

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05546

研究課題名(和文)極めて大きな視線速度をもつ近地球小天体の効率的検出方法の開発

研究課題名(英文)Detection Technology for Extremely Fast Near-Earth Objects

研究代表者

柳沢 俊史 (Yanagisawa, Toshifumi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：20371106

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)：これまでの近地球小天体の発見手法とは全く異なる新たな検出手法を開発し、実際に日本及び豪州でのサーベイ観測をとおして近地球小天体を9つ発見した。これにより小型の望遠鏡とFPGAを利用した高速解析による安価で効率的な近地球小天体の発見手法が確立され今後多くの近地球小天体、特にこれまでほとんど発見されてこなかった10m - 数100m級の近地球小天体の発見に大きく貢献すると思われる。これにより太陽系進化に関するあらたな知見をもたらすことが期待されるとともに地球衝突天体の早期発見にも役立つはずである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球に接近する天体を発見することは太陽系進化の謎を解明することに大きく貢献するとともに地球に衝突する危険性のある天体を事前に把握して対策をとることを可能にする。本研究では現在米国を中心に実施されている近地球小天体サーベイプログラムとは全く異なる手法を開発した。この手法は小型の望遠鏡から得られる大量の画像データを高速で処理するもので既存のサーベイプログラムが発見しづらい地球近傍を高速で移動していく天体の発見に有効である。また、コストも大幅に抑えることが可能であり、今後太陽系進化の知見獲得や地球に衝突する天体の早期発見に大きく貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：An innovative observation method which is very different from current near-earth objects (NEOs) observation technologies was developed. Survey observations carried out in Japanese and Australian observation sites discovered 9 NEOs using the method. The method uses small telescopes and FPGA-based analysis pipeline which is very cost effective. Using the method enable us to discover a lot of NEOs with the size range from ten to a several hundred meters which has almost not been discovered. This will greatly contribute the obtaining a deep insight of solar system evolution and planetary defenses.

研究分野：観測技術

キーワード：近地球小惑星 観測手法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近地球小天体は太陽系の様々な場所から飛来し、太陽系進化の履歴を背負う天体である。しかもそれらは太陽系形成直後から概ね“凍結保存”された惑星構成物質の破片であると考えられる。従って、近地球小天体がどこからどのようにして地球近辺にやって来たのかを詳しく知れば、太陽系内での惑星構成物質の動径方向移動についての知見が得られ、惑星構成物質の空間分布が太陽系史に於いてどう変化して来たのかと言う基礎データの取得に繋がる。そうしたデータは近年目覚ましい発展を遂げる太陽系外惑星の研究にも寄与するだろうし、太陽系小天体が果たしたとされる有機物質の輸送を介して生命の起源に迫る方法論にもなり得る。

昨今は各種のサーベイ観測により近地球小天体の発見は大きな進歩を遂げつつあるが、未解決な問題もまだ多い。例えば近地球小天体の主要な供給源は火星-木星間のメインベルトであると考えられて来たが、メインベルトからの天体供給量が実際に地球近傍で確認されている近地球小天体の現在数と真に整合的かどうかは未だ推定の域を出ない。近地球領域で天体の分裂破壊が頻繁に生じて個数を増したり、メインベルト以外からも多くの小天体が地球近傍に飛来しているなら、私達が持つ力学的知見が本質的に誤っていることになる。また、過去数億年における近地球小天体との衝突履歴を残すとされる月面クレーター記録に基づく研究では、現在の近地球小天体の観測結果だけでは説明できない、相対速度の小さい天体群の存在が示唆されている(Ito & Malhotra, 2010, *Astron. Astrophys.*, 513, A63)。このような問題や矛盾の多くは近地球小天体のより詳しい軌道分布やサイズ頻度分布を知ることでは解決されない。そのためには従来は発見率の低い領域にある天体を多数、そして効率的に検出する手法の開発が重要である。

2. 研究の目的

かつて太陽系の各所で形成した小惑星や彗星など小天体は長い時間をかけて動径方向に移動・拡散し、元の形成場所を大きく離れて現存するものも多い。その典型が近地球小天体であり、その拡散の歴史を知ることは太陽系史に於ける力学過程・物理過程を知ることと直結する。しかし近地球小天体はその高速な視線速度が故に検出が実は容易ではなく、世界中で探索が継続しているにも関わらず未だにその正確な分布や総数すら明らかになっていない。

