



木曾トモエゴゼンによる地球接近小惑星探査と 即時追跡観測によるサイエンス

2022年2月14日 15:00–15:30 @ 2021年度プラネタリーディフェンス・シンポジウム

べにやま じん
紅山 仁 (東京大学)

酒向 重行, 大澤 亮, 瀧田 怜, 小林 尚人 (東京大学),
奥村 真一郎, 浦川 聖太郎 (日本スペースガード協会),
吉川 真, 臼井 文彦 (JAXA/ISAS),
吉田 二美 (産業医科大学/千葉工業大学),
Tomo-e Gozen collaboration

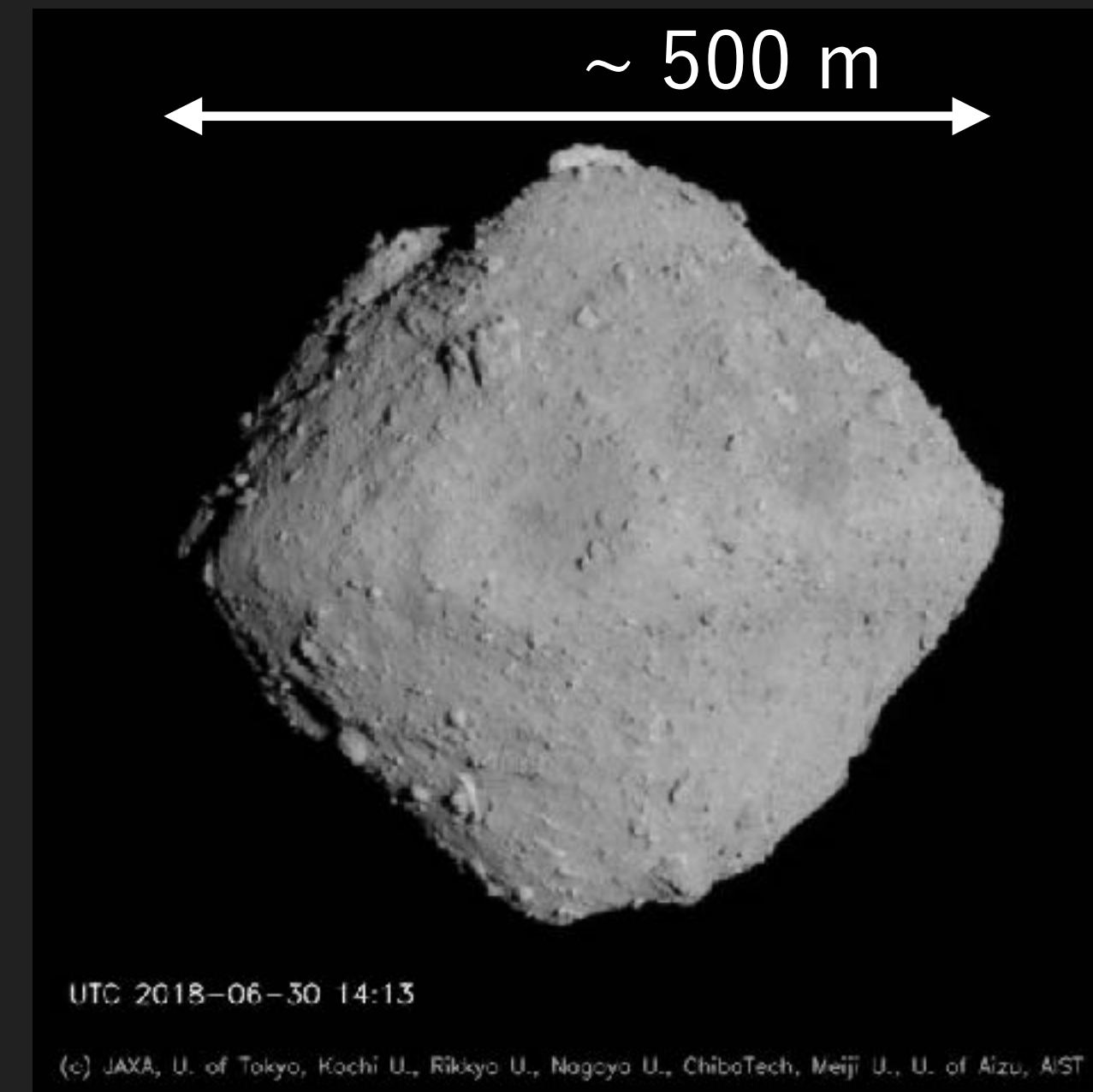
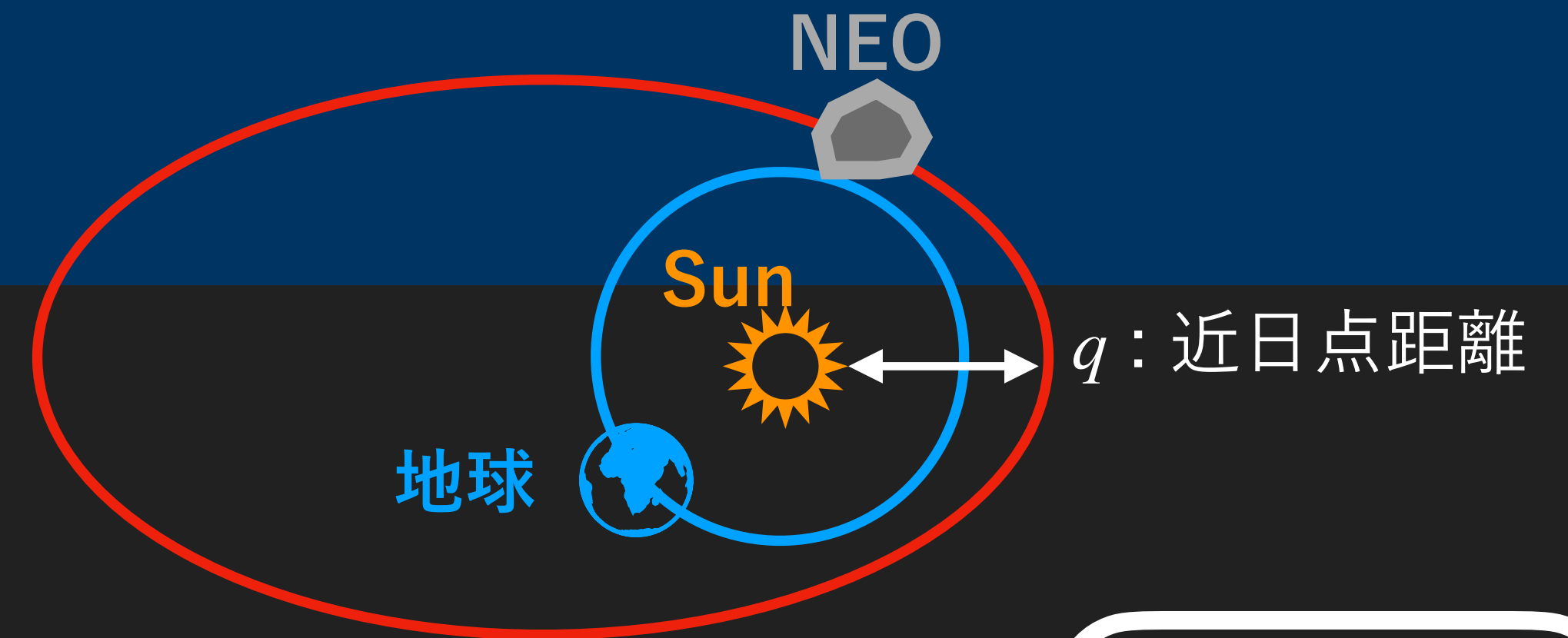
Intro. 地球接近小惑星(NEO)の観測

Part 1. Tomo-e のNEO探査

Part 2. NEOの即時追跡観測に
よるサイエンス

地球接近小惑星

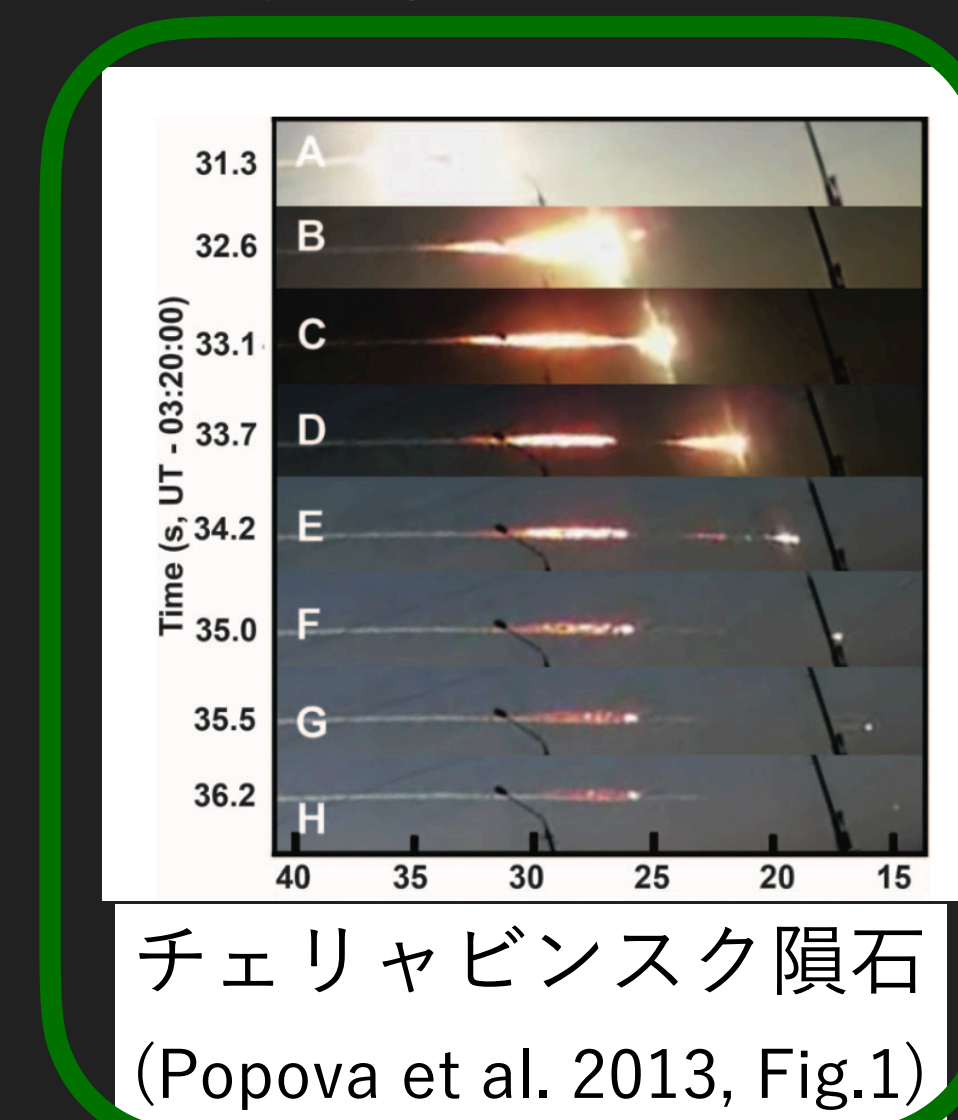
- 地球接近小惑星 (Near-Earth Objects, NEO)
: 近日点距離 $q < 1.3 \text{ au}$ の小惑星
 - ▶ 地球への被害の軽減 (プラネタリーディフェンス)
 - ▶ 地球に近いので探査機によるその場観測が可能
 - ▶ 地球に近いので10 m 級の**微小小惑星**も観測可能
 - 小さい小惑星は岩石の集積体である大きな小惑星とは本質的に異なり一枚岩
 - 小さい小惑星を用いることで、地球接近小惑星の起源、進化史に関する情報が得られる



