

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540239

研究課題名(和文) ブラックホール候補天体の深銀河探査と短時間変動解析による諸現象の理解

研究課題名(英文) Search for black hole candidates deep within our Galaxy and understanding of their accretion processes through short-term X-ray variability study

研究代表者

根来 均 (NEGORO, Hitoshi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30300891

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：全天X線監視装置 MAXI のデータを用いたX線新星等を発見する「突発天体発見システム」の改良を行った。その結果、GSC (ガススリットカメラ) 検出器の検出限界近くでの強度変動をリアルタイムで捉えられるようになり、本研究期間中に3つの新たなブラックホール候補天体を含む、計11個の新天体が発見された。また、MAXI のデータを用いた短時間変動解析(パワースペクトル解析)を確立し、MAXIのスキャン中の時間変動のデータからもブラックホール候補天体の状態遷移等の情報が得られることを確認した。さらに、SSC (半導体スリットカメラ) 検出器のデータを用いた突発天体発見システムの開発も行った。

研究成果の概要(英文)：The MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) nova-alert system to discover transient objects, such as X-ray novae, has been improved. As a result, the system can trigger on low flux variations near detection limits of GSC (Gas Slit Camera) detectors in realtime, and 11 X-ray transients including three black hole candidates were newly discovered. We have also established the method of the power spectrum analysis to investigate short-term variations during scan observations, and confirmed the state transition of black hole candidates from the power spectrum analysis. In addition, we developed a nova-alert system for SSC (Solid-state Slit Camera) data.

研究分野：X線天文学

キーワード：ブラックホール 宇宙ステーション X線観測 X線新星 突発天体 新天体 連星進化 全天X線監視装置 MAXI 国際宇

1. 研究開始当初の背景

MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は、国際宇宙ステーションに搭載され、2009年8月から全天観測を始めた全天X線監視装置である。私の研究室で開発した新天体等の突発天体を発見するシステム(以下、突発天体発見システム)により、新たな3つのブラックホール候補天体に新星爆発の初期点火を初めて捉えた MAXI J0158-744 を含む6つの新天体、潮汐破壊現象 Swift J1644+57 など、数多くの突発現象が発見された。それらの成果等により、2012年3月から2015年3月までの MAXI の延長運用が認められた。

MAXI が捉えたブラックホール候補等のX線新星はこれまで発見されたものより1桁以上暗いものが多く、その特徴と数から、(MAXIの全天に対する優れた検出感度により)我々の銀河の潜む数千万から数億個と見積もられる恒星質量ブラックホールがMAXIにより多く発見されたことが示唆された。

2. 研究の目的

MAXI の運用延長に伴い、突発天体発見システムをさらに改良することにより、天の川銀河に潜む新たなブラックホール候補天体を発見し、恒星及び連星進化の研究を行う。また、MAXI のデータを用いた、恒星質量ブラックホール近傍の様々なタイムスケールに対応する、10秒以下のタイムスケールでの短時間変動解析を確立する。それらMAXIによる観測と、米のSwift衛星の追観測によるデータを用いて、X線新星の出現から消滅までのブラックホール候補天体の包括的な研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 国際協力による突発天体の観測

突発天体発見システムにより発見された天体に対し、その正体の解明に向け、Astronomer's Telegram (ATel) や Gamma-ray Coordinates Network (GCN) を通じて世界に速報する。また、Swift チームの共同研究者らとともに Swift による追観測を行い、新天体の詳細な位置を決定し、多波長での追観測を可能にする。これらについては、MAXI チームとともにを行う。

(2) 突発天体発見システムの改良

MAXI は、スキャン観測のため、スキャン観測の度に(主に荷電粒子による)バックグラウンドが変動し、微弱な変動を捉える障害となっている。そこで、バックグラウンド特性を理解し、MAXI の検出限界である1日で15 mCrab (2-10 keV で約 3×10^{-10} erg/s) 近くまでの変動が捉えられるように突発天体発見システムを改良する。

