

令和 3 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13606

研究課題名（和文）オールト雲の解明

研究課題名（英文）Revealing the Oort cloud

研究代表者

有松 亘（Arimatsu, Ko）

京都大学・理学研究科・研究員

研究者番号：70770808

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では直接観測が不可能なオールトの雲に位置する天体の観測手法の開発を実施した。オールト雲天体による恒星掩蔽現象を検出するために、極めて広視野な動画観測が可能な観測システムを開発し、掩蔽検出及び詳細な解析を実現する解析ツールの開発にも成功した。これらの開発を通して、過去のデータからカイパーベルト天体による掩蔽イベント候補の検出に成功したほか、既知の太陽系外縁天体および動画天文学に関する複数の学術的成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カントやラプラスの時代に実証科学の対象として昇華せしめられた太陽系の起源に関わる問いは、今なお一定の答えを得るには至っていない。その理由の一つには、外側太陽系への探査が実現した現代に至ってもなお、人類が太陽系の最外縁部であるオールトの雲領域の観測技術を持ち合わせていないことにある。

本研究ではオールト雲天体が恒星の手前を通過する『掩蔽』と呼ばれる天文現象を利用することで、極めて安価で小型ながら、オールト雲天体の観測を実現できる観測システムの開発を実現した。今後本格的な観測を実施することで、史上初めてオールトの雲の領域の天体の検出を実現できる見込みである。

研究成果の概要（英文）：In this study, observational methods for the detections of Oort cloud objects have been developed. Observation systems for the detections of stellar occultations by Oort cloud objects have been developed. Also, data reduction tools for detections and analyses of occultation event candidates have been developed. Through these developments, a single occultation event candidate by a Kuiper-belt object is found from archival data. In addition, multiple scientific results about known trans-Neptunian objects and movie astronomy have been obtained.

研究分野：太陽系天文学

キーワード：太陽系外縁部 タイムドメイン天文学 惑星科学 冥王星

### 1. 研究開始当初の背景

惑星探査機が海王星以遠の星間空間に到達した現代においてもなお、カイパーベルト以遠の太陽系外縁部の描像は不明である。それはひとえにそうした領域の観測技術が存在しないためである。カイパーベルト以遠の太陽系外縁部には、長周期彗星の供給源として『オールトの雲』と呼ばれる天体集団が仮説的に提唱されてきた。このオールトの雲にはおよそ  $10^{11}$  天体もしくはそれ以上の数の小天体が存在していることが推定され、それらの天体の基本的特性を解明する事は太陽系の形成・進化プロセスを解明する上で重要であると考えられているが、当該領域での天体の観測例はなかった。

### 2. 研究の目的

本研究は、天球上を移動するオールト雲天体が背景の恒星の手前を通過する際に発生する恒星掩蔽現象の検出によって、これまで観測不可能であったオールト雲天体の観測的研究を実現することを目的としている。オールト雲天体による恒星掩蔽現象は継続時間が数秒未満かつ発生頻度の極めて小さい現象であることから、既存の観測体制では検出困難であった。よって本研究ではオールト雲天体による恒星掩蔽現象の検出を実現するためのソフトウェア面・ハードウェア面での観測手法を確立する。掩蔽検出のために構築する可視動画観測手法は、既存の観測手法では見逃されていた新たなサイエンスの開拓に貢献する可能性がある。よって本研究では実現できる新たな惑星科学・観測天文学の分野開拓を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究はまず、現実的な観測時間内でオールト雲天体による恒星掩蔽の検出を実現する観測システムの構築を実施する。具体的には(1)現実的な時間スケールで掩蔽イベントを検出し、掩蔽を司る天体のサイズや表面大気圧などについて観測的制約を得ることのできるソフトウェアの開発、および、(2)2017年度までに開発していた既存の観測システムと比較し、より広視野かつ高感度、そしてより高効率な観測の実現できる新観測システムの開発、を実施する。そして2016年度から2017年度に取得された、旧観測システムによって得られた観測データの再解析を実施し、外部太陽系の未知天体による恒星掩蔽イベントの検出及び詳細な解析を実施する。いっぽうでこうした動画観測・解析技術を応用した新たな科学成果の導出も実施する。具体的には旧観測システムによって得られた観測データの再解析結果に基づいて、秒スケール未満で発生する未知の発光現象の検出を試み、その発生頻度に観測的制約を得る。さらに国内外の望遠鏡を用いた動画観測を実施し、既知の外縁天体による事前予報可能な恒星掩蔽イベントの観測を実施し、その天体のサイズ、大気や環の有無や、大気が存在が確認されている天体に関しては大気圧の季節変動などについて観測的制約を得る。