地球接近小惑星 (162173) Ryugu
(クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)



はやぶさ2 拡張ミッション
2031年到着

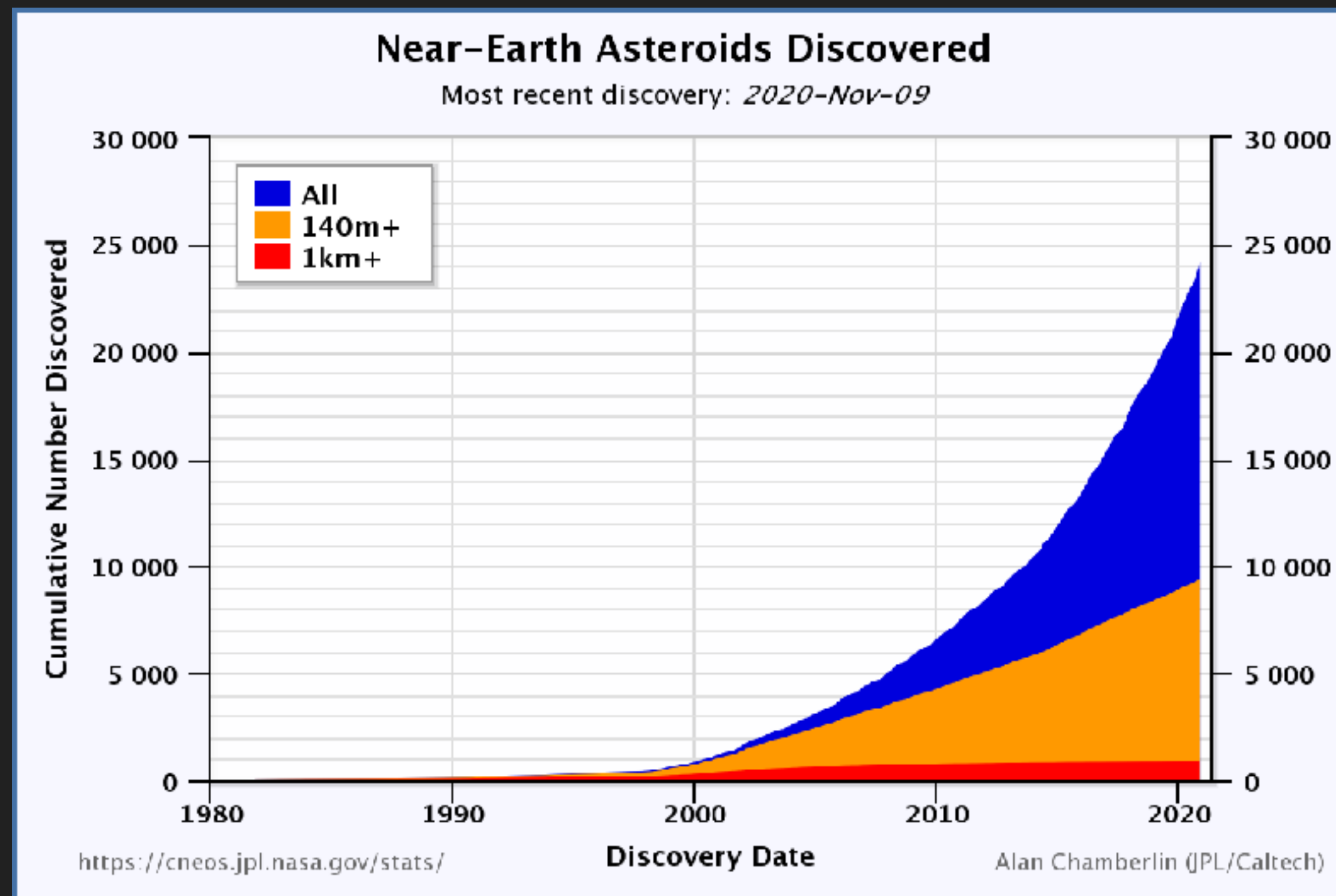


チェリャビンスク隕石
(Popova et al. 2013, Fig.1)

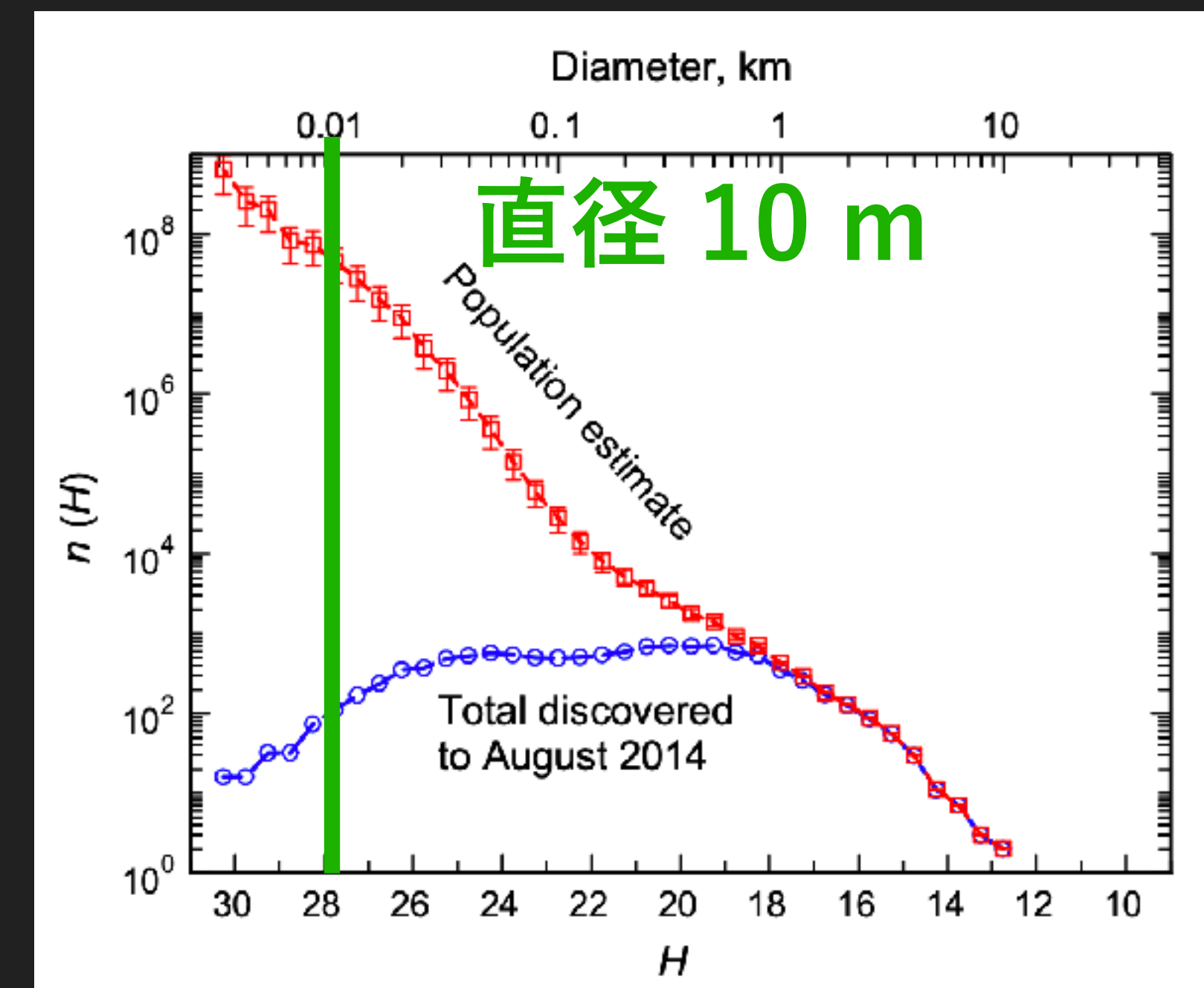
地球に接近する小惑星の発見には
多くの意義がある

地球接近小惑星の観測現状

- 主に大型サーベイ計画 (Pan-STARRS, ZTF, CSS etc.)により3,000コ/年のペースで発見
- より大きな小惑星の衝突破片であると考えられている微小小惑星のほとんどが未発見 (直径 10m : 99.99 %が未発見)



