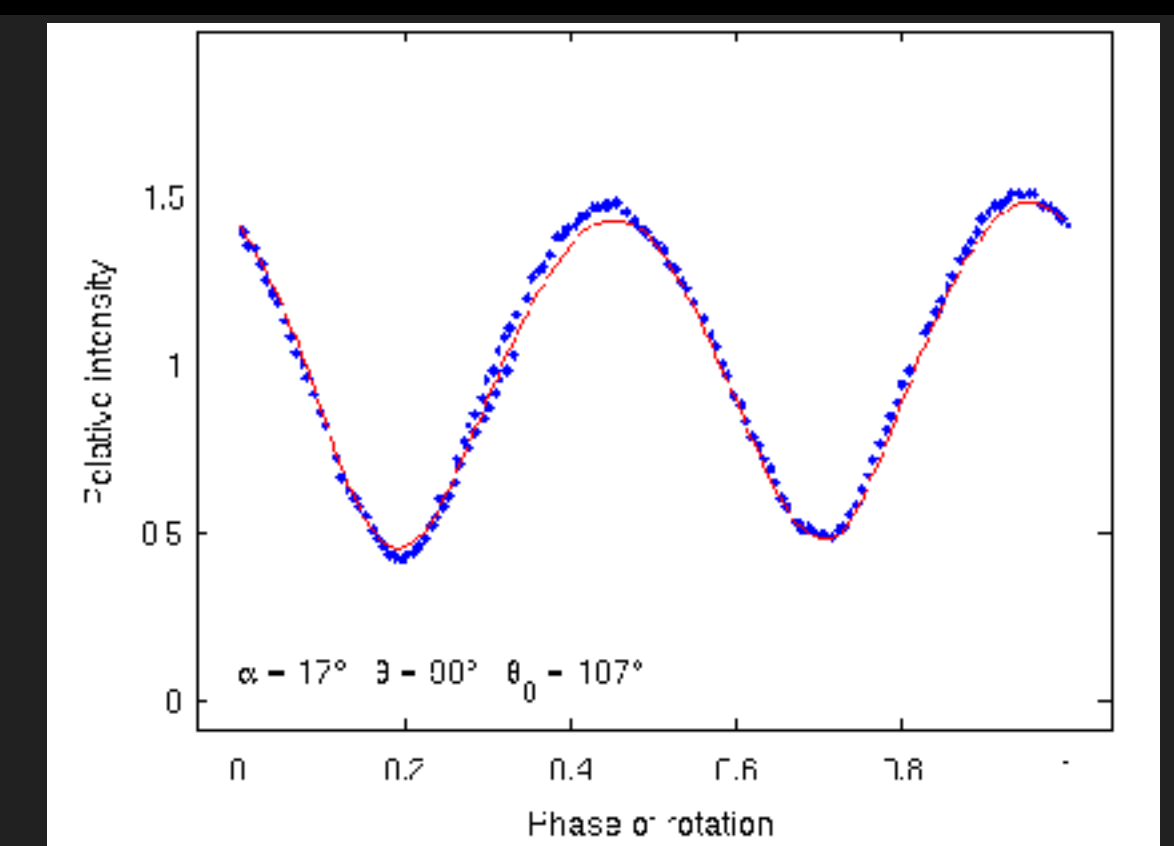
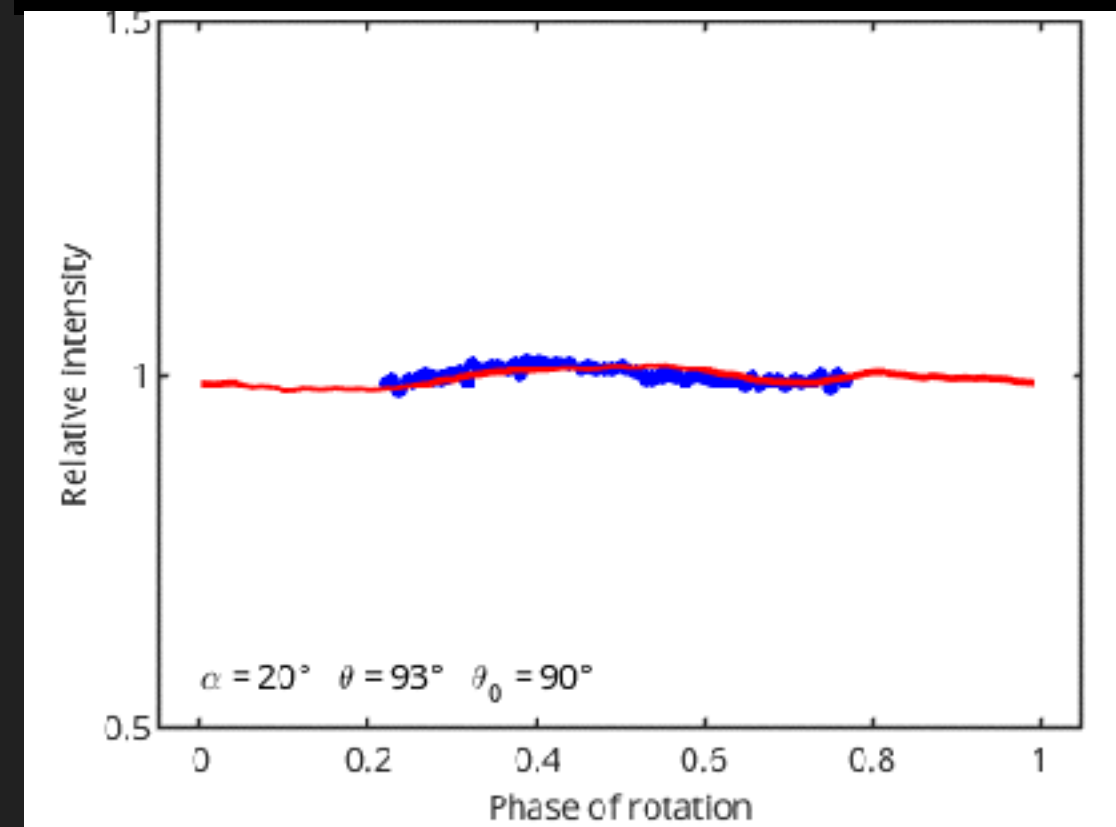
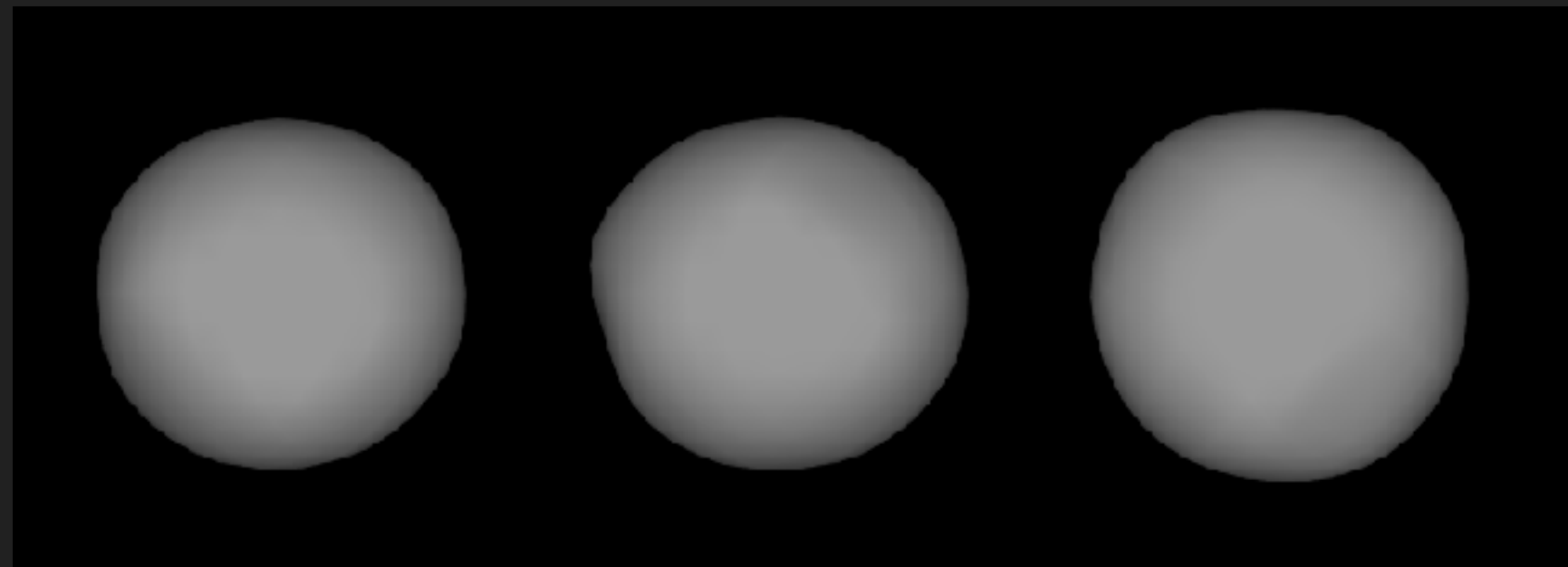


# Tomo-eとTriCCSによる

## 微小高速自転小惑星2022 JLの即時モニタリング観測

July 6th, 2022, 9:15–9:40 @ 木曾シュミットシンポジウム2022



紅山 仁 (D2)

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター

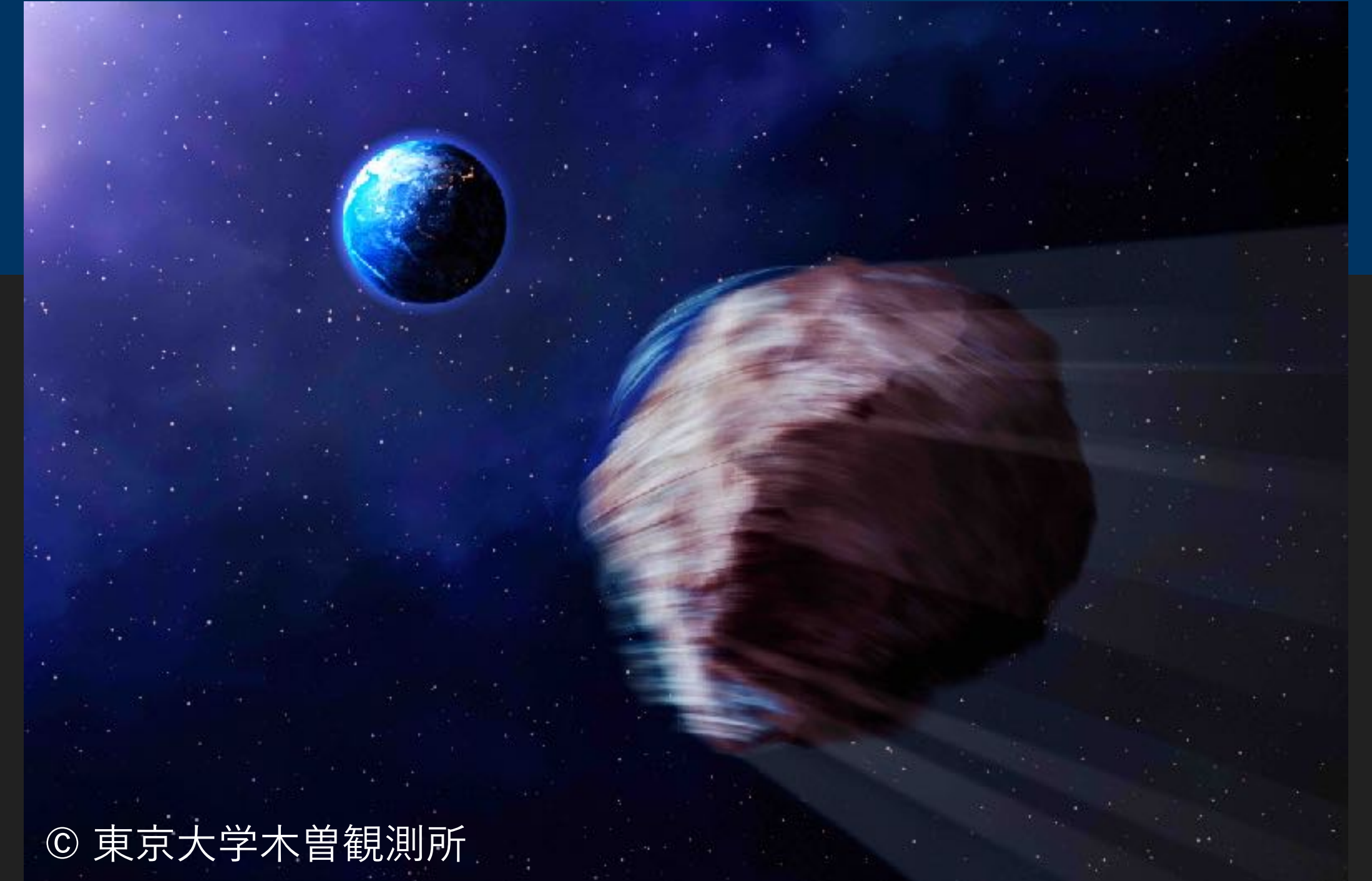
# 小惑星 (Asteroid)

aster (star)+ -oid (like) by William Herschel in 1802

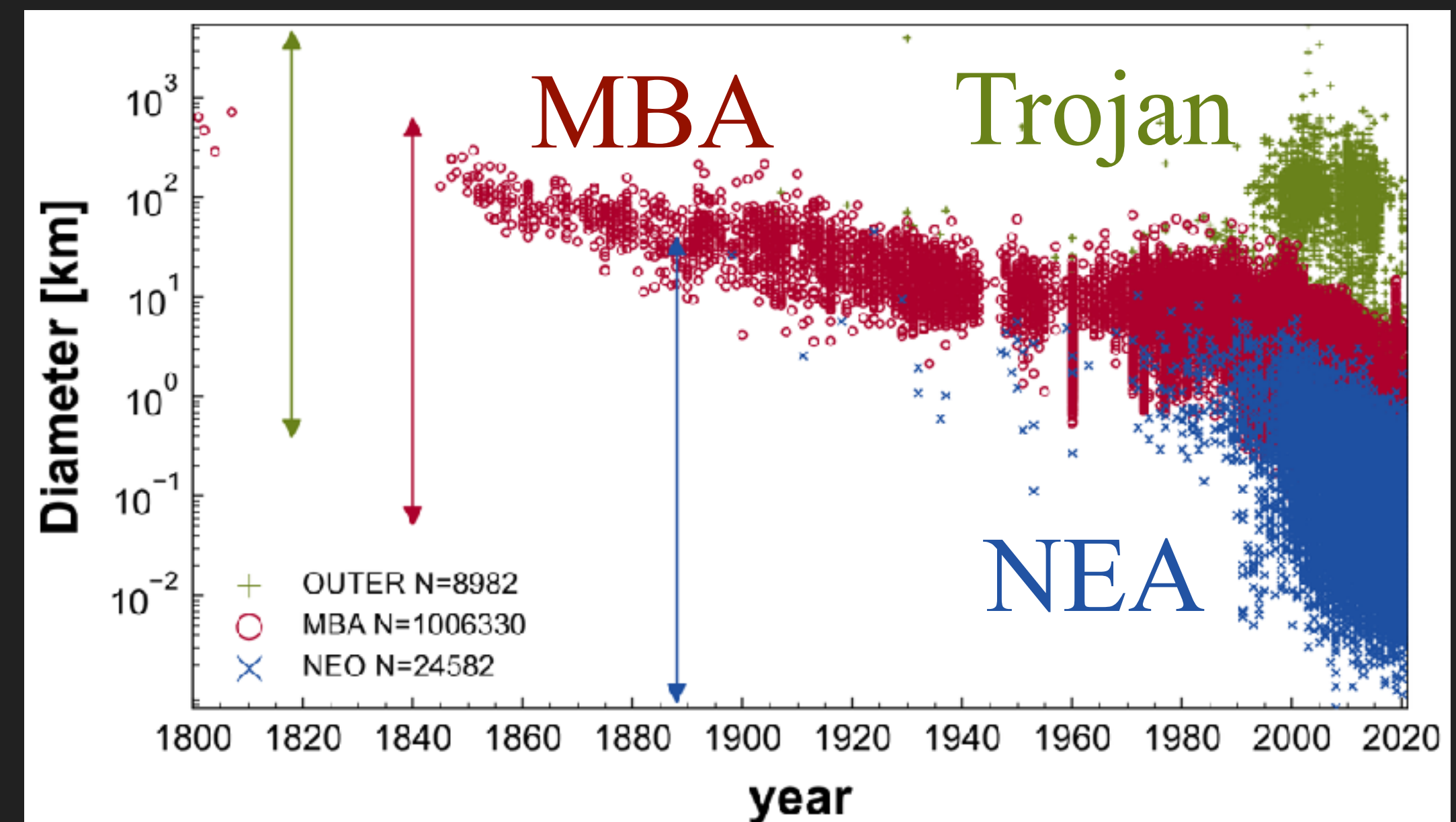
- ▶ Main belt asteroids: MBAs
- ▶ (Jupiter-)Trojans
- ▶ Near-Earth Asteroid: NEAs

## NEA観測の意義

1. 小惑星衝突の被害軽減
2. その場探査 (in-situ observations)  
(ex. Hayabusa, OSIRIS-REx)
3. 太陽系微小天体を観測可能



© 東京大学木曾観測所



小惑星の発見年と直径の関係



# 微小小惑星の観測意義：YORP効果を知る

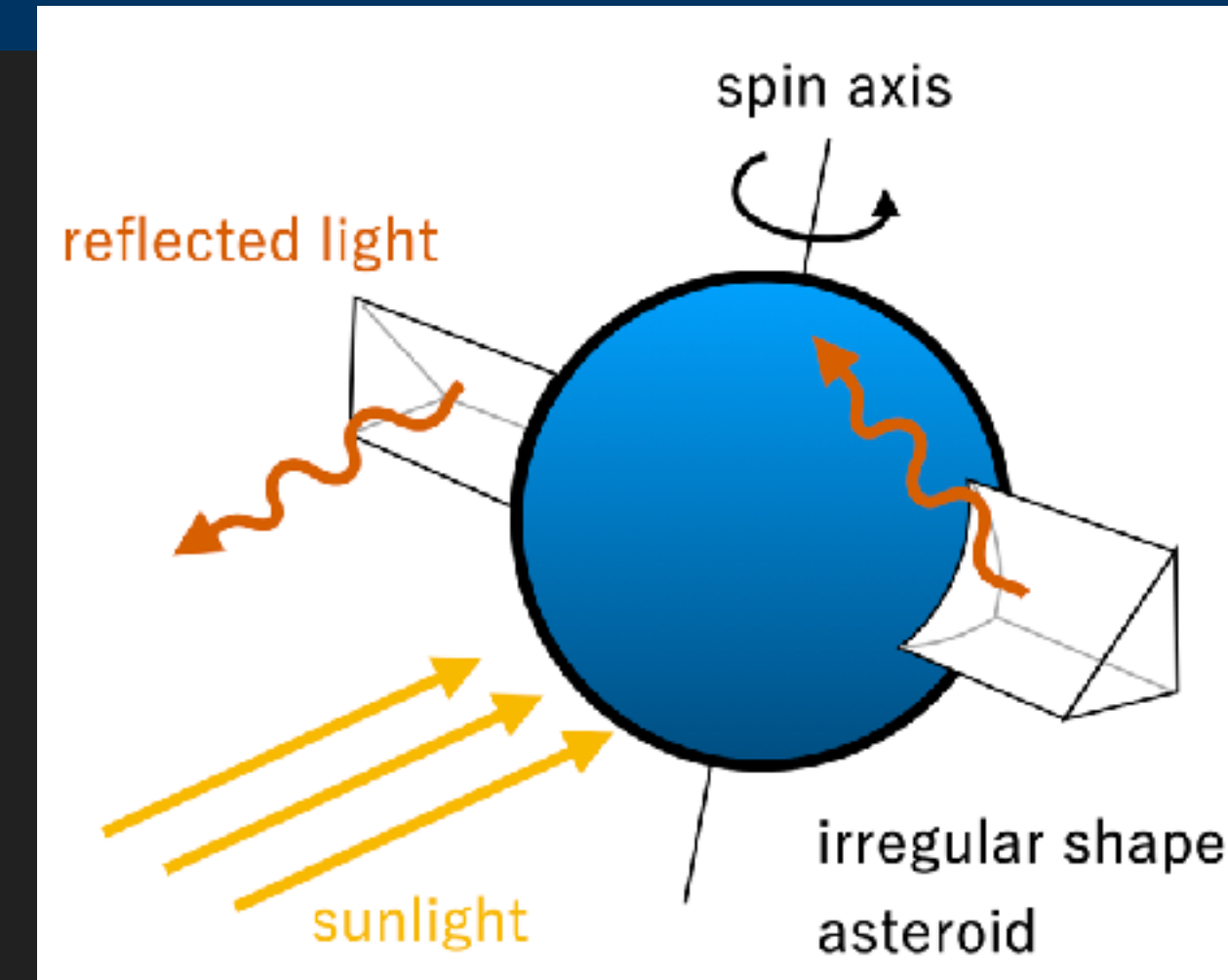
- Very Small Asteroids (VSAs):  $D < 150 \text{ m}$   
(Pravec+2002)