本研究の目的は地球接近小天体の正確な軌道・サイズ頻度分布を新たな観測・検出観測手法により詳しく検証することである。本研究が提案する検出手法は地球の極く近傍を通過してとても大きな視線速度を持つ天体に対応し、従来は発見が最も困難だった天体の検出を容易にする。

3. 研究の方法

初年度は本研究グループがこれまでに宇宙デブリ検出用に開発してきた画像解析技術を応用し、従来よりも圧倒的に高効率の天体検出手法を開発する。そのための専用機器の開発も実施する。計画二年目からは観測条件の良い豪州および日本からの試験的な遠隔観測とデータ解析技術を実証して、定常的な観測へと移行する。新たに検出された近地球小天体の情報は時を置かず追跡観測を行う施設へ転送され、精密な位置観測が実施される。計画二年目から三年目にかけては近地球小天体の定常観測を通してより効率的な観測・解析運用法を確立する。それと並行し、検出された天体データを基礎として数値実験を用いて地球近傍の小天体分布の理論モデルを構築し、それをコミュニティへ発信して行く。

4. 研究成果

成果概要：これまでの近地球小天体の発見手法とは全く異なる新たな検出手法を開発し、実際に日本及び豪州でのサーベイ観測をとおして近地球小天体を9つ発見した。これにより小型の望遠鏡と FPGA を利用した高速解析による安価で効率的な近地球小天体の発見手法が確立され今後多くの近地球小天体、特にこれまでほとんど発見されてこなかった 10m-数 100m 級の近地球小天体の発見に大きく貢献すると思われる。これにより太陽系進化に関するあらたな知見をもたらすことが期待されるとともに地球衝突天体の早期発見にも役立つはずである。

(1) 一年目は、これまで研究代表者が宇宙デブリ用に開発してきた検出アルゴリズムを改良し近地球小天体の新たな検出手法を開発した。具体的には大量の画像を高速で解析し、ノイズレベル以下の近地球小天体の検出が可能な専用 FPGA ボードの製作と関連するアルゴリズムの作成、一次解析計算環境の整備を実施した。製作した FPGA ボード等を JAXA 所有の入笠山光学観測施設へ搬入し、施設内に設置されている



図1：朝日新聞掲載記事(2017/3/29 夕刊)

18cm 望遠鏡 2 台及び CCD カメラ、CMOS センサを利用して実際の近地球小天体を対象とした試験観測を実施した。その結果、4 日間の試験観測で近地球小天体を 2 つ発見した(2017 BK, 2017 BN92)。これにより提案手法の有効性をしめすことができた。日本での近地球小天体の発見はおよそ 9 年ぶりであった。本成果は 2 月に実施された「シンポジウム 天体の地球衝突問題にどう取り組むか」で発表され、その際、朝日新聞の記者に取材を受け、後日朝日新聞に掲載された(図 1)。



図 2 : 豪州 Siding Spring 天文台内の JAXA 遠隔観測施設。田中光化学工業製の口径 25cm 望遠鏡に FLI 製 CCD カメラを装着。現在はこの他にタカハシ製 18cm 望遠鏡 (FLI 製 CCD 装着) も稼働している。

務する美星スペースガードセンターで追跡観測がなされ正確な軌道が決定されるとともに周期 172 秒と非常に高速で回転しているという事実が判明した。非常に近づいた状態であるため天体自体の光度が非常に高く光度変化を詳細にとらえることが可能である。このようにこれまでほとんど発見されたことのない 10m—数 100m 級の近地球小天体の運動状況の把握にも本手法が有効であることが示された。これらの成果により本研究で提案している手法を実用レベルで利用できることが示された。これらの研究成果を国内の研究会で 2 件、国外の学会で 2 件発表するとともに天文月報に解説記事を執筆した。

(3) 3 年目はアルゴリズムや観測装置等の軽微な改良を実施しつつ近地球小天体のサーベイ観測を継続した。その結果あらたに 5 つの近地球小天体を発見した(2018 PM10, 2018 RR4, 2018 UG3, 2019 GW1, 2019 GT19)。これらの成果を国内学会 4 件、国際学会 1 件で発表するとともに学術論文 1 編を執筆した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 柳沢俊史, 黒崎裕久, 伊藤孝士, 奥村真一郎, 吉田二美, 小田寛, 池永敏憲, 吉川真, NEO 新規発見手法とその成果—近地球天体 2017 BK 及び 2017 BN92 の発見—, 天文月報, 査読無し, 110 巻, 2017, 645—655
- ② T. Ikenaga, Y. Sugimoto, M. Ceriotti, M. Yoshikawa, T. Yanagisawa, H. Ikega, N. Ishii, T. Ito, M. Utashima, A concept of hazardous NEO detection and impact warning system, Acta Astronautica, 査読有り, vol. 156, 2019, pp284-296.
DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.06.058

