

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03616

研究課題名(和文) 突発現象の追跡観測を自動で意思決定するスマート観測システムの研究

研究課題名(英文) Research on the smart observation system with the automatic decision making for the follow-up observations of astronomical transients

研究代表者

植村 誠 (Uemura, Makoto)

広島大学・宇宙科学センター・准教授

研究者番号：50403514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：広島大学かなた望遠鏡による突発天体現象、特に新星と矮新星の研究において、爆発直後のデータを得るため、自律式の、自ら考える自動観測システム「Smart Kanata」を開発した。本システムでは発見直後の新天体のクラス判定に機械学習を、適切な追跡観測の意思決定に情報理論を、自動観測の実施に必要な天候判定などには深層学習を、それぞれ用いており、先端的な技術の集合体システムとなっている。このシステムによって、これまでに矮新星の自動連続撮像、新星の自動分光に成功した。矮新星では降着円盤の幾何構造の進化が初めて明らかになり、新星では初期の高温期を過ぎて、新星風が成長する直前の状態が観測できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来、専門家の知識と経験に基づいた判断によって実施されてきた突発天体現象の追跡観測を、先端的な技術を駆使することで自動化したことに意義がある。特に、適切な判断をするために必要な情報が不十分な状態で、次に取得すべきデータを確率論的に意思決定する仕組みは、他の様々な計測分野でも有用だろう。天文学的には、開発したシステムによって期待通りに初期成果が得られ、質量降着と放出の物理に新たなデータを提供できたことに意義がある。

研究成果の概要(英文)：The "Smart Kanata" autonomous observation system, developed for the "Kanata" telescope in Hiroshima University for the study of astronomical transients, particularly novae and dwarf novae, enables the acquisition of data immediately after explosions. This system incorporates machine learning for classifying newly discovered objects, information theory for making decisions on appropriate follow-up observations, and deep learning for tasks like weather assessment necessary for automated observations. By utilizing these cutting-edge technologies, the system has achieved automatic continuous imaging of dwarf novae and automatic spectroscopy of novae. In the case of dwarf novae, the evolution of the geometric structure of accretion disks has been elucidated for the first time, while in novae, observations have been made of the state just prior to the growth of the nova wind, after passing through the initial high-temperature phase.

研究分野：天文学

キーワード：光赤外線天文学 時間領域天文学 データサイエンス

1. 研究開始当初の背景

新星や矮新星などの突発天体現象は、その爆発初期を観測することが現象の理解に重要である。しかし、いつ、どの天体が爆発するか予測できないため、明るさの極大を迎えたのちに初めて発見されることが多く、爆発初期の状態を知ることは難しかった。近年、大口径の望遠鏡に大型の検出器を取り付け、広い視野で空全体を高頻度でモニターする計画が世界中で行われている。そのような大規模サーベイによって、毎日多くの突発現象が報告されるようになった。それらのなかには爆発直後の新星や矮新星も含まれているはずである。

しかし、そのように増えつつある観測好機を、従来は十分に活かせていなかった。大規模サーベイでは最新の画像を過去に撮られた参照画像と比較して、明るくなっている天体を突発現象として検出し、報告する。したがって、発見時には天体の座標と明るさの情報のみが与えられ、その天体の正体は追跡観測によって初めて明らかになる。これまでは、夜間に新しい突発現象が報告された際、専門家が発見時の情報と共に、静穏時の情報などもオンラインデータベースで調査した上で、その天体の型を判定してきた。追跡観測には分光観測や多色観測、短時間変動を調べるための連続観測など、複数の選択肢があるが、可能性のある天体の型ごとに、次に行うべき追跡観測の種類は変わる。従来は専門家の知識と経験に基づいて、適切な追跡観測の意思決定がなされてきた。

このような追跡観測のプロセスでは、夜間、専門家が観測の現場に居ないと貴重な爆発初期のデータが取れなくなる。大規模サーベイによって発見される突発現象の数は飛躍的に増加しており、従来の専門家の判断に基づいた観測プロセスでは、大量の情報の処理が追いつかないという問題もあった。

