

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H06341

研究課題名(和文) 高速掃天観測による連星中性子星合体現象の研究

研究課題名(英文) Study of neutron star mergers by high cadence optical observations

研究代表者

茂山 俊和 (Shigeyama, Toshikazu)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：70211951

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 99,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の主目的である84のCMOSからなる超広視野カメラTomo-eは完成し、2020年4月より運用を開始した(土居守)。我が国の重力波望遠鏡KAGRAは試験運用を2020年に行い、そのデータ解析に本研究で構築したデータ解析システムが用いられた。重力波データ解析での新たなノイズ除去アルゴリズムの進展にも寄与した(伊藤洋介, Kipp Cannon)。理論モデルでは連星中性子星合体の数十秒にわたる長期変化をシミュレートするモデルの構築を行い、相対論的ジェット形成を議論する下地を作った(関口雄一郎)。また、合体初期に放出される自由中性子からなる層からの放射モデルを構築した(茂山俊和)

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主な成果である超広視野カメラTomo-eの完成は重力波天体の光学対応天体の検出に寄与するだけでなく、時間領域天文学の最前線を切り開くものである。重力波データ解析は重力波天体物理学という新たな分野を進展させるために必須であるが、本研究の成果だけでは不十分で、さらに強力な体制を構築して発展させていく必要がある。本研究で構築された理論モデルは、次の連星中性子星合体が検出されたときにその現象の理解に大いに役立つと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Extremely wide field of view camera Tomo-e (the main topic of this research) has been completed and observations with the camera started in April 2020(M. Doi). This camera will definitely open a new window of time-domain astronomy. The data analysis system constructed with this funding has been used to analyze the data that were taken in the test run of KAGRA. Members of this research team, Y. Itoh and K. Cannon contributed to a new algorithm to reduce noise in raw data of the gravitational wave telescope KAGRA. Y. Sekiguchi constructed a theoretical model to reproduce the long term evolution of binary neutron star mergers covering a few tens of seconds and discuss the mechanism to launch relativistic jets from the system. T. Shigeyama performed systematic calculations to describe emission from matter composed of free neutrons that are supposed to eject in the very early phase of binary neutron star mergers.

研究分野：理論天体物理学

キーワード：重力波 中性子星 合体

### 1. 研究開始当初の背景

重力波の直接検出は一般相対性理論の検証として残された重要な実験である。近年、重力波望遠鏡の建設が進み米国の advanced LIGO(aLIGO)は一部観測を始めていた。重力波が最初に検出される最有力の候補は「連星系をなす中性子星同士の合体現象」であった。中性子星合体からと思われる重力波が検出された際に、その現象を重力波以外の既に確立された観測手段で確認することが、その現象の理解および一般相対性理論の検証にとって重要なのは明らかである。

本研究では高感度 CMOS センサを搭載した超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen (視野 9 度・以下 Tomoe)を開発し、東京大学木曾観測所の口径 1.0m シュミット望遠鏡にて、重力波イベントの迅速な超広視野追観測を実施し、光学対応現象の検出をめざした。世界的には様々な変光天体観測が行われつつあったが、いずれも(一般に読み出し速度が遅い) CCD センサによる観測である。本研究では、機敏な観測が可能な CMOS センサを搭載した超広視野高速カメラと 1m 広視野望遠鏡を組み合わせることで、これらの計画と競争可能な広視野かつ迅速な光学追観測を実施できる。

重力波望遠鏡 KAGRA は 2021 年からの本格観測に向けて建設中であった。重力波の観測データを解析する体制は、研究分担者の伊藤が中心に国内で整いつつあり、代表者が所属している東京大学理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センターがその一つの研究拠点になっている。重力波源の有力候補であった連星中性子星合体では、ほぼ等方的に放出される物質があることが知られており、キロノバ(もしくはマクロノバ)と呼ばれている。この物質は「中性子過剰で不安定な原子核」からなり、その崩壊熱で一週間ほど光る。キロノバは超新星爆発ほど明るくならないため、観測されたものは数例しかない。本研究では広視野と機敏な探査能力を生かして、重力波が検出される 6 億光年ほどの距離にある「中性子星合体に付随するキロノバ」を早期に可視光で観測し、その強度の時間変化を理論モデルと比較することで現象の解明を目指した。

