

木曾観測所 Tomo-e Gozen カメラと「重ね合わせ法」の 組み合わせによる地球接近微小惑星サーベイ観測計画

○奥村真一郎（日本スペースガード協会）、
柳沢俊史（JAXA）、酒向重行（東京大学）、吉川 真（JAXA）、
浦川聖太郎（日本スペースガード協会）大澤 亮、小島悠人（東京大学）、
他、Tomo-e Gozen メンバー

概要(Abstract)

太陽系小天体の軌道進化やその起源について調べるためには、地球近傍に存在する小天体のサイズ分布を知ることが重要である。また、地球への天体衝突問題（スペースガード/プラネタリーディフェンス）の観点からも、たとえ小さくとも地球に衝突すれば被害の出る数十mサイズの地球接近天体を把握することが重要である。このような小天体は地球に接近したタイミングでないと検出できる明るさにならない。ところが、地球接近時には見かけの移動速度が大きくなり、露出中に検出器の素子間を移動してしまうため検出限界が浅くなる（トレイルロス）現象が生じる。このような高速移動天体は大望遠鏡を使用して観測しても見逃してしまうことになる。トレイルロスを克服するためのデータ処理手法である「重ね合わせ法」を木曾観測所で開発中の Tomo-e Gozen カメラに適用して、大望遠鏡でも見逃してしまうような小サイズの地球接近小天体を大量に発見しようと試みる観測プロジェクトを進めている。以下、この計画について記す。

1. はじめに

「プラネタリー・ディフェンス」もしくは「スペースガード」と言われる、いわゆる天体の地球衝突問題は、かつては人類にとってそれほど気にする事象ではなかった。しかし 30 年ほど前から CCD 素子の発達により天文観測技術が進歩するとともに、大規模な観測プロジェクト¹⁾により多くの小惑星が新たに発見され、中でも特に地球に接近する天体（Near Earth Object; 以下、NEO）が多く検出されるようになったことにより状況は変化してきた。さらに 1994 年にはシューメーカー・レビー第 9 彗星が木星に衝突し、惑星や地球への天体衝突という現象が現実的なものとしてとらえられるようになった。

このような状況の中で、2000 年前後を境にして LINEAR²⁾など様々な NEO サーベイ観測プロジェクトが動き始めた。このような系統的なサーベイ観測が進むことによって、地球接近小天体を含む小惑星の発見数は飛躍的に増加する事になる。図 1 は Tricarico のデータ³⁾を元にして、NEO の絶対等級と存在数（累積数）の関係（サイズ分布）を図示したものである。直径がおよそ 1km より大きい NEO（図で絶対等級<18）に関しては、予想されている数の 9 割以上がすでに見つかっていると考えられている。しかし、直径 100m 程度のものについてはおよそ 10%、直径 10m のものは実に 0.02%ほどしか見つかっていない。

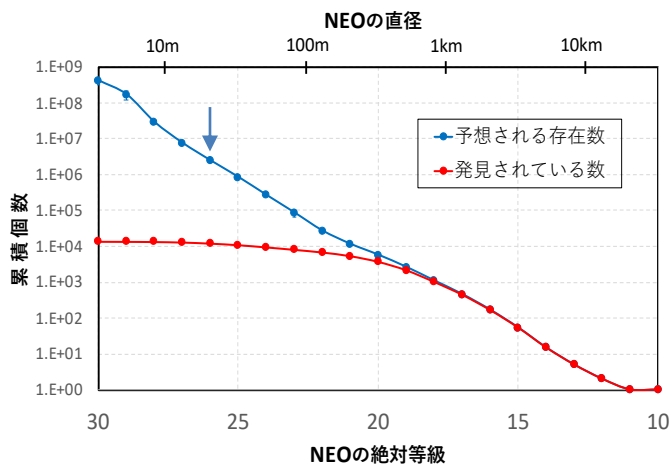


図 1 NEO のサイズ分布(絶対等級と累積個数の関係)。青が予想されている存在数、赤は 2016 年 2 月の時点で発見されている個数。Tricarico のデータ³⁾から作図。直径はアルベドを 0.16 として計算。矢印は 2013 年チェリャビンスクに落ちた隕石のサイズ。

