

Tomo-e Gozenデータを用いた 既知小惑星の位相角曲線の研究

吉田二美^{1,8}, 伊藤孝士², 浦川聖太郎³, 寺居剛⁴, 富永望⁵, 諸隈智貴⁶, 酒向重行⁶,
大澤亮⁶, 田中雅臣⁷, 濱崎凌⁵

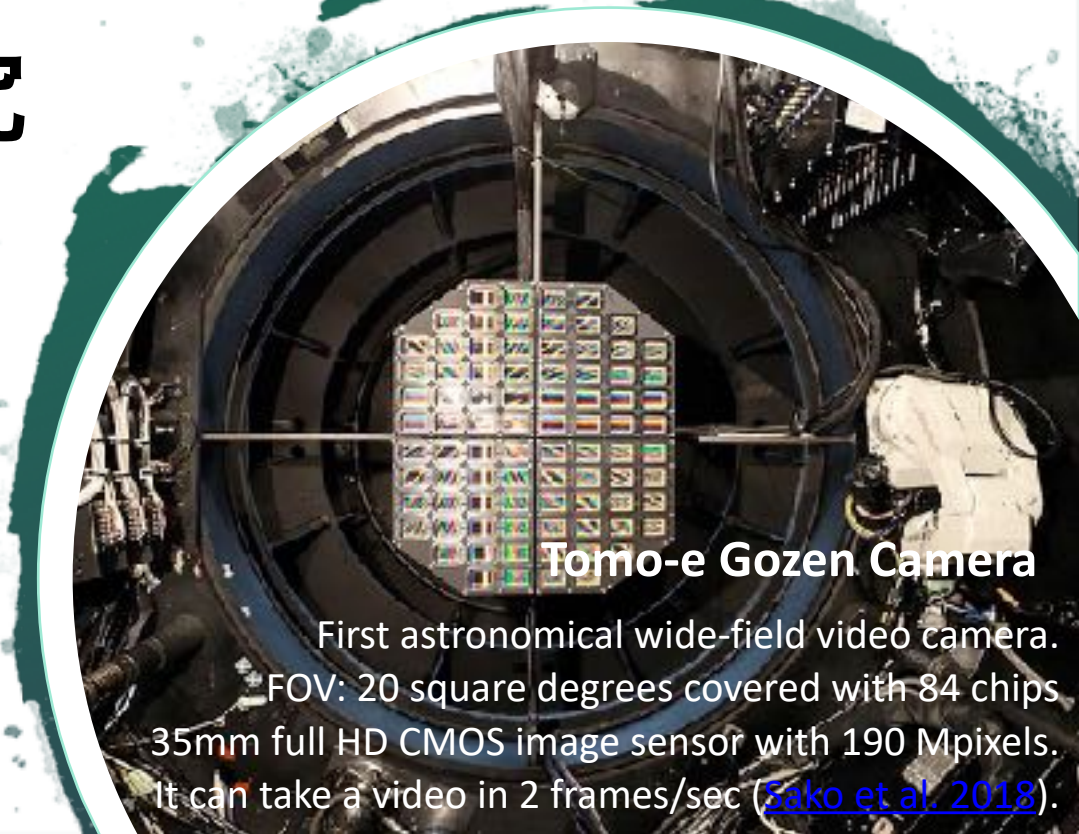
¹産業医科大学 (fumi-yoshida@med.uoeh-u.ac.jp), ² 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト, ³ 日本スペースガード協会, ⁴ 国立天文台ハワイ観測所, ⁵ 甲南大学, ⁶ 東京大学, ⁷ 東北大学, ⁸ 千葉工業大学惑星探査研究センター



Kiso Observatory

[Location]

137d37m31.5s E, 35d47m50.0s N,
Altitude: 1132m



Tomo-e Gozen Camera

First astronomical wide-field video camera.
FOV: 20 square degrees covered with 84 chips
35mm full HD CMOS image sensor with 190 Mpixels.
It can take a video in 2 frames/sec ([Sako et al. 2018](#)).