### 2. 研究の目的

重力波の検出から間をおかずに光学追観測を行い、重力波源として最も頻度が高いとされる中性子星合体の詳細を明らかにすることを目標とする。重力波望遠鏡による重力波の到来方向の予想誤差は数 10 平方度におよぶ場合も多く、検出後の即時に大変広範囲の光学追観測を行う必要がある(図 1)。本研究では、要請される即時広域観測が可能な超広視野高速カメラ Tomo-e を開発し、国内望遠鏡において圧倒的に広い視野(9 度)を持つ東京大学木曾観測所の 1.0m シュミット望遠鏡に搭載して追観測を行う。重力波望遠鏡の膨大な観測データから到来方向を高精度に予想するには時間を要する。本研究では、KAGRA の信号解析システムの計算機を高速化することにより解析速度と予想精度を強化する。中性子星合体に付随するキロノバの放射スペクトルと明るさは、図 2、図 3 のように時間変化すると予想されている。Tomo-e は重力波望遠鏡からアラートを受信後、視野 12 平方度<sup>+</sup>の超広視野追観測を即座に開始する。重力波源の光学対応イベントが検出され次第、近赤外線を含めた追加の測光観測と分光観測を国内外の光赤外線望遠鏡(すばる 8.2m、TAO 6.5m、京都 3.8m、なゆた 2m、かなた 1.5m 望遠鏡など)を用いて行い、重力波源の光赤外波長域での特徴を調べ、理論モデルと比較する。

↑研究方法で後述するように他基盤研究の寄与により Tomo-e の視野は 20 平方度に拡張された。

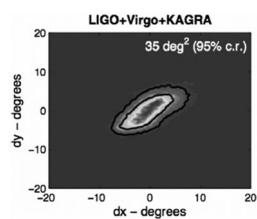


図 1 重力波の到来予想シミュレ

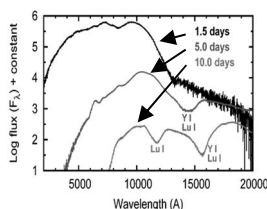


図 2 キロノバに予想される放射スペクトルの時

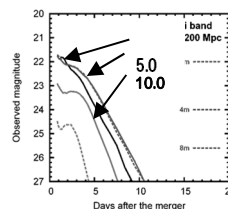


図 3 キロノバに予想される

### 3. 研究の方法

本研究は、超広視野 CMOS カメラの開発、重力波望遠鏡のデータ解析環境の強化、重力波源として最も有力な中性子星合体に付随するキロノバ現象の理論的研究からなる。

研究期間の前期 2 年間に、広視野高速カメラ Tomoe の開発と理論的研究を並行して進める。研究期間の後期 3 年間に、Tomo-e を東大木曾観測所の 1m 広視野望遠鏡に搭載して、光赤外線による重力波源の迅速な追加観測を実施する。また、KAGRA の重力波解析システムを強化し、1) ノイズとの相関解析、2)探索する中性子星質量範囲の拡大、3)複数の重力波望遠鏡からのデータのうち他の解析センターとは異なるペアのデータ解析、の 3 項目を実施することで重力波信号の信頼性を高める。観測結果から、重力波源が天体起源であることを確認し、また光赤外線波長

域の特徴をもとに、質量や爆発エネルギーなどの基本量を明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### 超広視野カメラ Tomo-e Gozen の開発

