

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540269

研究課題名(和文) X線長期モニターを用いた原始星の統計的研究

研究課題名(英文) A Statistical Study of Protostars with Monitoring Observations in the X-ray Band

研究代表者

坪井 陽子 (Tsuboi, Yohko)

中央大学・理工学部・准教授

研究者番号：70349223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 未だ星を形成しつつある初期の原始星(Class 0)がX線を放出していることを確認した。(2) MAXI/GSCで、巨大フレアの発生頻度が太陽フレアと同じ霧でエネルギーとともに落ちること、10桁に渡って黒点の面積がフレア規模と相関していること、HR1099の最大フレアエネルギー、を明らかにした。(3) II Pegを多波長同時観測し、H $\alpha$ 輝線で長期青方変移を、X線帯域で再加熱を観測し、超大規模ツーリボンフレアの証拠を得た。(4) Diamond Like Carbonの成膜により結晶を曲げる技術を確認し、Bragg反射を用いたX線偏光計として使えること、X線を集光できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：(1) We obtained the proof that a Class 0 candidate emits X-rays. (2) In order to access the origin and the geometry of protostars by detecting flares from them, we investigated key parameters for a flare on stars. Using the Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI), we searched huge X-ray flares on stars, and obtained the dependence of flare frequencies with flare energy and the relation of flare energy to the stellar spot size, ranging ten orders of magnitude, from small solar flares to huge stellar flares. (3) In a multi-wavelength observation of II Peg, we detected a huge version of two-ribbon flare. (4) We established a way to bend crystals by depositing Diamond Like Carbon on the surface of them. The bent crystals can be an X-ray imaging poralimetry which makes use of Bragg reflection. We also confirmed that the optics can converge X-ray beam.

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：X線 線天文学

キーワード：X線 星 原始星 フレア Tタウリ型星 連星 多波長観測

### 1. 研究開始当初の背景

星は塵が集積して誕生する。しかしその誕生の現場は、まさに降着してこようとする塵に阻まれて、観測できない。原始星段階は赤外・電波で観測されるが、あくまでもその帯域で見えるのは周辺物質(分子雲コアと降着ガス)であり、原始星そのものではない。これら星周物質は原始星そのものを厚く包み、可視光ではもちろん近赤外でも本体を直接透かして見ることはできない。しかし我々は天文衛星「あすか」が感度を持つ透過力の強い硬X線バンド(> 2keV)において、暗黒星雲深くに埋もれ全波長を通じて検出できなかった Class I 原始星本体からのX線を初検出した。また、空間分解能の良いチャンドラ衛星を用いて、ほとんどの Class I 原始星がX線を放射していることを明らかにした。これにより、X線帯域を用いれば、原始星本体の構造や物理状態と、その生成過程に迫ることができるということが明らかになった。

### 2. 研究の目的

他のどんな波長でも検出困難な原始星本体を透過力の強い硬X線で検出し、その物理状態を明らかにする。特に Class 0 段階と呼ばれる誕生直後の天体にも迫る。また惑星を含む、さまざまな質量の若い星からのX線を捉え、違いと共通性を明らかにする。これらの結果により、原始星/惑星の研究分野が将来の衛星でどのように発展可能かも検討する。

また、原始星に降着する直前の物体の幾何は、偏光情報から強く制限することができる。原始星の極近傍からの光はX線帯域でしか観測できないので、X線偏光観測技術が必要不可欠である。にもかかわらず、X線偏光技術は、他の波長に比べて大きく立ち後れている。そこで、将来の開発機器として、結晶のブラッグ反射を用いた90度反射光学系の開発を進める。

### 3. 研究の方法

現在稼働中の観測飛翔体によってさまざまな質量を持つ若い星状天体(原始星やTタウ型星、褐色矮星、惑星)のX線探査を行なう。検出された天体データのX線強度変動とスペクトルを調べ、フレアの諸物理パラメータ(強度、頻度、時間スケールなど)を明らかにする。また、全天X線監視装置「MAXI」を用いて、一般の星からの巨大フレアをサーベイし、フレアを起こすキーとなる物理量を明らかにする。このように星フレアのスタディを進めることで、原始星フレアの諸パラメータから原始星のどんな物理量がかかるかを明らかにする。

結晶のブラッグ反射を用いた90度反射光学系の開発を進める。この光学系はトムソン反射光学系と同じく、偏光検出能力を表すM値は極めて1に近いと期待できる。通常では折れやすく曲がりにくいと言われる結晶を曲げる技術を確認する。これにより、反射X線

の帯域に幅を持たせることが可能になると同時に、X線の集光もできる。また、結晶を曲げることによって積分反射率がどのように変化するかも調べる。

### 4. 研究成果

(1) 全天X線監視装置 MAXI/GSC を用いて、  
i) 巨大フレアの発生頻度が太陽フレアと同じ幕でエネルギーとともに落ちること、(ii) 太陽フレアから続く10桁もの範囲で黒点の面積がフレア規模と強く相関していること、(iii) HR1099 の最大フレアエネルギー、を明らかにした。