### 4. 研究成果

2018年度には動画観測データから恒星掩蔽現象を確実に検出し、偽検出率や検出効率を高い精度で計算する解析プログラムを開発した。この解析プログラムを2016-2017年度に取得していた動画観測データに適用することで、史上初めて半径1-10キロメートル(以下キロメートルサイズ)のサイズを持つ太陽系外縁天体による恒星掩蔽現象を検出することに成功した(図1)。当該年度には当該研究成果に関する論文(Arimatsu et al., 2019, Nature

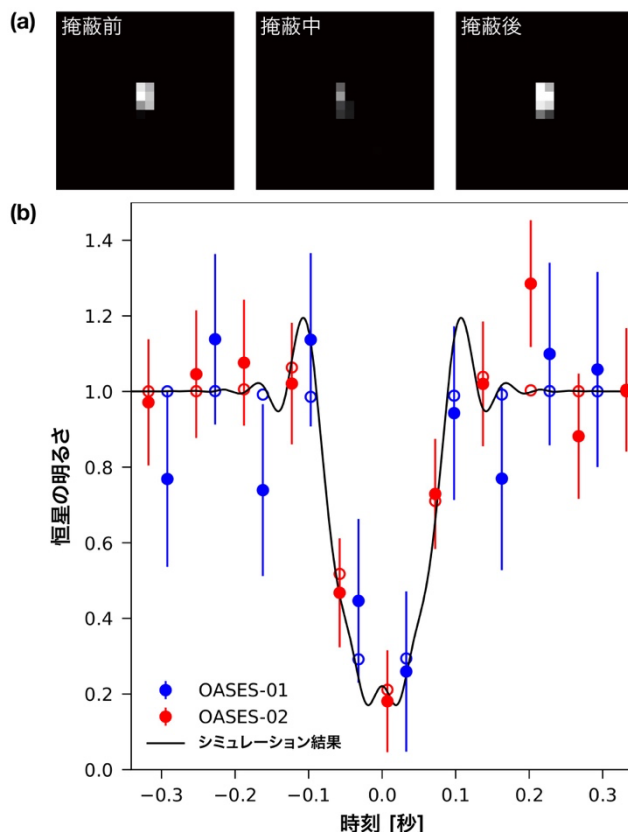


図1. (a) OASES 観測システムによって観測された、掩蔽された瞬間の恒星の画像(動画データから切り抜き)。 (b) 掩蔽時の恒星の明るさの変化のグラフ。2台の観測システムで観測された恒星の明るさをそれぞれ誤差棒付きの青点および赤点で示している。実線はカイパーベルト天体の掩蔽による明るさの変化のシミュレーション結果を示している。(Arimatsu et al. 2019, Nature Astronomy, 3, 301 より改変)

