

日本学士院賞 受賞者

牧島一夫  
まきしまかずお



専攻学科目

宇宙物理学実験

略 生 年 月 歴

昭和二十四年 四月

昭和四十九年 三月

同 五一年 三月

同 五三年一月

同 五六年 四月

同 六一年 四月

同 六一年 五月

平成 七年 四月

同 一三年 四月

同 一九年 四月

同 二二年 四月

同 二七年 四月

東京大学理学部物理学科卒業

東京大学大学院理学系研究科修士課程修了

東京大学宇宙航空研究所助手

宇宙科学研究所宇宙圏研究系助手

東京大学理学部助教

理学博士

東京大学大学院理学系研究科教授 (平成二七年三月まで)

理化学研究所牧島宇宙放射線研究室主任研究員 (兼務、平成二二年三月まで)

東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター長 (兼任、平成二七年三月まで)

(独)理化学研究所グローバル研究クラスター宇宙観測実験連携研究グループディレクター

国立研究開発法人理化学研究所グローバル研究クラスター研究顧問 (現在に至る)

## 理学博士牧島一夫氏の「X線観測による 中性子星の強磁場の研究」に対する授賞

### 審査要旨

中性子星は質量およそ $1.4$ 太陽質量、半径およそ $10\text{ km}$ で、ほとんどが中性子で出来ており、中性子の縮退圧で支えられている。現存する天体の中では最も高密度のものである。強磁場を持ち自転する中性子星は電波からX線にわたる周波数帯でパルスを発し、パルサーと呼ばれる。

牧島一夫氏と彼の主導するグループは「ぎんが」「あすか」「すざく」等の我が国のX線天文衛星を駆使してX線パルサーの観測研究を国際的にリードし、多くの成果を挙げてきたが、中でも次に述べる結果は特に重要である。

X線パルサーにはパルスのエネルギー源により、自転エネルギー型（かに星雲等）、連星系物質降着型（大部分のX線パルサー）、磁気エネルギー型（超強磁場 $10^{11}\text{ T}$ ；マグネターと呼ばれる）の三種がある。

牧島氏は「ぎんが」による観測で、七個のX線パルサーから $10$

〜 $50\text{ keV}$ の領域に、電子サイクロトロン共鳴線（強磁場で起こるLandau準位間の遷移：吸収線様構造）の検出に成功した。その後「すざく」により更に四例検出している。世界で、電子サイクロトロン共鳴線が見つけられているX線パルサー（総数一八個）の過半数は同氏等によるものである。この共鳴線エネルギーから中性子星の磁場が直接、精度よく測られ、その結果それらが $(1.4) \times 10^{11}\text{ T}$ の狭い範囲に揃っていることを示した (Makishima et al. 1990)。この事実

は(1) 中性子星が生まれた時に磁場がかなり揃った値を持つこと、  
(2) そして $10^8$ 年（連星系の年齢）以内には目立って減衰しないということを示している。これは磁場は時間と共に減衰するという当時の通説を否定する結果であった。

「あすか」の結果からもX線パルサーの磁場の減衰は否定され、牧島氏は中性子星の磁場が中性子の磁気モーメント整列による核物質強磁性の発現である可能性を指摘した (Makishima et al. 1999)。

牧島氏は次いで「すざく」を用い、更に強い $10^{11}\text{ T}$ の磁場を持つと考えられている中性子星、 $\gamma$ マグネター $\gamma$ の観測を主導した。このような超強磁場になると、Landau準位の間隔が電子の静止質量に近くなるため、新奇な量子電磁気学的(OED)現象が起こり得る。実際、牧島氏は榎戸氏等と共著で、マグネターに共通な、特異な硬X線成分が、OED現象の一つ「二光子分裂」により生ずる可能性を

