

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00152

研究課題名（和文）次世代重力波天文学に向けたKAGRAの観測稼働率の向上

研究課題名（英文）Improvement of duty cycle of KAGRA for the next generation gravitational wave astronomy

研究代表者

梶田 隆章 (Kajita, Takaaki)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：40185773

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究において、日本の大型低温重力波検出器KAGRAにおける制御系、データ取得系のフロントエンドにあたる、信号入出力インターフェースを大幅に改善した。具体的にはこれまで16ビットという階調で出力していた制御信号を、20ビットに上げることにより、制御信号による雑音を下げる可能性を示した。KAGRAの感度がまだ出力階調で制限されていないため、KAGRAへのインストールには至っていない。そのため2023年度から始まる国際観測04では効果が明らかにはまだ出ないが、KAGRAの感度は日々向上し続けていて、次期観測の05では感度が問題になってきて20ビット制御が重要になると考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、KAGRA本体の制御信号を改善することで、重力は検出に対する感度や安定性が将来向上することが見込まれ、将来の重力波の検出頻度が上がる可能性が示された。実際には、現在のKAGRAの感度はまだ想定したレベルに達していないため2023年度から始まる国際観測では効果ははっきりとは出る可能性は低いですが、2026年頃に始まる次期観測までにはKAGRAの感度も出力制御信号に制限される可能性が極めて高くなる。今回製作した新型の信号入出力モジュール及びその他回路群、ソフトウェア群は、すでに一部使われ始めていて、今後の機器の安定性や観測率の向上が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have significantly improved the signal input/output interface, which is the front-end of the control and data acquisition systems of KAGRA, the Japanese large cryogenic gravitational wave detector. Specifically, we demonstrated the possibility of reducing noise caused by increasing the resolution of the control signals from 16 bits to 20 bits. Since the sensitivity of KAGRA is not yet limited by the output resolution, it has not yet been installed on KAGRA. Therefore, we do not see obvious effects in the international observation 04 starting in 2023; The sensitivity of KAGRA is continuously being improved, 20-bit control will be a key technology for the next observation 05, as the sensitivity is expected to be limited by control output noise.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 重力波天文学 重力波検出 精密測定 制御 干渉計

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1916年にアルバートアインシュタインの一般相対性理論によって予言された重力波は、およそ100年の時を経て米国LIGO計画によって2015年に検出された。その際の重力波源は二つの質量の違うブラックホール同士の合体であることがわかり、一般相対論の検証という意味だけでなく、天文学的にも中間質量ブラックホール同士の合体というほとんど予測していなかった現象であったため、非常に大きなインパクトがあった。2017年のノーベル物理学賞をLIGOの3人の研究者が受賞したことはまだ記憶に新しいが、検出という実験分野が受賞の理由となったことは、いかにこの微小な重力波の検出が実験的に難しかったのかを表している。

LIGOグループはその後、3例の重力波の検出を報告し、特に4例目では欧州のVirgo計画との同時検出の報告もされ、世界3台の検出器による同時観測で三角測量の原理により、重力波源の方向精度も格段に上がるなど、すでに統計的に重力波を扱うことができる重力波天文学の始まりの時代が来ている。その後も、LIGO-Virgoで二つの中性子連星による100秒にも渡る長時間重力波イベントが捉えられ、加えて可視光での追観測が世界中の望遠鏡で報告されるなど、まさに重力波天文学の幕開け時代と呼ぶにふさわしい盛り上がりを見せている。

