

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12608

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24103002

研究課題名(和文)重力波天体からのX線・ガンマ線放射の探索

研究課題名(英文)Search for X/gamma radiation from gravitational wave sources

研究代表者

河合 誠之(Kawai, Nobuyuki)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：80195031

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 193,400,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙における重力波発生の物理的過程や発生源となる天体の起源を明らかにするため、重力波にほぼ同期して出現するX線・ガンマ線対応天体の探索を実施した。LIGOが史上初めて重力波を検出したブラックホール合体事象GW150914など複数の重力波事象に対して全天X線監視装置MAXIとCALET CGBMによりX線・ガンマ線放射を探索し、上限値を得た。また広天域突発X線放射探索ミッション WF-MAXIの開発を進め、ISS搭載ミッションとして提案した。また、重力波関連天体である中性子星、ブラックホール、およびガンマ線バーストをMAXI, Swift, Fermi, CALETなど多様な手段で観測した。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the physical processes working during the emission of gravitational waves (GW) and the origin of the astrophysical GW sources, we searched for X and gamma-ray counterparts of GW events detected by LIGO including GW150914, the black hole merger event with the first GW detection, using the MAXI all-sky X-ray monitor and the CALET gamma-ray burst monitor on the International Space Station, obtaining upper limits for X/gamma radiation. Furthermore, we conducted concept study of WF-MAXI mission that can efficiently detect transient X-ray emission from GW events with its Large-solid angle Soft X-ray Camera. We developed and built a laboratory model, and we proposed this mission as an ISS payload. In addition we observed astrophysical sources involved in GW emission such as neutron stars, black holes, and gamma-ray bursts using various missions, MAXI, Swift, Fermi, and CALET.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙物理 X線天文学 重力波 ガンマ線バースト X線検出器 ブラックホール 中性子星

## 1. 研究開始当初の背景

### 重力波検出への期待の高まり

米欧の LIGO, Virgo に続いて、わが国でも重力波望遠鏡 KAGRA の建設が始まり、2012 年から 5-6 年のうちに重力波が検出される可能性が高まってきた。重力波事象が検出された場合、その源を明らかにし、物理を理解するためには重力波以外の確立された方法で発生源を直ちに明らかにする必要がある。

### 対応天体探索における X 線・ $\gamma$ 線の重要性

突発的な重力波の発生が期待される中性子星連星の合体や、恒星の重力崩壊など破局的な天体現象では、重力波とともに様々な形態のエネルギーが放射される。中性子星連星合体を起源とすると考えられる短い GRB は長い軟 X 線放射を伴う例が知られている。

研究開始時点(終了時点でも)ガンマ線・硬 X 線領域では Swift 衛星 BAT と Fermi 衛星 GBM という二つの広天域を監視する装置が稼働している一方、10keV 以下の軟 X 線領域では、国際宇宙ステーション上に日本が設置した全天監視装置 MAXI が稼働しており、常に 92 分ごとに全天の 85% を掃天する。

## 2. 研究の目的

本研究には、(1) 重力波発生に伴う X 線・ $\gamma$  線を観測し、そこで起きている現象とその物理過程を明らかにすること、(2) ガンマ線バーストやブラックホール、中性子星などの天体を観測することによって、重力波源となる天体の分布や進化などを明らかにすること、という二つの最終目標がある。そこを目指して期間内には以下の二つの研究を実施する。

### 大視野観測装置による重力波対応 X 線・ $\gamma$ 線放射の検出

到来方向決定精度が低い重力波源を特定するには、以下の 2 段階の観測が必要である。

(1) 重力波と同期して発生する電磁波現象を捕えるために大天域の継続的監視。

(2) それによって高精度の位置が決まったら、高感度の望遠鏡で直ちに即応観測。

本研究では、すでに稼働中のミッションを最大限活用して観測を実施するとともに、継続的監視性能を向上させた軟 X 線広天域監視装置を緊急に開発する。

### 重力波源候補天体現象の観測研究

ガンマ線バーストの一部は、最も確実な重力波源である中性子星連星の合体によって発生すると考えられている。また超新星爆発も近年の観測や理論計算によれば非球対称を持ち重力波源となる。これらの巨大爆発現象、その前駆天体(X線連星等)、あるいは超新星残骸の地上および衛星からの多波長観測によって、重力波源と想定される天体の起源と物理機構の解明をめざす。

