

令和 3 年 4 月 26 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16K05347

研究課題名（和文）連星ブラックホールからの重力波による一般相対論の多角的な検証法の確立

研究課題名（英文）Multiple verification methods of general relativity by gravitational waves from binary black holes

研究代表者

中野 寛之（Nakano, Hiroyuki）

龍谷大学・法学部・准教授

研究者番号：80649989

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）：連星ブラックホールからの重力波を用いて、アインシュタインの一般相対性理論を様々な角度から検証する方法を構築することが本研究の目的である。具体的には、ブラックホールが一般相対性理論で予言されるものなのかどうか？強い重力場での一般相対性理論（アインシュタイン方程式の非線形性）は正しいのか？という問いに答えることができるようにする。

この目的に対して、重力波を放射しながら徐々に連星の軌道間隔を縮めていく時に放射される「インスパイラル重力波」の精度のチェック及び改良、合体した後に放射される「リングダウン重力波」のデータ解析法の研究を行い、これら2つの重力波を用いた一般相対性理論の検証法等を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般相対性理論と量子論を統一する試みとして、重力理論の修正・拡張を議論するアプローチがある。一方で、本研究では一般相対性理論を中心に据えて、重力波観測から「ずれ（新たな理論へのヒント）」を見出すために、精密な理論波形の構築や理論の検証方法を提案してきた。これらのアプローチは相補的であり、今後の理論物理学の発展のためには欠かせないものである。

特に、強い重力場の代表であるブラックホールを、近年始まった重力波物理学・天文学によって議論することは、自然界を記述する既存の理論をテストする魅力的な機会を我々に与えてくれるであろう。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to construct various methods in order to verify Einstein's general relativity by using gravitational waves from binary black holes.

Specifically, we prepare methods to be able to answer questions, whether a black hole is predicted by general relativity, and whether general relativity (nonlinearity of Einstein's equations) in a strong gravitational field is correct.

For this purpose, we checked and improved the accuracy of "inspiral gravitational waves" that are emitted when the orbital separation of binaries shrinks gradually while radiating gravitational waves, and studied on data analysis methods of "ringdown gravitational waves" that are emitted after merger. Furthermore, we proposed verification methods for general relativity by using the above two gravitational waves, and so on.

研究分野：重力波物理学・天文学

キーワード：重力波物理学 重力波天文学 重力波 ブラックホール 一般相対性理論

1. 研究開始当初の背景

およそ 100 年前、アインシュタインによって「重力波」は相対論的な物体の運動によって生じる時空のさざ波であることが予言された。重力波は物質によって吸収や散乱されることなく宇宙を伝播するため、我々に従来の観測方法では得られない情報をもたらす。電磁波やニュートリノとの同時観測は、宇宙の理解を深化させるであろう。しかし、重力波は微弱な信号であり、これを検出するためには非常に精密な検出器を必要とする。また、重力波観測からの情報を抽出するためには、重力波源から放出される理論的波形の正確な予測が必要であり、そのデータ解析の方法を確立しなければ、重力波の検出はできない。

