

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03896

研究課題名(和文) 即時重力波アラートに向けた環境雑音除去システムの構築

研究課題名(英文) Development of data quality evaluation system for the realtime triggers of gravitational wave observation

研究代表者

端山 和太(Hayama, Kazuhiro)

福岡大学・理学部・准教授

研究者番号：70570646

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：リアルタイムでの重力波探査を実現するために、外部環境の擾乱が望遠鏡運転に与える影響などから、望遠鏡の運転状態による観測データの質を定量的に評価し、重力波探査に反映する手法の確立を行った。そして望遠鏡の観測状態を4つのカテゴリーに分類し、重力波探査を効率的に行い、より短時間で探査を行える体制を構築した。

2020年に行われたLIGOとVirgo、GEO、KAGRAによる初めての共同観測の観測データの解析を中心に行った。我々は、継続時間が数ミリ秒から数秒の波形不明の突発性重力波の探査について、国際共同観測チームをリードして、観測データを解析し、観測期間内での突発性重力波の上限値を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では突発性重力波探査において、KAGRAの観測データの質を評価するシステムを構築し、それを初のLIGO-Virgo-KAGRA共同観測に適用した。観測データの質を評価することは、サイエンスを行う上で必須のことであり、そのシステムを構築したことは意義深いと考える。また、実際に観測データに適用し、KAGRAにとって初の国際共同観測の論文の突発性重力波探査のパートを担当したことも重要な進歩であると言える。

研究成果の概要(英文)：In order to realize a real-time gravitational wave observation, we established a method to quantitatively evaluate the quality of observation data depending on the telescope's operating conditions and reflect it in the gravitational wave observation, based on the effects of external environmental disturbances on the telescope's operation. Then, we classified the telescope's observation status into four categories, and established a system to efficiently conduct gravitational wave observations and to perform them in almost realtime.

We focused on the analysis of observation data from the first joint observation by LIGO, Virgo, GEO, and KAGRA in 2020. We led the international joint observation team in the search for abrupt gravitational waves with unknown waveforms of a few milliseconds to a few seconds in duration, analyzed the observation data, and obtained upper limits for abrupt gravity waves within the observation period.

研究分野：gravitational wave astronomy、重力波天文学

キーワード：gravitational wave KAGRA observation

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2015年のLIGOによる初の重力波検出によって、ブラックホール連星合体イベントを皮切りにその後複数イベントが観測され、2017年にはLIGO-Virgoの国際重力波望遠鏡ネットワークによって連星中性子星連星合体イベントが観測された。重力波天文学はまだ、その対象である重力波が検出された段階である。今後は一層の観測によって統計を稼ぎ、また対応天体のより正確な推定、電磁波観測との連携による光度変化やショックブレイクアウトの観測といった、広く横断的に天文・物理学の理解を獲得するという核心的研究が行われていく。そのための喫緊の準備として大切なのが、電磁波観測網への重力波アラートの正確性と即時性であり、現段階ではKAGRAでは検討されていないが近い将来観測フェーズに移るまでには必ず検討しなければならない事項である。このアラートの正確性と即時性を獲得するためには次の2点が必要であり、それはKAGRAの世界重力波観測ネットワークへの参加と、リアルタイムでの疑似重力波雑音の除去システムの構築である。

KAGRAは、地理的にLIGO-Virgoでカバーできない天球領域を捉え、またパラメタ推定精度の向上、偏極モードの縮退を解きモデル依存性の無い重力理論のテスト、偏極モードの円偏光による星のダイナミクスの解明といったことを可能とする重要な役割を果たす。LIGO-Virgoが観測体制に入った現在、KAGRAが早期にデザイン感度を実現し、望遠鏡ネットワークの一角を担い安定的に観測を続けることは急務である。

将来期待される連星合体直後や超新星爆発直後の光度曲線の観測やショックブレイクアウトの観測には重力波検出後数分内のレイテンシでアラートを出す必要がある。その際、重力波望遠鏡の観測データに高頻度で現れる疑似重力波雑音をリアルタイムで判別・除去することが重要となるが、世界の情勢ではLIGO、Virgoにおいて研究が始まったばかりで、まだ成果が出ていない。先のLIGOによる重力波検出では、重力波アラートを出すのに数時間のレイテンシが必要だった。即時アラートの実現のためには望遠鏡状態の常時モニタと、望遠鏡が地上にある限り将来的にも避けることができない地震動や電磁現象といった外部環境のモニタとその影響をリアルタイムに評価することが大切となる。