## 3. 研究の方法

上に掲げた第一の目標、特に研究期間内に LIGO または KAGRA によって検出される重力波事象の X 線 $\gamma$  線対応天体の探索と追跡観測に

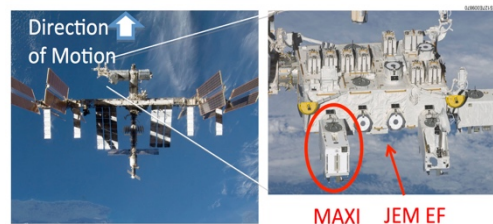


図 1. ISS 日本実験棟船外部 (JEM-EF) に取り付けられた MAXI

は既存の地上望遠鏡、X 線衛星などを活用する。特に、国際宇宙ステーション ISS 上の X 線全天監視装置 MAXI は 10keV 以下の軟 X 線領域で全天を監視する世界唯一の観測装置である。本研究では重力波の速報に対応して、ただちに誤差領域の新天体の有無を重点的に調べる自動解析システムを開発し、活用する。さらにメンバーが国際チームに参加している Swift 衛星や Fermi 衛星による観測、研究期間中に ISS に新しく設置される CALET GRB モニターも用いる。

一方、MAXI は掃天型の全天モニターであり、瞬間的な視野は全天の 2% に過ぎないため、継続時間が短い現象に対しても確実に電磁波で発見・観測するためには、大立体角突発 X 線監視装置が必要であり、そのような観測装置“WF-MAXI”を迅速に開発する。通常の科学衛星の開発のスケジュールでは時間がかかりすぎて重力波検出の最初の山場に間に合わないため、すでに軌道運用されており、MAXI 開発・運用の経験のある ISS のミッションとする。電源・通信・冷却系などの基盤が用意されており、特に、軌道上の 70% の時間で地上との実時間通信ができることは、速報が重要な突発天体監視のプラットフォームとして、非常に有利であり、すでに宇宙実証済みの要素技術を組み合わせることで下記 2 種類の装置を開発する。

**SLC (軟 X 線大立体角カメラ)**：MAXI 搭載のスリットカメラ SSC では 32 個の X 線 CCD を用いたが、これを 128 個に増やし (機械式冷凍機によって -120°C まで冷却)、光学系をスリットから符号化マスクに変えて大立体角と高い位置分解能 (2 分角) を達成する。

**HXM (硬 X 線モニター)**：CsI シンチレータと APD を組み合わせた硬 X 線検出器で 20-400 keV の硬 X 線スペクトルを測定するとともに、ガンマ線バーストのトリガーをかける。検出器の基本要素は超小型衛星 Tsubame のために開発済みである。

第 2 の研究目的である重力波源候補天体の観測研究としては、MAXI、すざく、Swift 等の衛星を用いて、GRB、中性子星連星、ブラックホールの観測を進める。MAXI による GRB やブラックホール連星の自動検出のための「ノバサーチ」システムの改良・高度化も進める。

## 4. 研究成果

### 重力波事象の X 線 $\gamma$ 線対応天体の探索

LIGO-Virgo Science Collaboration と覚書を結んで LIGO から重力波発生の速報を受け

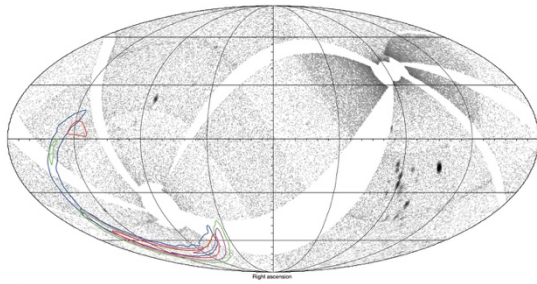


図2. GW150914 発生後の 90 分間 (ISS の軌道 1 周回) で得られた MAXI による全天画像。天球図内の左下の等高線によって示される LIGO による到来方向誤差領域の大部分をカバーしている。

