

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02158

研究課題名(和文) 高頻度広視野観測でつなぐ大質量星最期の姿と超新星爆発

研究課題名(英文) Deaths of Massive Stars and Supernova Explosions Revealed by High-Cadence Wide-Field Observations

研究代表者

諸隈 智貴 (Morokuma, Tomoki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：10594674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究及び他の関連研究において、視野20平方度を持つ口径1.05m木曾シュミット望遠鏡用広視野CMOSセンサカメラTomo-e Gozenを2019年4月に完成させた。空の広い領域を効率よく掃天観測し、さらに得られる大量のデータ(数TB/晩)を即時処理するシステムを構築し、2019年10月に本格的な突発天体高頻度探査観測を開始した。2020年1月以降、世界的にもユニークな30分間隔での広視野突発天体探査観測を行う観測戦略とし、爆発初期と考えられる超新星爆発の密なデータ取得に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Tomo-e Gozenは世界で初めてのCMOSセンサを用いた広視野撮像観測装置であり、これを用いた高効率な高頻度突発天体探査観測はユニークである。特に2020年1月より開始した時間間隔30分の探査観測は、早期超新星の検出期待値は小さいものの、ひとたび検出されれば非常に価値の高いデータとなり、すでにそのような天体の検出に成功しつつある。これらのデータ及び我々自身の理論モデル、そして変光星観測データの多方面から超新星爆発を起こす星の親星の性質に迫る研究であった。ベテルギウス他の超新星爆発を起こすと考えられている星は社会的にもニュースに頻出する天体であり、本研究は関係の深い研究である。

研究成果の概要(英文)：We successfully completed a wide-field CMOS-sensor optical imaging instrument, Tomo-e Gozen, for the 1.05-m Kiso Schmidt telescope in April 2019. The field-of-view of the instrument is 20 square degrees. We also developed an algorithm to efficiently survey a large area of the sky and a dedicated data reduction system for a large dataset obtained with Tomo-e Gozen (several TBs per night). We have started a systematic wide-field high-cadence transient survey since November 2019 and changed the observing strategy so that we would take 30-minute-cadence data. We successfully got a good-quality data for very early-phase data of transients.

研究分野：突発天体の観測的研究

キーワード：広視野探査観測 可視光 超新星爆発 短時間変動 変光星

## 1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星は、太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星の最期(赤色超巨星等)の大爆発であり、その膨大な爆発エネルギーや爆発時に合成される重元素を通して、宇宙の様々なスケールにおいて重要な役割を果たしてきた(銀河・星形成へのフィードバック、宇宙の化学進化等)。近年の精力的な観測的・理論的研究により、爆発メカニズムが明らかになりつつあるとともに、超新星爆発の親星に関連する興味深い現象も報告されている。これまで予想されていなかった“黄色”超巨星が超新星爆発に至った例や、爆発前数年に大量の質量放出が起きた例などの報告は、**大質量星の最終進化段階に対する我々の理解が不十分であることを示している**。これら大質量星・超新星噴出物の外層の状態に起因する現象の理解のためには、新しく合成された重元素を多く含む内層の噴出物の寄与が卓越した爆発後数日経過した状態ではなく、**爆発後1,2日以内の密な観測データが重要となる**。

