

東京大学木曽観測所超広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen による動画サーベイ計画

大澤亮¹⁾, 酒向重行¹⁾, 浦川聖太郎³⁾, 奥村真一郎²⁾, 吉川真³⁾, Tomo-e Gozen 開発チーム

東京大学理学系研究科 天文学教育研究センター¹⁾,
日本スペースガード協会²⁾, 宇宙航空研究開発機構³⁾

Near-Earth Object Survey Plan by Kiso Observatory Extreme Wide-Field CMOS Camera: Tomo-e Gozen

Ryou Ohsawa¹⁾, Shigeyuki Sako¹⁾, Seitaro Urakawa²⁾, Shin-ichiro Okumura²⁾, Makoto Yoshikawa³⁾, and Tomo-e Gozen Development Team

Abstract

地球近傍天体 (near-earth objects; NEOs) の地球への衝突を回避するためには天体の早期発見が重要である。Tunguska や Chelyabinsk のイベントは 10–50 m クラスの小惑星によって引き起こされたと考えられており、このサイズの NEOs を迅速に発見する能力が求められている。東京大学木曽観測所では 1.05 m シュミット望遠鏡に搭載する次世代広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen の開発を進めている。Tomo-e Gozen は 20 平方度の領域を最大 2 Hz でモニタリングでき、およそ 19 等までの星の明るさを網羅的に探査できる。Tomo-e Gozen は地球から見た角速度が大きい天体でも signal-to-noise 比を落とさずに観測ができるという長所がある。次世代の主要なサーベイ計画に於いて高速移動天体の検出限界を比較したところ、Tomo-e Gozen は LSST に匹敵するパフォーマンスを発揮することがわかった。Tomo-e Gozen は 2018 年より全天の超新星サーベイを実施する。このデータを NEOs サーベイに用いることで、Tomo-e Gozen は 10–50 m クラスの NEOs の早期発見に貢献することができる重要な観測システムとなる。

Key Words: Planetary Defense, Near-Earth Objects, Wide-Field Camera, Survey

1 Introduction

1.1 地球近傍天体と広視野サーベイ計画

近年のカメラの高感度及び広視野化によって地球近傍天体 (near-earth objects, NEO) の発見数は加速度的に増加している。NASA の統計によれば 2016 年までに 15,000 個超の NEOs が発見されている。2010 年代において NEOs の発見に大きく貢献している観測システムは Arizona 大学が推進する Catalina Sky Survey⁵⁾ と Hawaii 大学が運営する Pan-STARRS⁴⁾ である。2019 年には Large Synoptic Survey Telescope¹³⁾ (LSST) が稼働することによって 140 m クラスの NEOs の網羅的な検出が期待されている。これらのサーベイ計画は太陽系天体に特化したプロジェクトではないながらも、広い視野、高い感度、および高いスループットを持つ解析バックエンドのおかげで NEO の発見に高いパフォーマンスを発揮している。

NEOs の年間発見数の推移¹⁾を図 1 に示した。1 km を超える NEOs の検出数は 2000 年代をピークに減少しており、このサイズの NEOs はほぼ発見し尽くされつつあると言える。図 2 では NEOs のサイズ分布予想と実際に検出されたサイズ分布を比較している。サイズが 1 km よりも小さい NEOs はまだ未発見のものが多くあると考えられている³⁾。サーベイ観測ではより小さい天体を発見することが求められており、絶対等級 $H = 22$ mag (140 m 相当) の天体を網羅的に発見することがひとつの目標となっている⁸⁾。一方で人類に損害を与えうる小惑星を補足するためには 10–50 m クラスの NEOs を発見する必要がある。Tunguska や Chelyabinsk のようなイベントはそれぞれ 50 m および 20 m 級の小惑星によるイベ

¹⁾ Data obtained from “Discovery Statistics” in Center for Near Earth Object Studies (<https://cneos.jpl.nasa.gov/>).