(2) II Peg のフレアを多波長同時観測し、長時間に渡るH輝線の青方変移とX線帯域での再加熱から、太陽で起こるソーリボンフレアの超巨大版の証拠を得た。

(3) Class 0 と分類される、未だ星を形成しつつある初期の天体からX線が出ていることを確認。星はいつからX線を放射し始めるかについての制限を与えた。

(4) Diamond Like Carbon (DLC) を薄い結晶に成膜することにより、内部応力の差で結晶を曲げることに成功。曲率半径をコントロールする技術を開発した。その曲がった結晶の作成方法について特許を出願(飯塚亮、坪井陽子、“湾曲結晶の製造方法および湾曲結晶”2012年度、特願2012-147355)。実際にX線を集光し、偏光に感度があることも実証した。

### 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 13 件)

(1) Kamezaki, T., Imura, K., Omodaka, T., Handa, T., Tsuboi, Y., Nagayama, T., Hirota, T., Sunada, K., Kobayashi, H., Chibueze, J. O., Kawai, E., Nakano, M., “Annual Parallax Determination toward a New X-Ray-emitting Class 0 Candidate with the Water Maser in the NGC 2264 Star-forming Region”, The Astrophysical Journal Supplement, 211 巻, 18p, 2014年4月発行, 査読あり

(2) Morii, M., Tomida, H., Kimura, M., その他 29 名, 掲載 28 番, “Extraordinary Luminous Soft X-Ray Transient MAXI J0158-744 as an Ignition of a Nova on a Very Massive O-Ne White Dwarf”, The Astrophysical Journal, 779 巻, 118p, 2013年12月発行, 査読あり

(3) Hiroi, K., Ueda, Y., Hayashida, M., Shidatsu, M., Sato, R., Kawamuro, T., Sugizaki, M., Nakahira, S., Serino, M., Kawai, N., その他 33 名, 掲載 18 番, “The 37 Month MAXI/GSC Source Catalog of the High Galactic-Latitude Sky” The Astrophysical Journal Supplement, 207

巻, 36p, 2013年8月発行, 査読あり

(4) Sugizaki, M., Yamaoka, K., Matsuoka, M., Kennea, J. A., Mihara, T., Hiroi, K., Ishikawa, M., Isobe, N., Kawai, N., Kimura, M., その他 24 名, 掲載 26 番, “Spectral Evolution of a New X-Ray Transient MAXI J0556-332 Observed by MAXI, Swift, and RXTE” Publications of the Astronomical Society of Japan, 65 巻, 58p, 2013年6月発行, 査読あり

(5) Usui, R., Morii, M., Kawai, N., Yamamoto, T., Mihara, T., Sugizaki, M., Matsuoka, M., Hiroi, Kazuo., Ishikawa, M., Isobe, N., その他 21 名, 掲載 25 番, “Outburst of LS V +44 17 Observed by MAXI and RXTE, and Discovery of a Dip Structure in the Pulse Profile” Publications of the Astronomical Society of Japan, 64 巻, 79p, 2012年8月発行, 査読あり

(6) Nakahira, S., Koyama, S., Ueda, Y., その他 34 名, 掲載 29 番, “A Spectral Study of the Black Hole Candidate XTE J1752-223 in the High/Soft State with MAXI, Suzaku, and Swift” Publications of the Astronomical Society of Japan, 64, 13-25 (2012), 査読有

(7) Serino, M., Yoshida, A., Kawai, N., その他 32 名, 掲載 27 番, “Peculiarly Narrow SED of GRB 090926B with MAXI and Fermi/GBM” Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 1035-1040 (2011), 査読有.

(8) Ueda, Y., Hiroi, K., Isobe, N., その他 31 名, 掲載 28 番, “Revisit of Local X-Ray Luminosity Function of Active Galactic Nuclei with the MAXI Extragalactic Survey” Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 937-945 (2011), 査読有.

(9) Morii, M., Kawai, N., Usui, R., その他 34 名, 掲載 30 番, “MAXI GSC Monitoring of the Crab Nebula and Pulsar during the GeV Gamma-Ray Flare in 2010 September” Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 821-825 (2011), 査読有.

(10) Shidatsu, M., Ueda, Y., Nakahira, S., その他 29 名, 掲載 26 番, “Long-Term Monitoring of the Black Hole Binary GX 339-4 in the High/Soft State during the 2010 Outburst with MAXI/GSC” Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 803-811 (2011), 査読有.