地球接近小惑星 サイズごとの存在予測数



Harris et al. 2015 Fig.2

サーベイ観測計画

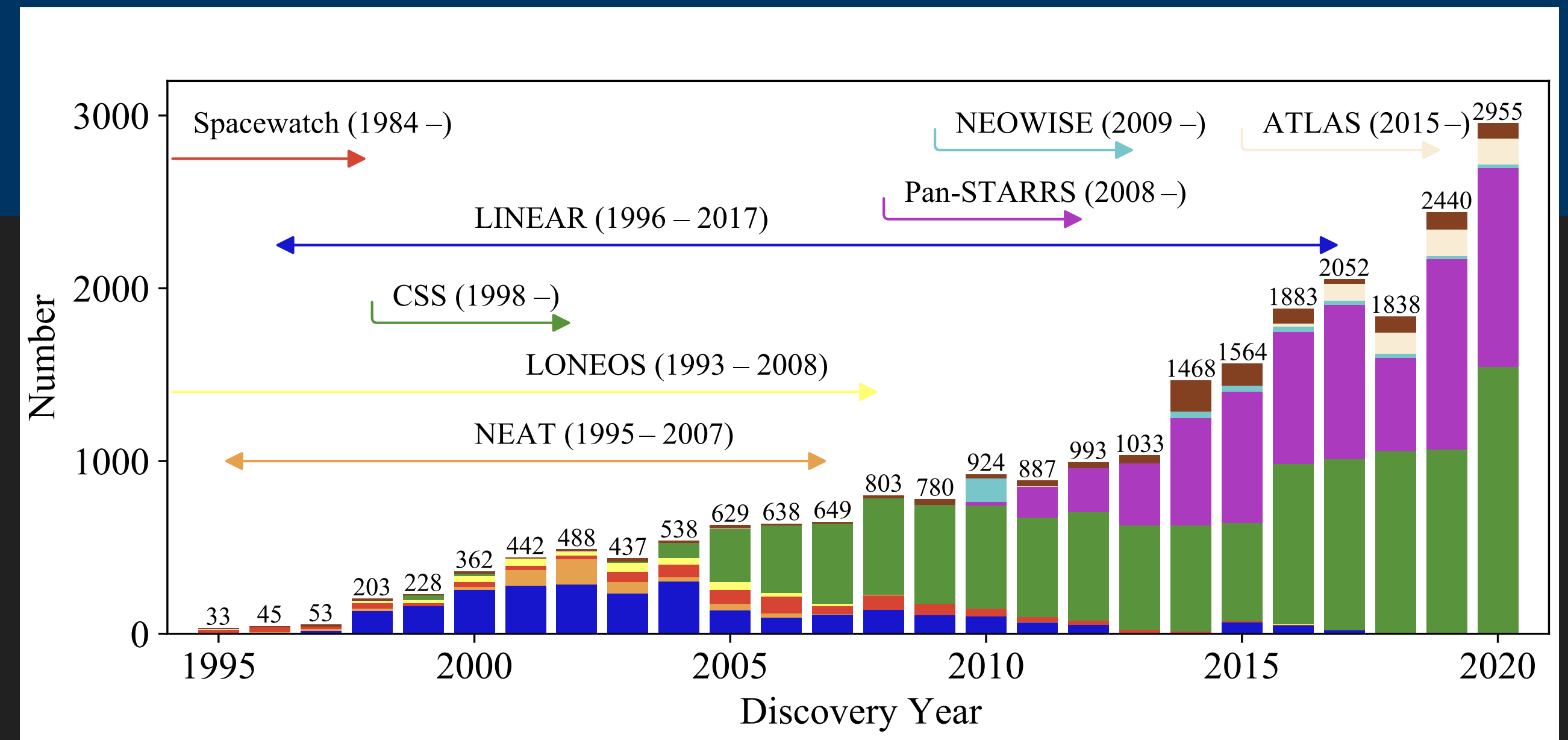
- 主なサーベイ観測

- ▶ **Pan-STARRS**

ハワイ州ハレアカラ山頂の
二台の口径 1.8 m 望遠鏡

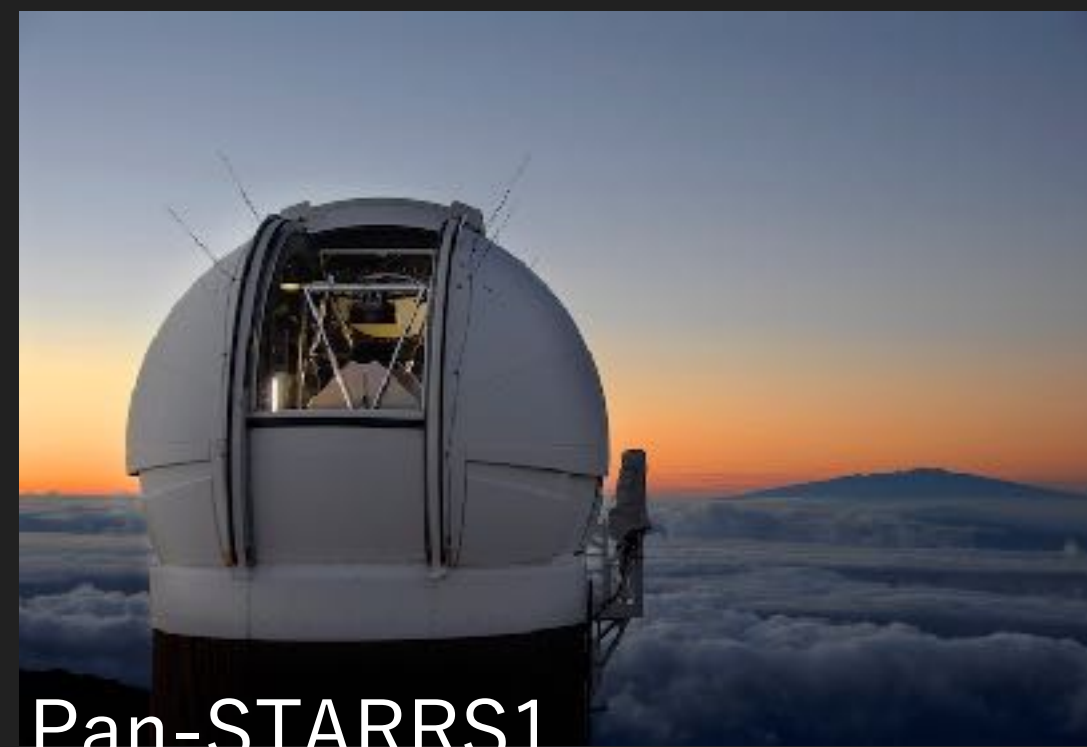
- ▶ **Catalina Sky Survey**

アリゾナ州サンタカタリーナ山地の
口径 1.5 m, 1.0 m (追跡用), 0.7 m 望遠鏡



NEO観測プロジェクトごとの発見数の推移

- 既存のサーベイは数十秒積分した
深くて(それなりに)広視野な画像から
小惑星を含む突発天体を探索



Pan-STARRS1

(<https://panstarrs.stsci.edu/>)



703



152

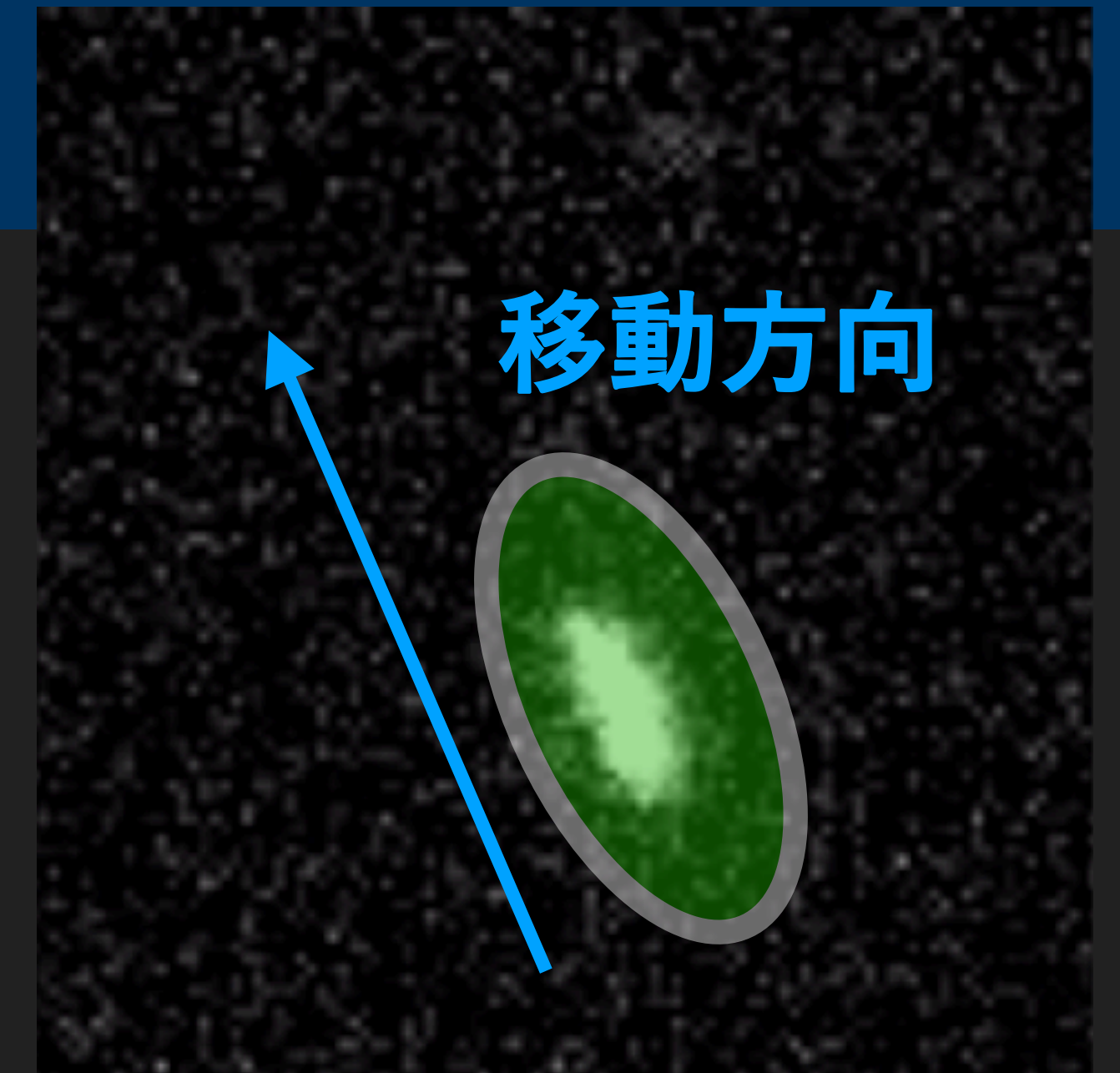
Catalina Sky Surveyの望遠鏡

(<https://catalina.lpl.arizona.edu/>)