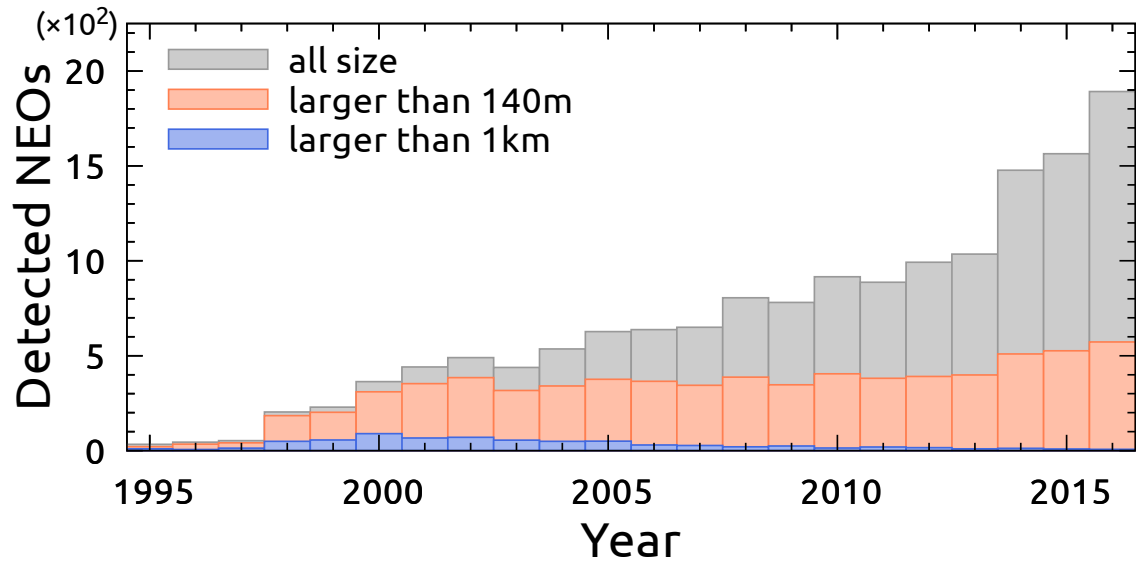


図 1: Annual detections of NEOs. The gray bars indicate the total number of the detected NEOs. The orange and blue bars show the detections of NEOs larger than 140 m and 1 km, respectively.

