

令和元年6月21日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05071

研究課題名(和文) 適応データ解析による重力波探査システムの開発とデータ解析ライブラリの整備

研究課題名(英文) Development of Gravitational Wave Search Using Adaptive Analysis and Preparation of Data Analysis Library

研究代表者

大原 謙一 (Oohara, Ken-ichi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00183765

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：画像解析や画像診断の新しい手法として開発されてきた適応データ解析を用いて重力波データ解析法の開発を行った。2015年に米国のAdvanced LIGOが初めて捉えたあ連星ブラックホールの合体であるGW150914の観測データに適用し、特にブラックホール合体後の波形が、一般相対論で予測されている準固有振動と矛盾しないことを示した。また、今後観測が予想される超新星からの重力波の探査やデータ解析の方法も開発した。これらを含めて、重力波データ解析のためのプログラムライブラリーKAGALIの開発も進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

米国のや欧州の重力波観測装置が順調に稼働し、重力波の直接観測が現実のものとなった。さらに、日本の重力波観測装置もまもなく稼働を開始し、今後は、重力波を用いた天体観測への期待が高まっている。重力波天文学を推し進めるためには、観測されたデータから重力波を取り出し、物理学としての研究に結びつけるためのデータ解析法の発展が必要不可欠である。我々の手法は、これまでの重力波データ解析で適用されてきたものとは異なるものである。様々な異なる手法によるデータ解析を比較することにより、その信頼性を高めていくという意味で、この研究は学術的に意義深いものである。

研究成果の概要(英文)：We developed a method of data analysis of gravitational waves using adaptive data analysis, which is developed for image analysis diagnostic imaging. We applied our method to the observational data of gravitational waves from coalescence of a binary black hole that was first observed by Advanced LIGO in the USA, and found that the waves after the coalescence is consistent with the quasi-normal mode predicted by the general relativity. The method was applied to developing methods of searching for and analysis of gravitational waves from supernovae, which are expected to observe in the near future, too. We also advanced development of a program library KAGALI for data analysis of gravitational waves.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力波 データ解析 ソフトウェアライブラリー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 一般相対論によりその存在が予言されている重力波の直接検出と重力波による天体観測を実現するために、レーザー干渉計を用いた重力波観測装置の建設が欧米や日本で進められている。米国 LIGO プロジェクトによる Advanced LIGO は、2015 年からの観測運転直前であり、世界初の重力波直接検出の期待が大きくなっていた。また、欧州 Virgo も 2016 年ごろからの観測開始のために Advanced Virgo の調整が進められていた。日本では KAGRA プロジェクトが 2015 年度末に試験運用である initial KAGRA (iKAGRA) の稼働、2017 年度の本格的な baseline KAGRA (bKAGRA) による観測を目指して建設が進められ、欧米との協力と競争のもとで研究開発を行っていた。

(2) このような観測装置を用いて、きわめて弱い重力波信号をとらえ、さらに、重力波を用いた天体観測を可能とするためには、高効率、高精度のデータ解析法の開発が必要不可欠である。中性子星やブラックホールの連星であるコンパクト連星の合体の際に放射される重力波の波形は、特に、2 つの星が重力波を放出しながら徐々に接近する inspiral phase では、十分よい精度で理論的に予測することができるため、予測された重力波波形を用いた検出方法であるマッチド・フィルター(MF)法が確立している。いっぽう、コンパクト連星が合体する merger phase や超新星爆発などのパースト的重力波については、MF 法が適用できるほどの精度で波形を予測することは困難である。さらに、未知の重力波源から重力波が来る可能性もあり、様々な重力波を解析し、重力波天文学に結びつけるためのデータ解析法の準備が必要である。

2. 研究の目的

(1) 重力波検出装置 Advanced LIGO, Advanced Virgo および KAGRA による本格的な重力波観測とこれらによって得られる重力波データから様々な天体現象の物理を研究するために、新しい重力波データ解析手法の開発を行う。コンパクト連星からの重力波のように波形があらかじめ精密に予想される場合だけでなく、超新星爆発などのパースト的なイベントや未知の重力波源からの重力波の解析にも適用可能な手法を開発する。特に、非定常な重力波時系列データに対して、これまでに考えられている手法より精度の高い時間-周波数解析が可能であると期待される Hilbert-Huang Transform (HHT) などの適応データ解析の手法を重力波データ解析に適用する。

