

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340043

研究課題名（和文）全天 X 線監視装置 MAXI によるブラックホール候補天体の包括的研究

研究課題名（英文）Comprehensive Study of Black Hole Candidates with Monitor of All-sky X-ray Image, MAXI

研究代表者

根来 均 (NEGORO HITOSHI)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：30300891

研究成果の概要（和文）：

国際宇宙ステーションに搭載した全天 X 線監視装置 MAXI は 2009 年の 8 月から全天の X 線観測を始めた。それと同時にそれまで開発してきた突発天体発見システムを稼働させ、同システムによりこれまでに 3 つの新たなブラックホール候補天体を発見し、既知のブラックホール候補天体の再増光やそれらの天体の状態遷移などを捉えることにも成功した。それらの結果を世界に速報することにより、多波長で追観測が行われ、新天体の正体や性質等が明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

Monitor of All-sky X-ray Image, MAXI, on International Space Station began the all-sky X-ray survey since August 2009. Simultaneously, we started to work the nova-alert system we had developed. With the system, 3 unknown black hole candidates were discovered, and renew activities from known black hole candidates and state transitions of these sources were also detected. Prompt alert about these discoveries to the world led to successful multi-wavelength follow-up observations, which revealed the nature of the sources.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	8,100,000	2,430,000	10,530,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：X 線  $\gamma$  線天文学、ブラックホール、国際宇宙ステーション、MAXI

## 1. 研究開始当初の背景

これまで 50 個余りのブラックホール候補天体 (black hole candidates, 以下 BHC) が銀河系内で発見されてきたが、その 9 割以上が X 線新星と呼ばれる、突然輝きだし、数 10 日から数 100 日のタイムスケールで減光する突発天体である (e.g., McClintock &

Remillard 2006)。X 線新星の 3-4 桁以上わたる大きな光度変化は、伴星からの質量降着の変化によるものと考えられている。

BHC は光度に応じて様々な様相 ("state" 状態) を示すので、光度変化の振幅が大きい X 線新星は、BHC を包括的に研究する上で最も適した天体と言える。

実際、X線新星には相対論的ジェットが発見されたGRS 1915+105やGRO J1655-40、ブラックホールの自転運動(角運動量)が測定し得る高周波数準周期的振動(HF-QPO)が発見されたXTE J1550-564やXTE J1859+226などがあり、ジェットやHFQPOの出現とその時の高い質量降着率(高光度)には強い相関があることがわかっている。

逆に低光度時の観測においては、事象の地平線の有無、つまりブラックホール存在の直接証拠ともなり得る研究がA0620-00やGS 2023+338などのX線新星を観測することによりなされた(Narayan et al. 1997)。

また、X線新星V4641 Sgrといった短期間に増減光を繰り返す特異な振る舞い示す天体も近年発見された。

以上のように、近年のBHCに関する発見や進展のほとんどがX線新星の観測を通じてなされている。しかし、これまでX線新星は年間1-2個しか発見されず、また、上記のような大変興味深い観測例もまだ少なく、現象としての理解もまだ始まったばかりでその解釈も仮説の段階にある。

それにも拘らず、これまで多くのX線新星を発見してきた米のRXTE衛星は2009年に運用停止の可能性もあり(実際は2011年末まで延長された)、X線新星を発見できるX線観測装置は、2009年にISSの日本実験棟「きぼう」に設置予定の全天X線監視装置MAXIだけとなる。

根来は、それまで行ってきたブラックホール天体の研究を進めるべく、2000年頃からMAXIの軌上データ処理部や地上データベースの開発等を行い、近年はX線新星などの突発天体を発見するためのシステム(突発天体発見システム)の開発に注力してきた。

## 2. 研究の目的

これまで開発を続けてきた突発天体発見システムを用いて、それまでより一桁多い年間10個程度のX線新星を発見し、その質量降着率の大きな変化を利用して様々な質量降着状態でのBHCの包括的研究を行う。

そして、ブラックホールと考えられている中心天体の質量と角運動量、そして、ブラックホール存在の直接証拠を掴むことを最終目的とする。

## 3. 研究の方法

MAXI打ち上げまではシミュレーションデータを用いて突発天体発見システムの完成度をあげることに専念する。また、稼働後は、実際のバックグラウンドレベル等に合わせたシステムのパラメータの最適化を行う。X線新星が発見されれば、位置の正確な決定と必要に応じて他の望遠鏡等に追観測の要求を行い、各研究テーマを遂行する。そして得

られた観測結果をもとに、連携研究者らとともに各種現象の解明を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 突発天体発見システムの開発