概要

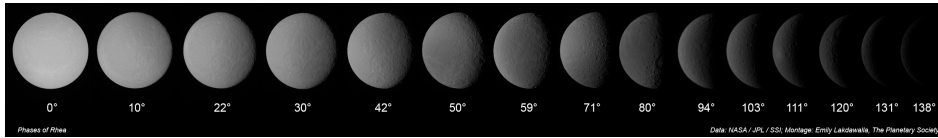
- Tomo-e Gozen High-Cadence Transient Surveyのデータを使って既知の太陽系小天体（SSSB）の位相角曲線を得る
- 2019年からこれまでに44,000個を超える既知のSSSBを検出
- 本発表では以下のものを示す
 - サーベイ観測から位相角曲線のプロット、絶対等級算出までの手順
 - 取得した位相角曲線コレクションの一部
 - Gaiaにデータと組み合わせた位相角曲線の例

このサーベイは10年継続する予定である。

検出可能な18等以下（見かけの等級）のほとんどの既知のSSSBで位相角曲線と絶対等級が、サーベイ終了時までには得られるのではと期待している。

位相角曲線から小天体の表面の特性を推定

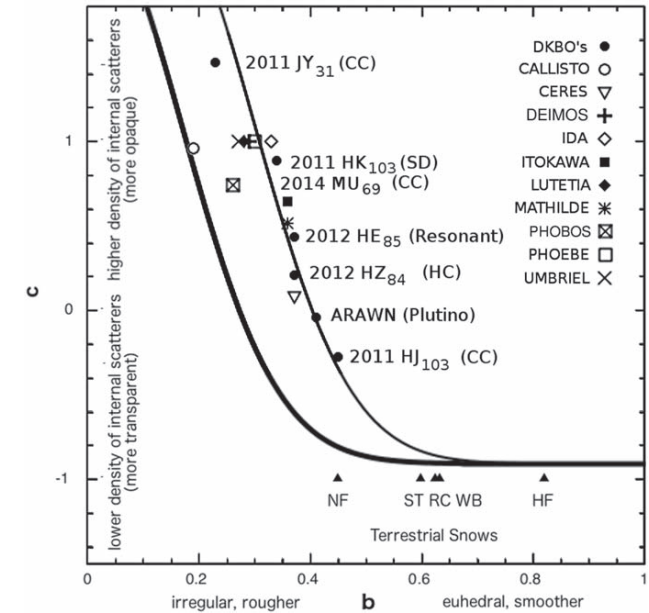
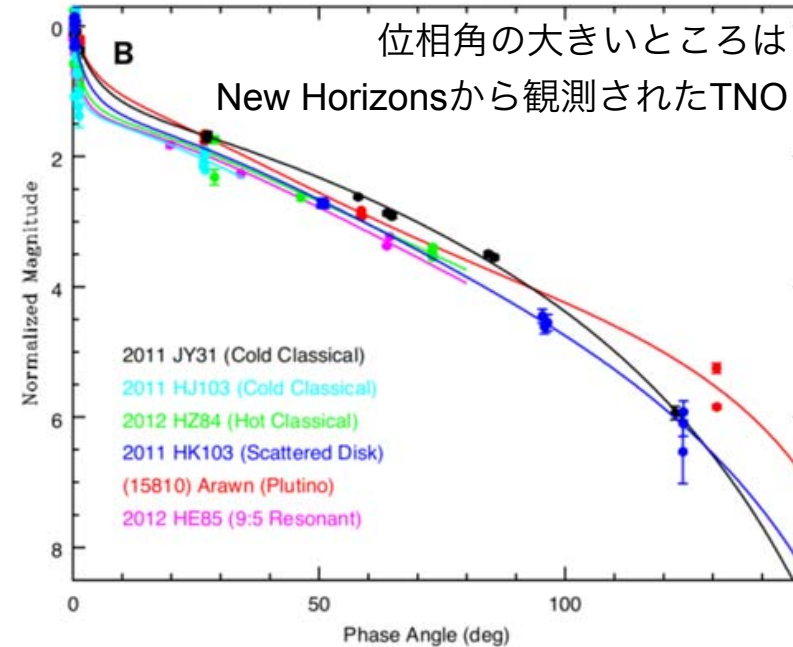
- 位相角曲線（横軸に太陽位相角、縦軸にその位相角での小惑星の明るさをプロットした曲線）



