

令和 4 年 5 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13599

研究課題名(和文) 動画分光観測による惑星間空間ダスト組成サーベイ

研究課題名(英文) Investigation of Compositions of Interplanetary Dust by Spectroscopic Video Observation

研究代表者

大澤 亮 (Ohsawa, Ryou)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任助教

研究者番号：40748696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：大口径の望遠鏡と高感度ビデオカメラを組み合わせることで、可視光線で10-12等級に相当する微光流星を観測する技術を確立した。特に分光観測により惑星間空間ダストの組成を明らかにするための技術確立に取り組んだ。東京大学木曾観測所で開発した広視野CMOSカメラ『トモエゴゼン』で多色(分光)撮像を可能にするためのフィルタホルダを作成、微光流星をターゲットとしたキャンペーン観測を複数回実施した。大量の動画データから迅速に流星を抽出するためのソフトウェアの開発もおこなった。トモエゴゼンが10等級に迫る微光流星を検出可能であることを実証し、流星の光度関数や地球への流入量を制限した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球をとりまく空間には微小な固体物質(ダスト粒子)が存在しており、地球表面に絶えず流入し続けている。ダストは小惑星や彗星と行った太陽系小天体を起源としており、ダストの性質や起源を理解することは地球と宇宙の関わりを明らかにするとともに、太陽系の起源に迫るための情報を提供する。流星観測はダストを研究する重要な観測手法であるが、観測装置の感度限界から地球に流入する質量の大半を占める微細なダストの観測は困難だった。本研究では望遠鏡と高感度ビデオカメラによる流星観測手法を確立し、微細なダストの性質を調べるに足る感度を達成していることを実証した。流星観測からダスト粒子組成を解明するための道筋を確立した。

研究成果の概要(英文)：This project aims to establish a method to conduct a spectroscopic observation of faint meteors using a 1-m class telescope and a high-sensitivity video camera, to inspect the compositions of dust grains in the interplanetary space. We use the Tomo-e Gozen camera in Kiso Observatory, the University of Tokyo. An optical filter holder is developed for multicolor and spectroscopic observations with Tomo-e Gozen, and data reduction software is prepared to extract faint meteors from video data. Observation programs of faint meteors have been conducted. We confirm that Tomo-e Gozen can detect faint meteors down to 10th mag. in optical wavelengths. A luminosity function and meteor influx to the Earth are constrained.

研究分野：天文学

キーワード：流星 惑星間空間ダスト 広視野動画観測

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球をとりまく惑星間空間は惑星間空間ダストという微小な固体物質によって満たされている。小惑星や彗星といった太陽系小天体から放出されたダストの一部は地球に衝突し、地球大気と相互作用することによって流星として観測される。流星とは微小な粒子が希薄な大気中を高速で運動することによって生じる現象である。流星の規模(明るさや電離領域の大きさ)を測ることで惑星間空間ダストの持つエネルギー(質量)を知ることができる。また、流星の光は主に電離した原子・分子が再結合することで生じる輝線によるため、流星の色(スペクトル)を調べることによってダストや高層大気の組成を知ることができる。

流星は光学観測とレーダによる観測が主流である。レーダによる観測では、大口径高出力の大気レーダの建設と流星ヘッドエコーを捉える手法の確立によって、 $\sim 1\mu\text{g}$ に迫る小さいダストが起こす微光流星まで捉えられるようになった。一方で、光学観測では観測装置(ビデオカメラ)の感度が足りず、微光流星の研究はレーダによる観測が主流であった。近年の半導体センサ技術の発展によって、動画観測を高感度で可能なイメージセンサが利用可能になった。光学観測によって微光流星を捉える基盤が整いつつある。特に、惑星間空間ダストの組成に迫るためのスペクトル観測手法を確立することが重要になっている。