(2) 上記の研究で得られた成果と同時に、MF 法などの既存の手法を含めて、重力波データ解析に必要なプログラムを世界中の研究者が自由に使えるようにするために、高性能で堅牢なプログラム・ライブラリーを整備し、世界に発信する。

3. 研究の方法

(1) 重力波検出装置が稼働するまでは、Advanced LIGO や KAGRA の予想感度曲線をもとにガウスノイズを仮定して、HHT を用いた解析手法の最適化、特に、Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) に含まれるパラメータの最適化を行う。実際の観測装置の出力データを処理する場合、最適パラメータが、そのノイズの性質に影響を受けると考えられるため、ここでは、最適パラメータの一般的な決定方法を確立することが重要である。low-latency 重力波探査に関して、我々の先行研究で、Hilbert-Huang Transform (HHT) を用いた Excess Amplitude Method (EAM) が有望であることを示したが、数値相対論によって得られた超新星爆発時の重力波波形データを用いて、波形の性質や EEMD パラメータに対する瞬時振幅と瞬時振動数の時間変化の再現性や計算時間の関係を詳しく調べる。これをもとに、EAM のために最適な EEMD パラメータの決定に重要な要素が何なのかを明らかにする。オフライン重力波解析では、超新星のほか、数値相対論グループからコンパクト連星合体時の波形データの提供を受けて、(1) 波形再構築: ノイズの中からどの程度の精度で元の波形を再現できるか、(2) 時間-周波数解析: 瞬時周波数の時間変化をどの程度の精度で求めることができるか、などについてシミュレーションを行い、将来観測される重力波から重力波源の物理を取り出す手法を検討する。

(2) プログラム・ライブラリーの構築に関して、エラー・ハンドリングやデータ読み込みに関する部分を完成させる。これは、いろいろな解析プログラムを開発していく上で土台となる部分であるため、KAGRA DMG/DAS グループと十分な議論をしながら進めていく。本研究での成果だけでなく、KAGRA DMG/DAS グループの研究を集約して、大学院生などの研究協力者のライブラリー構築技術を磨きながら、使いやすいデータ解析ライブラリーとしてまとめる。さらに、これらの成果を用いて、我々の解析法を KAGRA の重力波解析パイプラインへの実装を目指す。

4. 研究成果

(1) 連星中性子星合体で放射される重力波について、連星中性子星合体の数値相対論により得られた重力波波形と Advanced LIGO の予想感度曲線に基づくノイズを用いて、Hilbert-Huang Transform (HHT) によるデータ解析の可能性を明らかにした[1]。中性子星物質の状態方程式により、2 つの中性子星の合体後である post-merger phase における重力波波形が大きく異なることが予想されている。つまり、状態方程式が柔らかいと合体後すぐに重力崩壊をしてブラックホ

ールが形成されるが、状態方程式が硬い場合、hyper-massive neutron star が形成される。この違いにより、合体後、重力波の周波数の時間変動が異なる。HHT では、周波数の時間変動を精度よく捉えることができる。実際 図 1 のように、硬い状態方程式(S15)では、合体後しばらくの間、周波数がほぼ一定になっているが、柔らかい状態方程式(H135)では、時間とともに周波数が増加することが明確に示された。このように、連星中性子星合体の post-merger phase の重力波を捉えることにより、中性子星物質の状態方程式がどのような性質を持つべきかを判別できる可能性を示した。