指摘した (Enoto, Nakazawa, Makishima *et al.* 2010)。

この  $10^{10}$  T というマグネターの磁場強度は、中性子星表面から外部に伸びた双極子型磁場の強度をさすが、牧島氏は最近、以下に述べるようにマグネターの中性子星の内部に極めて強いトロイダル (ドーナツ型) 磁場が存在することを示す確かな証拠を得た。同氏等は「すごく」によるマグネター 4U 0142+61 (パルス周期: 八・六九秒) の観測において、その硬 X 線パルス成分の到着時刻が約一五時間間の周期で  $\sim 0.7$  秒振幅の位相変調されていることを発見した。(軟 X 線パルスにはこのような変調は見られない。)

牧島氏等は、この変調は力学系の自由歳差運動の特徴であることに注目し、中性子星が僅かにレモン型に変形していれば、その自由歳差運動として説明できることを示した。その変形量は慣性エネルギー比が 1 から僅か  $1/6300$  ずつれていることに対応する。中性子星がこれだけ変形するには、内部に凡そ  $10^{12}$  T の強烈なトロイダル磁場が存在することを示唆している。此の観測結果と解釈は *Physical Review Letters* (Makishima *et al.* 2014) に発表された。これは早速アメリカ物理学会誌 *Physics* の Synopsis に注目すべき結果<sup>1)</sup>として採り上げられている。

牧島氏等は最近もう一つのマグネター 1E 1547-54 でも同様に、硬 X 線パルスがパルス周期二・一秒の凡そ一万八千倍の長周期で位相

変調を受けていることを発見した。自由歳差運動はマグネターに普遍的である可能性が増した。超強トロイダル磁場による中性子星の変形はマグネターに共通の特性なのかも知れない。

実際このようなトロイダル優先磁場は II 型超新星で発現する可能性は理論的にも示されている (e.g.: Kotake *et al.* 2004; Braithwaite 2009)。

以上、牧島氏の業績は中性子星の生成・進化の天体物理学のみならず、核物質の状態方程式や量子多体問題にも関連する顕著な貢献と考えられる。

## 論文リスト

### 1 強磁場中性子星に関する論文

- [1] Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J. S., Nakano, T., Nakazawa, K., Sakurai, A., Sasano, M. & Murakami, H.: "Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61", *Phys. Rev. Lett.*, id.171102 (2014)
- [2] Yamamoto, T., Mihara, T., Sugizaki, M., Nakajima, M., Makishima, K. & Sasano, M.: "Firm Detection of a Cyclotron Resonance Feature with Suzaku in the X-ray Spectrum of GRO J1008-57 during a Giant Outburst in 2012", *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id. 59 (2014)
- [3] Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z. & Enoto, T.: "Suzaku View of the Neutron Star in the Dipping Source 4U 1822-37", *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id. 35 (2014)

