

研究実績報告書

**重力波データ抽出方法の開発：
新たな解析手法および分散型コンピューティングの導入**

**New directions in gravitational-wave data analysis:
both in computing algorithms and hardwares
including its outreach activities**

2019年度—2023年度科学研究費補助金 基盤研究(B) 課題番号 19H01901

令和6年(2024年) 6月

真貝寿明 Hisaaki Shinkai

大阪工業大学情報科学部 教授

この報告書とより詳しい研究発表リストは、<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/GWdata2019/project.html>よりダウンロードできます。

研究成果の概要 / Outline of Research Achievements

(日本語版)

日本の KAGRA 重力波観測グループは、2020 年より米欧のグループと共同観測・共同解析をはじめた。本研究では、この共同解析を組織の代表として進め、計算機環境を整えるとともに、重力波データ解析の新たな手法を提案した。後者は「自己回帰モデルを用いる波形抽出」「Hilbert-Huang 変換法を用いる波形抽出」など、事前に波形テンプレートの準備を不要とする重力波検出方法の開発、およびノイズにロバストなデータ解析を目的にした「独立成分分析を用いたノイズ除去」「機械学習を用いたノイズ除去」などを含む。これら 4 提案はいずれも実データを用いた実用性までを提示し、解析ツールへの実装を進めている。

(英語版)

The KAGRA group in Japan, which has been promoting gravitational wave observation, had started full-scale joint observation and analysis with groups in the U.S. and Europe from 2020. In this study, we promoted the joint analysis as core members of KAGRA group, and we also proposed new methods in gravitational-wave data analysis. The latter includes the new methods of extraction of gravitational waves applying “autoregressive model” or “Hilbert-Huang transformation” both of which do not require templates beforehand. We also developed noise reduction methods using “independent component analysis” or using “machine learning”. These proposals had been presented with applications to the real event data, all of them show the robustness against noise. These new methods will be applied to improve the accuracy of parameter estimation of gravitational-wave source objects and to test general relativity in an alternative perspective.

研究成果の学術的意義や社会的意義 / Scientific and social significance of your research achievements

我々が開発した重力波抽出やノイズ除去の新技术は、重力波波源天体のパラメータ推定の精度向上や新たな一般相対論の検証手法として応用される。今後、観測装置の能力向上とともに、重力波観測はその観測数を増し、精密科学となっていくことが期待されるが、そのための解析基盤を充実させることができたと考えられる。また、本研究では、重力波サイエンスのアウトリーチ活動も 1 つの柱としており、国際共同研究で発表した論文要旨を一般向けに翻訳して示すプロジェクトは、今後も継続して行っていく。また、2025 年度からは全国 6 カ所の科学館・博物館にて重力波とブラックホールの研究を紹介する展示も準備している。

キーワード

一般相対性理論 重力波 ブラックホール データ解析

1 研究開始当初の背景

2015 年 9 月に米国の LIGO グループと欧州の Virgo グループは重力波の直接観測に成功した。その後、本研究課題の申請時までに 6 例 (本研究課題の開始時までに 10 例) の重力波検出が報告された。日本の重力波干渉計 KAGRA (岐阜県神岡, プロジェクト PI は梶田隆章・東京大学宇宙線研究所所長 (当時)) は、米欧より 20 年遅れで装置を完成させつつあったが、装置調整の遅れから、観測開始の時期が定まらなかった。また、重力波の検出には複数台の装置による同時観測が必要となるため、米欧との共同観測・共同解析の体制を構築する必要もあった。米欧との共同体制が構築できたとしても、日本発の独自の解析や発見を行うことが期待されていた。本研究の代表者・真貝は、KAGRA グループの研究者代表を 2017 年から務めており、共同体制構築の交渉を行う立場にあった。本研究が開始された 2019 年度は、その交渉が本格化したときだった。

重力波の解析手法に関しては、あらかじめいくつもの重力波の波形を計算してテンプレートとして蓄え、ノイズに埋もれた重力波信号が存在するかどうかを確率的に判定する整合フィルタ法が主流である。確実な方法ではあるが、十分な量のテンプレートを準備し、かつ十分な計算機パワーが要求される。重力波物理学が最終的に解明すべき問題としては、一般相対性理論がどこまで正しいのか (量子重力理論へとつながる理論は何か) という理論の検証問題があるが、整合フィルタ法では、一般相対性理論以外の重力波テンプレートを用意することには限界がある。そこで、整合フィルタ法とは別に、重力波を抽出する方法の開発が望まれた。本研究は、この点に着目し、ノイズにまみれた実データから、意味のある重力波信号を取り出す新しい技術開発を進める計画を掲げた。