2. 研究の目的

本研究では、大口径($\sim 1\text{m}$)の望遠鏡と高感度動画カメラを組み合わせることで、可視光で10-12等級にあたる微光流星を観測する技術を確立する。特にスペクトル観測によって微光流星の組成を明らかにするための技術確立を目指す。また、大量の動画データから迅速に流星を抽出するためのソフトウェア開発も実施する。最終的に大規模な微光流星の動画観測を実施することによって微光流星の組成サーベイをおこなうことを目指す。

3. 研究の方法

本研究では東京大学理学系研究科天文学教育研究センター附属木曾観測所に設置された105cm-木曾シュミット望遠鏡と広視野モザイクCMOSカメラ“トモエゴゼン”[1]を使用する。トモエゴゼンは高感度CMOSイメージセンサを84枚搭載し、最大2fpsで連続動画撮影ができる観測装置である(図1左)。微光流星を効率よく観測するためには高い集光力、広い観測視野、高いフレームレートが必要である。105cm-木曾シュミット望遠鏡とトモエゴゼンの組み合わせは微光流星の観測に高いパフォーマンスを発揮する。

トモエゴゼンは広域サーベイ観測に特化した観測装置である。搭載しているイメージセンサはモノクロであり、光学フィルタを交換する機構も搭載していない。しかしながら、センサ前方にはクリアフィルタ(光学ガラス)が設置されており、クリアフィルタを透過型の分散素子や色ガラスフィルタと交換することによって多色での観測を実現できる。本研究では多色観測のためのフィルタホルダを新規作成し、分散素子や色ガラスフィルタを搭載して流星の観測を実施する。

トモエゴゼンのセンサは1枚あたりおよそ2Mpixelの画素をもっている。84枚のセンサで1晩継続観測すると最大で20TB近いデータを生成する。人力で流星を抽出することは現実的ではない。また、ターゲットとする微光流星はトモエゴゼンもちいても低面輝度の線分として観測されるため、専用の検出アルゴリズムが必要である。本研究では2016年に開発したアルゴリズム[2]をベースとしてトモエゴゼンが出力する動画データから、微光流星を効率よく抽出するためのソフトウェア開発もおこなう。

4. 研究成果

(1) フィルタホルダの作成: 分光素子と色ガラスフィルタを搭載するためのフィルタホルダを作成した(図1右)。フィルタホルダはトモエゴゼンカメラの1/4を覆う形状をしており、それぞれの検出器に異なる光学素子をインストールすることができる。最大で21枚の光学素子を搭載できる。本研究では測光フィルタとしてSDSSシステムの g' 、 r' 、 i' バンドを3枚ずつ搭載した。また、分光素子として透過型グレーティングを2枚購入・加工して搭載した。

(2) 流星検出ソフトウェアの開発: トモエゴゼンの各検出器は $39.7' \times 22.4'$ の領域を2fpsで連続撮影する。このフレームレートでは流星の運動を捉えることはできず、流星は1,2フレームにのみ映る線分として撮影される。大量の画像データの中から突発的に現れる直線構造を検出するためのアルゴリズムと、データを迅速に処理するためのソフトウェアを開発した。Hough変換を応用したアルゴリズム[2]を実装し、ソフトウェアをパッケージとして公開した[3]。本研究で取得したデータに作成したソフトウェアを適用して流星の検出をおこなった。