- [4] Enoto, T., Sasano, M., Yamada, S., Tamagawa, T., Makishima, K., Potschmidt, K., Marcu, D., Corbet, R., Fuerst, F. & Wilms, J.: "Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-ray Binary System", *Astrophys. J.* **786**, id. 127 (2014)
- [5] Rea, N., (+15 名), Enoto, T., Makishima, K., (+6 名): "A New Low Magnetic Field Magnetar: The 2011 Outburst of Swift J1822.3-1606", *Astrophys. J.* **753**, id.129 (2012)
- [6] Iwakiri, W., Terada, Y., Mihara, T., Angelini, L., Tashiro, M., Enoto, T., Yamada, S., Makishima, K., Nakajima, M. & Yoshida, A.: "Possible Detection of an Emission Cyclotron Resonance Scattering Feature from the Accretion-powered Pulsar 4U 1626-67", *Astrophys. J.* **751**, 35 (2012)
- [7] Enoto, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Kotoku, J. & Shibazaki, N.: "Soft and Hard X-Ray Emissions from the Anomalous X-ray Pulsar 4U 0142+61 Observed with Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 387-396 (2011)
- [8] Nakagawa, Y., Makishima, K. & Enoto, T.: "Suzaku Discovery of a Hard Power-Law Component in the Spectra of Short Bursts from SGR 0501+45", *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, S813 (2011)
- [9] Yamamoto, T., Sugizaki, M., Mihara, T., Nakajima, M., Yamaoka, K., Matsumoka, M., Morii, M. & Makishima, K.: "Discovery of a Cyclotron Resonance Feature in the X-ray Spectrum of GX 304-1 with RXTE and Suzaku during Outbursts Detected by MAXI in 2010", *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, S755-S757 (2011)
- [10] Esposito, P., (+15 名), Makishima, K., (+3 名): "Long-Term Spectral and Timing Properties of the Soft Gamma-Ray Repeater SGR 1833-0832 and Detection of Extended X-ray Emission around the Radio Pulsar PSR B1830-08", *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* **416**, 205-215 (2011)
- [11] Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Rea, N., Hurley, K. & Shibata, S.: "Broadband Study with Suzaku of the Magnetar Class", *Astrophys. J. Lett.* **722**, L162-L167 (2010)
- [12] Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Nakagawa, Y., Sakamoto, T., Ohno, M., Takahashi, T., Yamaoka, K., Murakami, T. & Takahashi, H.: "Suzaku Discovery of a Hard X-Ray Tail in the Persistent Spectra from the Magnetar 1E 1547.0-5408 during its 2009 Activity", *Publ. Astron. Soc. Japan* **62**, 475-485 (2010)
- [13] Enoto, T., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Makishima, K., Sakamoto, T., Esposito, P., Götz, D., Hurley, K., Israel *et al.*: "Wide-Band Suzaku Analysis of the Persistent Emission from SGR 0501+4516 during the 2008 Outburst", *Astrophys. J.* **715**, 665-670 (2010)
- [14] Nakajima, M., Mihara, T. & Makishima, K.: "Energy-Dependent Harmonic Ratios of the Cyclotron Features of X0331+53 in the 2004-2005 Outburst", *Astrophys. J.* **710**, 1755 (2010)
- [15] Enoto, T., (+7 名), Makishima, K., Mereghetti, S., (+10 名): "Suzaku Observation of the New Soft Gamma Repeater SGR 0501+4516 in Outburst", *Astrophys. J.* **693**, L122-L126 (2009)
- [16] Enoto, T., Makishima, K., Terada, Y., Mihara, T., Nakazawa, K., Ueda, T., Dotani, T., Kokubun, M., Nagase, F., Naik, S., (+3 名): "Suzaku Observations of Hercules X-1: Measurements of the Two Cyclotron Harmonics", *Publ. Astron. Soc. Japan* **60**, S57-S68 (2008)
- [17] Terada, Y., Mihara, T., Nakajima, M., Suzuki, M., Isobe, N., Makishima, K., Takahashi, H., Enoto, T., Kokubun, M., Kitaguchi, T., (+21 名): "Cyclotron Resonance Energies at a Low X-Ray Luminosity: A0335+262 Observed with Suzaku", *Astrophys. J. Lett.* **648**, L139-L142 (2006)
- [18] Nakajima, M., Mihara, T., Makishima, K. & Niko, H.: "A Further Study of the Luminosity-Dependent Cyclotron Resonance Energies of the Binary X-ray Pulsar 4U 0115+63 with RXTE", *Astrophys. J.* **646**, 1125-1138 (2006)