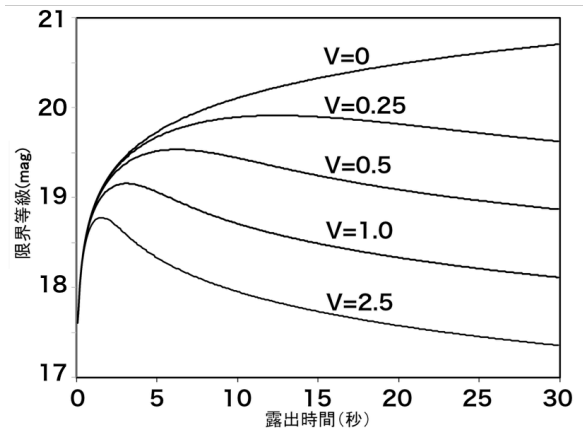


図 2 トレイルロスによる影響の例。横軸は露出時間、縦軸は限界等級、V は移動速度を表す。移動速度の単位は pixel/sec。1m 望遠鏡を仮定した計算値。

2013 年にロシアのチェリャビンスクに落ちた隕石は、地球規模の災害を引き起こす 1km クラスの NEO とくらべるとわずか 20m 程の大きさであったが、衝突時の衝撃波により 1200 名以上の負傷者を出す結果となった。天体衝突の危機管理という点では、1km クラスの NEO に気を使う以上に未発見のものが多く存在する数 100m～数 10m クラスの NEO にも注意をする必要がある。

数 100m～数 10m という大きさの NEO は近距離、たとえば月までの 10 倍程度の距離まで近づかないと検出できる明るさにならない。ところが NEO と地球の距離が近くなると見かけの移動速度が大きくなるため、望遠鏡を NEO の移動方向に追尾させる観測方法でないと露出中に検出器の素子間を移動してしまう。その結果 NEO からの光は複数の素子に分散し、露出を長くしても S/N 比が良くならない「トレイルロス」という現象が生じる(図 2)。このため大型望遠鏡を使用したとしても、数 100m～数 10m サイズの未知の(移動方向・移動速度のわかっていない) NEO を新たに発見する事は容易ではない。

2. 重ね合わせ法

撮影画像を重ね合わせて S/N 比を改善させることは、一般的な天文データ処理で頻繁に実施されている手法である。ここでいう重ね合わせ法とは、移動方向・移動速度のわかっていない移動天体に対する S/N 比を改善させるために比較的短時間露出の画像を多数枚、様々な方向・様々な速度を仮定してずらしながら足し合わせる手法⁴⁾の事を指す。この手法はトレイルロスの影響を軽減させる効果が強く、2017 年 1 月に実施した試験観測では口径わずか 18cm の望遠鏡を用いて絶対等級が 24 等と 25.6 等(直径に換算するとおよそ 50m と 25m) の NEO をそれぞれ一つずつ発見し⁵⁾、その後も未知 NEO の発見が続いている。この手法は様々な方向・様々な速度を仮定して画像処理を行うため、マシンパワーが必

要となることが欠点であるが、専用 FPGA ボードの導入とアルゴリズムの改良により克服している⁶⁾。

3. Tomo-e Gozen カメラ

Tomo-e Gozen カメラとは、東京大学木曾観測所で開発中の広視野カメラである。シュミット望遠鏡の焦点面に検出器を 84 枚並べることにより計 20 平方度の視野をカバーする。検出素子に CMOS センサを使用しているため高速読み出しが可能であり、2-fps（露出時間 0.5 秒）での連続撮像が可能であるためまさに動画のように画像を取得することができる。Tomo-e Gozen カメラと木曾シュミット望遠鏡の諸元を表 1 にまとめる。

Tomo-e Gozen カメラは高速撮像が可能でありピクセルスケールも比較的大きめであるためトレイルロスの影響を受けにくく、地球に接近した NEO のような高速移動天体の観測に適する。高速移動する NEO に対する感度は口径 1.8m の Pan-STARRS 望遠鏡をも上回る（図 3）。

表 1 Tomo-e Gozen カメラと望遠鏡諸元

観測サイト	東京大学木曾観測所 (長野県木曾郡木曾町)
望遠鏡	f/3.1 シュミット望遠鏡 (主鏡口径 1.50m, 補正板口径 1.05m)
検出器	2160 × 1200 pixel CMOS × 84 chip
波長範囲	350–700nm
ピクセルスケール	19μm (1.2" / pixel)
視野	φ 9° 内の 20 平方度 (39.7' × 22.4' × 84)
フレームレート	2 frame/s (フルフレーム) 10 frame/s (部分読み出し)
読み出しノイズ	1.9e ⁻ (@2Hz)

4. Tomo-e Gozen と重ね合わせ法の組み合わせによる高速移動 NEO サーベイ観測計画

高速撮像によりトレイルロスの影響を受けにくい Tomo-e Gozen カメラと、トレイルロスの影響を打ち消し小口径望遠鏡でも暗い移動天体を検出した実績のある重ね合わせ法を組み合わせる事により、さらに暗く小さい、数十mサイズの高速移動 NEO を検出しようという試みが本計画である。広視野をカバーし、短時間露出の画像を連続的に取得できる Tomo-e Gozen カメラは、重ね合わせ法と組み合わせで未知の移動天体をサーベイする目的には最適の観測装置である。

