

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05447

研究課題名(和文) 内部状態を考慮に入れた中性子星を含むコンパクト連星の研究

研究課題名(英文) A study of compact binaries including neutron stars with internal state

研究代表者

谷口 敬介 (TANIGUCHI, Keisuke)

琉球大学・理学部・准教授

研究者番号：70586528

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)：コンパクト連星は軌道運動を行うことで重力波を放出し、徐々に連星間距離を縮め、最終的には合体する。本研究では、合体前の準平衡段階での、内部状態を考慮に入れた中性子星を含むコンパクト連星の数値的研究に取り組んだ。まず、中性子星内部を中心部分のコアと外殻であるクラストという構造の違いによって二つの領域に分割し、コアは一つの完全流体として扱い、クラストは弾性体として扱う定式化を行った。その定式化に基づき、中性子星を構成する数値計算コード開発に取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、日本・アメリカ・ヨーロッパでレーザー干渉計を使った重力波観測が行われている。中性子星を含むコンパクト連星が合体直前に放出する重力波を観測した場合、その波形を用いて潮汐作用による中性子星の変形度を推定し、それを元に中性子星核物質の状態方程式の情報を得ることが可能である。本研究では、中性子星の変形度に影響を与える中性子星の内部構造・状態を考慮に入れることで、中性子星核物質の状態方程式を解明するための基礎研究に寄与した。

研究成果の概要(英文)：Compact binary systems gradually decrease their orbital separations and eventually merge due to the emission of gravitational waves. In this research program, we have tackled a numerical study of compact binaries including neutron stars with internal states in quasi-equilibrium before merger. First, we divide the interior of a neutron star into two regions, the inner region, core, and the outer region, crust. Then, we formulate the way to treat the core as a perfect fluid and the crust as an elastic body. Based on the formulation, we try to develop a numerical code to construct such neutron stars.

研究分野：数物系科学

キーワード：宇宙物理 一般相対論 中性子星 ブラックホール 連星系 準平衡解 数値計算 弾性体

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 2015年9月14日、二つのブラックホールで構成された連星系(連星ブラックホール)の合体時に放出された重力波が、アメリカの重力波観測用レーザー干渉計LIGOによって初めて直接観測された。また、2017年8月17日には、二つの中性子星で構成された連星系(連星中性子星)の合体から放出された重力波も観測された。連星ブラックホール、連星中性子星、ブラックホール-中性子星連星といったコンパクト連星の合体は、このLIGOや日本のKAGRAなど、地上/地下に建設されたレーザー干渉計の重要なターゲットの一つである。また、連星中性子星やブラックホール-中性子星連星の合体後に形成されるブラックホールとそれを取り巻く降着円盤というシステムは、継続時間の短いガンマ線バースト源の候補天体の一つとみなされており、活発に研究されている。

(2) 合体直前のコンパクト連星は、それを構成している中性子星やブラックホールはもちろん、連星系自身も重力によって非常に強く結合しているため、ニュートン重力による取り扱いでは不十分で、一般相対論を用いて研究しなくてはならない。その場合、アインシュタイン方程式や相対論的流体力学の方程式を連立させて解くのであるが、手段として最適なものは数値相対論によるシミュレーションである。ただしそのシミュレーションは、アインシュタイン方程式に含まれる拘束条件式を満たし、かつ、物理的にもっともらしい準定常的な初期データから開始しなくてはならない。

(3) そのような初期データとして用いられる中性子星を含むコンパクト連星の準平衡解は、今まで中性子星を完全流体と仮定して研究されてきた。しかし実際は、半径10キロメートル程度の中性子星の表面から深さ1キロメートルほどは、クラストと呼ばれる原子核の結晶状態になっている。完全流体でなく固体であれば、そこに関わる力も変わってくるため、伴星から潮汐力を受けたときの変形の度合いも変わると考えられる。また、クラスト内の中心に近い密度が約 $10^{11}\text{g/cm}^3$ を超える領域では、中性子が原子核から漏れ出し、超流動状態で自由に動いていると考えられている。この密度を超えたクラスト部分をインナークラストと呼ぶ。そして、クラストよりもさらに内側の中心部分はコアと呼ばれている。コアでは中性子が超流体になっていると考えられ、加えて陽子や電子などの荷電粒子も存在し、流体として別々の振る舞いをするので、これら二つの流体を分けて取り扱う必要がある。単独で存在する中性子星について、クラストの弾性やインナークラストでの超流体中性子、コアでの2流体の取り扱いなどについてはすでに研究されつつあるが、コンパクト連星については全く行われていない。

