

令和元年6月12日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17708

研究課題名(和文) 強磁場中性子星マグネターの内部磁場の起源とその進化の解明

研究課題名(英文) Elucidation of origin and evolution of a magnetar magnetic field

研究代表者

藤澤 幸太郎 (Fujisawa, Kotaro)

早稲田大学・理工学術院・日本学術振興会特別研究員

研究者番号：30732408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、強磁場中性子星マグネターの磁場を様々な物理過程を用いてモデル化することで、マグネター磁場の進化を議論し強磁場の起源に迫ることである。マグネターの強磁場の起源としては様々な物理モデルが考えられているが、本研究では古典的で最も広く受け入れられているマグネター内部の荷電粒子によって強磁場が生み出されていると考えて、そのコアでの両極性拡散を議論した。その結果、両極性拡散によるコア磁場の拡散にはクラストの磁場構造とコア・クラストの境界条件が重要であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、マグネターの磁場の起源とその進化を明らかにするために、コアにおける両極性拡散のタイムスケールを計算した。これまでの先行研究ではコア磁場のみを交流したものがほとんどであったが、コア・クラスト両方の磁場構造を考えてコア磁場の両極性拡散の働くタイムスケールを計算した。その結果、これまであまり考慮されていなかった、コア・クラスト磁場の境界条件が両極性拡散のタイムスケールに重要な影響を及ぼすことが分かった。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research was elucidating of origin and evolution of the magnetic fields of a magnetar by modeling various physical processes. Although previous works proposed many physical mechanisms as the origin of the strong magnetic fields of magnetars, we adopted a classical model among them in which magnetic fields come from charged particles. In that case, ambipolar diffusion in the core is the most efficient physical mechanism for the evolution of magnetic fields. We solved equations and evaluated the timescale of the ambipolar diffusion. We found that the timescale of the ambipolar diffusion in the core is affected by the structures of the crustal magnetic field. The boundary condition at the core-crust interface is important to consider the evolution of the magnetic fields.

研究分野：天体物理学、天文学

キーワード：マグネター 磁場進化 ホール効果 両極性拡散 中性子星 数値計算スキーム

1. 研究開始当初の背景

中性子星は星の表面で 10^{12}G 程度の強い磁場を伴っているが、この磁場が進化して減衰するか永続的であるかという問題は、中性子星が初めて観測された 1960 年代から現在に至るまで繰り返し議論されている。特に近年、マグネターと呼ばれる強磁場中性子星の存在が明らかになると、磁場進化の議論は新たな局面を迎えている。マグネターはその表面で 10^{13}G から 10^{15}G 程度の磁場を持っていて、磁気エネルギーを解放することで輝いている天体であると考えられている。実際にその磁場の減衰が観測より示唆されており、特に $\text{dB}/\text{dt} = -a B^{-1}$ という形で磁場が減衰するような現象論的なモデルを仮定すると、 $a = 1.75$ 程度の時に観測結果をよく説明できることが知られている(図 1)。新星残骸中のマグネターを観測した全く異なる別の解析でも $a = 1.75$ 程度の減衰を示唆しており、マグネターの磁場は年齢とともに減衰していると考えられることができる。