は **YORP効果** を知る良い観測対象

小惑星表面での熱放射、太陽光反射の非等方性に起因する自転状態の変化

自転加速され臨界自転周期に達した小惑星は質量放出/自転破壊

⇒ 小惑星のサイズ分布、バイナリの起源



YORP効果の概念図 (Bottke+2006)

YORP効果

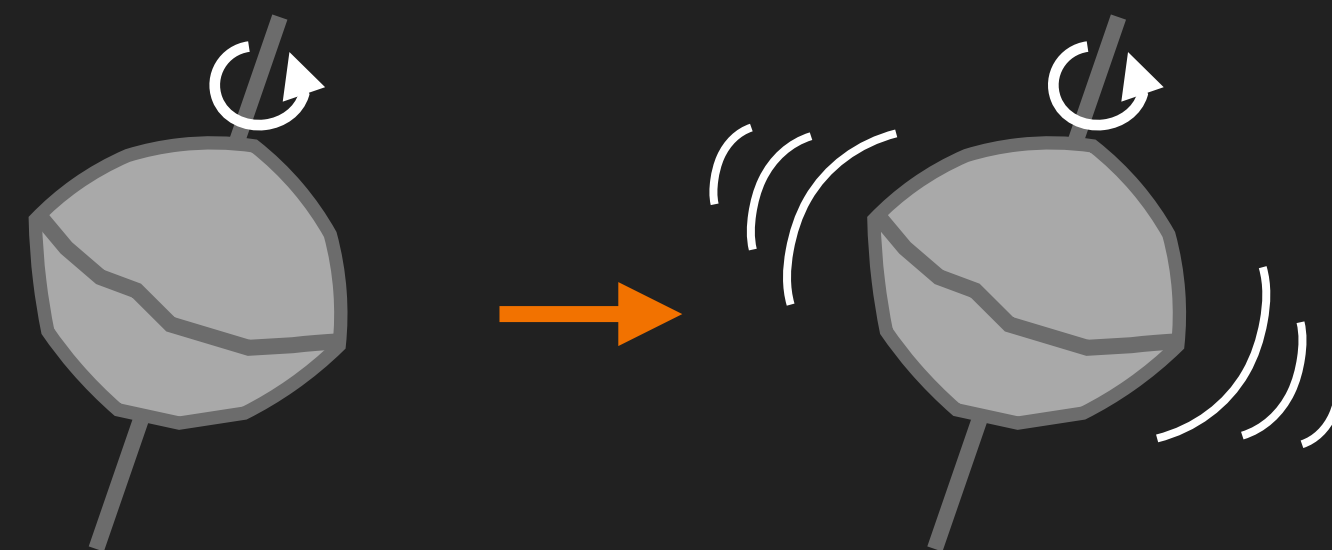
$$\frac{d\omega}{dt} \propto D^{-2}$$

$D$ : 直径

$\omega$ : 自転速度

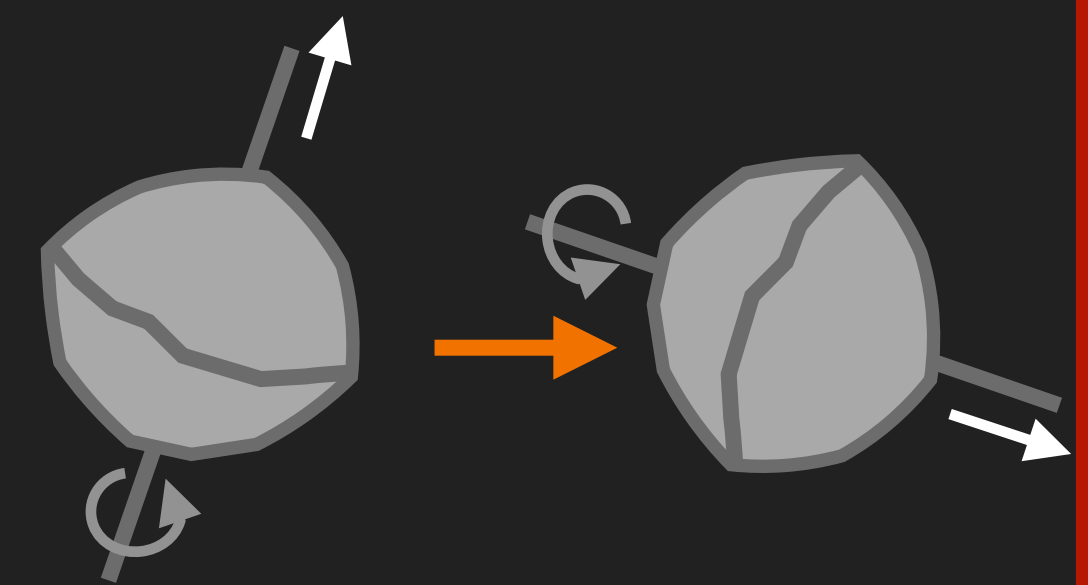
微小小惑星により強く作用する

## 1. 自転を加速/減速



$\omega$  (自転速度) or  $P$  (自転周期)

## 2. 自転軸を傾ける

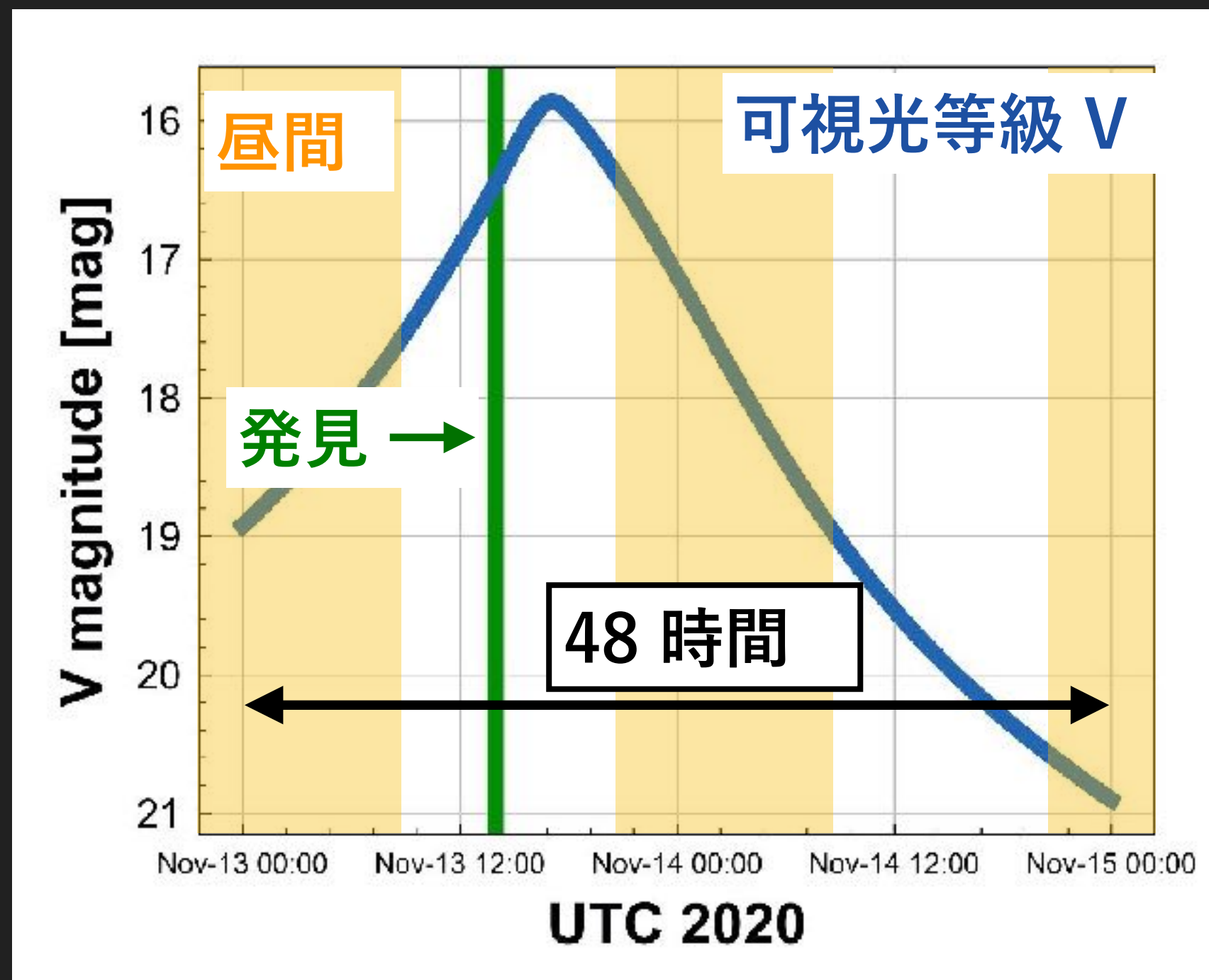


$(\lambda, \beta)$ : 自転軸の向き  
(北側, しばしば黄道座標)

# 微小惑星の観測的困難

## 限られた観測可能時間

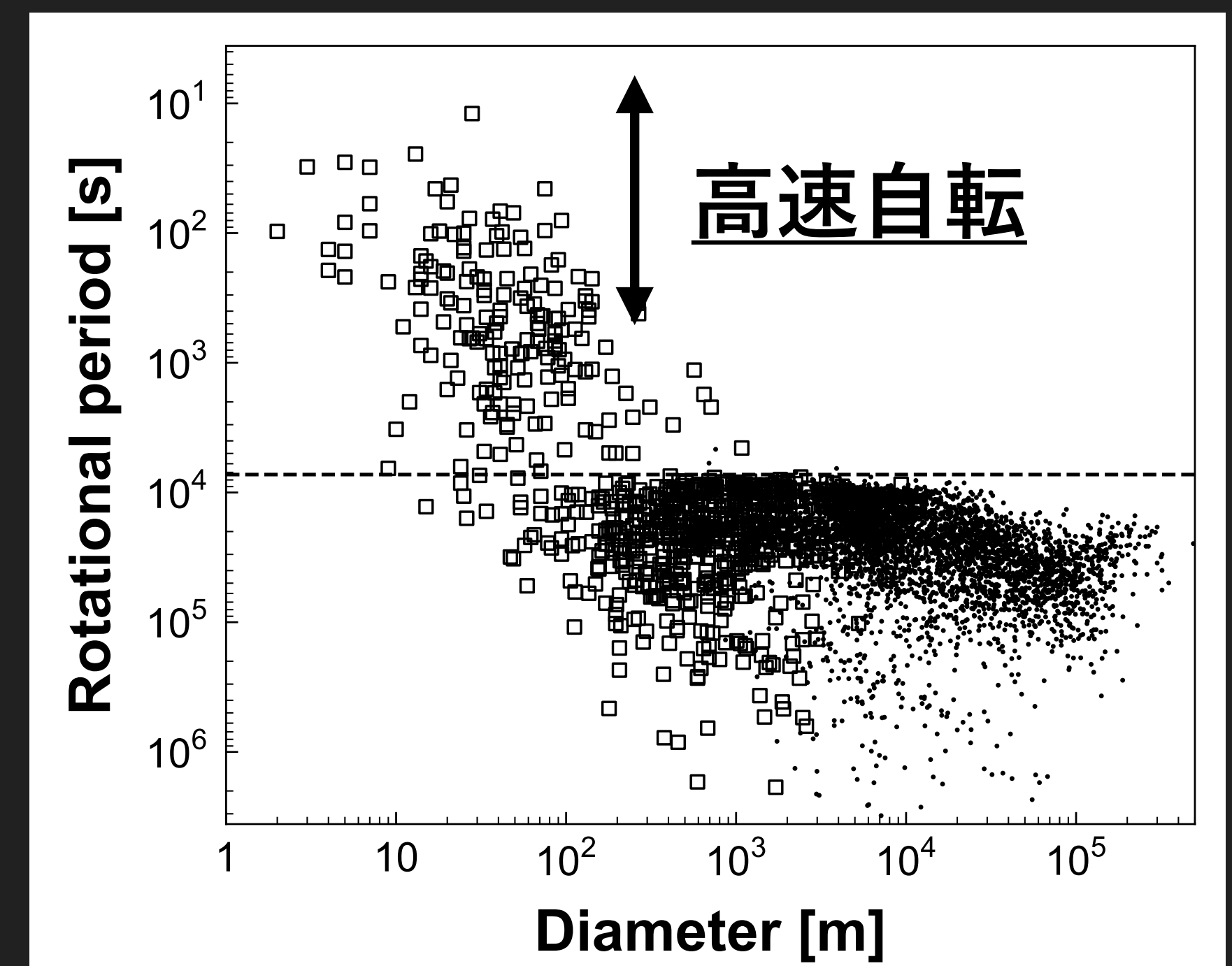
微小NEOは地球接近時に明るくなるが  
その期間は数時間から数日と短い



直径 5 m NEO 2020 VH<sub>5</sub> の天体暦

## 高速自転

周期10秒程度の高速自転の周期推定には  
短時間サンプリング観測が必要



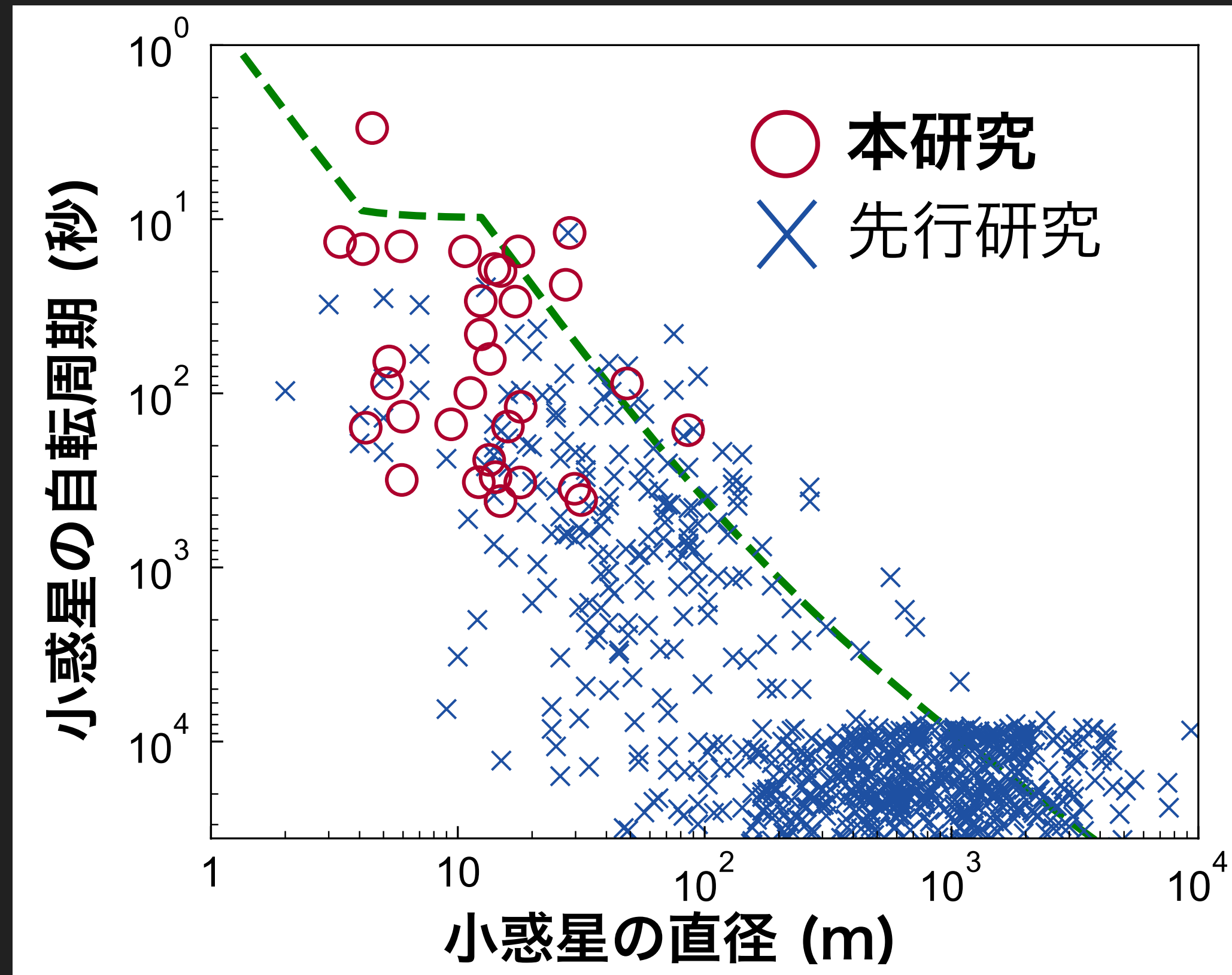
小天体の直径-自転周期関係

# YORP効果の手がかり ① 微小天体の自転周期

- 高速カメラ木曾Tomo-e Gozenを用いて極めて地球に接近する小惑星を即時動画観測  
60天体のVSAを観測し、32天体の自転周期を推定 (Beniyama+2022)

明るいうちに

高速自転検出可



- VSAの自転周期分布は従来のYORP効果では説明できない  
接線方向の熱伝導を考慮に入れた Tangential YORP 効果 (Golubov+2012) で説明できる