(3) 短時間変動解析

MAXI はスキャン観測のため、点源に対する検出器の有効面積が時間的に変化し、点源

からの時間変動はその影響を受ける。シミュレーションにより、短時間変動に対する変動の検出限界を調査するとともに、スキャン観測の影響の補正方法を確立し、その検証を行う。

4. 研究成果

(1) 突発天体発見システムの改良と新天体の発見

バックグラウンド除去方法の改良と最適化を行い、MAXI の検出限界に近い強度変動をリアルタイムで捉えることができるようになった。その結果、新天体の早期発見のみならず、MAXI J1932+091 といった暗い新天体が本システムを用いて MAXI チームにより発見された。本研究期間中に開発改良を行った突発天体発見システムにより発見された新天体は、11 である(3つのブラックホール候補天体、5の中性子星連星系、3は不明)。

特に、ブラックホール候補天体に関しては、MAXI の稼働期間中に発見された数の半数の世界一となっている。また、既知天体の活動を含め、本研究期間中に本システムによって発見・検出され、MAXI チームから世界に速報された数は ATel に 119 件、GCN に 66 件である。

これらの成果を含めた突発天体発見システムとその成果を最終年度に論文発表した(Negoro et al. 2016)。

(2) ブラックホール候補天体や中性子星連星系等の高エネルギー天体の観測的研究

MAXI と Swift のデータを用いて、MAXI が発見した新天体や既知のブラックホール候補天体等のX線天体の研究を共同研究者らと行った。それらの研究を通じ、新天体の特徴を明らかにするとともに、ブラックホール候補天体の質量や、状態遷移と質量降着量との関係等を調べ、論文発表した。

また、MAXI のデータのみならず、共同研究者らと Suzaku や Kepler 衛星のデータを用いて、ブラックホール候補天体 Cyg X-1 や超巨大ブラックホール(ブレーザー) W2R 1926+42 の短時間変動の研究も行った。

(3) 短時間変動解析の確立と実データを用いた新たな結果

日大の大学院生鈴木和彦とともに、MAXI のスキャン観測のシミュレーションデータを作成し、そのデータをもとにパワースペクトル解析による時系列解析を確立した。パワースペクトル上でのスキャン観測の影響は、天体を示す時間変動のスペクトルに対し、スキャン観測による有効面積の時間変化のスペクトルを畳み込むことにより表わされる。

同研究により、有意な時間変動を検出するためには1スキャンでは1Crab程度以上の明るさが必要であること、複数のスキャン観測の平均を取ることにより白鳥座X-1星等の状態(state)の違いが判別できること、準周

期的振動(QPO)の検出が可能であることなどが確認できた。そして、2種類のハード状態を示した XTE J1752-223 の(太陽角制限により、MAXIのみが観測できた)明るいハード状態のパワースペクトルが初めて得られた。

(4) SSC データを用いた突発天体発見システムの開発

それまでは比例計数管を用いた GSC 検出器のデータのみを用いていたが、本研究期間中に、MAXI のもう一つの検出器 SSC のデータの較正が進み、利用できるようになった。そこで、SSC だけが観測可能な 2 keV 以下の突発天体を発見するため、日大の大学院生福島康介とともに、SSC データを用いた突発天体発見システムを開発した。

開発にあたりそれまでの SSC のデータを用いて SSC 特有の軟 X 線領域でのバックグラウンド特性を調査した。そして、GSC とは異なるデータ処理方法そのものを含め、GSC 用のシステムを SSC 用に改良した。データ較正による 1 日ほどの遅れはあるもののシステムとしてはほぼ開発が完了した。

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 26 件)

(1) Negoro, H. 他 41 名, *The Nova-Alert System and results of its first 68 months*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 68 (SP1), 2016, S1 (24 pages), DOI: 10.1093/pasj/psw016

(2) Sugimoto, J., Mihara, T., Kitamoto, S., Matsuoka, M., Sugizaki, M., Negoro, H., Nakahira, S., Makishima, K., *MAXI observations of long-term variations of Cygnus X-1 in the low/hard and the high/soft states*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 68 (SP1), 2016, S17 (17 pages), DOI: 10.1093/pasj/psw004

