

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03653

研究課題名(和文) マグネターの自由歳差運動の観測と内部磁場の推定

研究課題名(英文) Observations of free precession of magnetars and estimation of their internal magnetic fields

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) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々は2つのマグネターで硬X線パルスが、パルス周期の1万倍程度の長周期で位相変調を受けていることを発見した。これは内部の強いトロイダル磁場により、これら中性子星が僅か変形して自由歳差運動が起き、それと自転周期とのうなりが現れたと解釈された。本研究では米国NuSTAR衛星のデータを用い、これら2天体で現象が再確認されたが、変調振幅は「すざく」の値と大幅に変化していた。「すざく」で観測された別のマグネターからは、周期48ksで硬X線パルスの位相変調が検出された。MAXIを用いX線パルサーの光度とパルス周期変化率の相関を調べた結果、X Perseiはマグネター並の超強磁場を持つことが判明した。

研究成果の概要(英文)：Using the Suzaku observatory, we had discovered long-period phase-modulation effects in the hard X-ray pulses from two magnetars. This was interpreted as a result of free precession in neutron stars that are axially deformed by ultra-strong toroidal fields hidden in them. In the present study, we analyzed X-ray data of these two magnetars obtained with the US NuSTAR satellite, and successfully reconfirmed the pulse-phase modulation effects in both objects. However, the modulation amplitudes in these objects were considerably different from those measured with Suzaku. In another magnetar observed with Suzaku in 2010, a similar phase modulation phenomenon in the hard X-ray pulses was discovered at a period of 48 ksec. Using the X-ray data from the MAXI observatory, we studied relations between the X-ray intensities and pulse-period derivatives of various binary X-ray pulsars. Then, the object named X Persei was found to have magnetic fields which are comparable to those of 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 自由歳差運動 内部磁場 宇宙X線衛星

## 1. 研究開始当初の背景

中性子星(NS)の中でも特に謎が多いのは、 $B_d=10^{14-15}$  G という強力な双極子磁場をもち、磁気エネルギーで駆動される[3]と見られる約30個の孤立NS、「マグネター」である[2]。それらの内部には、より強いトロイダル磁場  $B_t$  が潜み、それが磁気エネルギーの大部分を担うと考えられる。よってマグネターの本質を知るには、 $B_t$  を観測から直接に推定することが決定的に重要である。しかし  $B_d$  がパルス周期とその変化率から算出できるのに比べ、外部から見えない  $B_t$  の観測は難しかった。

我々はX線衛星「すざく」により、2つのマグネター4U0142+61[7]および1E1547-54[5]において、硬X線成分のパルスが、自転周期の約1万倍の長周期で位相変調されている現象を発見した。これは星内部に  $B_t \sim 10^{16}$  G に達する超強トロイダル磁場が内在し、その磁気応力により星がわずかに軸対称に変形した結果、自由歳差運動が発生し、自転周期と歳差周期との微小 ( $\sim 10^{-4}$ ) な差が長周期のビートを生み、それがパルスの位相変調として観測されたと解釈できる[7]。

この解釈が正しければ、我々はマグネターのトロイダル磁場を観測的に推定する、貴重な手段を手に入れたことになる。

## 2. 研究の目的

1 で述べたマグネターの自由歳差運動の描像をより確乎たるものにし、もってマグネターのトロイダル磁場に関し世界で初めて詳しい知見を得ることが、本研究の目的である。具体的には以下の5つの目的を掲げる。

- (1) 上記の2天体で「自由歳差運動」と思っている効果が、「すざく」に特有な装置起因の偽物現象ではないことを立証する。
- (2) 上記の2天体以外のマグネターで硬X線パルスの位相変調効果を探査し、自由歳差現象の検出例数を増やす。
- (3) 硬X線パルスの位相変調現象を、定量的な数理モデルで表現し、データを説明できるか否かを検証する。
- (4) マグネターの起源に関する知見を深めるため、既知のNSの中で、マグネターに匹敵する強い  $B_d$  をもつ天体を探査する。
- (5) より進んだ高性能の観測装置を用いて、当該現象を観測的に研究する。