2 研究の目的

本研究では、以下の 3 つを目的とした。(A) 新しい重力波の抽出方法およびノイズ除去方法を開発し、実データを用いてその有効性を明らかにすること。(B) 計算資源を確保し、将来に向けた重力波解析環境を構築すること、そして、(C) 巨大サイエンスとして進められている重力波観測の成果をできる限り社会へ還元できるアウトリーチ体制を確立することである。具体的には、(A) に関しては、「自己回帰モデルによる波形抽出」と「Hilbert-Huang 変換法を用いる波形抽出」を予定し、その他に「疎性モデリングによるノイズ除去」の可能性についても提案した。

「実データを用いた実証を行う」ことについては、研究開始当初の 2019 年では実現できていなかった。米欧の LIGO-Virgo コラボレーションと対等なレベルで共同研究体制を構築し、運用を開始することが、研究を進める上での必要なステップとなった。

3 研究の方法

(1) LIGO-Virgo-KAGRA 重力波観測コラボレーション体制の構築

本課題の研究代表である真貝は、KAGRA の研究者組織委員に 2019 年夏の選挙で再び選出され、2 期目の研究者代表に就き、米欧との対等な共同観測体制の覚書に 2019 年 10 月に梶田隆章 PI と共に調印した。KAGRA 内での研究グループ体制も米欧に対応するように再構築し、本課題の研究分担者の伊藤は KAGRA の連続重力波解析の責任者として、同じく高橋は 3 プロジェクト間の連携コンピューティング担当として、日本の重力波プロジェクトの一翼を担うことになった。

KAGRA は、2020 年 2 月に実観測を開始して共同観測体制に入ったが、残念ながらコロナ禍で世界中の観測がすぐに中断してしまう。しかし、2020 年からの実観測 (O3b; 第 3b 期観測) 結果に関する論文執筆には対等に関わり、毎週数回開かれるオンライン会議への参加、年に 2 回開かれる対面会議への参加 (コロナ禍のときはオンラインで実施)、論文原稿の内部査読、修正提案とりまとめ、新手法の内部提案などの研究活動が恒常化した。

2021 年夏に、真貝は 2 期満期終了で研究者代表から解放される。その後は、KAGRA のアウトリーチ担当グループを組織し、米欧との共同活動を進めている。また、2023 年 5 月から開始された第 4 期観測 (O4) では、

真貝は、重力波検出判定を行う観測シフト体制のアジア・インド圏のとりまとめ役となって、実観測時の対応や追観測する天文学者への情報公開手順などを取り仕切っている。

(2) 新しい重力波の抽出方法の開発、および計算機環境の構築

我々が提案する新たな手法としては、真貝が中心として進めた「自己回帰モデルを用いる波形抽出」「疎性モデリングによるノイズ除去」、高橋が中心として進めた「Hilbert-Huang 変換法を用いる波形抽出」「機械学習を用いたノイズ除去」、伊藤が中心となって進めた「独立成分分析を用いたノイズ除去」がある。適宜連絡を取り合いながら進展を共有した。学会や研究会を含めて、少なくとも年に4回は対面で協議する場を設けた。

本研究課題の予算を用いて、研究分担者の島野・西口・鳥居が所属する大阪工業大学に、重力波解析を行うための専用ワークステーションを構築した。将来的な分散コンピューティングシステムを導入するテスト環境を整えた。

(3) コロナ禍での活動

本研究課題の遂行期間はコロナ禍に重なり、3年以上の間、国内・国外の移動制限が生じた。オンラインで実施する研究会や学会に極力参加して、情報収集や成果発表に努めたが、当初想定した計画に比べると、その進展速度が鈍化したことは否めない。2020年度は旅費予算が利用できず、次年度以降に繰り越す措置を行った。当初計画の一部としていた分散コンピューティングを用いた重力波解析は、海外との共同研究が進展せず、期間内に実用化することができなかった。しかし、コロナ禍で移動制限が課された期間には、執筆活動などを進めることもできた。

4 研究成果

各年度ごとの研究成果の発表件数は以下のようである。

- 2019年度** 論文発表5, 国際会議・研究会発表16, 国内会議・研究会発表14, 一般向け講演・講義18, 専門書翻訳出版1, 雑誌への寄稿1, 取材協力1.
- 2020年度** 論文発表11, 国際会議・研究会発表4, 国内会議・研究会発表13, 一般向け講演・講義14, 図書出版(事典編集執筆)1, 雑誌への寄稿2, 取材協力1.
- 2021年度** 論文発表14, 学会発表7(うち招待講演3/うち国際学会3), 一般向け講演・講義9, 図書出版2(共著1, 事典項目1).
- 2022年度** 論文発表13, 学会発表15(うち国際学会6), 一般向け講演・講義2, 図書出版2(単著1, 事典項目1), 雑誌執筆1, 雑誌編集協力3.
- 2023年度** 論文発表15, 学会発表30(うち国際会議16)である。アウトリーチ関連では、一般向け講演・講義20, 図書出版5(共著3, 訳書1, 事典項目1), テレビ出演1.