一方KAGRAは建設段階であり、現段階では重力波の即時アラートシステムについての方針は決まっていないが、2020年には重力波観測ネットワークの一角を担うため、早急に即時アラートシステムの準備を行う必要がある。本研究はマルチメッセンジャー観測においてLIGO、Virgoに後れを取らない形で将来即時アラートを実現する上でのキーテクノロジーを開発するものである。

### 2. 研究の目的

重力波観測において重要な要素である、リアルタイムでの重力波イベントアラートを発信するために、最も基礎となる重力波と雑音(特に環境雑音)との切り分けをリアルタイムで行う手法の確立を実現することである。そのために、まずは環境の擾乱が望遠鏡に与える影響を定量的に評価する手法を確立させることである。

### 3. 研究の方法

重力波を起点とするマルチメッセンジャー観測のキーポイントとなる確度の高い即時アラートを実現するためには、疑似重力波雑音を、雑音として特定してリアルタイムでイベント候補から除去しなければならない。本研究では、たとえ望遠鏡が完成しても排除することができない、外部環境の擾乱を源として混入する雑音を、重力波望遠鏡周辺に設置した環境センサの情報を利用して評価し、データクオリティ情報としてフラグ付けを行い、実際の観測データにリアルタイムで適用した。

そのフラグを用いて、2020年4月に行った、LIGO、Virgo、KAGRA共同観測に適用し、KAGRAのデータの質を評価し、突発性重力波の探査を行った。

#### 4 . 研究成果

2019 年度は、望遠鏡の運転状態による観測データの質を定量的に評価し、重力波探査に反映する手法の確立に成功した。望遠鏡の状態変化の中で、特に重力波探査に影響する、干渉計ロック情報、アウトプットモードクリーナ、ミラー制御信号、防振系制御信号などの情報を用いて定量的に評価する方法を確立した。そして望遠鏡の観測状態を4つのカテゴリーに分類し、重力波探査を効率的に行い、より短時間で探査を行える体制を構築した。

また、擾乱実験の方は福岡大学でテーブルトップサイズの干渉計を構築し、地震動、音響雑音を与えることで、干渉計の伝達関数がどのように変動するかについての基礎実験を行った。実験室内の温度、湿度、気圧をモニタする、環境モニタをラズベリーパイを用いて開発。これはKAGRAのアームといった環境が厳しい場所での環境をモニタする際に必要になる安価で湿度に強い環境モニタを作成する第一歩となった。

2020 年度は、2019 年度に構築した、リアルタイムでの KAGRA 望遠鏡の観測状態に基づいたデータクオリティ評価システムを、2020 年 2 月から 4 月まで行われた LIGO と Virgo、GEO、KAGRA による初めての共同観測で実際に運用し、問題点の洗い出しと、システムの完成度を調べた。現状では KAGRA は観測体制に入ったものの、まだ不安定な状況が続くため、長時間の安定観測には至らなかったが、それでもリアルタイムで望遠鏡の観測状態を評価するシステムが動作することを確認した。また、得られた観測データと、データクオリティ評価結果を利用して、KAGRA としては初の国際共同重力波探査を行った。我々は特に、突発性重力波の探査について国際共同観測チームをリードして、探査を進めた。現在観測結果を論文にする上でも中心となって進めている。また、重力波を検出した際に、リアルタイムで波形解析をして、物理を明らかにする研究を進めた。本年度は、超新星爆発からの重力波の円偏光についての検出可能性に関して、世界の独立したグループが行った 3D シミュレーションで得られた様々な重力波に対して調べ、モデルには寄るが、コアの回転を持つモデルに関しては 5 kpc 程度まで検出できることを示し、論文を Physics Review D. に投稿した。