重力崩壊型超新星の爆発最初期には、その親星とされる赤色超巨星の典型的なサイズから、1時間程度の短時間スケールの変動現象が存在し、その間、極めて明るく輝く「ショックブレイクアウト」が40年以上前から予言されていた。これに加えて、近年報告されている、数時間から1,2日程度の時間スケールでの超新星の急増光は、爆発直前での1/1000-1/100太陽質量/年という大きな質量放出の存在を示唆している。これら**1時間未満から1,2日程度以下の現象の光度変動を高精度に観測できれば**、親星の大きさ、質量、爆発エネルギー、星周構造(爆発前の星の質量放出)等を信頼度の高い方法で決定することができる。しかし、これまでの観測データ(申請者らのグループの行ったすばる望遠鏡・基礎シュミット望遠鏡での観測的研究を含む)は頻度、精度の点で十分ではなかった。申請者らを含む東京大学・木曾観測所のグループは、これまでの研究で問題であった「遠方の見かけで暗い天体を見つけても詳細研究ができない」、**「近傍宇宙の見かけで明るい天体を見つけようとしても CCD の読み出し時間により効率の高い観測ができない」**の2点を克服する、読出時間が実質的にゼロで機敏な観測が可能な CMOS センサを用いた超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen の開発を、2012年に開始した。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の通りであった。(1) 高感度 CMOS センサを搭載した超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen を開発し、(2) 爆発最初期の光度曲線(1時間-1,2日スケール)を十分にサンプルする30分間隔で高頻度・広域・長期探査観測(400晩の観測)を行い、約10天体のショックブレイクアウトを含む約50天体の爆発最初期の高精度かつ密な可視光度曲線を初めて獲得する。(a) 最初期データから得られる親星の大きさ、質量、爆発エネルギー、星周構造、(b) 爆発後期データから得られる生成重元素の層状構造と質量の情報を組み合わせ、大質量星の最終進化段階を明らかにする。この観測結果をふまえ、非平衡物理過程を含む輻射流体理論モデルの精密化を進める。また、同様に世界的にユニークな銀河系内の星に対する高頻度広域データを用いて特に短時間スケールの変光現象も網羅的に探査する。

## 3. 研究の方法

本研究の方法は以下の通りである。(1) 超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e Gozen の開発と(2) それを用いた超新星広視野高頻度探査研究からなる。

Tomo-e Gozen は CMOS センサを採用することで読み出し時間が実質的にゼロの高速な観測(最大2 Hz)を実現する。長らく CMOS センサは感度において CCD に及ばないとされてきたが、我々はキヤノン社との共同研究により CCD と同水準の量子効率を持ち、より低い読み出しノイズ( $2.0e^-$ )を達成した CMOS センサ LZ8091 の開発に成功した。LZ8091 は背景光のフラックスより1桁低い暗電流を常温で達成している( $1e^-$ /秒以下)ため、Tomo-e Gozen では、真空・冷却装置が不要となり、空間と重量のリソースをセンサの多チップ化に割り振ることができ、超広視野(最大84台・20平方度)を実現できる。本申請研究では、34台のセンサを新規に購入し、Tomo-e Gozen プロトタイプ機に搭載する既存のセンサ8台を再利用することで、Tomo-e Gozen に搭載可能な台数の半分に相当する42台の CMOS センサを搭載した計12平方度の広視野高速カメラを開発する。

この Tomo-e Gozen を搭載した木曾シュミット望遠鏡での高頻度(30分時間間隔)突発天体広域探査観測を400晩にわたり実施することにより、10天体程度のショックブレイクアウトの発見及び50天体程度の超新星の早期発見を実現し、我々のグループ自身の理論モデルとの比較から爆発した星の性質を詳細に解明することを目的としていた。

## 4. 研究成果

(1) 口径1.05m 木曾シュミット望遠鏡用広視野 CMOS センサカメラ Tomo-e Gozen の開発

本研究では、CMOS センサ読み出し回路の設計と試作、センサの駆動試験による性能確認(国際研究会 SPIE[1],[2]、日本天文学会等で発表)の後、2019年4月に**84枚のセンサを搭載した視野20平方度のカメラとして完成させた**。他研究資金により、本研究で当初予定していた2

