

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 22日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340051

研究課題名（和文） 連星中性子星およびブラックホール中性子星連星の合体による重力波に対する数値的研究

研究課題名（英文） Numerical-relativity studies for coalescing binary neutron stars and black hole-neutron star binaries

研究代表者

京都大学・基礎物理学研究所・教授

柴田 大 (SHIBATA MASARU)

研究者番号：80252576

研究成果の概要（和文）：

連星中性子星およびブラックホール・中性子星連星の合体に対して、中性子星に対する幅広い状態方程式と質量、およびブラックホールに対する幅広い質量とスピンを採用しながら一般相対論の数値計算を実行し、合体過程の全容、合体後に誕生する天体の特徴、および放射される重力波の波形をこれまでになく系統的に解明した。特に、合体時の重力波波形が、中性子星の状態方程式やブラックホールのスピンを反映することを見出した。

研究成果の概要（英文）：

Numerical-relativity simulations for the coalescence of binary neutron stars and black hole-neutron star binaries were performed for a wide variety of neutron star's equations of state, for a wide range of masses of neutron stars and black holes, and for a wide range of black hole spins. We quantitatively and systematically clarified the merger process of these binaries, the product formed after the merger, and gravitational waves emitted. In particular, we clarified that gravitational waves in the merger phase depend strongly on the equations of state of neutron stars and black hole spins. This implies that they will be able to be constrained by the detection of gravitational waves which will be achieved in the near future by gravitational-wave detectors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	11,600,000	3,480,000	1,508,000

研究分野：数物科学系

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理(理論)

## 1. 研究開始当初の背景

連星中性子星やブラックホール・中性子星連星の合体は、2015年頃から順次本格稼動する予定の重力波検出器(米 LIGO, 仏伊 VIRGO, 日本 KAGRA)に対する最も有力な重力波源で

あるとともに、中性子星や高密度核物質の性質を調べるための自然の実験場でもある。これらの連星は誕生後、重力波放射によってその軌道半径を縮め、やがて合体に至る。軌道半径が 1000km 程度まで縮まった時に重力波

の周波数が約 10Hz になり、その 1~10 分後、周波数が 1 kHz 程度になった時に合体が始まると予想される。稼動予定の大型重力波検出器は、周波数が約 10Hz から数 kHz の重力波に対して感度を持つので、合体前後の重力波が検出目標となる。いずれの検出器においても、仮に約 10 億光年以内の距離でこれらの連星が合体すれば、放射される重力波を捕らえることができる。連星形成・進化の典型的なシナリオに従うと、1つの銀河で連星の合体は 10 万~100 万年に一度起こるとされるが、この合体率を宇宙全体に適用できると仮定すれば、連星の合体による重力波が、年間数 10 イベント程度検出されるようになると見積もられている。

連星からの重力波が検出されればその特徴を解析することで、中性子星やブラックホールの性質(質量、スピン、中性子星の半径など)が決定されると期待できる。しかしそのためには、中性子星やブラックホールの性質が重力波の波形に如何に反映されるのか、理論的に事前に解明しておかなくてはならない。具体的には、理論的に連星の運動状態を予想し、かつ重力波の波形を求める必要がある。軌道半径が星の半径よりも十分に大きい場合には、星の構造が無視できるうえに軌道速度が光速よりも十分に小さいので、質点近似とポストニュートン近似を組合せた解析的理論研究が有効になる。しかし、軌道半径が星の半径の 4~5 倍以下に縮んだ後は星の構造が無視できず、また運動速度も光速の 30~40% になるので、いかなる近似も適用できない。その場合、アインシュタイン方程式と物質の運動方程式を数値的に解く研究、いわゆる数値相対論、が唯一の研究手段になり、この研究を進めることが世界的にも重要課題になっている。

## 2. 研究の目的

(1) 主たる目的は、連星中性子星およびブラックホール・中性子星連星の合体過程および放射される重力波の波形を、中性子星の質量や状態方程式、ブラックホールの質量やスピンを幅広く変化させながら、これまでになく系統的にかつ正確に、数値相対論に基づくシミュレーションにより明らかにすることである。さらに重力波のカタログを作成し、データ解析模擬研究にも役立つようにすることも、付随した目的の 1 つである。