高速移動小惑星観測の困難性

- 小惑星は地球近傍ほど明るく見かけの速度が大きい
 - 星像が伸びることによる感度低下 (**トレイリングロス効果**)
 - 長時間 (数十秒) 積分する既存のサーベイ観測では発見が困難

→ **高速動画観測**



星像が伸びた高速移動天体の例

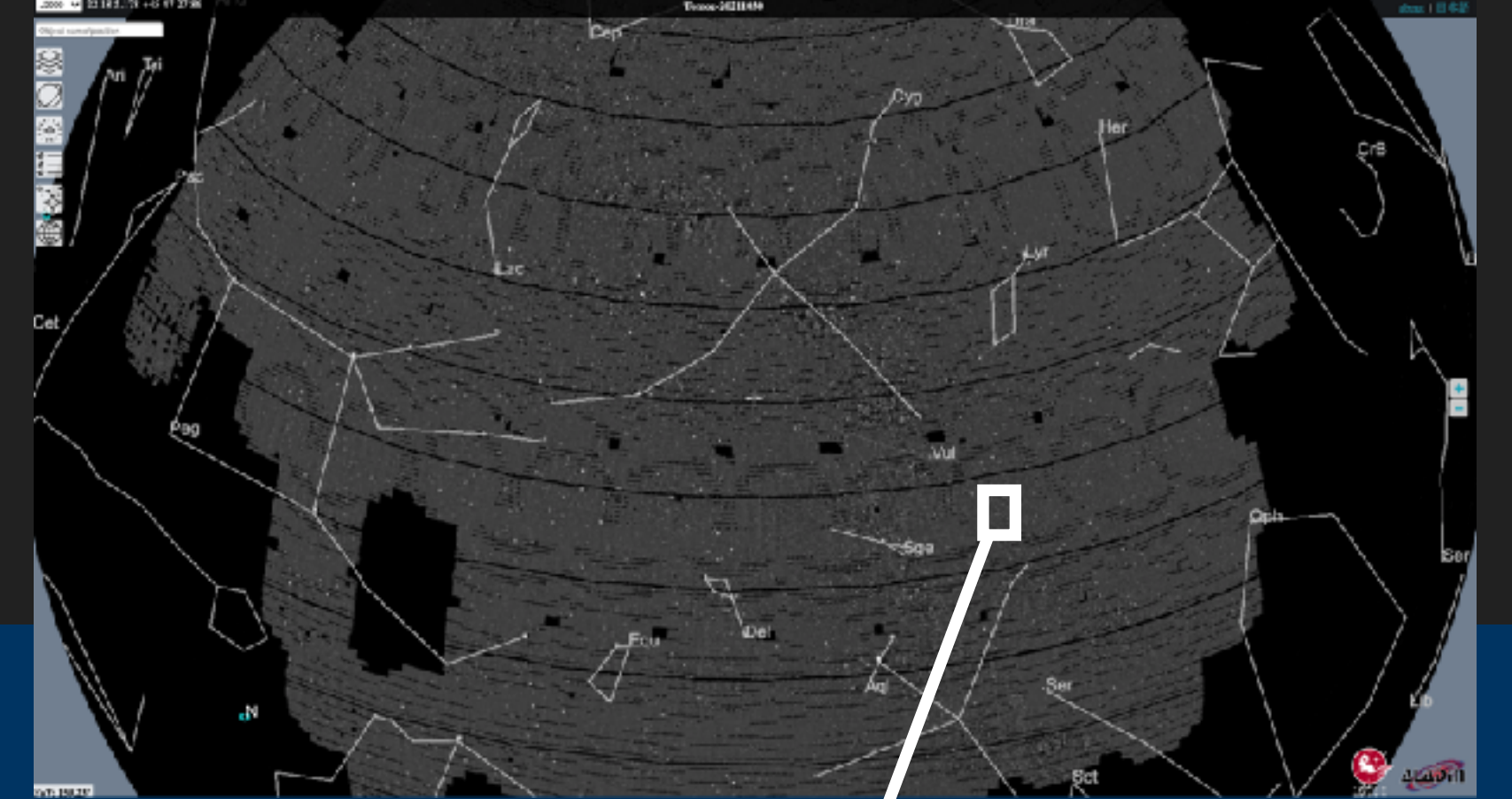
- 移動速度が大きく観測好機が非常に短い (数時間 – 数日)
軌道精度を高めるためには**迅速な追観測**が必要
- 科学的に価値のある情報を引き出す or 衝突などのリスクを回避する
ためには**より早い発見**が重要