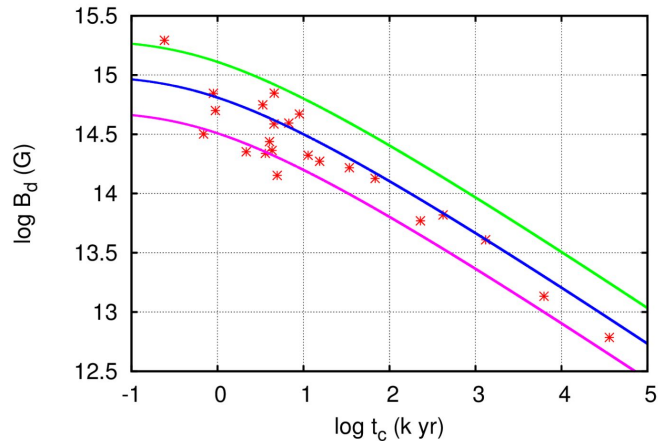


図 1 マグネターの特性年齢と双極子磁場。線は $a = 1.75$ の時、初期磁場の強さを変えた従来の現象論モデル。

この磁場の減衰を物理的に説明するためには、マグネターの磁場の起源を考えなければならない。マグネターは主に中性子で構成されているが、その内部には荷電粒子も存在していると考えられている。その内部構造は大まかには、半径約 10km のうち表面から約 1km 程度まではクラストであり、原子核が格子状に並び固体をなし、電子の海に浸っている。さらに内側の核密度を超える部分はコアとなり、大量の中性子の中にわずかに陽子や電子といった荷電粒子が存在している。マグネターの強磁場の起源は未だに明らかではなく、荷電粒子が磁場を担っているという古典的なモデル以外にも、強磁性体であるというモデルなどが提案されているが、磁性体というモデルは強磁場を作ることではできても、観測されている減衰を説明することはまだできていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、マグネターの磁場がコアの荷電粒子とクラストの電子によって担われているとし、その磁場構造の進化過程とそのタイムスケール計算し、マグネター磁場の進化を明らかにすることを目的とする。マグネターの磁場がクラストの電子、コアの荷電粒子によって担われているとすると、磁場の進化は主にコアの両極性拡散、クラストのホール効果、クラストのオーム散逸で記述される。電子だけが磁場を担っているクラストではホール項が、正負の荷電粒子があるコアでは両極性拡散項が重要になる。拡散係数が一定であるとすると、それぞれの項は磁場に依りて $O(B^{0+1})$ (オーム散逸)、 $O(B^{1+1})$ (ホール効果)、 $O(B^{2+1})$ (両極性拡散)というように a の値とタイムスケールが異なっている。磁場が強いマグネターでは、単なるオーム散逸よりはホール項や両極性拡散項が支配的になると考えられている。観測は $\sim B^{1.75+1}$ 程度の減衰を示唆しているため両極性拡散項が重要であると思われるが、コアの物理を考えなくてはならない両極性拡散の計算は難しく、これまでの先行研究はクラストでのホール効果を扱ったものばかりであり、 $a = 1.75$ 程度の減衰を説明できる先行研究はない。しかし磁場の発展方程式は非線形方程式であり初期条件や境界条件の影響を強く受ける。そこで本研究では、先行研究で考慮されてなかった境界条件を取り込んだ軸対称二次元計算を行い、両極性拡散項を含んだ磁場の進化タイムスケールの計算を行い、磁場の減衰が説明できるかを検証する。

3. 研究の方法

まずは先行研究で行われていた現象論的なモデルの再構築から研究を開始した。これまでの現

象論モデルはコア磁場・クラスト磁場を区別せず星全体の磁場のみを考慮していた。しかし実際にはコアでは両極性拡散が、クラストではホール効果が効くため磁場の進化メカニズムは異なっており、拡散のタイムスケールも異なっているため、それぞれを別々のものとして扱う必要がある。そこで、クラスト磁場とコア磁場をそれぞれ別々に考慮した新しい現象論モデルを作成した。

一方でこのような現象論モデルに対し、様々な境界条件の下でコア磁場やクラスト磁場を伴っているマグネターの磁場構造を多数計算し、磁場構造によって両極性拡散のタイムスケールがどのようになるかも調べた。

4. 研究成果

現象論的なモデルに関しては、コア磁場とクラスト磁場をそれぞれ別に考慮した新しい現象論的なモデルを構築することに成功した。その計算結果が図2と図3である。2つの極端なモデルとして、クラスト磁場が卓越しているモデル(左)とコア磁場が卓越しているモデル(右)の二つの計算を行った。図2より、コア磁場が卓越しているモデルの方がよりマグネターの観測結果を説明できることが分かった。

図3はそれぞれのモデルのクラスト磁場の強さとコア磁場の強さを示した図である。この図より、コア磁場が卓越しているモデルでは、初期に両極性拡散で磁場が急速に減少しやがてクラスト磁場の方が強くなり、最後はクラスト磁場でのホール効果によってゆるやかに進化していくということが明らかになった。

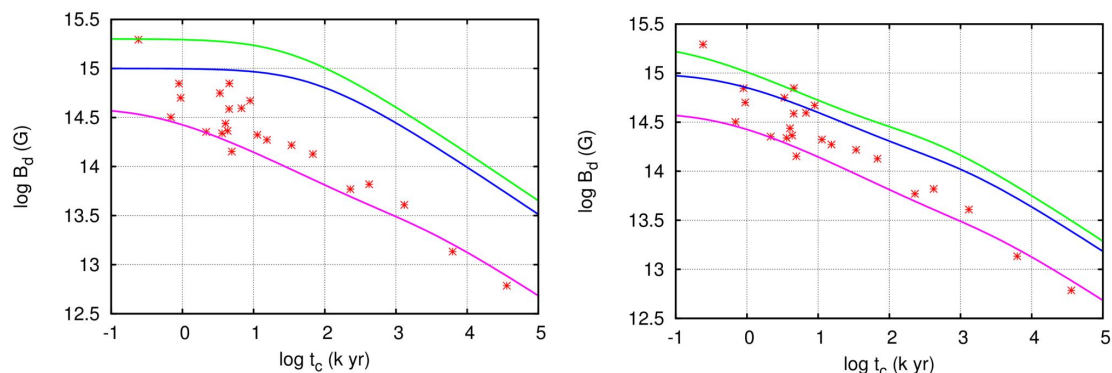


図2 新しい現象論モデルの解。それぞれクラスト磁場が卓越しているモデル(左)とコア磁場が卓越しているモデル(右)である。それぞれの線は合計の初期磁場の強さを変えたものである。

