一つとなっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、現在日本で主流のアナログ回路を利用した干渉計型重力波検出器の制御を計算機を利用したデジタルシステムによる制御に置き換えることにより、干渉計の調整、雑音の除去などをより簡便にし、干渉計の感度を向上することである。干渉計は、

日本の次期大型計画 LCGT のプロトタイプである CLIO(図 1, 2 参照)を利用する。

3. 研究の方法

米国 LIGO グループとの共同開発で CLIO にデジタル制御システムを導入する。まず、1 もしくは 2 自由度程度の簡便なシステムを現在の CLIO のアナログ制御を一部置き換える形で導入し、デジタルシステム固有のノイズが CLIO の現感度を悪化させないことを確認する。その後光軸方向の制御のみでなく、鏡の角度揺れ方向の制御も含めて多自由度自由度展開を目指す。

ハードウェアの導入後、ソフトウェアの開発に取りかかる。実際にはソフトウェア開発の部分が実質的なオペレーションや感度向上に直接つながってくる部分となり、デジタルシステムの利点が効いてくるのは、ソフトウェアを使いより複雑なシステムをより効率的に動作させられるようになってからである。計算機による調節機構の自動化や精度の統一化、干渉計を動作状態にまで持つていくロックアクイジションのスクリプト化、重力波観測体制を含む長期オペレーションの自

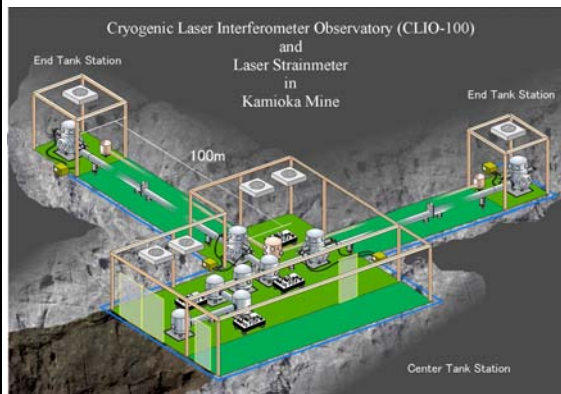


図 1: 神岡鉱山内に建設されている低温プロトタイプ干渉計 CLIO 干渉

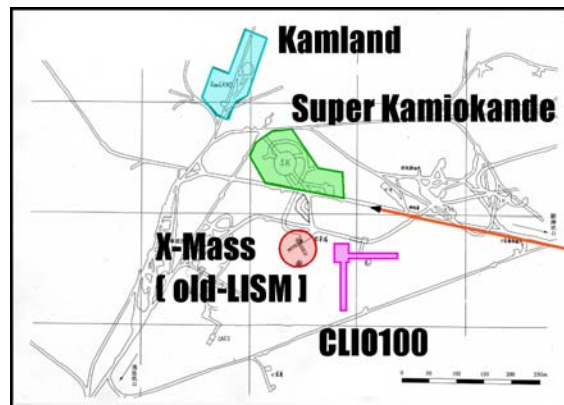


図 2: 神岡鉱山内での CLIO の位置

動化など、複雑な制御、調整、管理を要する大型干渉計に必要な要素技術を CLIO において開発する。

4. 研究成果

初年度に、米国 LIGO グループとの国際協力で CLIO 制御用のデジタル制御システムを共同開発し、実際に神岡鉱山内に敷設されている CLIO に一部システムを導入するに至った。多チャンネルの信号間の複雑な制御に絶え得るシステムを構築し、信号の入出力及びフィルター設計の調整など、実際の重力波干渉計の制御に十分耐え得るシステムを作り上げた。