→ **観測データからのリアルタイム
移動天体検出**

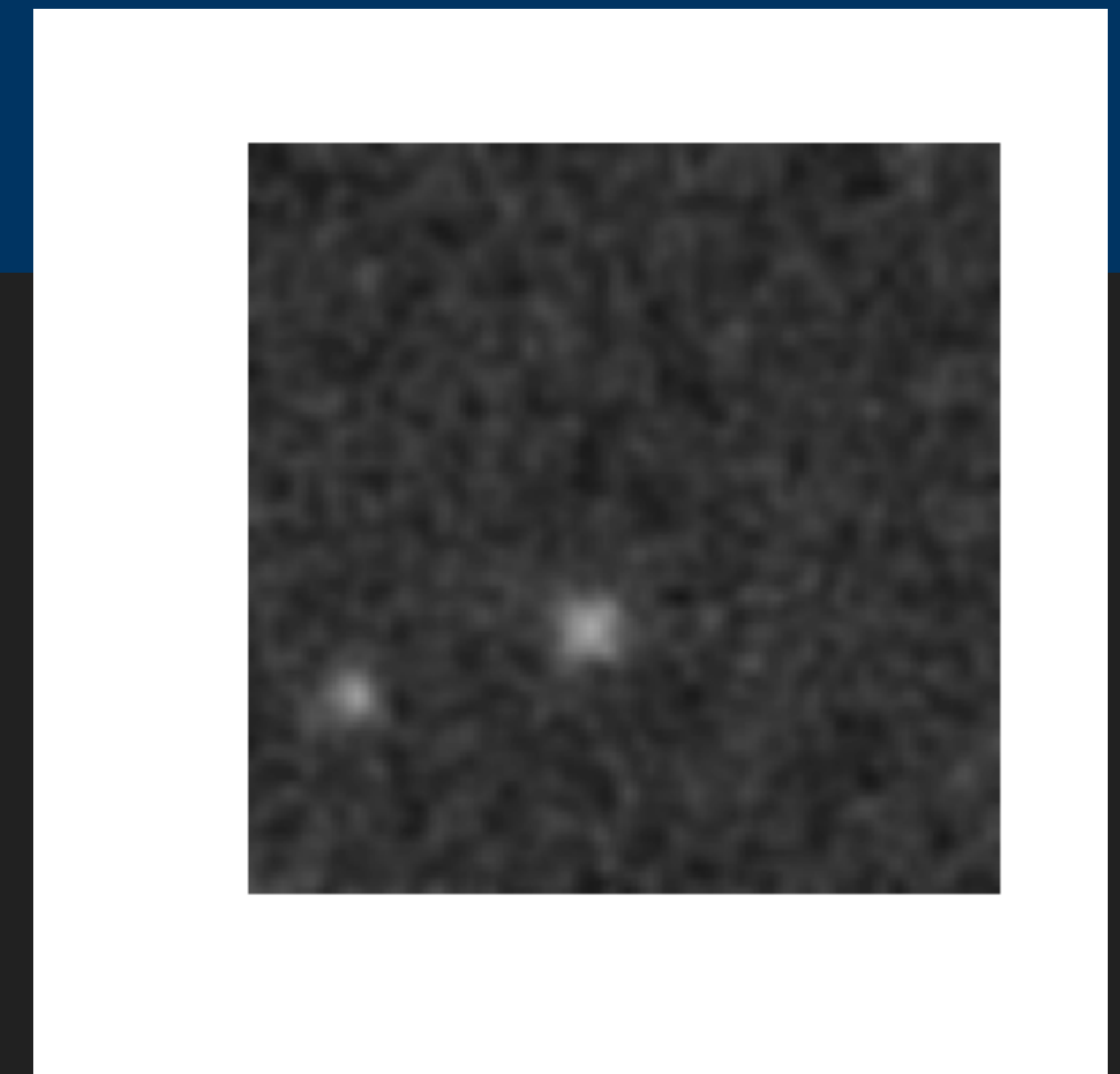
Tomo-e Sky Atlas by 瀧田さん

<https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/skyatlas/>

?target=20%2030%2027.387%2B30%2025%2024.75&fov=159.23&survey=Tomoe-20211030#

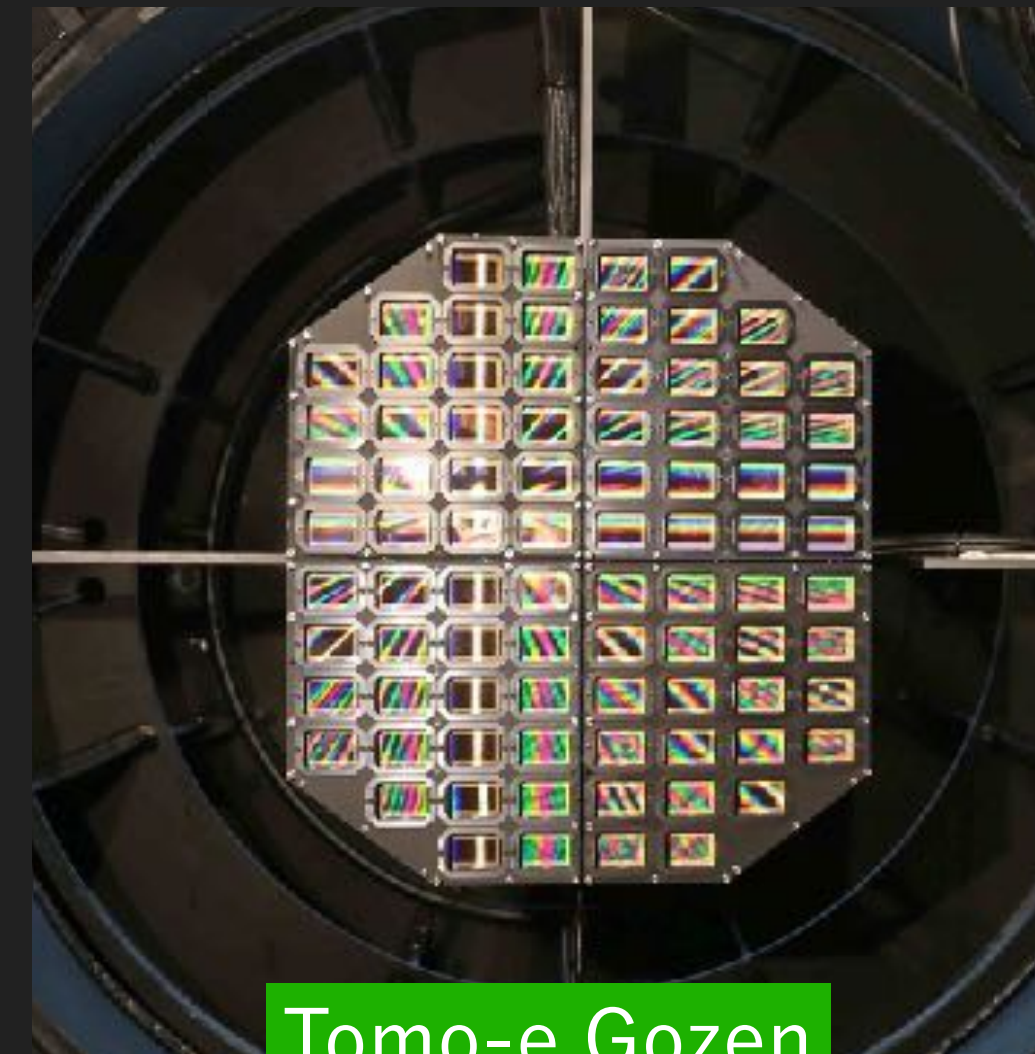


Part1. Tomo-e サーベイ観測 データからの小惑星の探索



Tomo-e Gozen (トモエゴゼン, 巴御前)

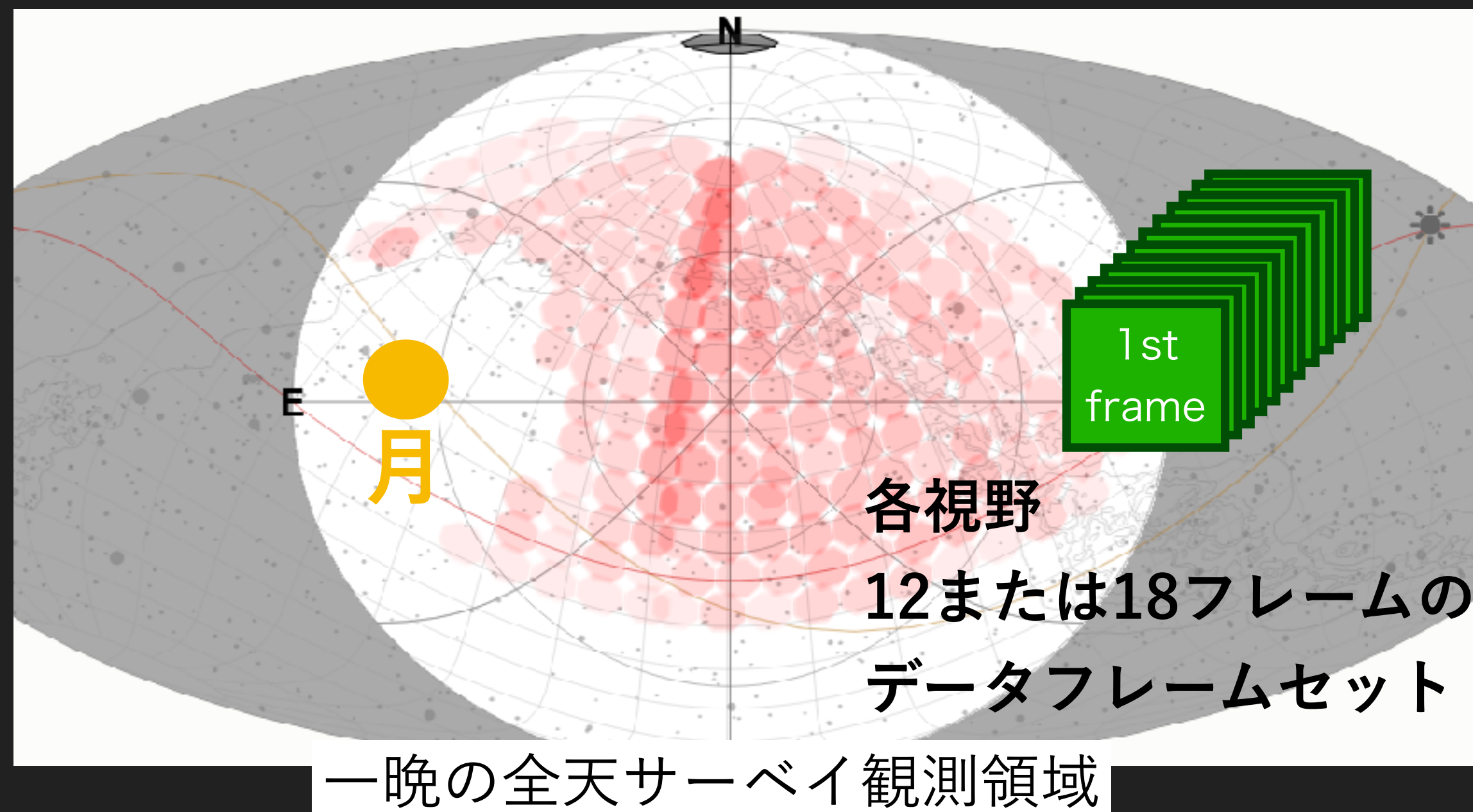
- 長野県木曾郡 東京大学木曾観測所 口径105 cm シュミット望遠鏡用に開発されたCMOSカメラ
- 84 枚のセンサが**広視野20 平方度**を覆う
- 2 Hz (0.5 秒積分) 動画観測による全天サーベイ
 - ▶ 毎晩 30 TBのビッグデータを蓄積
 - ▶ **この中から高速移動天体を検出する**



Tomo-e Gozen



巴御前出陣図 (部分)



Tomo-e Gozen 全天サーベイ観測の諸元

	Tomo-e Gozen
有効視野	20 deg ²
限界等級*	18 mag
サーベイ面積	30,000 deg ² /night
データレート	30 TB/night

