

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04010

研究課題名（和文）連星白色矮星合体残骸の進化計算と探査観測

研究課題名（英文）Evolution theory and survey observation of double white dwarf merger remnants

研究代表者

櫻山 和己（Kashiyama, Kazumi）

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10785744

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：木曾シュミット望遠鏡に搭載されたTomo-e Gozenカメラを用いて、白色矮星を含む恒星からの秒スケールの変動現象の探査を実施、その動画データから恒星の測光ライトカーブを取得、解析を行うパイプラインを構築した。特に、従来の探査観測では検出が難しかったM型星からの高輝度秒スケールフレアを22発検出することに成功した（Aizawa et al., 2022）。連星白色矮星合体残骸の理論研究として、合体白色矮星の測光ライトカーブの理論テンプレートの作成し、ZTF J1901などに適応、内部磁場や磁気圏構造について新たな制限を加えた（Suto et al., 2023）。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々が新たに発見したM型星の高輝度秒スケールフレアはその輝度や発生頻度からM型星周りの地球型惑星のハビタビリティに大きな影響を与える可能性があり、天文学にとどまらず惑星科学や宇宙生物学にとってもインパクトのある成果であると考えます。

また、連星白色矮星合体についての我々の一連の研究により、WD J005311が平安末期に発生し、吾妻鏡などの歴史書に記載されている超新星SN1181の残骸天体である可能性が高まっている。SN1181歴史書に記載されている銀河系内超新星のうち、唯一正体が明らかにならなかった超新星であり、自然科学の枠を超え、人文科学にも波及する成果であるといえる。

研究成果の概要（英文）：Using the Tomo-e Gozen camera on the Kiso Schmidt telescope, we have carried out a search for second-scale variability events from stars, including white dwarfs, and constructed a pipeline to obtain and analyse photometric light curves of stars from the video data. In particular, 22 high-luminosity second-scale flares from M-type stars, which have been difficult to detect with previous surveys, were successfully detected (Aizawa et al., 2022). We have successfully constructed a theoretical template of photometric light curves for merged white dwarfs as part of our theoretical study on the remnants of binary white dwarf mergers. This template was then applied to ZTF J1901, resulting in a new constraint on the structure of the internal magnetic field and the magnetosphere (Suto et al., 2023).

研究分野：天文学

キーワード：白色矮星 M型星 時間領域天文学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

太陽のように比較的低質量の星がその一生を終えるとき、星の外層が大きく膨らみ、中心には縮退圧によって自重を支える白色矮星が形成される。多くの星は連星系にあり、2つの白色矮星からなる連星白色矮星も多く形成される。連星白色矮星は重力波放射によって軌道運動のエネルギーを失い、終には合体衝突する。連星白色矮星の合体残骸はmass shedding 限界に近い高速回転をしており、合体時に発現する磁気流体不安定性によって強い磁場を持つ。その後の進化は元の連星系の総質量と質量比、化学組成、合体後の磁場強度と回転速度に依存し、多様な高エネルギー天体現象を起こすと考えられている。合体残骸の総質量がいわゆるチャンドラセカール質量を超える場合、合体残骸中で核燃焼が暴走的に起こるとIa型超新星爆発(SN Ia)を起こす。一方、暴走的な核燃焼が起こらない場合、一度舞い上がった合体残骸の外層が系全体の放射冷却にともない中心の縮退コアに降り積もり、強磁場中性子星(マグネター)に重力崩壊すると考えられている。いわゆるMerger induced collapse (MIC)である。AICはガンマ線バースト、「速い」超新星、高速電波バーストといった突発天体の起源としても注目されている。連星系の総質量がチャンドラセカール質量を下回る、あるいはチャンドラセカール質量を上回る場合でも合体によって大量の質量放出が起こると、合体残骸は縮退コアを保ち、強磁場白色矮星を残す。R Coronae Borealis変光星やB型準矮星の一部は合体残骸が晴れ上がって強磁場白色矮星が姿を顕にするまでの途中段階だとする議論はあるが、その進化経路はよく分かっていない。