## 3. 研究の方法

2. の(1)～(5)に対応し以下の方法を採用。

- (1) 硬X線感度に優れた米国 *NuSTAR* 衛星の

データを用い、4U 0142+61 と 1E1547-54 の位相変調現象を追確認する。両天体ともすでに観測されている。

- (2) 「すざく」のアーカイブデータを利用し、他のマグネターで、硬X線パルスの位相変調効果を探査する。候補天体としてはX線強度が高く、かつ十分な観測時間が確保できたものとして、1RXS J1708-40, 1E 1841-045, SGR 0501+54などが挙げられる。
- (3) 従来の解析では、硬X線パルスの到着時間が正弦波的に前後すると仮定し、その時間遅れを補正した上でデータを畳み込み、パルスが最も有意となる条件を探査した。これを進め、NS表面上に放射領域を仮定し、その対称性を変えることで疑似データを作り、実データとの比較を行う。
- (4) 国際宇宙ステーションに搭載された全天X線監視装置 MAXI のデータを利用し、いくつかのX線連星パルサー(BXP)にて、スピン周期の変化率とX線光度との相関を調べ、双極子磁場の値を推定する。とくに長周期(>数百秒)のBXPが候補である。
- (5) 2016年に打ち上げ予定の *ASTRO-H* 衛星は高感度の硬X線イメージャー(HXI)装置を搭載するので、HXIを用いたマグネターの観測を計画・立案する。

## 4. 研究成果

### 4-1) *NuSTAR* データを用いた現象の追確認

#### 4-1-1) 4U 0142+61

*NuSTAR* は2014年4月にこのパルス周期8.69秒のマグネターを約3日にわたり観測しており、データはすでに公開されている。そのデータを解析した *Tendulkar et al.* (2015) は、「すざく」で発見された周期  $T=55 \pm 4$  ksec の硬X線パルスの位相変調 (*Makishima et al.* 2014) は、検出できないと報告した。しかし彼らの解析は、エネルギー帯の選び方や、変調パラメータの探査方法などが最適化されていなかった。

そこで我々は、同じデータで10-70 keVの範囲を選び、変調周期  $T$  を振って「復調解析」を行った。すると図1のように、「すざく」と同じ  $T=55$  ksec で、8.69秒のパルスの有意度を示す統計量  $Z^2$  が顕著に増加する ( $\Delta Z^2 \sim 11$ ) ことを突き止めた。「すざく」の検出と同じ周期で  $\Delta Z^2 \sim 11$  の増加が起きる偶然確率は  $< 10^{-6}$  であることも確認された。

こうして  $T=55$  ksec の硬X線パルス位相変調が *NuSTAR* でも検出された結果、それが「すざく」に固有な装置由来の偽物効果である危険は払拭された。また「すざく」でも *NuSTAR* でも、この効果は硬X線成分のみに見られ、

軟X線成分のパルスは、変調を示さなかった。これは変調現象が、連星運動にもとづくものではないことを明確に示している。

両衛星での顕著な違いとして、「すざく」では変調振幅が  $A=0.75$  sec (1パルスの約8%)だったのに対し、*NuSTAR*では  $A=0.15$  sec と1/5に減少していたことが判明した。すなわち  $T$ は不変だが、 $A$ は観測ごとに変化するようである。これはNSの歪みや自由歳差運動の首振り角は一定だが、硬X線の放射パターンが時間変化し、それがNSの対称軸まわりの軸対称性を強く破るほど  $A$ が大になるとして説明できる。以上のように本研究を通じ、4U 0142+61が自由歳差運動を行っているという描像は、大きく強化された。論文は現在ほぼ完成し、投稿直前である。