### 2. 研究の目的

(1) 上記の背景およびこれまでの研究成果をもとに、本研究では、中性子星を含むコンパクト連星の準平衡解の研究において、まだ取り入れられていない中性子星の内部状態を考慮に入れ、合体直前のコンパクト連星の物理過程への影響を調べる。また、そのために必要な手法や数値計算コードの開発を行う。

(2) 本研究の一つ目の目的は、クラストを弾性体として扱った解を構成することである。クラストは原子核の結晶状態になっているので、完全流体として扱った場合と違い、応力が発生する。一般相対論的な弾性体については、引用文献 以来研究がなされているので、それらの成果を参考に、解を構成する。この段階の中性子星モデルでは、クラスト全体に弾性を入れるがインナークラストでの超流体中性子は考慮しない。また、コアは1流体の完全流体として扱うこととする。

(3) 二つ目の目的は、クラストでの超流体中性子の存在を考慮に入れた解の構成である。クラスト内の密度が $10^{11}\text{g/cm}^3$ を超えた領域で、原子核から漏れ出した中性子が超流動状態で自由に動くようになった状況を想定し、そのような超流体中性子が与える影響を調べる。一般相対論のもと、単独の中性子星のクラストでの超流体中性子を扱った研究としては、引用文献 などがある。この方法を用いて、インナークラストでの超流体中性子を考慮に入れた解を構成する。この段階のモデルでは、研究の目的(2)ですで行ったように、クラスト全体に弾性を入れるが、コアはまだ1流体の完全流体として扱う。

(4) 三つ目の目的は、コアを2流体の完全流体として扱った解を構築することである。コアの中心部分であるインナーコアについてはまだ解明されていない部分が多いので、本研究ではその外側のアウトターコアと合わせて一つのコアとして扱う。その上で、コアを超流体中性子と荷電粒子(陽子、電子)の2流体として扱った解を構成する。このような取り扱いを単独の中性子星に適用した研究としては、引用文献 がある。しかしこの研究では、クラストは考慮されていない。本研究では研究の目的(2)のようにクラスト全体に弾性を入れ、さらに(3)のようにインナークラストでの超流体中性子も考慮に入れる。

### 3. 研究の方法

(1) 最初に、中性子星内部をクラストとコアという二つの領域に分割する。そして、クラストを弾性体として扱い、コアは1つの完全流体として扱ったモデルを考える。このモデルを解くための定式化を行う研究と、定式化に基づいて数値的に解くためのコード開発を行う研究、という二つの研究を遂行する。これらの数値計算コードの基礎部分が完成したら、連星中性子星の準平衡解を求めるための数値計算コード開発に取り組む。数値計算法は現在までの研究と同様、スペクトル法を採用する。数値計算コードの基礎部分は、具体的には「中性子星内部を二つの領域に分割する」、「クラスト部分を弾性体として扱う」という二つの段階に分けて開発を行う。これらのコード開発が終わったら、連星中性子星の準平衡解を構成するための数値計算コード開発に取り組む。

(2) 定式化に不備がある場合、構成した中性子星内部にクラストとコアという二つの領域を持つ平衡形状が不安定になるかもしれない。それを確認するため、引用文献<sup>1)</sup>を参考にして動径方向への時間発展を求める数値計算コードの開発を行い、構成した球対称中性子星が安定かどうかを調べる。この研究の数値計算法には、準平衡解の場合と違い、有限差分法を採用することにする。

### 4. 研究成果

(1) 初年度は、まず重力に関するパラメータを解くための数値計算コード開発に取り組んだ。最初にこの研究に取り組んだ理由は、以前行った別の研究で開発を推進した数値計算コードが存在したため、それに改良を施すことで本研究の数値計算コードとして利用できるからである。物質が存在しない状態で、単独のブラックホールを自転するパンクチャーとして扱って解くことができる数値計算コードを開発した。その後、中性子星内部をクラストとコアに分割し、クラスト部分を弾性体、コア部分を完全流体として扱う定式化に入ったが、初年度内では完成することができなかった。

(2) 2年目は、初年度に引き続き定式化に取り組んだ。相対論的弾性体に関する引用文献<sup>2)</sup>などの先行研究を再度確認してクラスト部分について定式化を行った。また、完全流体として扱うコア部分については、今までの研究で用いた定式化を採用した。その次に、クラストとコアの接続部分の扱いについての研究を行った。