2. 研究の目的

そこで、本研究では突発現象の追跡観測の意思決定まで含んだ自動化を実現することで、新星や矮新星の爆発初期のデータを得て、それらの天体の爆発機構を解明することを目的とした。これまで、あらかじめ決められた天体の観測を自動化し、ロボット望遠鏡として、夜間の人間の観測者を不要とする自動観測システムは既に世界中の研究チームが開発、運用してきた。しかし、本研究では、発見直後で天体の情報が少なく、その正体が不確定な状態で適切な判断をするシステムを実現する点が難しく、新しい点である。

3. 研究の方法

研究には広島大学宇宙科学センター附属の 1.5-m かなた望遠鏡を用いる。大学所有の望遠鏡であるため、突発現象の観測には融通が利きやすい。かなた望遠鏡は可視光と近赤外線が同時に観測できる観測装置 HONIR と、分光観測に使われる観測装置 HOWPoI を搭載している。追跡観測の候補としては、HONIR による B バンドと V バンドの多色撮像観測、HONIR による V バンド連続撮像観測、HOWPoI による分光観測の 3 つのモードを考える。

本研究で開発するシステムには先端的なデータサイエンス技術を導入する。まず、発見直後の天体の型の判別には、確率論的判別モデルとしてスパースロジスティック回帰と生成モデルを検討する。判別する型は、新星、通常の矮新星、特に研究対象となる WZ Sge 型矮新星の他に、それらと混同されやすいミラ型星、フレア星も含め、合計 5 クラスを考える。次に、適切な追跡観測モードの意思決定は情報理論の枠組みで行う。判別モデルで得られた型の確率を事前確率に、追跡観測で得られる測定量の分布を尤度関数として、相互情報量を追跡観測モードごとに計算し、最も相互情報量が大きいモードを選択することで、意思決定の自動化を図る。観測の自動化においても、天候の判定などは画像データの判別問題とみなし、簡単な深層学習モデルを構築する。

4. 研究成果

本研究で構築した「Smart Kanata」システムのフローチャートを図 1 に示す。本システムは 10 分に 1 回、「Transient Name Server」などオンライン上の主要な突発現象速報サービスを巡回し、新天体の報告を確認する。新天体の発見報告があった場合、既知の新星、もしくは WZ Sge 型矮新星の場合は即座に追跡観測を実行する。そうでない場合は、本研究で開発した機械判別モデルによって、天体のクラス確率を推定する。その結果、95%以上の確率で新星、もしくは WZ Sge 型の場合は追跡観測を実施する。さらにそうでない場合は、相互情報量を計算し、3 つの追跡観測モードから最も情報利得が大きいと期待されるモードを実施する。この追跡観測によって得られたデータは自動的に解析される。その結果からクラス確率がベイズ更新され、新星、もしくは WZ Sge 型の確率が最も高い場合は 4 時間の連続観測を実行する。観測モードは新星の場合は