このように、重力波の初検出のみならず、複数の重力波検出による重力波天文学という新たな学問分野が開かれようとしている背景の中、日本の大型低温重力波望遠鏡計画KAGRAはLIGOの建設スタートから遅れること15年、2010年にやっと建設許可が下りるに至った。トンネル掘削、真空装置や防振系の建設と計画は順調に進み、その後種々の光学系を組み込み、2016年の試験観測を遂行した。それ以降も重力波検出が実現できる感度に達するべく、装置の改良が日々進んでいる。KAGRAが当初目指した重力波の初検出はLIGOグループによって実現されてしまったが、今後の重力波天文学の発展には地球規模的にKAGRAの位置が重要になる。KAGRAでの重力波観測が進むことで、重力波源の位置精度の向上に貢献できることはもちろん、重力波の偏光など4台目の検出器があって初めて解明できる物理が存在する。

このような研究開始当初の背景の元、本基盤Aの研究期間の間に、KAGRAは国際観測網において重力波の検出を成し遂げ、その後に複数の重力波を継続的に検出できるかどうかの議論になるかと予測していた。

2. 研究の目的

KAGRAは設計当時の思想として低温技術を率先して導入するなど、最高の感度を出すための性能を求めた。しかしながらその一方で、安定した観測データを生み出し続けるという視点は十分ではなかったのではないだろうかという疑問が出てきた。世界を見ると重力波初検出の盛り上がりの時期は過ぎ、定常的に重力波を検出する天文観測施設として存在する意義が求められ始めていて、非常に複雑な制御を有する重力波検出器に、コストをかけて安定に動かすという努力をしなければ、観測施設として成り立たないということ認識すべきである。

そのような観点からKAGRAを重力波天文台ともいうべき観測施設として考えた場合に、準備不足と思われる点を挙げてみた。大きく3つある。

- A) 突発的な非定常雑音からくる重力波データの汚れの対策
- B) 制御信号の分解能の制限からくるダイナミックレンジの不足
- C) 検出器の診断技術

これらは全て重力波検出器の安定性に大きく関わり、観測体制としての稼働率に直結し、重力波の検出率にそのまま効いてくる。そのため、本研究は「重力波検出器としての観測稼働率を上げ、KAGRAを重力波天文学に耐えうる観測施設にすること」を目的とする。

3. 研究の方法

ここでは、上で挙げた3つの目的に対し、どのように研究を進めていくかの具体的な方法を示す。

A)に関しては、現在のKAGRAでは一つの計算機で使える信号の数が、光ファイバーケーブルで接続されたデータ入出力モジュールの性能で制限されてしまっている。そのモジュールをさらなる信号帯域を持つように10台分を新規開発し、より多くの信号を扱えるようにする。その新規モジュールに、32チャンネルのアナログデジタルコンバーターを20枚程度追加し、信号数の大幅な増加をする。また、ネットワークスイッチ、およびネットワークカードの10ギガビット化を進め、信号帯域の制限を緩和する。以上のことにより、制御系、データ取得系の大幅な性能改善を目指し、非定常雑音の軽減を目指す。

B)に関しては、KAGRAの主鏡のアクチュエーター部分に信号を送るデジタルアナログコンバーターを、現在の16ビットのものから新たな20ビットのものに置き換える。また、デジタルアナログコンバーターから出た信号を鏡に信号を返すまでの間に設置するアナログフィルター回路群、特にアンチイメージフィルターと呼ばれるデジタル信号からアナログ信号に変化する際の、余分な雑音を除去するフィルターは、現在のものより4ビット分(16分の1)低雑音化しなくてはならない。そのために回路全般を製作する。実際に鏡を動かす制御系のソフトウェアも、現在の16ビット出力のものを20ビット化する必要がある。計算機内では信号自身は32ビット化されているので、これを出力時に16ビットに落として出力しているものから、20ビットに落とし

て使うことは容易である。

C)については専属のプログラム開発者を雇用する予定である。A、B で新規開発、および高分解能化した部分を組み込んだ際の、信号評価、量子化雑音のレベルを評価する診断できるシステムを開発することは極めて重要である。