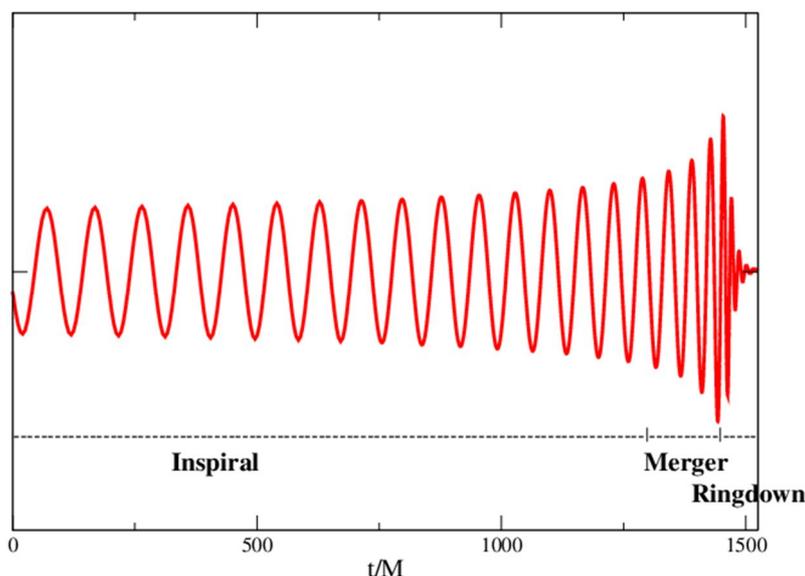
日本では大型重力波検出器 KAGRA の建設が着実に進み（鏡の低温化等を導入した baseline KAGRA としては 2018 年より稼働）また海外では LIGO (advanced LIGO として 2015 年 9 月 18 日より稼働) VIRGO 等の地上重力波検出器での重力波の直接観測が可能になりつつある。ハルス=テイラーによる連星パルサーの軌道周期変化の電波観測が、アインシュタインの一般相対論における重力波放射の間接的証拠を与える一方で、重力波源から放射・伝播して地球上に到来する重力波の直接観測が、この数年のうちになされ、重力波天文学による宇宙物理学の黄金時代がやってくる。

これらの状況から、申請者はこれまで、多くの国内外の研究者と共に、連星ブラックホールから放射される重力波に関する理論的研究を進めている。

2. 研究の目的

一般相対論において、ブラックホールが形成されると、ブラックホールの特異点を避けることができない。しかしながら、例えば、その特異点が事象の地平線によって隠されているとしても、特異点の存在を許容することは、物理法則としては受け入れがたい。それ故、特異点を回避する様々な可能性が議論されている。まだ完全には特異点を正則化する方法は知られていないが、一般相対論を超えた理論が必要である。本研究の目的は、重力波観測によって

- ブラックホールが一般相対論で予言されるものなのかどうか？
 - 強い重力場での一般相対論（アインシュタイン方程式の非線形性）は正しいのか？
- という問いに答えることができる一般相対論の検証法を確立することである。一般相対論を基礎とした、連星ブラックホールからのインスパイラル・マージャー・リングダウン重力波波形を取り扱うことにより、様々な角度から厳格な検証法を提案する。これらの研究を発展させることにより、我々の宇宙において一般的であると考えられている回転しているブラックホール (Kerr ブラックホール) の連星系に対してまで、検証法を明確に示す。



図：連星ブラックホールは、強い重力場を持ち、かつ激しい時間変化を伴う連星系である。その重力波放出による進化は、軌道が重力波放射により断熱的に時間発展する「インスパイラル」、連星が非線形現象の中で合体する「マージャー」、減衰振動重力波を放出し最終状態に落ち着く「リングダウン」の3つのステージに分けられる。横軸は時間、縦軸は重力波の大きさを表している。

3. 研究の方法

一般相対論を拡張した様々な修正重力理論を用いて、重力波波形を予測する研究が多くなされている。本研究では、あくまでアインシュタインの一般相対論が正しいとすることによって忠実に理論重力波波形を議論し、観測により一般相対論の予言からのずれが検出された場合には、一般相対論を棄却するという立場を採用する。

アインシュタインの一般相対論に対する、連星ブラックホールからの重力波を用いた様々な角度からの厳格な検証法を提案するために、連星系を成すブラックホールの性質により、平成 28 年度と平成 29 年度以降の 2 段階に分ける。具体的には、下記項目について研究を実施する。

- A) 回転していないブラックホールからなる連星系の全質量・質量比依存性
- B) 回転しているブラックホールからなる連星系の全質量・質量比・スピン依存性

なお、A)の段階で、様々な検証法を提案する。

検証法において、正確な理論重力波波形を利用することは必要不可欠である。現在、SXS Gravitational Waveform Database (<http://www.black-holes.org/waveforms/>) において、201 もの連星ブラックホール数値相対論の重力波波形が公に利用可能である。申請者の以前の所属先(ロチェスター工科大学)も数値相対論の拠点であり International Affiliate Researcher として共同研究を継続していることも、本研究の推進に活用する。