2010年7月に全天X線監視装置MAXIが国際宇宙ステーションに取り付けられ、8月から観測を始めた。研究計画に記した通り、ブラックホール候補天体等のアウトバーストを検出する「突発天体発見システム」(図1参照)を筑波宇宙センター内に設置し、日本大学の大学院生三好翔や小澤洋志らとともに実データに合わせたシステムの改良や突発天体発見のための閾値の最適化を行った。

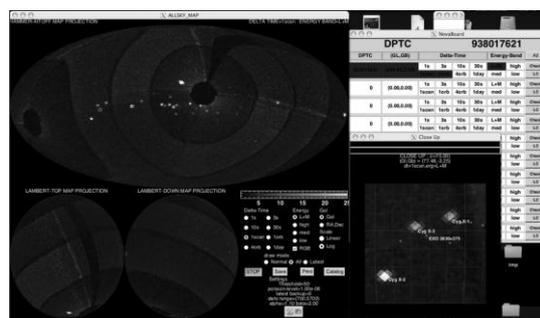


図1 突発天体発見システムのグラフィックユーザーインターフェイス部分

同システムにより、運用開始当初からリアルタイムの全天イメージを得ることができ、さらには同年11月に速報機能も追加して自動検出を可能にした。2011年度末までには有効面積の自動補正、バックグラウンド処理など全てリアルタイムで処理が行えるようになり、MAXIの検出限界である1日で15 mCrab程度の明るさの新天体まで自動で検出可能となった。

また、大学院生諏訪文俊により、ガンマ線バーストのような短時間での急激な強度変動に対しては、機上で検出後、最短で約10秒で全世界への速報が可能となった。

この突発天体発見システムにより、以下に記すブラックホール候補天体を含む、様々な天体の突発現象が発見された。

### (2) 新たなブラックホール候補天体の発見

突発天体発見システムにより、2010年9月25日にMAXI J1659-152を発見し、The Astronomer's Telegram(以下 ATel)に報告した(Negoro et al., ATel. 2873)。また、JAXAからもプレスリリースを行った。続いて2011年5月8日にはMAXI J1543-564(Negoro et al., ATel. 3330)を、同年8月30日にはMAXI J1836-194(Negoro et al., ATel. 3611)を同システムにより発見した。

MAXI の速報の後、世界の多くの天文台や衛星によるこれらの天体の多波長観測が行なわれ、これらの天体がブラックホールである可能性が極めて高いことがわかった。ATelでの発見報告の引用は、その後行われた追観測の報告がほとんどであり、その引用回数は上記の4天体に関してはこれまでそれぞれ、26回、11回、13回、7回となっている。

また、これらの発見等を通じて、米のSwiftチームのJ. Kenneaとは密に連絡を取り合い、MAXIが新天体を発見すると即座にSwiftによって追観測がなされるような体制が整った。

これらの新天体は、世界中の多くの研究者によって、Swift衛星やRXTE衛星により頻繁に観測され、それらのデータを用いて多くの研究がなされた。また、MAXIチームからも日本の「すざく」衛星にToO観測を要請し、ワイドバンドでの貴重なデータが得られている。

特にMAXI J1659-152については、これまで知られたBHCの中でもっとも短い連星の軌道周期(2.4-2.5時間)を持つことが可視光観測から示された。

### (3) 既知のブラックホール候補天体の監視

新天体のみならず、突発天体発見システムにより、既知のBHCであるH1743-322, 4U1630-47, GX 339-4などの再増光(アウトバースト)やXTE J1752-223, H1743-322, Swift J1753.5-0127などの状態遷移も同システムにより捉え、共同研究者らとともにATelに世界に先駆けて報告した。特に、2010年7月の白鳥座X-1の5年ぶりのソフトステートへの遷移の報告(Negoro et al., ATel 2711)に対しては、これまでに10以上の追観測等の報告がなされている。

先の新天体の発見報告を含め、MAXIによるこれらの報告(速報)によって行われた追観測により、電波観測による様々な状態でのジェットの有無や、可視光観測による伴星の性質や連星軌道周期、X線観測によるブラックホール質量の間接的測定となる降着円盤内縁の半径、そして、硬X線 $\gamma$ 線観測による非熱的成分の有無などを示すデータが多く得られた。

それらは、ジェットの発生機構を含む、様々な状態での降着円盤の物理的状態の解明や連星進化の研究に今後多いに役立つものと考えられる。

### (4) 突発天体発見システムにより発見された特異な天体や現象

2011年3月28日には、Swift衛星が先に捉えたSwift J164449.3 +573451の微弱な増光を突発天体発見システムのサブシステムが捉え、Swift衛星が頻繁に検出するガンマ