以下では本研究でなし得た成果を短くまとめる。個別の研究成果については、すでに専門研究誌あるいは国際学会にて発表している。詳細は本報告書末にある文献リストあるいは本研究課題の成果をまとめたウェブページ¹を参照していただきたい。

(1) LIGO-Virgo-KAGRA による第3期 b 観測結果

O3b 観測 (O3b; 2019年11月1日-2020年3月27日) までの観測結果をまとめて、2021年11月に、突発的重力波カタログ3 (GWTC-3) として発表したものが現在最新の重力波イベントカタログである。そのカタログでは、連星ブラックホール (BBH) 波源の重力波が85例、連星中性子星 (BNS) 波源が2例、中性子星-ブラックホール連星 (NSBH) を波源とするものが2例、片方がブラックホールで相方が不明なもの1例の合計90例を報告した。日本のKAGRAもO3bの最後に共同観測に入ったが、その期間に重力波の直接検出はなかった。2020年4月にKAGRAはドイツのGEO干渉計との同時観測を2週間行った(O3GK観測)。その期間に重力波の直接検出はなかったものの、ガンマ線バースト現象が近傍で生じていたため、その波源天体の距離の下限を推定する報告をした。

¹<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/GWdata2019/products.html>

連星系については、その合体頻度について、BBHは赤方偏移 $z = 0.2$ 付近において $17.9\text{--}44/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 、BNSは $10\text{--}1700/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 、NSBHは $7.8\text{--}140/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ と見積った。このほか、背景重力波に対して、宇宙膨張率に対して重力波のエネルギーが寄与する割合として（平坦なエネルギースペクトルを仮定した上で） $\Omega_{\text{GW}} < 6.0 \times 10^{-8}$ の上限が得た。連続重力波の重力波振幅に対しては、おおよそ 1×10^{-25} 程度（200 Hz 周り）の上限を得た。また、既知のパルサーからの連続重力波に対して、個々に上限値を得た。

一般相対性理論の検証も行われ、数あるテストすべてで、一般相対性理論から得られる予言と観測されている重力波信号との間に矛盾は生じていない。

今後、発見数が増すにつれて連星系の形成シナリオが明らかになることが期待される。将来的には、銀河系形成シナリオや初期宇宙の情報などにも、重力波観測から多くの知見がもたらされるであろう。

（２）重力波データ解析に対する新しい手法の提案

1. 自己回帰モデルを用いる波形抽出

連星合体後にブラックホールが形成されると、重力波は急速に減衰する。リングダウン重力波と呼ばれるこの波形が、一般相対性理論の予言と正しいかどうかを調べることができれば、もっとも強い重力場での理論検証になる。しかし、現実には減衰が非常に短時間であるために、リングダウン波のみを、干渉計データから重力波のテンプレート無しに抽出することは不可能であった。自己回帰モデル (Auto-Regressive model) は、テラヘルツ分光などの他の物理分野で利用されている手法である。我々は、ノイズのある数十点の時系列データに回帰曲線フィットを行い、その曲線（時系列関数）から周波数・減衰定数を読み取る技術を開発した。これまでに報告されている実重力波データ（シグナル・ノイズ比の大きな10例）に適用し、LIGO-Virgo-KAGRAグループが発表している合体後のブラックホールの質量と角運動量に近い値を見出せること、それらの値が一般相対性理論の予言と無矛盾であること、GW190412 など一部の合体現象では重力波の高次モード検出の可能性が指摘されていたが、そのようなモードは検出されないことを報告した。

2. Hilbert-Huang 変換法を用いる波形抽出

テンプレートを用いずに、実重力波データから重力波信号を抽出する第2の方法として、Hilbert-Huang 変換 (HHT) 法を実装した。これは、Hilbert 変換によって信号を信号変調と位相変調とに分離する手法を、複数のモードが混在したものに対して適用できるように、前処理として経験的モード分解 (EMD) を行うという Huang らの提案手法である。我々は、GW150914 の重力波イベントに対して、HHT 法によってリングダウン重力波が抽出できることを示したほか、EMD として Akima スプライン補間を用いるなどの工夫を行うことによって、連星中性子星合体のインスパイラル重力波波形から高密度物質の状態方程式の決定精度がどれだけ向上するか、などの実験結果を報告した。