(2) これまで実行できなかった、有限温度の効果を取り入れた物理的な状態方程式およびニュートリノ冷却の効果を考慮したシミュレーションを実行可能にすることが第 2 の目的である。そして新たなコードを用いてガンマ線バーストの中心源の形成過程の解明などに挑むことも目的である。

## 3. 研究の方法

(1) 平成 20 年度までに開発した数値相対論コード SACRA を用いて、連星中性子星の合体およびブラックホール・中性子星連星の合体に対する数値相対論的シミュレーションを多数のパソコンを用いて行う。その際、中性子星の状態方程式と質量、およびブラックホールの質量とスピンを幅広く系統的に変化させ、幅広いモデルに対する重力波波形を系統的に導出する。中性子星の状態方程式に関しては、基本的には、異なる断熱指数を持つポリトロップをつなぎ合わせてモデル化された状態方程式(ピースワイズポリトロップ状態方程式)を用いる。

(2) 有限温度の効果が考慮された物理的な状態方程式およびニュートリノ冷却の効果を取り入れた新たなコードをまずは開発し、さらにそれを用いてより物理的なシミュレーションを実行する。

## 4. 研究成果

以下に挙げたシミュレーション研究を共同研究者(関口雄一郎、木内建太、久徳浩太郎、仏坂健太(いずれも京都大学)と進め、大別すると 4 つの成果を得た。

(1) 連星中性子星に対するピースワイズポリトロップ状態方程式を用いた研究: 合計 15 のピースワイズポリトロップ状態方程式を採用してシミュレーションを系統的に行った。状態方程式を変化させると、合体が始まるときに放射される重力波の特徴的周波数や合体直後に形成される大質量中性子星から放射される重力波が変化する。その変化の具合に着目し定量的に調べた。具体的には、合体直前の重力波周波数の時間変化の様子は、状態方程式に依存することが分かった。仮に状態方程式が十分に硬いかあるいは連星の合体が十分近傍(1億光年程度)で起これば、この情報を用いて中性子星の状態方程式に制限が可能ながわかった。また合体後に誕生する大質量中性子星から放射される重力波の周波数は、状態方程式に依存し、2~4kHz 程度の幅を持つことも突き止めた。仮に合体が近傍で起こってこの重力波が観測されれば、周波数から中性子星の状態方程式に強い制限を与えうることを明らかにした。それ以外にも、合体後ブラックホール、中性子星のどちらが誕生するかは状態方程式に非常に強く依存することを明確にした。

(2) ブラックホール・中性子星連星の合体に関する研究: ブラックホールのスピン、ブラックホールと中性子星の質量、中性子星の状態方程式に対するパラメータなど多数のパラメータが存在するが、これらを系統的に変化させ幅広いパラメータに対してシミュレーシ

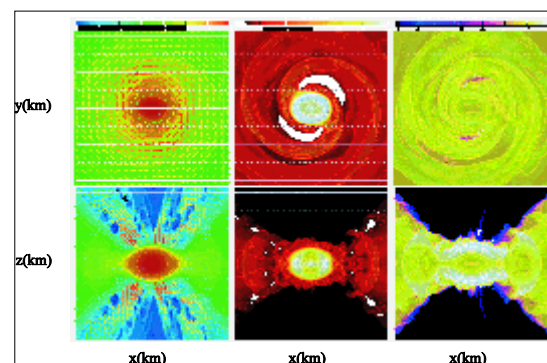
オンを行った。状態方程式に関してはピースワイズポリトロープを合計8通り、質量の組み合わせに関しては合計9通り(質量比は1.5~5の範囲)、ブラックホールのスピンのに関しては、その値を-0.5~0.75の範囲に6通り選んで、シミュレーションを系統的に行った。ブラックホール・中性子星連星の合体過程は大雑把に2通りに分類できる。1つはブラックホールに飲み込まれる前に中性子星が潮汐破壊される場合で、もう1つが潮汐破壊が起こることなく、ブラックホールに中性子星が飲み込まれてしまう場合である。どちらになるかは、質量比、中性子星の半径(状態方程式)、およびブラックホールのスピンに依存する。スピンの存在しない場合には、潮汐破壊は、質量比が小さいか(中性子星の半径が12km程度ならおよそ3以下)、中性子星の半径が大きいなどの限られた場合にしか起こらない。一方、ブラックホールのスピンが存在し、かつその向きが軌道角運動量の向きと一致している場合には、制限が緩和され、特にスピンの0.75であれば、半径が12km程度の典型的な中性子星で、質量比が5程度でも潮汐破壊が起こることを明らかにした。