- [19] Makishima, K.: "Measuring Magnetic Fields of Neutron Stars", *Prog. T. Phys. S.* **151**, 54 (2003)
- [20] Makishima, K., Mihara, T., Nagase, F. & Tanaka, Y.: "Cyclotron Resonance Effects in Two Binary X-Ray Pulsars and the Evolution of Neutron Star Magnetic Fields", *Astrophys. J.* **525**, 978-994 (1999)
- [21] Bulik, T., Meszaros, P., Woo, J. W., Nagase, F. & Makishima, K.: "The Polar Cap Structure of the X-ray Pulsar 4U1538-52", *Astrophys. J.* **395**, 564-574 (1992)
- [22] Mihara, T., Makishima, K., Kamiyo, S., Ohashi, T., Nagase, F., Tanaka, Y., Koyama, K.: "Discovery of a Cyclotron Resonance Feature at 30 keV from the Transient X-ray Pulsar Cepheus X-4", *Astrophys. J. Lett.* **379**, L61-L64 (1991)
- [23] Nagase, F., Dotani, T., Tanaka, Y., Makishima, K., Mihara, T., Sakao, T., Tsunemi, H., Kitamoto, S., Tamura, K., Yoshida, A. & Nakamura, H.: "Cyclotron Line Features in the Spectrum of the Transient X-ray Pulsar X0115+634", *Astrophys. J. Lett.* **375**, L49-L52 (1991)
- [24] Makishima, K., Mihara, T., Ishida, M., (+13 名): "Discovery of a Prominent Cyclotron Absorption Feature from the Transient X-ray Pulsar X0331+53", *Astrophys. J. Lett.* **365**, L59-L62 (1990)
- [25] Sakao, T., Kohnmura, Y., Makishima, K., Ohashi, T., Dotani, T., Kii, T., Makino, F., Nagase, F., Takeshima, T. & Turner, M. J. J.: "When Will the Peculiar X-Ray Pulsar GX 1+4 Resume Fast Spin-Up?", *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* **246**, 11 (1990)
- [26] Mihara, T., Makishima, K., Ohashi, T., Sakao, T. & Tashiro, M.: "New Observations of the Cyclotron Absorption Feature in Hercules X-1" *Nature* **346**, 250-252 (1990)
- [27] Makishima, K., Ohashi, T., (+21 名): "Observations of the Peculiar Hard X-ray Transient X0331+53 (V0332+53)", *Publ. Astron. Soc. Japan* **42**, 295-315 (1990)
- [28] Clark, G. W., Woo, J. W., Nagase, F., Makishima, K. & Sakao, T.: "Discovery of a Cyclotron Absorption Line in the Spectrum of the X-ray Pulsar 4U 1538-52 Observed by GINGA", *Astrophys. J.* **353**, 274-280 (1990)
- [29] Makishima, K., Ohashi, T., Sakao, T., Dotani, T., Inoue, H., Koyama, K., Makino, F., Mitsuda, K., Nagase, F., Thomas, H. D., Turner, M. J. L., Kii, T. & Tawara, Y.: "Spin-Down of the X-ray Pulsar GX1+4 during an Extended Low State", *Nature* **333**, 746-748 (1988)
- [30] Pelling, R. M., Patiesas, W. S., Peterson, L. E., Makishima, K., Oda, M., Ogawara, Y. & Miyamoto, S.: "A Scanning Modulation Collimator Observation of the High-Energy X-ray Source in the Crab Nebula", *Astrophys. J.* **319**, 416-425 (1987)
- [31] Makishima, K., Koyama, K., Nagase, F. & Hayakawa, S.: "Spectra and Pulse Period of the Binary X-ray Pulsar 4U 1538-52", *Astrophys. J.* **314**, 619-628 (1987)
- [32] Makishima, K., Kawai, N., Koyama, K., Shibasaki, N., Nagase, F. & Nakagawa, M.: "Discovery of a 437.5-s X-ray pulsation from 4U 1907+09", *Publ. Astron. Soc. Japan* **36**, 679-689 (1984)
- [33] Nagase, F., Hayakawa, S., Tsunoe, K., Sato, N., Ikegami, T., Kawai, N., Makishima, K., (+6 名): "Pulse-Period Changes of X-ray Pulsars Measured with Hakucho and TENMA", *Publ. Astron. Soc. Japan* **36**, 667-678 (1984)

2 心天学 天文学

- [34] Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimazaki, K., Xu, H. & Makishima, K.: "Probing of the Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters from  $z = 0.1$  to  $0.9$ ", *Astrophys. J.* **767**, id. 157 (2013)
- [35] Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S., Done, C., Kubota, A., Dotani, T.,