取り、ISS 上で全天 X 線監視装置 MAXI と CALET ガンマ線バーストモニター CGBM により X 線・ $\gamma$  線放射の探索を実施するシステムを整えた。研究期間の 2015 年 9 月から LIGO 第 1 期観測 (O1) が実施され、人類史上初の重力波検出が実現した。このことは本領域・本研究が実証的な時期に提案・実施されたことを示すものである。一方で、検出された重力波は研究開始時点では想定していなかった太陽の約 30 倍の質量をもつ 2 個のブラックホールの合体であった。この最初の重力波事象 GW150914 に対しては MAXI を用いて X 線対応天体の探索を行い、1 日以内に LIGO による誤差領域を 90% 以上カバーしたが、新しい X 線源は検出されず、上限値を得た。さらにこの直後に運用を開始した CALET も含め、LIGO O1 で検出された複数の重力波事象に対して、X 線・ $\gamma$  線放射の上限値を得た。これらのブラックホール合体では周囲に通常物質が存在することは期待されないため、電磁波放射が検出されなかったことは意外ではない。GW150914 に対して得られた上限値も MAXI のこのような探索に対する MAXI の感度を示すもので、中性子星合体に対するある種のモデルを制限するのに十分な感度をもつことも示された。

### WF-MAXI の開発

一方、突発的な重力波の X 線対応天体を MAXI より効率良く検出するため、軟 X 線大立体角カメラを主要観測装置とする WF-MAXI の概念検討と実験室モデル開発を実施した。その主観測装置となる軟 X 線大立体角カメラ SLC に対しては専用の CCD 素子を開発し、熱設計を考慮した試作品を製作した。またこのために新規開発した CCD 素子の宇宙利用に関わる性能評価を行った。副観測装置である硬 X 線モニター HXM も信号処理 ASIC を新規開発して試作品を製作し、性能評価を実施した。これらをもとに ISS 搭載ミッションとしての解を得て概念検討書、システム仕様書等を完成させた。このことで、本研究としての当初の目標を達成したこととなる。本研究ではカバーされないその次の段階として、実際に軌道上で稼働する装置を製作し宇宙ステーションに運搬するためには、JAXA のプロジェクトとして採用されなくてはならない。そのため、この概念

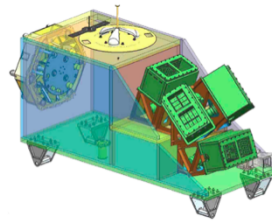


図3. 平成 26 年に提案した WF-MAXI の外観図。SLC 4 台と HXM を搭載する

設計をもとに平成 26 年に宇宙科学研究所小規模プロジェクト公募に ISS 搭載ミッションとして応募したが、当時は重力波検出の実現する前でその可能性を懸念する意見もあり、コストに科学的価値が見合わないとして不採択となったため。そのため設計を見直し (本研究中間評価指摘事項への対応)、規模を縮小して、本研究開始時には使えなかったがちょうど開発が完了した共用バスを用いて低コストを実現した結果、平成 27 年の再応募では宇宙理学委員会の審査でプロジェクト化が推薦された。しかし、JAXA の判断として開発すべきミッションには採用されなかった。重力波検出の可能性が広く認識されていなかったのは残念である。

### 重力波源候補天体現象の観測研究

ブラックホール連星、中性子星の観測研究においては MAXI, Swift, Fermi 等を用いた実施し、多数の新天体の発見と同日、GRB の観測などを国際コミュニティに速報するとともに、データを公開し、解析結果を学術誌に発表した。MAXI による突発天体の監視からは、新種の大光度軟 X 線新星 MAXI J0155-744、観測史上最上位の強さを持つ GRB130427A の観測、MAXI カタログ、新しいブラックホール連星の発見などの成果を上げた。詳細は主な発表論文・学会発表の項に掲載する。また、MAXI の突発天体の情報と観測データは無条件に世界に公開され、国際的な研究の活性化に貢献している。MAXI はほぼ毎年 1 個の割合で新しいブラックホール連星を発見しているが、世界の多数の研究者が MAXI 公開情報を活用して、MAXI チームとは独立な研究を行っている。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者等には下線)  
〔雑誌論文〕 (計 17 件)

