

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247074

研究課題名(和文) 広視野高速カメラによる太陽系外縁天体の探査

研究課題名(英文) High-speed and wide-field survey for trans-Neptunian objects

研究代表者

渡部 潤一 (Watanabe, Junichi)

国立天文台・天文情報センター・教授

研究者番号：50201190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はキロメートルサイズの太陽系外縁天体(trans-Neptunian objects; TNO)の掩蔽を観測することでTNOのサイズ頻度分布を決定し、太陽系初期の外縁部の環境や巨大氷惑星の移動プロセスを明らかにすることを目標とする。そのために高感度CMOSセンサを搭載した視野5平方度の広視野高速カメラを開発した。このカメラを東京大学木曾観測所の口径1mシュミット望遠鏡に取り付け、TNOの掩蔽の検出をめざした試験観測を実施した。黄道面や銀河面の背景星に対する広域かつ高速なデータを取得しその特性を解析することで、大規模掩蔽観測に必要なソフトウェアの開発と観測手法の構築を行った。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to reveal outer environment in the early solar system and migration process of ice giant planets by observing occultations of kilo-meter-size trans-Neptunian objects (TNOs) and deriving their size-frequency distribution. We have developed a wide-field high-speed camera with a field-of-view of 5 deg<sup>2</sup> equipped with highly sensitive CMOS sensors and conducted test observations with this camera on the 1-m Schmidt telescope at Kiso observatory, the University of Tokyo to detect the TNO occultations. We have also developed software and observation methods necessary for large surveys for the occultations by researching characteristics of data obtained with this camera in wide-field and high-speed observations in the ecliptic plane and the milky way regions.

研究分野：太陽系天文学

キーワード：固体惑星 衛星 小惑星 惑星形成 惑星進化

### 1. 研究開始当初の背景

太陽系には 30 天文単位(以下、AU)の海王星軌道から数 100AU 以遠に広く分布する多数の太陽系外縁天体 (trans-Neptunian objects; TNO) がある。TNO は直径 2,000km を越えるものから 100m 以下のものまで多様なサイズを持ち、氷や有機物に富む原始的な天体である。これらは太陽系形成時に巨大氷惑星の外側移動により重力散乱され、かつ相互衝突により軌道が変化して、現在の姿に進化したと考えられている。TNO のサイズ頻度分布 (size-frequency distribution; 以下、SFD) は散乱や衝突の歴史を反映しており、TNO の起源や進化のみならず、太陽系初期の外縁部の環境や巨大氷惑星の移動プロセスを探る大きな手がかりとなるが、その全体像はまだ明らかになっていない。

TNO はこれまでに 1,200 個以上が発見されている。これまで得られた SFD は直径 20km 以上の範囲は直接検出されている (Fuentes+2008) が、直径 10km 以下の TNO は可視光で 30 等級より暗いため、口径 10m クラスの望遠鏡でも直接検出は不可能である。一方、TNO は移動天体のため、背景の恒星を一時的に隠す掩蔽現象を起こす。隠される恒星のライトカーブを観測することで、TNO の存在だけでなく、その天体サイズの推定が可能になる。Zhang+2013 は長期のモニタ観測の結果、掩蔽の検出には至らなかったものの、直径 1~10km の範囲の SFD の上限値を与えた。より小さい数 100m の TNO については、ハッブル宇宙望遠鏡のガイドセンサで検出した掩蔽から SFD が求められている (Schlichting+2012)。

直径 30km 以上の TNO は原始太陽系円盤で形成された天体の生き残りなのに対し、直径数 km 以下は衝突により二次的に形成されたと推定され、それぞれ SFD の勾配が異なる。この勾配が遷移する (折れ曲がる) 場所は、太陽系初期の天体の分布や、天体の衝突破壊強度に依存するため、TNO の起源や性質を探る上で重要とされている。

SFD の折れ曲がりには km サイズの範囲にあると推測される。km サイズの TNO による掩蔽の頻度は恒星 1 つあたり  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  回/年と稀であり、かつ継続時間が 0.2~1 秒間と短いため、検出には数多くの恒星を高速かつ連続的に測光モニタする必要がある。しかし、現在、これを実現する観測装置は存在しない。小惑星や超新星サーベイ用に大フォーマット CCD を搭載した広視野カメラは開発されているが、いずれも 10 秒/フレームより高速に観測する能力を有していない。