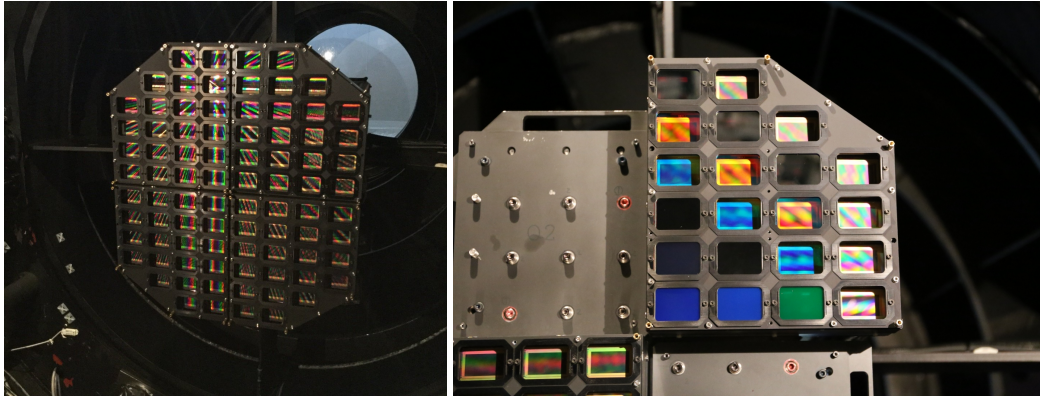


図1 (左) 105 cm-木曾シュミット望遠鏡焦点部に搭載された トモエゴゼンカメラ; (右) 本研究で作成したフィルタホルダ. 各種色ガラスフィルタと透過型分光素子を搭載している.

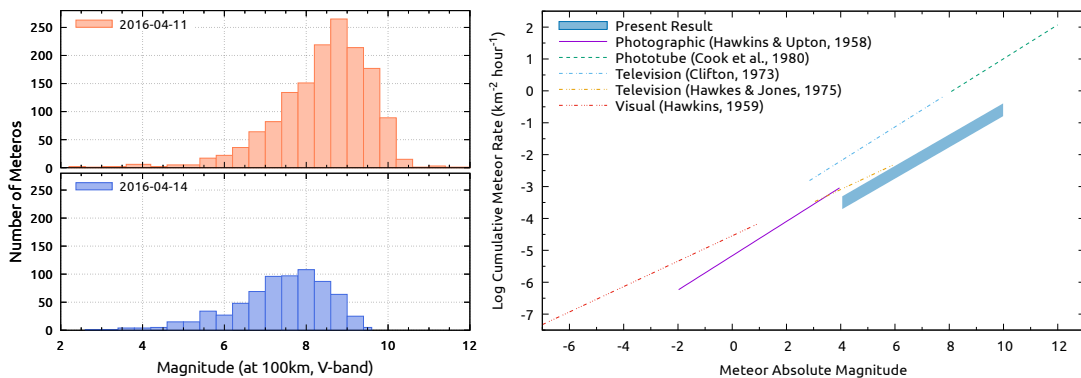


図2 (左) トモエゴゼン試験機によって検出された微光流星の光度分布. (右) 本研究で制限した微光流星の光度関数 (水色領域) と先行研究との比較. いずれも [8] からの引用.

(3) 微光流星観測キャンペーン: 東京大学木曾観測所にて微光流星のキャンペーン観測を実施した. 2018年4月には京都大学生存圏研究所 MU レーダとトモエゴゼンによる同時観測試験を実施した. 2019年には作成したフィルタホルダに透過型グレーティングを搭載して, 流星の色情報を取得するための試験データを取得した. 2019年12月には MU レーダと共同でふたご座流星群の同時観測を実施した. 2020年10月にはフィルタホルダに g' , r' , i' バンドのフィルタを取り付けて微光流星の多色撮像観測を実施した. 2020年11月には小惑星リュウグウから放出されたダスト粒子をターゲットとした流星のキャンペーン観測を実施した. 2020年12月には再び MU レーダと共同でふたご座流星群の同時観測を実施した. 105 cm-木曾シュミット望遠鏡とトモエゴゼンの性能を活かしたユニークなデータであり, 惑星間空間ダストの性質の理解に大いに役立つ情報を蓄積することができた.

(4) 望遠鏡観測による微光流星の光度関数: 本研究で開発したソフトウェアを使用して, トモエゴゼン試験機が2016年4月に取得した動画観測データを解析, 微光流星の光度頻度分布 (光度関数) を調べた. トモエゴゼン試験機はトモエゴゼンと同じセンサを8枚搭載したカメラであり, 微光流星の検出効率では劣るものの, 流星の検出感度についてはトモエゴゼンと同等である. 2日間の観測によってそれぞれ1514件と706件の流星を検出した. いずれの流星も特定の流星群に属さない散在流星であると考えられる. 検出した流星の光度分布を図2(左)に示した. 可視光で4-10等級の範囲において, 光度分布は傾きが $r = 3.1 \pm 0.4$ のべき関数でよく近似できることがわかった (図2右). 得られた結果は先行研究 [4, 5, 6, 7] と整合的であり, 散在流星の光度関数が火球レベルから微光流星まで同じ傾きの分布に従うことを示唆している. 本研究によって 105 cm-木曾シュミット望遠鏡とトモエゴゼンによって 10 等級に迫る微光流星の研究が可能であることを実証した [8].