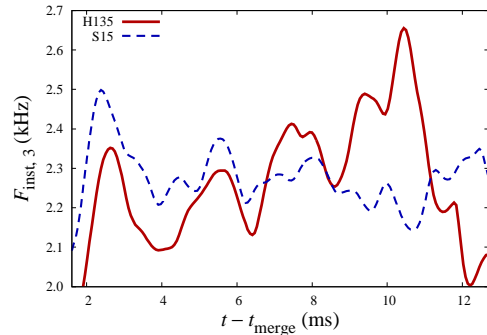


図 1 連星中性子星合体後の重力波の周波数変動

(2) HHT による新たなバースト的重力波探査手法の開発に関しては、Excess Amplitude Method (EAM) を提唱した[2]。これは、これまでのフーリエ変換に基づく Excess Power Method (EPM) と異なり、HHT が非定常時系列データの周波数や振幅の時間変動を精度よく捉えられることを用いて、特に振幅の時間変動に注目し、ノイズの中に重力波信号が含まれているかどうかを探るものである。我々は、重力崩壊型超新星爆発の数値相対論により得られた多数の重力波波形データと Advanced LIGO の予測感度曲線に基づくノイズを用いて、波形ごとに False Alarm Rate と False Dismissal Rate を詳しく調べた。図 2 は、代表的な波形 ($k = 15, 22, 41, 64$) に対して、重力波と認定する閾値を変えたときの ROC 曲線 (receiver operating characteristic curve, 受信動作特性曲線) を示したものである。ここで、 $k = 15$ は重力波の最大振幅が非常に小さい場合である。そのような特殊な場合を除いて、EAM を用いたバースト的重力波探査の可能性を示すことができた。

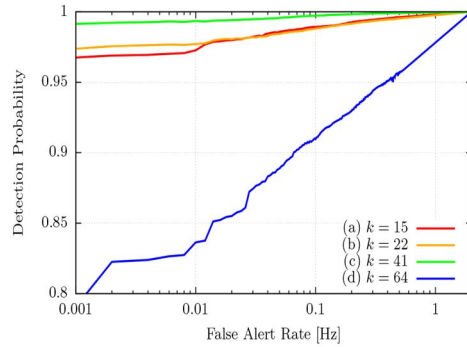


図 2 代表的な超新星爆発数値シミュレーション波形に対する ROC 曲線

(3) 2015 年 9 月 14 日に Advanced LIGO が重力波の初観測 (GW150914) に成功したことを受けて、公開された観測データに HHT 解析を適用して、その有用性を明らかにした[3]。特に、ブラックホール合体前の inspiral phase の重力波に対しても、HHT 解析を用いてその周波数の時間発展が十分な精度で捉えられる可能性を明らかにするとともに、ringdown phase の重力波の中で、周波数が一定になり振幅が時間とともに指数関数的な減衰する部分を捉え (図 3)、これにより求められた周波数や減衰率が一般相対論で予言されているブラックホールの準固有振動 (QNM) のものと矛盾がないことを示した。具体的には、連星ブラックホールの合体の際に放射される重力波に対して、観測装置のノイズを考慮しないシミュレーションデータだけを用いれば、HHT 解析により 1% 以下の精度で QNM を捉えられること明らかにした。さらに、ノイズを含めた実際の観測データに対して、QNM を用いて一般相対論の検証を行える可能性を明らかにしたが、ノイズが大きい場合にはも精度良い解析を行うためには、重力波信号のモード分解の精度を向上させることが重要であることが明らかになった。

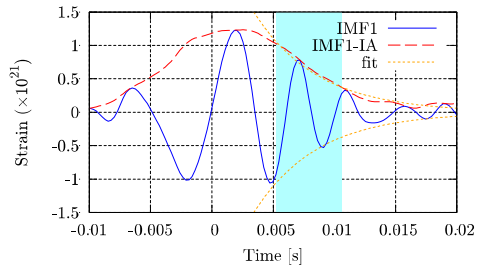


図 3 GW150914 の ringdown phase とその fitting

(4) 超新星爆発の際に放射される重力波の解析を行い、その中でも、これまでに我々が進めてきた解析手法である Hilbert-Huang Transform (HHT) を用いて、爆発メカニズムの解明に重要と考えられている Standing Accretion Shock Instability (SASI) に起因する重力波モードがどこまで検出できるかについて詳細な解析を行い、そのモードの周波数特性や開始・終了時刻が決定できる可能性を示した。図 4 は、SASI が活発に誘起される場合の超新星の数値シミュレーション波形[4](signal) を EEMD により intrinsic mode function (IMF) に分解したもので、5 番目の IMF である IMF5 に SASI モードを捉えている。図 5 は、これらの IMF を元にして時間-周波数マップを描いたものである。中止コアの振動による g-mode からの重