4．研究成果

研究開始当初、KAGRA は 2019 年から 2020 年の O3 と呼ばれる LIGO、Virgo 国際観測に参加する予定であったが、コロナ禍で当初の観測予定期間が短くなったこと、また KAGRA 本体の感度が不十分であったことなどの理由で、実際には GEO600 との 1 ヶ月程度の短期的な共同観測のみとなった。さらに、当初 2022 年 6 月開始予定だった O4 と呼ばれる国際観測も 2023 年 5 月開始予定とほぼ 1 年の延期になった。それらの理由から、本研究の成果の一部は KAGRA 本体に導入しているが、全てを導入して感度向上まで含めて検証することは実現していない。その一方、今後の観測において本研究で製作した機器や数々のソフトウェアは必須となり、KAGRA の検出器の性能向上や安定化に貢献していくことは、少し時期を待つ必要はあるかもしれないが、間違いなく期待できる。以下において、実際に製作した機器などの詳細を記しておく。

4-1. 重力波検出器 KAGRA で安定した観測体制を築くため、基盤 A による補助金を用いて多くの機器や回路を設計製作した。また ADC については、KAGRA の性能を引き出すための機器を選定し、購入した。特に、2 年目には KAGRA 本体で回路と機器を接続するためのケーブルを製作し、一部を KAGRA 本体に導入した。ここでは、上の目的に挙げた A、B、C に即して、成果を列挙する。

A-1: データ入出力モジュール

新たにデジタルアナログコンバーター、アナログデジタルコンバーターなどを 15 枚追加できるデータ入出力モジュールを設計開発し、8 台製作した。(図 1)。計算機からは PCIe の拡張スロットとして認識され、そこに搭載されたボードに GPS からの同期信号などが注入される。これまでの KAGRA の信号入出力モジュールと違い、小数枚を認識するボードを複数枚、複数の光ファイバーケーブルで接続することで、安定性を増している。また、電源周りを新たに見直すことで、安定した電源供給を実現していて、これも安定な稼働につながっている。実際、旧信号入出力インターフェイスボックスでは電源周りの不安定性から、再立ち上げ時にトラブルなどがある可能性があったが、新型のものではそのような現象はこれまで一切無くなっていることが確認できている。

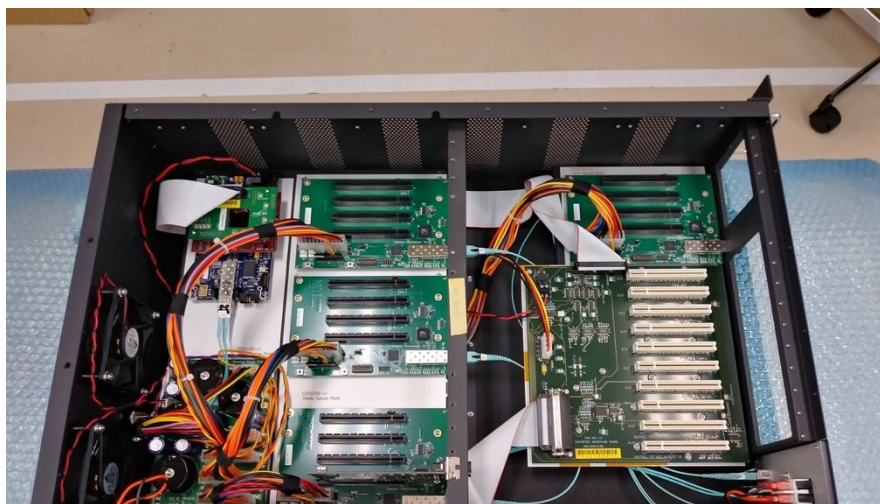


図 1: 製作したデータ入出力モジュール。汎用的にデジタルアナログコンバーター、アナログデジタルコンバーターカードなどを追加でき、各カードにタイミング信号を供給する。