倍のセンサ台数のカメラを完成させることができた。また、本カメラを用いた広視野探査観測、特に超新星爆発の超初期の検出に最適化したシミュレーションを行い、さらに巡回サラリーマン問題を応用した観測順序最適化を行うことで、**広域探査観測の効率化を実現した**。Convolutional Neural Networkを用いた突発天体検出の最適化を含め、得られる膨大なデータの解析ソフトウェア・データベースの開発も同時並行で進め、2019年10月から探査観測を本格的に開始した(記者会見にて発表)。実際に得られたデータをもとに観測戦略の練り直しを行い、2020年1月からは30-60分間隔でのデータ取得を約2000平方度にわたって行う戦略をとり、検出頻度は小さいものの、より密で価値の高い光度曲線の取得が可能となり、実際にそのようなデータが取得できつつある。これらのハードウェア・ソフトウェア開発をもとに、Tomo-e Gozenを用いて初めて早期発見した超新星(1a型) SN 2019cxx(webリリース)等、多数の近傍超新星を世界の他のプロジェクトと独立な発見を行うことに成功した。晴れている夜はほぼ毎晩観測を行なっているため、他プロジェクトで先に発見された天体に対しても、爆発前後の時期において、Tomo-e Gozenデータを用いて明るさの上限値をつけることにも成功した([3])。高頻度な広域モニタリングデータとしての価値も高く、Fermi衛星の検出したガンマ線源の可視光対応天体及びblazarの探査([4])、高エネルギーニュートリノIceCube-170922Aの放射源であるTXS 0506+056の秒スケールの変動研究([5])、重力波源追観測([6])等に利用された。

## (2) 超新星爆発理論モデルの構築

多波長輻射流体計算コードSTELLAを用いて複数の超新星爆発について理論モデルを構築した。これらの理論モデルは、上記の大規模探査観測をシミュレートする際のベースとなるとともに、観測された超新星の光度変動及びスペクトルの振る舞いを理解するためのものである。

さらに、以下のように特殊な超新星爆発の理論モデルを構築した。伴星との相互作用によって外層を激しく剥ぎ取られた超新星の光度曲線・スペクトルを元素合成計算に基づいて計算し、そのような超新星爆発の観測的特徴を予言した。これまでに観測された超新星とも比較を行い、Ca-richギャップトランジェントと呼ばれる超新星の一部や超新星2010Xの観測的特徴と一致していることを示した。また、このような近接連星系は将来中性子星合体を起こす可能性も指摘した。特殊な光度曲線進化を見せた短時間変動天体KSN2015K、超新星1987Aに似たII-peculiar型超新星2018haの多色光度曲線を再現する理論モデルをSTELLAを用いて構築した。

## (3) 高速電波バースト(FRB)

FRBは電波で数ミリ秒という非常に短い時間光る、起源が未だ不明な天体であり、多種多様な観測を用いた研究が求められている。その一つが可視光での高速観測であり、Tomo-e Gozenはその機能を持ち合わせた稀有な装置である。バーストがこれまで複数回検出されているFRB121102に対して、電波望遠鏡との同時観測を2020年3月に3時間程度行った。

また、FRB150418は、到来方向誤差領域内の電波強度の変動及びその位置における銀河の存在により、母銀河の同定が成功したと考えられた。しかし、その後、その電波変動はその銀河の中心の活動銀河核(AGN)によるものでFRBとの因果関係はないとの指摘があった。我々は、FRB150418から約1年後のGemini望遠鏡撮像データを解析し、可視光変動が見られないことを明らかにし、母銀河内のAGNやFRB150418の可視光残光に対する制限を与えた。

関連する研究として、秒スケールの突発天体の探査も行い、そのような短い時間スケールの突発天体の発生頻度に初めて上限値を与えた([7])。

## (4) 赤外線広視野観測による明るい星のモニタリング観測

星の一生の最期を理解するために適した、明るい星の近赤外線時系列データ取得のために立ち上げた口径30mmモニター専用近赤外線望遠鏡(IR-TMT)システムは、新しいKsフィルタを導入し、リモート制御システムを完成させた。悪観測条件下に取得したデータの再取得や校正方法の確立の後、クオリティの均一性の確認等を行い、銀河面に沿った2,000平方度にわたる変光星の光度変動のカタログの公表及びそれに向けた論文の準備中である。