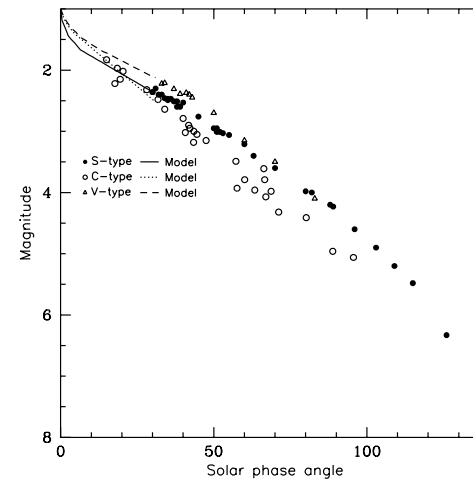
位相角によって明るさが異なる様子

- 微視的および巨視的效果を含む様々な物理的效果が位相角曲線の形状に寄与する。
- 太陽位相角(α) $<20^\circ$ ：反射光の干渉が発生する可能性があり微視的效果が現れる。天体の明るさが急上昇＝空隙率の高い表面層（衝効果）
- $\alpha > 90^\circ$ ：巨視的な粗さ（光の波長よりも大きい細孔、クレーター、山など）が位相角曲線の形状を支配。

位相角曲線は、空間分解出来ない天体の観測からその表面散乱特性を推定するためのユニークなツール。



[Verbiscer et al. AJ 158,123 \(2019\)](#)