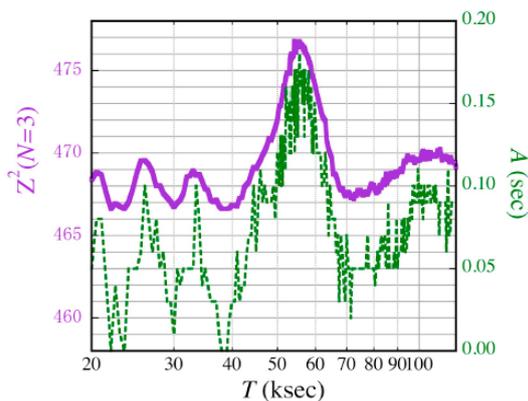


図1: *NuSTAR* データを解析して得られた 4U 0142+61 の 10-70 keV パルス復調解析の結果。横軸は仮定した変調周期、紫実線は復調を行って得られた最大の  $Z^2$  (縦軸は左)、緑破線は  $Z^2$  を最大化するときの変調振幅  $A$  (縦軸は右)。

#### (4-1-2) 1E1547-54

これはパルス周期 2.01 秒をもつ最速自転マグネターで、2009年1月にX線で大增光し、「すざく」で観測された。そのデータからは 10 keV 以上の硬X線帯域で、 $T=36.0 \pm 3.5$  ksec、 $A=0.52 \pm 0.14$  sec のパルス位相の変調が検出された[5]。

この天体は我々の観測提案に基づいて、*NuSTAR*で2016年4月、約1.5日にわたり観測された。すでに増光は終わり、X線強度は「すざく」の観測時に比べ1桁以上も下がっていたが、*NuSTAR*の高い感度のお蔭で、良質な信号データが得られた。

図2は、この8-20 keVデータに、パルス到着時刻の復調解析を施した結果で、図1と同じ書式である。こように、「すざく」で得られた  $T=36$  ksec を仮定して硬X線パルスを復調すると、パルスの有意度が顕著に増大することがわかる。よってこの天体でも、「す

ざく」の結果が追認された。変調の振幅は、「すざく」での値より有意に下がり、 $A \sim 0.15$  sec になっていた。2T付近にも副次的なピークが見られる。

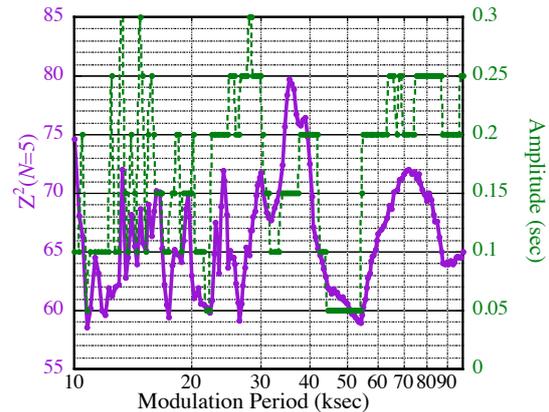


図2: *NuSTAR*で得られた 1E1547-54 の 8-20 keV データに対するパルス復調解析の結果。書式は図1と同じである。

#### (4-2) 新たな自由歳差運動の発見

「すざく」のアーカイブデータから、周期  $P=11.00$  sec のマグネター 1RXS J1708-40 と、周期  $P=11.79$  sec の 1E 1841-045 を選んで同様な解析を行った。1RXS J1708-40 は2009年と2010年の2回、約1.5日づつ観測された。

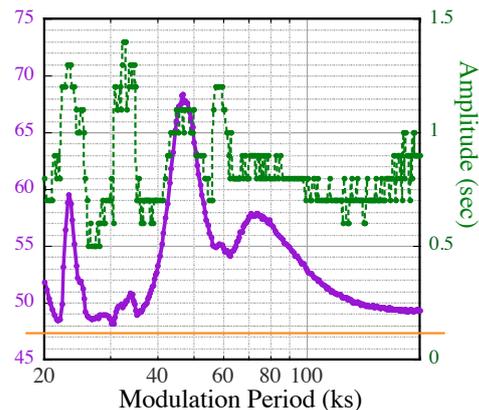


図3: 「すざく」HXDで2010年に得られた 1RXS J1708-40 の 13-47 keV データに対するパルス復調解析の結果。書式は図1や図2と同じ。

データ解析の結果、図3に示すように、2010年の 1RXS J1708-40 のデータでは、 $T=88$  ksec、 $A=1.2$  sec を仮定して 13-47 keV のパルスに到着時刻の復調を施すと、パルスの有意度が大きく改善することが発見された。これはこのマグネターが、 $P/T=2.2 \times 10^{-4}$  程度の非球対称な変形をもち、自由歳差運動を行っている結果と解釈される。ただし2009年のデータでは、復調解析を施す以前からパルスの有意度が  $Z^2 \sim 65$  と高く、パルス位相が