[学会発表] (計 1 3 件)

- ① 柳沢俊史, 黒崎裕久, 吉川真, 奥村真一郎, 浦川聖太郎, 酒向重行, 大澤亮, 吉田二美, Tomo-e Gozen を利用した近地球天体及び宇宙デブリ観測の可能性, 木曾広視野サーベイと

(2) 2 年目は 1 年目に明らかになった解析アルゴリズムの不具合を修正しその有効性を確めた。また、豪州の Siding Spring 天文台における遠隔観測施設での観測体制を整えて(図 2)、近地球天体の発見観測を開始した。その際、解析データの転送に時間がかかることが判明したが、新たな転送手法を確立することによりこの問題を解決した。試験観測により複数個の未発見近地球天体がみつけたが観測所コードが取得できず、国際天文連合への報告はできなかった。2018 年 1 月に観測所コードを取得し本格的なサーベイ観測を開始した。その結果、昨年度の入笠山光学観測施設の発見に引き続き 2 個の近地球天体を発見し、国際天文連合の小惑星センターより仮符号(2018 EZ2 及び 2018 FH1) が付与された。2018EZ2 に関しては発見から 2 日後に月までの距離の半分以下まで接近する 20メートルサイズの天体であることが分かった。図 3 に 2018 EZ2 発見時の軌道を示す。地球に非常に接近して高速で移動中に発見されたことがわかる。この天体は米国のサーベイグループの監視網を潜り抜けてきたものを我々が豪州の南天の空で発見したもので、このような天体がまだまだ多数発見されていない状況であることが推測された。

2018 EZ2 は発見後直ちに研究分担者の奥村氏らが勤務する美星スペースガードセンターで追跡観測がなされ正確な軌道が決定されるとともに周期 172 秒と非常に高速で回転しているという事実が判明した。非常に近づいた状態であるため天体自体の光度が非常に高く光度変化を詳細にとらえることが可能である。このようにこれまでほとんど発見されたことのない 10m—数 100m 級の近地球小天体の運動状況の把握にも本手法が有効であることが示された。これらの成果により本研究で提案している手法を実用レベルで利用できることが示された。これらの研究成果を国内の研究会で 2 件、国外の学会で 2 件発表するとともに天文月報に解説記事を執筆した。