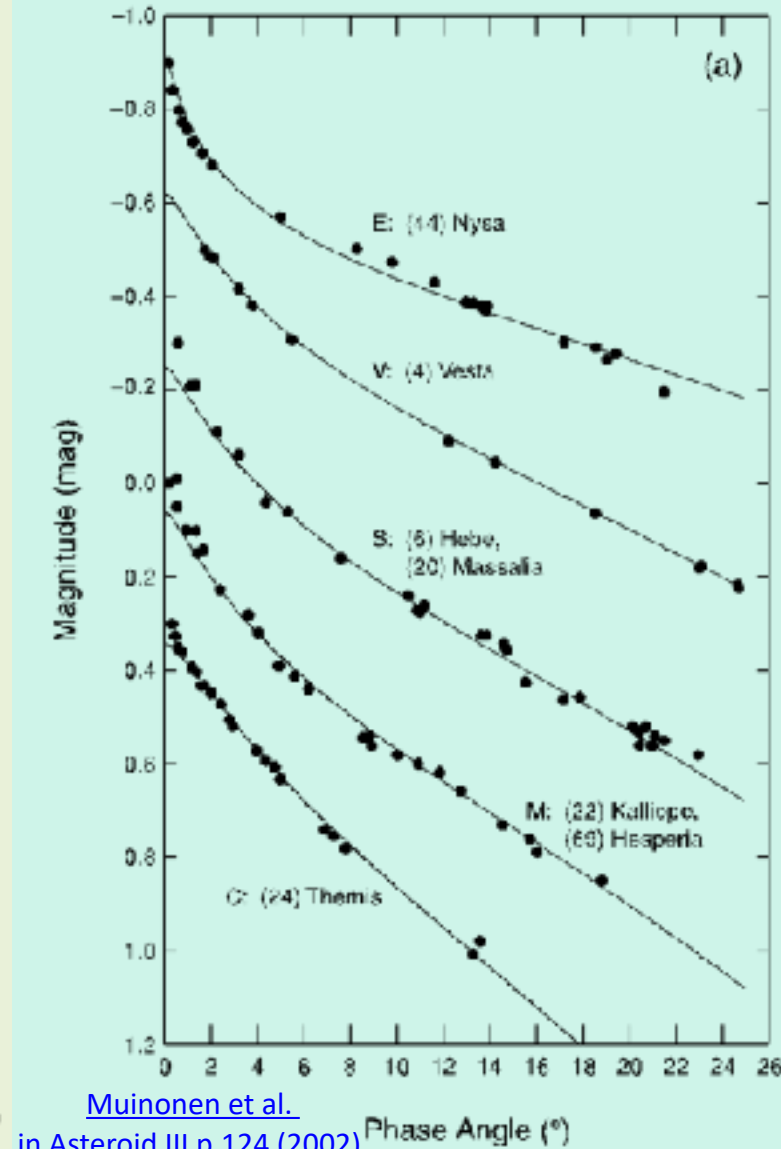
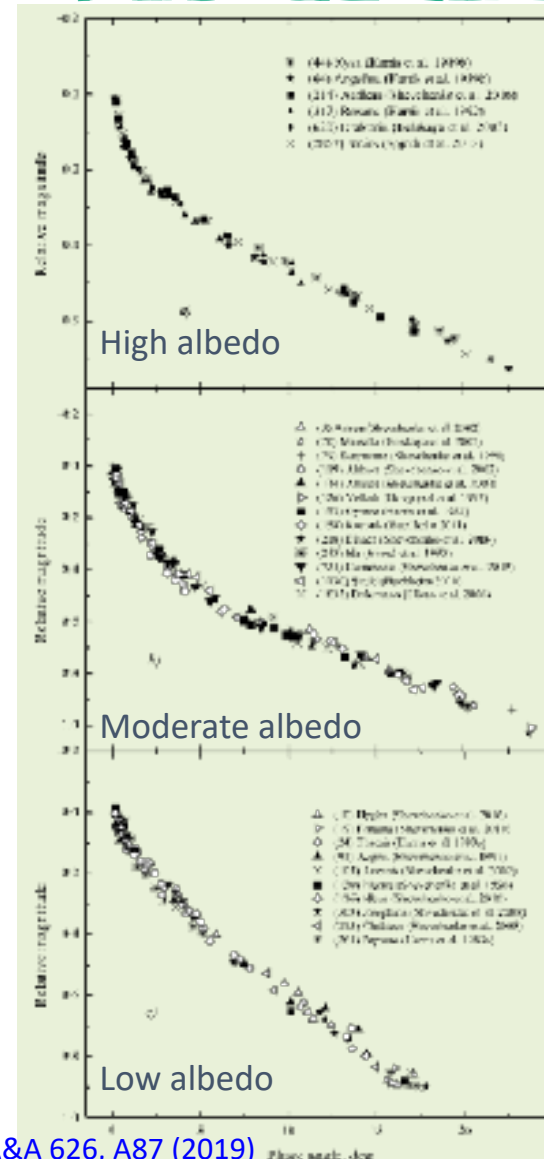


位相角曲線をHapke photometric model でfitしてやると表面が不規則か、スムーズか、または内部散乱成分が大きいかわかり、表面が透明か不透明かとかがわかる。約30度より大きい位相角では宇宙望遠鏡や探査機からの観測が必要。近地球小惑星は大きな位相角まで地上から観測できる天体もある。

各天体の位相角曲線に基づいた絶対等級推定

- 絶対等級(H)は小惑星サイズやアルベドを推定するのに重要なパラメーター
- 位相角 $\alpha=0^\circ$ での明るさでHが定義されている
- 小惑星の明るさは常に $\alpha=0$ で測定できるとは限らないため、異なる α で測定された明るさをfittingして $\alpha=0$ での明るさを推定する
- このような観測は通常は時間がかかる。
 - (1) 自転による光度変化を除去する各 α で光度曲線観測
 - (2) 天体の位相角が変化するのを待つ
- 現状ではほとんどの小惑星のHは、典型的なslopeパラメーター(G)=0.15をいう仮定のもとにfitting式から推定
- G値は小惑星のアルベドや小惑星タイプに依存（右図参照）。
- つまり、現在の小惑星カタログではほとんどの小惑星について「正確なH」が載っているわけではない。

