

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03606

研究課題名(和文) 磁場を伴った星の安定性解析法開発と安定性解析

研究課題名(英文) A new approach for stability analysis of magnetized stars

研究代表者

吉田 至順 (Yoshida, Shijun)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：30386635

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)：磁場を伴った星の安定性解析を行うための定式化を行った。定式化は変分原理に基づくもので、この定式化を用いて、有限要素法による安定性解析を行うための数値コードの作成を進展させた。安定性解析で必要となる磁場星の平衡解について、研究を進めた。主な成果は次の通りである。(i) 非常に強いトロイダル磁場と弱いポロイダル磁場を持つ平衡解を一般相対論の枠組みで求めた。(ii) 一般相対論の枠組みで、磁場を非摂動的に扱った場合の平衡解を一般の磁場構造に対して求めた。(iii) 星の外部に磁気圏を持つ場合の平衡解について解析した。(iv) 磁場星の表面に表面電流がある場合の平衡解を解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンパクト天体の磁場は、高エネルギー天体現象の最も重要な要素の一つであり、磁場無しでは多くの現象を説明できない。その一方で、コンパクト天体に存在する磁場が基本的には不安定であることが指摘されている。これが事実なら非常に深刻な問題であり、磁場を伴う星の安定性は、天体物理において、重要な問題となる。しかし、今のところ、磁場星の安定性を解析する正確で有効な方法は知られていない。本研究課題では、磁場星の安定性を解析する数値解析方法を進展させたという意味で意義がある。最終的な成果は得られていないが、今後、研究を進めることで、最終的な成果が得られると期待される。

研究成果の概要(英文)：The formulation for analyzing stability of magnetized stars are obtained. The formulation is based on a variational principle, which can be applied to a numerical approach with the finite element method. The construction of the numerical code for examining stabilities of magnetized stars is developed, although it is not finished yet. Equilibrium states of magnetized stars, which are required for examining their stability, are studied. Main results are summarized as follows: (i) Stars containing magnetic fields whose toroidal components are much larger than the poloidal ones in general relativity are obtained. (ii) Considering general magnetic field structures, we obtain magnetized stars within the framework of general relativity. (iii) Magnetized stars surrounded by plasma are investigated. (iv) Effects of the surface current on the stellar surface on the structure of the star are studied.

研究分野：宇宙物理

キーワード：理論宇宙物理

1. 研究開始当初の背景

一般に星の内部の磁場の強さや分布を観測から直接推測することは非常に難しい。そこで、磁場を伴った星の理論的に許される平衡解を求めることで、表面の磁場の強さに対する内部磁場の取りうる最大値や可能な磁場分布を推定する試みが 1990 年代後半から広く行われるようになり、ニュートン力学の枠組みではあるが、Tomimura & Eriguchi 2005 によって軸対称定常の仮定の下で、一般的な磁場分布を持つ磁場を伴った星の平衡解を求めることが可能となった。

その後、現在まで様々な磁場分布を持つ星の平衡解が求められるようになってきているが、(a)数値シミュレーションで作られた原始中性子星から予想されるような磁場分布を持つ平衡解が求められていない、(b)一般相対論的な扱いが完成していない、などの問題があった。

このように磁場を伴った星の平衡解の研究は、以前に比べ、大きく進展しているが、星の平衡解が自然界に存在するためには、解が安定であることが必要である。Taylor らによって、磁場を伴った星は、構成物質が完全導体であるという磁場星を扱う場合に良く用いられる第一近似(理想磁気流体近似と呼ばれる)の下では、多くの状況で、不安定であることが、1970 年代から予想されている。そのため磁場を伴った星の安定性解析は非常に重要な課題であり、精力的に研究が行われている。