1. Kimura, M.; Tsunemi, H.; Tomida, H.; et al. "Is the Cygnus Superbubble a Hypernova Remnant?", PASJ 査読有 65 (2013) No14 (1-8) DOI:10.1093/pasj/65.1.14
2. Morii, M.; Tomida, H.; Kimura, M.; Suwa, F.; Negoro, H.; Serino, M.; Mihara, T. et al "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) 118 (13pp) DOI: 10.1088/0004-637X/779/2/118
3. Serino, M.; Sakamoto, T.; Yoshida, A.; Kawai, N.; Morii, M.; Sugizaki, M.; Nakahira, S.; Negoro, H.; Mihara, T. et al. "GRBs Observed by MAXI", EAS Publications Series

- 査読有 61 (2013) 59–63 DOI:  
10.1051/eas/1361007
4. Hiroi, K., Ueda, Y., Mihara, T. et al. “The 37 month MAXI/GSC source catalog of the high galactic-latitude sky”, *Astrophysical Journal supplement* 査読有 207 (2013) 36 (12pp) DOI: 10.1088/0067-0049/207/2/36
  5. Morihana, K., Nakahira, M., Ueda, Y., Mihara, T., Negoro, H. et al “MAXI/GSC Discovery of the Black Hole Candidate MAXI J1305–704”, *PASJ* 査読有 65 (2013) L10 (5pp) DOI: 10.1093/pasj/65.5.L10
  6. Kawai, N.; Tomida, H.; Yatsu, Y.; Mihara, T.; Ueno, S.; Kimura, M.; Arimoto, M.; Serino, M.; Sakamoto, T.; Tsunemi, H.; Kohmura T.; Negoro, H.; Ueda, Y.; Morii, M.; Tsuboi, Y.; Ebisawa, K.; Yoshida, A. “Wide-field MAXI: soft x-ray transient monitor on the ISS” *SPIE* 査読無 9144 (2014) 91442P (1–9) DOI: 10.1117/12.2057188
  7. Arimoto, M.; Yatsu, Y.; Kawai, N.; et al. “Development of the hard x-ray monitor onboard WF-MAXI” *SPIE* 査読無 9144 (2014) 5Z(1–10) DOI: 10.1117/12.2054942
  8. Kimura, M.; Tomida, H.; Ueno, S.; Kawai, N.; et al. “Development of soft x-ray large solid angle camera onboard WF-MAXI” *SPIE* 査読無 9144 (2014) 60(1–6) DOI: 10.1117/12.2055610
  9. Mihara, T., Tomida, H., Ueno, S., Negoro, H., Yoshida, A., Tsunemi, H., et al. “MAXI: all-sky observation from the International Space Station”, *SPIE* 査読無 9144 (2014) 10 (1–6) DOI: 10.1117/12.2055792
  10. Mihara, T. et al. “Cyclotron lines at high energies in GRO J1008–57 and GX 304–1 with MAXI-Suzaku collaboration” *proc. Suzaku-MAXI2014* 査読無 1 (2014) 91–94
  11. Serino, M.; Sakamoto, T.; Kawai, N.; Yoshida, A. et al. “MAXI observations of gamma-ray bursts”, *PASJ* 査読有 66 (2014) 87(1–14) DOI: 10.1093/pasj/psu063
  12. Serino, M., Shidatsu, M., Ueda, Y., Matsuoka, M., Negoro, H., et al., “Low-mass X-ray binary MAXI J1421–613 observed by MAXI GSC and Swift XRT”, *PASJ* 査読有 67 (2015) 30 DOI:10.1093/pasj/psv003