Tomo-e Gozenでの探査観測は、解析ソフトウェアの解析速度が十分でなく、即時解析の遅れが生じていたため、即時追観測による研究は進めることができなかったが、広視野探査観測というデータそのものの価値も高く、上記のように複数の成果が上がった。並行して進めた理論モデル構築や変光星観測についてもTomo-e Gozenでの観測データ自身の解釈には至らなかったが、他のデータの利用等により研究が大きく進捗した。

<引用文献>：下線は本研究の代表・分担・連携研究者。木曾シュミット望遠鏡関連のみ示す。

[1] Sako, S., Morokuma, T., et al. 2016, SPIE, 9908

[2] Sako, S., Morokuma, T., et al. 2018, SPIE, 10702

[3] Nakaoka, T., Tominaga, N., Morokuma, T., Sako, S., et al. 2020, submitted to ApJ

[4] 森田雅大, 2020, 東京大学大学院理学系研究科・天文学専攻・修士論文

[5] IceCube Collaboration (Morokuma, T. 含) et al. 2018, Science, 361, 1378

[6] Morokuma, T., Tominaga, N., et al. 2016, PASJ, 68, L9

[7] Richmond, M. W., Tanaka, M., Morokuma, T., Tominaga, N., et al. 2020, PASJ, 72, 3