Astronomy, 3, 301)を公開した。キロメートルサイズの太陽系外縁天体の存在が直接観測・掩蔽観測いずれでも観測的に明らかになったのは史上初めてである。当該研究成果は『オールトの雲の小天体の発見』という本研究の最終目的の達成にとっても極めて大きな前進である。2018年度はさらに当初の計画で予定されていた掩蔽観測システムのアップグレードを一部実行した。オールト雲天体の検出をより確実に実現するために、アップグレード版観測システムの概念設計を当初の予定から変更し、小サイズの外縁天体による掩蔽観測に特化した新観測システムA(仮)と、より大きなサイズの外縁天体による掩蔽観測に特化した新観測システムB(仮)の計2種類の観測システムの開発を実施した。新観測システムBに関しては試作機の開発を完了し、2019年3月には観測予定地である沖縄県宮古島市にて試験観測を実施した。こうした活動と並行して、東京大学木曾観測所シュミットカメラに搭載されたTomo-e Gozenカメラなど、既存もしくは近未来に稼働する予定の観測装置を用いたオールト雲天体の観測可能性を検討した。2019年度には動画観測データから検出された恒星掩蔽現象に対して、(1)詳細な光度曲線を計測する動画データ解析プログラム、および、(2)得られた光度曲線と直接比較可能なモデル光度曲線を計算し、天体のサイズや表面大気圧などについて観測的制約を得ることのできるfitプログラム、の開発を実行した。2019年6月および7月には既知の太陽系外縁天体であるQuaoar(クワオアーもしくはクワオワー)および冥王星による恒星掩蔽現象について、それぞれ国内外の望遠鏡を用いた協調観測を実行した。得られた観測データに対して作成したデータ解析およびfitプログラムを適用し(データ解析プログラムに関しては一部実行)、Quaoarおよび冥王星表面の表面大気圧について新たな観測的制約を得ることに成功した。Quaoarの観測成果に関しては論文(Arimatsu et al., 2019, *Astronomical Journal*, 158, 6, 236)を投稿し、出版された。さらに新観測システムBに関しては試作機を改良した上で、東京大学木曾観測所シュミットカメラに搭載されたTomo-e Gozenカメラとの流星の協調観測を2019年8月に実施した。2020年度には新観測システムAの開発が完了したほか、掩蔽観測および動画観測データを用いた論文2報を出版した。2020年度には2019年度に概念設計が完了していた、掩蔽動画モニタ観測に特化した観測システムの開発を実施し、動作試験などを実施した。その結果、観測システムが掩蔽観測に必要なフレームレートでデータを取得できることなどを確認した。また2020年度は新観測システムを用いた長時間のモニタ観測を想定し、前年度までに開発した解析プログラムをさらに高速化させることに成功した。当該観測システムを用いたモニタ観測はCovid-19(いわゆる新型コロナウイルス)の感染拡大により、当該研究機関内には実施できなかったものの、2021年度以降に本格的なモニタ観測を実施する予定である。2020年度は観測システムの開発に加え、2019年度に引き続き冥王星による恒星掩蔽現象の観測データの再解析を進め、冥王星の大気圧の時間変動を観測的に確認することに成功した。当該研究成果に関しては投稿論文として公開した(Arimatsu et al. 2020, *Astronomy & Astrophysics*, 638L, 5)。当該年度は可視動画天文学の可能性を追求する一環として、動画データを利用した掩蔽観測以外のサイエンスの開拓も行った。旧観測システムによって取得された動画観測データの再解析を実行し、天球上で0.1秒-秒スケールの閃光現象の発生頻度の上限値に観測的制約を得ることに成功した。こうした観測的制約は得られた前例がなく、今後可視動画天文学の進展によって切り開かれていることが期待される新たなサイエンスの一例を示した。当該研究成果について投稿論文として公開した(Arimatsu et al., 2021, *The Astronomical Journal*, 161, 3)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Arimatsu Ko, 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Richmond Michael W, Tanaka Masaomi, Morokuma Tomoki, Sako Shigeyuki, Ohsawa Ryou, Arima Noriaki, Tominaga Nozomu, Doi Mamoru, Aoki Tsutomu, Arimatsu Ko, 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(1 ~ 14)
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 Arimatsu K., Tsumura K., Usui F., Shinnaka Y., Ichikawa K., Ootsubo T., Kotani T., Wada T., Nagase K., Watanabe J.	4. 巻 3
2. 論文標題 A kilometre-sized Kuiper belt object discovered by stellar occultation using amateur telescopes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 301 ~ 306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-018-0685-8	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-ich, 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 Arimatsu K., Hashimoto G. L., Kagitani M., Sakanoi T., Kasaba Y., Ohsawa R., Urakawa S.	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Arimatsu Ko, Tsumura Kohji, Usui Fumihiko, Ootsubo Takafumi, Watanabe Jun-ichi	4. 巻 161
2. 論文標題 Detectability of Optical Transients with Timescales of Subseconds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 135 ~ 135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/abd94d	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2件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Ko Arimatsu, Kohji Tsumura, Fumihiko Usui, Shinnaka Yoshiharu, Kohei Ichikawa, Takafumi Ootsubo, Takayuki Kotani, Takehiko Wada, Koichi Nagase, Jun-ichi Watanabe
2. 発表標題 A kilometre-sized Kuiper belt object revealed by OASES stellar occultation observations
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有松 亘
2. 発表標題 動画観測が究明する太陽系外縁部の " 影 "
3. 学会等名 第10回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

太陽系外縁天体が星を隠す瞬間の高感度観測に成功 - トモエゴゼンが実現する太陽系の果ての究明 -  
[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2019/191127\\_1.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2019/191127_1.html)  
小型望遠鏡で捉えた太陽系最果てにある小天体の影  
<https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190129-kbo.html>  
太陽系の果てに極めて小さな始原天体を初めて発見  
[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2018/190129\\_1.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/190129_1.html)

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