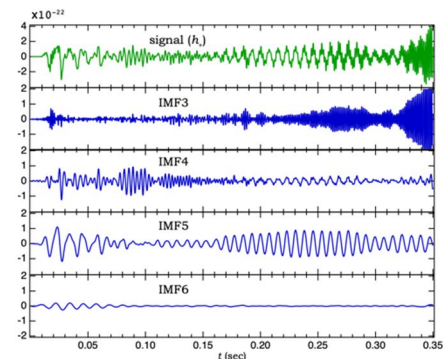


図 4 超新星からの重力波波形のモード分解

力波の周波数が時間とともに増大していることと同時に、110 ミリ秒ないし 160 ミリ秒以降に、周波数がほぼ一定の SASI モードが現れることを明確に捉えている。さらに、KAGRA などの検出器のノイズの中に埋め込まれた場合に、どの程度の距離まで観測できるかという点は、実際に KAGRA の運転が開始された後に解析する準備を行った。さらに、HHT 解析では、信号の一部しか得られていないデータに対しては、モード分解がうまくいかない場合があるが、かなり大きなガウスノイズを人工的に与えてアンサンブルを作成し、その平均を求めることにより、精度よくモード分解が可能であることも示した。

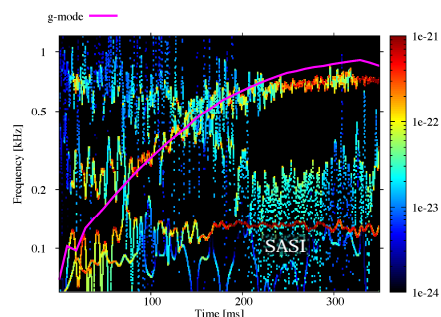


図 5 超新星からの重力波の時間-周波数マップ

<引用文献>

- [1] Masato Kaneyama, et al., Phys. Rev. D93 (2016), 123010
- [2] Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Hirotaka Takahashi, arXiv:1606.03583 (2016)
- [3] Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Hirotaka Takahashi, ICIC Express Letters, 11 (2017), 45-52
- [4] T. Kuroda, K. Kotake, and T. Takiwaki, ApJ, 829, L14 (2016)

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

酒井一樹, 神田展行, 大原謙一, 山本尚弘, 宮川治, 佐々木幸次, 植木聡史, 高橋弘毅, 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA におけるデータ自動転送システムの開発と性能評価, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J101-B, 818-827, 2018

(DOI: <https://doi.org/10.14923/transcomj.2017JBP3064>)

T. Akutsu,他 217 人(KAGRA Collaboration) (120 番目), Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Vol.2018, 013F01 (23 pages), 2018

(DOI: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptx180>)

Kazuki Sakai, Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara and Hirotaka Takahashi, Probability Distributions of Means of IA and IF for Gaussian Noise and Its Application to an Anomaly Detection, Advances in Data Science and Adaptive Analysis, Vol.10, 1850006 (14 pages). 2018 (DOI: <https://doi.org/10.1142/S2424922X18500067>)

Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Hiroyuki Nakano, Masato Kaneyama, and Hirotaka Takahashi, Estimation of starting times of quasinormal modes in ringdown gravitational waves with the Hilbert-Huang transform, Phys. Rev. D, Vol.96, 044047 (11 pages), 2017 (DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.044047>)

Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Hirotaka Takahashi, Analysis of the real gravitational wave data GW150914 with the Hilbert-Huang transform, ICIC Express Letters, Vol. 11, 45-52, 2017

(DOI: <https://doi.org/10.24507/icicel.11.01.45>)

Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hirotaka Takahashi, Yuichiro Sekiguchi, Hideyuki Tagoshi, and Masaru Shibata, Analysis of gravitational waves from binary neutron star merger by Hilbert-Huang transform, Phys. Rev. D, Vol.93, 123010 (11 pages), 2016 (DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.123010>)

[学会発表](計48件)

大原謙一, KAGRA Algorithmic Library (KAGALI) の開発, 第 74 回日本物理学会年次大会, 2019/3, 九州大学 (福岡県, 福岡市)

Ken-ichi Oohara, Analysis of Standing Accretion Shock Instability of Core Collapse Supernovae with Hilbert-Huang Transform JSI Workshop 2018: Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (JSI-GWPAW 2018), 2018/12, (College Park, USA)