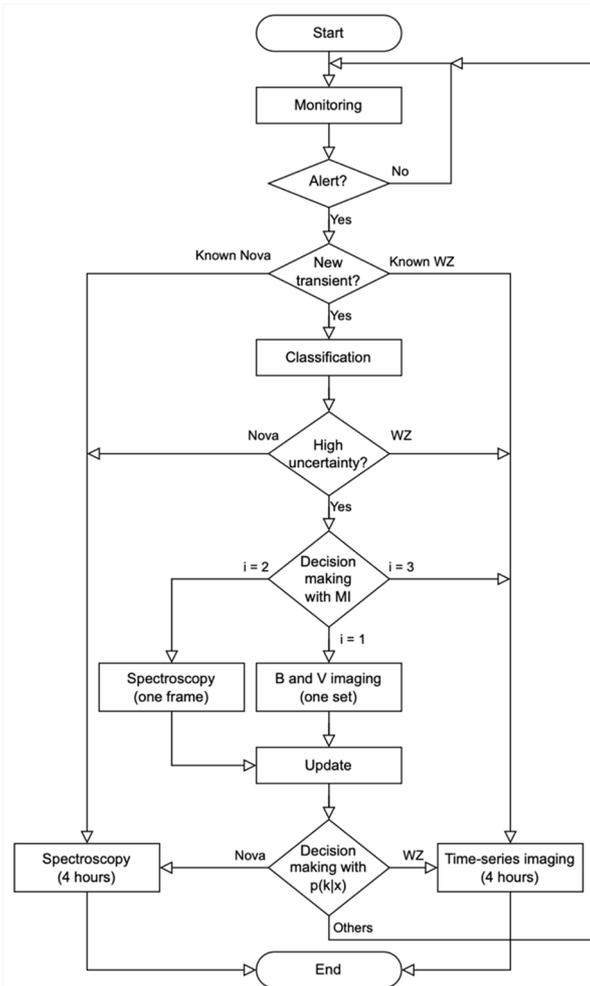


図1 Smart Kanata のフローチャート。

表1 開発した判別モデルの教師データに対する混同行列

Pred. \ Label	Label				
	N	DN	WZ	M	F
N	264	18	3	0	9
DN	13	1050	19	2	33
WZ	7	310	144	0	0
M	12	17	0	1048	9
F	1	57	0	11	420

連続撮像観測および解析システムの開発と試験運用を行った上で、Smart Kanata は2023年後期より、かなた望遠鏡において定常運用を開始した。かなた望遠鏡は新星・矮新星以外の天体の研究にも使われている。Smart Kanata は、それら継続中の観測を中断しないため、現場の観測者が最終的な追跡観測の認証を与える状態で運用されている。将来的に、他天体の観測研究もロボット化した際には、人間による最終認証を省略することもできる。

定常運用開始後、Smart Kanata は10日に1回程度の頻度で夜間に追跡観測すべき突発現象

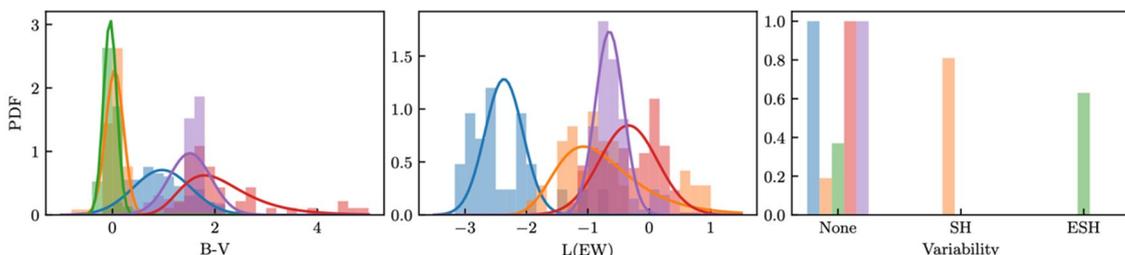


図2 追跡観測の測定量(B-V, L(EW), Variability) の変光星型ごとの分布。

HOWPoI による分光観測、WZ Sge 型の場合は HONIR による連続撮像観測が選択される。

Smart Kanata で扱うのは、8 特徴量を用いた 5 クラス判別問題である。約 2000 サンプルの教師データがあるが、欠損値が多いのが特徴である。判別モデルとしては単純な多変量正規分布を用いた生成モデルと、カーネル化によって非線形な決定境界を可能にするスパースロジスティック回帰をそれぞれ最適化して、性能を評価した。その結果、単純な生成モデルがスパースロジスティック回帰と同等の性能を示したため、欠損値があってもより多くのサンプルを教師データとして使える生成モデルを採択した。表1にモデルの性能として教師データに対する混同行列を示す。

Smart Kanata の最も新規性の高い点は、相互情報量によって追跡観測モードの意思決定を行うことである。このため、追跡観測で得られる測定量の、クラスごとの分布をあらかじめ作成する必要がある。本研究では5つの型に対して、色指数 B-V、H の等価幅、単時間変動の特徴について、公開データや過去の文献などから網羅的に調査し、図2の分布を作成した。これによって、専門家の主観によらない、客観的な意思決定を可能とした。