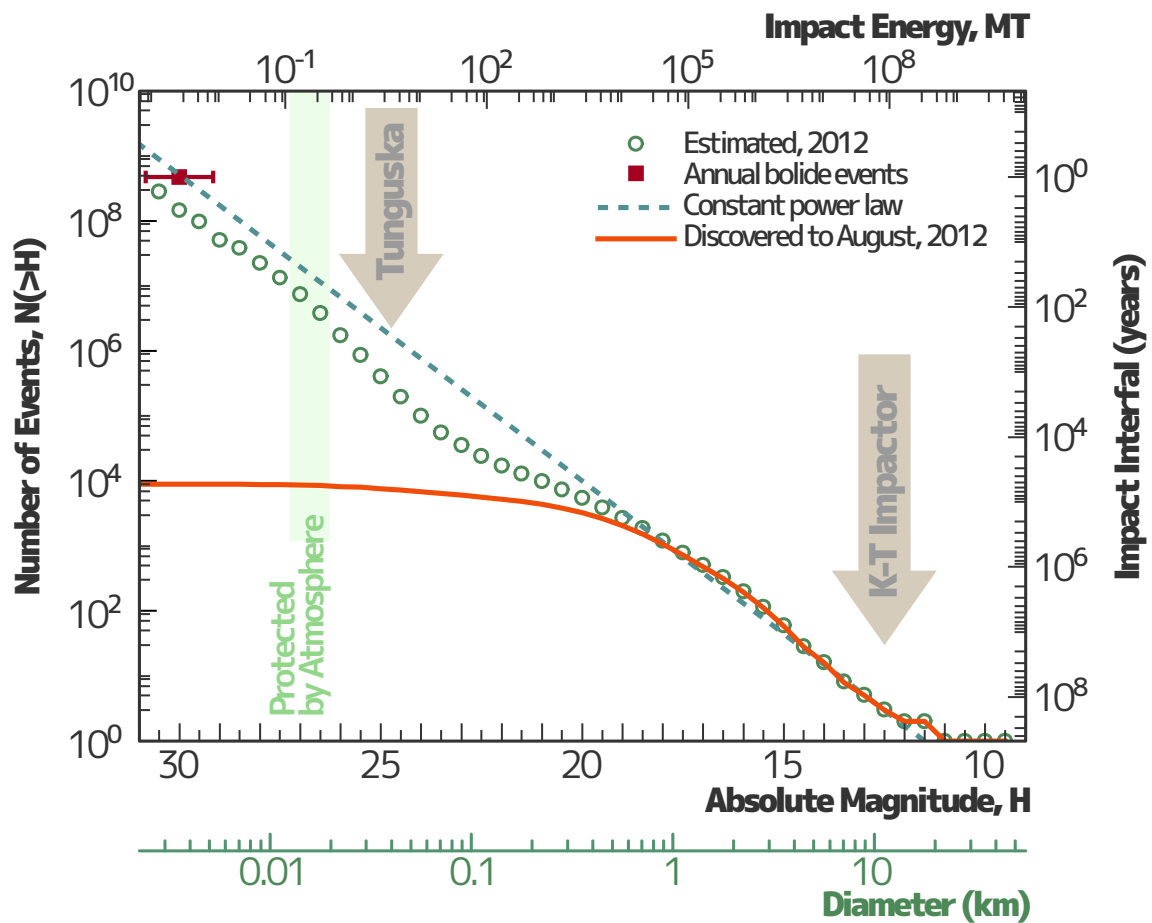


図 2: Completeness of NEO detections. The green circles indicate the estimate by Harris (2012). The orange solid line indicates the cumulative size distribution in observation.

ントだと考えられている^{1,6,2)}。こうした天体は小さく暗いために発見が難しいことに加え、天体との距離が近づいたときには見かけの角速度が大きくなり、トラッキングしなければ signal-to-noise 比が低下してしまうという問題がある。10–50 m クラスの NEOs を早期に発見するためには、より高感度のシステムを用いるか、高速移動天体に高いパフォーマンスを発揮するシステムが求められる。

我々のチームは東京大学木曽観測所に設置された 1.05 m シュミット望遠鏡に搭載される次世代広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen を開発している。Tomo-e Gozen では CCD イメージセンサの代わりに CMOS イメージセンサを採用したことによって、読み出しに必要な時間がほぼ無視できるまでに短縮された。本システムによって短時間読み出しで広域をサーベイする計画が初めて現実的なものとなる。本論文では 10–50 m クラスの NEOs の発見において Tomo-e Gozen のパフォーマンスを他のシステムと比較する。

2 Tomo-e Gozen 計画

2.1 次世代 CMOS カメラ Tomo-e Gozen

東京大学木曽観測所は日本の長野県木曽町にある。主力観測装置は 1.05 m シュミット望遠鏡であり、直径およそ 9 度の広い領域で歪みのない像を得ることができる。Tomo-e Gozen は木曽観測所で開発されている次世代観測装置である。Canon が新規に開発した CMOS センサを 84 枚用いて 20 平方度の領域をカバーする。天文学では CCD イメージセンサを用いたシステムが主流であるが、画素情報の読み出しに最低でも 10 秒程度の時間がかかるため露出時間が短くなると観測効率が大きく低下する。Tomo-e Gozen は CMOS のローリングシャッタを使用することで 2 Hz で連続的にデータを取得することが可能である。表 1 に Tomo-e Gozen およびその他の主要な観測システムについて、観測視野、口径、限界等級 (V-band)、サーベイ観測での典型的な露出時間、ピクセルスケールを列挙した。Tomo-e Gozen は他のシステムと比較して圧倒的に短い露出時間でデータを取得することができる。2015 年 12 月にはパイロットプロジェクトとして 8 枚の CMOS センサによって約 2 平方度をカバーする CMOS モザイクカメラ Tomo-e PM を作成し、Tomo-e Gozen による 2 Hz の観測ではおよそ 18.5 等の星まで signal-to-noise 比 5 以上で観測可能であることを実証した¹¹⁾。また、専用のソフトウェアを開発して流星や短時間変動現象の探査、および動画データの圧縮方法の検討を進めている^{9,7)}。

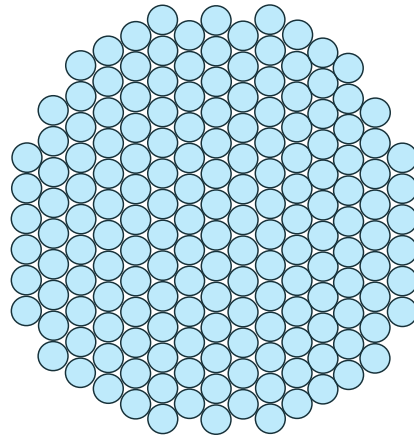


図 3: A schematic view of the all sky supernovae survey scheduled in the Tomo-e Gozen project. Each circle corresponds to a region with a diameter of 9°.