### 2. 研究の目的

「どのような連星白色矮星合体がどのようなコンパクト星形成、突発天体現象と結びつくのか？」また「合体残骸の多様性の起源は何か？」これらの問いに答えるためにはミッシングリンクである合体後約1万年、熱核進化タイムスケールの合体残骸の性質、特に磁場の強さや回転の速さを明らかにすることが必要不可欠である。本研究の最終目標は連星白色矮星合体残骸の時間進化とその多様性を詳らかにすることであった。

### 3. 研究の方法

上記の目標達成に向け、

研究計画1: 磁気回転駆動風の効果を取り入れた合体残骸白色矮星の進化計算

研究計画2: 木曾シュミット望遠鏡に搭載されたTomo-e Gozenカメラを用いた銀河系内白色矮星のsub-minute変動探査観測

の二つを軸に研究に取り組むことを計画した。研究計画1、2ともにWD J005311という新天体を足がかりとした。WD J005311は2019年の4月に発見が報告された連星白色矮星残骸の候補天体である(Gvaramadze et al. 2019)。明るい赤外星雲の中心に、幅が広い炭素、酸素、ネオン輝線を放つ白色矮星が見つかった。スペクトル解析から実効温度は $\sim 200,000$  Kと非常に高く、星風による質量放出率は $\sim 10^{-(5-6)}$  太陽質量 $\text{yr}^{-1}$ 、星風の終端速度も $\sim 20,000$  km/s と非常に大きいことがわかった。Gvaramadze et al.は高速の星風が磁気回転駆動によるものであると解釈、J005311が連星白色矮星合体の残骸で、高速回転する強磁場白色矮星であると結論付けた。赤外星雲のサイズと実効温度から独立に見積もられる系の年齢が $\sim 1$ 万年で一致しており、Gvaramadze et al.が正しいとするとJ005311は連星白色矮星のミッシングリンクの最初の観測例である。

#### 4. 研究成果

Tomo-e Gozen カメラの1 frame-per-second(fps)動画データから視野内に存在する18等より明るいGaia 天体の測光系列データを網羅的に抽出し、秒から分の変動を探查するためのパイプラインを構築した。

Tomo-e Gozen カメラは2019 年秋に本格運用を開始しており、我々は1 frame-per-second(fps)動画観測モードではこれまでに累計40 時間のテスト探查を実施した。上記通り構築した1fps動画データ解析パイプラインを用いてテスト探查データを解析、従来の探查観測では検出が難しかったM型星からの高輝度秒スケールフレアを22発検出することに成功した (Aizawa et al. 2022)。我々が新たに発見したM型星の高輝度秒スケールフレアはその輝度や発生頻度からM型星周りの地球型惑星のハビタビリティに大きな影響を与える可能性があり、天文学にとどまらず惑星科学や宇宙生物学にとってインパクトのある成果であると考えられる。

また、本研究のメインターゲットである白色矮星に対しても解析を進めており、ZTF J190132 の7 分周期を追検出、また、およそ10 分で回転する白色矮星を新発見 (論文投稿準備中) するなど、1fps動画データ解析パイプラインが連星白色矮星合体残骸の探查についても有用であることが確認できている。今後、探查範囲を木曾観測所から観測可能な全北天に拡大し、高速回転白色矮星を網羅的に調査する予定である。

そのような大規模探查のフェイズを見据え、測光ライトカーブから合体残骸白色矮星の物理的情報を抽出するための理論的準備研究にも取り組んだ。Suto et al. 2023では合体残骸白色矮星の測光ライトカーブの理論テンプレートの作成し、ZTF J190132などに適応、内部磁場や磁気圏構造について新たな制限を加えることに成功した。

また、計画していた磁気回転駆動風の効果を取り入れた合体残骸白色矮星の進化計算についても公開コード、Athena++を用いた多次元磁気流体シミュレーションによってWD J005311に代表される合体残骸白色矮星のアウトフローの性質、特に合体残骸白色矮星の磁気圏構造とアウトフローの幾何学的構造や時間変動の関係、また、アウトフローが持ち去る白色矮星の角運動量と白色矮星の質量、半径、磁場、回転周期との関係を明らかにし、成果をまとめて論文投稿準備中である (Zhang et al. in prep)。

