

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540245

研究課題名(和文)磁場中性子星の振動と安定性

研究課題名(英文)Oscillations and stability of magnetized neutron stars

研究代表者

吉田 至順(Yoshida, Shijun)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30386635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：磁気浮力による不安定性を安定化する安定成層の効果を考慮した相対論的な磁場星を構成するための定式化を行い、具体的な数値解を求めた。また、ニュートン力学の枠内であるが、一般の軸対称定常の磁場星の平衡解に対する線形摂動の固有値問題を解くための定式化を行った。この支配方程式を実際にポロイダル磁場だけを持つ場合に適応し、数値的に磁場に固有の振動モード及び不安定モードを求めた。トロイダル磁場だけを持つ星の場合の固有振動解析も行った。この場合は磁場に固有の振動モードは求まらなかったが、回転に固有の振動モードに対する磁場の影響を調べた。その他、強い重力場中での電磁場の振る舞いについての解析も行った。

研究成果の概要(英文)：Taking account of effects of the stable stratification, which stabilize the magnetic buoyancy instability, I formulate the master equations for constructing relativistic magnetized stars and obtain particular models numerically. Within the framework of Newtonian dynamics, pulsation equations for stationary axisymmetric stars with general configurations of magnetic fields are derived. With this formalism, I obtain magnetic oscillation modes for stars with purely poloidal magnetic fields. Those magnetic modes include unstable modes. For the cases of stars with purely toroidal magnetic fields, effects of magnetic fields on the oscillation modes that exist in the limit of non-magnetized stars are investigated. The properties of electro magnetic fields in strong gravitational fields are also investigated.

研究分野：数物系科学

キーワード：宇宙物理 中性子星 磁場 振動 安定性 相対論

1. 研究開始当初の背景

パルサー周期の時間変化の観測から通常の中性子星は10の12乗ガウス程度の強磁場を持つことが知られている。その一方で、異常X線パルサー(AXP)や軟ガンマ線リピーター(SGR)などの特異天体が、マグネターと呼ばれる10の14乗ガウスを超える超強磁場を持つ中性子星であるとする矛盾無く観測される特異天体の性質や活動性を説明することができ、超強磁場中性子星・マグネターが実際に存在する証拠であると考えられている。

マグネターでは、通常の中性子星に比べて、磁場が非常に強いため、磁場が中性子星の平衡形状やその振動、安定性を議論する上で無視できない。そのため、磁場を考慮した中性子星の平衡形状とその線形摂動解析の研究は、マグネター研究の基礎として非常に重要である。加えて、マグネターの平衡形状および磁場構造はマグネター周りの天体物理現象を研究する上で基本となるもので、平衡解を得るための定式化及び数値解法の開発は、AXPやSGRを理解する上で不可欠である。そのため、磁場星の平衡形状の研究は、現在、精力的に行われている。

計算された平衡形状が物理的に意味を持つのは、その解が安定な場合だけなので、解の安定性を知ることは非常に重要であるが、磁場星の安定性解析は、これまで十分な成果が得られていない。特に、星内部の磁場の安定性条件は、現在でも不明で、幾つかの磁場形状は不安定であることが示されているだけである(Taylor 1973, Kiuchi et al. 2008)。したがって、星の内部磁場の一般的な安定性条件を得ることは、磁場星研究において、非常に重要な課題である。

本当の意味での安定性と振動の性質を理解するためには固有振動解析が不可欠である。しかし、今のところ行われているのは星の線形摂動の時間発展を計算して安定性及び固有振動を解析する方法と平衡解を初期条件として、磁気流体方程式の時間発展を解き、その後の時間進化を見て安定性を解析する方法である。いずれの方法も有限の時間発展を追うので、近似的な意味での安定性と固有振動しか得られない。原理的な問題を別に、深刻な問題は、今のところ理想磁気流体を仮定した場合に安定な磁場星の解が見つかっていないということである。これまでパルサー磁気圏や中性子星振動の研究では、仮定された磁場中で物理現象の解析が行われ、それを観測と比較することが行われてきたが、そもそも安定な磁場が中性子星に存在しなければ、これらの研究はどこまで正しいのか分からなくなってしまう。

磁場中性子星の振動に関して、興味深い観測がある。SRGは、通常の線フレアの他にジャイアントフレアと呼ばれる超巨大線フレアを起こすことが知られている。最近、このジャイアントフレア時のX線観測デー