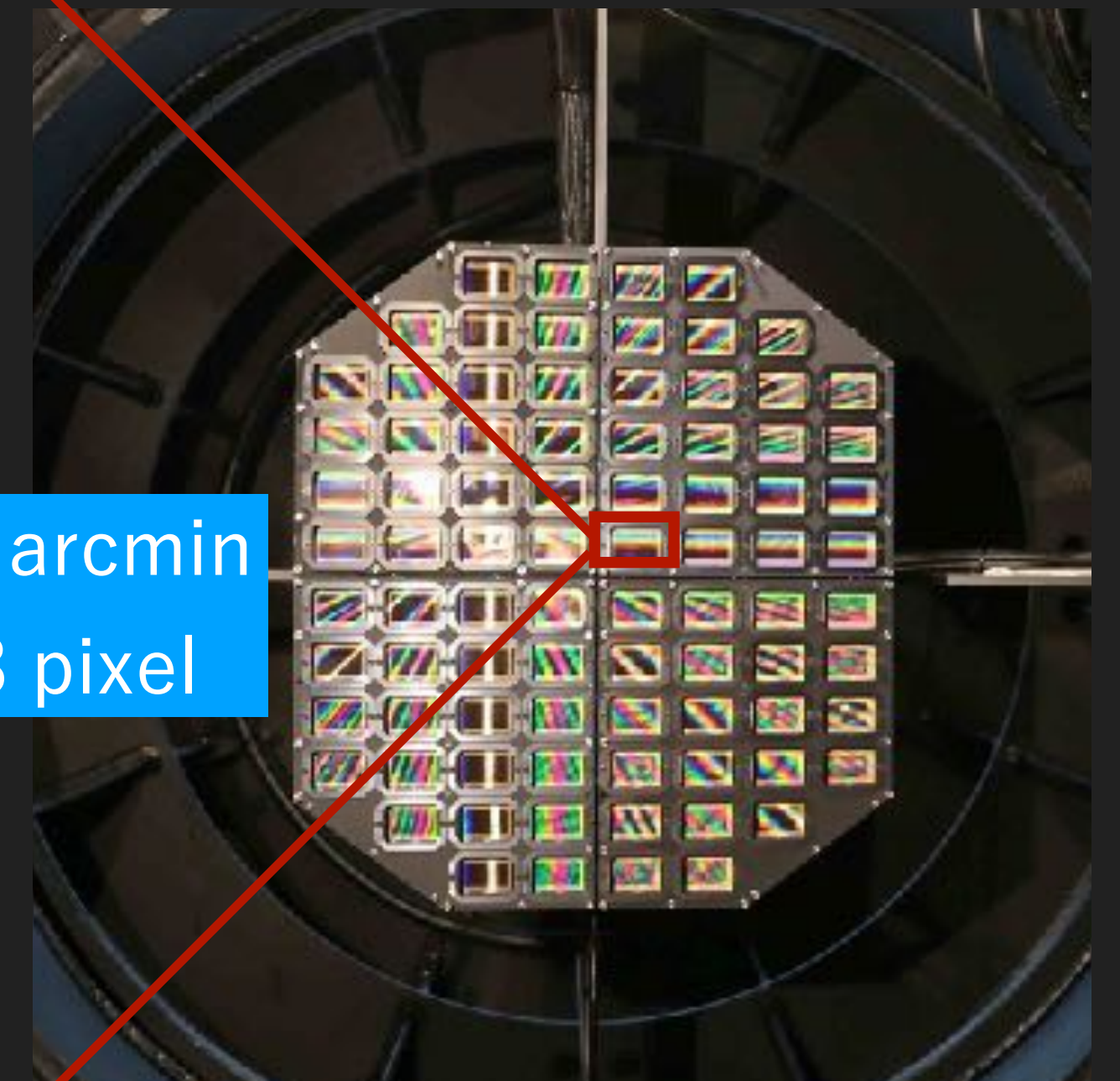
* S/N=5, 0.5秒積分, フィルターなし

Tomo-e Gozen が取得する動画データ例

39.7 arcmin, 2000 pixel



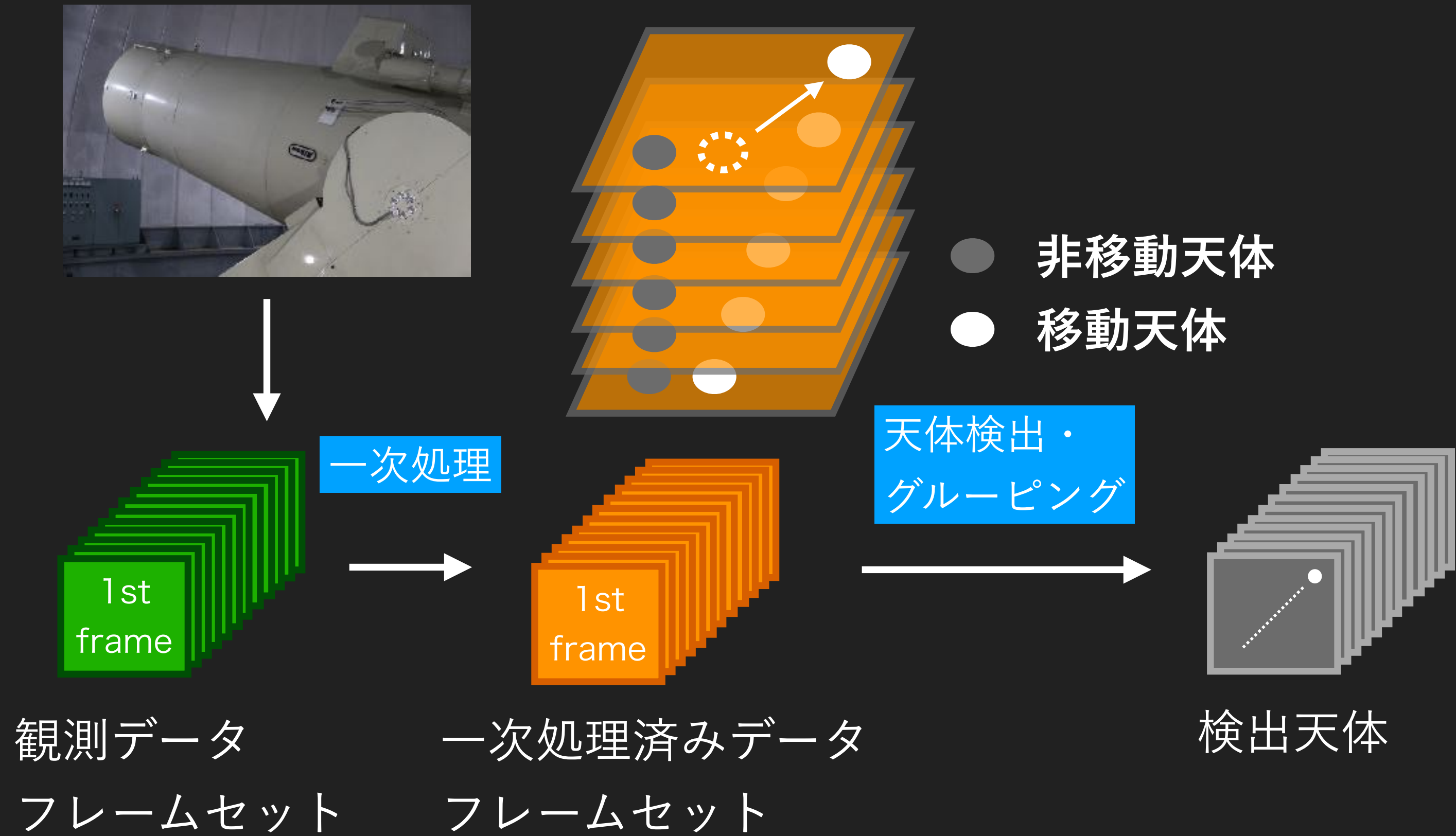
84枚のセンサ



22.4 arcmin
1128 pixel

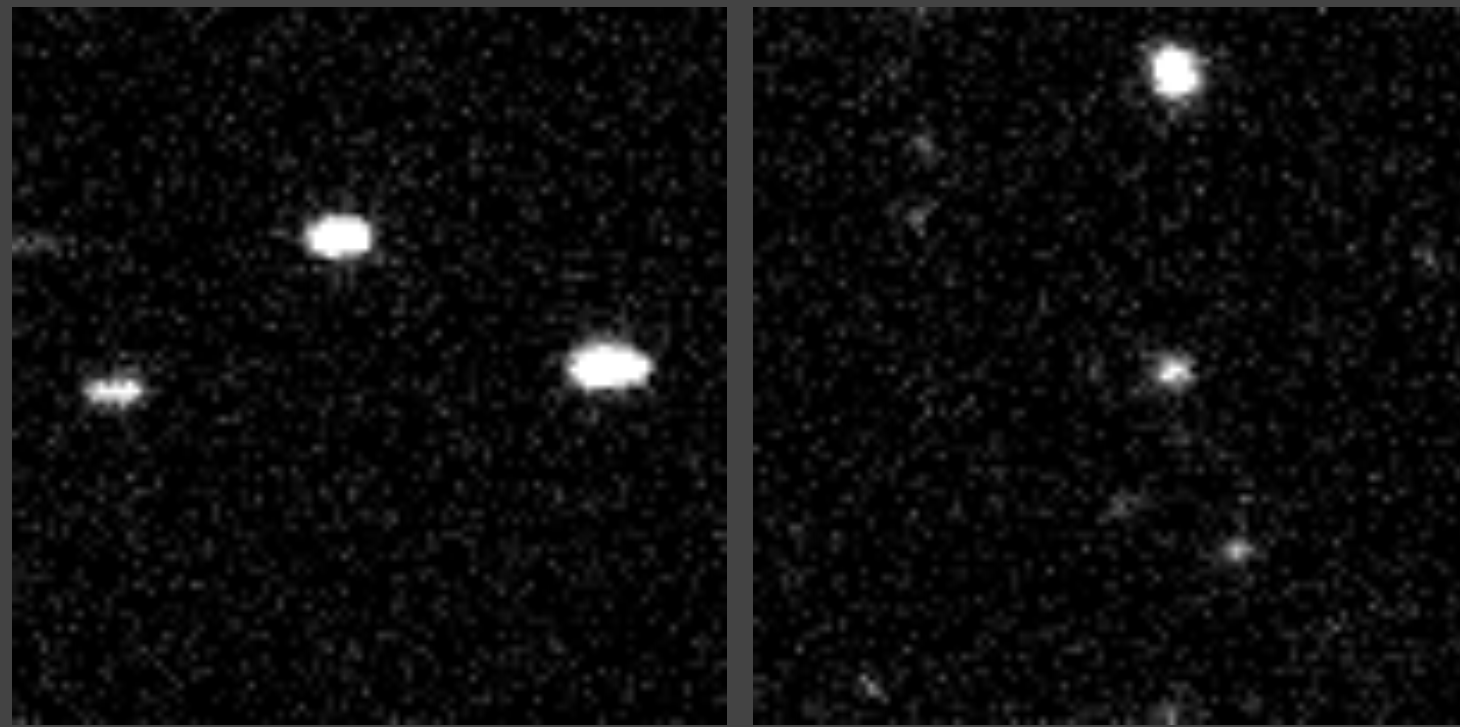
1ピクセルが見込む角度 ピクセルスケールは 1.189 arcsec
Point Spread FunctionのFWHM シーイングは 3-5 arcsec 程度