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 20件 / うちオープンアクセス 26件）

1. 著者名 The IceCube Collaboration, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS, VLA/17B-403 teams	4. 巻 361
2. 論文標題 Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1378-1378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aat1378	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamanaka Masayuki, Morokuma Tomoki et al.	4. 巻 12145
2. 論文標題 OISTER Optical and Near-Infrared Observations for the field of 3FGL J1804.5-0850 close to the position of IceCube-181023A,	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomer's Telegram	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kokubo Mitsuru, Mitsuda Kazuma, Morokuma Tomoki, Tominaga Nozomu, Tanaka Masaomi, Moriya Takashi J., Yoachim Peter, Ivezić ?eljko, Sako Shigeyuki, Doi Mamoru	4. 巻 872
2. 論文標題 A Long-duration Luminous Type II In Supernova KISS15s: Strong Recombination Lines from the Inhomogeneous Ejecta?CSM Interaction Region and Hot Dust Emission from Newly Formed Dust	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaff6b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Ohsawa Ryou, Sako Shigeyuki, Sarugaku Yuki, Usui Fumihiko et al.	4. 巻 165
2. 論文標題 Luminosity function of faint sporadic meteors measured with a wide-field CMOS mosaic camera Tomo-e PM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 281 ~ 292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2018.09.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tominaga Nozomu, Niino Yuu, Totani Tomonori, Yasuda Naoki, Furusawa Hisanori, Tanaka Masayuki, Bhandari Shivani, Dodson Richard, Keane Evan, Morokuma Tomoki, Petroff Emily, Possenti Andrea	4. 巻 70
2. 論文標題 Optical follow-up observation of Fast Radio Burst 151230	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Niino Yuu, Tominaga Nozomu, Totani Tomonori, Morokuma Tomoki, Keane Evan, Possenti Andrea, Sugai Hajime, Yamasaki Shotaro	4. 巻 70
2. 論文標題 A search for optical transients associated with fast radio burst 150418	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sako Shigeyuki, Ohsawa Ryou, Takahashi Hidenori et al.	4. 巻 10702
2. 論文標題 The Tomo-e Gozen wide field CMOS camera for the Kiso Schmidt telescope	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2310049	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kojima Yuto, Sako Shigeyuki, Ohsawa Ryou et al.	4. 巻 10709
2. 論文標題 Evaluation of large pixel CMOS image sensors for the Tomo-e Gozen wide field camera	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2311301	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yatsu Yoichi, Ozawa Toshiki, Mamiya Hideo, Kawai Nobuyuki, Kikuya Yuhei, Matsushita Masanori, Matunaga Saburo, Bilgi Pavaman, Nikzad Shouleh, Kulkarni Shrinivas R., Tominaga Nozomu, Tanaka Masaomi, Morokuma Tomoki, Takeyama Norihide, Enokuchi Akito, Sasaki Kenichi	4. 巻 10699
2. 論文標題 Conceptual design of a wide-field near UV transient survey in a 6U CubeSat	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2313026	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hatsukade B., Tominaga N., Hayashi M., Konishi M., Matsuda Y., Morokuma T., Morokuma-Matsui K., Motogi K., Niinuma K., Tamura Y.	4. 巻 857
2. 論文標題 Obscured Star Formation in the Host Galaxies of Superluminous Supernovae	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakaoka Tatsuya, Kawabata Koji S., Maeda Keiichi, Tanaka Masaomi, Yamanaka Masayuki, Moriya Takashi J., Tominaga Nozomu, Morokuma Tomoki et al.	4. 巻 859
2. 論文標題 The Low-luminosity Type IIP Supernova 2016bkv with Early-phase Circumstellar Interaction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aabee7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Morokuma Tomoki, Tanaka Masaomi, Tanaka Yasuyuki T., et al.	4. 巻 69
2. 論文標題 OISTER optical and near-infrared monitoring observations of peculiar radio-loud active galactic nucleus SDSS J110006.07+442144.3	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tominaga Nozomu, Tanaka Masaomi, Morokuma Tomoki, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Subaru Hyper Suprime-Cam Survey for an optical counterpart of GW170817 †	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Utsumi Yousuke, Tominaga Nozomu, Tanaka Masaomi, Morokuma Tomoki et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 A challenge to identify an optical counterpart of the gravitational wave event GW151226 with Hyper Suprime-Cam †	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka Masaomi, Utsumi Yousuke, Mazzali Paolo A., Tominaga Nozomu et al.	4. 巻 69
2. 論文標題 Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-Infrared counterpart of GW170817	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Utsumi Yousuke, Tanaka Masaomi, Tominaga Nozomu, Yoshida Michitoshi et al.	4. 巻 69
2. 論文標題 J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Moriya Takashi J., Mazzali Paolo A., Tominaga Nozomu, Hachinger Stephan, Blinnikov Sergei I., Tauris Thomas M., Takahashi Koh, Tanaka Masaomi, Langer Norbert, Podsiadlowski Philipp	4. 巻 466
2. 論文標題 Light-curve and spectral properties of ultrastripped core-collapse supernovae leading to binary neutron stars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2085 ~ 2098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stw3225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sako Shigeyuki et al.	4. 巻 11426
2. 論文標題 Detection of 10-msec scale optical flares in the black-hole binary candidate MAXI J1820+070 (ASASSN-18ey)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomer's Telegram	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., Acernese F., Ackley K. et al.	4. 巻 848
2. 論文標題 Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa91c9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Abbott B. P., Morokuma Tomoki et al.	4. 巻 826
2. 論文標題 LOCALIZATION AND BROADBAND FOLLOW-UP OF THE GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT GW150914	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L13 ~ L13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8205/826/1/L13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する