限界等級の見積もりは、例えば 0.5 秒露出を 64 枚重ねると 20–21 等まで達する。これは、たとえば秒速で 3 秒角ほど移動する天体に対して考えると、実に 8m クラスの望遠鏡に匹敵する感度を有する事になる（図 3）。このシステムならば、直径 10m 程度の NEO の発見も不可能ではない。また、未知の NEO を発見した際に軌道を決定するための国内外における追跡観測態勢も万全である。

10m~100m サイズの NEO を多く発見することにより小天体のサイズ分布や軌道情報のデータを提供する。それによって、プラネタリー・ディフェンス、スペースガード的には地球に衝突する恐れのある微小 NEO の軌道を把握するという点と、地球への衝突頻度を議論するためのデータを提供するという点で貢献する事になる。また科学的には太陽系小天体の軌道進化やその起源の解明に結びつく情報を提供することになる。

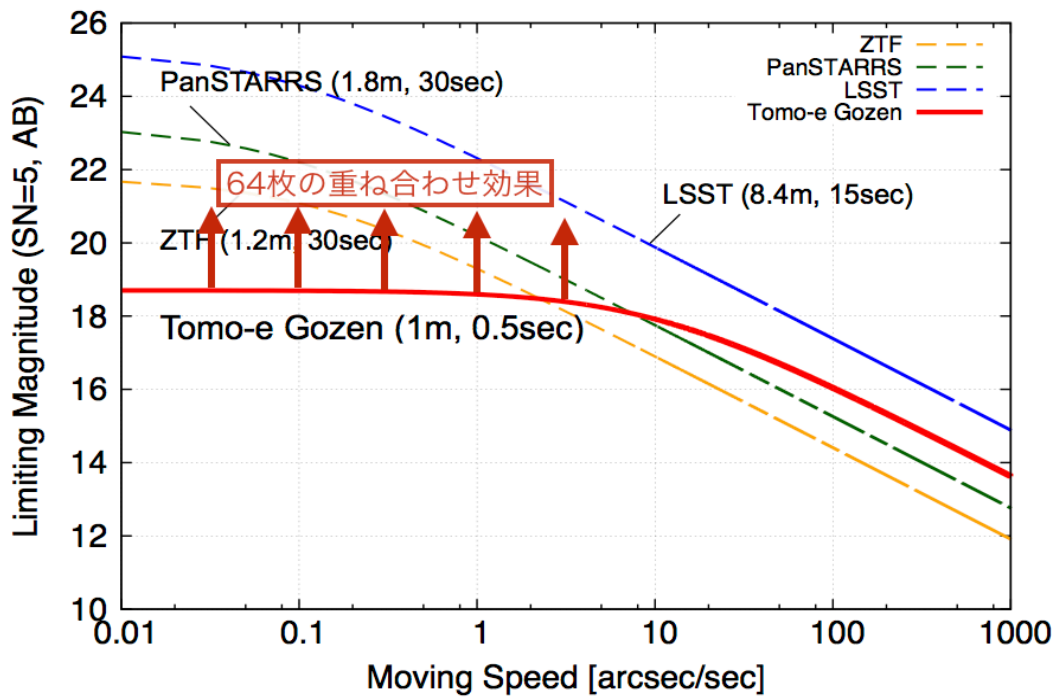


図3 各望遠鏡における移動天体に対する感度。横軸は移動速度(角度/秒)で () 内は口径と典型的な露出時間。Tomo-e Gozen での観測は $3''/\text{sec}$ より早く移動する天体に対しては、口径 1.8m の Pan-STARRS 望遠鏡の感度に匹敵する。64 枚の画像を重ね合わせれば、 $3''/\text{sec}$ 程度移動する天体に対しては口径 8.4m の LSST 望遠鏡と同等の感度に達する。(小島悠人氏作成の図を改変)

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H01261 の助成を受けています。

参考文献

1. 例えば、Gehrels, T., et al. : 1986, The Spacewatch Camera: a Progress Report, LUNAR AND PLANETARY SCIENCE XVII, **257**.
2. Vighh, H. E. M., et al. : 1997, Recent Results from the Lincoln Near Earth Asteroid Research (LINEAR) Project, DPS **29**, id.03.02.
3. Tricarico, P. : 2017, The near-Earth asteroid population from two decades of observations, Icarus, **284**, 416.
4. Yanagisawa, T., et al. : 2005, Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects, Publications of Astronomical Society of Japan, **57**, 399, 2005.
5. 柳沢他 : 2017, NEO 新規発見手法とその成果-近地球天体 2017BK 及び 2017BN92 の発見-, 天文月報, 第 **110** 巻, No.10, 645.
6. Yanagisawa, T., et al. : 2012, Detection of Small Sized GEO Debris Using FPGA Based Stacking Method, COSPAR, **39**, 2196.
7. Sako, S., et al. : 2016, Development of a prototype of the Tomo-e Gozen wide field CMOS camera, SPIE, **9908**, 99083P-15.