東京大学木曽 105cm シュミット望遠鏡用の可視光広視野モザイク CMOS カメラ Tomo-e Gozen は本研究が主体となり開発が進められ、平成 31 年 4 月に完成した(図 1)。Tomo-e Gozen は 84 枚の CMOS イメージセンサーによりシュミット望遠鏡の焦点面を覆うことで視野 20 平方度の超広視野を実現する。また CMOS センサーの高速性能により読み出しによる時間損失がなく空の迅速なスキャンが可能である。突発現象の検出感度を優先するために波長選択フィルターを用いず単色で観測を行う。84 枚の CMOS イメージセンサー(19  $\mu\text{m}$  画素サイズ、2,000 x 1,128 画素)はシュミット望遠鏡の焦点面(曲率半径 3,300 mm の球面)に沿って配置される。このセンサーは常温でも低い暗電流を達成するため真空・強制冷却装置を必要としない。そのため本装置は焦点面カメラの大型・軽量化に成功している。計 1 億 9,000 万画素のセンサーによる 2 フレーム毎秒の連続観測で生成される画像データは膨大であり、1 夜の観測で生成されるデータサイズは 30 TB に及ぶ。本研究では 100 個の CPU と 1 ペタバイトの記憶装置を持つサーバー計算機システムを構築し Tomo-e Gozen カメラに直結させた。この計算機システム上にて先端の情報科学的手法でリアルタイムに解析を行うことで、サーベイ画像データの中から重力波対応候補天体の搜索を実施する。ソフトウェアとの繋ぎこみ試験を経て、令和元年 9 月 30 日に長野県木曽町木曽地域振興局木曾合同庁舎にて Tomo-e Gozen の観測運用の開始を知らせる記者発表会を実施した(図 2)。



図 1 木曽シュミット望遠鏡の焦点面に搭載された Tomo-e Gozen カメラ

##### 重力波望遠鏡 03 観測期における Tomo-e Gozen による重力波可視光対応天体のサーベイ

当初は重力波望遠鏡 KAGRA と連携して重力波可視光対応天体のサーベイを実施する計画であったが、KAGRA の完成が遅れたため重力波望遠鏡 LIGO/VIRGO によるアラートを起点とした追観測サーベイを実施した。重力波望遠鏡からのアラートが無い時間帯は、重力波源の候補とされる連星中性子星合体(キロノバ)や超新星爆発の可視光独自検出を目的とした全天(7,000 平方度)の高頻度サーベイ(1 夜に数周スキャン)を実施した。重力波望遠鏡からのアラートを受信するとすぐさま全天サーベイを切り上げ、本研究で開発した追観測ソフトウェアが重力波の到来予想領域を効率的にサーベイする観測スケジュールを自動で生成して、即座に追観測を実行した。LIGO/VIRGO の感度向上の改修を経て実施された 03 観測ラン(平成 31 年 4 月から令和 2 年 3 月、令和元年 10 月に 1 か月間停止)の期間には Tomo-e Gozen の全 84 センサーによる追観測サーベイを実施した。03 の期間に LIGO/VIRGO により発行された計 56 イベントのアラートの中で、木曽から観測可能な条件を満たした計 26 イベントに対して即時追観測を実施した(図 3)。結果、重力波可視光対応天体の検出には至らなかった。重力波追観測では日本が保有する望遠鏡群(J-GEM)と連携して観測領域や分光情報を分担する観測も実施した。03 後の令和 2 年 4 月には KAGRA が約 2 週間の観測を実施した。この間に Tomo-e Gozen による可視光対応天体の追観測に備えたが、KAGRA による重力波の検出はなされなかった。03 期の一連の追観測データの検出限界等級を導出し、可視光対応天体の明るさに上限値を与えた。



図 2 Tomo-e Gozen の観測運用の開始を伝える記者発表の様子(長野県木曽町)

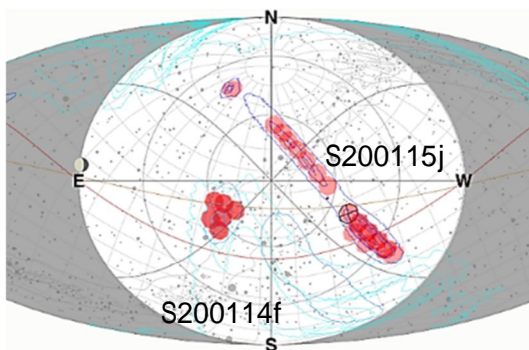


図 3 自動追観測ソフトウェアにより令和 2 年 1 月 15 日に実施された重力波可視光追観測サーベイ。コントアは重力波の到来予想領域。赤丸は Tomo-e Gozen のフットプリント