線バーストのような天体ではないことを世界に速報した(Kimura et al., ATel. 3244)。MAXIの過去の同領域のデータやその後の多波長での追観測により、遠方の銀河の中心にある巨大ブラックホールによる近傍の恒星の潮汐破壊によるもの、つまりは、星が巨大ブラックホールに吸い込まれる瞬間を捉えたと解釈でき、Natureにその結果が掲載され(Burrows et al. 2011)、日本側でもMAXIの成果としてプレスリリースを行った。

突発天体発見システムにより、BHC以外では2011年11月11日には特異な超軟X線源(Super-soft X-ray Source)が検出され、発見後約1分で世界に自動速報された。また、同システムは、MAXI J0556-332等の中性子星と考えられる新天体の発見や、中性子星の再活動(アウトバースト)や星からのフレア、ガンマ線バースト、AGNのフレアの検出など、多くの天文分野の研究に役立っている。

### (5) 今後の展望

以上のように、MAXIの優れた検出感度と広視野を最大限に活かした突発天体発見システムをよって、BHCに関しては世界に先駆け新天体や多くの現象を発見してきた。

それでもMAXI打ち上げ前の発見数予想を下回っているのは、種々の原因によるMAXIの検出限界の悪化に加え、MAXI打ち上げ以降、1Crabを超えるような明るいBHCが一つも現れていないことも大きな要因である。

しかし、図2に示すように、MAXIが発見

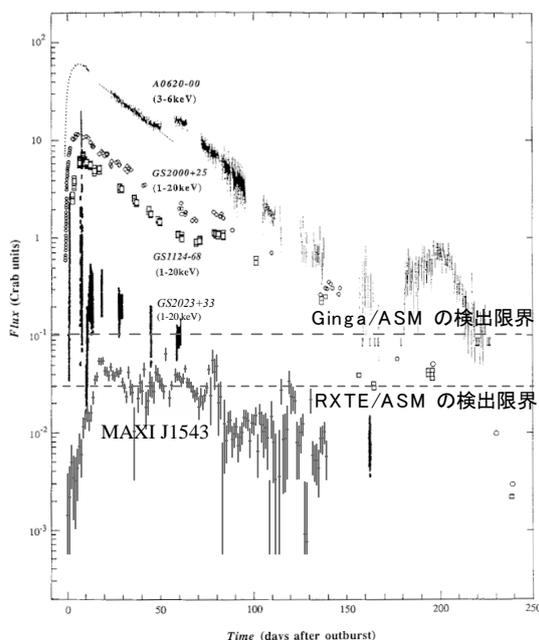


図2. MAXI J1543-564とこれまでX線新星の光度曲線(元の図はTanaka & Shibasaki 1996より)

してきた BHC はこれまでの全天モニター (ASM) では発見が困難であった暗いものまで、その発見から終息まで見事に捉えており、運用が続く限り、今後も成果は期待できる。

この3年間は、突発天体発見システムの開発を通じて世界に先んじて発見・報告し、新星の初期活動を捉えることに専念してきた。しかし、今後はこれまで得られている MAXI や追観測による種々のデータを用いて、最終的な研究目的であるブラックホール「候補天体」特有の諸現象と理論的に予想されるブラックホールそのものとの関係を理解する研究に重点を徐々に移して行う予定である。

#### 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 22 件)

1. Negoro, H. and MAXI Team, Outbursts and State Transitions in Black Hole Candidates Observed by MAXI, The First Year of MAXI, 査読無, 2012, pp.63-67 [http://maxi.riken.jp/FirstYear/proceedings/procindex.html]
2. Shidatsu, M., Ueda, Y., Nakahira, S., Negoro, H., Yamaoka, K., 他 27 名, Long-Term Monitoring of the Black Hole Binary GX 339-4 in the High/Soft State during the 2010 Outburst with MAXI/GSC, PASJ, 査読有, Vol. 63, 2011, pp. S803-S811
3. Burrows, D., 他 57 名 Negoro, H. (38 人目), Ueda, Y. (46 人目), Relativistic jet activity from the tidal disruption of a star by a massive black hole, Nature, 査読有, Vol. 476, 2011, pp. 421-424
4. Nakahira, S., Yamaoka, K., Sugizaki, M., Ueda, Y., Negoro, H., 他 26 名, MAXI GSC Observations of a Spectral State Transition in the Black Hole Candidate XTE J1752-223, PASJ, 査読有, Vol. 62, 2011, pp. L55-L60
5. Negoro, H., Miyoshi, S., Ozawa, H., Ishiwata, R., Nakajima, N., Matsuoka, M., Kawasaki, K., Ueno, S., Tomida, T., Suzuki, M., Ishikawa, M., Mihara, T., Kohama, M., Sugizaki, M., Nakagawa, Y., Tsunemi, H., Kawai, N., Morii, M., Yoshida, A., Yamaoka, K., Ueda, Y., Isobe, N., and Eguchi, S., MAXI Nova Alert System and the Latest Scientific Results, AIP Conf. Proc., 査読無, Vol. 1248, 2010, pp. 589-590
6. Negoro, H., Miyoshi, S., Ozawa, H., Ishiwata, R., Ueno, S., Tomida, H., Suzuki, M., Matsuoka, M., Kohama, M., Mihara, T., Sugizaki, M., Kawai, N.,