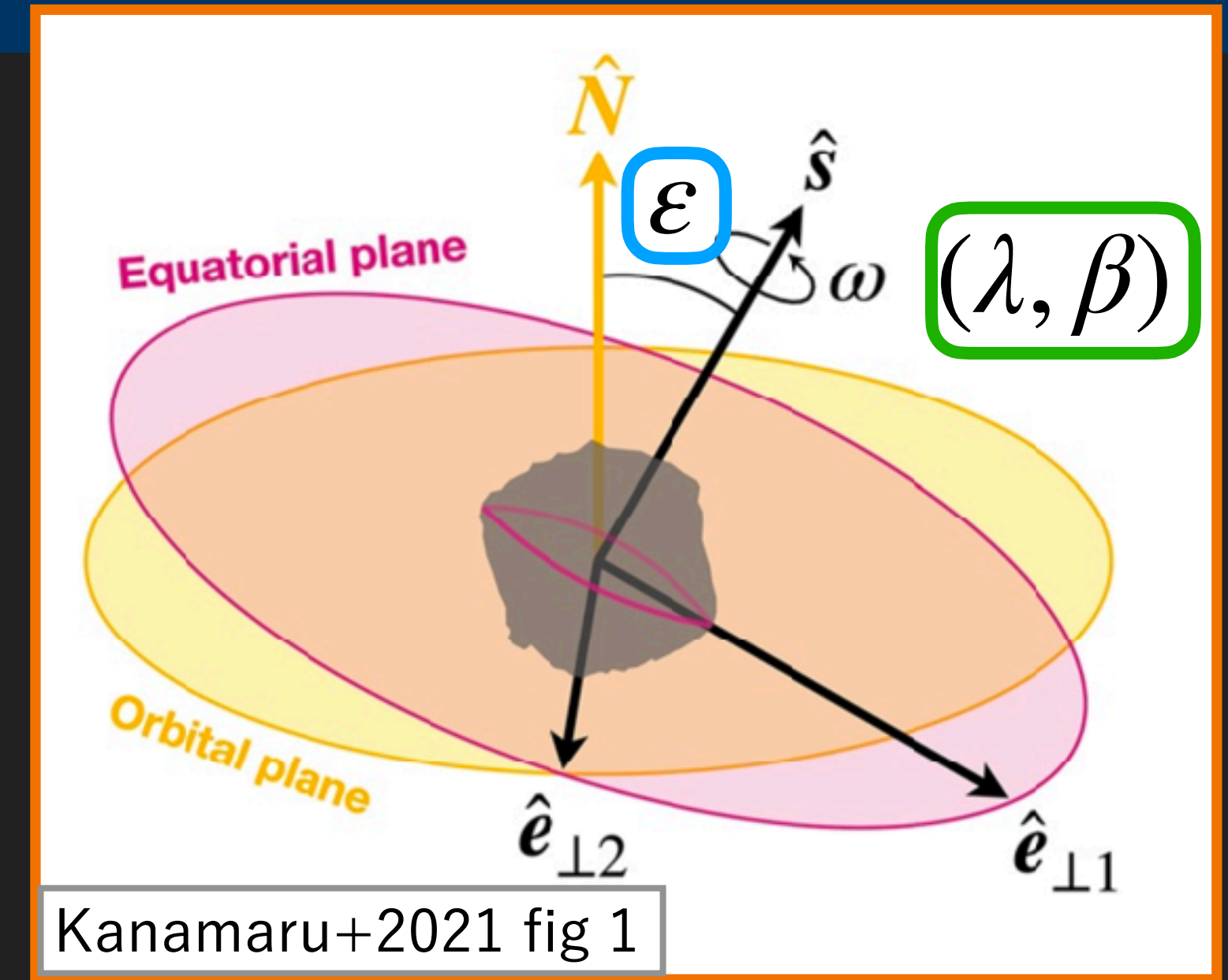
# YORP効果の手がかり ② 微小天体の自転軸

- これまで自転軸の向きが求まった VSA は2天体のみ\*
  - ▶ (54509) YORP (Lowry+2007, Taylor+2007)
  - ▶ 2021 DW1 (Kwiatkowski+2021)

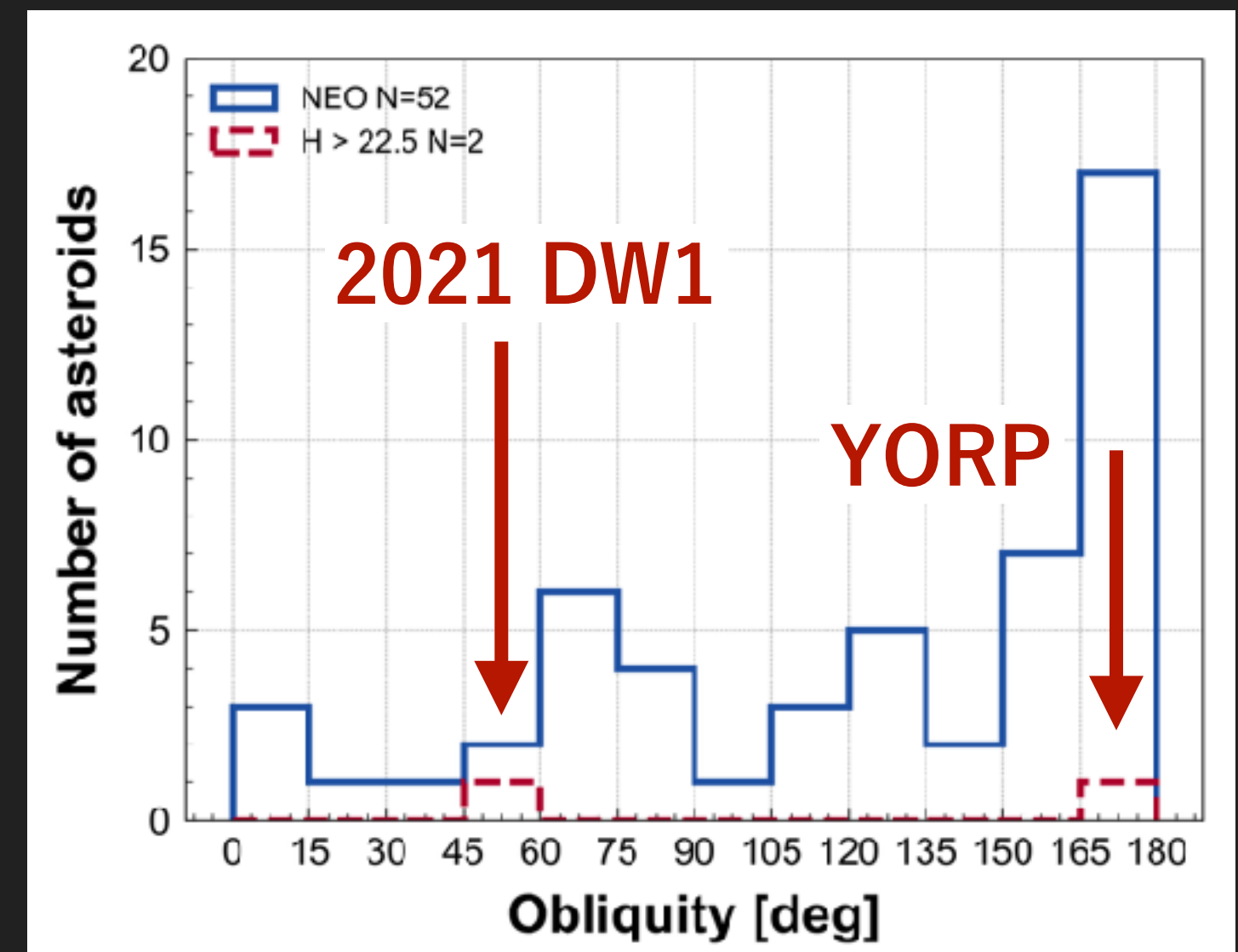
	軸方向 $(\lambda, \beta)$	傾斜角 $\epsilon$	#観測所 (国)
(54509) YORP	$(180^\circ, -85^\circ)$	$173^\circ$	9 (4)
2021 DW1	$(57^\circ, 29^\circ)$	$54^\circ$	10 (7)
	$(67^\circ, -40^\circ)$	$123^\circ$	

**明るい VSA が現れた！**

- 自転軸の軌道面からの傾き  $\epsilon$  (obliquity) は YORP効果によって 0, 90, 180 度に近づく (Capek & Vokrouhlicky 2004)
  - ▶ 2021 DW1は“中途半端”。2021 DW1が例外なのか判断するにはより多くの観測が必要 (Kwiatkowski+2021)



Kanamaru+2021 fig 1



Warner+2009, Lightcurve DataBase

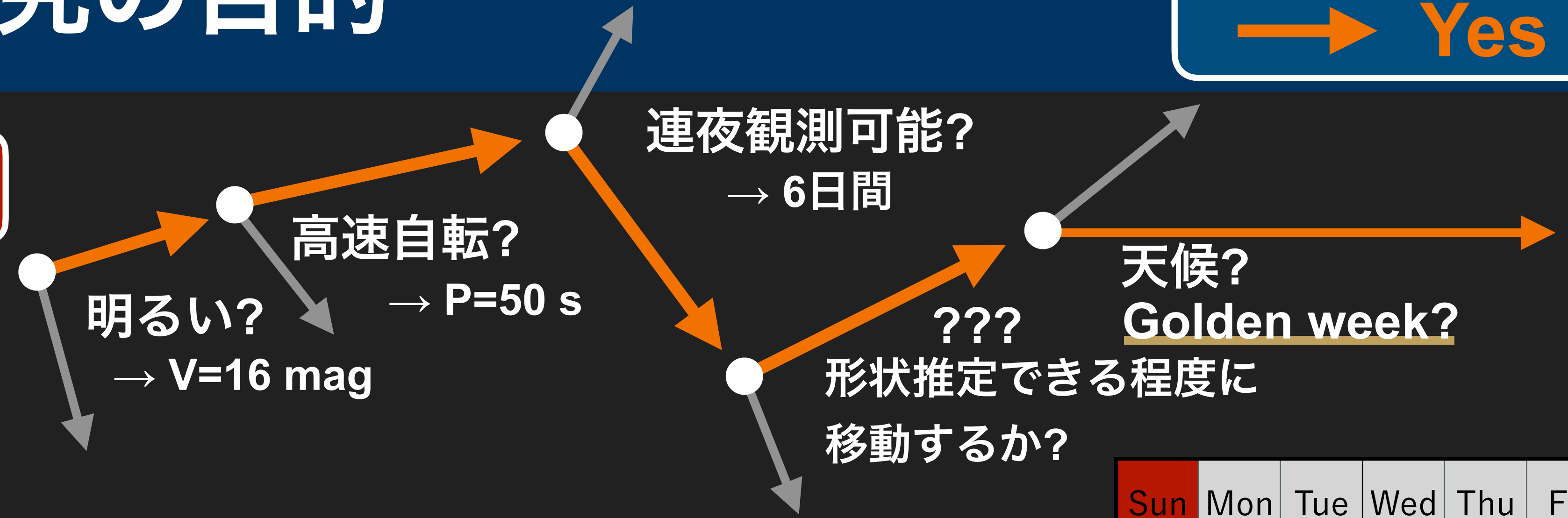
Lowry et al., 2007, Science, 316, 272, Taylor et al., 2007, Science, 316, 274,  
 Kwiatkowski et al., 2021, A&A, 656, A126, Kanamaru et al., 2021, JGR, 126, e06863  
 Capek & Vokrouhlicky 2004, Icarus, 172, 526, Warner et al., 2009, Icarus, 202, 134  
 \* Except for two non-principle axis rotators: (367943) 2012 DA14 (aka. Duende) and 2008 TC3

# 困難性と本研究の目的



## 明るい VSA 2022 JL

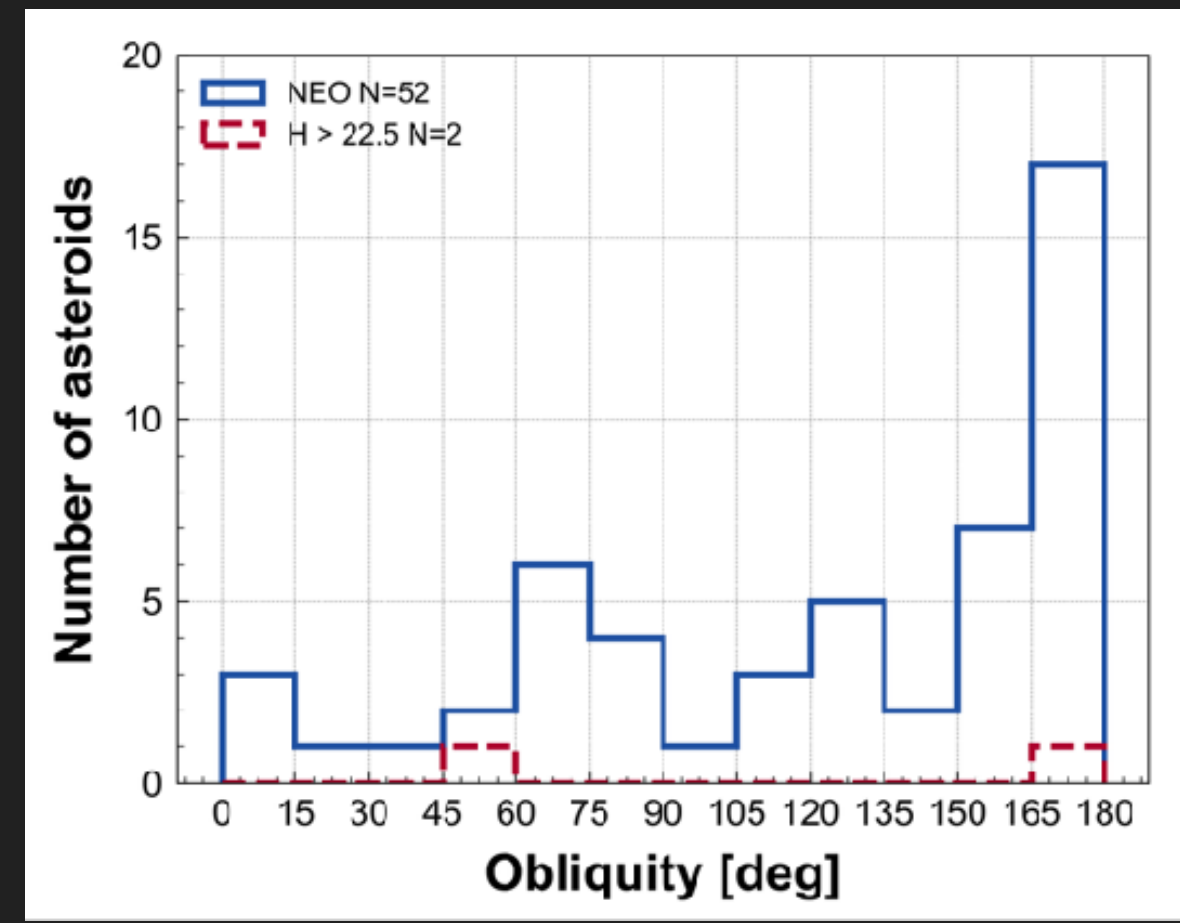
2022/5/3に  
米Catalina Sky Survey  
で発見



Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
5/1	2	3	4	5	6	7
<i>Observable</i> ←						
8	9	10	11	12	13	14
→						

## 本研究の目的

- ・ VSA 2022 JLの自転軸の向きの決定
- ・ VSAの自転軸推定のノウハウ習得  
(ライトカーブインバージョン, VSA形状推定の条件)



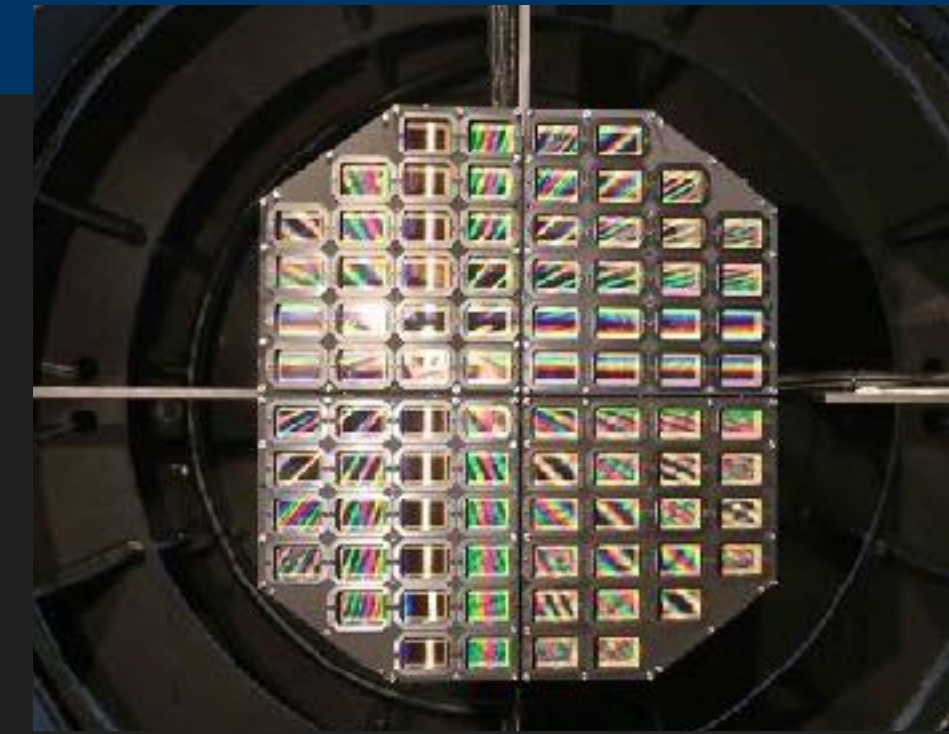


# 観測: 木曾 Tomo-e Gozen / 岡山 TriCCS

- Kiso 1.05 m Schmidt/Tomo-e Gozen (Sako+2018)

- ▶ 広視野高速カメラ (前面読み出し最大フレームレート 2 fps)
- ▶  $S/N=5$  lim.mag ~ 17 mag (V-band, 0.5 sec)
- ▶ センサー一枚の視野  $39.7' \times 22.4'$

Tomo-e Gozen



- Seimei 3.8 m /TriCCS

- ▶ TriColor CMOS Camera and Spectrograph @ Seimei 3.8 m telescope (Kurita+2020)
- ▶  $g, r, i$  (Pan-STARRS) 3色同時  
 $S/N = 10$ , lim.mag ~ 18 mag ( $g, r$  band, 1 sec)
- ▶ センサー一枚の視野  $12.6' \times 7.5'$