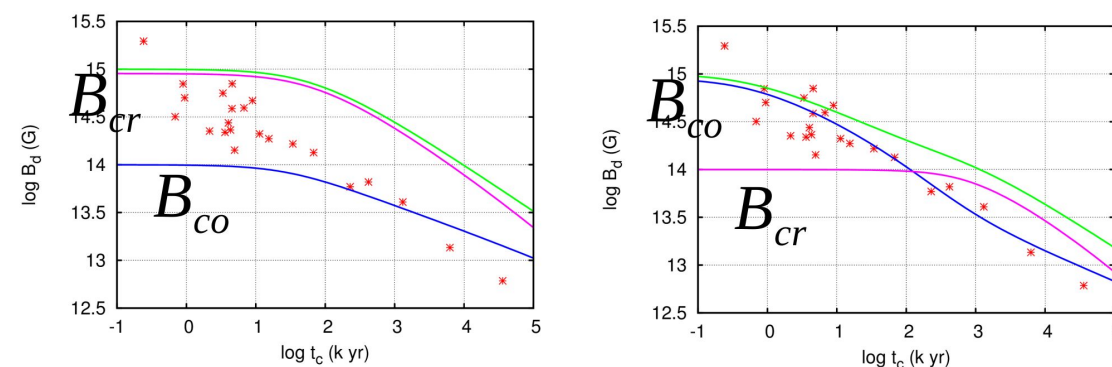


図3 図2のモデルのクラスト磁場の成分(マゼンタ)とコア磁場の成分(青)、合計の磁場の強さ(緑)を表した図。左はクラスト磁場が卓越しているモデル、右はコア磁場が卓越しているモデル。

次に、コア磁場・クラスト磁場の両方を持つ様々なマグネターの磁場構造を計算して、その時の両極性拡散のタイムスケールを計算した。図4は様々な種類のコア磁場・クラスト磁場、そしてコア磁場・クラスト磁場の境界条件を変えたマグネターの磁場構造のモデルである。図5はその時の両極性拡散速度の向きと大きさを計算した図である(Fujisawa et al. 2018)。

図4より、表面では同程度の似たような構造の磁場であっても、コア・クラストの境界条件によってコア磁場構造が異なっていることが分かる。特に右のモデルのように、コア・クラストの磁場がその境界で折れ曲がっている場合は、コアに強い磁場が保持されているような構造となる。そのような磁場構造の時には、同様に両極性拡散速度も大きくなる。図5より、左のモデルの両極性拡散速度に比べ、右のモデルの両極性拡散速度は10倍程度になっており、非常

に速い速度で拡散していくことが分かった。このようにコア磁場のみならずクラスト磁場までを考慮に入れると、コア・クラストでの磁場構造に対する境界条件が、両極性拡散速度に大きな影響を及ぼし、マグネターの磁場進化を説明しうるということが明らかになった。

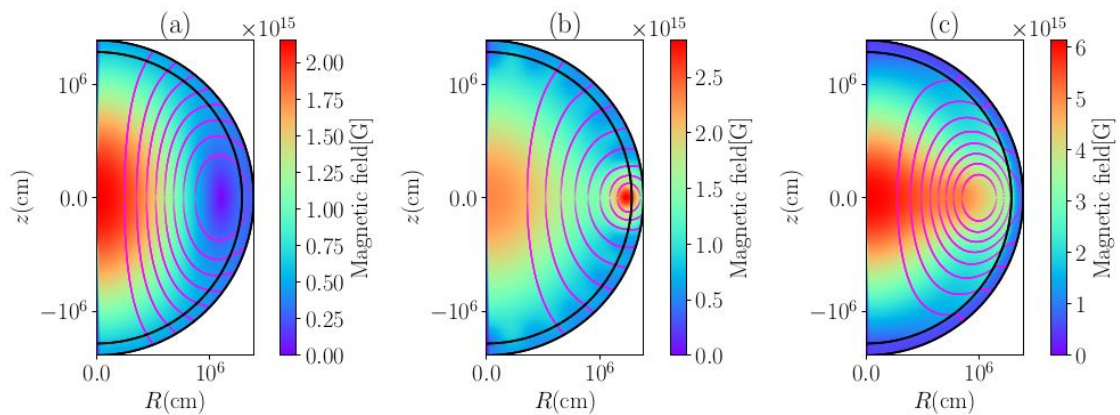


図 4 コア磁場とクラスト磁場を伴った様々なマグネター磁場構造のモデル。黒い曲線がクラストとコアの境界を示している。マゼンタの曲線は磁力線、色は磁場の強さを表している。どれも表面では同じ強さの磁場を持っているが、内部磁場構造や強さはそれぞれ異なっている。