潮汐破壊が起こると2つの興味深い現象が見られることも明らかにした。1つはブラックホール周りに降着円盤が誕生することである。円盤の質量は、典型的には0.1太陽質量程度になり、これはガンマ線バーストを発生させる系として有望視できるものである。2つ目は、特徴的な重力波波形が現れる点である。潮汐破壊が起こると、それまで放射されていた重力波の発生が急激に抑えられる。そのためフリー空間で見ると、ある閾値以上の周波数で振幅が激減するという現象が起きる。この閾値が潮汐破壊時の重力波周波数と一致する。潮汐破壊現象および破壊時の特徴的な重力波周波数は、質量比、中性子星の半径、ブラックホールのスピンで決まる。したがって、特徴的な周波数を決定できて、かつ質量比やブラックホールのスピンを他の情報(例えば、合体に至るまでに放射される重力波の波形)から決定できれば、中性子星の半径に制限を課することができる。本研究ではこの性質を特に詳しく調べ、合体が十分に近傍で起これば、状態方程式に強い制限をつけられることを明らかにした。

(3)有限温度の現実的な状態方程式を用いた連星中性子星に対する研究: 合体後大質量中性子星が誕生する場合、衝撃波加熱を通じて、その温度は $10^{11}$ Kを超えるまで上昇するので、有限温度の効果(有限温度の状態方程式とニュートリノ放射)がその後の進化に重要な役

割を果たす可能性がある。また、ニュートリノはその後のガンマ線バーストの発生に寄与する可能性があるため、どの程度放射されるのか定量的に調べるためにも物理素過程を取り入れる必要がある。つまり、有限温度の効果をもより正確に考慮した状態方程式とニュートリノ放射効果を取り入れた数値シミュレーションが必要である。そこで期間前半にはそのようなシミュレーションを可能にするコードの開発を進めた。コード開発は主に分担者の関口が担い、22年度中にはほぼ完成をみた。そして23年度には、最初のシミュレーションを実行した。有限温度の状態方程式とニュートリノ放射の効果の両方を取り入れた連星中性子星の数値相対論的シミュレーションは世界初のものである。この研究では、2つの中性子星の質量は等しいとするが、その質量は現実的と思われる範囲で広く変化させた(太陽の1.3~1.6倍程度)。そして、以下のような知見を得た。まず合体後中性子星が誕生する場合、その温度は典型的には $3-5 \times 10^{11}$ K程度にまで上昇することがわかった。そのためこれまでの予想よりも、熱に起因する圧力が誕生した大質量中性子星の重力を支える上で重要な役割を果たすことが分かった。高温になるので、ニュートリノが大量に発生することも明らかになった。典型的な高度は $10^{53}$ ergs/sを超える。また、反ニュートリノの方がより多く放射されることも分かった。さらにニュートリノ対消滅が効率よく発生すれば、ガンマ線バーストが発生しうること示唆された。

なお下の図は、この研究で得られた成果をまとめPhysical Review Lettersに掲載された論文の1つに掲載された図であるが、これはPhysical Review Lettersの表紙に採用された。