Tomo-e Gozen の主なサイエンスターゲットは短いタイムスケールでの希少な変動現象である。ここには超新星のショックブレイクアウトの観測や fast radio bursts の可視対応天体の発見、trans-neptunian objects による掩蔽現象の観測、微光流星の統計的研究などが含まれる。Tomo-e Gozen のファーストライトは 2018 年を予定しており、大規模動画サーベイプログラムを実施する。

2.2 Tomo-e Gozen 動画サーベイ計画

Tomo-e Gozen での観測は大型のプロジェクト単位で実施され、第一期観測プロジェクトとしては超新星サーベイが予定されている。図 3 にサーベイ計画のコンセプトを示した。図中の円は 105 cm シュミット望遠鏡のイメージサークルをもっている。Tomo-e Gozen は 2×2 のディザリングによって円の内部、直径 9 度の領域をほぼすべて観測することができる。各ディザリングポジションでは連続した 0.5 秒積分の画像 6 枚を取得する。すなわち、各ポジションで 0.5 秒の時間分解能を保持したまま 3 秒積分相当のデータを取得する。このサーベイでは望遠鏡移動のオーバーヘッドを含めておよそ 2 時間で高度 30° 以上の空およそ 10,000 平方度をすべて観測することができる。一晩に 3–4 回掃天することによって、hour-day スケールの変動現象を確実に捉える。本サーベイ計画の主たる目的は超新星の発見であるが、領域を限定しない無バイアスなサーベイであるため、タイムドメイン天文学一般に広く有用なデータが提供されると期待されている。

表 1: Specifications of Major Astronomical Survey Facilities.

	Pan-STARRS (PS2)	Catalina (CSS)	Tomo-e Gozen ^{a)}	LSST ^{b)}
FOV	2×7 deg ²	19 deg ²	20 deg ²	9.6 deg ²
Diameter	2×1.8 m	0.7 m	1.05 m	8.4 m ^{c)}
$M_{V,lim}$	22.0 mag	19.5 mag	18.5 mag	24.6 mag
T_{int}	30 s	30 s	0.5 s ^{d)}	15 s
θ_{pix}	0.3''	2.5''	1.0''	0.2''

^{a)}the first light is scheduled in 2018.^{b)}the first light is scheduled in 2019.^{c)}the effective diameter is about 6.7 m.^{d)}a nominal integration time for the supernova survey is 3 s (6 exposures of 0.5 s integration).

3 Detection of Fast-Moving NEOs

3.1 Tomo-e Gozen による NEOs 観測

我々は Tomo-e Gozen による超新星サーベイ計画によって得られるデータを転用することで、多くの NEOs を発見することができると期待している。超新星サーベイによってもたらされるデータから、見かけの移動速度 v が $1''\text{s}^{-1}$ 以下、かつ見かけの明るさが $V \gtrsim 18.5\text{ mag}$ の NEOs については網羅的に発見されると期待される。移動速度が $1''\text{s}^{-1}$ を超える NEOs については、6 枚の画像内で移動している様子が確認できるため即座に移動天体であると認識しアラートを出すこともできる。また、本サーベイでは、およそ 2 時間間隔でサーベイを繰り返すため、自らが発見した NEOs を自らでフォローアップすることによって NEOs の軌道に強い制限を与えることも可能である。将来的には対物グリズムを用いた観測も検討しており、 $V \sim 15\text{ mag}$ 程度の明るい NEOs について波長分解能 $R \sim 10$ 程度の色情報を取得することも可能である。Tomo-e Gozen による動画サーベイによって、従来の NEOs サーベイとは異なるパラメタスペースを開拓することが可能になる。

3.2 トレイルロスの評価

Planetary defense の観点からは 10–50 m 級の NEOs の検出は極めて重要である。Tomo-e Gozen は 1 m 級の望遠鏡に搭載されるため Pan-STARRS や LSST と比較すると限界等級は浅い。このため NEOs との距離が 1 au 程度の場合は Tomo-e Gozen の検出能力は既存の観測システムに劣る。一方で Tomo-e Gozen のサーベイデータは最大で 0.5 s という高い時間分解能を持っているため、高速で移動する NEOs をトラッキングすることなく高い感度で観測することが可能である。ここでは 10–50 m クラスの NEOs が $\ll 1\text{ au}$ の距離にある場合の検出力について検証する。