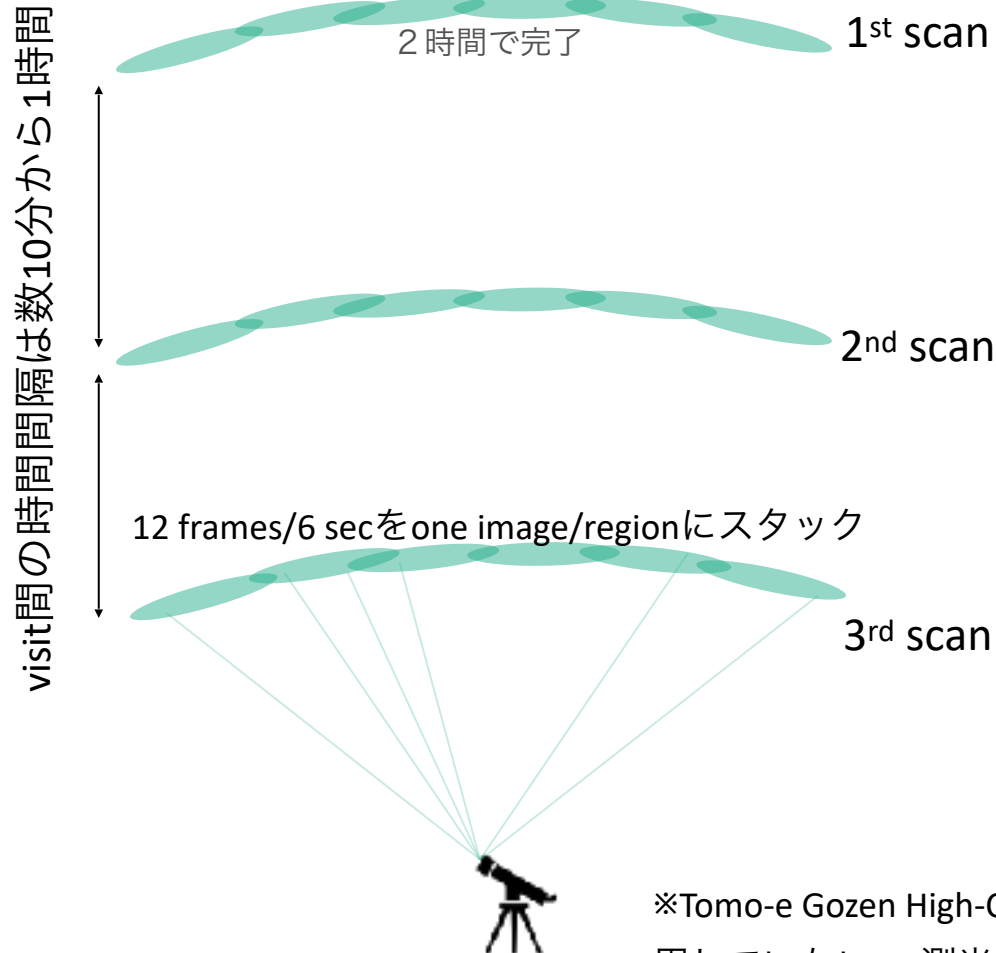
Tomo-e Gozenのデータを使い、位相角曲線に基づいて「正確なH」を再推定することは非常に重要/必須なタスク。



移動天体の検出

Tomo-e Gozen High-Cadence Transient Survey

高度35°以上の全天スキャン



※Tomo-e Gozen High-Cadence Transient Surveyはフィルターを使用していない。測光のキャリブレーションは、Pan-STARRSカタログのrバンドの値を使用して行われる。