決定された観測モードを自動的に実施するためには、望遠鏡や観測装置に命令を送る前に、天候の判断なども必要となる。天候の判断は、東広島天文台屋上にある全天監視カメラの画像を利用して、畳み込みニューラルネットワークによる判別器を作成した。このモデルは監視カメラ画像を 32×32 ピクセルにダウンサイズした上で標準化したものを入力として、畳み込み層2つと全結合層2つの比較的単純なネットワークで、「晴天」「曇天」の2クラス判別とした。6万サンプルの画像を教師データとし、検証データに対する正解率97.8%のモデルを得た。Smart Kanata の追跡観測に必要な精度としては十分である。

これらの他にも、HOWPoI による自動分光観測および解析システムの開発と試験運用、さらに HONIR による自動多色撮像・

を検出しているが、多くは天候不良、もしくは観測者の不在によって自動追跡観測は実現しなかった。そして、2024年3月26日、日本人のアマチュア天文家である小嶋正氏が発見した新天体 TCP J17395720-2627410 の情報を Smart Kanata が検出、かなた望遠鏡 HOWPoI による自動分光観測が実施され、この天体が新星であることを明らかにした (Uemura & Nakaoka, ATel, 16521, 2024)。この観測結果をもとに、本天体は V4370 Oph という変光星名が付けられた。

得られた V4370 Oph の初日のスペクトル (灰色) と 5 日後のスペクトル (黒色) を図 3 に示す。初日のスペクトルは新星の極大前、5 日目のスペクトルは極大後のスペクトルとして典型的なものだが、1) 初日のスペクトルには Al III の兆候が見られること、2) H の吸収成分が 15 分間の間で有意に深くなっていること (図 4 参照)、3) 初日から 5 日目の輝線輪郭において、高速成分の成長が著しいこと、が明らかになった。同様に新星爆発の初期を捉えた過去の研究から、我々が観測した初日のスペクトルは、膨張ガスの光球面が外側へ広がると共に温度が低下することで高励起の輝線が消えつつあり、同時に、新星風が形成される前の段階であることが示唆される。

新星 V4370 Oph の他にも、Smart Kanata の連続観測モードでは試験運用の段階で既に 4 件の WZ Sge 型矮新星の連続多色観測に成功している。その結果、アウトバースト極大前の降着円盤においては、理論的に期待される 2 本腕構造ではなく、1 本腕のような構造が見られることなどが明らかになった (Sazaki, et al. in prep.)。

このように、本研究で開発した Smart Kanata は新星・矮新星の研究に効果的であることが実証された。このシステムによって、新星・矮新星の爆発初期の観測が今後飛躍的進展すると期待される。

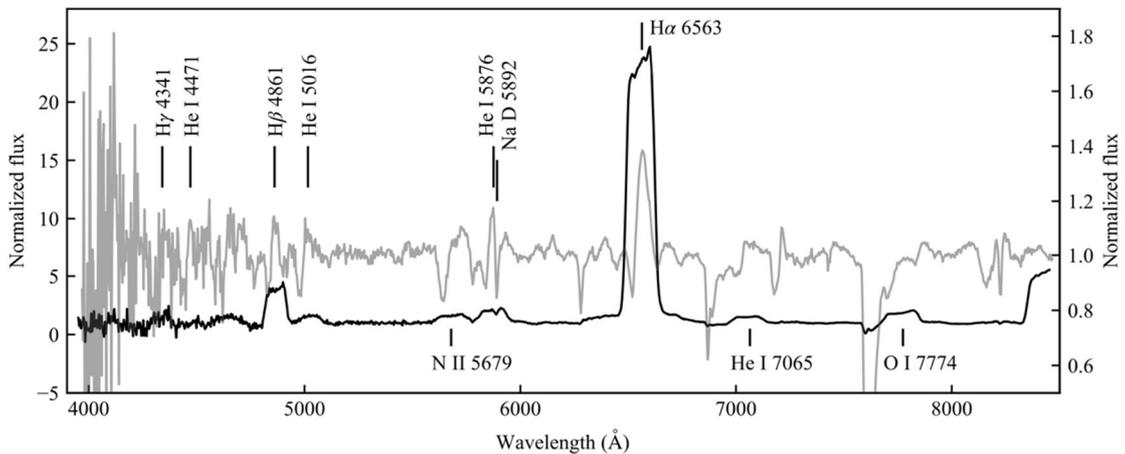


図 3 Smart Kanata によって得られた新星 V4370 Oph の爆発初日のスペクトル (灰色)