(11) Uzawa, A., Tsuboi, Y., Morii, M., Yamazaki, K., Kawai, N., Matsuoka, M., Nakahira, S., Serino, M., Matsumura, T., Mihara, T., その他 28 名, “A Large X-Ray Flare from a Single Weak-Lined T Tauri Star TWA-7 Detected with MAXI GSC” Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 713-726 (2011), 査読有.

(12) Hiroi, K., Ueda, Y., Isobe, N., その他 31 名 掲載 29 番, “The First MAXI/GSC Catalog in the High Galactic-Latitude Sky” Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 677-689 (2011), 査読有.

(13) Sugawara, Y., Maeda, Y., Tsuboi, Y., Hamaguchi, K., Corcoran, M., Pollock, A., Moffat, A., Williams, P., Dougherty, S., Pittard, J., “The variable X-ray spectrum of the Wolf-Rayet binary WR140 with Suzaku” Proceedings of the 39th Liège Astrophysical Colloquium, 80, 724-728 (2011), 査読有.

〔学会発表〕(計 22 件)

(1) 坪井陽子, 比嘉将也, 川越淳史, 三宅梢子, 飯田悠, 中平聡志, 富田洋, 薄井竜一, 根来均, 松岡勝, ほか MAXI チーム “MAXI による 4 年間の巨大恒星フレアサーベイ”

日本天文学会 2014 年春季年会, 国際基督教大学, 2014 年 03 月 19 日 ~ 2013 年 03 月 22 日

(2) 兼藤聡一郎, 坪井陽子 “NGC2264 における原始星の X 線長期変動” 日本天文学会 2014 年春季年会, 国際基督教大学, 2014 年 03 月 19 日 ~ 2013 年 03 月 22 日

(3) Yohko Tsuboi, and MAXI team “Stellar Flares detected in Four Year’s Monitoring with MAXI/GSC” Suzaku-MAXI conference 2014 “Expanding the Frontiers of the X-ray Universe” 愛媛大学, 2014 年 02 月 19 日 ~ 2013 年 02 月 22 日

(4) Yasuharu Sugawara, Yohko Tsuboi, Yoshitomo Maeda “The peculiar X-ray variations of the enigmatic massive binary WR 21a” Suzaku-MAXI conference 2014 “Expanding the Frontiers of the X-ray Universe” 愛媛大学, 2014 年 02 月 19 日 ~ 2013 年 02 月 22 日

(5) Ryo Iizuka, Masatoshi, Akiyama, Yohko Tsuboi, 他 18 名 “Simultaneous multi-wavelength observations of large flare stars” Suzaku-MAXI conference 2014 “Expanding the Frontiers of the X-ray Universe” 愛媛大学, 2014 年 02 月 19 日 ~ 2013 年 02 月 22 日

(6) 川越淳史, 坪井陽子, 比嘉将也, 薄井竜一, 根来均, 河合誠之, 松岡勝, ほか MAXI チーム

“MAXI が捉えた K2 型変光星 HD347929 からの巨大フレア” 日本天文学会 2013 年秋季年会, 東北大学, 2012 年 09 月 10 日 ~ 2013 年 09 月 12 日

(7) 秋山昌俊, 坪井陽子, 飯塚亮, 比嘉将也, 櫻井峻, 高橋英則, 橋本修, 本田敏志,

新井彰,  
鳴沢真也, 今村和義, 小木美奈子, 宮地竹  
史, 花山秀和, 綾仁一哉, 前野将太, 藤井  
貢, 大島修,  
赤澤秀彦, 伊藤弘, 塩川和彦  
“2013年1月のII Pegフレアの多波長同時  
観測”  
日本天文学会2013年秋季年会, 東北大  
学, 2012年09月10日~2013年09月12日  
(8) 菅原泰晴, 坪井陽子, 前田良知  
“長周期大質量連星系WR137における謎のX  
線光度変動”  
日本天文学会2013年秋季年会, 東北大  
学, 2012年09月10日~2013年09月12日  
(9) 比嘉将也, 坪井陽子, 根来均, 中平聡  
志, 富田洋, 松岡勝, ほかMAXI チーム  
“全天X線監視装置MAXI/SSCを用いた星の  
巨大フレアの探査”  
日本天文学会2013年春季年会, 埼玉大学,  
2013年03月20日~2013年03月23日  
(10) 秋山昌俊, 藤井貢, 比嘉将也, 坪井陽  
子, “II Pegフレアの可視光測光・分光観測”  
日本天文学会2013年春季年会, 埼玉大学,  
2013年03月20日~2013年03月23日  
  
(11) 亀崎達矢, 井村健二, 面高俊宏, 半田  
利弘, James Chibueze O., 坪井陽子, 永山  
匠, 砂田和良, 廣田朋也, 仲野誠, VERA チ  
ーム  
“星形成領域NGC2264CのVLBI観測と  
class0天体に付随するX線源の発見”  
日本天文学会2013年春季年会, 埼玉大学,  
2013年03月20日~2013年03月23日  
  
