

令和 6 年 5 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03624

研究課題名（和文）中性子星の内部に潜む磁場の観測的推定

研究課題名（英文）Observational Estimates of Magnetic Fields inside Neutron Stars

研究代表者

牧島 一夫 (Makishima, Kazuo)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・名誉教授

研究者番号：20126163

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000 円

研究成果の概要（和文）：我が国の科学衛星「あすか」および「すざく」などで取得された、マグネター天体の公開データの解析を続けた結果、7個のマグネターにおいて、自転パルスがその自転周期より4桁も長い周期で位相変調されていることを突き止めた。これは内部に潜む10の16乗ガウスのトロイダル磁場により、星がわずかに縦長に変形し、自由歳差運動が起きた結果と解釈される。7天体で推定されたトロイダル磁場の強度を、それらの双極子磁場の強度で割ったところ、その比が年齢とともに増加することを発見した。これは双極子磁場に比べ、トロイダル磁場がより長く保持されることを意味し、マグネターの未裔とおぼしき何種類かの中性子星の存在をよく説明できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の結果は、宇宙でおそらく最強の磁場を発見したことを意味する。10の16乗ガウスのトロイダル磁場の存在は、いくつかの傍証から示唆されてはいたものの、その観測的検証に挑んだ研究は、我々の知る限り皆無である。我々が得たパルス位相変調という手掛かりは、データの詳細解析と基礎物理学を通じて到達したものであり、何らかの理論予測に導かれたものではなく、外国の後追いでもない。用いたデータがおもに日本の科学衛星が取得したものであることも鑑みると、本研究の成果はは掛けなしに100パーセント「日本オリジナル」なものであると自負できる。

研究成果の概要（英文）：Using archival data from Japanese cosmic X-ray satellites, such as ASCA and Suzaku, we performed timing studies of magnetars (a special type of neutron stars). Then, in seven magnetars, the rotational pulses were found to suffer phase modulation, at a period that is 4 orders of magnitude longer than the pulse period. This can be explained as a manifestation of free precession, when the star is axially deformed due to extremely intense toroidal magnetic fields, reaching  $10^{16}$  Gauss, hidden inside it. When the estimated toroidal field strengths of the 7 object are divided by their dipole magnetic field strengths, the ratio was found to increase toward older objects. This means that the toroidal magnetic field, invisible from outside, lasts longer than the dipole field extending outside the stars. The result can naturally explain the presence of some classes of known neutron stars, which are regarded as aged magnetars.

研究分野：X線宇宙物理学

キーワード：中性子星 マグネター 宇宙X線 磁場進化 パルス位相変調 トロイダル磁場

## 1. 研究開始当初の背景

中性子星(NS)の多くは、 $B_d \sim 10^{12}$  G の強い双極子磁場をもつが、中でもマグネターと呼ばれる約 30 個の孤立 NS は  $B_d = 10^{14-15}$  G という超強磁場をもち、その磁気エネルギーを消費してX線を放射すると考えられる。我々は 2010 年代半ば、日本の「すざく」衛星などで得た宇宙X線データの解析により、2例のマグネターにおいて、NSの自転に伴う周期  $P$  (数秒程度) のパルスの位相が、それより4桁も長い周期  $T$  で進み遅れするという、PPM (位相変調; Pulse Phase Modulation) 現象を発見した。考察の結果、これら NS の内部には  $B_l \sim 10^{16}$  G ものトロイダル磁場が潜み、それが星を慣性能率の異方性にして  $\varepsilon \sim 10^{-4}$  ほど縦長に歪める結果、自由歳差運動が起き、自転周期と自由歳差周期の微小( $10^{-4}$ )なズレがビートして PPM を生んでいる可能性に到達した。 $P/T$  比が  $\varepsilon$  を与え、その  $\varepsilon$  は  $B_l^2$  に比例することから、外部から見えない星内部のトロイダル磁場の強度  $B_l$  を、観測から推定する独創的な方法が得られたことになる。さらに我々はもう1例のマグネターからも PPM の徴候を得ていた。このことから PPM 現象がマグネターに普遍的で、よってマグネターの多くが  $B_l \sim 10^{16}$  G のトロイダル磁場を内包することが示唆された。これらの成果はおもに基盤研究(C)「マグネター級の強磁場中性子星を含む連星系の探査」(18K03694; 当初計画では2018年度から4年間)を通じ得られたものである。

## 2. 研究の目的

上述の先行課題は大きな進展を見たため2020年度にて終了し、それを引き継いだ本研究課題では、以下の4項目を目的に掲げた。(ア)上述のマグネター3例目の PPM 現象を確定し、論文として出版公表すること。(イ)マグネター類似天体に関する知見を深めること。(ウ)より多くのマグネターから PPM 現象を検出して、それらの  $B_l$  の値を推定すること。(エ)以上の結果にもとづき、マグネターの磁場 ( $B_d$  と  $B_l$  の双方を含め) の進化の手掛かりを得ること。これらのうち、(ア)(イ)はミニマムサクセス、(ウ)まで到達すればフルサクセス、そして(エ)はエクストラサクセスと位置づけられる。

