

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740201

研究課題名(和文) 相対論的回転星の静的な不安定性とその非線形動力学の性質の探求

研究課題名(英文) Secular Instabilities in Rotating Relativistic Stars and Their Nonlinear Dynamical Natures

研究代表者

西條 統之 (Saijo, Motoyuki)

早稲田大学・教育・総合科学学術院・助教

研究者番号：40510988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：回転星の重力波放射によって引き起こされる非線形rモード不安定性を、重力波放射の輻射反作用力を含む流体動力学的手法、音波の伝播の時間スケールを殺した航空工学的近似的手法を用いて研究した。この不安定性の物理的特長を生かした数値計算手法の構築、非軸対称不安定性を追跡する数値シミュレーションコード開発の後、動力学的手法によってこの不安定性の特徴的な振動数および成長時間の再現に成功し、また航空工学的近似を用いて低回転星における非線形rモード不安定性の飽和振幅の推定に成功した。

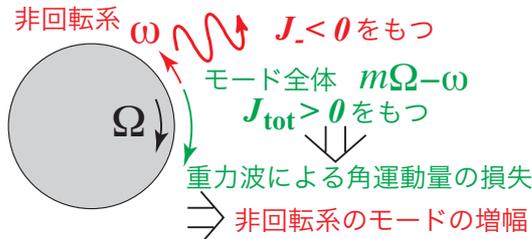
研究成果の概要(英文)：We have investigated nonlinear r-mode instabilities in uniformly rotating stars, triggered by gravitational radiation reaction force, restored by Coriolis force. First we have succeeded in developing our new computational code of three dimensional hydrodynamics in Newtonian gravity with mass-current multipole of radiation reaction force in rotating reference frame, imposing nonlinear anelastic approximation. In order to verify our developed code, we compare the characteristic frequency and growth timescale of r-mode instability with that from linear perturbation analysis, and have a good agreement. Next we have studied the saturation amplitude of r-mode instabilities in nonlinear anelastic approximation and compared the amplitude with that from three dimensional hydrodynamics. Remarkably we find quite a good agreement within 10 percent in the amplitude, which reinforces studying nonlinear regime of r-mode instabilities with nonlinear anelastic approximation.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：相対論的回転星 流体動力学 航空工学的な近似 重力波 重力波による輻射反作用力 rモード不安定性 静的な時間スケール 非線形動力学

## 1. 研究開始当初の背景

非回転系で星の回転の逆向きモードは、負の角運動量をもつ。しかし星が回転することにより、回転系における全体のモードは星の順回転方向の運動が可能で、全体のモードは重力波放出により正の角運動量を失う。この結果、非回転系で星の回転の逆向きモードは、重力波放出により増幅される r モード不安定性が発生する。重力波は透過性が非常



に高いため、中性子星の内核を「みる」唯一の手段として期待され、重力波の直接検出によりで中性子星の物理が解明される機運にある。実際、地上型重力波検出器(LIGO)のS5データより、この不安定性の重力波振幅の上限値が発表されている。その不安定性は中性子星内部の様々な散逸の効果の賜物として発生するため、中性子内部の構造を考慮した研究、不安定性の発生領域に着目した研究、系の重力波の効果を超えて取り入れたモード間相互作用およびその動学的描像の研究、など多種多様な研究がある。しかし、静的な時間スケールの時間進化が取り扱えてかつ r モードの非線形効果を考慮した研究は、ニュートン重力場中で慣性モードの3波相互作用を一部取り入れた空間1次元の数値計算のみである。

私は相対論的重力場中の流体動力学の数値シミュレーションにより、相対論的回転星に現れる動的な不安定性の性質を主に動学的な手法を用いて研究してきた。この利点を生かして、動学的な手法を用いて静的な時間スケールが取り扱える手法、および動的な時間スケールを対象とした手法の両方を用いて r モード不安定性の性質の探求を行う。新たな手法の導入で非線形動力学の視点で r モード不安定性の理解が可能になり、統合的な理解が可能になる。

## 2. 研究の目的

中性子星はガンマ線バースト、超新星爆発、巨大な磁気フレア、パルサーのスピンドアウンなど様々な形でその極限状態の物理描像を我々に提供している。これらのエネルギー解放現象に普遍的に存在し、かつ確固たる役割を担う機構の1つとして、回転する中性子星の重力波放出に伴う不安定性(rモード不安定性)がある。系の散逸に付随したこの不安定性は、中性子星の誕生過程、およびその内部構

造を理解可能にし、この不安定性からの重力波検出も進行中である。本研究では、相対論的回転星の r モード不安定性の非線形動力学の性質の探求を目的とし、中性子星の誕生過程や内部構造の理解を目指す。

具体的には、以下の3項目の解明を目的とする。

- (1) 相対論的回転星の静的な不安定性の動力学
- (2) rモード不安定性の非線形動力学の性質の解明
- (3) 粘性を含む系における r モード不安定性の非線形動力学の性質の解明