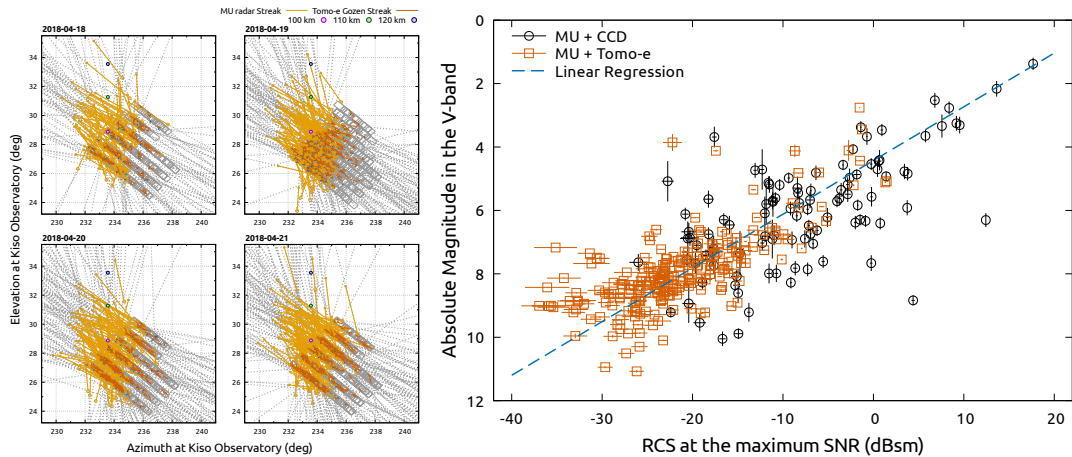


図3 (左) トモエゴゼンと MU レーダによって同時に検出された流星の飛跡. (右) 可視光での等級とレーダ反射断面積との関係. いずれも [13] からの引用.

(5) 京大生生存圏研究所 MU レーダとの微光流星同時観測: 大口径高出力レーダでは一晩に数千件の流星が検出される. こうした流星を可視光で捉えるための試みは数多くなされてきた [9, 10, 11, 12] が, 統計的な議論を行うに十分な数の流星を同時に検出することはできていなかった. トモエゴゼンであれば, 流星ヘッドエコー観測が対象としているような微小なダストによる流星も捉えることができる. そこで東京大学木曾観測所からおよそ 173 km 離れた京大生生存圏研究所 MU レーダとの協同観測を実施した. 2018 年 4 月 18–22 日に実施した観測では, 2 つの施設で同じ流星を捉えた可能性が高いものに限定しても, 合計 228 件の散在流星を検出することに成功した. 図 3 (左) に検出した流星の飛跡を木曾観測所から見た空に投影した. 流星ヘッドエコー観測で捉えてきた流星と可視光での流星を結びつけることに成功した (図 3 右). 微光流星のレーダ反射断面積と可視光の光度を相互に変換するための経験式を導出し, 惑星間空間ダストが地球表面へ 1 日あたり 1×10^3 kg ほど流入していることを示した [13, 14]. MU レーダとの協同観測は継続して実施しており, 特にダストの母天体がわかっているふたご座流星群をターゲットにした観測を遂行している. 本研究を進展させることで散在流星とふたご座流星群のダストの違いに迫ることができると考えている.