2021 年度は、2020 年 2 月から 4 月まで行われた LIGO と Virgo、GEO、KAGRA による初めての共同観測の観測データの解析を中心に行った。我々は、超新星爆発からの重力波といった、波形が前もって予想できず、また継続時間が数ミリ秒から数秒の突発性重力波の探査について、国際共同観測チームをリードして、観測データを解析した。その結果重力波は検出されなかったが、上限値を得た。2022 年 3 月には、各重力波源からの重力波の探査結果とともに、我々の出した重力波の上限値を用いた観測論文を Progress of Theoretical and Experimental Physics に投稿した [1]。この論文は、KAGRA と LIGO, Virgo との初めての共同観測論文となる。

また、2020 年度に Physical Review D に投稿した、超新星爆発からの重力波の円偏光についての検出可能性に関して調べた論文が出版された [2]。

[1] LIGO-Virgo-KAGRA collaboration, arXiv:2203.01270

[2] Chan, L., Hayama, K., Physical Review D, Volume 103, Issue 10, article id.103024

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Hayama, K. in Akutsu T et al.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Application of independent component analysis to the iKAGRA data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa056	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 Hayama, K. in Michimura Yuta et al	4. 巻 102
2. 論文標題 Prospects for improving the sensitivity of the cryogenic gravitational wave detector KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.022008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hayama, K. in Akutsu T et al	4. 巻 2020
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 1-24
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 Hayama, K. in Abbott B. P. et al.	4. 巻 23
2. 論文標題 Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Living Reviews in Relativity	6. 最初と最後の頁 1-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41114-020-00026-9	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 Hayama, K. in Akutsu T et al	4. 巻 2020
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 1-68
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayama, K. in Akutsu T. and et al.	4. 巻 1342
2. 論文標題 The status of KAGRA underground cryogenic gravitational wave telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012014 ~ 012014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1342/1/012014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayama, K. in Akutsu T. and et al.	4. 巻 1342
2. 論文標題 The status of KAGRA underground cryogenic gravitational wave telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012014 ~ 012014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1342/1/012014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayama, K. in Akiyama Y. and et al.	4. 巻 36
2. 論文標題 Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 095015 ~ 095015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab0fcb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayama, K. in Akutsu T and 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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takeda Hiroki, Nishizawa Atsushi, Nagano Koji, Michimura Yuta, Komori Kentaro, Ando Masaki, Hayama Kazuhiro	4. 巻 100
2. 論文標題 Prospects for gravitational-wave polarization tests from compact binary mergers with future ground-based detectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 042001 ~ 042013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.042001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayama, K. in Kawamura Seiji et al.	4. 巻 28
2. 論文標題 Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics D	6. 最初と最後の頁 1845001 ~ 1845001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218271818450013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakuno, Y., Hayama, K.	4. 巻 50
2. 論文標題 The dynamical properties of the rotation of GW170817 by circular polarization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fukuoka University science reports	6. 最初と最後の頁 8-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Nagano, H., Hayama, K.	4. 巻 50
2. 論文標題 Measuring the curvature of the universe using the gravitational wave observation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fukuoka University science reports	6. 最初と最後の頁 65 - 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Gushima, Y., Hayama, K.	4. 巻 51
2. 論文標題 Model-independent test of Scalar-Tensor gravity theory by reconstructing scalar mode of GW170817	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fukuoka University science reports	6. 最初と最後の頁 47 - 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Kukihara, M., Hayama, K.	4. 巻 51
2. 論文標題 Probing multiverse using gravitational wave observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fukuoka University science reports	6. 最初と最後の頁 53 - 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Gushima, Y., Hayama, K.
2. 発表標題 Model-Independent test of Scalar-Tensor gravity theory by reconstructing scalar mode of GW170817
3. 学会等名 Sixteenth Marcel Grossmann Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kukihara, M., Hayama, K.
2. 発表標題 Probing multiverse using gravitational wave observations
3. 学会等名 Sixteenth Marcel Grossmann Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Gushima, Y., Hayama, K.
2. 発表標題 Model-Independent test of Scalar-Tensor gravity theory by reconstructing scalar mode of GW170817
3. 学会等名 GWPAW 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kukihara, M., Hayama, K.
2. 発表標題 Probing multiverse using gravitational wave observations
3. 学会等名 GWPAW 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------