1. 著者名 Abbott B. P., Morokuma Tomoki et al.	4. 巻 225
2. 論文標題 SUPPLEMENT: " LOCALIZATION AND BROADBAND FOLLOW-UP OF THE GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT GW150914 " (2016, ApJL, 826, L13)	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 8~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0067-0049/225/1/8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Katsuda, Satoru, Morokuma Tomoki et al.	4. 巻 826
2. 論文標題 Constraining the Age and Distance of the Galactic Supernova Remnant G156.2+5.7 by H Expansion Measurements	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 9~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/826/2/108	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Horiuchi Takashi, Misawa Toru, Morokuma Tomoki, Koyamada Suzuka, Takahashi Kazuma, Wada Hisashi	4. 巻 68
2. 論文標題 Optical variability properties of mini-BAL and NAL quasars	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 48~48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psw044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Morokuma Tomoki, Tominaga Nozomu et al.	4. 巻 68
2. 論文標題 J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW150914	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 L9~L9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psw061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshida Michitoshi, Tominaga Nozomu, Morokuma Tomoki et al.	4. 巻 69
2. 論文標題 J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226*	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 9~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psw113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Morii Mikio, Ikeda Shiro, Sako Shigeyuki, Ohsawa Ryou	4. 巻 835
2. 論文標題 DATA COMPRESSION FOR THE TOMO-e GOZEN USING LOW-RANK MATRIX APPROXIMATION	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/835/1/1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sako Shigeyuki, Osawa Ryou, Ita Yoshifusa, Morokuma Tomoki, Tominaga Nozomu et al.	4. 巻 9908
2. 論文標題 Development of a prototype of the Tomo-e Gozen wide-field CMOS camera	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2231259	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ohsawa Ryou, Sako Shigeyuki, Ita Yoshifusa, Morokuma Tomoki, Tominaga Nozomu et al.	4. 巻 9913
2. 論文標題 Development of a real-time data processing system for a prototype of the Tomo-e Gozen wide field CMOS camera	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2231615	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計42件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 Northern Sky Transient Survey with Tomo-e Gozen
3. 学会等名 木曾シュミットシンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 Tomo-e Gozen計画の現状
3. 学会等名 木曾シュミットシンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富永望
2. 発表標題 Supernovae with Tomo-e Gozen
3. 学会等名 木曾シュミットシンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 幅崎裕太
2. 発表標題 Near-Infrared Thirty "Millimeter" Telescopeによる銀河面サーベイ(2)
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoki Morokuma
2. 発表標題 Optical Transient Surveys
3. 学会等名 10th DTA symposium "Stellar deaths and their diversity" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nozomu Tominaga
2. 発表標題 Explosive nucleosynthesis in core-collapse supernovae
3. 学会等名 10th DTA symposium "Stellar deaths and their diversity" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 光・赤外線天文学大学間連携によるIceCubeアラート対応
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富永望
2. 発表標題 FRB151230の可視光追観測
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 超新星搜索最前線：世界の動向
3. 学会等名 第2回新天体搜索者会議（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoki Morokuma
2. 発表標題 Optical GW Counterpart Searches with the Wide-Field CMOS sensor camera Tomo-e Gozen on 1m Kiso Schmidt Telescope
3. 学会等名 The Second annual symposium of the innovative area "Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis", 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 木曾Tomo-e Gozenによる可視光高頻度突発天体サーベイ
3. 学会等名 茨城大学重点研究 研究会：「突発・変動現象の電波フォローアップ」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富永望
2. 発表標題 Fast radio bursts
3. 学会等名 茨城大学重点研究 研究会：「突発・変動現象の電波フォローアップ」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 Tomo-e Gozen突発天体全天サ - ベイ観測計画
3. 学会等名 木曽シュミットシンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 Tomo-e Gozen計画の現状
3. 学会等名 木曽シュミットシンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富永望
2. 発表標題 Tomo-e Gozen超新星ショックブレイクアウト観測
3. 学会等名 木曽シュミットシンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 板由房
2. 発表標題 Near-Infrared Thirty "Millimeter" Telescope (IR-TMT)による銀河面変光星探査
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoki Morokuma
2. 発表標題 HSC Transient Survey (VIII): Tidal Disruption Events