## 3. 研究の方法

先行課題 18K03694 と同様、「すざく」や *NuSTAR* (アメリカ)といった宇宙X線衛星の公開データを利用し、X線の時系列データに対し、我々が2010年頃から開発してきた新たなタイミング解析を施す。解析方法や、利用するソフトウェアは、開発済みであった。研究の途上、「すざく」の先代に当たる「あすか」衛星(1993-2001)のアーカイブも利用価値が高いことが判明し、有効に役立てられた。研究の遂行に当たり、JAXA ポスドクの内田和海博士には衛星データの整約で、京大の榎戸輝揚准教授には結果の解釈において、協力を仰いだ。

## 4. 研究成果

- (1) SGR 1900+14は代表的なマグネターで、先行課題では「すざく」と *NuSTAR* のデータから、 $P=5.23$ 秒のパルスが  $T=40.5$  ksの長周期で位相変調される PPM の徴候が得られていた。これを確定し、論文として出版できた[論文8]。自由歳差運動の3例目に当たる。
- (2) SGR 1806-20は(1)の天体と並び、最も活動的なマグネターの代表例である。1993年と1995年に「あすか」衛星のGIS(撮像型比例計数管)装置で取得されたX線データを解析した結果、 $P=7.47$ 秒のパルスが  $T=16.43$  ksで位相変調される現象を発見し、論文とし

て公表した[論文3]。これで自由歳差運動は4例目となり、またこの天体のPPMは、少なくとも60サイクルにわたり安定に継続することも判明した。ちなみにここで用いたGIS装置は、約30年前、研究代表者らが開発して「あすか」に搭載したX線検出器である。また1993年のデータは、ガンマ線バーストの粗い位置を頼りに、SGR 1806-20の精密な位置決め成功 (Murakami et al. 1994)した時の、記念すべきデータである。

- (3) 「すぎく」HXD(硬X線検出器)で取得された3例のマグネター、1E 1841-045 (2006年に観測), SGR 0501+4516 (同2008年), RXJ 1708-4009 (2009年と2010年に観測)の公開データを解析した結果、周期 $P=11.78$ 秒,  $5.76$ 秒,  $11.01$ 秒のパルスがそれぞれ $T=23.4$  ks,  $16.4$  ks,  $46.5$  ksで位相変調されていることを発見した。これにより、これまで解析した7例のマグネターすべてにおいて、NSが軸対称に歪むことで自由歳差運動が起き、PPM効果が誘発されていることが判明した。結果として、歪みの原因である $B_l \sim 10^{16}$  Gのトロイダル磁場が、マグネターに共通な性質であることが観測から明らかになった。結果は国際会議収録[論文1]に速報され、より詳しい投稿論文は準備中である。
- (4) 「あすか」GISのデータ(1999年)を用い、ガンマ線連星 LS 5039から $P \sim 9$ 秒のX線パルスを追認した[論文2]。これは「すぎく」とNuSTARのデータで示唆されたパルスの存在 (Yoneda et al. 2020)を決定づけ、この連星系がマグネターを含むという結論を強化するものである。(2)と併せ、「あすか」アーカイブの利用価値の高さが確かめられた。
- (5) (1)~(3)で確認された7天体につき、 $P/T$ 比から推定されるトロイダル磁場の強度 $B_l$ を双極子磁場の強度 $B_d$ で割ったところ、図1のように、老齢のマグネターほど $B_l/B_d$ の比が大きいことを発見した。これはマグネターの双極子磁場は速く減衰するが、トロイダル磁場はより長く保たれることを意味し、X線や電波で観測されつつある「マグネターに類似した老齢なNSの種族」の存在を自然に説明できる。結果は国際会議収録[論文1]にて速報され、より詳しい結果は(3)の結果とあわせ論文として準備中である。
- (6) 剛体の自由歳差運動の詳しい解説と、時系列データの周期解析のテクニックを、著書に取り込み出版することができた[図書1,2,3]。

以上のように本研究では、エクストラサクセスまで達成することができ、3年間で計8編の査読つき英文論文を出版することができた。うち4編は研究代表者による主著(または単著)論文である。さらに1編が投稿寸前の状態にある。これらの成果を得るにあたり、内田和海博士および榎戸輝揚准教授には多大な協力を得たので、謝意を表したい。

