

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400276

研究課題名(和文)大域的磁場の性質から探る中性子星の構造と進化

研究課題名(英文)Structure and evolution of neutron stars from viewpoint of their global magnetic fields

研究代表者

小島 康史(Kojima, Yasufumi)

広島大学・理学研究科・教授

研究者番号：10192577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：マグネターの表面の運動が磁気圏にひずみを与え、閾値を超えた時点で突発的現象が起きると考えられるので、静的な磁気圏として可能な解を系統的に調べた。一般相対論的效果により蓄えられるエネルギーは大幅に増加する。それは星の表面近傍にできる、非線形効果で絡み合った磁気構造が重要で、そのような状態はフレア開始前のものと考えられる。

また、二成分プラズマの微視的モデルにより定常なブラックホール磁気圏構造を探った。外向きの電磁的エネルギーの流れを生じる機構を示せたが、その量はプラズマ数密度が増加すると、減少することもわかった。

研究成果の概要(英文)：It is thought that slow motion at the magnetar surface on a secular timescale twists its exterior magnetosphere, and a burst occurs when the state exceeds a threshold. A family of static solutions for the magnetosphere is studied. It is found that general relativistic effect importantly enhances the maximum magnetic energy stored in the magnetosphere. Formation of a magnetic flux rope plays a key role there.

Black hole magnetosphere is also studied in term of two-fluid plasma model. The mechanism of out-going energy flux is demonstrated, but the amount decreases with plasma density.

研究分野：宇宙物理

キーワード：宇宙物理 中性子星 磁気圏 相対論

## 1. 研究開始当初の背景

中性子星(パルサー)の発見から半世紀が過ぎたが、依然新たな謎に包まれている。通常の電波パルサーよりはるかに強い磁場を持つ中性子星(マグネター)で起きるフレアやバーストなどの天体現象やその形成や進化に関して中性子星全体を概観した際にその位置づけがある。比較的弱い磁気双極子しかないマグネターの存在や自転速度の突然の減少(逆グリッジ)が観測され、それらの統一理解に至るまでにはまだほど遠い状態であった。マグネターは硬X線側での放射が強く、X線衛星(ひとみ衛星 2016年不具合で約1か月で運用停止)の性能を活かし、観測情報が大幅に増えることも期待されていた。これらの状況を受けて、4年前の研究開始当初は磁場という側面から中性子星の構造と進化を理論的に研究する必要性を感じた。特に、マグネターの活動性と永年進化を理解するために、内部磁場と磁気圏モデルを結合した理論研究が鍵になると考えた。永年の磁気散逸やフレアでの動的な振動現象を数値実験することにより、この天体の特異な現象を解明できると展望した。

## 2. 研究の目的

中性子星の一部の種族は極めて磁場が強く、突発的変動現象を起こす。その活動源は磁場であると認識されているものの、その具体的機構は不明である。通常のパルサーでは起こらず、強い磁場がある場合のみ影響がある、星内部(クラスト部分)のホールドリフト電流の効果が重要と考えられる。この効果は磁場強度の2乗に比例しており、マグネターのような強磁場天体でのみ重要となる。この効果が内部及び外部の磁場構造にどのように影響があるかを検討する。永年の進化でひずみが生じ、限界を超えた時に動的な構造変化を起こすと考えられる。

そこで、マグネター磁場構造、特に相対論的天体周りの磁気圏構造とその進化、動的な変動現象の発現の条件と様相の理論的理解を進める。その結果、この特異な天体であるマグネターで起きる変動現象を解明する。同時にそれが内部の状態の依存性を調べることにより、高密度核物理への制限を得る可能性を検討する。

## 3. 研究の方法

以下のテーマごとに具体的に示す。

### (1) マグネター磁場構造の永年の進化

中性子星のクラスト(殻)ではイオンは固定され、磁場があると自由電子によるホール電流が重要になる。それが永年に磁場構造を変化させるとともに、様々なマグネターの突発的変動現象の源になると考えられる。ホールドリフトの効果を取り入れて、数千から数百万年の時間尺度で、星の内部と外部の磁気圏の進化を数値的に計算する。その準備段階として、マグネターにおける静的な磁気圏

として可能な数値解を系統的に調べる。また、バーストやフレア現象は平衡解の喪失と関連すると考えられるので、その特異状態が起こる条件を数値計算結果から明らかにする。

### (2) マグネターの動的振動

ある種のガンマ線バースト現象はマグネターの巨大フレアであることが知られている。バースト直後の高エネルギーのX線及びガンマ線の観測で、数十から百Hzの準周期的な振動成分(QPO)がみられ、中性子星の殻におけるシア運動の振動と考えられている。磁気張力がその振動に大きく影響していると考えられ、既にいくつかの理論研究がなされている。さらに詳しい解析を行い、殻の振動と外部磁気圏の変動を調べるとともに、巨大フレアの観測量からの星内部の物理量がいかに得られるかを検討する。