現在の主要な手法は、(c)線形化した理想磁気流体の方程式を用いて、適当に仮定した初期条件の時間発展を追って、初期の摂動の成長を見る(Lander & Jones 2012 など)、(d)非線形の理想磁気流体の方程式を用いて、星の平衡解に微小な摂動を加えたものの時間発展を直接追い、その後の状態変化をみる(Kiuchi, Yoshida & Shibata 2012 など)、である。(c)は扱いが簡単であること(d)は不安定が起こった後の最終的な状態を知ることができることが、その長所として挙げられるが、初期条件依存性の問題や数値不安定の問題などもあり、安定性解析としては完全なものではない。また、これらの摂動の時間発展を用いた安定性解析では、これまでに、安定な平衡解は知られていない。

初期条件に依存しない正確な安定性を知るためには線形摂動解析によって固有振動を求めることが必要であり、時間発展の計算による結果は、固有振動の結果と比較し、確認することで初めて正しい結果であったと確認することが可能になる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁場を伴った星の線形摂動解析による安定性解析の強固で標準的な数値的方法の開発を行うことである。

これまで、星の安定性解析を行う従来の方法を磁場星へ拡張する試みが幾つかあったが、十分な成果が得られていなかった。そこで、本申請課題では、プラズマ核融合の分野で用いられている線形摂動解析による固有振動モードの計算方法を可能な限りそのまま磁場を伴った星へ拡張し、磁場星においても固有振動モード解析及び安定性解析を行える強固な方法を開発することを目的とする。

また、安定性解析に必要な磁場星の平衡解についても同時に研究を進め、これまでに得られている磁場の構造と比較して、より広い範囲の磁場の構造を持つ平衡解について、安定性の解析を行う。特に、これまでに十分に研究が進んでいない一般相対論の枠組みでの磁場星の平衡解について、研究を進め、より広い範囲で平衡解を得られるようにしたい。

3. 研究の方法

プラズマ核融合の分野で用いられている自己重力を含まない磁気流体の平衡状態の固有振動モードを求めるための数値解法を磁場星の場合に拡張する。具体的には有限要素法に基づく手法である。最終的には行列の固有値問題となる。本研究課題では、簡単化のために、ニュートン力学に基づいた解析を行う。最初に、Cowling 近似と呼ばれる重力ポテンシャルの摂動を無視する近似を用いた場合に拡張を行う。この近似のメリットは(i)線形摂動解析の基礎方程式が自己重力を含まない場合(プラズマ核融合の場合)とほぼ同じになること(ii)重力自体はニュートン力学では力学的自由度を持たず無視しても定性的な振る舞いは変わらないこと(iii)この近似で得られた固有振動数の値自体も、正確な計算結果と大きく変わることは少ないことが挙げられる。可能な場合は、最終段階で重力ポテンシャルの摂動も入れた解析に拡張する。簡単な磁場分布を持つ場合の解析で数値解法の正常作動の確認とこれまでの解析において予想された性質との整合性の確認を行う。最終的には一般の磁場分布を許した場合で磁場が弱い場合の安定性解析を行う手法を開発する。また、詳細な固有振動モードの解析も行い連続モードや磁場に固有の振動モードの基本的な性質についての知見を得る。

平衡解に関しては、これまでに考慮されていない効果を考慮した平衡解を得るための定式化および数値解を求めるための数値コードの開発を行い、具体的な数値解を求め、物理的な性質

の解析を行う。特に、これまでにあまり研究が進んでいない一般相対論の枠組みで平衡解を求めるための解析を行う。

4. 研究成果

本研究課題では、最終的な研究目的を達成できていない。理由は研究期間の不足である。研究期間がもう少しあれば目的を達成することが可能と思われるので、研究を継続し、近い内に予定通りの成果を得る予定である。

その一方で、安定性解析を行うための磁場星の平衡解に関して、幾つか重要な成果を得ることができた。特に、これまでに得られていなかった磁場の配位である強いトロイダル磁場と弱いポロイダル磁場を持つ磁場星の平衡解を得ることに初めて成功した。また、磁気圏を考慮した磁場星の平衡解の研究も発展させることができた。共同研究として、一般相対論の枠組みで、強い磁場を持つ星の平衡解の数値解法についても成果を得ることもできた。