(3) Serino, M., Shidatsu, M., Ueda, Y., Matsuoka, M., Negoro, H. 他 4 名, *Low-mass X-ray binary MAXI J1421-613 observed by MAXI GSC and Swift XRT*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 67, 2015, A30 (7 pages), DOI: 10.1093/pasj/psv003

(4) Yoshikawa, A., Yamada, S., Nakahira, S., Matsuoka, M., Negoro, H., Mihara, T., Tamagawa, T., *Repeated short-term spectral softening in the low/hard state of the Galactic black hole candidate Swift J1753.5-0127*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 67, 2015, A11 (11 pages), DOI: 10.1093/pasj/psu140

(5) Sugimoto, J., Negoro, H., 他 6 名, *MAXI*

monitoring of blazars and black hole binaries, 2014 Fermi Symposium Proc., 査読無, 1, 2014, (5 pages), <http://arxiv.org/abs/1502.02408>

(6) Sawada, M., Mineshige, S., Yamada, S., Negoro, H., *Shot Analysis of Kepler Blazar W2R 1926+42*, 2014 Fermi Symposium Proc., 査読無, 1, 2014, (5 pages), <http://arxiv.org/abs/1502.02243>

(7) Isobe, N. 他 (12 名中 12 番目), *MAXI Investigation into the Long-term X-ray Variability from the Very-high-energy gamma-ray Blazar Mrk 421*, Astrophysical Journal, 査読有, 798, 2014, A27 (10 pages), DOI: 10.1088/0004-637X/798/1/27

(8) Serino, M. 他 (43 名中 21 番目), *MAXI observations of gamma-ray bursts*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 66, 2014, A87 (14 pages), DOI: 10.1093/pasj/psu063

(9) Nakahira, S., Negoro, H., 他 6 名, *A new X-ray nova MAXI J1910-057 (=Swift J1910.2-0546) and mass accretion inflow*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 66, 2014, A84 (12 pages), DOI: 10.1093/pasj/psu060

(10) Evans, P. A., 他 (27 名中 15 番目), *GRB 130925A: an ultralong gamma-ray burst with a dust-echo afterglow, and implications for the origin of the ultralong GRBs*, Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, 査読有, 444, 2014, pp. 250-267, DOI: 10.1093/mnras/stu1459

(11) Suzuki, K., Negoro, H., Sakakibara, H., Onodera, T., Fukushima, K., Nakagawa, Y., MAXI Team, *Short-term X-ray variability study using MAXI/GSC data*, Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 査読無, 1, 2014, pp. 230-231, http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/SuzakuMAXI2014/pdf/2014SM_conf_P230-P231.pdf

(12) Onodera, T., Negoro, H., Suzuki, K., Fukushima, K., Kennea, J., MAXI Team, *X-ray properties of MAXI J1647-227 observed by MAXI and Swift*, Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 査読無, 1, 2014, pp. 206-207, http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/SuzakuMAXI2014/pdf/2014SM_conf_P206-P207.pdf

(13) Kawagoe, A., Tsuboi, Y., Sugawa, Y., Maehara, Y., Hashimoto, O., Honda, S., Morihana, K., Iizuka, R., Higa, M., Usui, R., Negoro, H., MAXI Team, *The nature of the giant flare star HD 347929 detected with MAXI/GSC*, Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 査読無, 1, 2014, pp. 164-165, <http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/SuzakuMAXI2014/pdf>