(6) 今後の展開: 本研究では目標の一部であった, 望遠鏡観測による観測で微光流星を検出する技術の確立, および大規模な微光流星観測の実施を達成することができた. 一方で, 計画の遅れやデータ解析の複雑性などの影響で微光流星の色情報 (スペクトル) を明らかにするための解析が遅れている. すでにトモエゴゼンによって世界的にもユニークなデータセットが得られている. 今後も解析を継続することで, 惑星間空間ダストの組成に迫るための情報を引き出す. また, 研究開始時には単純な形状のフィルタホルダしか制作する技術がなかったため, 分光観測のデータ解析が極めて複雑になるという問題があった. 木曾観測所では湾曲した焦点面に沿ったフィルタホルダの開発を進めている. この技術を活用することで, 本研究を加速することができると期待している. また, 105 cm-木曾シュミット望遠鏡には対物プリズムを搭載することができる. こちらも研究期間中には活用の目処が立たなかったが, 新たな分光観測手法として検討を進める. 本研究の成果をステップとして微光流星・惑星間空間ダストの研究を大きく進展させることができる.

<引用文献>

- [1] Sako, S. et al. The Tomo-e Gozen wide field CMOS camera for the Kiso Schmidt telescope. in Proc. SPIE vol. 10702 107020J.
- [2] Ohsawa, R. et al. Development of a real-time data processing system for a prototype of the Tomo-e Gozen wide field CMOS camera. in Proc. SPIE vol. 9913 991339.
- [3] Ohsawa, R. Faint Line Segment Detection Tool, <https://pypi.org/project/falsedto/>
- [4] Hawkins, G. S. & Upton, E. K. L. The Influx Rate of Meteors in the Earth's Atmosphere. The Astrophysical Journal 128, 727 (1958).

- [5] Hawkins, G. S. The relation between asteroids, fireballs and meteorites. *The Astronomical Journal* 64, 450 (1959).
- [6] Hawkes, R. L. & Jones, J. Television observations of faint meteors. I - Mass distribution and diurnal rate variation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 170, 363–377 (1975).
- [7] Cook, A. F., Weekes, T. C., Williams, J. T. & Omongain, E. Flux of optical meteors down to MPG = +12. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 193, 645–666 (1980).
- [8] Ohsawa, R. et al. Luminosity function of faint sporadic meteors measured with a wide-field CMOS mosaic camera Tomo-e PM. *P&SS* 165, 281–292 (2019).
- [9] Michell, R. G. Simultaneous optical and radar measurements of meteors using the Poker Flat Incoherent Scatter Radar. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 72, 1212–1220 (2010).
- [10] Michell, R. G. et al. Simultaneous optical and radar observations of meteor head-echoes utilizing SAAMER. *Planetary and Space Science* 118, 95–101 (2015).
- [11] Nishimura, K., Sato, T., Nakamura, T. & Ueda, M. High sensitivity radar-optical observations of faint meteors. *IEICE Transactions on Electronics* E84-C, 1877–1884 (2001).
- [12] Brown, P. et al. Simultaneous optical and meteor head echo measurements using the Middle Atmosphere Alomar Radar System (MAARSY): Data collection and preliminary analysis. *Planetary and Space Science* 141, 25–34 (2017).
- [13] Ohsawa, R. et al. Relationship between radar cross section and optical magnitude based on radar and optical simultaneous observations of faint meteors. *P&SS* 194, 105011 (2020).
- [14] Ohsawa, R. & Sako, S. Weighing space dust with radar, UTokyo Focus, University of Tokyo https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/en/press/z0508_00143.html

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 R. Ohsawa, A. Hirota, K. Morita, S. Abe, D. Kastinen, J. Kero, C. Szasz, Y. Fujiwara, T. Nakamura, K. Nishimura, S. Sako, J. Watanabe, et al.	4. 巻 194
2. 論文標題 Relationship between radar cross section and optical magnitude based on radar and optical simultaneous observations of faint meteors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 105011 ~ 105011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2020.105011	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 K. Arimatsu, G. L. Hashimoto, M. Kagitani, T. Sakanoi, Y. Kasaba, R. Ohsawa, S. Urakawa	4. 巻 638
2. 論文標題 Evidence for a rapid decrease of Pluto's atmospheric pressure revealed by a stellar occultation in 2019	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202037762	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 Michael W. Richmond, Masaomi Tanaka, Tomoki Morokuma, Shigeyki Sako, Ryou Ohsawa, Noriaki Arima, Nozomu Tominaga, Mamoru Doi, et al.	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 -
1. 著者名 Ko Arimatsu, Ryou Ohsawa, George L. Hashimoto, Seitaro Urakawa, Jun Takahashi, Miyako Tozuka, Yoichi Itoh, Misato Yamashita, et al.	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 -