3. 学会等名 日本天文学会春季年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 高エネルギーニュートリノ事象IceCube-170922A: 可視近赤外線追観測
3. 学会等名 日本天文学会春季年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富永望
2. 発表標題 GW170817: すばる望遠鏡HSCを用いた可視光対応天体の探索
3. 学会等名 日本天文学会春季年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 木曾広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen が切り開く広視野動画天文学
3. 学会等名 天文学におけるデータ科学的方法
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 Follow-up observations of EM counterparts of GW events by U-Tokyo
3. 学会等名 Symposium on "New development in astrophysics through multi-messenger observations of gravitational wave sources"
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 木曾シュミット望遠鏡Tomo-e Gozenによる突発天体サーベイ計画
3. 学会等名 2017年度岡山ユースミーティング
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 東京大学木曾観測所が進める宇宙の広視野動画サーベイ
3. 学会等名 データ駆動プラズマ物理研究の開拓
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 Tomo-e Gozen全天サーベイ計画とK00LS-IFUでの即時追観測提案
3. 学会等名 K00LS-IFU 研究会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Tomoki Morokuma
2. 発表標題 Tomo-e Gozen Supernova Survey
3. 学会等名 Molecule 2017: "Transient Universe in the Big Survey Era: Understanding the Nature of Astrophysical Explosive Phenomena" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 木曽超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen実機の開発 - 基本設計
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 木曽超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen実機の開発 - 要素試験と詳細設計
3. 学会等名 日本天文学会春季年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富永望
2. 発表標題 超新星残骸観測から探る超新星爆発
3. 学会等名 日本天文学会春季年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nozomu Tominaga
2. 発表標題 Transient surveys with Subaru/Hyper Suprime-Cam
3. 学会等名 Supernova Through the Ages (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 木曽超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen開発の進捗報告
3. 学会等名 木曽シュミットシンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 Kiso Supernova Survey (KISS)
3. 学会等名 木曽シュミットシンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 富永望
2. 発表標題 Tomo-eを用いた超新星探査
3. 学会等名 木曽シュミットシンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tomoki Morokuma
2. 発表標題 Optical Wide-Field Surveys with Kiso/Tomo-e Gozen
3. 学会等名 AMON Sixth Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Morokuma
2. 発表標題 J-GEM Observations for Gravitational Wave Sources
3. 学会等名 GWPAW 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Morokuma
2. 発表標題 Optical Time Domain and Multi-Messenger Astronomy
3. 学会等名 12th East Asian VLBI Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 短時間スケール突発天体のサーベイ観測
3. 学会等名 第32回 理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 IceCubeニュートリノ電磁波対応天体サーベイ観測
3. 学会等名 木曾シュミットシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 Tomo-e Gozen計画
3. 学会等名 木曾シュミットシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富永望
2. 発表標題 Data analysis pipeline for SN survey
3. 学会等名 木曾シュミットシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 Northern Sky Transient Survey
3. 学会等名 木曾シュミットシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 すばる広視野探査とTMT分光によるIceCube高エネルギーニュートリノの超新星爆発起源説の検証
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸隈智貴
2. 発表標題 木曾シュミット望遠鏡Tomo-e Gozen高頻度突発天体サーベイ
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Tomo-e Gozenプロジェクト  <a href="http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/tomoe/">http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/tomoe/</a>          木曾シュミット望遠鏡  <a href="http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/">http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/</a>          超新星SN 2019cxxのTomo-e Gozenによる発見  <a href="http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/SN2019cxx/index.html">http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/SN2019cxx/index.html</a>          東京大学木曾観測所トモエゴゼンの観測運用の開始について  <a href="http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/pr20190930/pr20190930.html">http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/pr20190930/pr20190930.html</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	富永 望 (Tominaga Nozomu) (00550279)	甲南大学・理工学部・教授  (34506)	

## 6. 研究組織 (つづき)

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	板 由房 (Ita Yoshifusa) (30392814)	東北大学・理学研究科・助教  (11301)	
研究分担者	酒向 重行 (Sako Shigeyuki) (90533563)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授  (12601)	
連携研究者	青木 勉 (Aoki Tsutomu) (10251414)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助手  (12601)	
連携研究者	松永 典之 (Matsunaga Noriyuki) (80580208)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教  (12601)	
連携研究者	田中 雅臣 (Tanaka Masaomi) (70586429)	東北大学・理学研究科・准教授  (11301)	
連携研究者	河北 秀世 (Kawakita Hideyo) (70356129)	京都産業大学・理学部・教授  (34304)	