##### 重力波望遠鏡 04 観測に向けてのシステム更新

重力波望遠鏡 KAGRA、LIGO、VIRGO が令和 5 年から計画している 04 観測に向けて、Tomo-e Gozen の突発天体検出システムのデータベースの最適化と、解析パイプラインのアルゴリズムの改良により処理の高速化を実施した。また、リファレンス画像データの改善と畳み込みニューラルネットワーク機械学習モデルの改良により天体候補

の真偽識別の精度向上を実現した。また、Tomo-e Gozen の膨大な画像データおよび突発現象候補データを国内外のマルチメッセンジャー観測施設と迅速に共有するために、東京大学本郷キャンパスにデータサーバ兼ウェブサーバシステムを構築し、木曽観測所と東京大学本郷キャンパスを高速ネットワークで接続した。これらの準備を進めたことにより 04 観測期の初頭から円滑で確実な科学成果が期待される。

### KAGRA データ解析の進展

岐阜県飛騨市神岡町に建設された KAGRA は、2016 年に鏡を冷やさない初期観測、2018 年に極低温での試験観測をおこない、2019 年には干渉計のほぼ全ての構成要素が設置され、2020 年 2 月下旬より何度かの調整を経て 2 週間の観測を 4 月におこなった。この観測は、すでに観測を始めていた LIGO および Virgo 重力波望遠鏡と同時におこなわれる予定であったが、コロナ禍のため LIGO と Virgo が 3 月末での観測中止を余儀なくされたため、KAGRA はドイツの GEO600 重力波望遠鏡との同時観測をおこなうこととなった。O3GK と呼ばれるそのデータは、現在 KAGRA-GEO 解析チームが解析しており、その結果は現時点では関係団体の協定により開示できないが、2021 年度前半には公表の予定である。重力波データの解析には本基盤研究 S 科研費によって強化された重力波データ解析専用クラスタ計算機も活用されており、重要な貢献となっている。このクラスタ計算機はデータの質保証に重要な較正およびデータの低遅延転送系(低遅延解析は本科研費研究の目的の 1 つである)の試験などでも活用されている。ノイズとの相関解析については、非ガウスノイズを重力波チャンネル時系列データから分離できる独立成分分析という手法を研究、実データに適用しており、手法および結果について査読論文を出版している。本手法は未だ試験段階ではあるが、LIGO/Virgo における同様な研究からノイズ除去の有望な手法と考えることができ、将来に向けた研究を強力に進めている。また、LIGO/Virgo グループのおこなっていない非線形相関しているノイズの除去に向けてもすでに定式化をほぼ完成し、O3GK データを用いて研究をおこなっているところである。KAGRA は LIGO/Virgo との同時観測ができなかったことから、複数の重力波望遠鏡からのデータのうち他の解析センターとは異なるペアのデータ解析は、おこなうことができなかった。なお KAGRA および重力波天文学・物理学についての特集 “KAGRA and beyond: gravitational wave physics and astronomy” が Progress of Theoretical Physics and Experimental Physics 誌において組まれることが決定しており、2021 年第二四半期にその第 1 特集が出版される予定である。伊藤は同特集の企画編集委員を務めている。