高速移動天体検出までの流れ

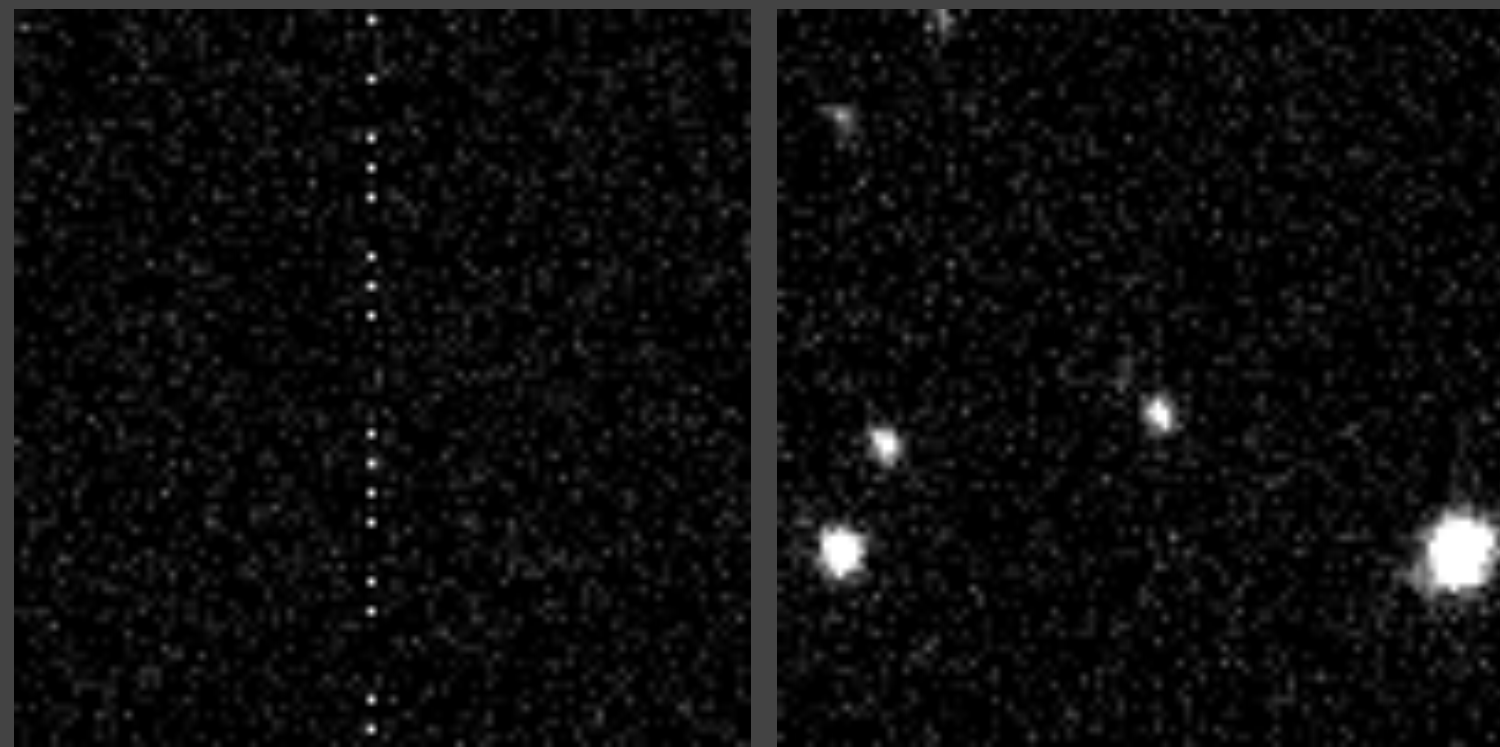


高速移動天体検出までの流れ

移動天体

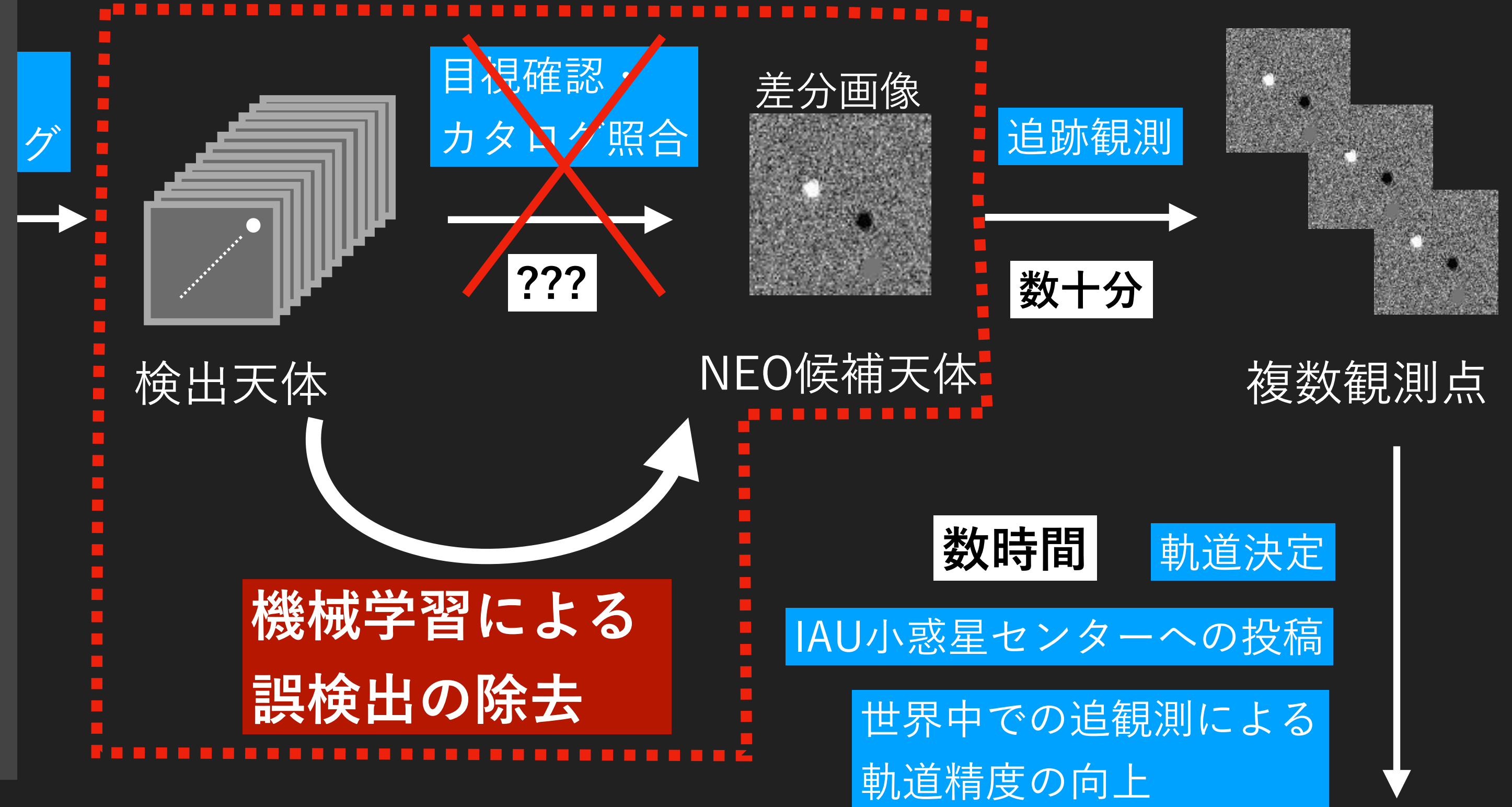


誤検出



膨大なサーベイ観測データからは
大量の誤検出(~100万天体)が発生。
観測時間が限られたNEOの発見には
誤検出の除去が不可欠。

移動天体
動天体



移動天体検出

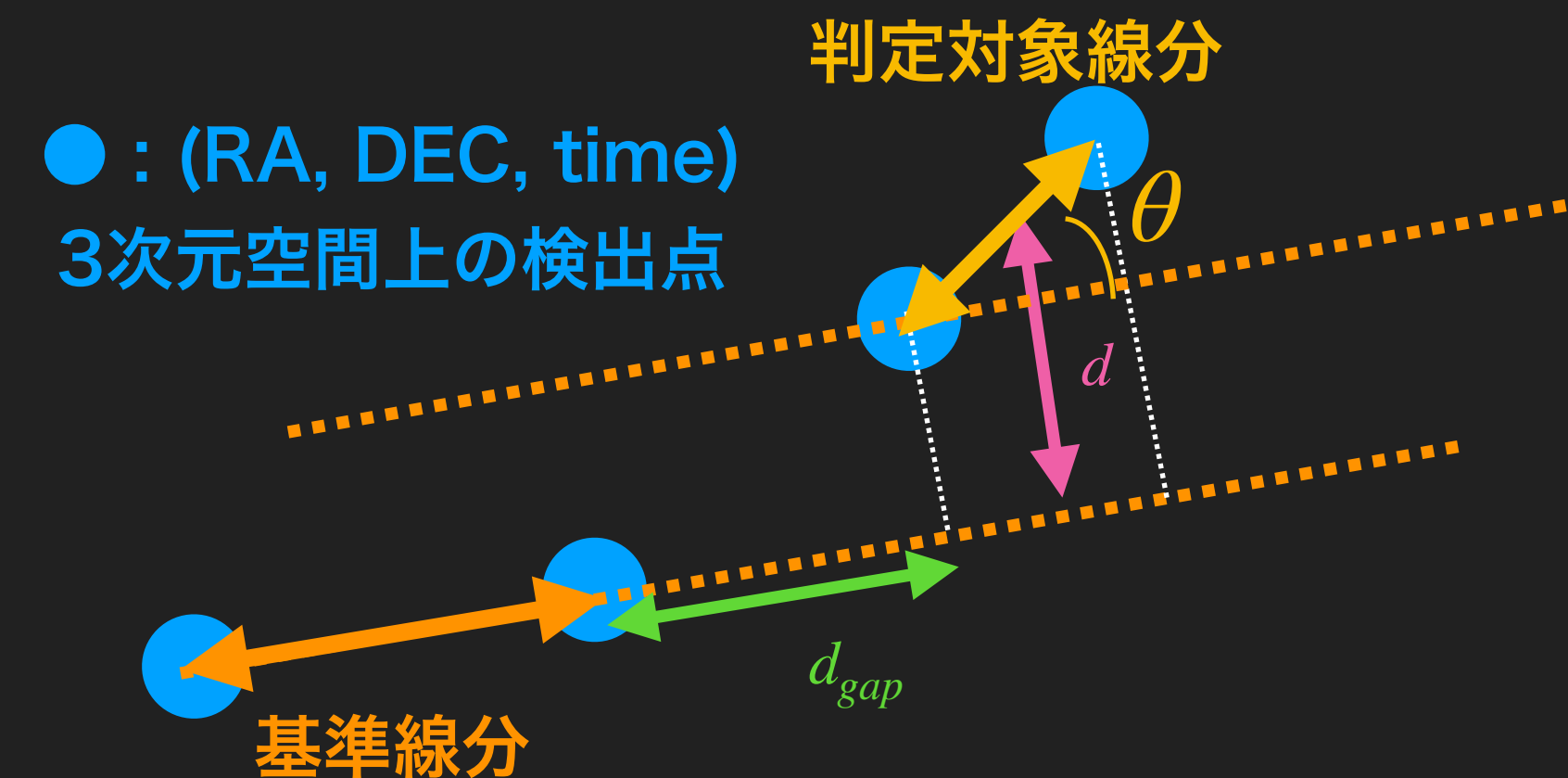
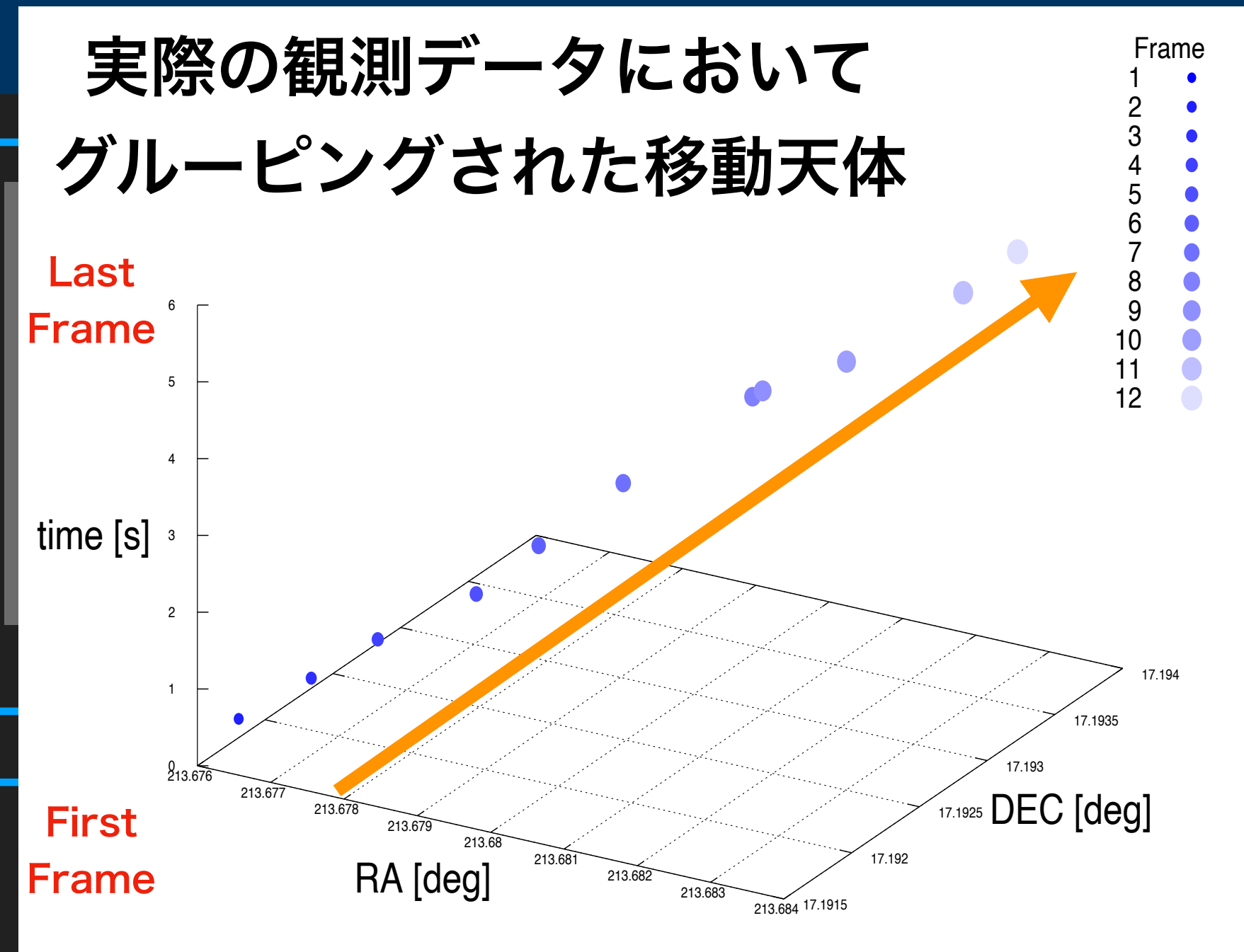
1. 恒星マスクを用いた天体検出

動画データの2フレームを用いた恒星マスクを作成。
2フレームに存在する非移動天体はマスクされ、
片方のフレームにしか存在しない移動天体はmaskされない。

2. 検出点のグルーピング

検出された全ての点を時間軸方向に
グルーピングすることで移動天体を検出する。
基準線分となす角度(θ)、垂直距離(d)、並進距離(d_{gap})
が閾値以下のものを同一グループとみなす。