### (3) ブラックホール磁気圏構造の解明

銀河中心核から噴出するジェットへエネルギーを供給する機構として、ブラックホールの回転エネルギーを電磁気的に取り出す過程(Blandford-Znajek過程、略称BZ過程)が長年にわたり議論されてきた。これまでの多くの研究では理想MHD条件で議論されてきたが、ブラックホールから外向きにエネルギーが出るか否かはモデルの境界条件が決定する。磁力線に沿ってある種の量が一定であり、ブラックホールの地平面近傍の振る舞いは結果的に遠方での条件が関係する。理想MHD条件を課さずに、電荷が正と負の二成分の流体の運動を考慮する微視的モデルにより定常な電磁場構造を探る。

## 4. 研究成果

### (1) マグネター磁場構造の永年の進化

超強磁場をもつ中性子星であるマグネターでは永年の時間尺度で外部の磁気圏にひずみとエネルギーが徐々に蓄えられ、ある臨界状態に達した際、突然の巨大なフレアに繋がると考えられている。より小規模で頻繁に起きるバースト現象も同列に扱えるか否かの解明も待たれている。マグネターの磁気圏にどの程度の量のエネルギーがどのように貯蓄されるかを理論的に解明することは重要である。この問題は太陽フレアと関連して研究がなされてきたが、中性子星の外部では一般相対論で空間の曲がりが必要になり、非相対論の結果と同じかどうかも明らかでなかった。そこで、一般相対論に基づくForce-free磁気圏の数値的解を系統的に求めた。図1には数値計算で得られた磁力線が巻きつけられている(twist)状態を示している。興味深いことは一般相対論効果による空間の曲がりの効果により、磁気圏に蓄えられるエネルギーの最大値はほぼ一桁増加する(論文DOI:10.1093/mnras/stx584)。マグネターのフレアが起きる時はプラズマを外部に放出するために、一時的に開いた磁気圏構造となる必要がある。その開いた磁気圏に蓄えられるエネルギー状態は真空の双極子

磁場のものより、かなり高いため、フレア前の磁気圏にはそれ以上のエネルギーを貯めているはずである。それが可能な平衡状態を探った結果、星の表面近傍にできる、磁場のポロイダル成分とトロイダル成分が非線形効果で絡み合ったフラックスロープの形成が重要であることがわかった。それが形成されるなら磁気圏が開く以上のエネルギーを貯蔵しているということを経験的に示した(論文 DOI: 10.1093/mnras/sty176)。

図2はその様子を磁力線構造の変化を蓄えられるエネルギーの増加とともに示してある。一般相対論の効果はその構造を支えるように働いていることがわかった。また、表面の磁場構造は単純な双極子磁場でなく、他の多重極子の成分が重なった状態であると考えられる。その影響を調べるため、一つのモデルとして四重極子磁場を考慮した(論文 DOI: 10.1093/mnras/sty866)。空間的に限られた領域にのみ電流が流れる磁気圏なら、よりスケールの小さな現象が可能であることがわかった。

当初の一つの課題であった星の内部と外部の磁気圏を結びつけた進化の数値計算は2017年にヨーロッパのグループに先を越された。しかし、その結果は限定的であることがわかったとともに、バースト後の磁気配置の取り扱い(モデル不定性)を検討中である。

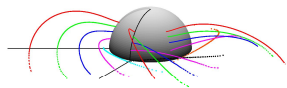


図1: ある Force-free 磁気圏の磁力線構造 (論文 DOI:10.1093/mnras/stx584 より)

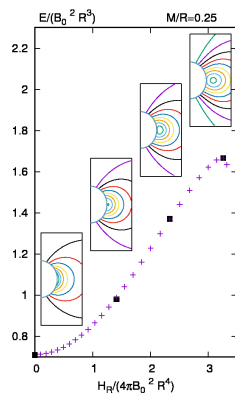


図2: 磁気圏のヘリシティの増加とともにそこに蓄えられるエネルギーが増加する。それとともに磁気圏構造(トポロジー)も変化する。(論文 DOI:10.1093/mnras/sty176 より)

## (2) マグネターの動的振動

マグネター内部で起きる振動を初期値からの時間発展の形式で調べるコードを開発した。軸対称を仮定し、空間2次元の偏微分方程式となる。巨大フレア時には振動現象が観測させているが、その振動数は100 Hz程度、観測されている時間はフレア後100秒で持続時間100秒程度である。数千~万回の振動を精度良く計算する必要があり、部分的には結果を得たが、整理がつかず研究は継続中である。