### 2. 研究の目的

本研究では、大フォーマットの高感度 CMOS センサを用いた広視野高速カメラを開発し、東京大学木曽観測所 105cm シュミット望遠鏡に搭載することで、4 平方度の広

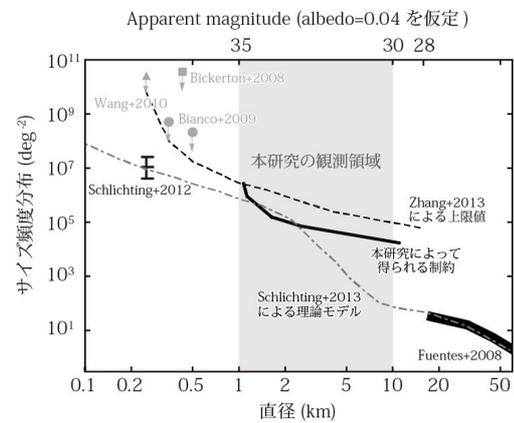


図 1: TNO のサイズ頻度分布。一点鎖線は観測を説明する理論モデルの一例

視野を 10Hz の高時間分解能で連続観測できる観測システムを構築する。同時に、生成される膨大なデータを迅速に解析するソフトウェアを開発する。これを用いて、多数の恒星の大規模な測光モニタ観測を実施し、km サイズの TNO による掩蔽現象の世界初の検出を目指す。観測された掩蔽によるライトカーブを詳細に解析することで TNO のサイズを推定し、これまで観測的に得られていなかった km サイズを含む、TNO 全体の SFD を決定する (図 1)。これをもとに TNO の物理的特徴や進化の過程を解明する。

### 3. 研究の方法

本研究では、直接検出が不可能な km サイズの TNO を、掩蔽現象によって検出し、さらに統計的な議論に用いることができるほどのサンプル数を集めることを目的とする。km サイズの TNO による掩蔽はいままでに観測されていない。掩蔽による TNO の検出を目標とした大規模な計画としては、台湾・メキシコ・米国による TAOS-II 計画がある。視野 2.3 平方度の CMOS カメラと口径 1.3m の専用望遠鏡を開発し、2018 年以降に観測を開始する予定である。TAOS-II はセンサ・カメラ・望遠鏡・観測サイトのすべてを新規に開発する計画であるため、開発要素が多岐にわたり実現までにリスクを伴う。一方、本研究では長期間の運用実績のある東京大学木曽観測所シュミット望遠鏡を用いる。また、TAOS-II と異なり、常温駆動が可能な CMOS センサを採用することで、真空冷却装置が不要で軽量コンパクトな信頼度の高いカメラを実現する。搭載予定の CMOS センサは我々がメーカーと共同で開発を進めており、現在、開発の最終段階にある。従って、本研究ではカメラ部が組み上がり次第、即座に観測を実行する体制に入ることができる。

本研究の期間内では視野 4 平方度 (TAOS-II の 2 倍に相当) の高速カメラの開発を目標とするが、今後、本研究で得られる技術を用いて木曽シュミット望遠鏡が持つ 36 平方度の視野を広く覆う超広視野高速カメラに発展

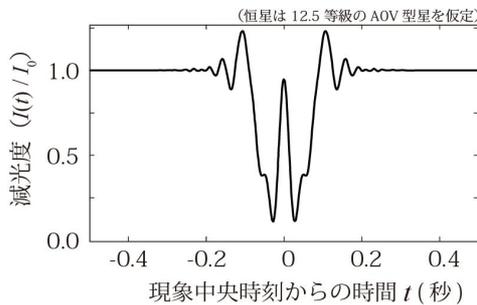


図 2: 直径 3km、距離 40AU にある TNO による掩蔽で予想されるライトカーブ。

させていく計画である。これが実現すれば、太陽系小天体の研究だけでなく、広く天文・宇宙物理分野に大きなインパクトをもたらす。例えば、重力波天体の可視光対応天体の検出や、超新星爆発の瞬間 = ショックブレイクアウト現象の検出の実現の可能性が飛躍的に上昇する。