Seimei telescope

@ Okayama Observatory, Kyoto University



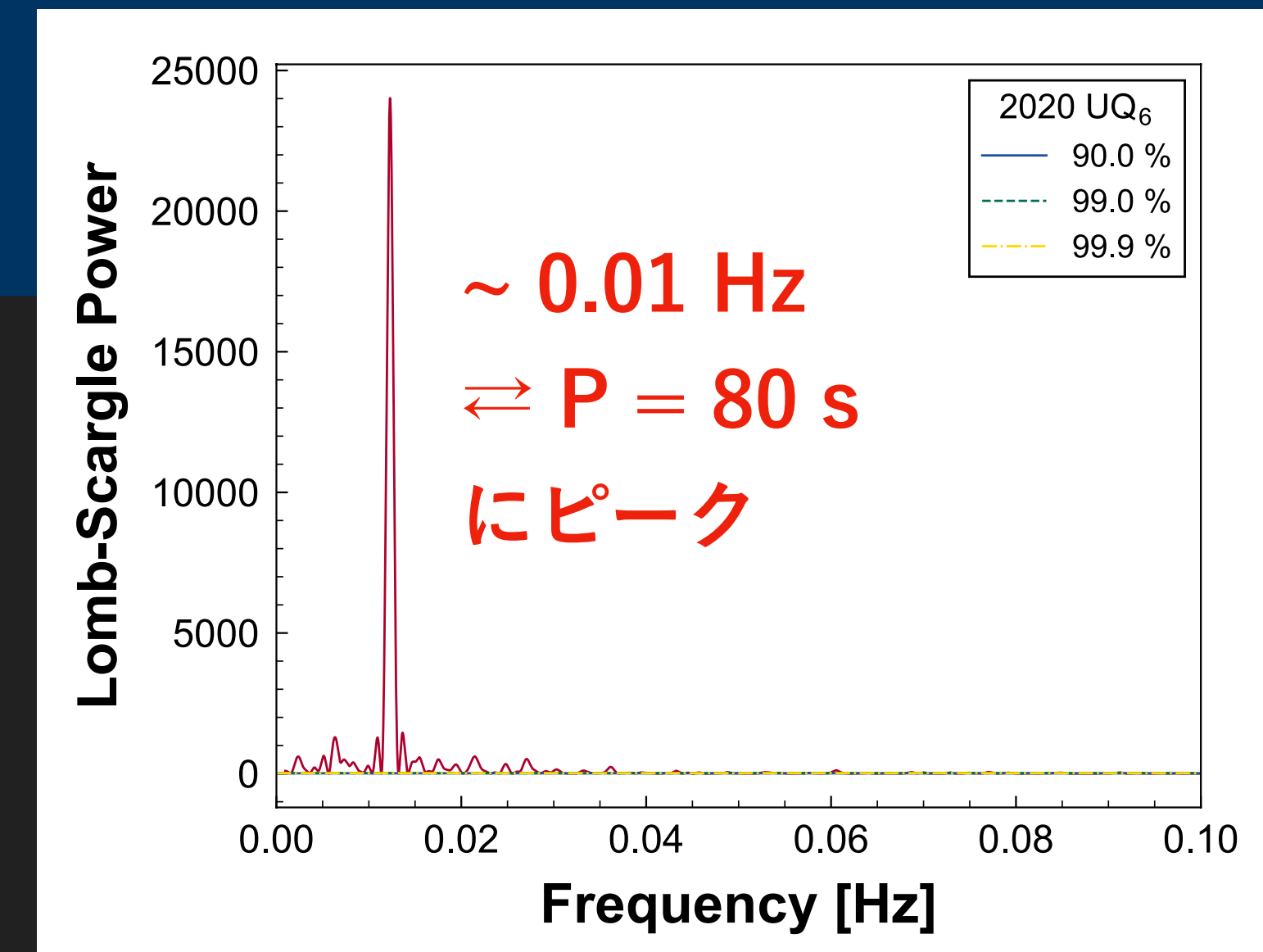
TriCCS



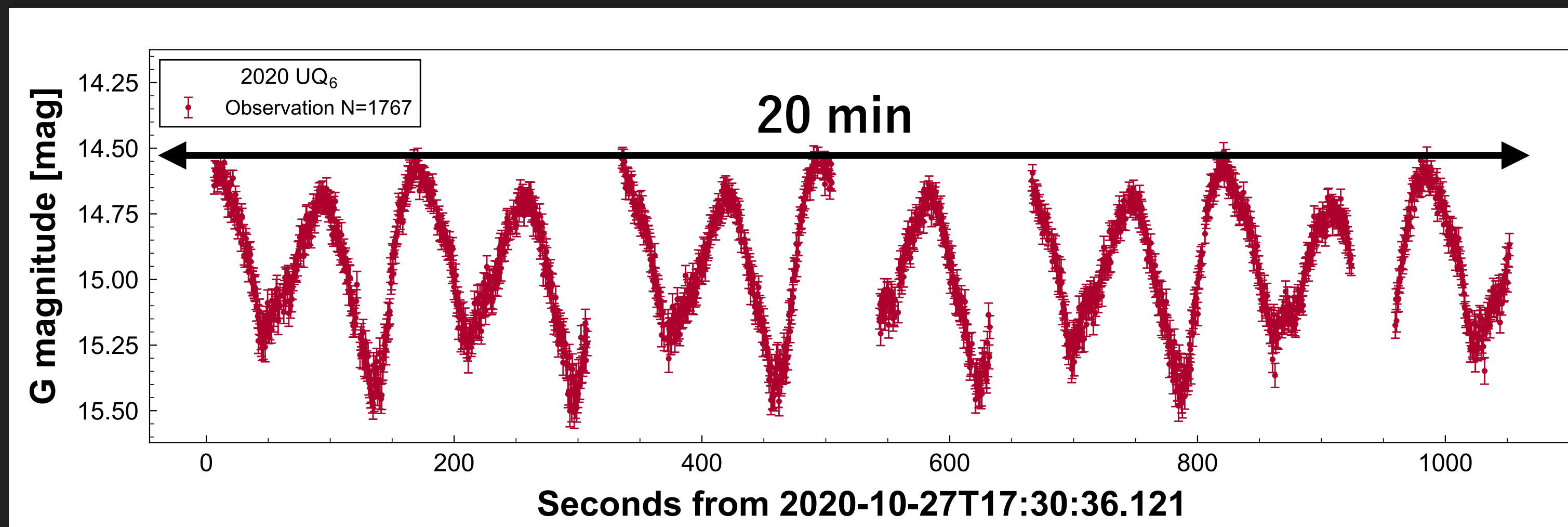
# 解析：自転周期の推定

- 開口測光を行い明るさの時系列情報を取得 (Bertin+1996, Barbary+2015)
- 周期解析 (Lomb-Scargle法, Lomb1976, Scargle1982) により自転周期 (と等級振幅) を推定

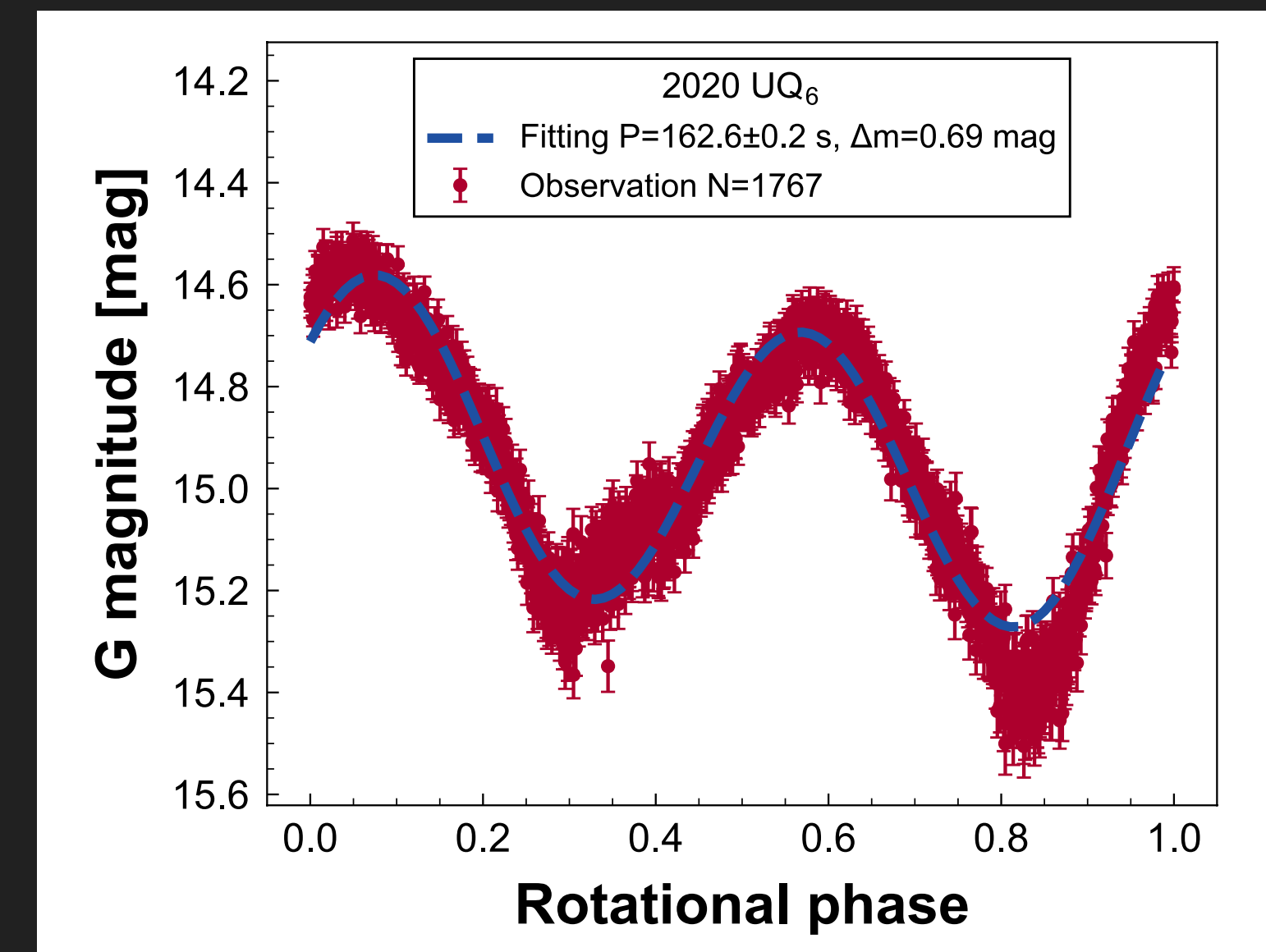
解析例 2020 UQ<sub>6</sub> (D = 86 m, 位相角  $\alpha = 16.0^\circ$ )



ピリオドグラム



光度曲線 (約20分間)

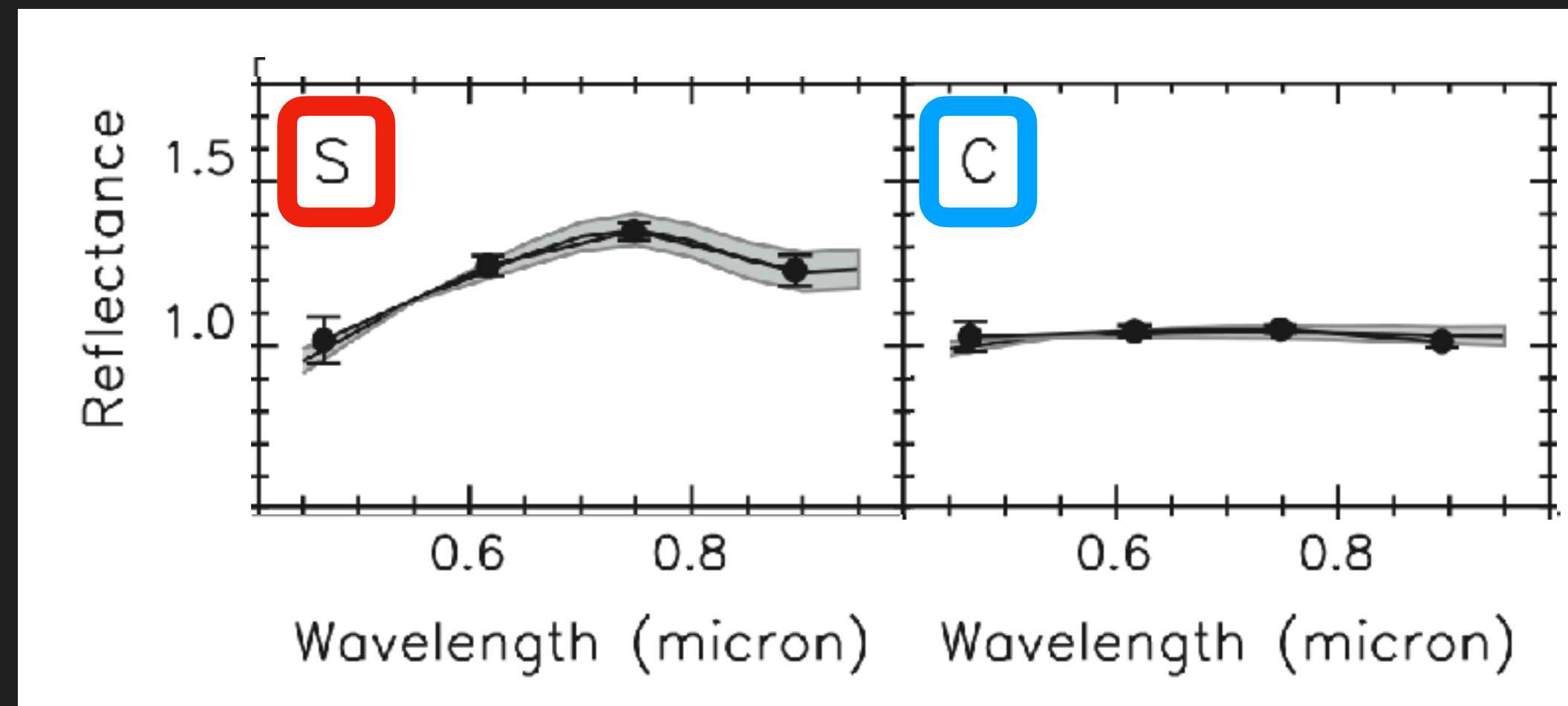


折り返し光度曲線

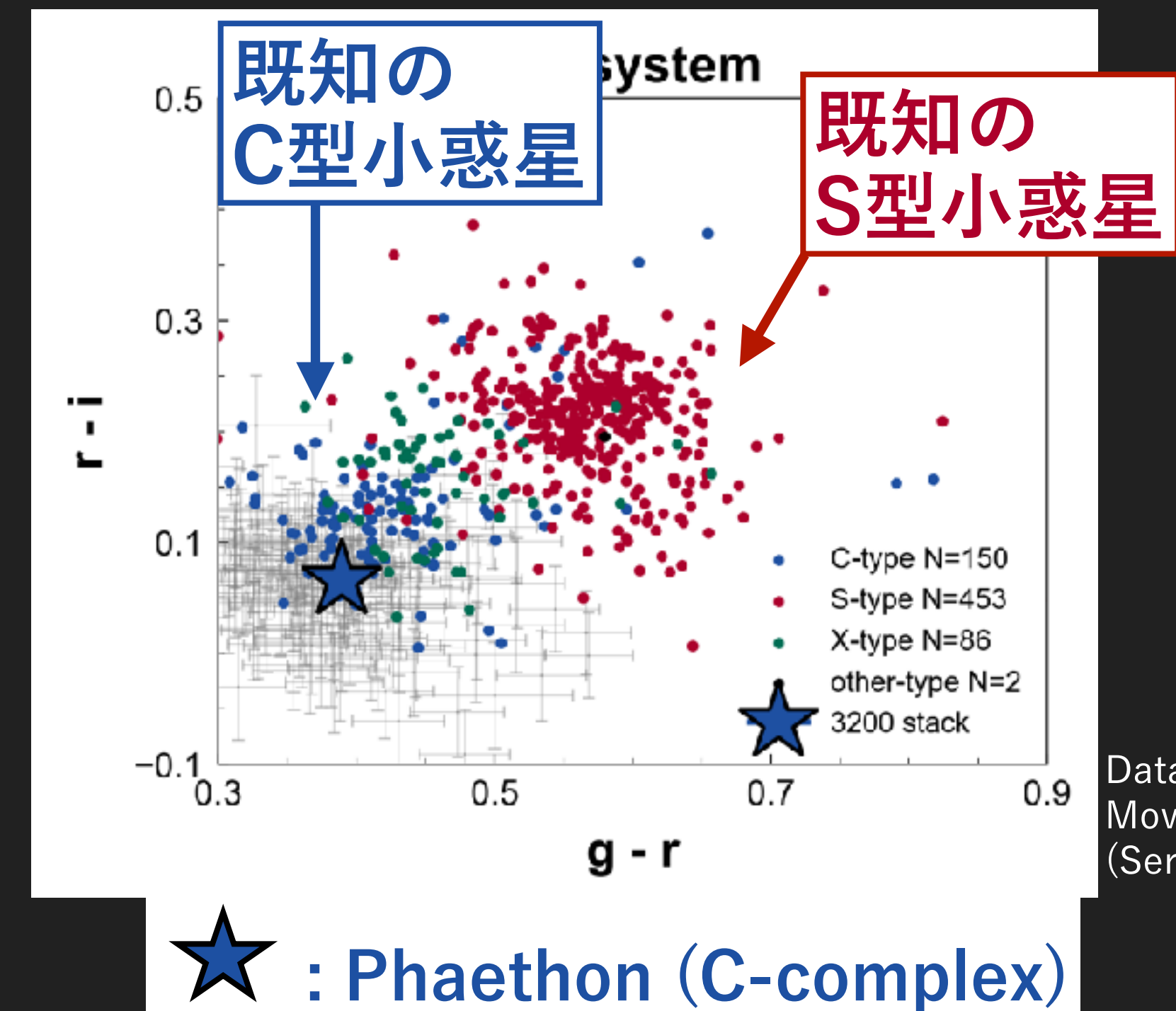
$P = 162.6 \text{ s}, \Delta m = 0.69$

# 解析：表面カラー

- 小惑星と隕石の表面スペクトル(カラー)の対応づけ -> 組成
  - ▶ **S型** : Silicate rich, **赤い** スペクトル
  - ▶ **C型** : Carbonaceous, **フラットな** スペクトル



小惑星の可視スペクトル例 (DeMeo+2013, figure B.1)



Data from SDSS Moving Object Catalog (Sergeyev+2021)