$T=48$  ksec で変調されている徴候は、確認できなかった。これは 2009 年には硬 X 線の放射パターンが高い軸対称性を持っていたのに対し、2010 年にはその対称性が破られたことを示唆する。1E 1841-045 のデータからは、自由歳差運動を示す結果は、得られていない。

#### (4-3). 位相変調の数理モデル化

これまでの解析では、単純な現象論として、硬 X 線パルスの到着時間が正弦波的に前後すると仮定し、その時間遅れを補正した上でデータを畳み込み、最もパルスが有意となる条件を探していた。より物理的な立場として、NS の磁軸が慣性主軸の 1 つだと仮定し、それが角運動量ベクトルと角度  $\alpha$  (首振り角) だけずれていると考え、さらに X 線放射が磁極と少しずれた場所から、ある特定の方向に強く放射されると仮定した。その下で、予想されるパルスの到着遅れを数理化し、その分だけ観測された個々の X 線光子の到着時間を修正しパルス探査を行った。その結果、2009 年に「すざく」で観測された 4U 0142+61 のデータは、物理的に妥当なパラメータ群で記述できることがわかった。

#### (4-4). MAXI を用いた超強磁場 NS の探査

「すざく」などを用いたマグネターの自由歳差運動の探査とは別のアプローチとして、国際宇宙ステーションに搭載された全天 X 線監視装置 MAXI を利用し、既知の X 線連星パルサー (BXP) の中に、マグネターに匹敵する超強磁場をもつ天体が潜んでいないか探査を行った。その手段として、磁場の強い NS ほど物質降着率 ( $\propto$  X 線光度) が変わったとき敏感にパルス周期が変わると期待される (Ghosh and Lamb 1978) ことを利用した。

まず手法を較正するため、4U 1626-67 という BXP を MAXI で長期 (~7 年) にわたり観測したデータを解析した結果、光度が高いときはこの BXP がスピニアップし、光度が低いとスピンドアウンすること、またその様子が Ghosh and Lamb (1978) の理論モデルで良く記述できることが判明した [6]。

次に、MAXI で同様に長期にわたり観測された 12 個の BXP で同様な研究を行った結果、Ghosh and Lamb モデルに含まれる系統的な不定性を評価することに成功した [1]。

以上の予備研究の下、MAXI で 7 年にわたり観測した、X Persei のデータを解析した。これは 835 秒の長いパルス周期をもつ BXP である。その結果、パルス周期の変化率は X 線強度と良い相関を示し、Ghosh & Lamb の理論モデルと比較したところ、モデルに内在する不定性を考慮しても X Persei の双極子磁場

は  $(3\sim 30) \times 10^{13}$  G と推定された。これは通常の BXP の値より 1 桁も高く、マグネターの磁場に匹敵する強さである。これはマグネターの起源を考える上で、重要な手掛かりとなると期待される。

#### (4-5). ASTRO-H 衛星

「すざく」の後継機 ASTRO-H 衛星は大規模な国際協力により開発され、2016 年 2 月 17 日、JAXA の種子島宇宙センターから、H2 ロケット 26 号機で打ち上げられた。衛星は所定の地球周回軌道に乗り「ひとみ」と命名された。しかし搭載された観測装置の立ち上げがほぼ完了した 3 月 26 日、姿勢制御系の予期せぬ誤動作により、「ひとみ」は高速回転状態に陥り、太陽電池バドルなどの破損をきたし、痛恨ながら機能を喪失してしまった。したがって「ひとみ」による研究の大幅な進展は、実施できなかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者と研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件、すべて査読有り)

[1] Sugizaki, M., Mihara, T., Nakajima, M., & Makishima, K.: “Correlation between the luminosity and spin-period changes during outbursts of 12 Be binary pulsars observed by the MAXI/GSC and the Fermi/GBM”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **69**, id 100, 21pp (2017), DOI: 10.1093/pasj/psx119