km サイズの TNO による掩蔽現象を世界で初めて検出するために、研究期間の前半に計 4 平方度の広視野を持つ高速カメラを開発する。カメラには我々が国内メーカーと共同で開発してきた大フォーマットの高感度 CMOS センサを複数台搭載する。このセンサは常温駆動が可能のため、カメラ筐体は真空冷却装置を持たない軽量かつコンパクトな設計とする。筐体内にセンサアライメント装置と温度制御装置を持つことで、複数枚の CMOS センサを常に最適な状態に維持する。カメラの開発と並行して、掩蔽観測で得られる大量の動画データから効率的に時間変動イベントを検出する解析手法とソフトウェアの開発も行う。研究期間の後半に、東京大学木曾観測所の大規模観測プログラムとして、シュミット望遠鏡と広視野高速カメラを用いた 100 夜の掩蔽モニタ観測を実施する。この観測で得た掩蔽イベントの検出頻度から TNO の SFD を導出する。

観測者から 40AU 離れた天体による可視光の回折の典型的なサイズは 1.4km であるため、直径数 km の TNO の掩蔽による恒星の減光のライトカーブ(図 2)には、特徴的な回折パターンが強く見られる (Nihei+2007)。掩蔽の継続時間は地球との相対速度 (すなわち TNO までの距離) で決まり、0.2~1 秒間程度と見積もられる。このライトカーブを高時間分解能で精度よく観測することで、掩蔽を起こした TNO の大きさと天体までの距離を導出する。

本研究で開発する広視野高速カメラのイベント検出能力 = 感度 × 視野は先行研究 (Zhang+2013) よりも 1 桁高く、Schlichting+2013 の理論モデル (図 1) によると、計 100 時間のモニタ観測で km サイズの掩蔽イベントを検出可能である。これは、本研究で計画している計 100 夜/年の観測で複数回の掩蔽イベントを検出し、統計的に信頼のおける SFD を決定できることを意味する。

#### 4. 研究成果

研究初年度の平成 26 年度には、CMOS センサの読み出しシステムの設計・製作とそれを用いたセンサの駆動試験を実施した。また、広視野高速カメラの筐体および光学系、データ逐次処理部の概念設計、汎用計算機を用いた演算速度の実測試験を実施した。並行して、掩蔽モニタ観測の基本計画 (観測視野、観測手順、観測頻度など) を構築した。6-7 月にはヘルシンキで開かれた国際研究会 ACM2014 にて、研究の概要と進捗について発表し、関連分野の情報収集を行った。

平成 27 年度には、センサを 8 台搭載した視野 2 平方度の広視野高速カメラのカメラ筐体の開発を完了させた。これを東京大学木曾観測所が保有する口径 1.0m シュミット望遠鏡の主焦点に搭載して試験観測を実施した。また、掩蔽モニタの観測手法と解析手法の検討に必要な基本データを取得した。

平成 28 年度には、木曾シュミット望遠鏡に搭載しての掩蔽モニタの試験観測を実施しながら、データ解析パイプライン、逐次解析計算システムの開発を実施した。並行して、高速データ通信システムの開発を行うとともに、センサの感度や温度依存性とカメラ筐体の熱安定性の性能評価を進め、当初の設計性能が達成されていることを確認した。掩蔽モニタ観測の監視領域、観測手法、観測モード、検出方法の検討も進めた。6 月には広視野高速カメラについて装置開発の国際研究会 SPIE にて発表した。

最終年度である平成 29 年度には、CMOS センサを追加することで当初計画を超える 5 平方度の広視野高速カメラへのアップグレードを実施した。並行して、不具合が確認されていた読み出し回路の改修も実施した。この 5 平方度広視野高速カメラは平成 30 年 2 月に木曾シュミット望遠鏡にてファーストライト観測に成功した (図 3)。本研究で開発した広視野高速カメラは木曾地方で活躍した女武将にちなみ Tomo-e Gozen カメラと名付けられた。Tomo-e Gozen カメラは視野 5 平方度を最大 2 フレーム/秒で観測できる世界初の広視野高速 CMOS カメラとなった。センサの部分読み出しにより 200 フレーム/秒での観