4. 研究成果

本研究費に申請中の 2016 年 2 月 11 日(米国時間)に発表された世界初、アメリカの Advanced LIGO の**第 1 次重力波観測 (01)**による重力波の直接観測(イベント名: GW150914)により、本研究に関連する分野は、世界的に加速した。また、それ以外にも様々な重力波イベントを受けて、現在の地上重力波検出器の観測周波数帯と連星ブラックホールの質量との関係から、連星ブラックホールからの重力波における「リングダウン」部分の信号雑音強度比は、「インスパイラル」部分と比較すると非常に小さいという知見を得た。

このことから、上記に述べた研究の方法とは異なり、まず「リングダウン」部分を重力波データ解析によって、如何に効率よく抽出し、一般相対論の検証につなげるかという研究を推進した。特に、ノイズを含む重力波データ解析において、直接リングダウンの始まる時刻(スターティングタイム)に着目した。また、重力波データ解析を行っている共同研究者と共に、一般相対論からのずれを含んだシミュレーション波形を用いて、どこまで検証できるのかを明らかにした。さらに、将来計画を想定し、リングダウン重力波からブラックホールの情報をどの程度の精度で得られるかについて議論し、第 5 次重力波観測(2025 年予定)の時期に日本の重力波望遠鏡 KAGRA が目指すべき感度について検討を行った。

着実に重力波物理学・天文学の道はひらけてきおり、様々な重力波に関連する研究を進めた。「マージャー」段階の重力波の研究に特に有効な、連星ブラックホールの数値シミュレーションに関連して、より良い数値相対論波形を得るための連星系の初期パラメータの研究を行った。また、合体後のブラックホールが相対論で予言されるものとは異なり、「壁」を持っていた場合、ブラックホールに吸収されるはずの重力波が「こだま」のように聞こえるかもしれない。我々はブラックホール摂動論を用いて、この「こだま」の波形を理論的に導出し、重力波データ解析を行った。

2016 年 11 月 30 日から**第 2 次重力波観測 (02)**が始まった。1 ヶ月に一度、偽の検出を許す緩い制限の下では、多くの重力波イベント候補があったと報告された。このような状況の下では、信号雑音強度比が大きい「インスパイラル」部分に特化した一般相対論の検証に対する研究も推進すべきでと考え、特にインスパイラル重力波の理論波形の精度向上を行った。ここでは、ブラックホールに吸収される重力波の(また、その質量が変化する)寄与も考慮した。また、同質量程度のブラックホールからなる連星からのインスパイラル重力波の研究において、現在までのところ、多くの理論波形は「準円軌道」「軌道面・スピンの歳差運動無し」という状況で導出されている。しかしながら、スピンの軌道角運動量と同じ方向でない場合、歳差運動が生じる。また、連星系の成り立ちの状況によっては、観測周波数帯域において離心率を持った軌道もありえる。このことから、楕円軌道かつ歳差運動を含む一般軌道からのインスパイラル理論重力波波形を構築した。