  13. Sugizaki, M., Mihara, T., et al. “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”, *PASJ* 査読有 67 (2015) 73 DOI:10.1093/pasj/psv039
  14. Yatsu, Y., Kataoka, Jun, Kawai, N., et al. “Multi-wavelength Observations of the Black Widow Pulsar 2FGL J2339.6–0532 with OISTER and Suzaku”, *The Astrophysical Journal* 査読有 802 (2015) 84 DOI:10.1088/0004-637X/802/2/84
  15. Arimoto, M., Kawai, N. et al. “High-energy Non-thermal and Thermal Emission from GRB141207A Detected by Fermi”, *The Astrophysical Journal* 査読有 833 (2016) 139–151 DOI: 10.3847/1538-4357/833/2/139
  16. Negoro, H.; Serino, M.; Kawai, N.; Mihara, T.; Tomida, H. et al. “The MAXI/GSC Nova-Alert System and results of its first 68 months”, *PASJ* 査読有 68 (2016) 1–24 DOI: 10.1093/pasj/psw016
  17. Tomida, H., Tsunemi, H., Kimura, M., Nakahira, S., et al. “The first MAXI/SSC catalog of X-ray sources in 0.7–7.0 keV”, *PASJ* 査読有 68 (2016) S32, 14pp DOI: 10.1093/pasj/psw006
- [学会発表](計 24 件)
1. 河合誠之, “ガンマ線バースト残光観測の現状と課題”, 日本天文学会秋期年会(招待講演), 2012年9月19–21日, 大分大学
  2. 河合誠之ほか, “WF-MAXI:X線短時間トランジェント天体監視実験”, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26–29日, 広島大学
  3. 木村公, 富田洋, 上野史郎ほか, “Wide-Field MAXIに搭載される広天域軟X線カメラ(SLC)の開発状況”, 日本天文学会2013年秋季年会, 2013年9月10–12日, 東北大学
  4. 有元誠, 河合誠之, 谷津陽一, 池田博一ほか, “Wide-Field MAXI搭載 Hard X-ray Monitor (HXM)のASIC開発”, 日本天文学会2014年春季年会, 2014年3月19–22日, 国際基督教大学
  5. 木村公, 富田洋, 上野史郎ほか, “Wide-Field MAXI に搭載される 広天域軟X線カメラ(SLC) の 開発状況”, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年9月20–23日, 高知大学
  6. 坂本貴紀, “Current and proposed X-ray/gamma-ray transient missions”, 新学術「重力波天体」領域研究会(招待講演), 2013年5月24日, 東京工業大学
  7. 富田洋, 河合誠之他, “WF-MAXI計画の現状(I)”, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年9月20日–23日, 高知大学
  8. 木村公, 富田洋ほか “Wide-Field MAXI に搭載される 広天域軟X線カメラ(SLC) の 開発状況”, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年9月20日–2013年9月23日, 高知大学
  9. Kimura, M. et al., “MAXI/SSC analysis of Galactic diffuse emission”, *Suzaku-MAXI 2014 : Expanding the Frontiers of the X-ray Universe*, 2014年2月19–22日, 愛媛大学
  10. Mihara, T. et al., “Cyclotron lines at high energies in GRO J1008–57 and GX 304–1 with MAXI-Suzaku collaboration”, *Suzaku-MAXI 2014 : Expanding the Frontiers of the X-ray Universe*, 2014年2月19日–22日, 愛媛大学
  11. Mihara, T. “Latest Result of MAXI Mission”, Asian Pacific Regional IAU Meeting (招待講演), 2014年8月18日, Daejeon, Korea
  12. Mihara, T., “Monitoring the Galaxy – Highlights from the MAXI mission”, 40th COSPAR Scientific Assembly(招待講演), 2014年8月5日, Moscow, Russia

