OISTERによる <u>微小小惑星 2010 XC15 の 偏光観測</u>

2023年3月1日 13:00-13:20 @ 第13回 OISTER ワークショップ

べにやま じん 紅山仁(東京大学 D2)

共同研究者:

石黒正晃 (ソウル大学), 浦川聖太郎, 黒田大介 (日本スペースガード協会), 関口朋彦(北海道教育大学), 匠あさみ(国立天文台), 前田夏穂(神戸大学), 吉田二美 (産業医科大学/千葉工業大学), 鍵谷将人 (東北大学), 酒向重行, 瀧田怜 (東京大学), 高橋隼, 斎藤智樹, 大島 誠人 (兵庫県立大学), 齊藤大晶,高木聖子(北海道大学),中岡竜也,今澤遼(広島大学)













微小小惑星を観測する意義

- 小惑星による物質輸送は 地球の水や生命の起源の有力候補の一つ (Peslier 2020)
- 小惑星が多く存在するメインベルト帯から 地球近傍への移動において、太陽輻射に起因して 小天体の軌道が変化する (Yakorvsky効果, Farinella+1998)
- Yarkovsky 効果は小天体のサイズ、表面様相、密度など に依存して作用する (Bottke+2006, Vokrouhlicky+2015など)。 直径が小さい小惑星ほど Yarkovsky 効果が強く働く → 軌道変化の変化の検出は容易
 - → Yarkovsky 効果の理解を深める良い研究対象

<u>微小小惑星の表面様相が推定された例は極小数</u>

Farinella, P. et al., 1998, Icarus, 132, 378. Bottke et al. 2006, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 34, 157. Vokrouhlický et al., 2015, In Asteroids IV, 509. Peslier 2020, Science, 369, 1058.









scheme of the Yarkovsky effect



(微小)小惑星を偏光観測する意義

- 可視光での小天体観測は天体表面での太陽光の散乱光をみている。 天体の表面様相(アルベド、粒子サイズ分布、ラフネスなど)に依存して 散乱光の振動方向は程度の差こそあれ偏っている(偏光)。 → <u>偏光観測 (Polarimetry) により、小天体の表面様相を推定可能</u>



 ・ 高位相角を含む複数の太陽位相角 α で偏光観測することができれば、表面粒子サイズまで推定



偏光観測から導出できる物理量

• <u>高位相角: positive branch</u>

- ▶ 幾何的な制約から基本的にメインベルト小惑星では難しく、<u>NEA</u>で多くの研究
- ▶ 位相角 100 度以上で偏光観測した例は<u>非常に少ない</u>

No.	Object	Taxon.	Filter	Phase angle range	Max. Pr [%]	Max. alpha [deg]	Reference
1	(1685) Toro	S	V	47–106.3	8.5±0.7	110±10	Kiselev+1990
2	(4179) Toutatis	S	6 vis.	13.5–112	7.0±0.2	107±10	Mukai+1997, Ishiguro
3	(23187) 2000 PN9	S	V	90.7, 115 *	7.7	90–115	Belskaya+2009
4	(1566) Icarus	S	R	57–141	7.32±0.25	124±6	Ishiguro+2017
5	(331471) 1984 QY1	S, Q	V, R	41.2–111.7	~8	~100	Geem+2022a
6	(3200) Phaethon	В	vis.	19–135	45±1	124.0±0.4	Kiselev+2022
7	(155140) 2005 UD	В	R	20–105	> 50	> 100	Ishiguro+2022 (Devogele
8	(162173) Ryugu	С	V, R	28–104	53	100	Kuroda+2021
9	(144898) 2004 VD17	Ε	V	105.1–109.6	> 2.35	> 80	De Luise+2007

(*) Combine other observations to derive polarimetric parameters

Li+2015, Asteroid IV, Kiselev+1990, Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel (ISSN 0233-7665), vol. 6, 77., Mukai+1997, Icarus, 127, 452., Ishiguro+1997, PASJL, 49, L31., Cellino+2005, Icarus, 179, 297., Belskaya+2009, Icarus, 201, 167., Ishiguro+2017, AJ, 154, 180., Kiselev+2022, MNRAS, 514, 4861., Ishiguro+2022, MNRAS, 509, 4128., Cellino+2018, MNRAS, 481, L49., Kuroda+2021, ApJL, 911, L24., De Luise+2007, Icarus, 191, 628.