① 一晩で全天を数回visits(一晩で各小惑星の明るさが数点測れる)

② 光源カタログを作成(自動)

③ 光源カタログから移動天体を区別

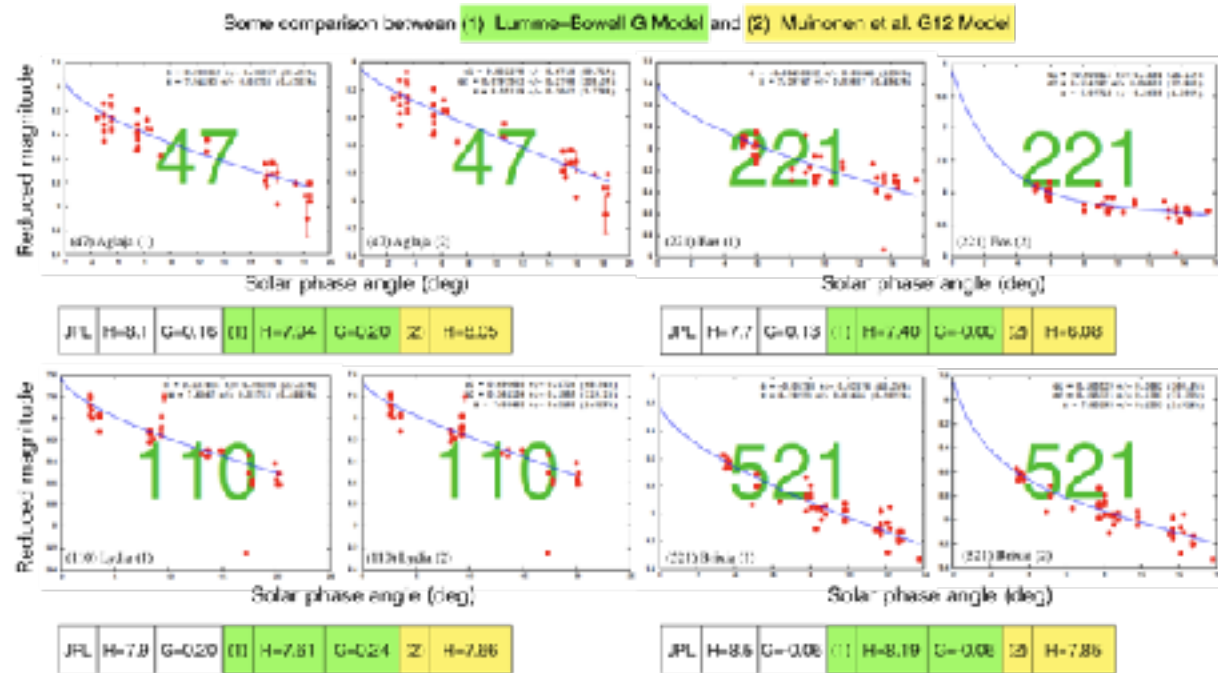
ローウェル天文台の太陽系小天体カタログ「astorb」を参照し、検出された時刻の各SSSBの予測位置座標を計算する。その予測座標を中心に6"x6"の範囲に天体がある場合、その天体はastorbにリストされている既知の小惑星と見なされ、超新星やトランジット天体のカタログから外す。

移動天体抜きのカatalogで
メインサイエンス

外された天体のRA,DEC,MJD,見かけ等級,等級誤,astorbでの予想等級,小惑星の名はサーベイデータベーステーブルに自動的に追加される。これが移動天体カタログとなる。

取り除かれた方の
カタログで
太陽系小天体の研究

絶対等級 H とslopeパラメータ Gの決定



位相角曲線のフィッティングは2つのモデルで試した。

(1) Lumme-Bowellモデル(Bowell et al.1989) H、Gシステムとして知られる。

$$V = 5 \log_{10}(r\Delta) + H - 2.5 \log_{10}[(1 - G)\Phi_1 + G\Phi_2]$$

$$\Phi_i = -A_i \left[\tan \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]^{B_i}, \quad i = 1, 2 \quad A_1=3.33, A_2=1.87, B_1=0.63, B_2=1.22$$