/2014SM_conf_P164-P165.pdf
(14) Fukushima, K., Negoro, H., Onodera, T., Suzuki, K., Tomida, H., Kimura M., Yamada, H., Tsuboi, Y., Higa, M., Kawagoe, A., MAXI Team, *MAXI Nova-Alert System for the MAXI/SSC*, Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 査読無, 1, 2014, pp. 146-147, http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/SuzakuMAXI2014/pdf/2014SM_conf_P146-P147.pdf
(15) Negoro, H., MAXI Team, MAXI observes black-hole X-ray novae from the beginning to the end, Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 査読無, 1, 2014, pp. 128-133, http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/SuzakuMAXI2014/pdf/2014SM_conf_P128-P133.pdf
(16) Asai, K., Mihara, T., Matsuoka, M., Sugizaki, M., Nakahira, S., Negoro, H., Nakajima, M., Okazaki, A., *Sudden end of X-ray outbursts around periastron of Circinus X-1 observed with MAXI*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 66, 2014, A79 (13 pages), DOI: 10.1093/pasj/psu054
(17) Morii, M., Tomida, H., Kimura, M., Suwa, F., Negoro, H., 他 27 名, *Extraordinary Luminous Soft X-Ray Transient MAXI J0158-744 as an Ignition of a Nova on a Very Massive O-Ne White Dwarf*, Astrophysical Journal, 査読有, 779, 2013, A118 (13 pages), DOI: 10.1088/0004-637X/779/2/118
(18) Shidatsu, M., Ueda, Y., Nakahira, S., Done, C., Morihana, K., Sugizaki, M., Mihara, T., Hori, T., Negoro, H. 他 8 名, *The Accretion Disk and Ionized Absorber of the 9.7 hr Dipping Black Hole Binary MAXI J1305-704*, Astrophysical Journal, 査読有, 779, 2013, A26 (17 pages), DOI: 10.1088/0004-637X/779/1/26
(19) Morihana, K., Sugizaki, M., Nakahira, S., Shidatsu, M., Ueda, Y., Serino, M., Mihara, T., Matsuoka, M., Negoro, H., Kawai, N., *MAXI/GSC Discovery of the Black-Hole Candidate MAXI J1305-704*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 65, 2013, L10 (5 pages), DOI: 10.1093/pasj/65.5.L10
(20) Kawashima, T., Ohsuga, K., Usui, R., Kawai, N., Negoro, H., Matsumoto, R., *Recurrent Outbursts and Jet Ejections Expected in Swift J1644+57: Limit-Cycle Activities in a Supermassive Black Hole*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 65, 2013, L8 (5 pages), 10.1093/pasj/65.4.L8
(21) Asai, K., Matsuoka, M., Mihara, T.,

Sugizaki, M., Serino, M., Nakahira, S., Negoro, H., Ueda, Y., Yamaoka, K., *A Propeller-effect Interpretation of MAXI/GSC Light Curves of 4U 1608-52 and Aql X-1 and Application to XTE J1701-462*, Astrophysical Journal, 査読有, 773, 2013, A117 (7 pages), DOI: 10.1088/0004-637X/773/2/117

(22) Sugizaki, M., 他 (34 名中 18 番目), *Spectral Evolution of a New X-Ray Transient MAXI J0556-332 Observed by MAXI, Swift, and RXTE*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 65, 2013, A58 (14 pages), DOI: 10.1093/pasj/65.3.58

(23) Yamada, S., Negoro, H., Torii, S., Noda, H., Mineshige, S., Makishima, K., *Rapid Spectral Changes of Cygnus X-1 in the Low/Hard State with Suzaku*, Astrophysical Journal Letters, 査読有, 767, 2013, L34 (5 pages), DOI: 10.1088/2041-8205/767/2/L34

(24) Asai, K., Matsuoka, M., Mihara, T., Sugizaki, M., Serino, M., Nakahira, S., Negoro, H., Ueda, Y., Yamaoka, K., *Slow and Fast Transitions in the Rising Phase of Outbursts from NS-LMXB Transients, Aquila X-1 and 4U 1608-52*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 64, 2012, A128 (14 pages), DOI: 10.1093/pasj/64.6.128

(25) Negoro, H., Ozawa, H., Suwa, F., Asada, M., Serino, M., MAXI Team, *Development of the MAXI Nova Alert System and the Photon Event Database*, ASP Conference Series, 査読無, 461, 2012, pp. 797-800, <http://aspbooks.org/custom/publications/paper/461-0797.html>