図 2 が示すように、10–50 m 級の NEOs は絶対等級にして $H = 25\text{ mag}$ 相当であるため、現在の

観測技術では十分に接近した状態でなければ観測できない。一方で、近接した NEOs については観測者から見た見かけの運動が無視できなくなる。2010 年以後に地球に接近した NEOs のうち、再近接時に見かけの速度が最も速かった 5 天体を表 2 にリストした²。NEOs のなかには 1 秒間に 2–3' 程度移動する天体が存在する。観測装置の典型的なピクセルスケールは 0.2–2'' であるため、このような NEOs はトラッキングしなければ露出中にシグナルが複数のピクセルに分散してしまい、露出時間が長いほど損をすることになる。ここではこの効果をトレイルロスと呼ぶ。線像検出法やスタッキング合成法などを用いることである程度まではトレイルロスの効果を回復することができるが、計算にかかるコストは低くない^{14,16,15,12)}。

ノイズがバックグラウンドからの放射で支配されている場合、ピクセルあたりの signal-to-noise 比がトレイルロスによって劣化する効果は以下の式で近似できる：

$$SN_{pix}^{TL} = \frac{t's}{\sqrt{tn + t's}} \simeq \frac{t'}{t} SN_{pix}, \quad (1)$$

ここで SN_{pix} はトレイルロスを考慮しなかった場合の signal-to-noise 比、 SN_{pix}^{TL} はトレイルロスを考慮した場合の signal-to-noise 比、 s は天体からの単位時間あたりのフラックス、 n は単位時間あたりのバックグラウンド放射、 t は総積分時間、 t' は天体からのシグナルが単一ピクセルに留まっている時間 (on-pixel time) である。式 (1) は on-pixel time が減少すると比例して signal-to-noise 比が低下することを示している。

ここではトレイルロスの影響をおおまかに見積もるために地球、および NEO が図 4 に表した配置にある状況を考える。NEO と地球との最接近距離を D とし NEO と地球の相対速度のうち視線方

² Data obtained from “Close Approaches” in Center for Near Earth Object Studies (<https://cneos.jpl.nasa.gov/>).

表 2: Close-Approached NEOs

Name	Close-Approach Date	Distance (au)	Velocity ("s ⁻¹)
2016 DY30	2016-Feb-25 19:59	9.5×10^{-5}	250
2012 KT42	2012-May-29 07:07	1.4×10^{-4}	169
2011 CQ1	2011-Feb-04 19:39	7.9×10^{-5}	169
2014 LY21	2014-Jun-03 22:27	1.1×10^{-4}	139
2013 HT25	2013-Apr-18 13:48	3.6×10^{-4}	114

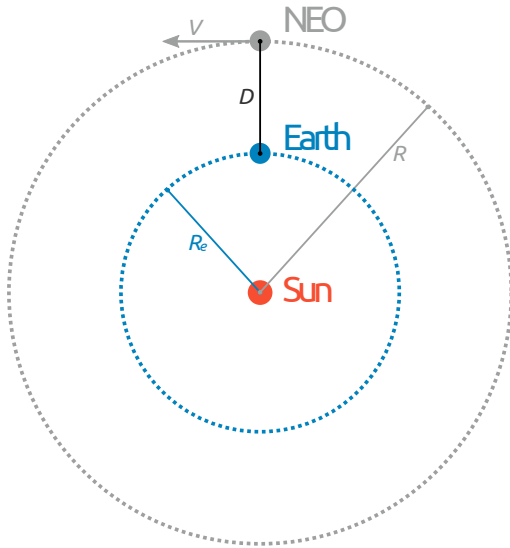


図 4: An assumed configuration of a NEO and the Earth in estimation of NEO detectability.

向と直交する成分の大きさを V とする. ここで相対速度 V を NEO と太陽との距離 R に対応するケプラー回転速度によって近似する:

$$V = 29.8 \sqrt{\frac{R}{1 \text{ au}}} \text{ km s}^{-1}. \quad (2)$$

地球にいる観測者から見た見かけの速度 v に変換すると以下の式を得る³.

$$v = 4.1 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{R}{1 \text{ au}}} \left(\frac{D}{1 \text{ au}} \right)^{-1} \text{ '' s}^{-1}. \quad (3)$$

ここで地球に対して夜側にある NEOs だけを考慮して $R = R_e + D$ とする. 観測装置のピクセルスケール θ_{pix} を v で割った時間を on-pixel time t' と定義する. ただし on-pixel time は実積分時間 t を超えないものとする.