第 3 次重力波観測 (03)が 2020 年 3 月末に終了した。地上重力波検出器(Advanced LIGO, Advanced VIRGO, bKAGRA)は、100Hz 程度が最も感度が良い。しかしながら、連星ブラックホールからの重力波は、その質量の大きさのために、地上重力波検出器の観測帯域では重力波信号の継続時間が非常に短い。このことが、信号雑音強度比が大きな重力波検出イベントであっても、個々のブラックホールのパラメータ(質量, スピン)を決定する際、さらには、一般相対論の検証においても弱点となっており、克服されなければならない。地上重力波検出器(高周波数帯)だけでなく、将来計画である宇宙空間重力波検出器(低周波数帯、LISA, B-DECIGO)を組み合わせた多波長重力波観測が重要である。LISA は 0.01Hz 程度が最も感度が良く、B-DECIGO は 1Hz 程度に感度のピークがくるように計画されている。GW150914 や GW190521 のような連星ブラックホールからの重力波は、LISA, B-DECIGO、地上重力波検出器の全ての観測帯域で検出できる可能性がある。多波長重力波観測によるパラメータ決定精度の向上、一般相対論の非線形の検証方法としての「インスパイラル・リングダウン無矛盾テスト」について議論した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計36件（うち査読付論文 36件 / うち国際共著 22件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Uchikata Nami, Nakano Hiroyuki, Narikawa Tatsuya, Sago Norichika, Tagoshi Hideyuki, Tanaka Takahiro	4. 巻 100
2. 論文標題 Searching for black hole echoes from the LIGO-Virgo catalog GWTC-1	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 62006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.062006	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 Ireland Brennan, Birnholtz Ofek, Nakano Hiroyuki, West Eric, Campanelli Manuela	4. 巻 100
2. 論文標題 Eccentric binary black holes with spin via the direct integration of the post-Newtonian equations of motion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.024015	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 Nakano Hiroyuki, Narikawa Tatsuya, Oohara Ken-ichi, Sakai Kazuki, Shinkai Hisa-aki, Takahashi Hirota, Tanaka Takahiro, Uchikata Nami, Yamamoto Shun, Yamamoto Takahiro S.	4. 巻 99
2. 論文標題 Comparison of various methods to extract ringdown frequency from gravitational wave data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.124032	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 Isoyama Soichiro, Nakano Hiroyuki, Nakamura Takashi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Multiband gravitational-wave astronomy: Observing binary inspirals with a decihertz detector, B-DECIGO	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 730
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty078	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 Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Hiroyuki Nakano, Norichika Sago, Takahiro Tanaka	4. 巻 2018
2. 論文標題 "Flux-balance formulae" for extreme mass-ratio inspirals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty136	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 Fujita Ryuichi, Isoyama Soichiro, Le Tiec Alexandre, Nakano Hiroyuki, Sago Norichika, Tanaka Takahiro	4. 巻 34
2. 論文標題 Hamiltonian formulation of the conservative self-force dynamics in the Kerr geometry	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 134001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aa7342	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 Healy James, Lousto Carlos O, Nakano Hiroyuki, Zlochower Yosef	4. 巻 34
2. 論文標題 Post-Newtonian quasicircular initial orbits for numerical relativity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 145011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aa7929	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 Nakano Hiroyuki, Sago Norichika, Tagoshi Hideyuki, Tanaka Takahiro	4. 巻 2017
2. 論文標題 Black hole ringdown echoes and howls	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 "071E01"
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx093	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 Sakai Kazuki, Oohara Ken-ichi, Nakano Hiroyuki, Kaneyama Masato, Takahashi Hirotaka	4. 巻 96
2. 論文標題 Estimation of starting times of quasinormal modes in ringdown gravitational waves with the Hilbert-Huang transform	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.044047	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 Isoyama Soichiro, Nakano Hiroyuki	4. 巻 35
2. 論文標題 Post-Newtonian templates for binary black-hole inspirals: the effect of the horizon fluxes and the secular change in the black-hole masses and spins	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 24001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aa96c5	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 Fujita Ryuichi, Sago Norichika, Nakano Hiroyuki	4. 巻 35
2. 論文標題 Note on accuracy of the post-Newtonian approximation for extreme-mass ratio inspirals: retrograde orbits	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 27001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aa9ad5	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 Kawaguchi Kyohei, Kyutoku Koutarou, Nakano Hiroyuki, Shibata Masaru	4. 巻 97
2. 論文標題 Extracting the orbital axis from gravitational waves of precessing binary systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.024017	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 Sadiq Jam, Zlochowar Yosef, Nakano Hiroyuki	4. 巻 97