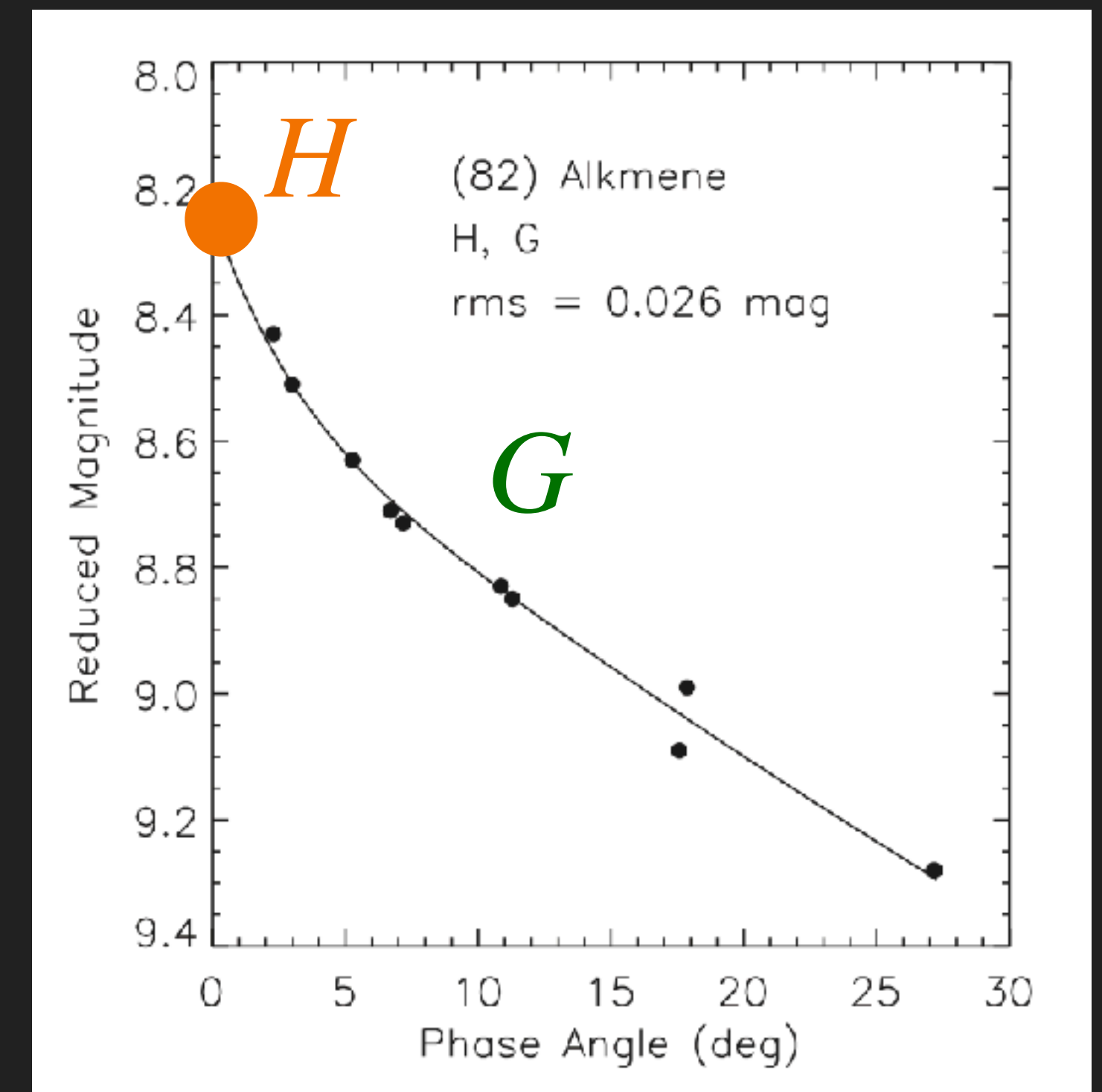
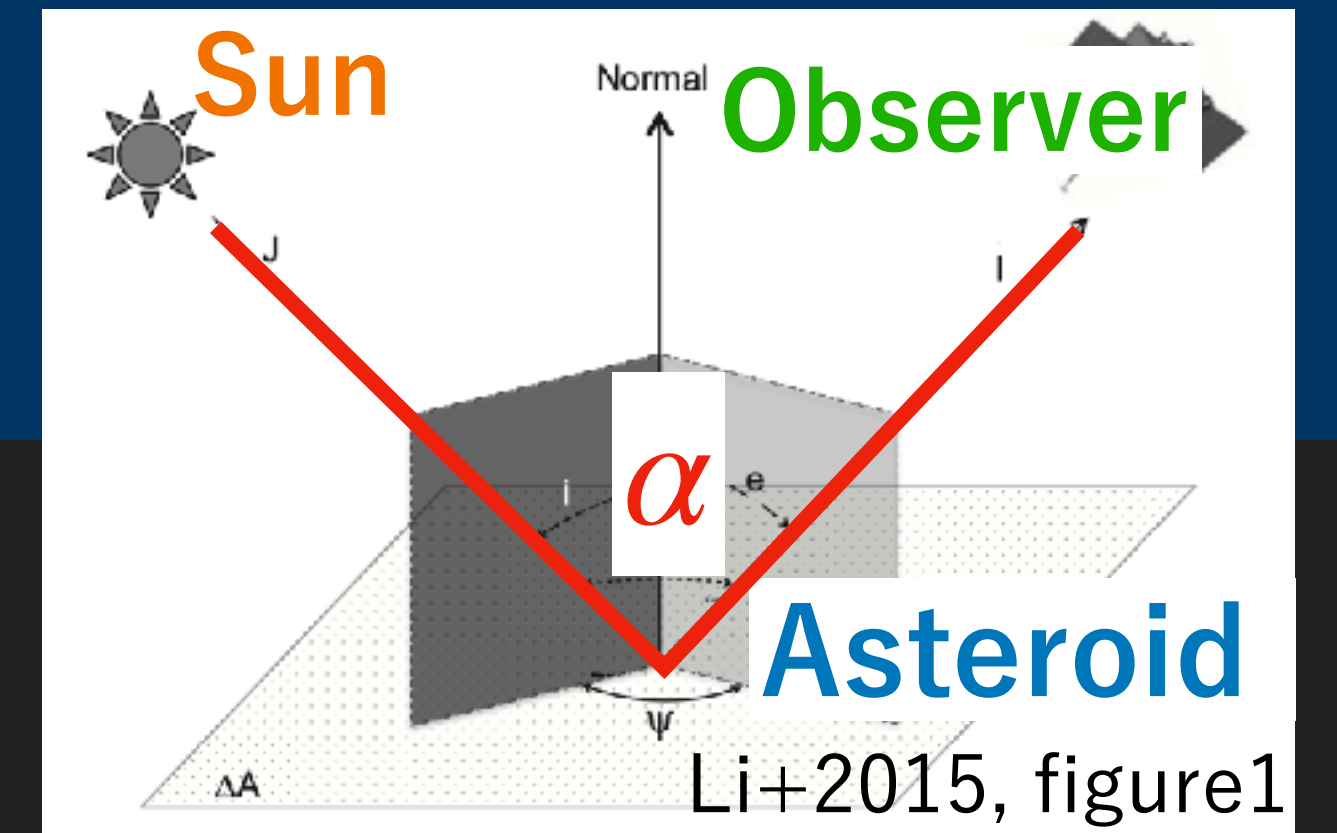
# 解析：位相曲線

- 太陽位相角と等級の関係（位相曲線）は小惑星の表面特性を反映 (Bowell+1989, Muinonen+2010)
- 位相曲線は絶対等級  $H$ 、スロープパラメタ  $G$  を用いた以下の式で表される

$$V(\alpha) = H - 2.5 \log_{10}((1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha))$$

↑
↑
↑

絶対等級
スロープパラメタ



位相曲線の例 (Muinonen+2010, Fig. 3)

# 解析：形状推定

- ライトカーブインバージョンによる小惑星の形状推定を行う (Kaasalainen+2001ab).

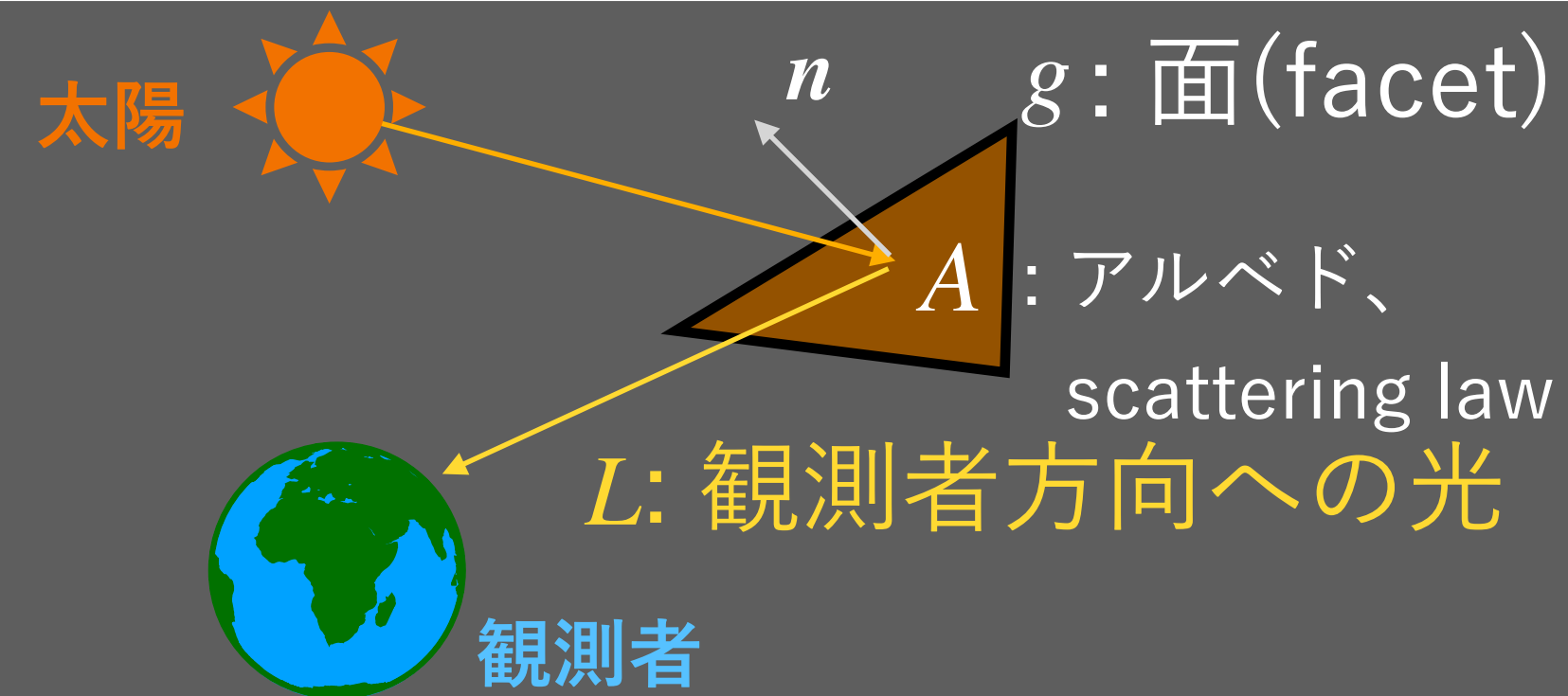
逆問題

$$L = Ag$$

$L$ : 明るさ (観測量)

$A$ : 散乱特性

$g$ : 小惑星を多面体で近似した面

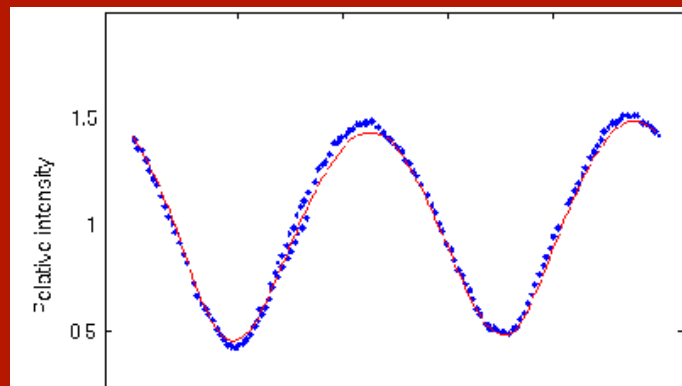


- DAMIT には1000天体以上の小天体の形状モデル (Durech+2010).  
Database of Asteroid Models from Inversion Techniques

ほとんどの形状モデルは大きくて明るいメインベルト小惑星  
観測の困難性に起因して直径 150 m 以下の自転軸推定は 2 例のみ\*。

in DAMIT

$g$ : 面(facets)



$L$ : lightcurves

minimize

$$\chi^2 = |L - Ag|^2$$

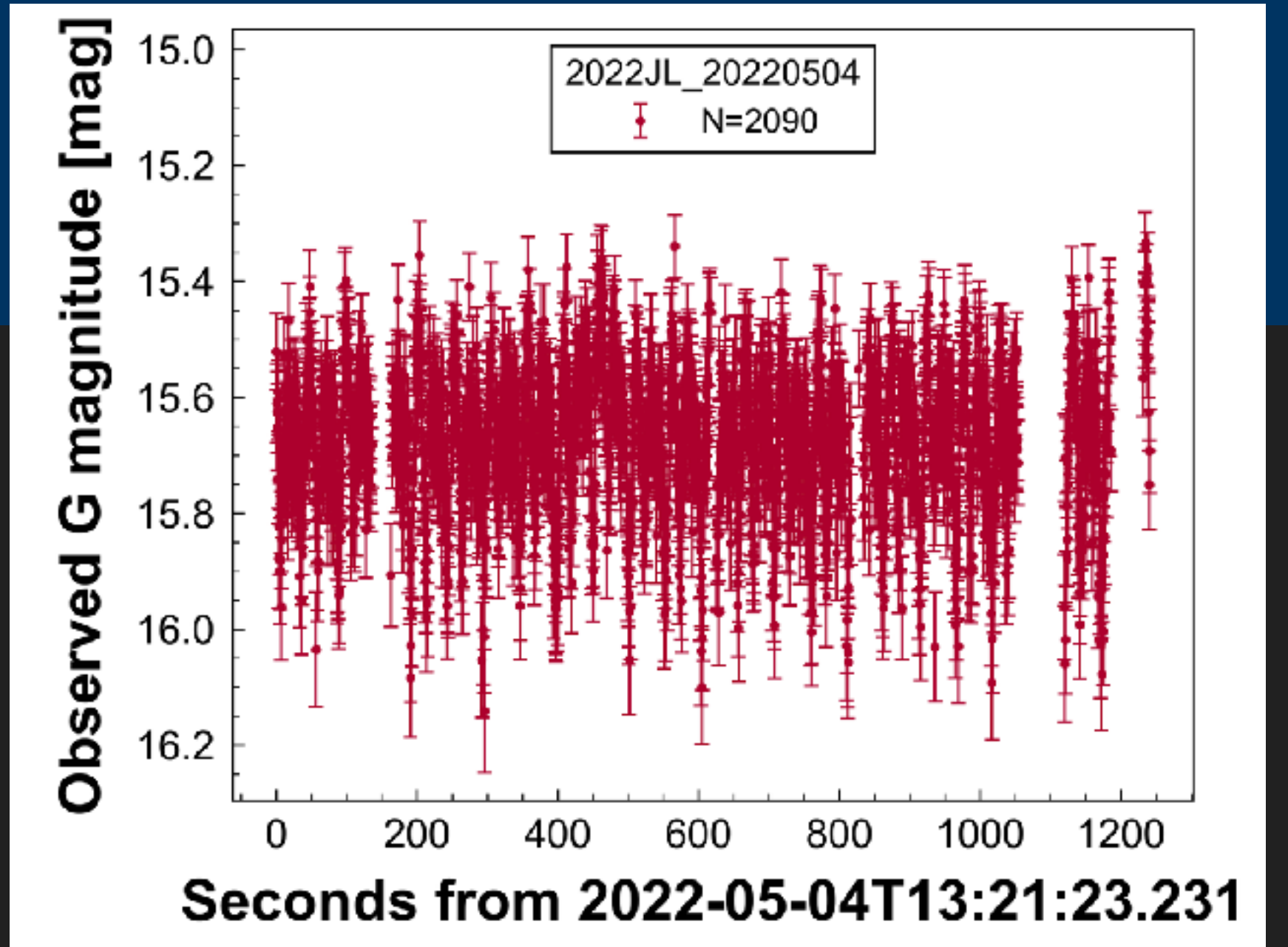
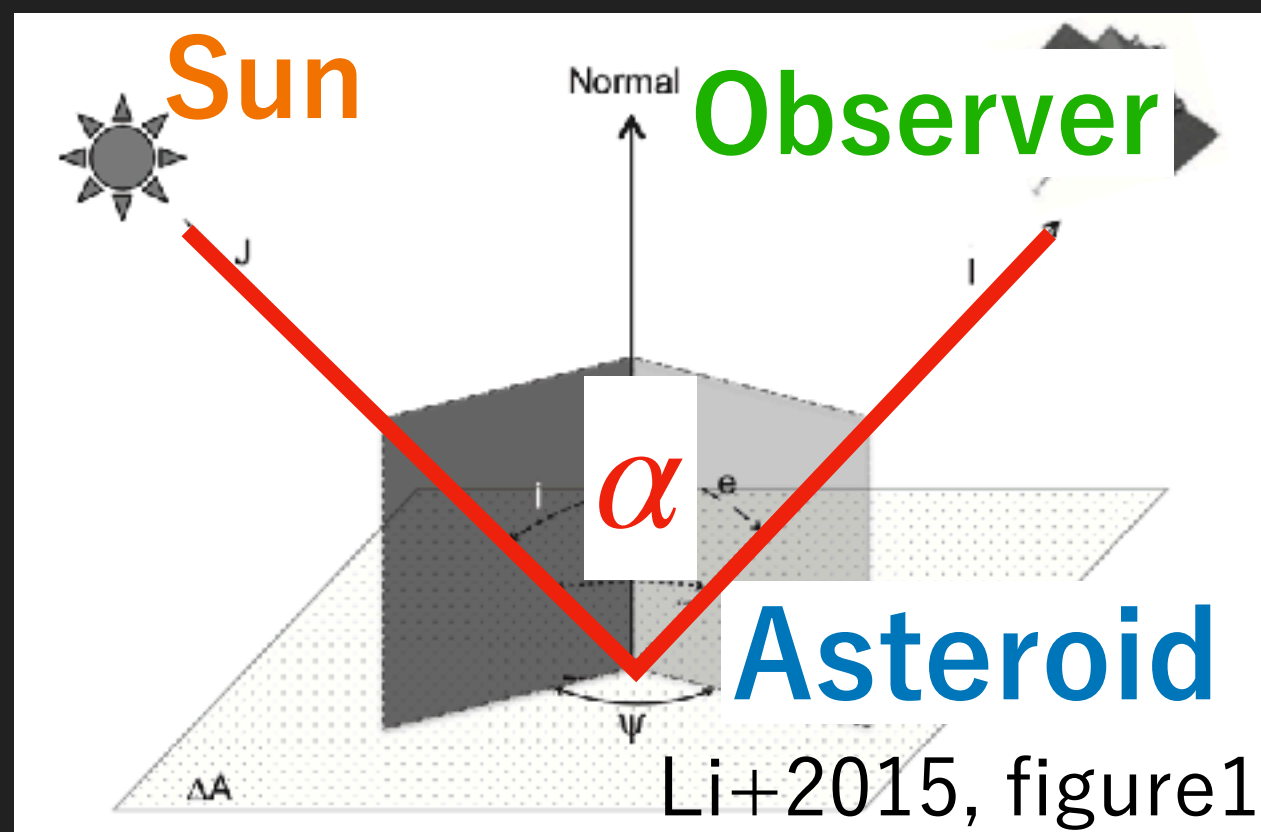