^wは難しく、<u>NEA</u>で多くの研究 (Near-Earth Asteroid)





偏光観測から導出できる物理量

• <u>高位相角: positive branch</u>

- ▶ 幾何的な制約から基本的にメインベルト小惑星では難しく、<u>NEA</u>で多くの研究
- ► 位相角 100 度以上で偏光観測した例は<u>非常に少ない</u>
- Shkuratov & Opanasenko (1992) は様々なサイズの 月サンプルの偏光観測を行い、
 幾何アルベド p_V,最大偏光度 P_{max},表面粒径 d の相関を見出した

Umov's law and particle size (Shkuratov & Opanasenko 1992)

$$\log_{10}(p_{\rm V}) + a \log_{10}(P_{\rm max}) = b,$$

 $d = 0.03 \exp(2.9b)$

今日はこの関係式に注目

Shkuratov & Opanasenko, 1992, Icarus, 99, 468.



に 、 い 、 い 、 NEA で多くの研究 (Near-Earth Asteroid)



Data from Kiselev+2002, De Luise+2007, Ishiguro+2022, and references therein

偏光観測から導出できる物理量

• <u>高位相角: positive branch</u>

- ▶ 幾何的な制約から基本的にメインベルト小惑星では難しく、NEA で多くの研究
- ► 位相角 100 度以上で偏光観測した例は**非常に少ない**
- Shkuratov & Opanasenko (1992) は様々なサイズの 月サンプルの偏光観測を行い、 幾何アルベド p_V ,最大偏光度 P_{max} ,表面粒径dの相関を見出した

Umov's law and particle size (Shkuratov & Opanasenko 1992)

$$\log_{10}(p_{\rm V}) + a \log_{10}(P_{\rm max}) = b,$$

 $\underline{d} = 0.03 \exp(2.9b)$

今日はこの関係式に注目

Shkuratov & Opanasenko, 1992, Icarus, 99, 468.





(Near-Earth Asteroid)





微小小惑星 2010 XC15

- Catalina Sky Survey により2010年12月5日に 発見された地球接近小惑星
- 2017年の Spitzer 宇宙望遠鏡の観測 (3.6 & から推定された<u>幾何アルベドは高い</u> (~ 0.3
- 複数回帰で観測されており軌道決定精度が高い
- 2022年12月末に <u>V~13 mag, 太陽位相角~115</u>° の観測好機を迎えた

微小小惑星の表面様相を知るための またとない観測対象

(*) NEOSurvey, Aug. 2018, "NEOSurvey--results," on line at Near-Earth Objects at Northern Arizona University (<u>http://nearearthobjects.nau.edu/neosurvey/results.html</u>)

(**) <u>https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=2010XC15&view=VOP</u>

幾何アルベド $p_V \&$ 最大偏光度 $P_{max} \&$ 粒径 d

4.5	μ	m)
3)			

直径 D [km] $0.102^{+0.030}_{-0.017}$ $0.350^{+0.176}_{-0.151}$ Geometric albedo pV Taxonomy **Rotation Period**



7 / 17

2010 XC15の軌道 (2022-12-27)**

微小小惑星 2010 XC15







• 高位相角での偏光観測による 微小小惑星の表面粒径の推定 (OISTER)

トル型の推定 転周期 スペク (せいめい望遠鏡共同利用)





アルベドと最大偏光度の関係 Ishiguro et al. (2017)



観測(せいめい望遠鏡共同利用/OISTER偏光観測)

• <u>撮像観測(共同利用観測2022B, PI: 紅山)</u>

- TriColor CMOS Camera and Spectrograph @ Kyoto University 3.8 m telescope (せいめい望遠鏡)
- ► g, r, i/z (Pan-STARRS) 3色同時撮像
- ► 視野 12.6 x 7.5 arcmin
- ▶ 5 s 積分で連続観測
- ► 0.5夜 x 6日 (観測者:前田、匠、紅山)

<u>偏光観測 (光・赤外線天文学大学関連携 OISTER, PI: 紅山)</u>

- ▶ 北海道大学 Pirka 1.5 m / MSI 1夜(*)
- ► 広島大学 Kanata 1.5 m / HONIR 5夜(*)
- ▶ 兵庫県立大学 Nayuta 2.0 m / WFGS2 2夜(*)









結果と議論 1. 自転周期と形状 (Seimei/TriCCS)

Beniyama et al., in prep.