2. 論文標題 Comparing an analytical spacetime metric for a merging binary to a fully nonlinear numerical evolution using curvature scalars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.084007	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 Takashi Nakamura, Hiroyuki Nakano	4. 巻 2016
2. 論文標題 How close can we approach the event horizon of the Kerr black hole from the detection of gravitational quasinormal modes?	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw026	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 Norichika Sago, Ryuichi Fujita, Hiroyuki Nakano	4. 巻 93
2. 論文標題 Accuracy of the post-Newtonian approximation for extreme mass ratio inspirals from a black-hole perturbation approach	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 104023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.104023	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 Brennan Ireland, Bruno C. Mundim, Hiroyuki Nakano, Manuela Campanelli	4. 巻 93
2. 論文標題 Inspiralling, nonprecessing, spinning black hole binary spacetime via asymptotic matching	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 104057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.104057	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 Yosef Zlochower, Hiroyuki Nakano, Bruno C. Mundim, Manuela Campanelli, Scott Noble, Miguel Zilhao	4. 巻 93
2. 論文標題 Inspiralng black-hole binary spacetimes: Challenges in transitioning from analytical to numerical techniques	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 124072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.124072	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 Hiroyuki Nakano, Norichika Sago, Takahiro Tanaka, Takashi Nakamura	4. 巻 2016
2. 論文標題 Estimate of the radius responsible for quasinormal modes in the extreme Kerr limit and asymptotic behavior of the Sasaki-Nakamura transformation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 830
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw098	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 Takashi Nakamura, Masaki Ando, Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano, Kazunari Eda, Shuichi Sato, Mitsuru Musha, Tomotada Akutsu, Takahiro Tanaka, Naoki Seto, Nobuyuki Kanda, Yousuke Itoh	4. 巻 2016
2. 論文標題 Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw127	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 Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano, Takashi Nakamura	4. 巻 2016
2. 論文標題 Gravitational wave quasinormal mode from Population III massive black hole binaries in various models of population synthesis	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 1030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw143	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 Hiroyuki Nakano, Brennan Ireland, Manuela Campanelli, Eric J. West	4. 巻 33
2. 論文標題 Spinning, Precessing, Black Hole Binary Spacetime via Asymptotic Matching	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Class. Quant. Grav.	6. 最初と最後の頁 247001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0264-9381/33/24/247001	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 Tomoya Kinugawa, Takashi Nakamura, Hiroyuki Nakano	4. 巻 2017
2. 論文標題 The possible existence of Pop III NS-BH binary and its detectability	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx003	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 Nakano Hiroyuki, Fujita Ryuichi, Isoyama Soichiro, Sago Norichika	4. 巻 7
2. 論文標題 Scope Out Multiband Gravitational-Wave Observations of GW190521-Like Binary Black Holes with Space Gravitational Wave Antenna B-DECIGO	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 53 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe7030053	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 Kinugawa Tomoya, Nakamura Takashi, Nakano Hiroyuki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Formation of mass gap compact object and black hole binary from Population III stars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa176	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 Kinugawa Tomoya、Nakamura Takashi、Nakano Hiroyuki	4. 巻 501
2. 論文標題 Formation of binary black holes similar to GW190521 with a total mass of $\sim 150 M_{\odot}$ from Population III binary star evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L49 ~ L53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slaa191	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 Kinugawa Tomoya、Nakamura Takashi、Nakano Hiroyuki	4. 巻 498
2. 論文標題 Chirp mass and spin of binary black holes from first star remnants	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3946 ~ 3963