Yoshida, A., Eguchi, S., and MAXI Team, Real-time X-ray Transient Monitor and Alert System of MAXI on the ISS, ASP Conf. Series, 査読無, Vol. 434, 2010, pp. 127-130

[学会発表] (計 25 件)

1. Negoro, H., Ozawa, H., Suwa, F., Asada, M., Serino, M., and the MAXI Team, Development of the MAXI alert system and the photon event database, ADASS XXI, 2011 年 11 月 6-10 日, 仏パリ
2. 根来 均 他, ブラックホール候補天体 MAXI J1543-564 の発見, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学
3. Negoro, H., Kawai, N., Yamaoka, K., and MAXI Team, Discoveries of New Black Hole Transients MAXI J1659-152 and MAXI J1543-564, Suzaku 2011 Exploring the X-ray Universe, 2011 年 7 月 20-22 日, 米カルフォルニア
4. 根来 均 他, 全天 X 線監視装置 MAXI による MAXI J1659-152 の発見と「すざく」による追観測, 日本天文学会 2011 年春季年会, 2011 年 3 月 17 日, 筑波大学
5. Negoro, H. and MAXI Team, MAXI Capabilities for Accreting Compact Object Studies, COSPAR 10, 2010 年 7 月 21 日, 独ブレーメン
6. 根来 均, X 線観測の現状と課題, 日本物理学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学
7. Negoro, H. and MAXI Team, MAXI Nova Alert System, HEAD Meeting, 2010 年 3 月 2 日, 米ハワイ

[その他]

MAXI のホームページ <http://maxi.riken.jp>

ATel: The Astronomer's Telegram への報告 87 編 (内、主著者 16 編, 主要なものについては 4 の研究成果に記した。)

GCN: The Gamma-ray Coordinates Network への報告 23 編 (内、主著者 1 編)

JAXA からのプレスリリース

1. 全天 X 線監視装置 (MAXI) による X 線新星の発見について  
発表日時: 平成 22 年 9 月  
URL:  
[http://www.jaxa.jp/press/2010/09/20100929\\_maxi\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2010/09/20100929_maxi_j.html)
2. 「きぼう」に搭載された全天エックス線監視装置 (MAXI: マキシ) と 米国スウィフト衛星を用いた観測による成果論文の英科学誌「ネイチャー」への掲載につ

いて - 巨大ブラックホールに星が吸い  
込まれる瞬間を世界で初めて観測 -

発表日時：平成 23 年 8 月 25 日

URL:

[http://www.jaxa.jp/press/2011/08/20110825\\_maxi\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2011/08/20110825_maxi_j.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

根来 均 (NEGORO HITOSHI)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：30300891

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

松岡 勝 (MATSUOKA MASARU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・

宇宙科学研究本部・

プロジェクト共同研究員

研究者番号：30013668

富田 洋 (TOMIDA HIROSHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・

宇宙科学研究本部・主任開発員

研究者番号：30399547

上野 史郎 (UENO SHIRO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・

宇宙科学研究本部・主任開発員

研究者番号：60415916

三原 建弘 (MIHARA TATEHIRO)

独立行政法人理化学研究所・MAXI チーム・

前任研究員

研究者番号：20260200

吉田 篤正 (YOSHIDA ATSUMASA)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：80240274

嶺重 慎 (MINESHIGE SHIN)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：70229780

松元 亮治 (MATSUMOTO RYOJI)

千葉大学・理学研究科・教授

研究者番号：00209660

上田 佳宏 (UEDA YOSHIHIRO)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10290876

山岡 和貴 (YAMAOKA KAZUTAKA)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：00365016

### 研究協力者

河合 誠之 (KAWAI NOBUYUKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：80195031