(2) Muinonen et al.G12モデル(Muinonen et al. 2010) 2つフリーパラメーターと3つ目の関数が含まれる。

$$V = 5 \log_{10}(r\Delta) + H - 2.5 \log_{10}[G_1\Phi_1 + G_2\Phi_2 + (1 - G_1 - G_2)\Phi_3]$$

④ [JPL Horizons](#) (既知の小惑星の位置推算webサービス) を使って、小惑星が検出された時刻でのその小惑星の太陽位相角(α)、地心距離、日心距離を取得

⑤ 距離の補正を行なった上で、位相角 α での明るさ $H(\alpha)$ を算出

$$H(\alpha) = V(\alpha) - 5 \log_{10}(\text{日心距離} \times \text{地心距離})$$

⑥ 位相角曲線 α vs. $H(\alpha)$ を描く

⑦ 位相角曲線を二つの異なるモデルでフィッティングして絶対等級 H とslopeパラメータ Gを求める

それぞれのモデルでフィッティングした結果はここで見られる

(1) [Lumme-Bowell G Model](#) and (2) [Muinonen et al. G12 Model](#)

[You can click here to see the plots.](#)

[You can click here to see the plots.](#)

これまでに検出された天体グループと天体数

Asteroid category	Total number of detected asteroids
Aten [NEO, PHA]	5
Aten [NEO]	11
Amor [NEO, PHA]	4
Amor [NEO]	68
Apollo [NEO, PHA]	33
Apollo [NEO]	54
Mars-crossing	510
Inner main belt	703
Main belt asteroids	41263
Outer main belt	1410
Jupiter Trojans	248
Centaur	5
Trans Neptunian	9

As for the categorization,
please refer [here](#).