発見以後の追観測により、WD J005311の周囲には赤外線、X線で輝く星雲領域が存在することが明らかとなった。我々はこの星雲領域の時間進化を、WD J005311からのアウトフローの影響を加味した理論計算によって求め、WD J005311がおよそ1,000年前に起こった連星白色矮星合体の残骸天体であることを示し、合体時に発生した爆発現象の爆発エネルギーや放出質量について定量的な制限を与えた (Ko et al. 2023:arXiv:2304.14669)。我々の一連の研究により、WD J005311が平安末期に発生し、吾妻鏡などの歴史書に記載されている超新星SN1181の残骸天体である可能性が高まっている。SN1181歴史書に記載されている銀河系内超新星のうち、唯一正体が明らかになっていなかった超新星であり、自然科学の枠を超え、人文科学にも波及する成果であるといえる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Suto Yasushi, Sasaki Shin, Aizawa Masataka, Fujisawa Kotaro, Kashiyama Kazumi	4. 巻 75
2. 論文標題 Modeling photometric variations due to a global inhomogeneity on an obliquely rotating star: Application to light curves of white dwarfs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac093	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 Aizawa Masataka, Kawana Kojiro, Kashiyama Kazumi, et al.	4. 巻 74
2. 論文標題 Fast optical flares from M-dwarfs detected by a one-second-cadence survey with Tomo-e Gozen	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1069 ~ 1094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac056	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 Kashiyama Kazumi, Sawada Ryo, Suwa Yudai	4. 巻 935
2. 論文標題 X-Raying the Birth of Binary Neutron Stars and Neutron Star-Black Hole Binaries	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 86 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7ff7	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 Moriya Takashi J, Murase Kohta, Kashiyama Kazumi, Blinnikov Sergei I	4. 巻 513
2. 論文標題 Variable thermal energy injection from magnetar spin-down as a possible cause of stripped-envelope supernova light-curve bumps	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 6210 ~ 6218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1352	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 Yamasaki Shotaro, Kashiyama Kazumi, Murase Kohta	4. 巻 511
2. 論文標題 Multi-wavelength constraints on the outflow properties of the extremely bright millisecond radio bursts from the galactic magnetar SGR 1935+2154	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3138 ~ 3149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac234	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 Sawada Ryo, Kashiyama Kazumi, Suwa Yudai	4. 巻 927
2. 論文標題 On the Energy Source of Ultrastripped Supernovae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 223 ~ 223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac53ae	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 Tsunai Daichi, Kashiyama Kazumi, Shigeyama Toshikazu	4. 巻 922
2. 論文標題 AT 2018lqh: Black Hole Born from a Rotating Star?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L34 ~ L34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac3997	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 Murase Kohta, Omand Conor M B, Coppejans Deanne L, Nagai Hiroshi, Bower Geoffrey C, Chornock Ryan, Fox Derek B, Kashiyama Kazumi, Law Casey, Margutti Raffaella, Meszaros Peter	4. 巻 508
2. 論文標題 ALMA and NOEMA constraints on synchrotron nebular emission from embryonic superluminous supernova remnants and radio-gamma-ray connection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 44 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2506	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 Kimura Shigeo S., Kashiyama Kazumi, Hotokezaka Kenta	4. 巻 922
2. 論文標題 Multiwavelength Emission from Magnetically Arrested Disks around Isolated Black Holes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L15 ~ L15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac35dc	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 Inayoshi Kohei, Kashiyama Kazumi, Visbal Eli, Haiman Zoltan	4. 巻 919
2. 論文標題 Gravitational Wave Backgrounds from Coalescing Black Hole Binaries at Cosmic Dawn: An Upper Bound	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 41 ~ 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac106d	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 Zhong Yici, Kashiyama Kazumi, Shigeyama Toshikazu, Takasao Shinsuke	4. 巻 917
2. 論文標題 A Necessary Condition for Supernova fallback Invading Newborn Neutron-star Magnetosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 71 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0a74	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 Kimura Shigeo S., Sudoh Takahiro, Kashiyama Kazumi, Kawanaka Norita	4. 巻 915
2. 論文標題 Magnetically Arrested Disks in Quiescent Black Hole Binaries: Formation Scenario, Observable Signatures, and Potential PeVatrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 31 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abff58	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 Tsunadaichi, Kashiyama Kazumi, Shigeyama Toshikazu	4. 巻 914
2. 論文標題 Multiwavelength View of the Type II In Zoo: Optical to X-Ray Emission Model of Interaction-powered Supernovae	5. 発行年 2021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/abfaf8	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 Eftekhari T., Margalit B., Omand C. M. B., Berger E., Blanchard P. K., Demorest P., Metzger B. D., Murase K., Nicholl M., Villar V. A., Williams P. K. G., Alexander K. D., Chatterjee S., Coppejans D. L., Cordes J. M., Gomez S., Hosseinzadeh G., Hsu B., Kashiyama K., Margutti R., Yin Y.	4. 巻 912
2. 論文標題 Late-time Radio and Millimeter Observations of Superluminous Supernovae and Long Gamma-Ray Bursts: Implications for Central Engines, Fast Radio Bursts, and Obscured Star Formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 21 ~ 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe9b8	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 Tsunadaichi, Ishii Ayako, Kuriyama Naoto, Kashiyama Kazumi, Shigeyama Toshikazu	4. 巻 897
2. 論文標題 Intermediate Luminosity Red Transients by Black Holes Born from Erupting Massive Stars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L44 ~ L44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aba0ac	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 Seto Naoki, Kashiyama Kazumi	4. 巻 19
2. 論文標題 Astrometric study of Gaia DR2 stars for interstellar communication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Astrobiology	6. 最初と最後の頁 308 ~ 313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S147355042000004X	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 et al. including Kazumi Kashiyama	4. 巻 0
2. 論文標題 Overview of KAGRA: KAGRA science	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 0-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa120	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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 X-Raying the Birth of Binary Neutron Stars and Neutron Star-Black Hole Binaries
3. 学会等名 2023年春季天文学会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 Double degenerate merger remnants and related astrophysical phenomena
3. 学会等名 Exploring the Transient Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 Accretion and merger induced collapse of white dwarfs as possible progenitor of fast radio burst sources
3. 学会等名 Fast Radio Bursts Symposium 2023 in Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年