以下、本研究課題で達成した研究成果について、詳しく述べる。

安定性解析：プラズマ核融合の分野で用いられる磁気流体の平衡状態には、自己重力が含まれていないため、圧力分布が磁束関数と相似となる。そのため、磁場の分布と物質の分布は一つの関数で記述可能であり、この性質によって、平衡状態の安定性解析でも取り扱いが非常に簡単になる。しかし、自己重力を含む星の場合、物質の分布は主に重力によって決まるため、磁場を含む場合の摂動の式は、複雑になる。このことを考慮して、磁場の分布を反映させた座標系である磁束座標系の下で、変分原理を用いた定式化を完成させた。この定式化は、有限要素法による安定性解析に用いることが可能である。

次に、この定式化を用いた安定性解析を行うための数値コードの開発を行った。まず、平衡解から磁束座標を構成する数値コードの開発を行い、この座標系の下で、有限要素法による数値解析コードの開発を進めたが、現在、コード開発の途中である。

平衡解：一般相対論の枠組みで、強いトロイダル磁場と弱いポロイダル磁場を持つ平衡解を計算するための定式化を行い、具体的な数値解を求めた。この解析によって、このような解は、ポロイダル磁場が弱いという近似の下で、近似的にのみ平衡解として成立することが示された。

また、一般の磁場の構造を許した場合の一般相対論的な磁場星の平衡解を求めるための定式化および数値解法の開発を、共同で行った。この研究では、磁場の効果は、非摂動的に扱い、重力場は、全く近似を用いずに、一般相対論的に正しく取り扱うことに初めて成功した。これまで、このような厳密な取り扱いで、一般相対論的な磁場星の平衡解を求めた例は、ほとんどなかったが、今後、いろいろな平衡解の系列が求められ、コンパクト磁場星において、一般相対論の効果がどのように効くのかなどの解析を行うことが可能となった。

従来の平衡解の研究では、磁場星の外部は、真空として取り扱われることが多かった。しかし、現実には存在する星の場合、星の外部は、プラズマで満ちていて、少なくとも星の近傍では、低密度だが高い電気伝導度を持っていると予想される。そのため、現実の星の磁場を生成する電流は、星の外部にも存在でき、電流に対する境界条件が大きく異なる可能性が高い。そこで、星の外部にプラズマを置き、星の表面から電流が出入りできる場合に、星の構造がどう変わるのか解析を行った。この解析は、一般相対論の枠組みで、磁場を摂動的に扱った場合とニュートン力学の枠組みで、磁場を非摂動的に扱った場合を考えた。

また、これまでの中性子星の磁気圏を扱った研究では、星の表面に表面電流を仮定して、磁気圏を扱うことが、しばしば、あった。磁気圏の研究では、磁気圏そのものに興味があるため、多くの場合、星の構造については全く考慮されない。しかし、表面電流自体は、磁場によってローレンツ力を受けるため、実際には、星の表面に磁気力が働くことになる。そこで、一般相対論の枠組みで、星の構造に対する表面電流の効果を解析した。表面電流が大きく星の構造に影響する可能性は極めて低いですが、理論的観点からは、正確に扱うことが可能かどうかという点は重要である。本研究課題では、正しく扱うための定式化および具体的な数値解を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koji Uryu, Shijun Yoshida, Eric Gourgoulhon, Charalampos Markakis, Kotaro Fujisawa, Antonios Tsokaros, Keisuke Taniguchi, and Yoshiharu Eriguch	4. 巻 100
2. 論文標題 New code for equilibriums 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
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

1. 著者名 Shijun Yoshida	4. 巻 99
2. 論文標題 Stably stratified stars containing magnetic fields whose toroidal components are much larger than the poloidal ones in general relativity: A perturbation analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84034
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.99.084034	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
---------------------------	-----------------------	----

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