A-2: ケーブル

各サブシステムと測定機器や回路などを接続するための D-SUB ケーブルを、設計製作した。このケーブルは雑音減や不安定動作の原因となるグラドループを作らないように特別に設計されていて、両端の金属シェルの片方とシールド線が、もう片方とグラウンド線がつながっていて、グラドループを避けつつ、グラウンド信号線をケーブル接続先に確実に伝えるような仕様とした。既に KAGRA 本体に一部インストールされている。

B-1. 20 ビットデジタルアナログコンバーター

20 ビットデジタルアナログコンバーターには General Standard 社のものを選択した。現在

KAGRA で使われている 16 ビットモデルを新たに再基本から再設計したものになる。16 ビットモデルを簡易的に拡張した 18 ビットモデルも存在しているが、出力信号の正負の反転時で信号が飛ぶなど、不安定が確認されたために、線型性、信号の滑らかさという意味で、より素直な拡張モデルの 20 ビット版のものを使うことにした。

B-2. 回路 1: アダプターカード

実際のデジタルアナログコンバーターとして動作させるためには、65536Hz(2 の 16 乗)および 1PPS (Pulse Per Second)の同期のためのクロック信号を入力する必要がある。そのための外部からのクロック信号を、リモートでオン/オフの操作をして入力できる様なアダプターカード回路の設計、製作をした(図 2)。これは KAGRA 本体の制御装置でもそのままクロック信号の切り替えができるような、互換性の高い回路としたため、性能評価後直接 KAGRA に導入できるようになっている。回路設計時においては、クロック信号の入力切替において入力信号が途絶える、故障を引き起こす様な潜在的な問題が発見されたが、それらも改善しより安定な動作を実現することができた。



図 2: General Standard 社製の 20 ビットデジタルアナログコンバーターをデータ入出力モジュールで動作させるためのアダプターカード。写真では 18-Bit となっているが、18 ビット(今回は購入していない)および 20 ビットカード両方に使える仕様となっている。

B-3. 回路 2: アンチイメージフィルター

アナログ信号をデジタル信号に変換する際に、アンチイメージフィルターと呼ばれるデジタル信号から発生する高周波の偽信号を除去する回路が必要となる。偽信号はノイズと考えられ、このアンチイメージフィルターがないと実際の鏡は高周波成分で揺らされてしまう。これまで使ってきた 16 ビット対応のものでは雑音が大きく不十分で、4 ビット分(16 分の 1)の低雑音化しなくてはならないことが判明し、20 ビットデジタルアナログコンバーター専用新たに設計、製作した(図 3)。



図 3: 製作したアンチイメージフィルター。デジタル信号から発生する高周波の偽信号を除去する。

C-1. 信号の評価についてであるが、まず本研究期間がほぼ全てコロナ禍であったということもあり、当初計画していた人を雇うことが困難であった。そのため、サイトのモニターシステムを増強し、リモートで各種診断できるシステムを構築した。

本システムは診断のみでなく、KAGRA の自動運転も司り、コロナ禍におけるリモート操作にも大きな役割を果たしている。図 4 は診断、自動操作システムのごく一部であるが、このようなユーザーインターフェースを介して、裏で各種スクリプトを走らせる。これらのスクリプトは常時アップデートされ続けていて、今後も十分に調整整備されていく。ヒューマンエラーをできるだけ避けることに貢献し、今後行われる重力波観測体制の安定性に直接つながることになる。



図 4: 各種操作のための画面の一例。KAGRA 本体の制御を動作を司るシステム。各ステートと呼ばれる段階が示されている。右下から左上に動作状態が進行していく。後に診断しやすいように、各ステートには番号が割り振られていて、動作時間などの検証に使われる。

C-2. 制御ソフトウェア

新規の 20 ビットデジタルアナログコンバーター合わせて、制御系のソフトウェアも、現在の 16 ビット出力のものを 20 ビット化する必要があるが、こちらも対応済みであり、動作確認をした(図 5)。