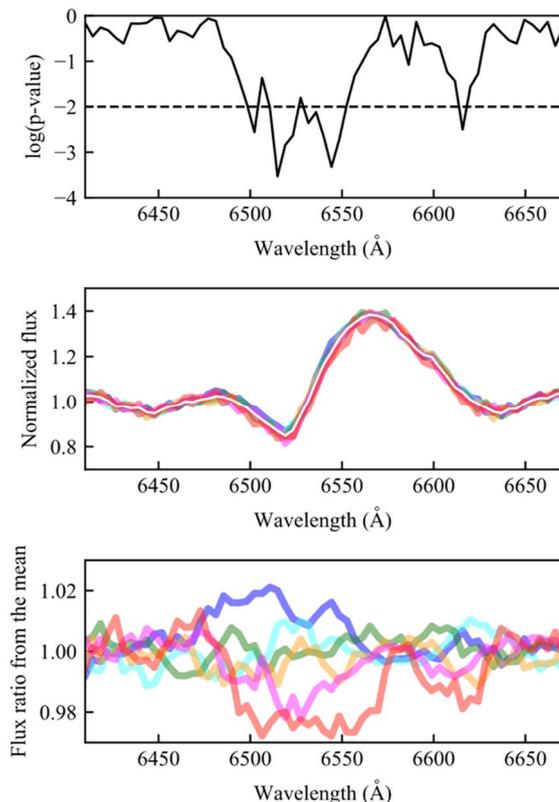


図 4 V4370 Oph の H 付近の拡大図。
 (上) 短時間変動の有意水準を表す p 値。
 (中) 観測されたスペクトル。(下) 各スペクトルを平均で正規化したもの。青、シアン、緑、黄色、マゼンタ、赤の順に時間が経過している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Peirson, Abel L., Negro, Michela, Liodakis, Ioannis, Uemura, Makoto, and 127 more	4. 巻 948
2. 論文標題 X-Ray Polarization of BL Lacertae in Outburst	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L25 ~ L25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/acd242	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 Valtonen, Mauri J., Zola, Staszek, Gopakumar, A., Uemura, M., and 23 more	4. 巻 521
2. 論文標題 Refining the OJ 287 2022 impact flare arrival epoch	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 6143 ~ 6155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad922	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 Valtonen, Mauri J., Zola, Staszek, Gopakumar, A., Uemura, M., and 24 more	4. 巻 525
2. 論文標題 On the need of an ultramassive black hole in OJ 287	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1153 ~ 1157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2249	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 Di Gesu, Laura, Marshall, Herman L., Ehlert, Steven R., Uemura, M., and 139 more	4. 巻 7
2. 論文標題 Discovery of X-ray polarization angle rotation in the jet from blazar Mrk 421	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 1245 ~ 1258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-023-02032-7	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 Gupta, Alok C., Kushwaha, Pankaj, Valtonen, Mauri J., Uemura, M., and 24 more	4. 巻 957
2. 論文標題 Quasi-simultaneous Optical Flux and Polarization Variability of the Binary Super Massive Black Hole Blazar OJ 287 from 2015 to 2023: Detection of an Anticorrelation in Flux and Polarization Variability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L11 ~ L11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/acfd2e	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 Kim, Dawoon E., Di Gesu, Laura, Liidakis, Ioannis, Uemura, Makoto, and 132 more	4. 巻 681
2. 論文標題 Magnetic field properties inside the jet of Mrk 421	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A12 ~ A12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202347408	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 Makoto Uemura, Tatsuya Nakaoka	4. 巻 16521
2. 論文標題 Spectroscopic Observation of TCP J17395720-2627410, Classifying as a Reddened Nova	5. 発行年 2024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 Errando, Manel, Liidakis, Ioannis, Marscher, Alan P., Uemura, Makoto, and 141 more	4. 巻 963
2. 論文標題 Detection of X-Ray Polarization from the Blazar 1ES 1959+650 with the Imaging X-Ray Polarimetry Explorer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 5 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad1ce4	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 Sawada N., Uemura M., Fujishiro I.	4. 巻 41
2. 論文標題 Multi-dimensional time-series subsequence clustering for visual feature analysis of blazar observation datasets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy and Computing	6. 最初と最後の頁 100663 ~ 100663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ascom.2022.100663	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 Tampo Yusuke, Isogai Keisuke, Kojiguchi Naoto, Uemura Makoto, Kato Taichi, Tordai Tamas, Vanmunster Tonny, Itoh Hiroshi, Dubovsky Pavol A, Medulka Tomas, Sano Yasuo, Hamsch Franz-Josef, Taguchi Kenta, Maehara Hiroyuki, Ito Junpei, Nogami Daisaku	4. 巻 74