具体的には、光路長制御の中の一自由度をアナログからデジタルに置き換え、干渉計を動作状態にスムーズに持っていくことができることを確認した。動作状態になるまでの時間もアナログに比べて短縮する等、デジタル制御の優位性が示される結果となった。また、初期アラインメントの自動化の原理検証実験を行い、次年度からの本格的な干渉計動作自動化への大きな足がかりを残すことができた。さらに、R&D 的な実験への応用例の一つとして、CLIO の鏡の揺れを軽減するシステムの多自由度の制御に短時間のうちに適用することができた。これは当初の計画では想定されていなかったが、デジタルシステムの汎用性の高さと、取り回しのよさを実証でき、各種 R&D 実験にも十分適用可能なことを示すことができた。

次年度は、導入されたシステムを実際に使用し、デジタル化による各種操作の自動化等による干渉計動作制の向上とともに、デジタルシステムの基本性能を見るための最重要課題である、干渉計のノイズハンティングを

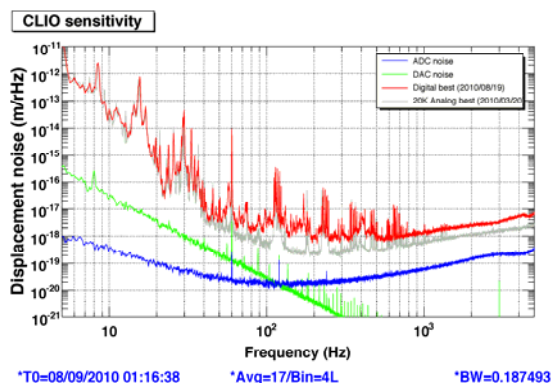


図3: デジタル制御で実現されたノイズ及び、デジタルシステム固有の ADC と DAC のノイズの影響

試みた。その際のデジタル固有のノイズの同定には、本システムならではの素早い取り回しによる、極めて迅速なノイズハンティングが可能であった。これによりデジタル化以前に達成されたアナログ制御での感度に迫る性能を実現し(図 3)、その基本性能の優位性が示されたと考えている。特に、デジタル小システム固有のノイズである ADC 及び DAC のノイズは目標感度の一桁以上も下にあり、将来のより感度の良い大型干渉計に置いても十分な余裕を持って使用できることが示された。

日本の次期大型干渉計計画 LCGT ではデジタル制御は必須と考えられており、そのプロトタイプであり、LCGT 建設予定地と同じ場所にある CLIO にデジタル制御を導入することで、将来計画に対する大きな知見と多くの技術蓄積が得られた。

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 2 件)

K. Agatsuma, T. Uchiyama, K. Yamamoto, M. Ohashi, S. Kawamura, S. Miyoki, O. Miyakawa, S. Telada, and K. Kuroda
Direct Measurement of Thermal Fluctuation of High-Q Pendulum
Phys. Rev. Lett., 104, 040602 (2010), 査読有り

K. Agatsuma, K. Arai, M.-K. Fujimoto, S. Kawamura, K. Kuroda, O. Miyakawa, S. Miyoki, M. Ohashi, T. Suzuki, R. Takahashi, D. Tatsumi, S. Telada, T. Uchiyama, K. Yamamoto and CLIO collaborators
Thermal-noise-limited underground interferometer CLIO
Class. Quantum Grav., 27, 084022 (2010), 査読有り

[学会発表] (計 4 件)

宮川 治
低温レーザー干渉計 CLIO(25), デジタルシステムの導入(II)
日本物理学会, 2009年9月10日, 甲南大学

宮川 治
低温レーザー干渉計 CLIO(28), デジタルシステムの導入(III)
日本物理学会, 2010年3月22日, 岡山大学

宮川 治

低温レーザー干渉計 CLIO(30), デジタルシステム
の導入(IV)
日本物理学会, 2010年9月13日, 九州工業
大学

宮川 治

CLIO から LCGT へ
日本物理学会, 2011年3月26日, 新潟大学

[その他]

ホームページ等

<http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGwwiki/CLIO>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮川 治, 宇宙線研究所, 助教

研究者番号: 90532680