# 結果1. 光度曲線

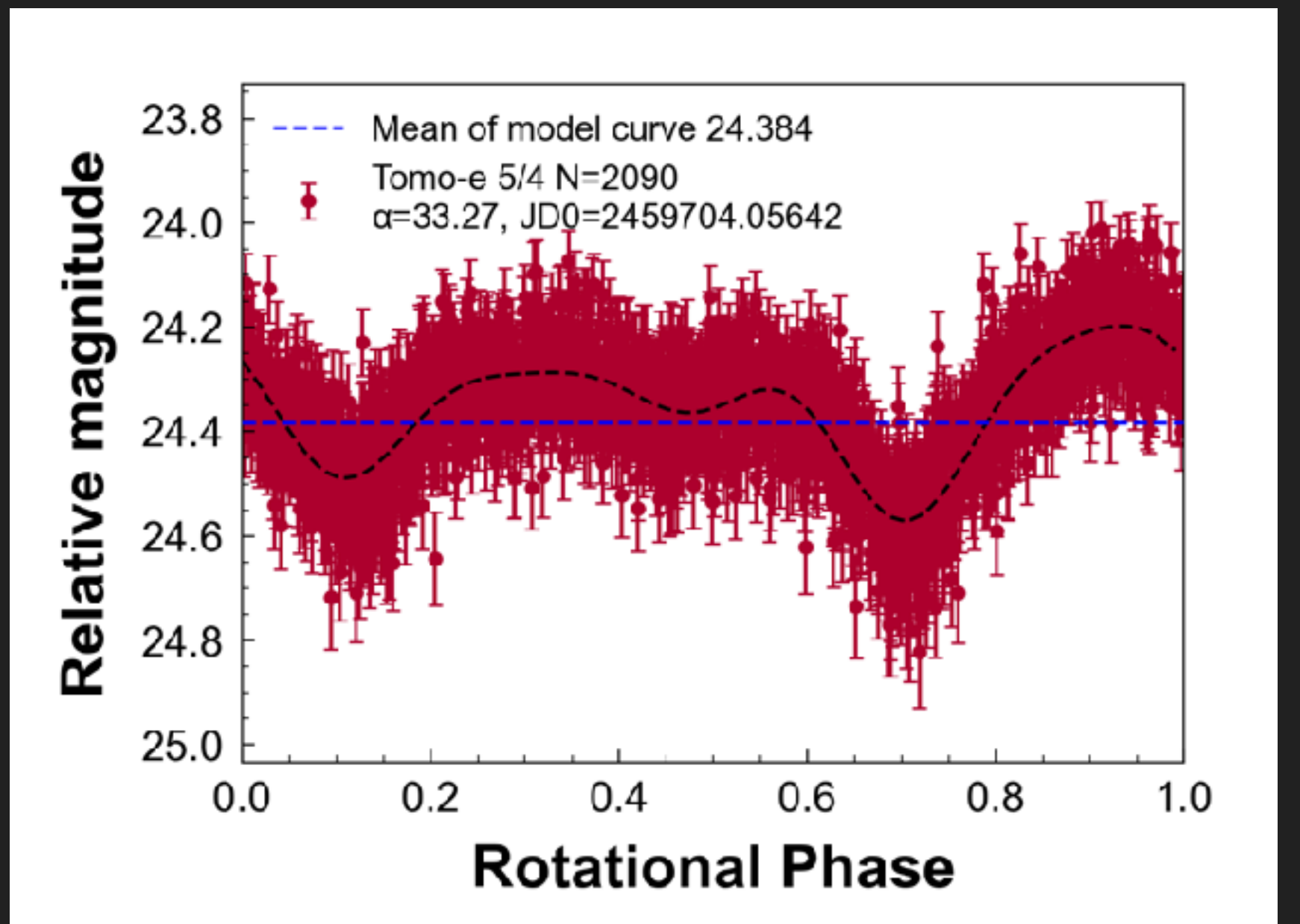
- 即時モニタリング観測により7つの光度曲線の取得に成功

- ▶ 木曾 Tomo-e Gozen (フィルタなし) 6日間 (2022/05/03-08)
- ▶ 岡山 TriCCS (g, r, i 3色同時) 1日間 (2022/05/06)