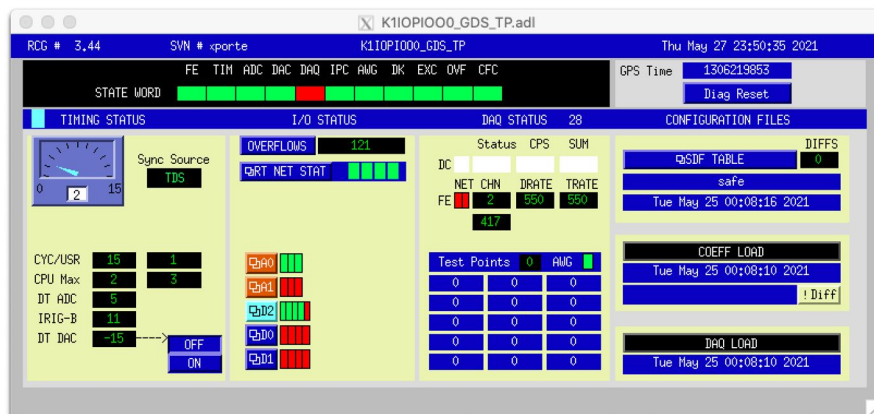


図 5: 20 ビットデジタルアナログコンバーターの制御を司るソフトウェアのサマリー画面。真ん中の D2 というのが、今回新たに導入した 20 ビットデジタルアナログコンバーターに相当する。

4-2. KAGRA 本体への取り組み

4-1 で選択した 20 ビットデジタルアナログコンバーターと、製作したアダプターカードを、KAGRA で用いられている信号入出力ボックスに組み込み、動作の確認をした。まずは 20 ビットデジタルアナログコンバーターが単体で動作することを確認し、さらに制御システムの一環としてきちんと全体で動作するかどうかを確認した。

KAGRA 本体では 2020 年度初めまで観測が続き、その後約 3 年に渡りアップデートとコミッションが続いた。特に多数の防震装置のアップデートに予想以上の時間がかかったこと、KAGRA の感度が 20 ビットデジタルアナログコンバーターを必要とするほど向上しなかったことなどの理由で、残念ながら KAGRA 本体の実際のアクチュエータ部分に組み込むことは本研究期間内には実現しなかった。その代わりに 20 ビットデジタルアナログコンバーターを今後スムーズに KAGRA 本体にインストールする準備として、別途製作した KAGRA での制御システムに近い規模のテストベンチを製作して、そこでテストをしている。また、サブシステムの動作確認として、新規データ入出力モジュールを 1 年ほど稼働して実際に使っていて、少なくとも年単位で安定して動くことが確認できている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Akutsu Tomotada, et.al.	4. 巻 91
2. 論文標題 Compact integrated optical sensors and electromagnetic actuators for vibration isolation systems in the gravitational-wave detector KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 115001 ~ 115001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0022242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Akutsu Tomotada, et.al.	4. 巻 125
2. 論文標題 Overview of KAGRA: Detector design and construction history	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Akutsu Tomotada, et.al.	4. 巻 93
2. 論文標題 Performance of the KAGRA detector during the first joint observation with GE0600 (O3GK)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Akutsu Tomotada, et.al.	4. 巻 166
2. 論文標題 Input optics systems of the KAGRA detector during O3GK	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Akutsu Tomotada, et.al.	4. 巻 37
2. 論文標題 An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 035004 ~ 035004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab5c95	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Akutsu Tomotada, et.al.	4. 巻 120
2. 論文標題 Overview of KAGRA: KAGRA science	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>KAGRA 大型低温重力波望遠鏡 https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp KAGRA wiki http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGllwiki/KAGRA KAGRA Digital System Subgroup http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGllwiki/KAGRA/Subgroups/DGS</p>

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
研究分担者	山本 尚弘 (Yamamoto Hirotaka) (00796237)	東京大学・宇宙線研究所・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	宮川 治 (Miyakawa Osamu) (90532680)	東京大学・宇宙線研究所・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関