## 3. 研究の方法

- (1) 相対論的回転星の静的な不安定性の動力学

本研究では重力波放射や粘性など系の散逸に付随する変化の時間スケールを主たる研究対象にしている。動力学的手法でかつ現実的な計算時間でその非線形効果に着目するため、特殊な数値計算手法が必要になる。すなわち、対象とする時間スケールより極端に短い時間スケール(本研究では特に星の回転周期や音波の伝播の時間スケール)の変化を無視して数値計算を行う近似手法を具体的に確立する必要がある。

rモード不安定性の非線形動力学の性質の解明に向けて、まず静的な時間スケールが取り扱える相対論的非線形動力学のスキームおよび数値計算コードの構築を、航空工学的近似、低マッハ数近似等を用いて行う。

- (2) rモード不安定性の非線形動力学の性質の解明

相対論的回転星の静的な不安定性の1つである、重力放射によって引き起こされ、かつコリオリ力を復元力とする r モード不安定性を研究すべく、ニュートン重力場中の流体動力学に重力波放射による輻射反作用力を取り入れた形式の3次元流体動力学の数値解析コードを新たに開発する。

rモード不安定性が発生する相対論的回転星に固有モード関数による摂動を与え、静的な時間スケールにおける r モード不安定性の飽和振幅を 3+1 形式の数値シミュレーションで特定する。飽和振幅を用いて r モード不安定性の多様な動力学の性質、非線形モード間相互作用、カスケード、パラメータ共鳴の可能性、飽和振幅の持続性などに関する議論を、静的および動的な時間スケール両方の数値シミュレーションを行うことにより、展開

する。

### (3) 粘性を含む系における r モード不安定性の非線形動力学的安全性の解明

最後に粘性や現実的な状態方程式を用いて、非線形 r モードの動力学的安全性、特に不安定性の発生領域に関する議論を行う。静的および動的な時間スケール両方の数値シミュレーションを行い、それぞれの効果の比較および議論より統合的な理解を図る。

## 4. 研究成果

### (1) 相対論的回転星の静的な不安定性の動力学

本研究では短い時間スケールの変動を無視する航空工学的近似、低マッハ数近似を採用した。陽解法の時間進化で系の音波の自由度を殺すために、星の回転座標系上で非線形項を含む航空工学的な近似を提唱し、これを課した。これは系の単位密度あたりのエンタルピー方程式のソース項を無視することに対応し、エンタルピーの時間進化を解く代わりに圧力方程式を各時間ステップで解いている。今回の近似を施した方程式系は、非圧縮性流体におけるその計算手法(SMAC 法)を拡張した形になっていたため、計算手法を新たに提唱し、はじめて回転星の音波の時間スケールを越えた動力学に適用することに成功した。またこの手法は相対論的重力に自然に拡張可能であるため、本研究課題遂行において非常に有用である。

本研究で提唱した近似手法が相対論的回転星の動力学で音波を越えた時間スケールで適用可能であることを示すために、まずニュートン重力場中でポスト・ニュートン最低次である 2.5PN の重力波放射の反作用を取り入れ、かつ非線形項も含む航空工学的な近似を施した対称性を課さない 3次元流体動力学の数値計算コードを開発した。またその数値計算コードの検証として、回転星の平衡解に最も支配的な不安定 r モードの摂動を加えて系の時間進化を追跡し、不安定性の典型的な振動数がほぼ最も不安定な r モードのものと一致することを確認した。

### (2) r モード不安定性の非線形動力学的安全性の解明

r モード不安定性を研究すべく、ニュートン重力場中の流体動力学に重力波放射による輻射反作用力の最低次である 2.5PN の質量四重極モーメントを取り入れた形式の 3次元流体動力学の数値解析コードを新たに開発した。航空工学的な近似を各時間ステップで拘束条件として課すために、運動方程式の時間進化の数値スキームを新たに開発し、ま

た境界条件付きの圧力ポアソン方程式を数値的に高速に解く手法も新たに開発した。

次に r モード不安定性が本質的に効く重力波放射による輻射反作用力の 3.5PN の流速四重極モーメントを取り入れたモデルで数値的に研究し、2.5PN の質量四重極モーメントの結果と定性的に一致する示唆を得た。これは高速回転星の r モード不安定性の最終状態には、系の不安定性によって励起されるモード間相互作用の非線形性が本質的に重要であることを意味している。

r モード不安定性の非線形動力学的安全性を探求するために、また星の回転周期のスケールが運動方程式の時間進化の変化に陽に現れないために、重力波放射による輻射反作用力を取り入れた空間 3次元の回転座標系における流体動力学の数値シミュレーションコードの開発をはじめて行った。その結果、輻射反作用力に動力学が実行可能な程度の増幅ファクターを加えた場合には低速回転、高速回転する星両方ともその不安定性の飽和振幅は  $o(1)$  程度まで増幅可能である結果を得た。またこの不安定性は動力学的手法ではその不安定性を持続せず、動力学的時間内に破壊し、星の最終状態は差動回転する示唆を得た。これは当該分野における慣性系で行われた数値シミュレーションの研究結果を支持するものであり、同時に新たに独自に開発した数値計算コードの検証に成功した意味合いをも持つ。