2020年4月11日
現在で44323個
の太陽系小天体
検出

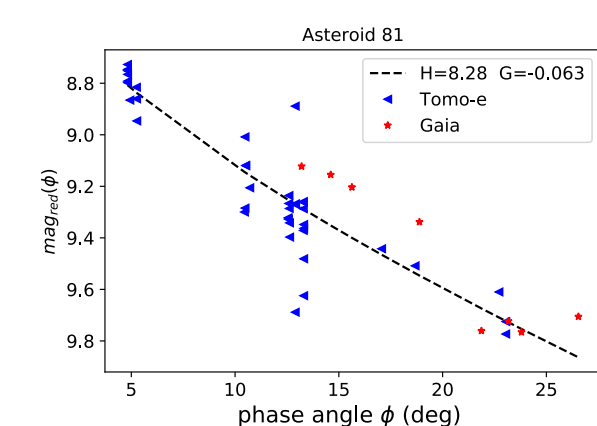
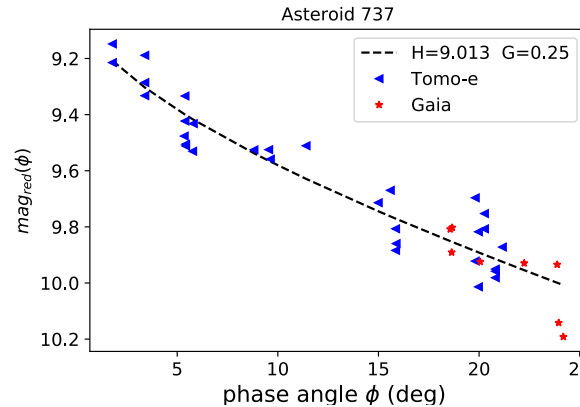
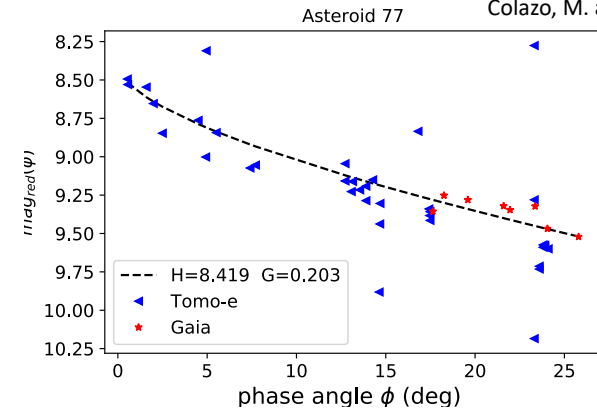
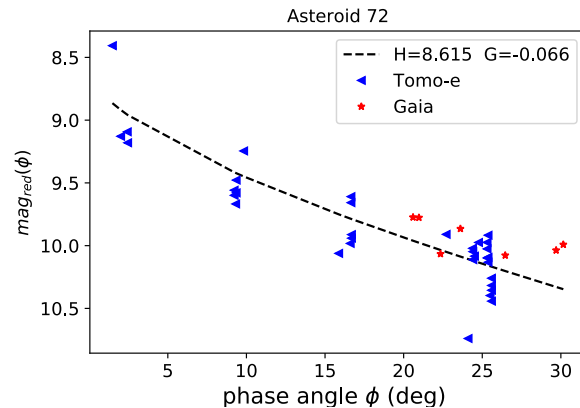
- このサーベイの検出限界は約18等なので、検出される移動物体はほぼ既知の太陽系小天体。
- 位相角 α の範囲は多くの小惑星で0度から数10度までで、微視的効果が現れる範囲に対応。絶対等級の推定には十分な位相角範囲。
- まだ測定数や位相角の幅が十分でなく、正確なH,Gが算出にはデータが足りない天体が多い。
- Tomo-e Gozen High-Cadence Transient Surveyは10年間継続されるので、サーベイ終了までには多くの既知SSSBで位相角曲線と絶対等級が得られると期待している。
- 密なデータポイントが得られた時点で、H,Gの値と表面特性、小惑星タイプ、アルベドなど相関関係を調べる。

まとめと今後

- Tomo-e Gozen High-Cadence Transient Surveyで検出された44323個の小天体の位相角曲線をプロットした。
- 2つの異なるモデル(1)Lumme–Bowell Gモデルと(2)Muinonen et al. G12モデルで位相角曲線をfittingした。
- 各天体の密な位相角曲線が取得できれば、小天体の絶対等級と表面特性に関する有望な情報を提供するが、まだほとんどの天体に対して十分なデータ点がない。
- しかし、このサーベイは10年間継続されるため、より多くの天体に対してより密度の高い位相角曲線が確実に得られるはずである。

References

- [Bowell et al. 1989](#), in Asteroids II, ed. R. P. Binzel, T. Gehrels, & M. Shapley Matthews (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 524
- [Muinonen et al. 2002](#), in Asteroid III, ed. W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 124
- [Muinonen et al. 2010](#), Icarus, 209, 542
- [Sako et al. 2018](#), Proceedings of the SPIE, Volume 10702, id. 107020J 17 pp.
- [Shevchenko et al. 2019](#), A&A 626, A87
- Colazo, M. and Duffard, R.: H-G determination of 4000 asteroids from GAIA-DR2, Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-406, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-406>, 2020
- [Li et al.](#) in Asteroid IV. P.131
- [Verbiscer et al. 2019](#), AJ, 158, 123



Gaiaでは4208個の小惑星のH,Gが決定された。Gaia Data Release 2 には14,099個の太陽系小天体のデータが含まれており、それらとTomo-e Gozenのデータを組み合わせれば、より広い位相角範囲で位相角曲線が得られるはず。さらにPan-STARRSやPalomar Transient Factory、Zwicky Transient Facility、Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System でも同様のデータ取得が見込まれ、ここ数年のうちに小惑星カタログの絶対等級の精度はかなり改善されるだろう。