- 初日が最も高位相角  $\alpha \sim 51^\circ$   
 日が経つにつれて低位相角に  $\alpha \sim 8.5^\circ$



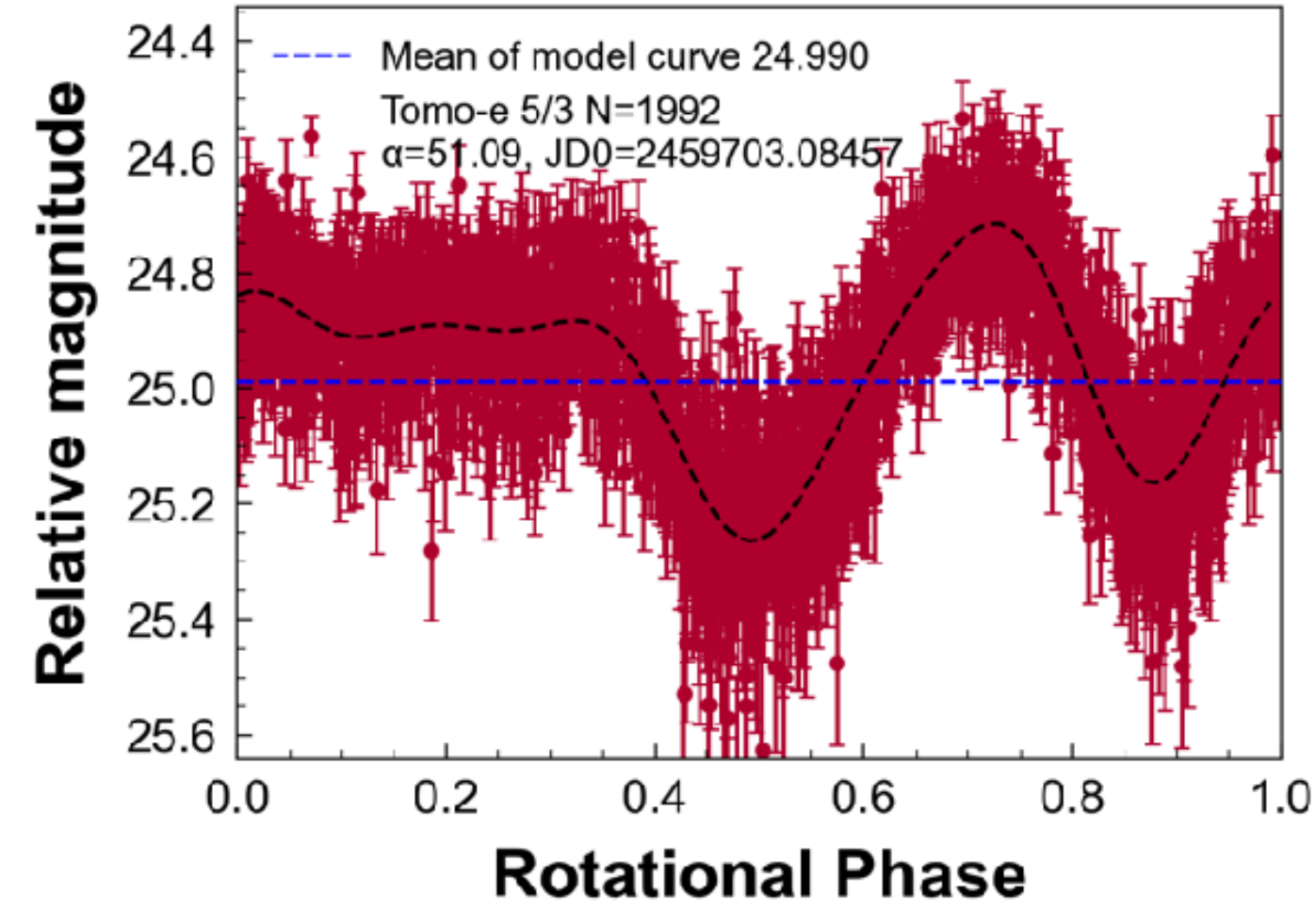
↓ 自転周期で折り返し



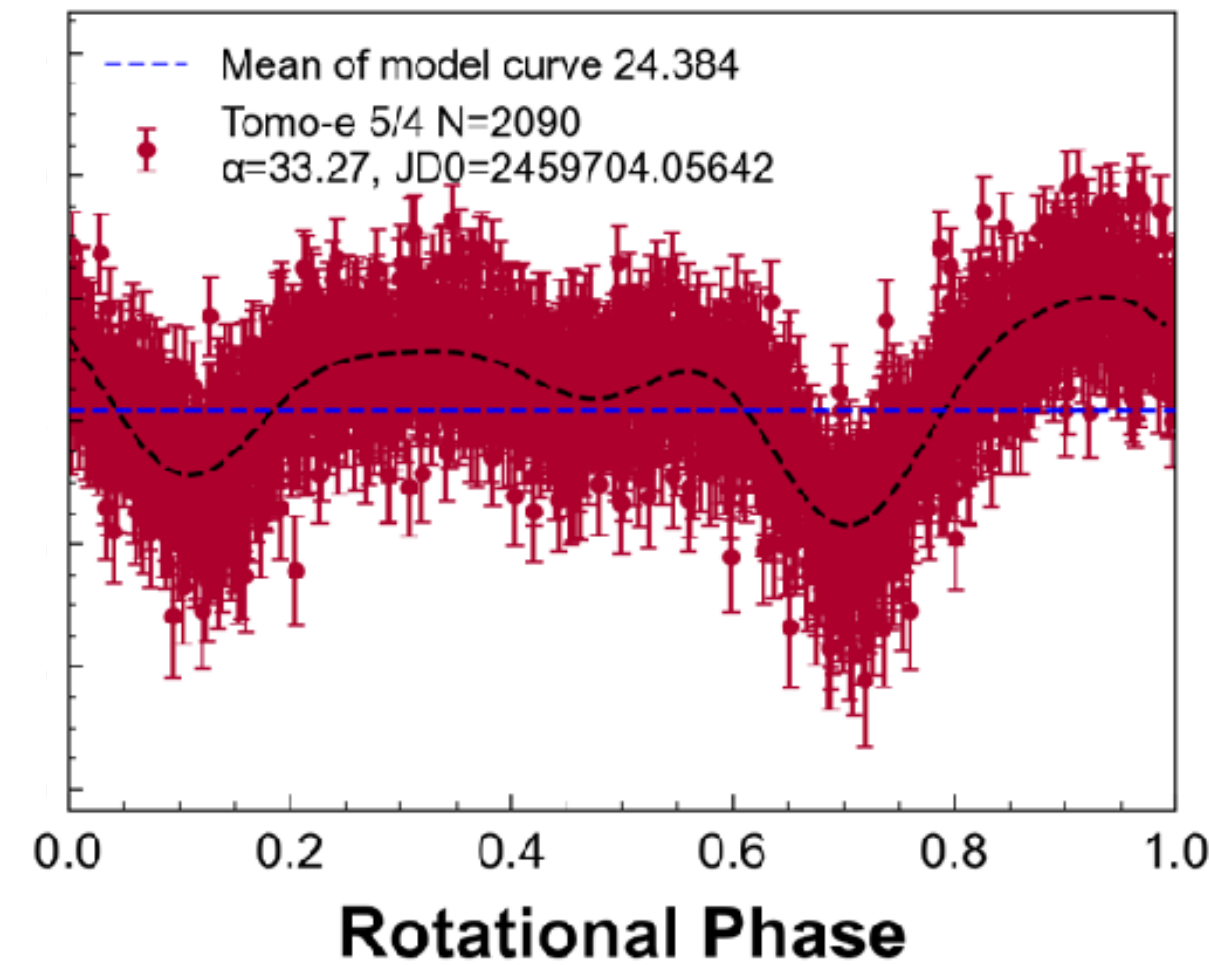


# 結果1. 光度曲線

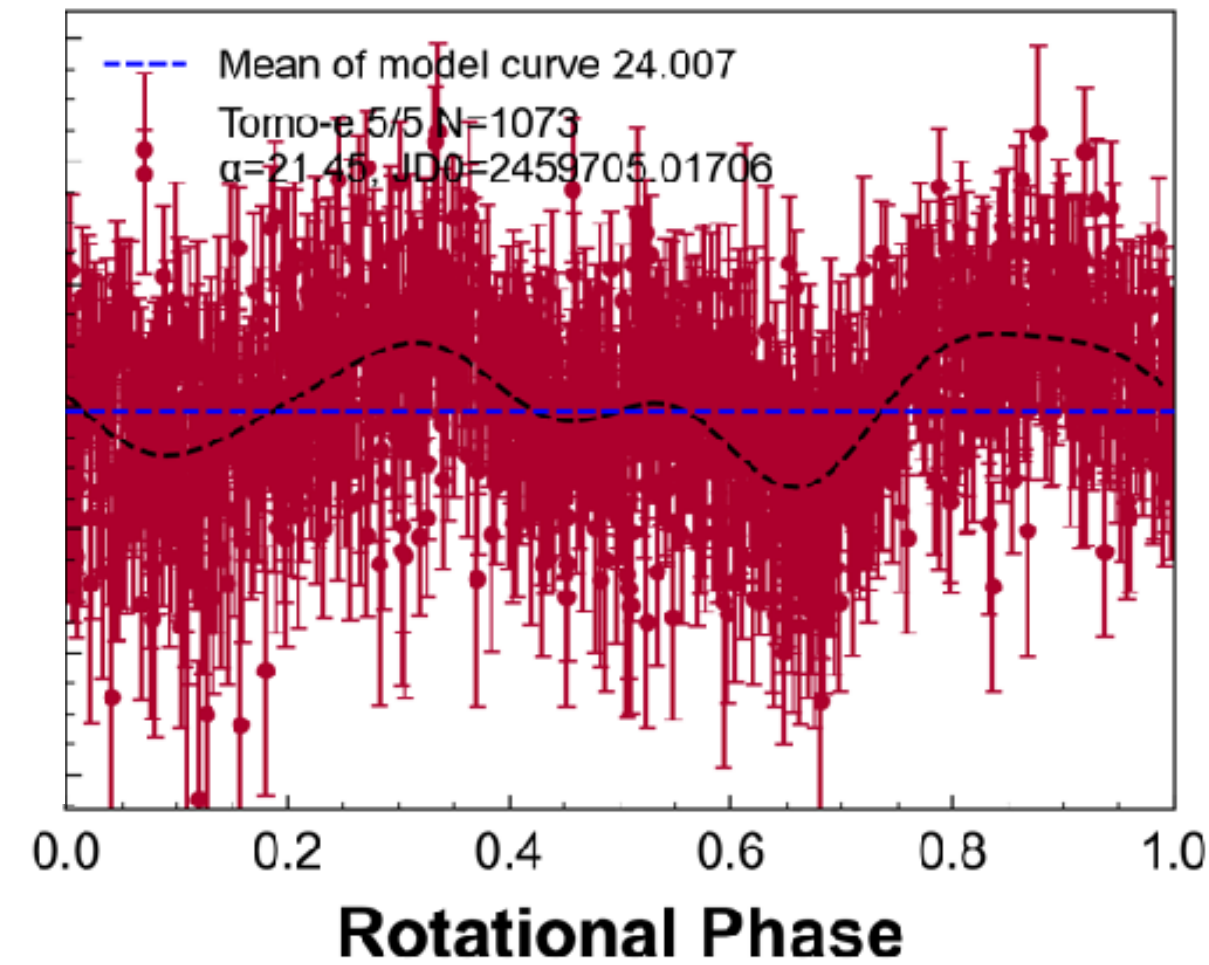
Tomo-e 5/3



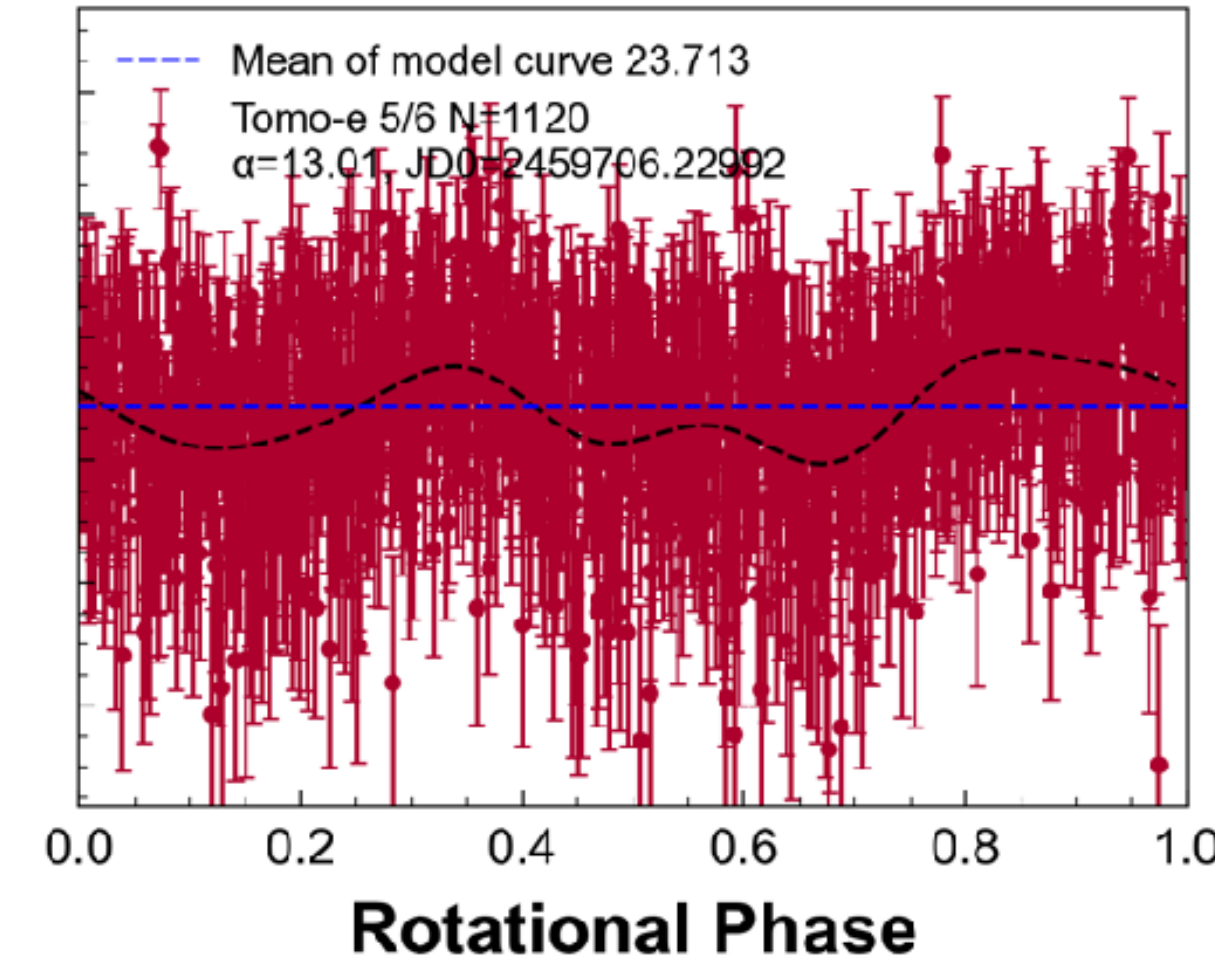
Tomo-e 5/4



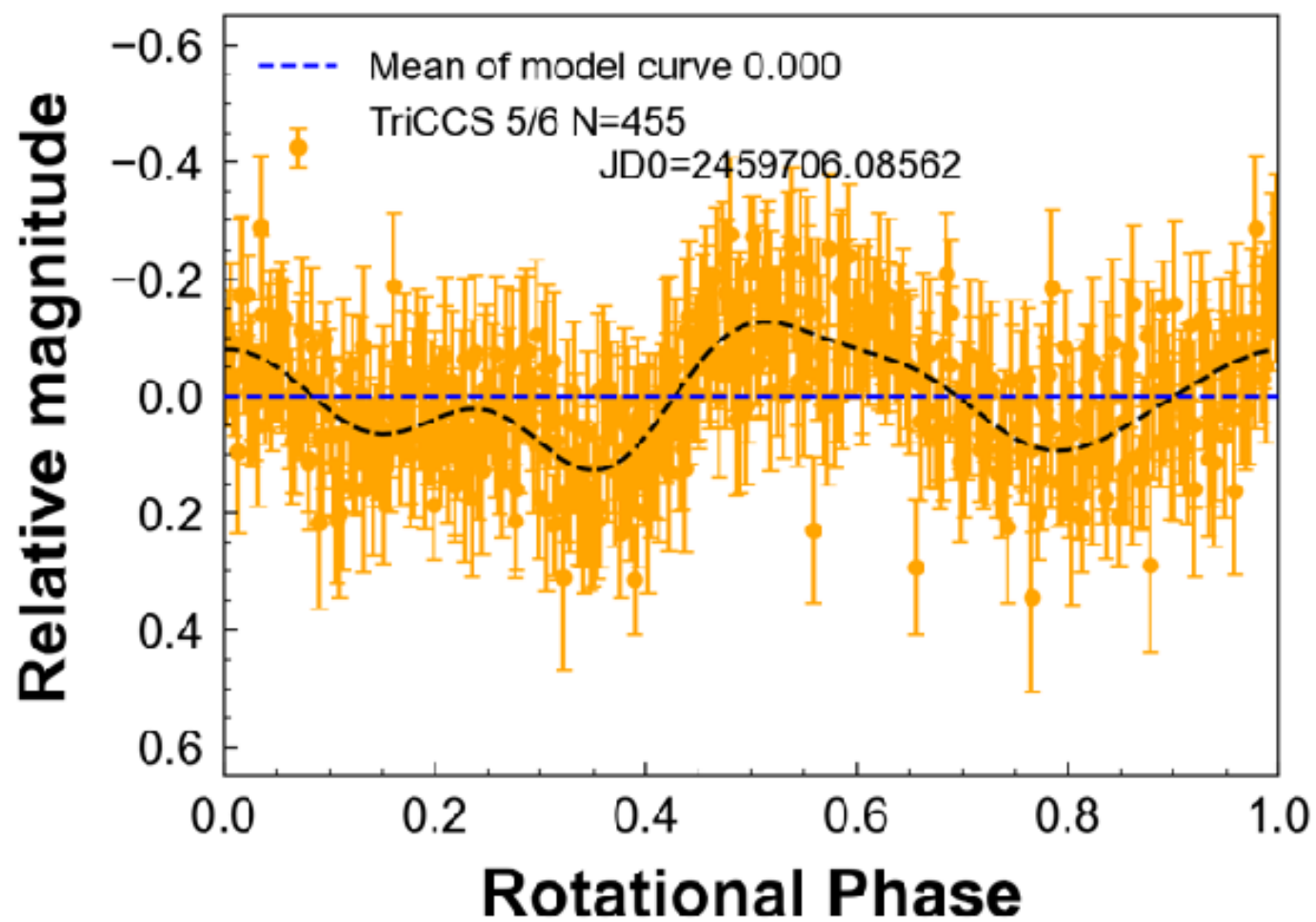
Tomo-e 5/5



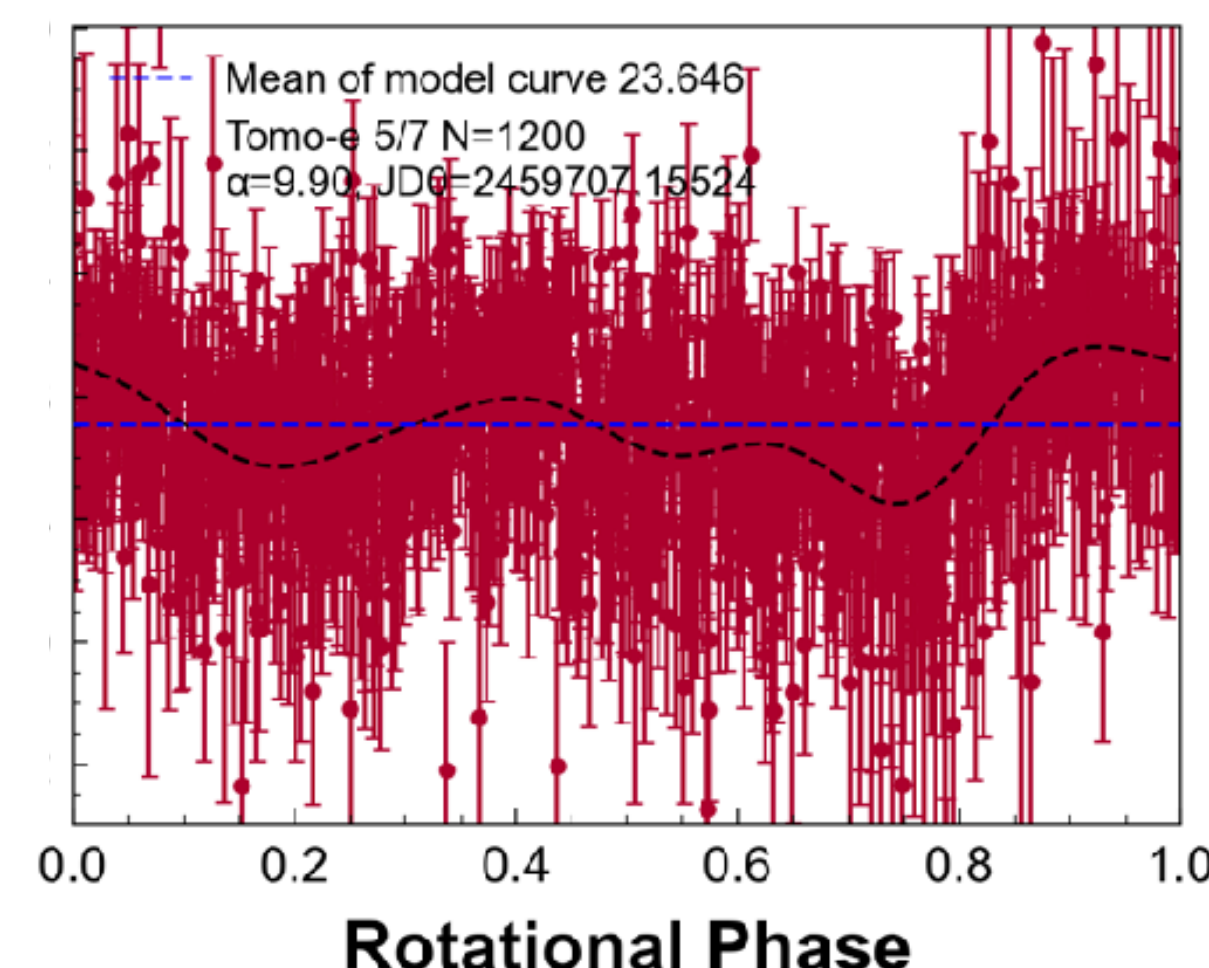
Tomo-e 5/6



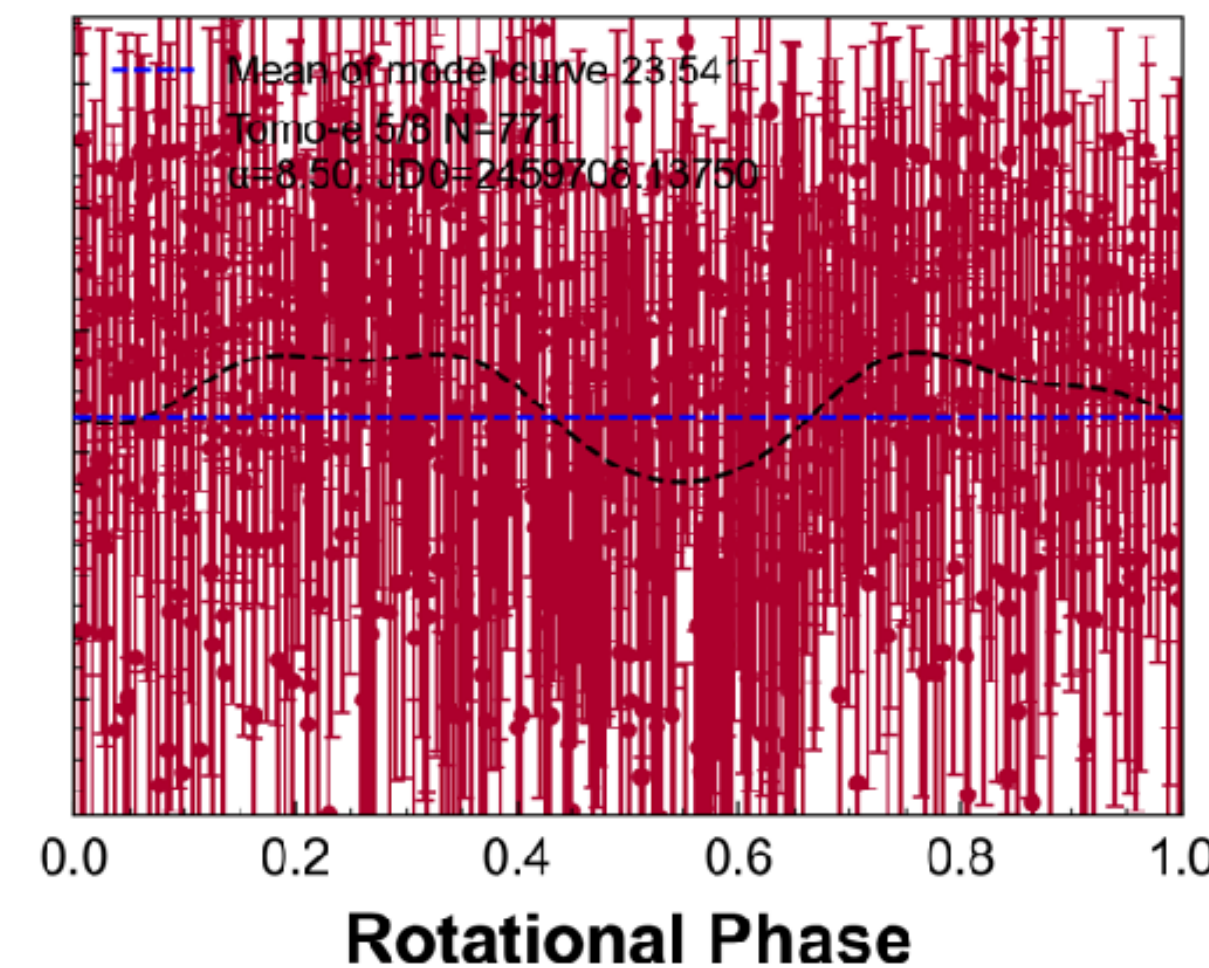
TriCCS 5/6



Tomo-e 5/7



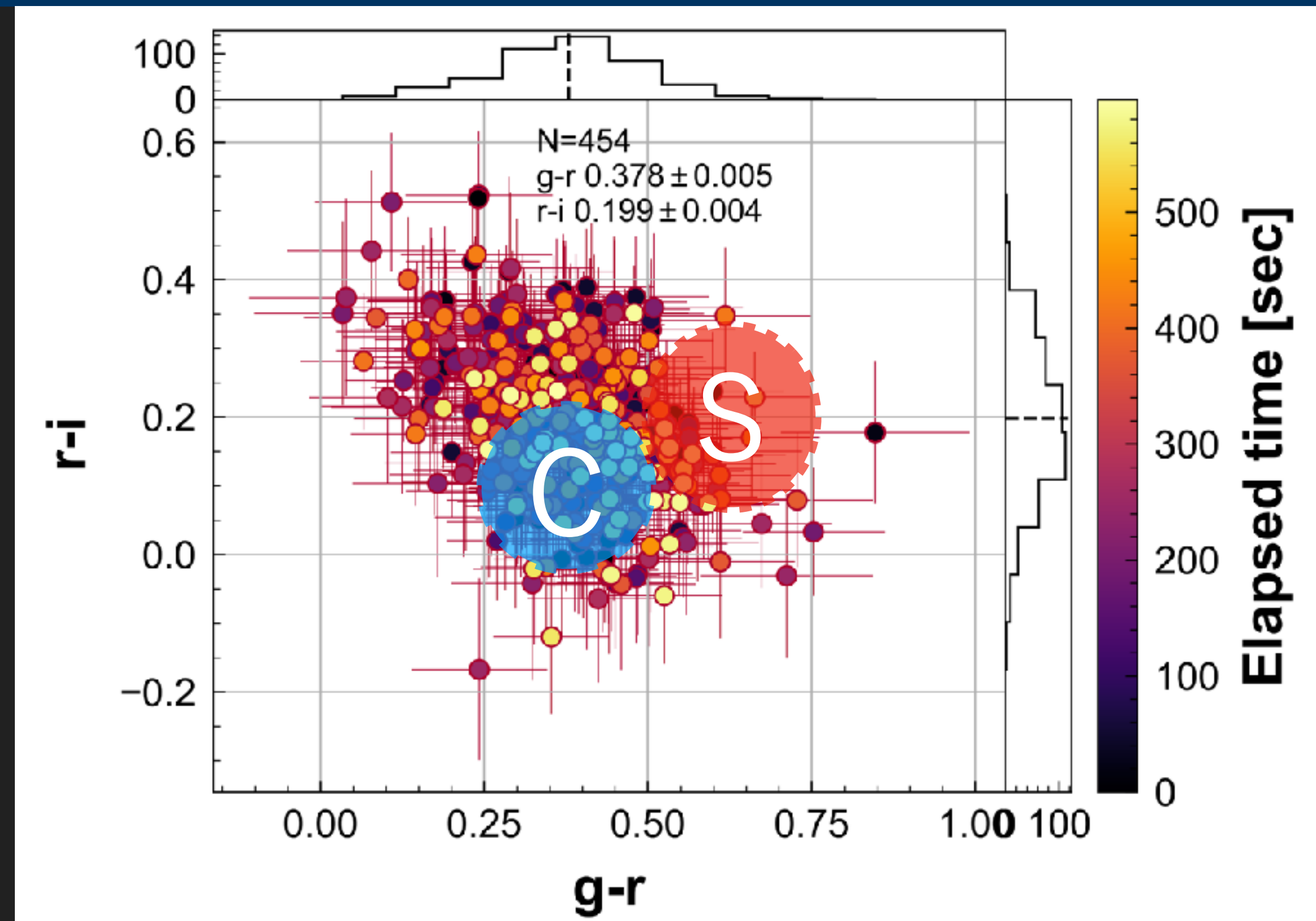
Tomo-e 5/8



周期解析から  
自転周期を  
 $P_{\text{rot}} = 51.647 \pm 0.009 \text{ s}$   
と推定



# 結果2. 表面カラー



- Seimei/TriCCSの多色観測から求めた2022 JLのカラー  
 $g - r = 0.378 \pm 0.005$ ,  $r - i = 0.199 \pm 0.004$  -> **C型**

# 結果3. 位相曲線

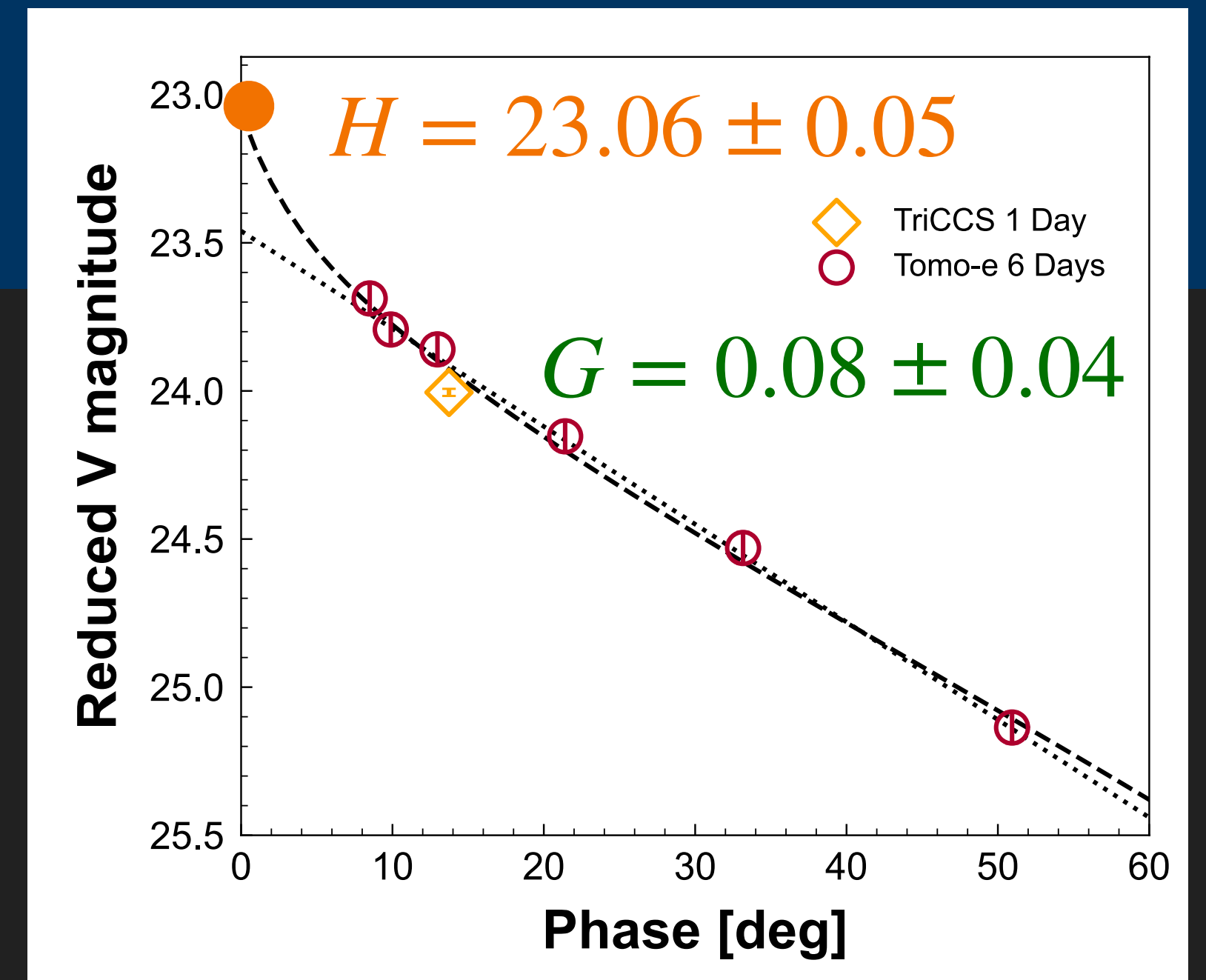
- 6日間の位相角 9–50度の観測データから絶対等級  $H$  とスロープパラメタ  $G$  を決定

$$H = 23.06 \pm 0.05, G = 0.08 \pm 0.04$$

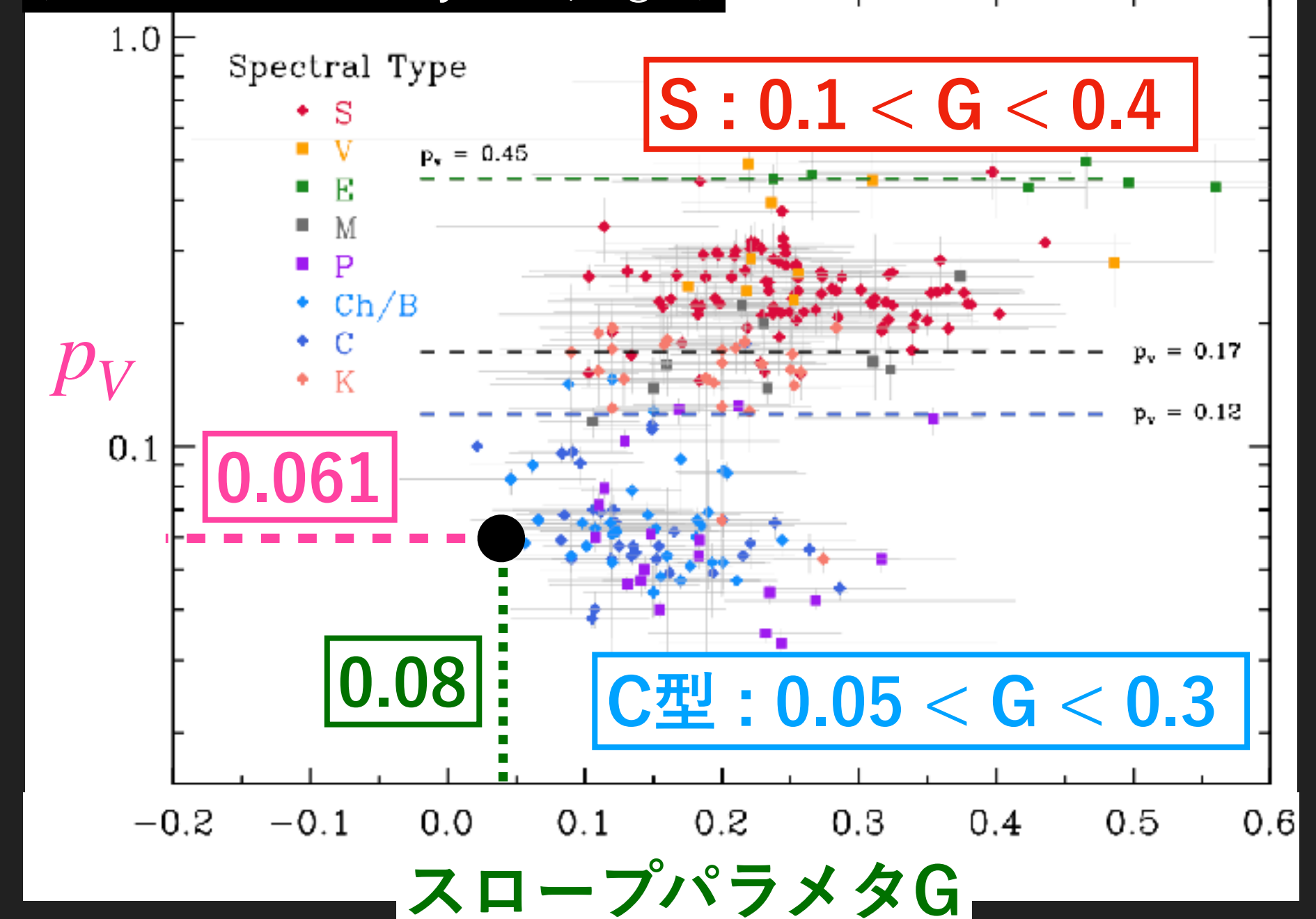
$$D = \frac{1329}{\sqrt{p_V}} \times 10^{-0.2H} \text{ km}$$