(4)重力波波形カタログの作成: 数値相対論の計算で得られた重力波の波形を随時ホームページに公表した。それらは、海外の共同研究者によって解析され、来るLIGO重力波観測計

画におけるパラメータ決定精度の解析を知るための模擬データ解析研究に役立てられている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件) (全て査読有)

- ① M. Shibata and Y. Sekiguchi, “Radiation Magnetohydrodynamics for Black Hole-Torus System in Full General Relativity: A Step toward Physical Simulation”, *Prog. Theor. Phys.* **127**, 535-559 (2012)
- ② B. Lackey, K. Kyutoku, M. Shibata, et al., “Extracting equation of state parameters from black hole-neutron star mergers.I. Nonspinning black holes”, *Phys. Rev. D* **85**, 044061-1—21 (2012)  
DOI:10.1103/PhysRevD.85.044061
- ③ K. Kyutoku, H. Okawa, M. Shibata, and K. Taniguchi, “Gravitational waves from spinning black hole-neutron star binaries: dependence on black hole spins and on neutron star equations of state”, *Phys. Rev. D* **84**, 064018-1—32 (2011)  
DOI:10.1103/PhysRevD.84.064018
- ④ Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, and M. Shibata, “Effects of hyperons in binary neutron star mergers”, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 211101-1—5 (2011)  
DOI:10.1103/PhysRevLett.107.211101
- ⑤ Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, and M. Shibata, “Gravitational waves and neutrino emission from the merger of binary neutron stars”, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 051102-1—5 (2011)  
DOI:10.1103/PhysRevLett.107.051102
- ⑥ Y. Sekiguchi and M. Shibata, “Formation of black hole and accretion disk in collapsar”, *Astrophys. J.* **737**, 6-1—28 (2011)  
DOI:10.1088/0004-637X/737/1/6
- ⑦ K. Kiuchi, M. Shibata, et al., “Gravitational waves from the Papaloizou-Pringle instability in black hole-torus systems”, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 251101-1—4 (2011)  
DOI:10.1103/PhysRevLett.106.251102
- ⑧ K. Hotokezaka, K. Kyutoku, H. Okawa, M. Shibata, and K. Kiuchi, “Binary neutron star mergers: Dependence on the nuclear equation of state”, *Phys. Rev. D* **83**, 124008-1—12 (2011)  
DOI:10.1103/PhysRevD.83.124008PACS
- ⑨ M. Shibata, K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, and Y. Suwa, “Truncated Moment Formalism for Radiation Hydrodynamics in Numerical Relativity”, *Prog. Theor. Phys.* **125**, 1255—1287 (2011)
- ⑩ M. Shibata and K. Taniguchi, *Astrophys. J. Supplement*, “Coalescence of black hole-neutron star binaries”, *Living Review in Relativity*, **14**, 6, 1—90 (2011)
- ⑪ K. Kiuchi, S. Yoshida, and M. Shibata, “Non-axisymmetric instabilities of neutron stars with purely toroidal magnetic fields”, *Astron. Astrophys.* **532**, A30-1--17 (2011)  
DOI:10.1051/0004-661/201016242
- ⑫ M. Shibata, K. Kiuchi, Y. Suwa, and K. Ioka, “Afterglow of binary neutron star merger”, *Astrophys. J. Lett.* **734**, L36—L40 (2011)  
DOI:10.1088/2041-8205/734/2/L36
- ⑬ M. Shibata and K. Kyutoku, “Constraining Nuclear-Matter Equations of State by Gravitational Waves from Black Hole-Neutron Star Binaries”, *Prog. Theor. Phys. Supplement* **186**, 17—25 (2010)
- ⑭ L. Baiotti, M. Shibata, and T. Yamamoto, “Binary neutron star mergers with WHISKY and SACRA”, *Phys. Rev. D* **82**, 064015-1—15 (2010)  
DOI:10.1103/PhysRevD.82.064015
- ⑮ K. Kyutoku, M. Shibata, and K. Taniguchi, “Gravitational waves from non-spinning black hole-neutron star binaries: Dependence on equations of state” *Phys. Rev. D* **82**, 044029-1—24 (2010)  
DOI:10.1103/PhysRevD.82.044049
- ⑯ P. Montero, J.A. Font, and M. Shibata, “Influence of self-gravity on runaway instability of black hole-torus system”, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 191101-1—4 (2010)  
DOI:10.1103/PhysRevLett.104.191101
- ⑰ K. Taniguchi and M. Shibata, “Binary neutron stars in quasiequilibrium” *Astrophys. J. Supplement* **188**, 187—208 (2010)  
DOI:10.1088/0067-0049/188/1/187
- ⑱ K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Taniguchi, “Exploring binary-neutron-star-merger scenario of short-gamma-ray bursts by gravitational-wave observation”, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 141101-1—4 (2010)  
DOI:10.1103/PhysRevLett.104.141101
- ⑲ K. Uryu, F. Limousin, J.L. Friedman, E.