$$t' = \min(t, \theta_{\text{pix}} v^{-1}). \quad (4)$$

以上の設定において, 表 1 に記載した観測シス

テムで NEOs を観測したときのピクセル単位の signal-to-noise 比 (面輝度) を比較した. 結果を図 5 に示した. 各線はそれぞれの観測システムで, ある大きさの NEOs を観測したときに初めてピクセル単位の signal-to-noise 比が 5 を超える距離を表している. 線の左側の領域が NEOs を観測可能な領域にあたる. サイズと絶対等級の関係は Pravec et al. (2012)¹⁰ を参照し, アルベドの値は 0.15 を仮定した. LSST や Pan-STARRS のようにピクセルスケールが細かいシステムではトレイルロスの影響を受けやすく, $D \lesssim 2 \text{ au}$ あたりから signal-to-noise 比が距離の逆二乗則に従わなくなることがわかる. CSS ではピクセルスケールが大きい口径では Pan-STARRS に劣るものの $D \simeq 1 \text{ au}$ 以内の NEOs に関してはほぼ同等のパフォーマンスを発揮できる. Tomo-e Gozen は露出時間が短いため他のシステムに比べると限外等級は浅いものの, NEOs が $D \simeq 0.02 \text{ au}$ 程度まで近づいてもトレイルロスの影響を受けない. このため Tomo-e Gozen では 10 m 級の NEOs を 10^{-2} au 程度の距離で発見できる. 高速移動天体の検出能力に関して, Tomo-e Gozen は LSST に匹敵するパフォーマンスを発揮することができると期待される.

4 Conclusion

次世代の広視野サーベイによる NEOs 探索ではより小さな NEOs を探ることがひとつの目標となっている. LSST の稼動によって 140 m クラスの NEOs が網羅的に発見できると期待される. 一方で地球への衝突被害を及ぼす可能性のある 10–50 m 級の NEOs を発見するためには見かけの速度が $1'' \text{ s}^{-1}$ を超えるような高速移動天体を確実に捉えられる観測装置が有力である. 東京大学木曽観測所では 1.05 m シュミット望遠鏡用の次世代観測装置として CMOS イメージセンサを用いたモザイクカメラ Tomo-e Gozen の開発を進めている. Tomo-e Gozen は 20 平方度の視野を 0.5 秒でモニタリング可能であり, 点源天体であれば V-band でおよそ 18.5 mag. まで捉えることができる. Tomo-e Gozen による動画サーベイによって多くの small-sized NEOs の発見が期待される.

³ 式 (3) は表 2 に記載されている速度に対して 2–3 倍程度過大に評価している. この程度のズレであれば観測システム間の比較にはほとんど影響しない.

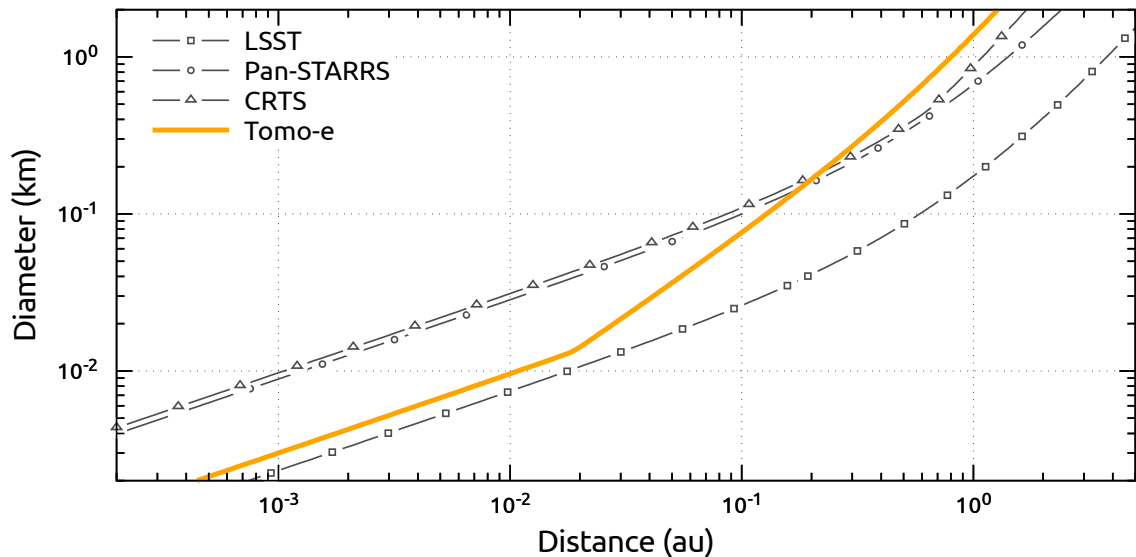


図 5: Detectabilities of fast-moving NEOs. Each line indicates detection limits of NEOs in distance from the Earth. The detection limits were calculated for per-pixel signal-to-noise ratios = 5.