結果と議論 2. 色指数とスペクトル型 (Seimei/TriCCS)



結果と議論 3. 直線偏光度 (OISTER観測)



結果と議論 4. E-type 小惑星の測光/偏光特性



結果と議論 4. E-type 小惑星の測光/偏光特性



結果と議論 5. 小惑星の表面環境





• 2022年12月下旬に地球に接近し観測好機を迎えた 微小小惑星2010 XC15の観測キャンペーンを実施 目的は高位相角での偏光観測による表面粒子径の推定



日本での 2010 XC15 の天体歴

岡山 (MPC code 371)毎日後半夜に観測可能



Elevation [deg] V magnitude [mag] Phase angle [deg]



偏光解析: 標準星の偏光度 (Nayuta/WFGS2, Pirka/MSI)

諸々の補正パラメタを使って正しく偏光度が求まるかを検証する目的で





Nayuta/WFGS2 on 2022-12-20 radius = 25 pix (4.95 arcsec)

Nayuta/WFGS2 on 2022-12-27 radius = 30 pix (5.94 arcsec)

<u>各観測所で2010 XC15の他に偏光標準星 HD19820 (Schmidt+1992) を観測した(してもらった)</u>

標準星のストークスパラメタ q, u



Pirka/MSI on 2022-12-21 radius = 20 pix (7.8 arcsec)







偏光解析:標準星の偏光度(Kanata/HONIR)





Kanata/HONIR on 2022-12-23 radius = 20 pix



r = 20 pix on 2022-12-24



[•] = 25 pix on 2022-12-26



r = 20 pix on 2022-12-25



直線偏光度 (OISTER 観測)

- 初日 2022-12-20 3 set の解析結果(なゆた 2 m 望遠鏡)
 - ► 位相角~60°で偏光度は1,2% -> 高アルベド小惑星 -> 翌日以降も低い偏光度が予想される (この解析をすぐにできていれば、観測者に有益であった……)

2010 XC15のストークスパラメタ q, u



1st set



2nd set

3rd set

直線偏光度 (OISTER観測)

• <u>最終日 2022-12-27 8 set の解析結果(なゆた 2 m 望遠鏡</u>)

► 位相角 ~115° で偏光度は ~1.5 % -> やはり高アルベド小惑星







直線偏光度(OISTERによる観測)

- 2022-12-21 3 set の解析結果(名寄 1.6 m 望遠鏡)
 - ► 標準星の解析がうまくいっていないので絶対値は信頼できない -> 今日のところは使わない (名寄は悪くない)

2010 XC15のストークスパラメタ q, u



1st set





3rd set

4th set

直線偏光度 (OISTERによる観測)

最終日 2022-12-27 8 set の解析結果(なゆた 2 m 望遠鏡)

► 位相角 ~115° で偏光度は ~1.5 % -> やはり高アルベド小惑星







結果と議論 6. 同一起源小惑星?

 過去に高位相角で偏光観測された小惑星は3例 2010 XC15 と (33342)1998 WT24の軌道は類似

No.	Object	Taxon.	Filter	Phase angle range	Max. Pr [%]	Max. alpha [deg]	Referer
7	(155140) 2005 UD	В	R	20–105	> 50	> 100	Ishiguro+2022 (D
8	(162173) Ryugu	С	V, R	28–104	53	100	Kuroda+2021
9	(144898) 2004 VD17	E	V	105.1–109.6	> 2.35	> 80	De Luise+2007

• 8惑星と小惑星のN体軌道計算を実施(w/REBOUND, Rein+2012, 2015)





結果と議論 6. 同一起源小惑星?

 過去に高位相角で偏光観測された小惑星は3例 2010 XC15 と (33342)1998 WT24の軌道は類似

	a [au]	е	i [deg]	q [au]
2010 XC15	0.73	0.42	8.24	0.42
1998 WT24	0.72	0.42	7.37	0.42
2004 VD17	1.51	0.59	4.22	0.62
Phaethon	1.27	0.89	22.3	0.14
2005 UD	1.27	0.87	28.66	0.16

8惑星と小惑星を含むN体の軌道計算を実施(w/REBOUND, Rein+2012, 2015)



(2010 XC15) Classification: Aten [NEO, PHA] SPKID: 3553169 Related Links: Ephenetic

Orbit Viewer Inde

For accurate ephemerices, please instead use our **Horizons system**. This orbit vi



33342 (1998 WT24)

Classification: Alen [NEC, PHA] SPKID: 2035342 Related Links: Ephemeris

Orbit Viewer [hid

for accurate ephameridas, piease instead use our Horizons system. This orbit via





結果と議論 6. 同一起源小惑星?





0.775

0.750

0.725

0.700

2010 XC15







0.775

0.750

0.725

0.700

0.675

0.44

0.42

0.40

0.38

0.36

10°

10

10

Dista

1.0

1.0

1.0

1.0