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2511	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 Uchikata Nami、Narikawa Tatsuya、Sakai Kazuki、Takahashi Hirotaka、Nakano Hiroyuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Black hole spectroscopy for KAGRA future prospect in O5	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.024007	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 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 磯山総一郎、藤田龍一、佐合紀親、中野寛之
2. 発表標題 Analytical adiabatic waveform of extreme mass-ratio inspirals
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野寛之, Brennan Ireland, Ofek Birnholtz, Eric West, Manuela Campanelli
2. 発表標題 後期インスパイラル段階における離心率の進化について
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 寛之
2. 発表標題 Multiband gravitational-wave astronomy: Observing binary inspirals
3. 学会等名 第17回DECIGOワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 寛之
2. 発表標題 より良いポストニュートンインスパイラル波形を目指して
3. 学会等名 重力波物理学・天文学：創世記 A01 f2fミーティング
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano
2. 発表標題 Gravitational-wave absorption effects on inspiral waveforms
3. 学会等名 Symposium on "New development in astrophysics through multi-messenger observations of gravitational wave sources"
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano
2. 発表標題 Contribution to KAGRA from Ryukoku University
3. 学会等名 17th KAGRA face-to-face meeting
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 磯山 総一郎, 中野 寛之
2. 発表標題 Effects of gravitational-wave absorption in binary black-hole inspirals
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野 寛之
2. 発表標題 連星系のスピンの決定精度について
3. 学会等名 DECIGOワークショップ2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野 寛之
2. 発表標題 連星ブラックホールからのインスパイラル波形
3. 学会等名 第30回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano, Soichiro Isoyama, Takashi Nakamura
2. 発表標題 Multi-band gravitational-wave astronomy for binary's spin parameters
3. 学会等名 YKIS2018a Symposium "General Relativity - The Next Generation -"
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野寛之, 磯山総一郎, 中村卓史, DECIGOワーキンググループ
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(91): DECIGOのサイエンス
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano
2. 発表標題 On ringdown gravitational waves of coalescing binary black holes
3. 学会等名 Multi-Messenger Bi-Monthly Meeting
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano, Takashi Nakamura, Takahiro Tanaka
2. 発表標題 Confirmation of the Existence of the Ergoregion by Ringdown Gravitational Waves
3. 学会等名 GWPAW 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中野寛之, 中村卓史, 田中貴浩, 佐合紀親
2. 発表標題 ブラックホール準固有振動と重力波
3. 学会等名 日本天文学会2016年秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中野寛之
2. 発表標題 連星ブラックホール合体と相対論の検証について (Testing GR with Binary Black Hole Mergers)
3. 学会等名 日本物理学会(秋)(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano
2. 発表標題 Precessing, Spinning Black Hole Binary Spacetime
3. 学会等名 The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG26) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano
2. 発表標題 連星ブラックホールからの重力波による相対論の検証
3. 学会等名 DECIGOワークショップ2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano
2. 発表標題 Post-Newtonian Quasicircular Initial Orbits for Numerical Relativity
3. 学会等名 Symposium on "New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources", 5th annual symposium of the innovative area
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano
2. 発表標題 連星ブラックホールと重力波
3. 学会等名 第2回数理セミナー「幾何学と物理学の接点～研究最前線を語る～」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakano
2. 発表標題 連星ブラックホールの準円軌道初期パラメータ
3. 学会等名 連星中性子星・ブラックホールを含む重力波源の電磁波対応天体
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野寛之, DECIGOワーキンググループ
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(79): DECIGOのサイエンス
3. 学会等名 日本物理学会(春)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野寛之
2. 発表標題 突発的重力波カタログ2 (GWTC-2)と重力波物理学
3. 学会等名 The 4th workshop on "Mathematics and Physics in General Relativity" (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 安東正樹、白水徹也、浅田秀樹、石橋明浩、小林努、真貝寿明、早田次郎、谷口敬介	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 432
3. 書名 相対論と宇宙の事典 (担当: 分担執筆, 範囲: 5章 5.6 GPS, 5.9 重力波の直接検出)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>連星ブラックホールからの重力波による一般相対論の多角的な検証法の確立 (16K05347) https://sites.google.com/site/denden919/home/research/16k05347</p> <p>Black Hole Perturbation Club (B.H.P.C.) https://sites.google.com/view/bhpc1996/home</p> <p>共同研究者: 多数 (感謝いたします。)</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

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

米国	ロチェスター工科大学	ミネソタ大学ダールズ	NASA	他3機関
ブラジル	リオ・グランデ・ド・ノルテ国立大学			
ドイツ	マックスプランク重力物理学研究所			
フランス	パリ天文台			
ポルトガル	リスボン大学			
カナダ	トロント大学			
英国	サウサンプトン大学			
アルゼンチン	アルゼンチン電波天文学研究所			