(Fowler & Chillemi 1992)

- 表面カラーとスロープパラメタ  $G$  は共に **2022 JLはC型小惑星**であることを示唆
- C型の幾何アルベド  $p_V = 0.061 \pm 0.028$  (Usui+2013) を仮定  
-> **直径  $D = 130 \pm 30 \text{ m}$**



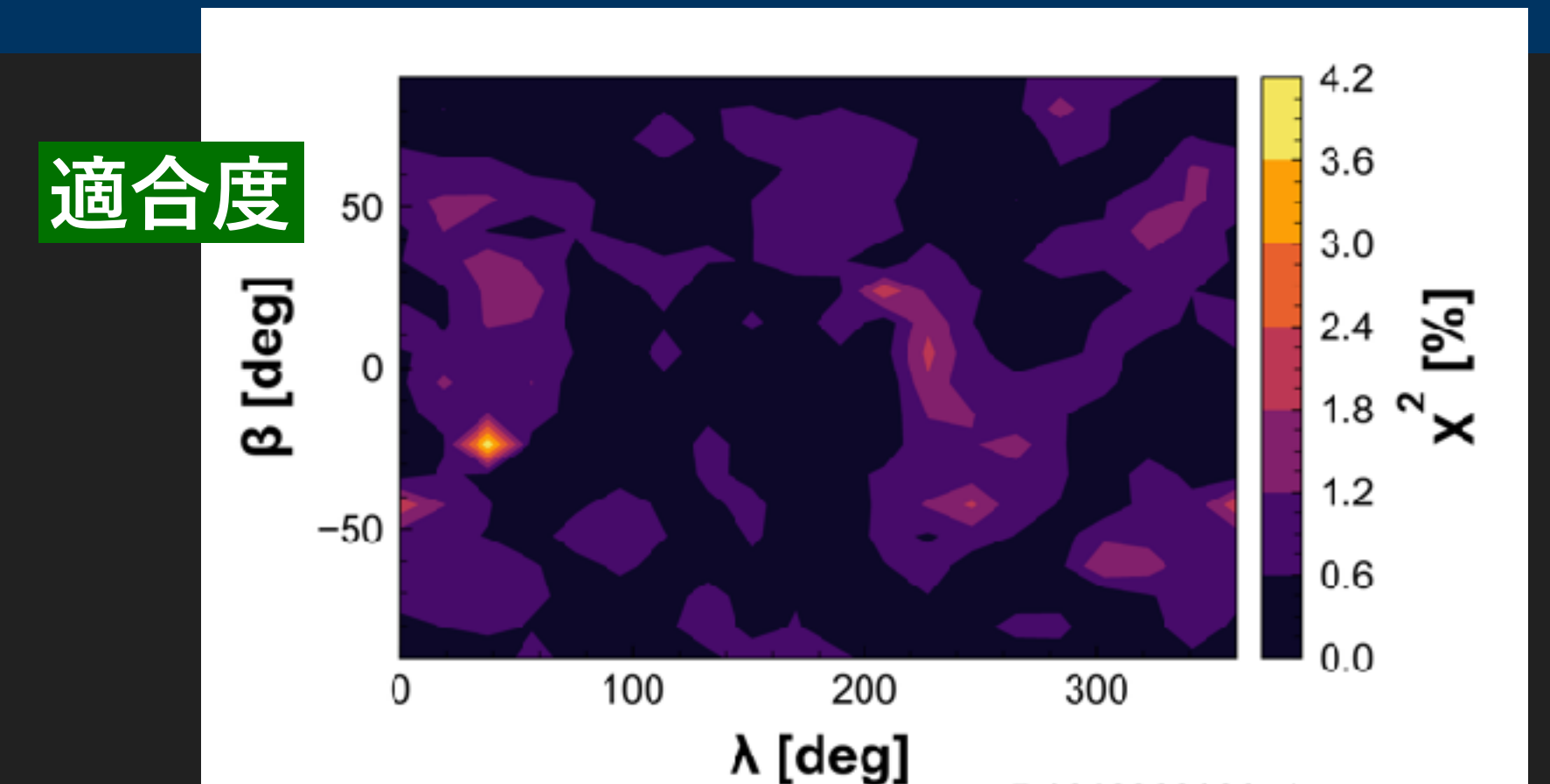
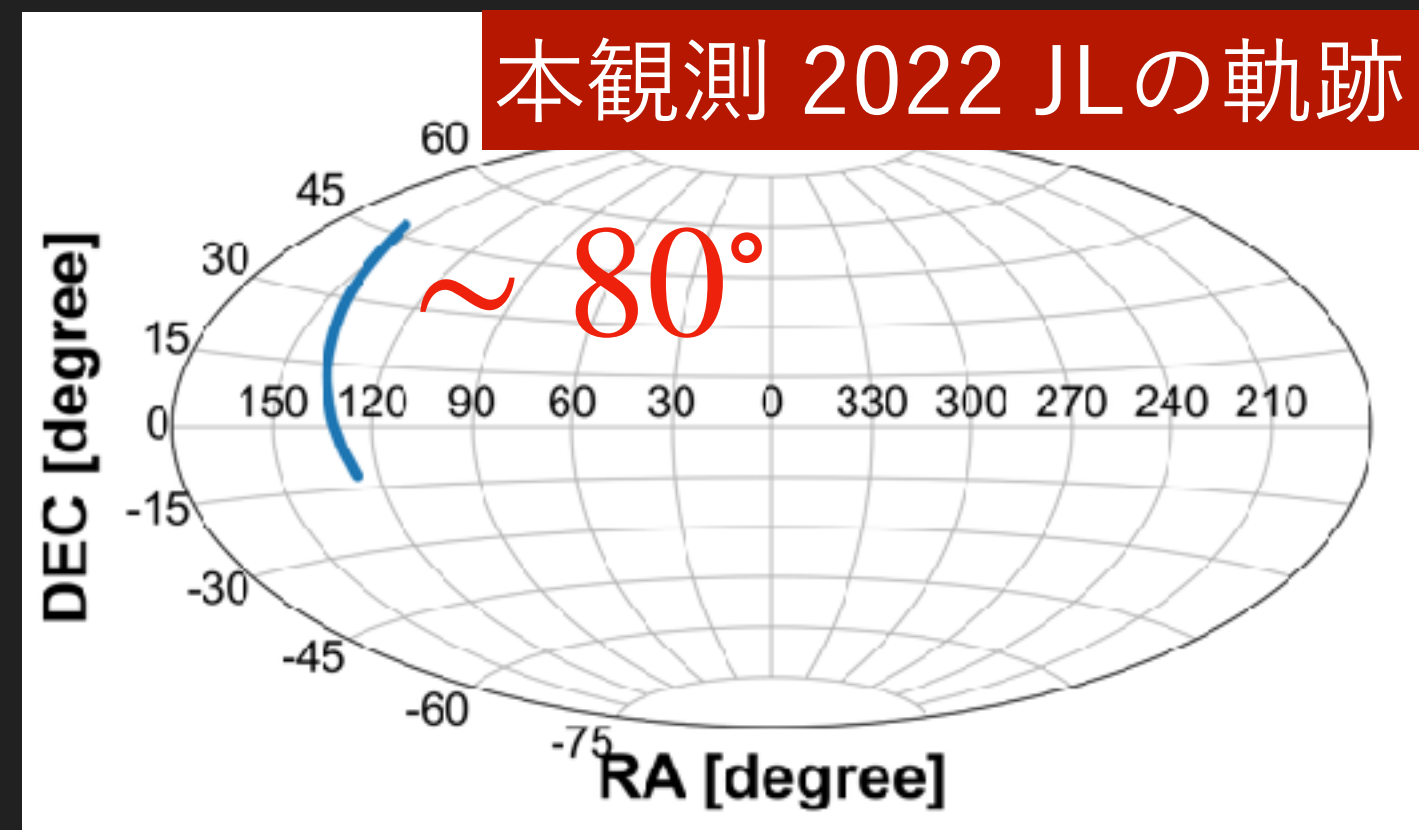
(MacLennan & Emery 2022, Fig. 2)



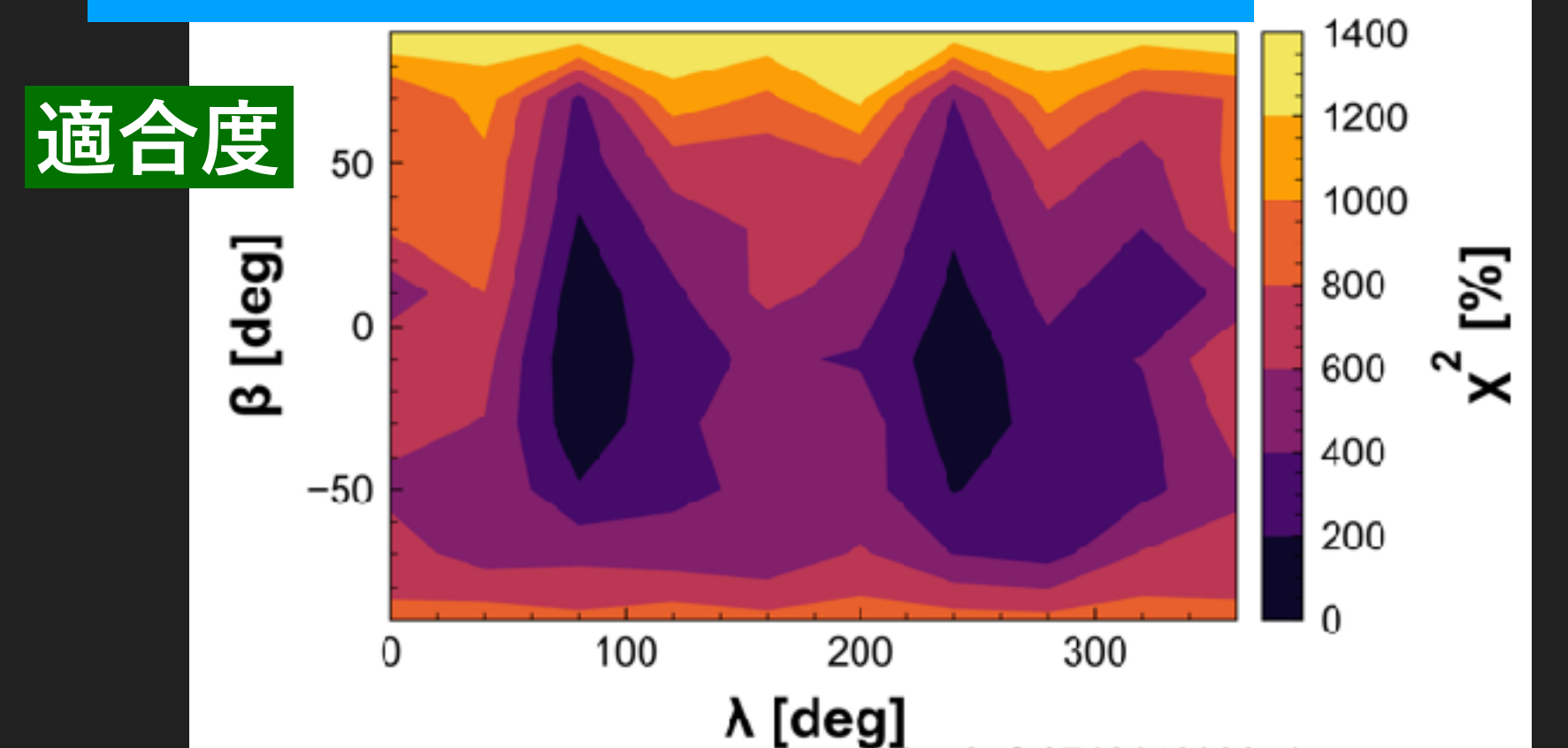


# 結果4. 形状モデル

- モデルカーブに対する適合度 ( $\chi^2$ )をもとに自転軸の向きを推定する
  - ▶  $5^\circ \times 5^\circ$  グリッド全 400 パターンの軸の向き ( $\lambda, \beta$ ) を探索
  - ▶  $\chi^2$  が周囲より10%以上低い解を候補と判断 (Hanus+2011)
- 本観測から自転軸/形状を求めるのは難しそう
  - ▶ *While each case is different, a good rule of thumb for NEAs is to have data sampling an arc on the sky **longer than 120°** (Josef Durech, personal communication).*

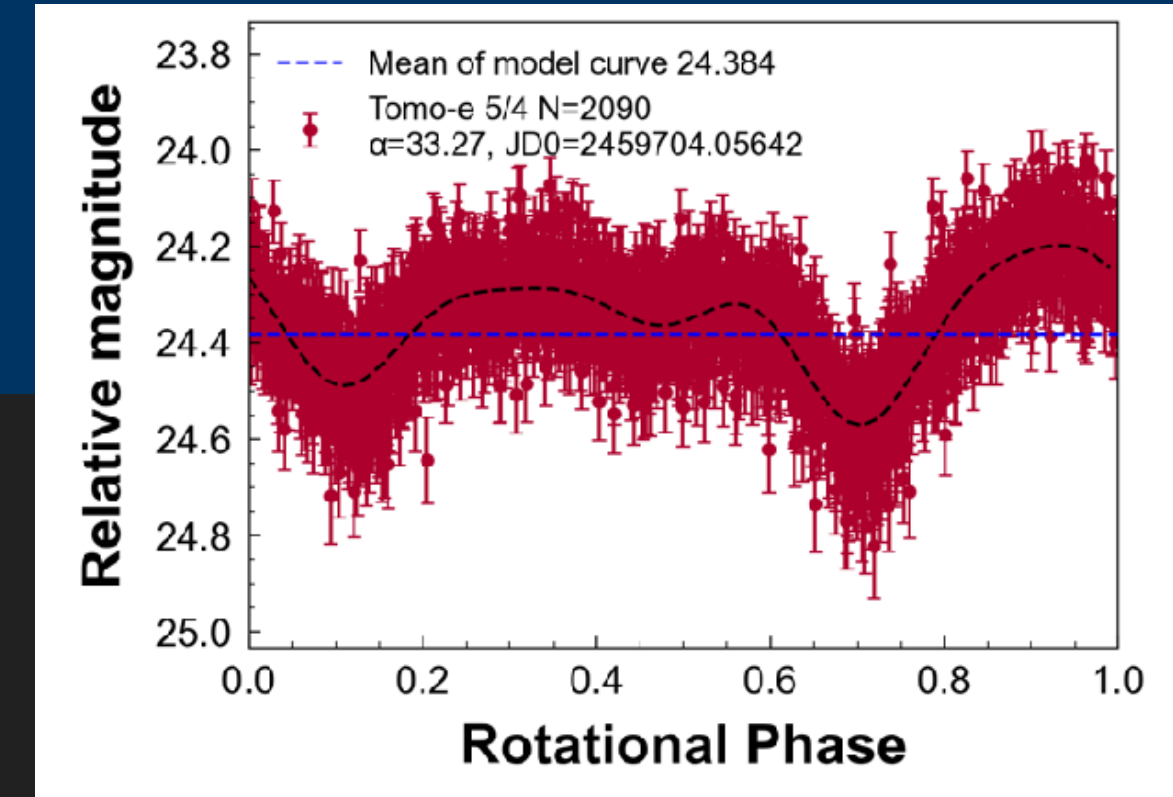


自転軸推定成功例 (43)Ariadne

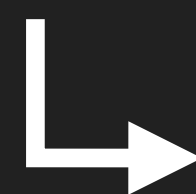


# まとめ

- Very Small Asteroids (VSAs,  $D < 150$  m) の自転軸の向きは小天体の力学史(に関連するYORP効果)を知る上で欠かせない物理量。観測の困難性からこれまでに自転軸が求まったVSAは2(4)天体のみ。



- 2022年5月に地球に接近した VSA 2022 JL の6日間の即時動画観測キャンペーンを実施



木曾Tomo-e Gozen (フィルタなし, 6日間)  
岡山TriCCS (g, r, i band, 1日間)

- 結果 : 1. 自転周期  $P_{\text{rot}} = 51.647 \pm 0.009$  s  
2. 表面カラー  $g - r = 0.378 \pm 0.005, r - i = 0.199 \pm 0.004$   
3. 絶対等級  $H = 23.06 \pm 0.05, G = 0.08 \pm 0.04$

炭素質 C型小惑星

直径  $D = 130 \pm 30$  m

- 4. ライトカーブインバージョンによる形状推定で解は得られず

## 今後 :

- ▶ データ収集 (イギリスでの観測あり。ただし観測期間は重複。)
- ▶ 微小小惑星の形状推定可能性の検討 (推定できる条件)