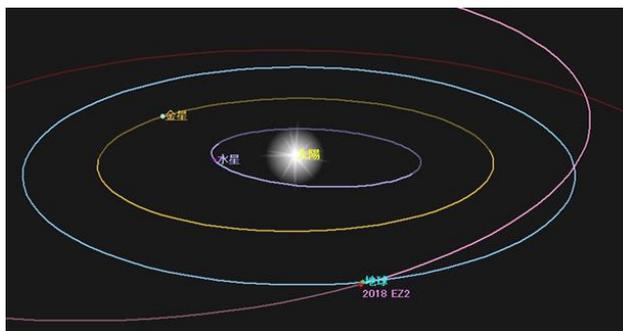


図 2 : 近地球小天体 2018 EZ2 の軌道 (ピンク色)。水色が地球の軌道。

- 京都 3.8m 即時測光によるタイムドメイン天文学の推進, 2017
- ② 柳沢俊史, 黒崎裕久, 小田寛, 池永敏憲, 吉川真, 伊藤孝士, 吉田二美, 奥村真一郎, 小型望遠鏡による NEO 探索システム, 近地球天体 2017 BK, 2017 BN92 の発見!, シンポジウム: 天体の地球衝突問題にどう取り組むか, 2017
 - ③ 柳沢俊史, 黒崎裕久, 黒田信介, 池永敏憲, 杉本洋平, 河津要, 吉川真, 平子敬一, 伊藤孝士, 吉田二美, 奥村真一郎, 小型望遠鏡による NEO 探索システム—その後の進捗—, シンポジウム: 天体の地球衝突問題にどう取り組むか 2, 2017
 - ④ T. Yanagisawa, T. Ikenaga, Y. Sugimoto, K. Kawatsu, M. Yoshikawa, S. Okumura, T. Ito, New NEO search technology using small telescopes and FPGA, IEEE Aerospace Conference, 2018
 - ⑤ Y. Sugimoto, T. Yanagisawa, T. Ikenaga, M. Yoshikawa, Performance Evaluation of the Fast-moving NEO Detection Mission, IEEE Aerospace Conference, 2018
 - ⑥ 池永敏憲, 杉本洋平, Matteo Ceriotti, 柳沢俊史, 吉川真, 伊藤孝士, 宇宙及び地上観測網を利用した地球接近天体早期発見システムの検討について, 天体力学 N 天体力学研究会, 2018
 - ⑦ 柳沢俊史, 黒崎裕久, 池永敏憲, 杉本洋平, 神谷浩紀, 吉川真, 黒田信介, 伊藤孝士, 吉田二美, 奥村真一郎, 小型望遠鏡と高速画像解析による NEO の発見, 第 11 回スペースガード研究会, 2018
 - ⑧ 奥村真一郎, 柳沢俊史, 酒向重行, 吉川真, 浦川聖太郎, 大澤亮, 小島悠人, 木曾広視野カメラ Tomo-e Gozen と重ね合わせ法による高速移動 NEO のサーベイ計画, 第 11 回スペースガード研究会, 2018
 - ⑨ 黒田信介, 柳沢俊史, プラネタリーディフェンスへの欧米の動きと Janess のミッション, 第 62 回宇宙科学連合講演会, 2018
 - ⑩ 柳沢俊史, 黒崎裕久, 池永敏憲, 杉本洋平, 神谷浩紀, 吉川真, 黒田信介, 伊藤孝士, 吉田二美, 奥村真一郎, 小型望遠鏡を利用した NEO サーベイシステムの構築 (現状と将来構想), 第 62 回宇宙科学連合講演会, 2018
 - ⑪ 柳沢俊史, 小型望遠鏡による近地球天体 (NEO) 探索, 第 2 回新天体探索者会議, 2018
 - ⑫ T. Yanagisawa, H. Kurosaki, T. Ikenaga, Y. Sugimoto, K. Kamiya, M. Yoshikawa, S. Kuroda, S. Okumura, T. Ito, SMALL NEO SEARCH TECHNOLOGIES USING SMALL TELESCOPES AND FPGA, 2019 ESA NEO and debris detection conference, 2019
 - ⑬ 柳沢俊史, 黒崎裕久, 池永敏憲, 神谷浩紀, 吉川真, 平子敬一, 黒田信介, 伊藤孝士, 吉田二美, 奥村真一郎, 重ね合わせ法の原理と成果及び将来構想, 小望遠鏡による地球接近天体観測についての研究会, 2019

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

○取得状況 (計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

JAXA 研究開発部門研究紹介 地球接近小惑星の発見
<http://www.kenkai.jaxa.jp/research/debris/neo.html>

地球接近小惑星 2018 EZ2 に高速自転を検出

<http://www.spaceguard.or.jp/RSGC/2018EZ2.html>

本研究で発見した近地球小天体の詳細

2017 BK:

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2017+BK

2017 BN92:

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2017+BN92

2018 EZ2:

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2018+EZ2

2018 FH1:

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2018+FH1

2018 PM10:

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2018+PM10

2018 RR4:

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2018+RR4

2018 UG3:

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2018+UG3

2019 GW1:

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2019+GW1

2019 GT19:

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2019+GT19

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：伊藤孝士

ローマ字氏名： Takashi Ito

所属研究機関名：国立天文台

部局名：天文データセンター

職名：助教

研究者番号（8桁）：40280565

研究分担者氏名：奥村真一郎

ローマ字氏名： Shin-ichiro Okumura

所属研究機関名：特定非営利活動法人日本スペースガード協会（スペースガード研究センター）

部局名：スペースガード部門

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：40344270

研究分担者氏名：吉田二美

ローマ字氏名： Fumi Yoshida

所属研究機関名：千葉工業大学

部局名：惑星探査研究センター

職名：研究員

研究者番号（8桁）：20399306

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：小田寛

ローマ字氏名： Hiroshi Oda

研究協力者氏名：池永敏憲

ローマ字氏名： Toshinori Ikenaga

研究協力者氏名： 吉川真

ローマ字氏名： Makoto Yoshikawa

研究協力者氏名： 樋口有理可

ローマ字氏名： Arika Higuchi

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。