13. Mihara, T., “Transient Be X-ray binary pulsars with MAXI”, Be X-ray Binary 2014 (国際学会), 2014年7月7日, Valencia, Spain
14. Kawai, N. et al. “Wide-Field MAXI: soft X-ray transient monitor on the ISS”, SPIE 2014, 2014年6月24日, Montreal, Canada
15. Tomida, H., et al., “Development of Soft X-ray Large Solid Angle Camera onboard WF-MAXI”, SPIE 2014, Montreal, Canada
16. Arimoto, M., Yatsu, Y., “Development of the hard X-ray monitor onboard WF-MAXI”, SPIE 2014 (国際学会), 2014年6月24日, Montreal, Canada
17. Kawai, N., “Wide-Field MAXI - Wide-Field Soft X-ray Transient Monitor on the ISS”, 40th COSPAR Scientific Assembly, Aug 2-10, 2014, Moscow, Russia
18. Kawai, N. “iWF-MAXI: soft X-ray transient monitor on the ISS”, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2015 17-20 June, 2015, Osaka
19. 吉田篤正他, “CALETガンマ線バーストモニター(CGBM)の初期成果”, 日本物理学会第71回年次大会 2016年3月19-22日, 東北学院大
20. 富田洋, 今井駿介, 河合誠之, 谷津陽一, 磯部直樹, 有元誠, 幸村孝由, 三原建弘, 芹野素子, “軟X線広天域カメラの開発状況”, 日本天文学会2017年春季年会, 2017年3月15日~18日, 九州大学
21. 今井駿佑, 富田洋, 河合誠之, 谷津陽一, 有元誠, 幸村孝由, 玉澤晃希, 小澤祐亮, 安田弘平, “軟X線広天域監視装置iWF-MAXI用X線CCD検出器の基本性能と放射線劣化の評価”, 日本天文学会2017年春季年会, 2017年3月15日~18日, 九州大学
22. Mihara, T., “MAXI 7 years highlights”, 7 years of MAXI: Monitoring X-ray transients (国際学会), Dec 5-7, 2016, RIKEN, Saitama
23. Kawai, N., “Search for X-ray Counterparts of gravitational Wave events”, 7 years of MAXI: Monitoring X-ray transients, Dec 5-7, 2016, RIKEN, Saitama
24. Kawai, N. et al., “Recent MAXI observations of black hole systems”, IAUS 324, New Frontiers in Black Hole Astrophysics, Sep. 12-16, 2016, Ljubljana, Slovenia

[その他]

領域ホームページ

<https://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/gwastro/>

全天 X 線監視装置 MAXI

<http://maxi.riken.jp/top/>

プレス発表等

ハイパーノバの痕跡を発見

[http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/130222\\_maxi.html](http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/130222_maxi.html)

[http://www.riken.jp/pr/press/2013/20131114\\_2/](http://www.riken.jp/pr/press/2013/20131114_2/)

MAXI が NASA Space Station Top Results for Discoveries”を受賞

<http://iss.jaxa.jp/topics/2016/07/160715.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河合 誠之 (KAWAI, Nobuyuki)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：80195031

### (2) 研究分担者

三原 建弘 (MIHARA, Tatehiro)

理化学研究所・開拓研究本部玉川高エネルギー物理研究室・専任研究員

研究者番号：20260200

富田 洋 (TOMIDA, Hiroshi)

宇宙航空研究開発機構・X線天文衛星代替機プリプロジェクトチーム・主任研究開発員

研究者番号：30399547

坂本 貴紀 (SAKAMOTO, Takanori)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：00645161

谷津 陽一 (YATSU, Yoichi)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：40447545

### (3) 連携研究者

常深 博 (TSUNEMI, Hiroshi)

大阪大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：90116062

上野 史郎 (UENO, Shiro)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学プログラム室・主任研究開発員

研究者番号：60415916

吉田 篤正 (YOSHIDA, Atsumasa)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：80240274

根来 均 (NEGORO, Hitoshi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30300891

上田 佳宏 (UEDA, Yoshihiro)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10290876

### (4) 研究協力者

木村 公 (KIMURA, Masashi)

有元 誠 (ARIMOTO, Makoto)

磯部 直樹 (ISOBE, Naoki)

杉田 聡司 (SUGITA, Satoshi)

芹野 素子 (SERINO, Motoko)

中平 聡 (NAKAHIRA, Satoshi)

幸村 孝由 (KOHMURA, Takayoshi)