[2] Enoto, T., Shibata, S., Kitaguchi, T., Suwa, Y., Uchide, T., Nishioka, H., Kisaka, S., Nakano, T., Murakami, H., & Makishima, K.: “Magnetar Broadband X-Ray Spectra Correlated with Magnetic Fields: Suzaku Archive of SGRs and AXPs Combined with NuSTAR, Swift, and RXTE”, *Astrophys. J. Suppl.* **231**, id 8, 21 pp (2017), DOI: 10.3847/1538-4365/aa6f0a

[3] Nakano, T., Murakami, H., Furuta, Y., Enoto, T., Masuyama, M., Shigeyama, T. & Makishima, K.: “Study of the progenitor of the magnetar 1E 2259+586 through Suzaku observations of the associated supernova remnant CTB 109”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **69**, id 40, 15pp (2017), DOI: 10.1093/pasj/psx012

[4] Laplace, E., Mihara, T., Moritani, Y., Nakajima, M., Takagi, T., Makishima, K., & Santangelo, A.: “Possible regular phenomena in EXO 2030+375”, *Astron. Astrophys.* **597**, id A124, 9 pp (2017), DOI: 10.1051/0004-6361/201629373

[5] Makishima, K., Enoto, T., Murakami, H., Furuta, Y., Nakano, T., Sasano, M., & Nakazawa, K.: “Evidence for a 36 ks phase modulation in the hard X-ray pulses from the magnetar 1E 1547.0-5408”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **68**, id S12, 18pp (2016), DOI: 10.1093/pasj/psv097

[6] Takagi, T., Mihara, T., Sugizaki, M., Makishima, K., & Morii, M.: “Application of the Ghosh & Lamb relation to the spin-up/down

behavior in the X-ray binary pulsar 4U 1626-67”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **68**, id S13, 14pp (2016), DOI:10.1093/pasj/psw010

[7] Makishima, K.: “X-ray studies of neutron stars and their magnetic fields”, *Proc. Japan Academy* **92**, 135-155 (2016), DOI: 10.2183/pjab.92.135

[8] Nakano, T., Murakami, H., Makishima, K., Hiraga, J.S, Uchiyama, H., Kaneda, H., & Enoto, T. “Suzaku studies of the supernova remnant CTB 109 hosting the magnetar 1E 2259+586”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, id 9, 12pp (2015), DOI: 10.1093/pasj/psu135

[9] Sugizaki, M., Yamamoto, T., Mihara, T., Nakajima, M., & Makishima, K.: “Luminosity and spin-period evolution of GX 304-1 during outbursts from 2009 to 2013 observed with the MAXI/GSC, RXTE/PCA, and Fermi/GBM”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, id 73, 12pp (2015), DOI: 10.1093/pasj/psv039

[学会発表] (計 19 件)

[1] 杉崎睦, 三原建弘, 中島基樹, 牧島一夫: 「Be星X線連星パルサーにおける降着スピニング機構の系統的検証」、日本物理学会春季年会、2018年3月25日(東京理科大学・野田)

[2] 谷田部史堯, 牧島一夫, 三原建弘, 杉崎睦, 高木利紘, 中島基樹: 「Ghosh & Lamb 降着トルクモデルのX線連星パルサーX Perseiへの適用」、日本天文学会春季年会、2018年3月19日-22日(千葉大学)

[3] 牧島一夫: 「中性子星の新しい観測の手掛りの開拓」、第6回「中性子星の核物質」研究会、2017年12月2日(理研・和光)招待講演

[4] 牧島一夫: 「マグネター級の強磁場をもつX線連星パルサー: X Perseiと4U 0114+65」、 「中性子星の観測と理論」研究活性化ワークショップ、2017年11月23日(国立天文台・三鷹)