(26) Usui, R. 他 (31 名中 17 番目), *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, 査読有, 64, 2012, A79 (7 pages), DOI: 10.1093/pasj/64.4.79

〔学会発表〕(計 19 件)

(1) 根来 均 他、全天 X 線監視装置 MAXI による 2014-2015 年度の科学成果、日本物理学会、2016 年 3 月 21 日、東北学院大学 (宮城県仙台市)

(2) 根来 均 他、MAXI が検出した 2015 年度後半の突発現象と検出限界光度近くの突発天体の検出、日本天文学会春季年会、2016 年 3 月 17 日、首都大学東京 (東京都八王子市)

(3) 根来 均、残されたブラックホール観測の課題、第 9 回「ブラックホール磁気圏勉強会」研究会、2016 年 3 月 4 日、マウントレースイホテル (北海道夕張市)

(4) Negoro, H., MAXI 's Gravitational Wave Followup Program, 4th Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, 2016年2月19日、東京大学柏キャンパス(千葉県柏市)

(5) 根来 均 他、2015年にMAXIが発見した新天体と突発現象、第16回宇宙科学シンポジウム、2016年1月6-7日、宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

(6) Negoro, H. MAXI Team, MAXI All-sky Survey for over 5 Years, INTEGRAL Workshop 2015, 2015年10月9日、ローマ(イタリア)

(7) 根来 均 他、MAXIが検出した2015年度前半の突発現象、日本天文学会秋季年会、2015年9月8-11日、甲南大学(兵庫県神戸市)

(8) 根来 均 他、理論降着円盤モデルと観測降着円盤モデル、降着円盤大研究会 2015、2015年6月21日、京都大学(京都府京都市)

(9) 根来 均 他、高銀緯X線新星 MAXI J1619-383の発見とMAXIが検出した2014年度後半の突発天体、日本天文学会春季年会、2015年3月19日、大阪大学(大阪府豊中市)

(10) Negoro, H., MAXI detection of new transients, 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014年8月5日、モスクワ(ロシア)

(11) 根来 均 他、全天X線監視装置 MAXIによる最近の成果、日本物理学会、2014年3月30日、東海大学(神奈川県平塚市)

(12) 根来 均 他、ブラックホール候補天体 MAXI J1828-249の発見とMAXIが検出した2013年度後半の突発天体、日本天文学会春季年会、2014年3月20日、国際基督教大学(東京都三鷹市)

(13) Negoro, H., MAXI observes black-hole X-ray novae from the beginning to the end, Suzaku-MAXI 2014 "Expanding the Frontiers of the X-ray Universe", 2014年2月20日、愛媛大学(愛媛県松山市)

(14) 根来 均 他、MAXIにより2013年に発見された暗いX線源、第14回宇宙科学シンポジウム、2014年1月9-10日、宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

(15) Negoro, H., Recent highlight events related with MAXI, INTEGRAL workshop "INTEGRAL's journey through the high energy sky", 2013年10月15日、ローマ(イタリア)

(16) 根来 均 他、MAXIが発見検出した2013年度前半の突発天体と突発現象、日本天文学会秋季年会、2013年9月11日、東北大学(宮城県仙台市)

(17) 根来 均 他、X線新星 MAXI J1910-057/Swift J1910.2-0546の減光中に見られた再/再々増光と状態遷移、日本物理学会、2013年3月29日、広島大学(広島県広島市)

(18) 根来 均 他、2012年における MAXI に

よる新天体の発見と突発現象の発見、第13回宇宙科学シンポジウム、2013年1月8-9日、宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

(19) Negoro, H., 3 years all-sky X-ray observations with MAXI, Half a Century of X-ray Astronomy, 2012年9月20日、ミコノス(ギリシャ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

根来 均 (NEGORO, Hitoshi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 30300891

(2) 研究協力者

福島 康介 (FUKUSHIMA, Kosuke)

鈴木 和彦 (SUZUKI, Kazuhiko)

小野寺 卓也 (ONODERA, Takuya)