音波の伝播の自由度を殺す近似手法を非線形 r モード不安定性で検証するため、航空工学的な近似を施した重力波放射による輻射反作用力を取り入れた空間 3次元の流体動力学の数値シミュレーションを回転座標系で行う計算コードの開発を行い、近似を施さない数値計算結果との比較を行った。回転星の平衡解に最も支配的な不安定 r モードの摂動を加えて系の時間進化を数値的に解析し、不安定性が発生する線形領域では固有振動数、不安定性の成長時間両者ともにその再現に成功した。

r モード不安定性の非線形動力学的安全性の解明にむけて、流束四重極モーメントによって構成される重力波放射の輻射反作用力を加えたニュートン重力場中の流体動力学のシミュレーションを回転座標系で実施した。また航空工学的近似の有無により、r モード不安定性の成長時間の違いが飽和振幅に到達する直前に徐々に顕著になる傾向を得た。また、飽和振幅も近似の有無により低速回転星の場合 10%程度異なった。一般に時間スケールの異なる物理現象をスケール化して計算する場合には計算制度が犠牲になることが良くあるため、定量的な 10%程度の違いで動力学的時間スケールを超えた動力学の定性的な振る舞いを議論することが可能であ

れば、非線形 r モード不安定性におけるその数値計算手法を確立したと主張することができる。

ようやく自身が信頼できる数値計算コードの開発、検証に成功したので、当初の研究計画に沿った研究成果を出すべく、引き続き当該研究課題の計画に沿った研究を遂行したい。

## 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 3 件)

- ① Motoyuki Saijo, Nonlinear R-mode Instability in Rotating Stars: Hydrodynamical Treatment, Proceedings of the Twentythird Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Non-refereed, 419 – 426 (2013).
- ② Motoyuki Saijo, Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars, Proceedings of the RESCEU Symposium on General Relativity and Gravitation, Non-refereed, 111409 (2012).
- ③ Motoyuki Saijo, Dynamical Approaches for Secular Instabilities in Rotating Stars, Proceedings of the Twentyfirst Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Non-refereed, edited by Y. Ito, 104 – 107 (2012).

[学会発表] (計 11 件)

- ① Motoyuki Saijo, Nonlinear R-mode Instability in Uniformly Rotating Stars, Talk given at Encuentros Reativistas Españoles 2014, 1 – 5 September 2014, Fundacion Universidad-Empresa of the Universitat de Valencia, Valencia, Spain.
- ② 西條 統之, 回転星の r モード不安定性の非線形効果: 航空工学的近似の有用性, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日–30 日, 東海大学, 神奈川県.
- ③ Motoyuki Saijo, Nonlinear R-mode Instability in Rotating Stars: Hydrodynamical Treatment, Talk given at the 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 5 – 8 November 2013, Hiroasaki University, Aomori, Japan.
- ④ Motoyuki Saijo, Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars: Current quadrupole effect, Talk given at the 1st Annual Symposium on New Developments in Astrophysics Through Multi-Messenger

Observations of Gravitational Wave Sources, Osaka City University, Osaka, 1 – 2 March 2013.

- ⑤ Motoyuki Saijo, Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars, Talk given at the 26th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, 15 – 20 December 2012, Hotel Bourbon Convention Ibirapuera, Sao paulo, Brazil.
- ⑥ Motoyuki Saijo, Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars, Talk given at the RESCEU Symposium on General Relativity and Gravitation, 12 – 16 November 2012, The University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- ⑦ Motoyuki Saijo, Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars, Talk given at the Fifth East Asian Numerical Astrophysics Meeting, 29 October – 2 November 2012, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan,
- ⑧ 西條 統之, 回転星の r モード不安定性の非線形効果: ニュートン重力における航空工学的近似を用いた場合, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 11 日–14 日, 京都産業大学, 京都府.
- ⑨ Motoyuki Saijo, Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars, Talk given at the Thirteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, 1 – 7 July 2012, AlbaNova University Center, Stockholm, Sweden.
- ⑩ Motoyuki Saijo, Dynamical Approaches for Secular Instabilities in Rotating Stars, Talk given at the Twentyfirst Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 26 – 29 September 2011, Tohoku University, Sendai, Japan.
- ⑪ 西條 統之, 静的な時間スケールにおける動力学: 自転する星の場合, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 16 日–19 日, 弘前大学, 青森県.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西條 統之 (SAIJO, Motoyuki)  
早稲田大学・教育・総合科学学術院・助教  
研究者番号: 40510988