(12) 菅原泰晴, 坪井陽子, 前田良知, “系  
内Wolf-Rayet星のX線帯域における統計的  
調査II”  
日本天文学会2012年秋季年会, 大分大  
学, 2012年09月19日~2013年09月21日  
(13) 松村和典, 飯塚亮, 坪井陽子, 他2名,  
“前主系列星V773 Tauの多波長同時観測  
III: X線、光赤外観測”  
日本天文学会2012年秋季年会, 大分大  
学, 2012年09月19日~2013年09月21日  
(14) 比嘉将也, 坪井陽子, 山崎恭平, 根来  
均, 中平聡志, 松岡勝, ほかMAXI チーム  
“全天X線監視装置MAXI/GSCを用いた星の  
巨大フレアの探査”  
日本天文学会2012年秋季年会, 大分大  
学, 2012年09月19日~2013年09月21日  
(15) 亀崎達矢, 井村健二, 面高俊宏, 半田  
利弘, James chibueze okwe, 山口善之, 永  
山匠, 砂田和良, 廣田朋也, 仲野誠, 坪井  
陽子, VERA チーム  
“星形成領域NGC2264の年周視差計測”  
日本天文学会2012年秋季年会, 大分大  
学, 2012年09月19日~2013年09月21日  
(16) 菅原泰晴, 矢澤涼, 坪井陽子(中央大学),  
前田良知(JAXA)

“Wolf-Rayet 連星系 WR 21a における謎の X  
線増光”  
日本天文学会2012年春季年会, 龍谷大学,  
2012年03月19日~2013年03月22日  
(17) 飯塚亮, 得能敦, 粟屋崇, 岡田豪太, 田  
山健, 中島弘章, 古澤優慈, 坪井陽子(中央大  
学)  
“湾曲結晶を用いたブラック反射型X線偏光  
計の開発とその現状”  
日本天文学会2012年春季年会, 龍谷大学,  
2012年03月19日~2013年03月22日  
(18) 山崎恭平, 坪井陽子, 松村和典(中央大  
学), 中平聡志, 松岡勝(理研), 富田洋, 上野  
史郎(JAXA), ほかMAXI チーム  
“全天X線監視装置MAXI/GSCで観測された  
星の巨大フレアの最新報告”  
日本天文学会2011年秋季年会, 鹿児島  
大学, 2011年09月19日~2011年09月22  
日  
(19) 菅原泰晴, 坪井陽子(中央大学), 前田良  
知(JAXA)  
“WO型Wolf-Rayet 連星からの硬X線放射”  
日本天文学会2011年秋季年会, 鹿児島  
大学, 2011年09月19日~2011年09月22  
日  
(20) 松村和典, 飯塚亮, 坪井陽子(中央大学),  
梅本智文, 廣田朋也(国立天文台), 時政典  
孝(西はりま天文台公園), 丹羽隆裕(八戸  
工業高専), 衣笠健三, 高橋英則, 橋本修(ぐ  
んま天文台), 綾仁一哉(美星天文台), 三澤  
浩昭, 土屋史紀(東北大学), 野上大作, 前  
原裕之, 蔵本哲也(京都大学), 磯貝瑞希,  
新井彰(京都産業大学), 大島修(岡山県立  
水島工業高等学校), 花山秀和, 福島英雄(石  
垣島天文台), 永井和男, 伊藤弘, 塩川和彦,  
藤井貢  
“前主系列星V773 Tauの多波長同時観測”  
日本天文学会2011年秋季年会, 鹿児島大  
学, 2011年09月19日~2011年09月22日  
(21) 岡田豪太, 得能敦, 粟屋崇, 坪井陽子,  
飯塚亮, 楠進吾, 村上弘明(中央大学)  
“X線偏光撮像を目指した湾曲Si結晶の曲率  
制御、偏光検出能力評価”  
日本天文学会2011年秋季年会, 鹿児島大  
学, 2011年09月19日~2011年09月22日  
(22) 宮崎諒平, 田代武, 坪井陽子(中央大学)  
“Chandra 衛星及びSpitzer 衛星による星生  
成領域L1228とIC5146の観測”  
日本天文学会2011年秋季年会, 鹿児島大  
学, 2011年09月19日~2011年09月22日  
  
〔図書〕(計 件)  
  
〔産業財産権〕  
出願状況(計 1 件)  
  
名称: 湾曲結晶の製造方法および湾曲結晶  
発明者: 飯塚亮, 坪井陽子  
権利者: 学校法人 中央大学  
種類: 特許権

番号：2012-147355  
出願年月日：平成 24 年 6 月 29 日  
国内外の別： 国内

取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

坪井 陽子 (TSUBOI YOHKO)  
中央大学・理工学部・教授  
研究者番号：70349223

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：