1. 著者名 Ohsawa Ryou, Sako Shigeyuki, Sarugaku Yuki, Usui Fumihiko, Ootsubo Takafumi, Fujiwara Yasunori, Sato Mikiya, Kasuga Toshihiro, Arimatsu Ko, Watanabe Jun-ichi, 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9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Ryou Ohsawa, Jin Beniyama, Shigeyuki Sako, Seitaro Urakawa, Shin-ichiro Okumura, Jun-ichi Watanabe, Makoto Yoshikawa, Tomoki Morokuma
2. 発表標題 Near-Earth Asteroid Survey with Tomo-e Gozen
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryou Ohsawa, Akira Hirota, Shinsuke Abe, Daniel Kastinen, Johan Kero, Shigeyuki Sako, Jun-ichi Watanabe
2. 発表標題 Radar and optical simultaneous observations of faint meteors with MU radar and Tomo-e Gozen
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryou Ohsawa, Akira Hirota, Kohei Morita, Shinsuke Abe, Daniel Kastinen, Johan Kero, Takuji Nakamura, Koji Nishimura, Shigeyuki Sako, and Jun-ichi Watanabe
2. 発表標題 Radar and optical simultaneous observations of faint meteors with MU radar and Tomo-e Gozen
3. 学会等名 Meteoroids 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大澤亮, 弘田旭, 森田晃平, 阿部新助, Daniel Kastinen, Johan Kero, 藤原康徳, 中村卓司, 西村耕司, 酒向重行, 渡部潤一
2. 発表標題 京都大学 MU レーダと東京大学木曾観測所 {Tomo-e-Gozen} による微光流星同時 観測
3. 学会等名 日本惑星科学会 2019 年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 MU レーダと Tomo-e Gozen による微光流星同時観測
2. 発表標題 大澤亮, 森田晃平, 阿部新助, Daniel Kastinen, Johan Kero, 藤原康徳, 中村卓司, 西村耕司, 酒向重行, 渡部潤一, Tomo-e Gozen Science Working Group メンバー
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 Ryou Ohsawa
2. 発表標題 All Sky Survey and Meteor Observations with Tomo-e Gozen
3. 学会等名 9th Workshop on Catastrophic Disruption in the Solar System (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryou Ohsawa, et al.
2. 発表標題 Video Observations of Faint Meteors with Tomo-e PM
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018 年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryou Ohsawa, Shigeyuki Sako, Fumihiko Usui, Yuki Sarugaku, Mikiya Sato, Yasunori Fujiwara, Takafumi Ootsubo, Shinsuke Abe, Akira Hirota, Ko Arimatsu, Toshihiro Kasuga, Jun-ichi Watanabe, and Tomo-e Gozen Science Group
2. 発表標題 Optical Observations of Faint Meteors with a Wide-Field CMOS Camera Tomo-e Gozen
3. 学会等名 45th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大澤亮, 酒向重行, 小島悠人, 奥村真一郎, 浦川聖太郎, 柳澤俊史, 吉川真, Tomo-e Gozen サイエンスグループ
2. 発表標題 東京大学木曾観測所広視野 CMOS モザイクカメラ Tomo-e Gozen による人工天体の観測
3. 学会等名 第 8 回 スペースデブリワークショップ (国際学会)
4. 発表年 2018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と京都大学生存圏研究所MUレーダーによって微光流星の同時観測に成功 https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2020/7097/ Weighing space dust with radar https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/en/press/z0508_00143.html</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

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