Gourgoulhon, and M. Shibata,  
“Non-conformal flat initial data for binary  
compact objects” Phys. Rev. D **80**,  
124004-1—23 (2009)

DOI:10.1103/PhysRevD.80.124004

- ⑳ K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and  
K. Taniguchi, “Longterm general  
relativistic simulation of binary  
neutron stars collapsing to a black  
hole” Phys. Rev. D **80**, 064037-1—27  
(2009)  
DOI:10.1103/PhysRevD.80.064037

[学会発表] (計 10 件) (全て招待講演)

- ① M. Shibata, “Fully general  
relativistic MHD simulation of  
binary neutron stars”,  
ASTRONUM2009, Chamonix,  
France, 2009, July 2
- ② M. Shibata, “Numerical simulation of  
binary merger in Japan”,  
MICRA2009, Neils Bohr Institute,  
Denmark, 2009, August 24
- ③ M. Shibata, “Merger of binary neutron  
stars and black hole-neutron star  
binaries”, Computational relativistic  
astrophysics, Princeton, USA, 2009,  
October 23
- ④ M. Shibata, “Merger of binary neutron  
stars and black hole-neutron star  
binaries”, 2011 Shanghai Asia-Pacific  
School and Workshop on Gravitation,  
Shanghai, China, 2011, February 11, 12
- ⑤ M. Shibata, “Coalescence of binary  
neutron stars and black hole-neutron star  
binaries”, Advances in Computational  
Astrophysics, Cefalu, Italy, 2011, June 15
- ⑥ M. Shibata, “Higher-dimensional  
numerical relativity”, Numerical relativity  
beyond astrophysics, Edinburgh, Scotland,  
2011, July 13
- ⑦ M. Shibata, “Higher-dimensional  
numerical relativity, Numerical relativity  
and high-energy physics, Madeira,  
Portugal, 2011 September 2
- ⑧ M. Shibata, “Gravitational waves from  
binary neutron stars”, Black holes: New  
horizon, Banff, Canada, 2011, November,  
24
- ⑨ M. Shibata, “Coalescence of binary  
neutron stars and black hole-neutron star  
binaries”, seventh ICGC, Goa, India, 2011,  
December 18
- ⑩ 柴田 大, 「数値相対論」、日本物理学  
会、弘前大学、2011 年 9 月 16 日

[図書] (計 1 件)

- ① 宇川彰、青木慎也、初田哲男、柴田大、  
梅村雅之、西村純、岩波書店、計算科  
学第 2 卷「計算と宇宙」、2012、250 頁

[その他]

ホームページ等

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~mshibata/research.html> に代表者の研究成果

同/shibal.html に代表者の論文リスト

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~kyutoku> に研究で得られた重力波波形のデータを掲載

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柴田 大 (SHIBATA MASARU)  
京都大学・基礎物理学研究所・教授  
研究者番号：80252576

### (2) 研究分担者

関口 雄一郎 (SEKIGUCHI YUICHIRO)  
京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員  
研究者番号：50531779

木内 建太 (KIUCHI KENTA)  
京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員  
研究者番号：40514196

### (3) 連携研究者

なし