タの中に数十ヘルツ程度の幾つかの準周期振動(QPO)が発見され注目を集めている。(Israel et al. 2005; Srohmayer & Watts 2005)このQPOはマグネターの表面付近にある固体層に励起されたシアー振動モードであると仮定すると観測を良く説明できる。すなわち、中性子星発見以来、初めての中性子星振動の観測である可能性が高い。このQPOが本当にシアー振動モードであった場合、今後の観測によって、振動データが蓄積されると地球や太陽のように地震学的手法によって中性子星の構造に制限を与えることが期待される。特に、この観測からは固体層の厚さが決められ、何らかの方法で星の質量が分かった場合は、原子核密度を超える超高密度中性子星物質の状態方程式に強い制限を与えることが可能である。また、今のところ基本モードだけが観測されているが、今後、倍音モードなどの高次のモードが観測されると、振動の観測から直接状態方程式に強い制限を与えられ、さらに、中性子星の内部構造を決定できる可能性もある。(中性子星震学の確立)このようなマグネターに対する中性子星震学を行うためには、磁場を考慮した中性子星の正確な固有振動解析が必要であるが、現実的な磁場星の固有振動解析は難しく、これまで十分に行われていない。今のところ、最近のジャイアントフレアにおけるQPOの発見によって、幾つかの研究が発表された程度であり、今後の理論研究の大幅な発展が期待されている。(Piro 2005; Lee 2006)

2. 研究の目的

1. で述べた様に磁場星の固有振動解析は非常に重要な課題であるが、今のところ簡単な場合でも、十分な解析法が確立していない。そこで本研究課題では、磁場星の固有振動解析を行うための定式化および数値解析法の開発を行う。

固有振動解析法の完成後は、いろいろな平衡解について安定性及び固有振動解析を行い安定な磁場形状を持つ星を見つけ、安定に必要な条件について知見を得る。

さらに、現在、観測されている中性子星振動と思われる観測結果に対する制限を与える。

また、平衡解をはじめ強磁場中での相対論的な現象についても広く研究を行い、相対論的な電磁場についての知見も得る。

3. 研究の方法

本研究課題の主題は磁場星の安定性及び振動の解析である。しかし、この課題はこれまで十分な成果が得られていない非常に困難な問題である。そこで本研究課題では、研究が予定通り進まない場合でも十分な成果が得られるように、(1)簡単な場合から段階的に固有振動の解析を行うこと、(2)安定性解析を行うための平衡解の研究も並行して

行うこと、(3)中性子星では一般相対論的な効果も重要になるため、強い重力場中での電磁場の性質の理解に関連した研究も並行して行うこと、の三点を考慮して研究を行う。(1)では、磁場に固有の振動モードは磁場がゼロの極限ではゼロ振動数になることを仮定した解析法から始め、振動数ゼロを仮定しない通常の方法と解析を進める。(2)、(3)に関しては適宜解析を進める。

4. 研究成果

本研究課題の主な成果は、(1)磁場星の固有振動、(2)磁場星の平衡形状、(3)強重力場中の電磁場の性質、に分けられる。

(1)磁場星の固有振動に関しては、本研究課題では全てニュートン力学の枠内で行った。磁場中性子星を定量的に扱うためには、今後、相対論的な場合への拡張が必要である。具体的な成果は次の通りである。軸対称定常の仮定で許される一般の磁場分布に対して、磁気力による星の変形を無視して、非軸対称の固有振動を求めるための基礎方程式の導出を行った。磁気力による星の変形の効果は、一般には無視できないが、磁気力に特徴的な固有振動及び安定性にモードを限定すれば、星の変形の効果は高次の効果として無視することが可能である。従来磁場なし星の場合の定式化を直接的に拡張した場合に、対称軸上で固有関数が特異になるという問題があったが、これを圧力の摂動を従属変数から外す定式化を行うことで、この問題を解決することができた。この定式化をトロイダル磁場だけを持つ星の場合に適用し、固有振動モードの数値解析を行った。この場合に、磁場に固有の振動モードを世界で初めて求めることに成功した。この磁場星は不安定であることが知られているが、不安定なモードと振動モードの両方を求めることが出来た。いずれの場合も星の典型的なアルペン時間で成長または振動することから磁気力に固有のモードと考えられる。これらの成果は、現在、論文としてまとめている途中で、完成後は査読付き学術誌へ投稿予定である。ポロイダル磁場だけを持ち、ゆっくり回転している星の固有振動解析を二つの独立した方法で行った。一つは磁場なし星の固有振動解のまわりでアルペン振動数の二乗で摂動展開し、磁場の振動数への影響を評価する方法で、特に星の自転によるコリオリ力を復元力とする振動モードの補正を実際に評価するための定式化及びポリティロープの場合に実際の数値を求めた。もう一つは磁気力を含む線形化した流体方程式、線形化した誘導方程式、理想磁気流体条件を直接数値的に解く方法である。この方法では磁気力による振動モードも含む全ての振動モードを原理的に求めることが可能だが、実際の計算では磁気力による振動モードを求めることはできなかった。前述の方法で求めた振動数とこの方法で求めた振動数はよく一致することは確認

できたが、なぜ磁気力によるモードが求められないのかは分かっていない。この原因を説明するは今後の課題である。また、今後は、トロイダル磁場とポロイダル磁場の両方を含む場合に拡張を行うことを考えている。