(3) 3年目は、2年目に研究した定式化を用いて、内部状態を考慮に入れた中性子星を構成する数値計算コード開発に取り組んだ。現在も、単独の中性子星を構成する数値計算コードの開発途中であり、年度内に最終的な目的であるコンパクト連星を構成する研究には入ることができなかった。また、中性子星の安定性を調べるための一般相対論的な球対称時間発展コードの開発については、3年目に数値シミュレーションコードを書き上げ、現在、計算途中で発生する不具合を取り除く作業を行っている。今後は、単独の中性子星について、クラスト部分を弾性体、コア部分を完全流体として扱った平衡形状を求める数値計算コードを完成させる。その平衡形状について安定性を調べたのち、それを連星中性子星やブラックホール-中性子星連星の中性子星部分として用いた準平衡解を構成することを目指す。

(4) 上記の研究と並行して、中性子星全体を完全流体とした場合の連星中性子星とブラックホール-中性子星連星の準平衡解を初期データとして数値シミュレーショングループに提供し、それらの合体シミュレーションの結果を論文として発表している。連星中性子星の合体シミュレーションでは、得られた重力波波形を解析的な重力波波形と比較してよく一致していることを確認した。また、重力波波形を周波数の関数として表現したモデルや、中性子星の変形度の状態方程式依存性についても詳しく研究した。一方、ブラックホール-中性子星連星の合体シミュレーションでは、ブラックホールによって中性子星が潮汐破壊され降着円盤を形成する過程でのニュートリノ放出や質量放出について研究を行った。また、一般相対論を用いた差動回転する中性子星の平衡解に関する共同研究と、同じく一般相対論を用いた磁場を伴った自転する中性子星の平衡解に関する共同研究も行い、それらの結果を論文として発表している。差動回転する中性子星の平衡解の研究では、差動回転のモデルを設定し、モデルの違いによる中性子星の形状や最大質量の変化を詳しく調べた。中性子星磁場についての研究では、ポロイダル磁場とトロイダル磁場の両方を持つ場合について、中性子星内部と外部の磁場構造を求めた。

(5) さらに、磁場による中性子星の変形度や中性子星内部と外部の磁場構造を調べるため、中性子星形状を楕円体と近似したニュートン重力を用いた研究も推進している。この研究では、中性子星の形状を楕円体と近似し、中性子星内部の磁場も自転軸方向のみの成分を持つと仮定することで、中性子星の形状を半解析的に求めることができる。その上で、有限差分法を用いて外部磁場を求める数値計算コードの開発を行った。この外部磁場は、自転軸方向のみの成分と仮定した中性子星内部の磁場と中性子星表面で無矛盾に接続しなくてはならず、それを実現するため

に中性子星の表面に電流を導入した。本研究では、この表面電流を決定する方法論を確立し、数値的に求めることに成功した。現在、その結果について論文執筆中である。

<引用文献>

- B. Carter & H. Quintana, Proc. R. Soc. Lond. A. **331**, 57 (1972).
- B. Carter & L. Samuelsson, Class. Quantum Grav. **23**, 5367 (2006).
- A. Sourie, M Oertel, & J. Novak, Phys. Rev. D **93**, 083004 (2016).
- J. V Romero, J. M<sup>a</sup>. Ibanez, J. M<sup>a</sup>. Marti, & J. A. Miralles, Astrophys. J. **462**, 839 (1996).
- M. Karlovini & L. Samuelsson, Class. Quantum Grav. **20**, 3613 (2003).
- I. Brito & M. P. M. Ramos, J. Geometry and Physics **98**, 485 (2015).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kiuchi Kenta, Kawaguchi Kyohei, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 96
2. 論文標題 Sub-radian-accuracy gravitational waveforms of coalescing binary neutron stars in numerical relativity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 084060-1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.96.084060	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 Uryu Koji, Tsokaros Antonios, Baiotti Luca, Galeazzi Filippo, Taniguchi Keisuke, Yoshida Shin'ichirou	4. 巻 96
2. 論文標題 Modeling differential rotations of compact stars in equilibriums	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103011-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.96.103011	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 Kyutoku Koutarou, Kiuchi Kenta, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 97
2. 論文標題 Neutrino transport in black hole-neutron star binaries: Neutrino emission and dynamical mass ejection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 023009-1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.97.023009	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, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 97
2. 論文標題 Frequency-domain gravitational waveform models for inspiraling binary neutron stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 044044-1-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.97.044044	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 Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 876
2. 論文標題 Revisiting the Lower Bound on Tidal Deformability Derived by AT 2017gfo	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L31-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/able45	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 Uryu Koji, Yoshida Shijun, Eric Gourgoulhon, Charalampos Markakis, Fujisawa Kotaro, Antonios Tsokaros, Taniguchi Keisuke, Eriguchi Yoshiharu	4. 巻 100
2. 論文標題 New code for equilibrium and quasiequilibrium initial data of compact objects. IV. Rotating relativistic stars with mixed poloidal and toroidal magnetic fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123019-1-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.123019	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

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----