3. 独立成分解析法を用いたノイズ除去

実重力波データからノイズを除去することができれば、重力波信号の検出効率が上がり、重力波信号の質も向上して、得られるサイエンスも広がる。だが、ノイズには非ガウスのものもあり、非ガウスの雑音を除去するための有効な手法が待たれていた。我々は、検出器のデータだけでなく、検出器まわりに設置された環境モニタ（地面振動計や防振系の各段階に設置された加速度計、光てこ、音響モニタ、電気ノイズ計、磁場計など）の情報を取り入れて、独立成分解析によるデータ解析を行うことで、非ガウス雑音を効率的に除去できることを示した。そして、O3GK の観測データに適用した。各チャンネルが線形関係を持つ通常の独立成分解析を実装してノイズ低減を実証した。また、各チャンネルが任意の非線形関係で結びついた一般的な状況で独立成分解析を行えるマスター方程式を導出し、それをもとに複数のチャンネルの非線形結合を許した状況での解析を行い、環境モニタと同じ周波数のノイズだけでなく、サイドバンドの除去もできることを示した。

4. 機械学習を用いたノイズ除去

重力波観測の実データには、原因が不明な非定常・非ガウス性の突発性雑音 (glitch) が多数含まれていて、これらは重力波信号の模倣・隠蔽を引き起こす。そこで、深層学習を用いて突発性雑音の潜在変数を抽出し、

その分類を行った。分類化されたことにより、突発性雑音の原因の特定や突発性雑音除去などへとつながり、観測装置の安定的運用や、観測の精度向上に貢献することが期待できる。

また、実データから重力波信号の抽出する部分に関しても、機械学習を応用する研究を進めた。その1つは、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を使用した、コア崩壊型超新星から発生する重力波の分類である。3次元数値シミュレーションから得られた重力波波形に O3 時の LIGO/Virgo のノイズデータを加え、そのスペクトログラムを使用してトレーニングを行った。ここでのスペクトログラムには、クラス・アクティベーション・マッピング手法を適用し、モデル予測にとって重要な、入力画像内の領域を視覚化した。クラス・アクティベーション・マップは、モデル予測が主に入力スペクトログラム内の特定の特徴 (g モードと低周波モード) に依存していることを示していた。CNN モデルを視覚化することで、モデルの信頼性を高めるための解釈が可能になり、検出効率を改善するためのガイダンスが提供されることがわかった。また、2つ目は、CNN を使用して、連星合体からの信号検出を試みた。CNN のアーキテクチャを 1 次元 (1D)/ 2 次元 (2D) とで比較すると、1D モデルは BBH 信号の識別に優れ、2D モデルは NSBH 信号と BNS 信号の識別に優れていた。アーキテクチャを両者の組み合わせ (アンサンブルモデル) とすることで、すべての信号タイプで検出機能が向上した。

以上の成果はすべて実データを用いた実用性までを提示しており、将来的にノイズに対してロバストな重力波データ解析を推進できることが期待される。

(3) 重力波サイエンスのアウトリーチ活動

研究代表、研究分担者の各自が、出版・講演・出張講義・一般向け講座・テレビ出演などを精力的に行った。また、LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーションの日本拠点として、論文出版ごとに一般向けの解説文「Science Summary」を執筆し、翻訳を行った (LIGO のウェブページ²より閲覧できる)。

毎年発行されている『理科年表』(国立天文台編、丸善出版) は、2022 年版より「重力波」の項を新設した。研究代表の真貝は、京都大学田中貴浩氏と毎年改訂を行っている。この他に、書籍としては、一般相対性理論に関する専門書として、問題集の翻訳『演習 相対性理論・重力理論』(A. Lightman 他著、真貝・鳥居訳、森北出版、2019 年)、教科書の翻訳『ロヴェッリ 一般相対性理論入門』(Carlo Rovelli 著、真貝訳、森北出版、2023 年)、事典『相対論と宇宙の事典』(真貝編著、朝倉書店、2020 年)、ブラックホール理論の解説書『宇宙検閲官仮説 裸の特異点は隠されるか』(真貝、講談社ブルーバックス、2023 年)などを出版したほか、雑誌からの依頼記事・編集などに応えた。

現在、「重力波とブラックホール」のテーマでの巡回展を国内の科学博物館 (大阪・明石・横浜・富山・仙台・東京ほか) で 2025 年度以降に行う準備を進めている。

本研究課題については、ウェブページ³を開設し、成果報告を随時報告している。論文などへのリンクも用意している。また、研究者向けには、重力波研究のリンクページ⁴を開設している。

(4) 今後の研究に関して

本研究の継続として、代表者を真貝とした科研費・基盤研究 (C) 『重力波観測データから探るブラックホール形成シナリオへの制限と一般相対性理論の検証』(課題番号 24K07029) が、2024 年度より採択された。本研究成果を発展させ、重力波サイエンスを充実させていける機会をいただけたことを感謝する。

²<https://www.ligo.org/science/outreach.php>

³<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/GWdata2019/project.html>

⁴<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/linkGW.html>