1. 発表者名 Kazumi Kashiyama
2. 発表標題 Outflows from Dwarfs
3. 学会等名 YITP workshop Extreme Outflows in Astrophysical Transients (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumi Kashiyama
2. 発表標題 Magnetic fields of compact objects
3. 学会等名 NAOJ Future Planning Symposium 2021 -Thinking about Future Plans Across Wavelengths (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yici Zhong, 樫山和己, 茂山俊和, 高棹真介
2. 発表標題 How much SNR fallback can invade newborn pulsar wind and magnetosphere?
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樫山和己, Conor Omand, 村瀬孔大, 浅野勝晃
2. 発表標題 Synchrotron Boilers in Embryonic Neutron-Star Wind Nebulae
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高棹真介, 櫻山和己
2. 発表標題 Magnetically Arrested Diskの発現条件に関する理論研究
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻山和己
2. 発表標題 X-raying the missing links in compact object astrophysics
3. 学会等名 多波長・時間軸天文学の時代のFORCE ~広帯域X線で迫るコンパクト天体の世界~ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumi Kashiyama
2. 発表標題 Can repeating fast radio bursts still be rotation powered?
3. 学会等名 YITP International Molecule-type Workshop : Fast Radio Bursts: A Mystery Being Solved? (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumi Kashiyama
2. 発表標題 Fast Radio Bursts and their possible counterparts
3. 学会等名 Probing the Extragalactic Universe with High Energy and Very High Energy Sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazumi Kashiyama
2. 発表標題 Fast Radio Bursts: A Mystery Being Solved?
3. 学会等名 Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 パリティ編集委員会、大槻 義彦	4. 発行年 2022年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 204
3. 書名 物理科学, この1年 2022	

1. 著者名 樫山和己	4. 発行年 2020年
2. 出版社 天文月報 (Astronomical Herald)	5. 総ページ数 12
3. 書名 突発天体とコンパクト天体形成の最前線へ	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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
---------	---------