2. 論文標題 PNV J00444033+4113068: Early superhumps with 0.7 mag amplitude and non-red color	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 1287 ~ 1294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac068	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 Middei Riccardo, Liidakis Ioannis, Perri Matteo, Uemura Makoto, 他144名	4. 巻 942
2. 論文標題 X-Ray Polarization Observations of BL Lacertae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L10 ~ L10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aca281	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 Kato Taichi, Tampo Yusuke, Kojiguchi Naoto, Shibata Masaaki, Ito Junpei, Isogai Keisuke, Itoh Hiroshi, Hamsch Franz-Josef, Monard Berto, Kiyota Seiichiro, Vanmunster Tonny, Sosnovskij Aleksei A, Pavlenko Elena P, Dubovsky Pavol A, Kudzej Igor, Medulka Tomas	4. 巻 73
2. 論文標題 BO Ceti: Dwarf nova showing both IW And-type and SU UMa-Type features	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1280 ~ 1288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab074	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 Kato Taichi, Kojiguchi Naoto	4. 巻 73
2. 論文標題 New candidates for AM Canum Venaticorum stars among ASAS-SN transients	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1375 ~ 1381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab080	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10件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 佐崎凌佑、植村誠、中岡竜也、今澤遼
2. 発表標題 WZ Sge 型矮新星 TCP J23580961+5502508 のアウトバースト初期の降着円盤 構造の進化
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Makoto Uemura
2. 発表標題 Automated Decision Making in Rapid Follow-up Observations of Cataclysmic Variables
3. 学会等名 Transients Down Under 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ryosake Sazaki, Makoto Uemura
2. 発表標題 The growth of the disk structure of WZ Sge-type dwarf novae
3. 学会等名 Transients Down Under 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 植村誠
2. 発表標題 突発現象の追跡観測の意思決定を自動化する：SMART KANATA計画
3. 学会等名 激変星研究会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植村誠
2. 発表標題 激変星の追跡観測に関する意思決定の自動化
3. 学会等名 天文学におけるデータ科学的方法
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植村誠
2. 発表標題 銀河系内突発現象の追跡観測とデータサイエンス
3. 学会等名 天の川銀河研究会2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植村誠
2. 発表標題 突発天体現象の観測とデータサイエンス
3. 学会等名 岡山大学物理談話会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古賀柚希、植村誠、池田思朗、加藤太一、野上大作、磯貝桂介、小路口直冬、田口健太、前原裕之
2. 発表標題 かなた望遠鏡による情報理論・機械学習を用いた自動意思決定システムの実用性の検証
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Uemura
2. 発表標題 Follow-up observations of galactic transients with astroinformatics
3. 学会等名 International Astronomical Union Astroinformatics and Astrostatistics Commission (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 反保雄介、野上大作、加藤太一、綾仁一哉、内藤博之、成田憲保、高橋英則、藤井貢、橋本修、衣笠健三、本田敏志、鳴沢真也、坂元誠、今田明
2. 発表標題 V455 And の分光観測:円盤風が矮新星アウトバーストに付随する可能性
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 植村 誠	4. 発行年 2023年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 240
3. 書名 物理のためのデータサイエンス入門	

〔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
研究 分 担 者	加藤 太一 (Kato Taichi) (20283591)	京都大学・理学研究科・助教 (14301)	

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