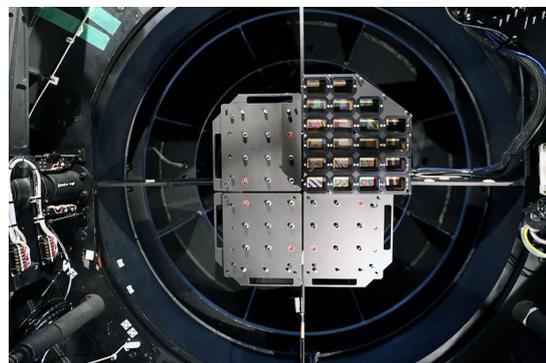


図 3: 木曾シュミット望遠鏡に搭載した広視野高速カメラ

測も可能である。GPS センサを搭載しており絶対時間精度 $\pm 0.2$  ミリ秒で時刻情報を記録できる。そのため、場所の離れた他の望遠鏡との高精度の同時観測が可能である。本研究が起点となり、今後、センサの台数を増やすなどの改良を加え、広視野を活かした重力波や超新星の広域探査にも使用される予定である。

Tomo-e Gozen を用いて既知の小惑星 372 Palma による掩蔽の観測を実施し、光度曲線の評価を実施した。また、掩蔽モニタの監視領域として計画している黄道面の広域高速観測を実施し、掩蔽探査に混在してくる時間変動現象の調査を実施した。この観測では流星、人工天体に加え多数の小惑星を検出した。掩蔽信号の誤検出とならないように、これらの変動現象を除去するパイプラインソフトウェアを開発した。

多数の背景星に対する測光監視観測を天の川領域にて実施した。約 30,000 天体を 0.5 秒毎に約 400 秒間にわたり監視したデータを解析した結果、その中の 1 天体において約 40 秒間にわたり約 2% の増光が検出された(図 4)。このイベントはプロファイルと継続時間が予想される掩蔽現象とは異なるため、本研究の目標とするものではなかった。しかし、このような短時間の増光現象は過去に報告されていないため、本研究で実施した広視野高速観測により初めて見えてきた未知なる天体現象である可能性がある。また、予想される掩蔽の変光振幅(数 10%) よりはるかに小さな数% の振幅を検出できたことは、今後実施する掩蔽探査にて計画通りの検出感度を達成することを示している。

本研究は広視野高速カメラを 5 平方度への拡張を行ったために観測の実施が当初計画より遅延し、研究期間内に十分な観測時間を確保できなかった。しかし、質の高いデータを効率的に取得できるようになったため、今後の探査を加速させることができる。研究最

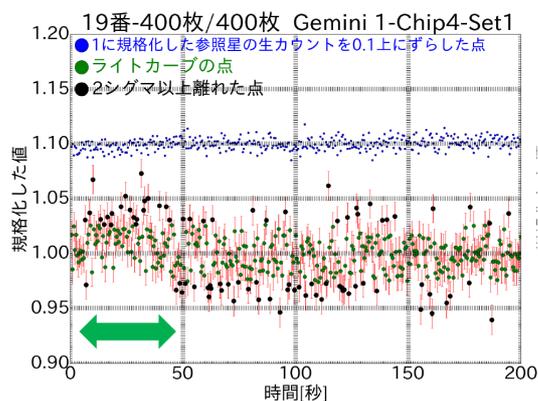


図 4: 天の川領域の広域高速観測で検出された未知の増光イベント。約 40 秒にわたり約 2% の増光が検出された(猪岡 2017 年度東京大学修士論文より)。

終年度の翌年である平成 30 年度に長期間の掩蔽探査を実施した後、速やかにデータを解析し、結果を雑誌論文などで報告する予定である。平成 29 年度には論文文化に向けて国際研究会 the Transneptunian Solar System および第 13 回 Asian-Pacific Regional IAU Meeting にて共同研究者との議論を行った。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

Kuroda, D.; Ishiguro, M.; Watanabe, M.; Hasegawa, S.; Sekiguchi, T.; Naito, H.; Usui, F.; Imai, M.; Sato, M.; Kuramoto, K., Significantly high polarization degree of the very low-albedo asteroid (152679) 1998 KU2, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, Volume 611, (2018), A31-, DOI: 10.1051/0004-6361/201732086

Hasegawa, S.; Kuroda, D.; Yanagisawa, K.; Usui, F., Follow-up observations for the Asteroid Catalog using AKARI Spectroscopic Observations, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, Volume 69, Issue 6, (2017), 99-, DOI: 10.1093/pasj/psx117