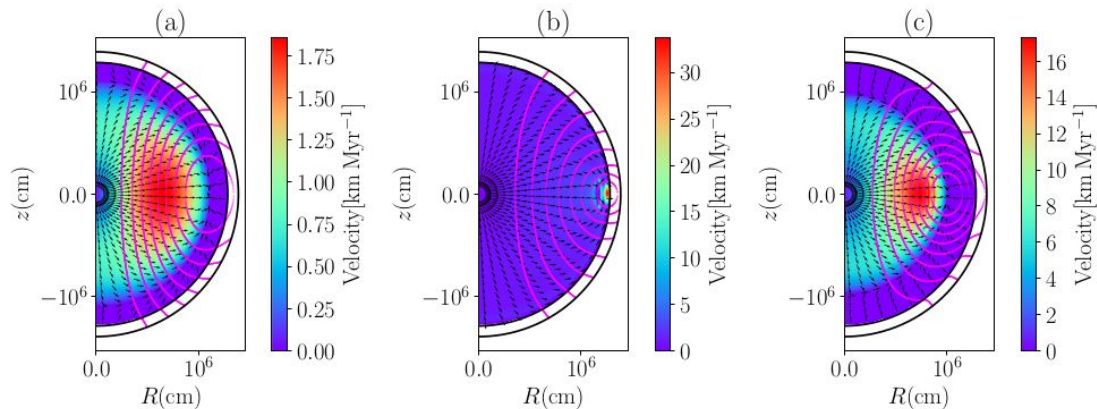


図 5 図 4 の磁場構造の時の、両極性拡散速度と向きの図。クラスト・コアでの磁場の違いによって、拡散速度が大きく変わる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. [K.Fujisawa](#), [H.Okawa](#), [Y.Yamamoto](#) & [S.Yamada](#)
 “Effects of rotation and magnetic field on the revival of a stalled shock in supernova explosions”
 2019, The Astrophysical Journal, 872, 155
2. [K.Fujisawa](#), [A.Yatabe](#) & [S.Kisaka](#)
 “Magnetic field configurations of magnetars”
 2018, IAU Symposium 337, 334
3. [N.Yasutake](#), [K.Fujisawa](#), [S.Yamada](#)
 “Rotational equilibria by Lagrangian variational principle: towards multidimensional stellar evolutions”
 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 463, 3705
4. [R.Hirai](#), [H.Nagakura](#), [H.Okawa](#), [K.Fujisawa](#)
 “Hyperbolic self-gravity solver for large scale hydrodynamical simulations”
 2016, Physical Review D, 93, 8, id.083006

〔学会発表〕(計 9 件)

1. 藤澤幸太郎
「マグネターの磁場進化」
2019, 中性子星の観測と理論 研究活性化ワークショップ
2. 藤澤幸太郎、大川博督、山本佑、平井遼介、安武伸俊、長倉洋樹、山田章一
「天体物理学における非線形連立方程式を数値的に計算する革新的な手法」
2018, 第 31 回理論懇シンポジウム
3. 藤澤幸太郎、大川博督、山本佑、山田章一
「重力崩壊型超新星爆発における定常計算のための非線形連立方程式を数値的に計算する革新的な手法」
2018, 日本天文学会秋季年会
4. 藤澤幸太郎, 矢田部彰宏, 木坂将大
「マグネターコアの磁場構造」
2017, 日本天文学会秋季年会
5. K. Fujisawa, A. Yatabe & S. Kisaka
“Magnetic field configurations of magnetars”
2017, IAU Symposium 337 Pulsar Astrophysics: The Next Fifty Years
6. 藤澤幸太郎, 矢田部彰宏, 木坂将大
“Evolution of magnetic field in magnetars”
2017, 第 7 回 DTA シンポジウム: ~ 中性子星の観測と理論 ~ 研究活性化ワークショップ 2017
7. 藤澤幸太郎
「コア磁場とクラスター磁場を考慮したマグネター磁場の減衰」
2016, 日本天文学会秋季年会
8. 藤澤幸太郎
「マグネター磁場の進化」
2016, 中性子星勉強会 ~ 中性子星の多様性に迫る ~
9. 藤澤幸太郎
“Magnetic field configurations of magnetized stars”
2016, 第 4 回 DTA シンポジウム「Compact stars and gravitational wave astronomy」

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。