

特集「宇宙防災:科学と工学の新たな展開」 プラネタリーディフェンスに対する観測の現状

浦川 聖太郎¹

(要旨) 2013年の遊星人において「スペースガード観測の現状」と題して、当時のプラネタリーディフェンスに対する観測の取り組み(地球接近天体に対する観測)について解説を行った[1]。その後、時間軸天文学に根ざした大規模サーベイ観測の発展により、プラネタリーディフェンスの観測に大きな進捗が見られている。また、アーカイブデータを利用したシチズンサイエンスによる太陽系小天体の探索という、新たな活動も行われるようになってきている。加えて、重ね合わせ法という画像処理技術が開発され、その技術を用いて地球接近天体の発見に成功している。今回の特集記事に際し、2013年から現在に至るまでのプラネタリーディフェンスに対する観測の進捗と現状についてまとめる。

1. IAWN

プラネタリーディフェンスに対する観測についてまとめる前に、IAWN(International Asteroid Warning Network)の活動を紹介します。地球接近天体(Near-Earth Object, 以下NEO)の観測に対する取り組みは1994年のシューメーカー・レビー第9彗星の木星への衝突で感心が高まり、2013年のチェリャビンスク隕石の衝突によって、その重要性が一層認識されるようになった。天体の地球衝突問題は、2000年前後から国連の宇宙空間平和利用委員会(COPUOS, Committee on the Peaceful Use of Outer Space)で議論が開始され、特にNEOに対する観測分野での国際的な取り組みを検討するグループとして、2013年にIAWNが設立された。IAWNでは参加メンバー各々の観測施設におけるNEO観測についての意見交換や、特定のNEOについての観測キャンペーンの実施などが行われている。IAWNの会合にはオブザーバーの立場でJAXAの吉川真氏が長年出席していたが、2023年にJAXA

がIAWNへ加入し、第17回会合から正式メンバーとして出席している。IAWNへの参加は観測施設を有している機関であれば可能であり、各国1機関と決まっているわけではない。今回、JAXAはJAXA美星スペースガードセンターや後述するオーストラリアのリモート望遠鏡施設等を観測施設として登録した。IAWNに加入すれば会合への出席が可能となり、プラネタリーディフェンスに対する最新の状況を知ることができる。義務的な観測や費用が生じることはないので、観測施設を所有している大学等研究機関はIAWNへの参加を一考していただきたい。

2. プラネタリーディフェンスに対する観測

2.1 NEOの発見状況

2013年から現在に至るまでのプラネタリーディフェンスに対する観測の進捗と現状についてまとめる。図1は、NEOの累積発見天体数を示したものである。NEOの衝突に対する危険性は衝突時のエネルギーに依存するが、ここでは簡単に直径を危険性に対する指標とする。生物の大量絶滅を引き起こす

¹日本スペースガード協会
s_urakawa@spaceguard.or.jp

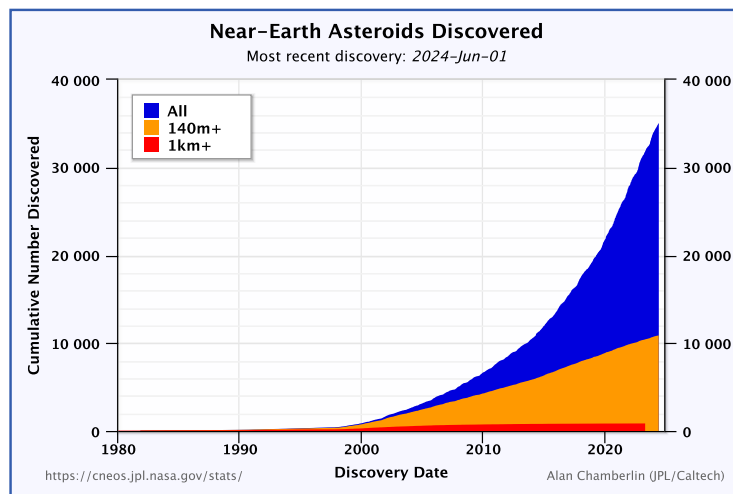


図1: NEOの累積発見数. 直径1 km以上のNEOは900天体弱程度であり, おおよそ発見された状態である. 近年は, 直径140 m以下の小さなNEOの発見が急増している. Courtesy NASA/JPL-Caltech.

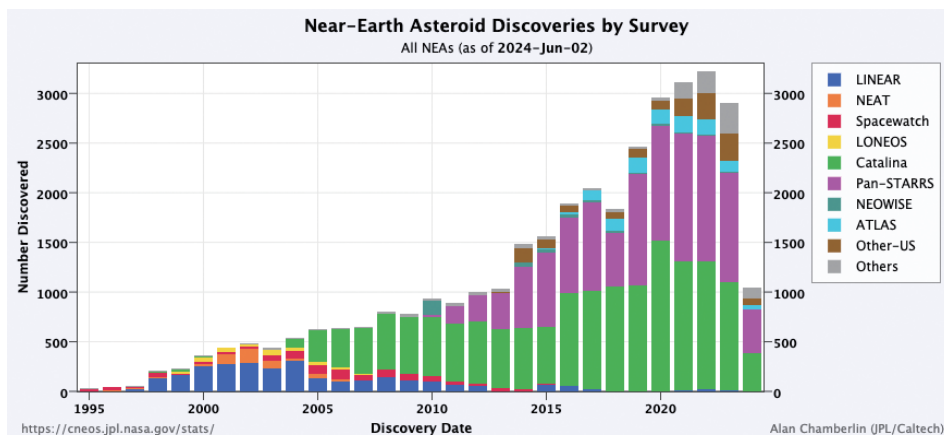


図2: 観測プロジェクト別のNEOの発見数. Catalinaは文中のCSS(Catalina Sky Survey)を示す. 近年は, Pan-STARRSとCSSが発見の大半を占めている. Courtesy NASA/JPL-Caltech.

ような直径1 km以上のNEOはおおよそ発見され軌道も明らかになっている. 次の目標として2030年までに都市の壊滅的な破壊を起こす直径140 m以上(絶対等級で22等級以上に相当)のNEOの90%を発見することが, 国際的な目標に設定されている. この目標は2013年から変わっていない. 2013年5月の時点で直径140 m以上のNEOの発見数は5615天体であったが, 2024年5月には10872天体に増加している. しかし推定される存在数に対しては43%程度であり, 目標に対してはまだ道半ばという状況である[2].

図2は, 観測プロジェクト別のNEOの発見状況を

示している. また, 本稿で紹介する観測施設の概要を表1にまとめる. NEOの発見は, 口径1-2 m程度の望遠鏡と広視野カメラを用いた大規模サーベイ観測で実施する方法が主流である. 2013年には, そうした観測装置を備えたCSS(Catalina Sky Survey)が発見の多くを占めており, それに次ぐのがPan-STARRS(Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)であった. Pan-STARRSは, 口径1.8 mの同じタイプの4台の望遠鏡(PS1からPS4)を建設する計画であり, 2013年当時は1台目のPS1が稼働を開始していた. その後

表1: 主な観測プロジェクト.

プロジェクト名・ 観測所名	場所	口径	F値	視野
CSS	アメリカ アリゾナ	68cm	1.9	2.9° × 2.9°
	アメリカ アリゾナ	1.5m	2.0	1.1° × 1.1°
	オーストラリア	1.0m	3.5	2° × 2°
	ニューサウスウェールズ			
Pan-STARRS (PS1, PS2)	アメリカ ハワイ	1.8m	4.4	φ 3.0°
ATLAS	アメリカ ハワイ	50cm	2.0	5.4° × 5.4°
	南アフリカ			
	チリ			
JAXA Siding Spring	オーストラリア	18cm×4	2.8	4.2° × 4.2° など
	ニューサウスウェールズ	25cm	2.8	2.25° × 2.25°
		18cm	2.8	3.5° × 3.5°
Tomo-e Gozen	長野県木曽町	1.05 m	3.1	φ 9.0°
墨子	中国 青海省海西モンゴル 族チベット族自治州	2.5m	2.5	φ 3.0°
すばる望遠鏡HSC	アメリカ ハワイ	8.2 m	2.0	φ 1.5°
ZTF	アメリカ カリフォルニア	1.22m	2.5	47 sq. degree

2015年にPS2の観測が始まり、それ以降現在に至るまでCSSとPan-STARRSがNEOの発見のほとんどを占めている状況である。なお、PS3とPS4の建設は現在停止中である。

2.2 時間軸天文学とNEO探索

観測天文学における2010年代以降の潮流として、時間軸天文学(あるいは時間領域天文学, Time Domain Astronomy)の発展があるように思う。時間軸天文学とは、超新星や重力波対応天体といった、変化のタイムスケールが比較的短い突発天体を対象とした天文学である。NEOも突発天体と考えることができるので、時間軸天文学における観測の一環でNEO探索が行われるようになっていく。時間軸天文学では、サーベイ観測を実施し、そこから生み出される膨大な画像データを用いて、それぞれの研究グループ別(例えば、超新星グループやNEOグループ)で画像解析を実施する方式がと

られることが多い。従来行われている観測提案(プロポーザル)を提出し、自身のテーマに即した観測を専有的に行う方式ではなく、一定の観測戦略で撮像されたデータを多目的に共有する方式である。上述のPan-STARRSも時間軸天文学の観測プロジェクトの一つであると言える。この時間軸天文学を意識した観測プロジェクトが2010年代中頃から増加している。例えば、NEOの発見数で3番目であるATLAS(Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System)は、口径50 cmの4台の広視野望遠鏡をハワイ、南アフリカ、チリに設置し全天自動サーベイ観測を行なっている。口径はやや小さいものの、広いサーベイ面積を活かした観測によって地球からの距離が近く、比較的直径の小さなNEOを発見している。この他、ZTF(Zwicky Transient Facility)や、最近では中国の墨子天文台[3]においても、時間軸天文学を意識したサーベイ観測が実施されNEOが発見されている。国内では、東京大学木

曾観測所105 cm望遠鏡のTomo-e Gozenで時間軸天文学が実施されている。Tomo-e GozenによるNEO探索の詳細はすでに遊星人において紹介されているが[4]、紹介のあった2022年に42天体であったNEOの発見数は、2024年5月までに54天体に増加している。

2.3 アーカイブデータを利用したシチズンサイエンスによる太陽系小天体の探索

もうひとつの潮流としてデータサイエンスとシチズンサイエンスの融合をあげる。シチズンサイエンスとは、研究者が非研究者の方々と共に課題に取り組む研究スタイルである。1990年代中頃までは、NEOをはじめとする太陽系小天体の発見の多くはアマチュア天文家によるものであった。元来、太陽系小天体の探索はアマチュア天文家やシチズンサイエンスとの親和性が高いと言える。しかしながら、これまで述べてきた様々な大規模サーベイ観測の発展によりアマチュア天文家が自身の観測装置で太陽系小天体を発見することは難しくなっている。一方、大規模サーベイ観測のデータはアーカイブ化され公開されていることが多い。そのデータの中には、未発見の太陽系小天体が撮像されている。近年、このようなアーカイブデータを利用して太陽系小天体を探索するアプリケーションが開発されており、シチズンサイエンティストの中には、こうしたアプリケーションを利用して太陽系小天体の探索を行っている者もある。ここでは、これらの事例について紹介する。

筆者らの研究グループは、すばる望遠鏡の画像から太陽系小天体を探索するウェブアプリケーション COIAS(Come-On! Impacting ASteroids)を開発し、2023年7月に公開した(<https://web-coias.u-aizu.ac.jp/>)。COIASでは、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラHSC(Hyper Suprime-Cam)による大規模サーベイ観測(HSC-SSP: HSC Subaru Strategic Program)のアーカイブデータを利用している。HSC-SSPのサーベイ面積は、Pan-STARRSやATLASに比べて狭いものの、その画像の中には他の観測施設では検出困難な26等級に及ぶ未発見の太陽系小天体が数多く撮像されている。2024年5月31日までに900名を超えるシチズンサイエンティストによって、11万を超える新天体候

補(追観測が未実施の天体)を検出しMPC(Minor Planet Center)へ報告を行っている。このうち2つのNEOや144の太陽系外縁天体を含む1211天体に対して仮符号を取得している。

DMP(Daily Minor Planet: <https://www.zooniverse.org/projects/fulsdavid/the-daily-minor-planet>)は、CSSで自動検出できなかった太陽系小天体をシチズンサイエンティストが探索を行うウェブアプリケーションである。DMPの特徴はDailyの名の通り、前夜にCSSで撮像されたデータを日々更新して利用できる点にある。観測日からデータ解析日までの時間間隔が短いため、NEO候補を検出した場合、MPCを通じて全世界の観測者に追観測要求を発信することが可能である。

"Active Asteroids" (<https://www.zooniverse.org/projects/orionnau/activeasteroids/about/research>)は、口径4 mのBlanco望遠鏡(チリ)の広視野カメラDECam(Dark Energy Camera)で取得したアーカイブデータを用いて、活動的小惑星(突発的な彗星活動を起こす小惑星)の探索を行うシチズンサイエンスプロジェクトである。活動的小惑星は、始原的な物質を含む天体と考えられており、将来の小天体探査計画を策定する上でも重要な天体である。"Active Asteroids"を用いて、活動的小惑星である(6478)Gaultの6年間に及ぶ活動履歴の調査や数多くの活動的小惑星の発見がなされている[5][6]。"Active Asteroids"はNEOの探索を目的としたアプリケーションではないが、そのデータの元となるDECamを用いた観測では、173天体のNEOが発見されている。

IASC(International Astronomical Search Collaboration)は、Pan-STARRSやCSSのデータを用いて、小惑星探索を行う中高生向けの教育プログラムである。世界各地で教育イベントが行われており、これまで14583天体の新天体候補の報告と114天体について仮符号を取得している。このようなシチズンサイエンスの発展はIAU(国際天文学連合)がシチズンサイエンスを通じた天文教育を推奨していることに関係していると推測する[7]。

2.4 Precoveryによる太陽系小天体の軌道精度の向上

ここまでの事例のようにサーベイ観測データの多くは公開されている。これらのデータを用いて、Precovery(pre-discovery recovery)を行う試みもなされている。Precoveryとは、NEOをはじめとする太陽系小天体の発見データから軌道を遡り、過去のアーカイブデータから発見済みの天体を探し出すことである。発見済みの天体が、発見前のアーカイブデータに検出されていれば、観測期間が伸び軌道精度の大幅な向上が見込まれる。Precoveryを実施するために、B612財団(プラネタリーディフェンスを行う民間財団)のAsteroid InstituteがADAM(Asteroid Discovery Analysis and Mapping Platform)という検索システムを公開している(<https://b612.ai/platform/precovery/>)。ADAMでは、ZTFなどのアーカイブデータを利用し、例えば天体名で検索をかければアーカイブデータの視野内に検索天体が撮像されているか調べることができる。同様の検索システムは、カナダ天文学データセンターのSSOS(The Solar System Object Search: <https://www.cadc-ccda.hia-ihp.nrc-cnrc.gc.ca/en/ssois/>)でも公開されている[8]。国内においても国立天文台・写真乾板ワーキンググループが旧・岡山天体物理観測所188 cm望遠鏡で取得された写真乾板データのアーカイブ化を行っている[9]。また、JAXA/ISASのDART(Data Archives and Transmission System)では、JAXA美星スペースガードセンターや赤外線天文衛星AKARIなどの画像データを公開している。これらのデータのPrecoveryへの活用が期待される。

2.5 重ね合わせ法によるNEO探索

最後に重ね合わせ法を用いたNEOの発見観測を紹介する。地球の近くに存在するNEOは、天球上での見かけの動きが速い。そのため、長い露出時間で撮像しても星像は伸びてしまい、NEOからの光量を増加させる効果はない。これをトレイルロスという。トレイルロスを避けるには短い露出時間で多数毎の撮像を行い、NEOの動きに合わせて取得した画像を重ねれば良い。しかし、未発見のNEOの動きの速さや方向は分からないので、あらゆる速さと方向を

想定して画像を重ね合わせ、検出可否を確認しなければならない。これを重ね合わせ法という。重ね合わせ法の画像処理には長い解析時間が必要であり、現実の観測時間中に運用を行うためには画像処理の高速化が必要である。JAXAの柳沢氏らの研究グループは、解析画像の2値化や専用のFPGA(Field Programmable Gate Array)ボードの開発などを行うことによって、解析時間の問題を解決することに成功した[10]。柳沢氏らは、オーストラリアのSiding Spring天文台内に設置したJAXAのリモート観測施設や長野県の入笠山光学観測施設において、重ね合わせ法によるNEO探索の試験観測を行った。その結果、11天体のNEOの発見に成功した。表1にもあるように使用した望遠鏡は口径18-25 cmの小型望遠鏡である。小型望遠鏡でも十分にNEO探索を行えることを示すとともに、圧倒的な低コストで観測成果をあげることができることを示した。

3. 今後のプラネタリーディフェンスに対する観測

ヴェラ・C・ルービン天文台(チリ)が完成間近であり、近い将来に観測が開始される。ヴェラ・C・ルービン天文台は口径8.4 mの望遠鏡と9.6平方度の超広視野カメラを備えており、この観測システムにより新たな大規模サーベイ観測(LSST: Legacy Survey of Space and Time)を実施する計画である。この計画の中でもプラネタリーディフェンスは主要なテーマとなっており、LSST単独で2032年までに直径140 m以上のNEOの61%を見つけることを目標にしている[11]。また、LSSTで発見した太陽系小天体の軌道を遡った時、すでにCOIASで報告したものの、暗いために追観測が完了していなかった新天体候補と軌道が繋がるのが期待できる。つまり、COIASの報告データがLSSTで発見した天体に対するPrecoveryの役割を果たす。LSSTとCOIASの相補的な効果によって、これまで発見されていなかったサイズ領域の太陽系小天体の軌道が明らかになる。また、米国ではNEO探索に特化した赤外線宇宙望遠鏡NEO Surveyorを計画しており、2027年に打ち上げ予定である[12]。この計画では口径50 cmの赤外線望遠鏡を太陽-地球系のL1ラングラン

ジュ点で運用し、5年間の観測で直径140 m以上のNEOの90%以上を発見することを目標にしている。

4. まとめ

2013年以降のNEOの発見観測に注力してその進捗と現状についてまとめた。特に、最近のプラネタリーディフェンスの観測の進展として、時間軸天文学に根ざした大規模サーベイ観測の発展と、そこから生み出されるアーカイブデータを利用したシチズンサイエンスとの融合について紹介した。また、今回取り上げなかったが、プラネタリーディフェンスでは発見観測と並んで、既知のNEOの追観測による軌道精度の向上も重要である。JAXA美星スペースガードセンターでは、Pan-STARRSやCSSで発見されたNEOの即時追観測を実施し、その軌道精度の向上に寄与している。このような地道な観測もプラネタリーディフェンスでは重要である。加えて、NEOの物理状態(例えば構成物質や構造的強さ)を解明することも重要である。特に、現実的に地球衝突の可能性がある直径の小さなNEO(直径100 m程度以下)の物理状態の解明は、NEOの地球衝突が現実になった時に、その対策を行う上で重要な情報となる。直径の小さなNEOの物理状態の解明は、Tomo-e Gozenによって積極的に行われているが、まだ不明な点も多い[4]。Heraが探査を行うディモルフォスや”はやぶさ2拡張ミッション(はやぶさ2#)”の最終目的地である1998 KY₂₆は、まさにこうしたサイズ領域のNEOであり、その探査結果はプラネタリーディフェンスに寄与するものとして大きな期待が寄せられる。1998 KY₂₆に対しては地上観測が可能であり、

地上観測と探査結果を合わせた詳細な物理状態の解明も期待できる。

参考文献

- [1] 浦川聖太郎ほか, 2013, 遊星人 22, 222.
- [2] Jonson, L. and Fast, K., 2023, The 17th IAWN Steering Committee Meeting, https://iawn.net/documents/20231026_17th_virtual/NASA-update.pdf.
- [3] Lou, Z. et al., 2016, Proceedings of SPIE 10154 article id. 101542A.
- [4] 紅山仁ほか, 2022, 遊星人 31, 272.
- [5] Chandler, C. O. et al., 2019, ApJL 877, L12.
- [6] Chandler, C. O. et al., 2024, AJ 167, 156.
- [7] IAU 戦略計画2020-2030, https://www.iau.org/static/administration/about/strategic_plan/strategicplan-2020-2030-jp.pdf.
- [8] Gwyn, S. D. J. et al., 2012, PASP 124, 579.
- [9] 柳澤顕史ほか, 2023, 日本天文学会秋季年会, Y09a.
- [10] Yanagisawa, T. et al., 2021, PASJ 73, 519.
- [11] Jones, R. L. et al., 2018, Icarus 303, 181.
- [12] Mainzer, A.K. et al., 2023, The Planetary Science Journal 4, 224.

著者紹介

浦川 聖太郎

日本スペースガード協会スペースガード研究センター主任研究員。神戸大学大学院自然科学研究科構造科学専攻博士課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員PDを経て、2006年4月より日本スパー

スガード協会観測員、2007年4月より同協会内に設立されたスペースガード研究センターにて現職を併任。専門は太陽系小天体の観測的研究。日本天文学会、日本惑星科学会、アメリカ天文学会に所属。