### 重力波天体理論モデルの成果

2015 年のブラックホール同士の合体からの重力波検出に次ぎ、中性子星合体からの重力波は 2017 年 8 月 17 日に aLIGO によって初めて観測され(GW170817)、重力波検出から 11 時間後には対応光学天体も検出され、日本を含む世界中の望遠鏡によって精力的に観測された。それらの観測結果をもとに中性子星合体から放出された物質を記述する理論的モデルとの比較も行われた。本研究では、中性子星合体の一般相対論的シミュレーション結果との比較からこの現象に考察を加え(関口雄一郎)、合体時に異なる様相で(ジェット状や球状など)放出された物質について、それぞれの様相を個別に精査した(関口雄一郎、茂山俊和)。また、Tomo-e の高速探査によって、より早期の可視光観測でどのような情報をもたらすか理論的予測(茂山俊和)を行うとともに、ジェット噴出機構を解明するために合体現象をより長く追跡できるシミュレーション手法を開発した(関口雄一郎)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 30件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Richmond Michael W、Tanaka Masaomi、Morokuma Tomoki、他35名	4. 巻 72
2. 論文標題 An optical search for transients lasting a few seconds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz120	査読の有無 有
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 Terasaki Tomoki、Tsunai Daichi、Shigeyama Toshikazu	4. 巻 890
2. 論文標題 Fast Luminous Blue Transients in the Reionization Era and Beyond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L17 ~ L17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab7240	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Kashiyama Kazumi、Fujisawa Kotaro、Shigeyama Toshikazu	4. 巻 887
2. 論文標題 The Optically Thick Rotating Magnetic Wind from a Massive White Dwarf Merger Product	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 39 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4e97	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Arimatsu Ko、Ohsawa Ryou、Hashimoto George L.、他17名	4. 巻 158
2. 論文標題 New Constraint on the Atmosphere of (50000) Quaoar from a Stellar Occultation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 236 ~ 236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ab5058	査読の有無 有
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 Fujibayashi Sho, Shibata Masaru, Wanajo Shinya, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Mass ejection from disks surrounding a low-mass black hole: Viscous neutrino-radiation hydrodynamics simulation in full general relativity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083029 ~ 083029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.083029	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Akutsu T., Ando M., Araya A., Aritomi N., Asada H., Aso Y., KAGRA collaboration	4. 巻 1342
2. 論文標題 The status of KAGRA underground cryogenic gravitational wave telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012014 ~ 012014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1342/1/012014	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 KAGRA collaboration	4. 巻 3
2. 論文標題 KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 35 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-018-0658-y	査読の有無 有
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 Abbott B. P., KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration, and Virgo Collaboration, Abbott R., Abbott T. D. et al.	4. 巻 21
2. 論文標題 Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Living Reviews in Relativity	6. 最初と最後の頁 3-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41114-018-0012-9	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 Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 97
2. 論文標題 Global simulations of strongly magnetized remnant massive neutron stars formed in binary neutron star mergers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124039~124039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.124039	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Ishii Ayako, Shigeyama Toshikazu, Tanaka Masaomi	4. 巻 861
2. 論文標題 Free Neutron Ejection from Shock Breakout in Binary Neutron Star Mergers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 25 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aac385	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Fujibayashi Sho, Kiuchi Kenta, Nishimura Nobuya, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 860
2. 論文標題 Mass Ejection from the Remnant of a Binary Neutron Star Merger: Viscous-radiation Hydrodynamics Study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 64 ~ 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aabafd	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Kojima Yuto, Sako Shigeyuki, Ohsawa Ryou, Takahashi Hidenori, Doi Mamoru, 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 107091T~107091T
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 有
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 -

1. 著者名 Sako Shigeyuki, Ohsawa Ryou, Takahashi Hidenori, Kojima Yuto, Doi Mamoru, 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 10702J-10702J
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 有
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 -

1. 著者名 Tominaga Nozomu, Tanaka Masaomi, Morokuma Tomoki, Utsumi Yousuke, 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 28-28
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kyutoku Koutarou, Kiuchi Kenta, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 97
2. 論文標題 Neutrino transport in black hole-neutron star binaries: Neutrino emission and dynamical mass ejection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 023009-023009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.023009	査読の有無 有
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 -

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 L12-L12
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 Utsumi Yousuke, Tanaka Masaomi, Tominaga Nozomu, 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 101~101
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujibayashi Sho, Sekiguchi Yuichiro, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru	4. 巻 846
2. 論文標題 Properties of Neutrino-driven Ejecta from the Remnant of a Binary Neutron Star Merger: Pure Radiation Hydrodynamics Case	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 114 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8039	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Tsujiimoto Takuji, Matsuno Tadafumi, Aoki Wako, Ishigaki Miho N., Shigeyama Toshikazu	4. 巻 850
2. 論文標題 Enrichment in r-process Elements from Multiple Distinct Events in the Early Draco Dwarf Spheroidal Galaxy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L12 ~ L12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa9886	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Komiya Yutaka, Shigeyama Toshikazu	4. 巻 846
2. 論文標題 R-process Element Cosmic Rays from Neutron Star Mergers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 143 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa86b3	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Tsujimoto Takuji, Matsuno Tadafumi, Aoki Wako, Ishigaki Miho N., Shigeyama Toshikazu	4. 巻 850
2. 論文標題 Enrichment in r-process Elements from Multiple Distinct Events in the Early Draco Dwarf Spheroidal Galaxy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L12 ~ L12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa9886	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Komiya Yutaka, Shigeyama Toshikazu	4. 巻 846
2. 論文標題 R-process Element Cosmic Rays from Neutron Star Mergers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 143 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa86b3	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Komiya Yutaka, Shigeyama Toshikazu	4. 巻 830
2. 論文標題 CONTRIBUTION OF NEUTRON STAR MERGERS TO THE r-PROCESS CHEMICAL EVOLUTION IN THE HIERARCHICAL GALAXY FORMATION	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 76 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/830/2/76	査読の有無 有
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 -