[5] 牧島一夫: 「X線による中性子星の観測」、 「X線天体と元素合成を中心とする宇宙核物理研究会」2017年12月2日(理研和光)招待講演

[6] Makishima, K., Takagi, T., Mihara, T., Sugizaki, M., Yatabe, F., Sasano, M., Nakazawa, K. & Nakajima, M.: “Do Long-Period Binary Pulsars Have Stronger Magnetic Fields than Ordinary Accretion-Powered Pulsars?”, *European Week of Astronomy and Space Science*, 2017年6月30日(プラハ, チェコ共和国)

[7] 牧島一夫, 高木利紘, 三原建弘, 杉崎睦, 谷田部史堯, 笹野理, 中澤知洋, 中島基樹: 「長周期X線パルサーX Perseiが $> 10^{13}G$ の超強磁場をもつ可能性」、日本天文学会春季年会、2017年3月16日(九州大学・伊都)

[8] 牧島一夫, 高木利紘, 三原建弘, 杉崎睦, 谷田部史堯, 笹野理, 中島基樹, 中澤知洋: 「長周期X線パルサーは $10^{13}G$ の超強磁場をもつか?」、日本物理学会春季年会、2017年3月17日(大阪大学・豊中)

[9] 牧島一夫, 榎戸輝揚, 村上浩章, 中澤知洋: 「マグネター4U 0142+61の自由歳差運動: NuSTARデータによる検証」、日本物理学会秋季年会、2016年9月24日(宮崎大学・木花)

[10] 牧島一夫: 「マグネターの自由歳差運動」、蔵王中性子星研究会、2016年9月8日(山形県蔵王温泉)

[11] Makishima, K., Enoto, T., Nakano, T., Murakami, H., Furuta, Y., Nakazawa, K. & Nakagawa Y.E.: “RECENT X-RAY RESULTS ON MAGNETARS (Poster)”, 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos, 2016年06月20~23日(新潟市朱鷺メッセ)

[12] Murakami, H., Makishima, K., Enoto, T., Nakano, T., & Nakazawa, K.: “A new approach to observe toroidal magnetic fields of magnetars”, XMM-Newton: The Next Decade, 2016年05月9~11日(European Space Astronomy Center, マドリード、スペイン)

[13] 牧島一夫, 榎戸輝揚, 村上浩章, 中澤知洋: 「マグネター 4U 0142+61の硬X線パルス位相変動: NuSTARデータの解析」、日本天文学会春季年会、2016年03月17日(首都大学東京・南大沢)

[14] 榎戸輝揚, 柴田晋平, 北口貴雄, 諏訪雄大, 内出崇彦, 牧島一夫: 「マグネターの磁場強度と硬X線放射の相関: すざく観測のまとめ」、同上

[15] 中野俊男, 古田禄大, 増山美優, 村上浩章, 榎戸輝揚, 牧島一夫, 茂山俊和: 「超新星残骸CTB109のX線観測によるマグネター1E 2259+586の親星質量の推定」、日本物理学会春季年会、2016年03月21日(東北学院大学)

[16] 牧島一夫: 「中性子星に関するいくつかの観測的なスペキュレーション」、中性子星の観測と理論: 研究活性化ワークショップ、2015年12月23日(京都大学・北白川)

[17] 牧島一夫, 榎戸輝揚, 村上浩章, 古田禄大, 中野俊男, 笹野理, 中澤知洋: 「『すざく』によるマグネター自由歳差運動の二例目の発見: 1E1547.0-5408」、日本物理学会秋季年会、2015年09月25日(大阪大学・豊中)

[18] 村上浩章, 牧島一夫, 中澤知洋: 「マグネター 1E 1841-045 および 1RXS J170849.0-400910 の「すざく」による硬X線パルス復調解析」、日本天文学会秋季年会、2015年9月10日(甲南大学)

[19] 牧島一夫, 榎戸輝揚, 村上浩章, 古田禄大, 中野俊男, 中澤知洋: 「『すざく』によるマグネター1E 1547.0-5408の自由歳差運動の検出(2)」、同上

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

牧島 一夫 (MAKISHIMA, Kazuo)  
東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授  
研究者番号：20126163

### (2) 研究分担者

中澤 知洋 (NAKAZAWA, Kazuhiro)  
名古屋大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：50342621