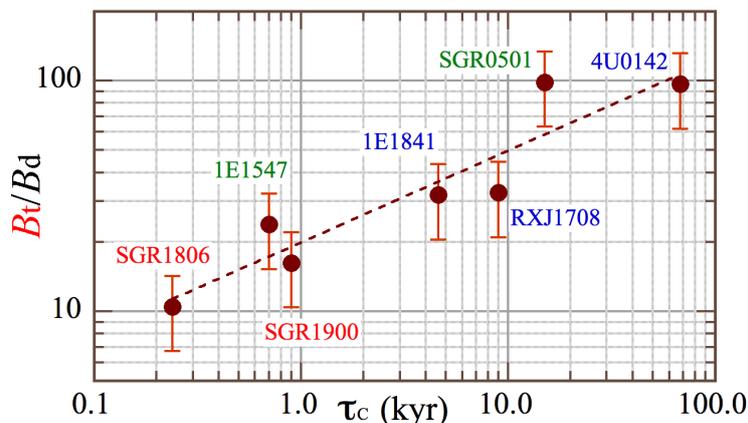


図1: 7個のマグネターにつき、自由歳差運動の観測から推定したトロイダル磁場の強度 $B_l$ を、外部から見える双極子磁場 $B_d$ で割り、その比を特性年齢に対しプロットした結果。年齢とともに比が増大することが見てとれる(論文投稿準備中)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 7件）

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Makishima, K.   | 4. 巻<br>136                |
| 2. 論文標題<br>Novel Clues to the Physics of Magnetars as Probed with Detailed Pulse-Timing Studies | 5. 発行年<br>2023年            |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the International Astronomical Union                                   | 6. 最初と最後の頁<br>267-270      |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1017/S1743921322000473  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-                  |
| 1. 著者名<br>Makishima, K., Uchida, N., Yoneda, H., Enoto, T., Takahashi, T.                       | 4. 巻<br>959                |
| 2. 論文標題<br>Further Evidence for the 9 s Pulsation in LS 5039 from NuSTAR and ASCA               | 5. 発行年<br>2023年            |
| 3. 雑誌名<br>Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>id.79, 16 pp |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.3847/1538-4357/ad0bdf   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-                  |
| 1. 著者名<br>Makishima, K., Uchida, N., Enoto, T.  | 4. 巻<br>76                 |
| 2. 論文標題<br>Discovery of the Free Precession in the Magnetar SGR 1806-20 with the ASCA GIS       | 5. 発行年<br>2024年            |
| 3. 雑誌名<br>Publications of the Astronomical Society of Japan                                     | 6. 最初と最後の頁<br>in press     |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-                  |
| 1. 著者名<br>Ghandi, P. and 11 co-authors (including Makishima, K.)                                | 4. 巻<br>6                  |
| 2. 論文標題<br>Frontiers in accretion physics at high X-ray spectral resolution                     | 5. 発行年<br>2022年            |
| 3. 雑誌名<br>Nature Astronomy  | 6. 最初と最後の頁<br>1364, 1375   |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1038/s41550-022-01857-y   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する               |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Yoneda, H., Khangulyan, D., Enoto, T., Makishima, K., Mine, K., Mizuno, T., and Takahashi, T.  | 4. 巻<br>917         |
| 2. 論文標題<br>Broadband High-energy Emission of the Gamma-Ray Binary System LS 5039: Spectral and Temporal Features Using NuSTAR and Fermi Observations | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>id.90 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ac0ae1   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>該当する        |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Uchida, N., Takahashi, H., Fukazawa, Y. and Makishima, K.                          | 4. 巻<br>73              |
| 2. 論文標題<br>A study of the accretion mechanisms of the high-mass X-ray binary IGR J00370+6122 | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>Publications of the Astronomical Society of Japan                                  | 6. 最初と最後の頁<br>1389-1404 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/pasj/psab083   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-               |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Iwakiri, W.B., Serino, M., Mihara, T., Gu, L., Yamaguchi, H., Shidatsu, M. and Makishima, K.           | 4. 巻<br>73              |
| 2. 論文標題<br>Discovery of a strong 6.6 keV emission feature from EXO 1745-248 after the superburst in 2011 October | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>Publications of the Astronomical Society of Japan  | 6. 最初と最後の頁<br>1405-1417 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/pasj/psab085   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-               |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Makishima, K., Tamba, T., Aizawa, Y., Odaka, H., Yoneda, H., Enoto, T., and Suzuki, H. | 4. 巻<br>923               |
| 2. 論文標題<br>Discovery of 40.5 ks Hard X-Ray Pulse-phase Modulations from SGR 1900+14              | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>id.63, 17pp |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ac28fd   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-                 |