## (3) ブラックホール磁気圏構造の解明

電荷が正と負の二成分の流体の運動を考慮する微視的モデルにより定常な電磁場構造を探る。ブラックホールの回転エネルギーを電磁的に取り出す過程に関して理想MHD条件のもとでの研究があったが、新たな試みである。球対称で動径方向の磁場中では中性の流れになるが、ブラックホールの回転が影響を与える。ブラックホールの自転は小さいとし、方程式の角度部分は球関数で展開し、動径方向にはWK B近似を用いて関係するモードのみを取り出した。その結果、ブラックホールの自転の引きずり効果により回転方向の運動が生じ、正負の電荷の流体で反対方向にローレンツ力を受け、子午面内に電荷分離とその流れである電流を生じる(図3)。それからつくられる電場と磁場から外向きの電磁的エネルギーの流れを生じる。このことはことブラックホールの地平面で生じるものでないことを示した(論文 DOI:10.1093/mnras/stv2155)。しかしながら、その生じた電磁的エネルギーはプラズマ数密度が増加すると、減少することがわかった(Kojima, arXiv:1711.07628)。

また、BZ過程を研究する者も国内でも多数おり、その討論の場として研究会「不惑BZ77研究会」を主催した。集中して議論することで参加者全員の理解が深められた。

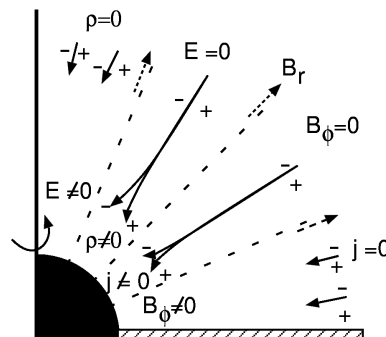


図3: 中心にあるブラックホールへ落下する正負の2種類のプラズマの運動とそれらから生じる電磁場の子午面内の模式図 (論文 DOI:10.1093/mnras/stv2155 より)

## 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 6 件)

### 1 小島康史 他

雑報「不惑 BZ77 研究会」観戦記

天文月報 2018 年 2 月号 146

査読無

### 2 Yasufumi Kojima

Twisted magnetosphere with quadrupolar fields in the exterior of a neutron star  
Mon. Not. R. astro. Soc., vol.477 no.3 (2018) 3530-3538

DOI:10.1093/mnras/sty866

査読有

### 3 Yasufumi Kojima and Satoki Okamoto

Axisymmetric force-free magnetosphere in the exterior of a neutron star - II.

Maximum storage and open field energies  
Mon. Not. R. astro. Soc., vol.475 no.4 (2018) 5290-5295

DOI:10.1093/mnras/sty176

査読有

### 4 Yasufumi Kojima

Magnetic energy stored in relativistic force-free magnetosphere

Yasufumi Kojima

J. Phys.: Conf. Ser.932 Issue 1, (2017) 012016 (4 pages)

DOI:10.1088/1742-6596/932/1/012016

査読有

### 5 Yasufumi Kojima

Axisymmetric force-free magnetosphere in the exterior of a neutron star

Mon. Not. R. astro. Soc., vol.468 no.2 (2017) 2011-2016

DOI: 10.1093/mnras/stx584

査読有

### 6 Yasufumi Kojima

Outgoing electromagnetic power induced from pair plasma falling into a rotating black hole

Mon. Not. Roy. Astron. Soc. vol.454, no.4 (2015) 3902-3911

DOI:10.1093/mnras/stv2155

査読有

[学会発表](計 7 件)

### 1 小島康史 岡本聖樹

日本天文学 2018 年春季年会 千葉大学

2018 年 3 月 17 日

マグネター磁気圏のエネルギー蓄積と開いた構造(フレア状態)への遷移

### 2 小島康史

日本天文学 2017 年秋季年会 北海道大学

2017 年 9 月 12 日

ブラックホールの自転と 2 成分プラズマ流による外向きの電磁エネルギー流の生成と消滅

### 3 小島康史

日本天文学 2017 年春季年会 九州大学

2017 年 3 月 18 日

マグネター磁気圏でのフレア前のエネルギー蓄積

### 4 小島康史

日本天文学 2016 年秋季年会 愛媛大学

2016 年 9 月 16 日

マグネターの巨大フレア時の重力波放出

### 5 小島康史

日本天文学 2016 年春季年会 首都大学東京

2016 年 3 月 15 日

微小回転のブラックホールから外向きの電磁エネルギー流の生成機構

### 6 小島康史

日本天文学 2015 年秋季年会 甲南大学

2015 年 9 月 11 日

ブラックホールの回転による外向きの電磁エネルギー流の生成

### 7 小島康史

日本天文学 2015 年春季年会 大阪大学

2015 年 3 月 21 日

ブラックホール磁気圏の回転駆動による電流と電荷の分布構造

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://theo.phys.sci.hiroshima-u.ac.jp/~astro/index.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

小島 康史 (KOJIMA, Yasufumi)

広島大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 10192577

### (2)研究分担者

無

### (3)連携研究者

無

### (4)研究協力者

岡本 聖樹 (OKAMOTO Satoki)

大学院生(当時)