Kozak, P. M.; Watanabe, J., Upward-moving low-light meteor - I. Observation results, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, Volume 467, Issue 1, (2017), 793-801, DOI: 10.1093/mnras/stx008

Arimatsu, K.; Tsumura, K.; Ichikawa, K.; Usui, F.; Ootsubo, T.; Kotani, T.; Sarugaku, Y.; Wada, T.; Nagase, K.; Watanabe, J., Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey (OASES): Design and performance, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, Volume 69, Issue 4, (2017), 68, DOI: 10.1093/pasj/psx048

Kwon, Y. G.; Ishiguro, M.; Kuroda, D.; Hanayama, H.; Kawabata, K. S.; Akitaya, H. Nakaoka, T.; Itoh, R.; Toda, H.; Yanagisawa, K.; Lee, M. G.; Ohta, K.; Yoshida, M.; Kawai, N.; Watanabe, J., Optical and Near-infrared Polarimetry of Non-periodic Comet C/2013 US10 (Catalina), *The Astronomical Journal*, 査読有, Volume 154, Issue 4, (2017), 12-, DOI: 10.3847/1538-3881/aa89ef

Muller, T. G.; Durech, J.; Ishiguro, M.; Mueller, M.; Kruhler, T.; Yang, H.; Kim, M.-J.; O'Rourke, L.; Usui, F.; Kiss, C.; Altieri, B.; Carry, B.; Choi,

Y.-J.; Delbo, M.; Emery, J. P.; Greiner, J.; Hasegawa, S.; Hora, J. L.; Knust, F.; Kuroda, D.; Osip, D.; Rau, A.; Rivkin, A.; Schady, P.; Thomas-Osip, J.; Trilling, D.; Urakawa, S.; Vilenius, E.; Weissman, P.; Zeidler, P., Hayabusa-2 mission target asteroid 162173 Ryugu (1999 JU3): Searching for the object's spin-axis orientation, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, Volume 599, (2017), 25-, DOI: 10.1051/0004-6361/201629134  
Morii, M.; Ikeda, S.; Sako, S.; Ohsawa, R., Data Compression for the Tomo-e Gozen Using Low-rank Matrix Approximation, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 835, Issue 1, (2017), 5-, DOI: 10.3847/1538-4357/835/1/1  
Terai, T.; Itoh, Y.; Oasa, Y.; Furusho, R.; Watanabe, J., Photometric Measurements of H<sub>2</sub>O Ice Crystallinity on Trans-Neptunian Objects, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 827, Issue 1, (2016), 10-, DOI: 10.3847/0004-637X/827/1/65

〔学会発表〕(計 7件)

酒向重行、木曾超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e Gozen 実機の開発 要素試験と詳細設計、日本天文学会、2017 年  
酒向重行、Development of a prototype of the Tomo-e Gozen wide-field CMOS camera、SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation、2016 年  
酒向重行、木曾超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e Gozen 実機の開発 基本設計、日本天文学会、2016 年  
酒向重行、木曾超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e の開発 基本設計の完了、日本天文学会、2015 年  
酒向重行、超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e の観測戦略、日本天文学会、2015 年  
酒向重行、木曾観測所広視野 CMOS カメラの開発計画、日本天文学会、2014 年  
渡部潤一、Faint-meteor survey with a large-format CMOS sensor、ACM2014、2014 年

〔その他〕

広視野カメラ Tomo-e Gozen のウェブページ  
<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/tomoe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 潤一 (WATANABE, Junichi)  
国立天文台・天文情報センター・教授  
研究者番号：50201190

(2) 研究分担者

臼井 文彦 (USUI, Fumihiko)  
神戸大学・理学研究科・特命助教  
研究者番号：30720669

酒向 重行 (SAKO, Shigeyuki)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号：90533563

(3) 連携研究者

前原 裕之 (MAEHARA, Hiroyuki)  
京都大学・理学研究科・特定准教授  
研究者番号：40456851

三戸 洋之 (MITO, Hiroyuki)  
東京大学・大学院理学系研究科・研究員  
研究者番号：00396805

青木 勉 (AOKI, Tsutomu)  
東京大学・大学院理学系研究科・助手  
研究者番号：10251414

征矢野 隆夫 (SOYANO, Takao)  
東京大学・大学院理学系研究科・助手  
研究者番号：20251415