Yukinobu Watanabe, Data Analysis of Gravitational Waves from Core Collapse Supernovae with Hilbert-Huang Transform (II), Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures (SNeGWv2018), 2018/10, 富山国際会議場 (富山県, 富山市)

Yuta Hiranuma, Data Analysis of Gravitational Waves from Core Collapse Supernovae with Hilbert-Huang Transform (I), Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures (SNeGWv2018), 2018/10, 富山国際会議場 (富山県, 富山市)

Ken-ichi Oohara, KAGRA data management: Summary of Phase-I and status, The 4th

KAGRA International Workshop, 2018/6, Ewha Womans University (Seoul, Korea)
渡邊幸伸, 超新星爆発重力波の Hilbert Huang 解析, 第 73 回日本物理学会年次大会, 2018/3, 東京理科大学 (千葉県, 野田市)
Kazuki Sakai, Estimation of starting times of quasi-normal modes in ringdown gravitational waves with the Hilbert-Huang transform, The 2017 Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW2017), 2017/5, Annecy (France)
酒井一樹, Hilbert-Huang 変換を用いた連星ブラックホール合体からの ringdown 重力波の解析, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017/3, 大阪大学 (大阪府, 豊中市)
Ken-ichi Oohara, Application of the Hilbert-Huang transform to data analysis of gravitational waves, Symposium on New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources, 2016/12, 京都大学 (京都府, 京都市)
大原謙一, KAGRA Collaboration, Hilbert-Huang 変換を用いた iKAGRA 観測データの解析, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016/9, 宮崎大学 (宮崎県, 宮崎市)
Kazuki Sakai, Analyzing ringdown gravitational waves from binary black hole mergers with the Hilbert-Huang transform, The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG26), 2016/10, 大阪市立大学 (大阪府, 大阪市)
Ken-ichi Oohara, KAGRA Algorithmic Library (KAGALI): Present Status of Development and Application, The First International Meeting on KAGRA, 2016/6, KISTI & KAIST (Daejeon, Korea)
Kazuki Sakai, Amplitude-based detection method for gravitational wave bursts: application to GW150914, The 2016 Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW2016), 2016/6, Cape Code Resort and Conference Center (Hyannis, Massachusetts, USA)
酒井一樹, Hilbert-Huang 変換を用いたバースト重力波イベントトリガーの構築とその評価, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016/3, 東北学院大学 泉キャンパス (宮城県・仙台市)
Ken-ichi Oohara, Sources of Gravitational Waves and Searches for Gravitational Waves with KAGRA, Taiwan-Japan Workshop on KAGRA, 2015/12, 新竹市 (台湾)
Kazuki Sakai, Amplitude-based approach to the detection of gravitational-wave bursts with the Hilbert-Huang Transform, The 25th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG25), 2015/12. 京都大学基礎物理学研究所 (京都府・京都市)
Ken-ichi Oohara, KAGRA Data Analysis and Data Management, The 25th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG25), 2015/12. 京都大学基礎物理学研究所 (京都府・京都市)
Ken-ichi Oohara, Development of KAGRA Algorithmic Library (KAGALI), The 14th Marcel Grossmann Meeting (MG14), 2015/7, Rome (Italy)
Ken-ichi Oohara, Development of KAGALI, The 8th Korea-Japan workshop on KAGRA, 2015/6, Gwagnju, (Korea)
Masato Kaneyama, Reconstruction of Waveform for Burst Gravitational Waves with the Hilbert-Huang Transform, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2015 (GWPAW2015), 2015/6, INTEX Osaka (大阪府・大阪市)

6 . 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名 : 高橋 弘毅
ローマ字氏名 : (TAKAHASHI, Hirotaka)

研究協力者氏名 : 酒井 一樹
ローマ字氏名 : (SAKAI, Kazuki)

研究協力者氏名 : 金山 雅人
ローマ字氏名 : (KANEYAMA, Masato)

研究協力者氏名 : 神田 展行
ローマ字氏名 : (KANDA, Nobuyuki)

研究協力者氏名 : 平沼 悠太
ローマ字氏名 : (HIRANUMA, Yuta)

研究協力者氏名：坂井 佑輔
ローマ字氏名：(SAKAI, Yusuke)

研究協力者氏名：渡邊 幸伸
ローマ字氏名：(WATANABE, Yukinobu)

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、研究者個人に帰属されます。