Tomo-e Gozen による超新星動画サーベイでは高度 30 度以上の領域を 2 時間間隔で繰り返し観測することで超新星を網羅的に観測する。一視野の観測データは 6 枚の 0.5 秒積分の露出から構成される。このため比較的高速 ($\sim 1''\text{s}^{-1}$) で移動する NEOs でもほぼ点源として捉えることができる。また Tomo-e Gozen は、他のサーベイ計画では捉えることの難しい、高速で移動する NEOs の検出および軌道決定に有利である。地球近傍を高速で移動する NEOs についてピクセル単位の signal-to-noise 比を比較したところ、Tomo-e Gozen は LSST に匹敵するパフォーマンスを発揮することがわかった。Tomo-e Gozen は 10 m 級の NEOs をおよそ 10^{-2} au の距離で発見することができる。地球に衝突被害をもたらす NEOs の発見、および軌道同定において Tomo-e Gozen は有力かつユニークなツールとなりうる。

- [10] Pravec, P., Harris, A. W., KuÅanirák, P., Galád, A., & Hornoch, K. 2012, *Icarus*, 221, 365. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012Icar..221..365P>
- [11] Sako, S., Osawa, R., Takahashi, H., et al. 2016, in *Proc. SPIE*, Vol. 9908, 99083P–15. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2544194>
- [12] Shao, M., Nemati, B., Zhai, C., et al. 2014, *The Astrophysical Journal*, 782, 1. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014ApJ...782....1S>
- [13] Tyson, J. A. 2002, in *Proc. SPIE*, Vol. 4836, eprint: arXiv:astro-ph/0302102, 10–20. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002SPIE.4836...10T>
- [14] Yanagisawa, T., Hanada, T., Kurosaki, H., et al. 2012, in *Proc. COPASAR*, Vol. 39, 2196. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012cosp...39.2196Y>
- [15] Yanagisawa, T., & Nakajima, A. 2005, *Japan Society of Aeronautical Space Sciences Transactions*, 47, 240. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005JSAST...47..240Y>
- [16] Yanagisawa, T., Nakajima, A., Kadota, K.-I., et al. 2005, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 57, 399. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005PASJ...57..399Y>

(2017年4月28日受付, 2017年5月10日受理)

参考文献

- [1] BoroviÅnka, J., Spurný, P., Brown, P., et al. 2013, *Nature*, 503, 235. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013Natur.503..235B>
- [2] Farinella, P., Foschini, L., Froeschlé, C., et al. 2001, *Astronomy and Astrophysics*, 377, 1081. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001A%7B%26A...377.1081F>
- [3] Harris, A. W. 2010, in *Proc. the International Conference "Asteroid-Comet Hazard 2009"*, 312. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010peca.conf...312H>
- [4] Kaiser, N., Aussen, H., Burke, B. E., et al. 2002, in *Proc. SPIE*, Vol. 4836, 154–164. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002SPIE.4836...154K>
- [5] Larson, S., Brownlee, J., Hergenrother, C., & Spahr, T. 1998, in *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 30, 12.P14. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998BAAS...30.1037L>
- [6] Lyne, J. E. 1995, *Nature*, 375, 638. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1995Natur.375..638L>
- [7] Morii, M., Ikeda, S., Sako, S., & Ohsawa, R. 2016, *ArXiv e-prints*, 1612, arXiv:1612.03994. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2016arXiv161203994M>
- [8] NASA. 2007, *NEO Survey and Deflection Analysis and Alternatives, Report to Congress*, NASA. https://cneos.jpl.nasa.gov/doc/neo_report2007.html
- [9] Ohsawa, R., Sako, S., Takahashi, H., et al. 2016, in *Proc. SPIE*, Vol. 9913, 991339–8. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2543636>