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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., Abernathy M. R., Acernese F., 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 Yoshida Michitoshi, Utsumi Yousuke, 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, Takahashi Hidenori, Kikuchi Yuki, Doi Mamoru, 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 991339-991339
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 -

1. 著者名 Sako Shigeyuki, Osawa Ryou, Takahashi Hidenori, Kikuchi Yuki, Doi Mamoru, 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 99083P~ 99083P
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 -

1. 著者名 Kawaguchi Kyohei, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 97
2. 論文標題 Frequency-domain gravitational waveform models for inspiraling binary neutron stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.044044	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Shibata Masaru, Fujibayashi Sho, Hotokezaka Kenta, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Tanaka Masaomi	4. 巻 96
2. 論文標題 Modeling GW170817 based on numerical relativity and its implications	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.123012	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Kyutoku Koutarou, Kiuchi Kenta, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 97
2. 論文標題 Neutrino transport in black hole-neutron star binaries: Neutrino emission and dynamical mass ejection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.023009	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Fujibayashi Sho, Sekiguchi Yuichiro, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru	4. 巻 846
2. 論文標題 Properties of Neutrino-driven Ejecta from the Remnant of a Binary Neutron Star Merger: Pure Radiation Hydrodynamics Case	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 114 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8039	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計45件（うち招待講演 15件 / うち国際学会 26件）