(2)磁場星の平衡形状に関しては、一般相対論の枠内で、安定成層を考慮した磁場星モデルを構成するための定式化及び実際の数値モデルの計算とニュートン力学の枠内で子午面内の流れの効果を見るために磁場を含んだトーラスの平衡解の計算を行った。これは、中性子星として考えられてきたこれまでの多くのモデルは非成層を仮定して計算が行われていたが、実際中性子星では組成勾配による安定成層が存在することが知られている。安定成層の効果は磁場がない場合は、それほど重要ではないが、磁場が存在する場合は、磁気形状によっては、磁場による磁気浮力不安定性が存在する可能性があり、この場合の不安定性を強く安定化する安定成層の存在は、安定性を考える上で非常に重要である。そのため安定成層を考慮した磁場星モデルを求めるための定式化を行った。安定成層中性子星モデルの例として、トロイダル磁場とポロイダル磁場の両方を持つ星外部には磁場がないモデルの実際の数値解を求めた。このモデルでは星の表面付近で強い磁気浮力不安定性が存在するが、安定成層によって十分に安定化可能であることがオーダー評価によって確かめられた。これは、子午面流の効果をはっきり見るために星形状ではなくトーラス形状の自己重力を含む磁気流体平衡状態を数値的に構成し、その性質を調べた。その結果、子午面流によって動圧が生じ、トーラスの太さが大きくなることが確かめられた。磁場星の平衡形状については、一般相対論での扱いが現状では不十分であるので、今後、一般相対論の枠内でいろいろな磁場形状を持つ解を求める方法を開発することを考えている。また、現状では星の外部は、多くの場合、真空が仮定されているが、真空の仮定は、現実中性子星を考えると非常に非現実的である。実際中性子星では外部はプラズマで満ちていて、電流が流れ、磁気圏を構成していると考えられている。したがって星外部の磁気圏を考慮したモデルの構成が必要である。

(3)強重力場中の電磁場の性質に関しては、正則ブラックホールと呼ばれるホライズンは持つが特異点がないブラックホール代案モデルの解析を行った。これらのモデルでは、通常、正の宇宙項だけで作られたド・ジッター核を考え、これの負の圧力で特異点への重力崩壊を妨げるモデルがしばしば用いられる。このとき現実のブラックホールのように電荷がないと仮定するとド・ジッター核とブラックホール解を接続した場合の境界が空間的となることが知られている。一方、電荷を考慮すると、この境界が時間的となり、ド・ジッター核は通常の星のように振る舞う。

本研究では、強重力場中での電磁場に興味があるので、電荷を持ったモデルを考えた。電荷を持ったモデルで、ド・ジッター核とブラックホール解の境界に物質が存在するモデルは今まで考えられていなかったもので、このモデルを世界で初めて求めた。特に、球対称の場合に、平衡解を求め、動径安定性の解析、軸対称定常な場合の平衡解の解析を行った。は、帯電した無限に薄いダスト球殻の運動を仮定し、その運動方程式を解析することで、静的な球対称解及び動径摂動に関する安定性を同時に知ることが出来る。本研究課題で求めた解はすべて安定であることが分かった。で求めた球対称静的解に軸対称定常な摂動を加えることで軸対称定常な回転している正則ブラックホール解を求めた。回転がない場合の帯電球が回転することで、ブラックホール内部にも磁場が現れ、ブラックホール外部時空にも磁場が現れる。球殻内部は軸対称定常な摂動を受けたド・ジッター核で、球殻外部は回転が遅いことを仮定したカー・ニューマン解で、これらが等方圧力を持った無限に薄い帯電流体を用いて接続できることが分かった。

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 5件)

Hidetaka Asai, Umin Lee, & Shijun Yoshida, Non-radial oscillations of the magnetized rotating stars with purely toroidal magnetic fields, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 449, 3620-3634 (2015), DOI: 10.1093/mnras/stv538

Nami Uchikata & Shijun Yoshida, Slowly rotating regular black holes with a charged thin shell, Physical Review D, 査読有, Volume 90, 064042 (2014), DOI: 10.1103/PhysRevD.90.064042

Kotaro Fujisawa, Rohta Takahashi, Shijun Yoshida, & Yoshiharu Eriguchi, Counter effects of meridional flows and magnetic fields in stationary axisymmetric self-gravitating barotropes under the ideal MHD approximation: Clear examples --- toroidal configurations, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 431, 1453-1469 (2013), DOI: 10.1093/mnras/stt275

Nami Uchikata, Shijun Yoshida, & Toshifumi Futamase, New solutions of charged regular black holes and their stability, Physical Review D, 査読有, Volume 86, 084025 (2012), DOI:

10.1103/PhysRevD.86.084025

Shijun Yoshida, Kenta Kiuchi, & Masaru Shibata, Stably stratified magnetized stars in general relativity, Physical Review D, 査読有, Volume 86, 044012 (2012), DOI:

10.1103/PhysRevD.86.044012

[学会発表](計 2件)

吉田 至順、星の慣性振動モードに対するトロイダル磁場の影響、日本天文学会春季年会、2015年3月20日、大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)内湯 那美、回転の遅い正則なブラックホール解、日本物理学会、2014年3月29日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

[図書](計 件)

[産業財産権]

出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

[その他] ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 至順(Yoshida, Shijun)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 30386635

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: