

# 東京大学木曾観測所トモエゴゼンによる 微小地球接近小惑星の動画観測

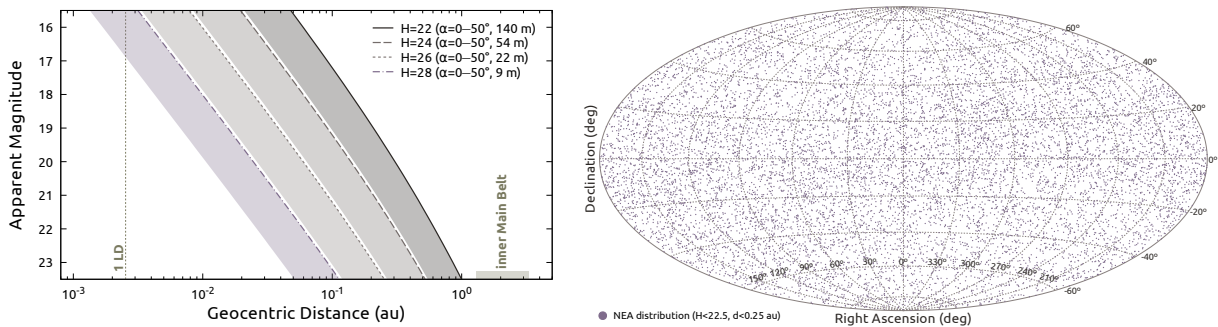
大澤亮<sup>1</sup>, 紅山仁<sup>1</sup>, 酒向重行<sup>1</sup>, 浦川聖太郎<sup>2</sup>, 奥村慎一郎<sup>2</sup>,  
渡部潤一<sup>3</sup>, 吉川真<sup>4</sup>, 諸隈智貴<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 日本スペースガード協会, <sup>3</sup> 国立天文台, <sup>4</sup> ISAS/JAXA

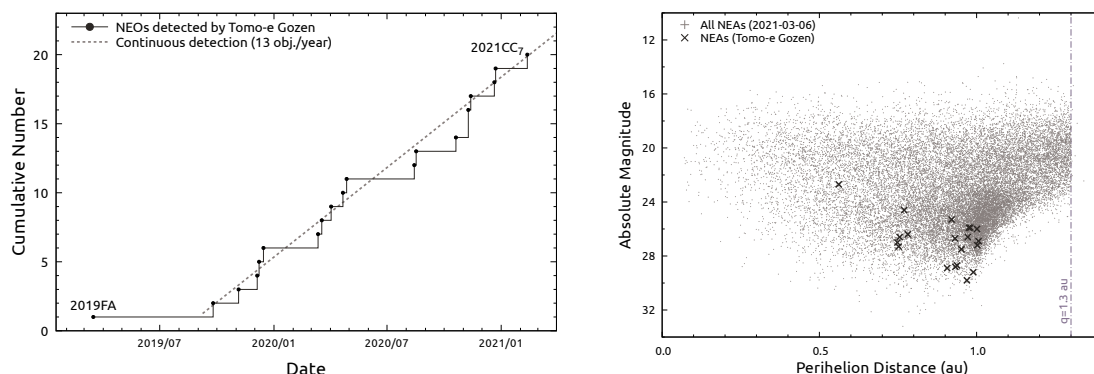
我々の太陽系には小惑星や彗星に代表される太陽系小天体が数多く存在する。太陽系小天体は微惑星の生き残りである。太陽系小天体の進化には衝突破壊、軌道進化、太陽光による加熱といった過程が深く関わっており、現在の小天体のサイズ・自転周期・形状、軌道には太陽系形成時やその後の進化の情報が刻み込まれている [1]。直径が  $\sim 200$  m を超える小惑星の多くは、岩塊 (ボルダー) が重力的に束縛されたラブルパイル構造を持つと考えられている [2, 3]。ボルダーの典型的な大きさは 10–100 m 程度である [4, 5]。こうしたボルダーの特性を知ることは、微惑星形成や衝突破壊カスケードといった初期の太陽系を特徴づける重要な過程の理解へとつながる。

小惑星表面に存在するボルダーを空間的に分解して個別に観測するためには、探査機によるその場観測が必要となる。一方で、表層にあるボルダーは衝突や自転崩壊によって定常的に宇宙空間に放出されている。太陽系におけるボルダーの普遍的な性質を理解するためには 10–100 m 級の微小な小惑星を地上望遠鏡によって観測することが必要である。また、微小小惑星には小惑星の軌道長半径を変化させる Yarkovsky 効果が効率よく働くため [6]、太陽系の力学的進化の素課程を理解する実験室としても価値も高い。直径が小さい天体ほど空間密度が高く、地球への衝突頻度も無視できないため、微小小惑星の研究はプラネタリーディフェンスの観点からも重要である。

望遠鏡と観測技術の発達によってメインベルトでも直径 500 m を切るような微小な小惑星が発見されつつある [8]。しかしながら、既知の小惑星のうち絶対等級が  $H > 20$  mag ( $\sim 300$  m) である天体はほとんどが地球接近小惑星である。Figure 1 (左) にサイズの異なる小惑星の明るさを距離の関数として示した。発見可能な明るさを仮に 20 mag とすると、100 m 級の小惑星を発見するためには 0.2 au の距離に接近した天体を対象としなければならない。こうした天体はみかけの移動速度が大きくなるため、10 秒程度の露光時間でも像が流れてしまい感度を損なってしまう [9]。さらに、距離が 0.2 au ほどに接近した天体は天球面のあらゆる場所に現れるため (Figure 1, 右), 空の広い領域を効率よく搜索する性能が求められる。このように直径 10–100 m 級の小惑星を発見するためには、通常の小惑星観測とは異なる特殊なパフォーマンスが要求される。



**Figure 1:** (左) 衝の位置にある小惑星の典型的な明るさ (位相角  $\alpha = 0^\circ$ )。アルベドを 0.15 と計算した。位相角による影響の大きさを領域で示している; (右) 地心距離が 0.25 au 以内に接近する小惑星の天球面上での分布。



**Figure 2:** (左) トモエゴゼンによる小惑星発見のタイムライン. 本格運用開始 (2019 年 10 月) からの平均的な発見レートを点線で示した; (右) トモエゴゼンが発見した小惑星の近日点距離と絶対等級の関係.

東京大学木曾観測所では 105-cm シュミット望遠鏡に搭載する次世代観測装置として、広視野 CMOS モザイクカメラ「トモエゴゼン」の開発を進めてきた [10]. トモエゴゼンは 84 枚のイメージセンサで 20 平方度の視野カバーする巨大なカメラであり、最速 2 fps で連続観測することが可能である. 全天のどこに現れるかわからない高速移動天体を発見するのに適した性能を持っている.

木曾観測所では、突発天体の発見を目的として 9 秒毎に視野を変えながら空を掃く高速サーベイ観測を実施している. トモエゴゼンは 2 fps という高い時間分解能で観測できるため、高速移動天体に対しても感度を落とさずに観測が可能である. このサーベイでは見かけの速さが  $1''\text{s}^{-1}$  よりも速い天体を検出することを目標としている. これは地心距離にしておよそ 0.01 au 以内に近づいた天体に相当する. 既存の大規模サーベイとは大きく異なるパラメタ空間を探ることができる. 我々は、動画データから高速移動天体を抽出するためのパイプラインと迅速に追観測をするためのインタフェースを整備しながら、微小地球接近小惑星のサーベイ観測を実施し、2021 年 3 月までに計 20 天体を発見した<sup>1</sup>. Figure 2 (左) に発見のタイムラインを図示した. 平均の発見レートは年間 13 天体に相当する. Figure 2 (右) には発見した天体を近日点距離と絶対等級の平面にプロットした. 既知の天体よりも比較的小さい天体 ( $H > 28 \text{ mag}$ ) を効率よく発見できていることが読み取れる.

既存の地球接近小惑星の軌道分布から、0.01 au 以内には  $H < 28 \text{ mag}$  の小惑星は平均的に 1 個程度存在していると予想される [7]. ここから、トモエゴゼンによって年間およそ 20 個程度の微小地球接近小惑星が発見可能だと推定できる. 現状のサーベイが高い効率を達成できていることを示唆している. 今後はこのサーベイ観測を継続しながら、微小地球接近小惑星のサイズ頻度分布の導出や、より小さな ( $\sim 1 \text{ m}$ ) 地球接近小惑星を発見可能なシステムの構築を目指していく. また、発見直後に約 20 分間の追跡観測をすることによって、微小地球接近小惑星の自転周期データベースを構築する研究も並行して進めている. 最大 2 fps で観測できるトモエゴゼンなら、数秒程度の自転周期でも確実に検出することができる. 微小地球接近小惑星の臨界自転速度を制限することで、ボルダーの強度に観測からアプローチすることができる. 講演ではトモエゴゼンによる微小地球接近小惑星サーベイの最新成果と、広視野動画観測によって拓かれるサイエンスの展望について紹介する.

**参考文献** [1] DeMeo, F. E. & Carry, B. 2014, *Nature*, 505, 629 [2] Fujiwara, A., et al. 2006, *Science*, 312, 1330 [3] Sugita, S., et al. 2019, *Science*, 364, 252 [4] Michikami, T., et al. 2019, *Icarus*, 331, 179 [5] Jiang, Y., et al. 2015, *Sci. Rep.*, 5, 16029 [6] Greenberg, A. H., et al. 2020, *AJ*, 159, 92 [7] Harris, A. 2019, *PDC* [8] Maeda, N., et al. 2021, *LPSC*, 52, 1388 [9] Yanagisawa, T., et al. 2012, *JSA&SS*, 10, 29 [10] Sako S., et al. 2018, *SPIE*, 107020J

<sup>1</sup> ここでは地球接近小惑星候補天体に仮符号が付与されたことを以って発見とする.