1. 発表者名 石井彩子
2. 発表標題 連星中性子星合体初期の電磁波放射のスペクトル計算
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 茂山俊和
2. 発表標題 R-process element cosmic rays from neutron star mergers
3. 学会等名 JINA-CEE IReNA / NAOJ workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 連星中性子星合体とrプロセス元素合成
3. 学会等名 原子核物理でつむぐrプロセス (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 Compact binary coalescence physics
3. 学会等名 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 数值相对論:数值流体計算と比較して
3. 学会等名 日本流体力学会 2019年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 Constraining EOS of NS : achievements in GW170817 and future prospects
3. 学会等名 Quarks and Compact Stars 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 GW170817: Observations and Modelling
3. 学会等名 The international workshop on nuclear physics for astrophysical phenomena (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 GW170817: Multi-messenger Observations and Modelling
3. 学会等名 高エネルギー突発現象の多波長・多粒子観測と理論 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 GW170817: Observations and Modelling
3. 学会等名 Origin of Elements and Cosmic Evolution: From Big-Bang to Supernovae and Mergers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤洋介
2. 発表標題 Status of KAGRA
3. 学会等名 The 29th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤洋介
2. 発表標題 Application of the independent component analysis to the iKAGRA data
3. 学会等名 New Innovative Area Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 木曾超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 新納悠
2. 発表標題 Tomo-e Gozen による重力波フォローアップ観測実施状況
3. 学会等名 木曽シュミットシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新納悠
2. 発表標題 木曽超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e Gozen による重力波フォローアップ観測
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 新納悠
2. 発表標題 Optical follow-up observations of GW events with the wide-field CMOS camera Tomo-e Gozen
3. 学会等名 Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新納悠
2. 発表標題 Optical follow-up observations of GW events with the wide-field CMOS camera Tomo-e Gozen
3. 学会等名 Yamada Conference LXXI: Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新納悠
2. 発表標題 Optical follow-up observations of GW events with the wide-field CMOS camera Tomo-e Gozen
3. 学会等名 Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, The Third Annual Area Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 Properties of the dynamical ejecta in binary neutron star merger and r-process nucleosynthesis
3. 学会等名 The Eighth East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 GW170817 : Observations and Theoretical modelling
3. 学会等名 Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井彩子
2. 発表標題 連星中性子星合体の衝撃波加熱による自由中性子放出と初期の電磁波放射
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
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 大澤亮
2. 発表標題 Development of a Wide-Field CMOS Camera: Tomo-e Gozen and Contributions to EM Follow-up Observations of Gravitational Wave Events
3. 学会等名 Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2017 (国際学会)
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" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 木曾超広視野CMOSカメラTomo-e Gozen計画の現状
3. 学会等名 シュミットシンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島悠人
2. 発表標題 木曽超広視野CMOSカメラTomo-e Gozenと他計画との感度比較
3. 学会等名 シュミットシンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋英則
2. 発表標題 木曽超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e Gozen FM筐体の開発
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会,
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島悠人
2. 発表標題 木曽超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozenの状態監視システムの開発
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島悠人
2. 発表標題 木曽超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen Q0の性能評価
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井彩子
2. 発表標題 連星中性子星合体における shock breakout に伴う中性子の放出と電磁波放射
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 茂山俊和
2. 発表標題 Origin of r-process elements in dwarf spheroidal galaxies
3. 学会等名 Workshop on "Theories of Astrophysical Big Bangs" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井彩子
2. 発表標題 Free neutron ejection from shock breakout in binary neutron star merger
3. 学会等名 INT-JINA Symposium: First multi-messenger observations of a neutron star merger and its implications for nuclear physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井彩子
2. 発表標題 連星中性子星合体における自由中性子の放出と電磁波放射
3. 学会等名 宇宙線研究所共同利用研究会 「ガンマ線バースト研究の新機軸」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小宮裕
2. 発表標題 The Galactic chemical evolution of r-process elements by neutron star mergers
3. 学会等名 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小宮裕
2. 発表標題 Hierarchical galaxy formation and the r-process chemical evolution of the Milky Way
3. 学会等名 Galactic Archaeology & Stellar Physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 茂山俊和
2. 発表標題 Bright novae - Indications of the spectrum of MAXI J0158-744
3. 学会等名 7 years of MAXI: Monitoring X-ray Transients (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大澤亮
2. 発表標題 Development of Extreme Wide-Field CMOS Camera Tomo-e: Contribution to Gravitational Wave/EM Counterparts Search
3. 学会等名 GWPAW (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 酒向重行
2. 発表標題 Development of a prototype of the Tomo-e Gozen wide field CMOS camera
3. 学会等名 SPIE (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
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 一木真
2. 発表標題 木曽超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen試験機による高頻度測光の評価
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 Exploring Physics of Neutron Star Matter by Gravitational Waves
3. 学会等名 Workshop on Quarks and Compact Stars 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 Numerical Relativity simulations of neutron-star binaries in Kyoto group
3. 学会等名 Hot Topics in General Relativity and Gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 連星中性子星の質量分布に基づく合体時放出物質の平均的性質
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 Dynamical Mass Ejection from BNS Mergers and r-Process Nucleosynthesis
3. 学会等名 Neutron Star Mergers and Galactic Chemical Evolution (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 GW170817: A Modelling Based on Numerical Relativity
3. 学会等名 Hadron and Nuclear physics workshop 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関口雄一郎
2. 発表標題 GW170817 : Observations and Theoretical modelling
3. 学会等名 Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>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.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/pr20190930/pr20190930.html">http://www.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/pr20190930/pr20190930.html</a>  UTokyo starts a full operation of Tomo-e Gozen.  <a href="http://www.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/pr20190930/pr20190930e.html">http://www.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/pr20190930/pr20190930e.html</a>  中性子星合体からの重力波初検出と重力波天体が放つ光の初観測  <a href="http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2017/5594/">http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2017/5594/</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	土居 守  (Doi Mamoru)  (00242090)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授   (12601)	
研究分担者	関口 雄一郎  (Yu-ichiro Sekiguchi)  (50531779)	東邦大学・理学部・准教授   (32661)	
研究分担者	カンノン キップ  (Cannon Kipp)  (50777886)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授   (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	伊藤 洋介  (Ito Yousuke)  (60443983)	大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授    (24402)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関