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>牧島一夫, 内田和海, 榎戸輝揚                    |
| 2. 発表標題<br>ガンマ線連星LS 5039: 「あすか」データによる9 秒パルスの確認 |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2023年春季年会 (立教大学)              |
| 4. 発表年<br>2023年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Makishima, K., Uchida, N.  |
| 2. 発表標題<br>New Observational Results on Magnetars                                 |
| 3. 学会等名<br>2023 Asia-Pacific Regional IAU Meeting (Kohriyama, August 7-11) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>牧島一夫, 内田和海, 榎戸輝揚        |
| 2. 発表標題<br>マグネター内部磁場の強度とその進化の観測的推定 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2023年秋季年会 (東北大学)  |
| 4. 発表年<br>2023年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Makishima, K.   |
| 2. 発表標題<br>Evolution of Magnetic Fields of Magnetars (MGTS) Inferred from Observations |
| 3. 学会等名<br>中性子星の観測と理論-研究活性化ワークショップ 2023 (京都大学、9/7-9/8)                                 |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>牧島一夫                                |
| 2. 発表標題<br>ガンマ線連星 LS5039からの-9秒パルスの検出 (ポスター)    |
| 3. 学会等名<br>高エネルギー宇宙物理学研究会 (東京大学本郷、11/27-11/29) |
| 4. 発表年<br>2023年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>牧島一夫, 内田和海, 榎戸輝揚               |
| 2. 発表標題<br>マグネターの磁気変形とトロイダル磁場: 観測結果の中間まとめ |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2022年秋季年会 (新潟大学、ハイブリッド)  |
| 4. 発表年<br>2022年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>内田和海, 山崎典子, 牧島一夫              |
| 2. 発表標題<br>マグネターSGR 1806-20 の長期観測        |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2022年秋季年会 (新潟大学、ハイブリッド) |
| 4. 発表年<br>2022年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>牧島一夫, 内田和海, 榎戸輝揚, 丹波翼, 鈴木寛大  |
| 2. 発表標題<br>X線観測から迫るマグネターのトロイダル磁場の長期変化   |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2022年春季年会 (オンライン、3月1日) |
| 4. 発表年<br>2022年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>牧島一夫、内田和海                               |
| 2. 発表標題<br>観測から見て来たマグネター内部磁場の進化                    |
| 3. 学会等名<br>第21回高エネルギー宇宙物理連絡会研究会 (大阪大学+オンライン、3月11日) |
| 4. 発表年<br>2022年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>MAKISHIMA, Kazuo  |
| 2. 発表標題<br>Directly Estimating the Toroidal Magnetic Fields of Magnetars     |
| 3. 学会等名<br>European Astronomical Society Annual Meeting (オンライン、6月28日) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>牧島一夫                                       |
| 2. 発表標題<br>硬X線パルスの位相変調から探るマグネターの物理                    |
| 3. 学会等名<br>中性子星の観測と理論-研究活性化ワークショップ 2021 (オンライン、8月11日) |
| 4. 発表年<br>2021年                                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>牧島一夫、丹波 翼、會澤優輝、小高裕和、米田浩基、檀戸輝揚            |
| 2. 発表標題<br>マグネター SGR 1900+14の硬X線パルス位相変調：エネルギー依存性の発見 |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2021年秋季年会 (オンライン、9月15日)            |
| 4. 発表年<br>2021年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>MAKISHIMA, Kazuo   |
| 2. 発表標題<br>Evolution of Galaxies Driven by the Intra-Cluster Plasma           |
| 3. 学会等名<br>5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (オンライン、9月28日) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>MAKISHIMA, Kazuo  |
| 2. 発表標題<br>Magnetic Reconnection as a Key Phenomenon in Cluster of Galaxies ~ a Grand Scenario ~ |
| 3. 学会等名<br>Particle Acceleration in Solar Flares and Plasma Universe (オンラン、11月17日) (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>MAKISHIMA, Kazuo   |
| 2. 発表標題<br>Novel Clues to the Physics of Magnetars as Probed with Detailed Pulse-Timing Studies |
| 3. 学会等名<br>IAU Symposium 363: Neutron Stars Astrophysics at the Crossroads (オンライン、12月1日) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

〔図書〕 計3件

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名<br>牧島 一夫                  | 4. 発行年<br>2022年 |
| 2. 出版社<br>東京大学出版会                | 5. 総ページ数<br>389 |
| 3. 書名<br>目からウロコの物理学1：力学・電磁気学・熱力学 |                 |

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名<br>牧島 一夫                  | 4. 発行年<br>2024年 |
| 2. 出版社<br>東京大学出版会                | 5. 総ページ数<br>222 |
| 3. 書名<br>目からウロコの物理学2：フーリエ解析・量子力学 |                 |

|                          |                 |
|--------------------------|-----------------|
| 1. 著者名<br>牧島 一夫          | 4. 発行年<br>2024年 |
| 2. 出版社<br>東京大学出版会        | 5. 総ページ数<br>159 |
| 3. 書名<br>目からウロコの物理学3：相対論 |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|