- Ebisawa, K., Itoh, T., Kitamoto, S., Negoro, H., Ueda, Y. & Yamaoka, K.: "Suzaku Results on Cygnus X-1 in the Low/Hard State", *Publ. Astron. Soc. Japan* **60**, 585-604 (2008)
- [36] Kokubun, M., Makishima, K., (+50 名): "In-Orbit Performance of the Hard X-Ray Detector on Board Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, S53-S76 (2007)
- [37] Takahashi, T., (+31 名), Makishima, K., (+36 名): "Hard X-Ray Detector (HXD) on Board Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, S35-S51 (2007)
- [38] Mitsuda, K., (+5 名), Makishima, K., (+49 名): "The X-Ray Observatory Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, S1-S7 (2007)
- [39] Makishima, K., Ezawa, H., Fukuzawa, Y., Honda, H., Ikebe, Y., Kamae, T., Kikuchi, K., Matsushita, K., Nakazawa, K., Ohashi, T., Takahashi, T., Tamura, T. & Xu, H.: "X-Ray Probing of the Central Regions of Clusters of Galaxies", *Publ. Astron. Soc. Japan* **53**, 401-420 (2001)
- [40] Makishima, K., Kubota, A., Mizuno, T., Ohnishi, T., Tashiro, M., Aruga, Y., Asai, K., Dotani, T., Mitsuda, K., Ueda, Y., Uro, S., Yamaoka, K., Ebisawa, K., Kohmura, Y. & Okada, K.: "The Nature of Ultraluminous Compact X-Ray Sources in Nearby Spiral Galaxies", *Astrophys. J.* **535**, 632-643 (2000)
- [41] Makishima, K., Tashiro, M. (+28 名): "In-Orbit Performance of the Gas Imaging Spectrometer onboard ASCA", *Publ. Astron. Soc. Japan* **48**, 171-189 (1996)
- [42] Ohashi, T., (+12 名), Makishima, K., (+9 名): "The Gas Imaging Spectrometer on Board ASCA", *Publ. Astron. Soc. Japan* **48**, 157-170 (1996)
- [43] Acton, L., Tsuneta, S., Ogawara, Y., Bentley, R., Bruner, M., Canfield, R., Culhane, L., Doschek, G., Hiei, E., Hirayama, T., Hudson, H., Kosugi, T., Lang, J., Lemm, J., Nishimura, J., Makishima, K., Uchida, Y. & Watanabe, T.: "The *Yohkoh* Mission for High-Energy Solar Physics", *Science* **258**, 591 (1992)
- [44] Kosugi, T., Makishima, K., Murakami, T., Sakao, T., Dotani, T., Inda, M., Kai, K., Masuda, S., Nakajima, H., Ogawara, Y., Sawa, M. & Shibasaki, K.: "The Hard X-ray Telescope (HXT) for the *SOLAR-4* Mission", *Solar Physics* **136**, 17-36 (1991)
- [45] Turner, M. J. L., Thomas, H. D., Patchett, B. E., Reading, D. H., Makishima, K., Ohashi, T., Dotani, T., Hayashida, K., Inoue, H., Kondo, H., Koyama, K., Misusa, K., Ogawara, Y., Takano, S., Awaki, H., Tawara, Y. & Nakamura, N.: "The Large Area Counter on GINGA", *Publ. Astron. Soc. Japan* **41**, 345-372 (1989)
- [46] Makishima, K., Maejima, Y., Mitsuda, K., Bradt, H. V., Remillard, R. A., Tuohy, I. R., Hoshi, R. & Nakagawa, M.: "Simultaneous X-ray and Optical Observations of GX 339.4 in an X-ray High State", *Astrophys. J.* **308**, 635-643 (1986)
- [47] Tanaka, Y., Fujii, M., Inoue, H., Kawai, N., Koyama, K., Maejima, Y., Makino, F., Makishima, K., Matsuoka, M. & Mitsuda, K.: "X-ray Astronomy Satellite Temma" *Publ. Astron. Soc. Japan* **36**, 641-658 (1984)