しかし、検出天体には多くの誤検出が含まれる



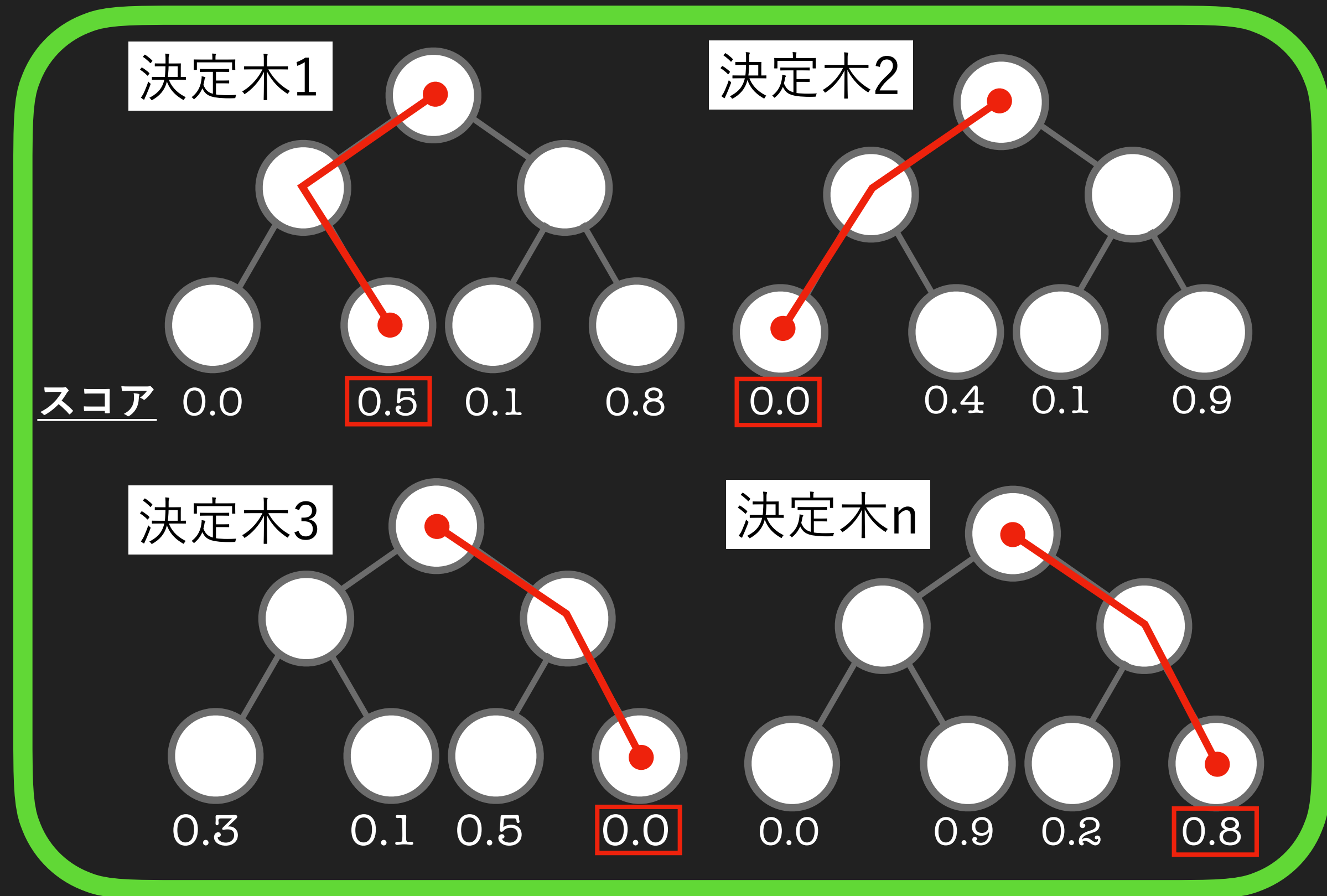
ランダムフォレスト機械学習アルゴリズム

- ・ 2001年にLeo Breimanにより提唱された機械学習アルゴリズム (Breiman 2001)
- ・ ノード間の情報利得を最大化することで分類を行う **決定木を複数使用**

利点

- ▶ 標本をランダムサンプリングし決定木を多数生成する **アンサンブル学習**により過学習を抑制
- ▶ **可視化することで結果の解釈が可能**

移動天体と誤検出(非移動天体)
の2分類モデルを作成



ランダムフォレストの概念図

機械学習を用いた分類モデルの作成

1. 教師データフレームセットの準備

Tomo-e Gozenの全天サーベイデータの中から、視野内の星の量、星像の広がりなど多様性を持つデータフレームセットを使用。
データフレームセットに移動天体(模擬天体)を埋め込む。

2. 教師データ(特徴量)の準備

1のデータフレームセットに対し実際の観測と同様の天体検出を行い、ラベルと特徴量(天体検出のパラメーター)のセットを取得。

3. 学習

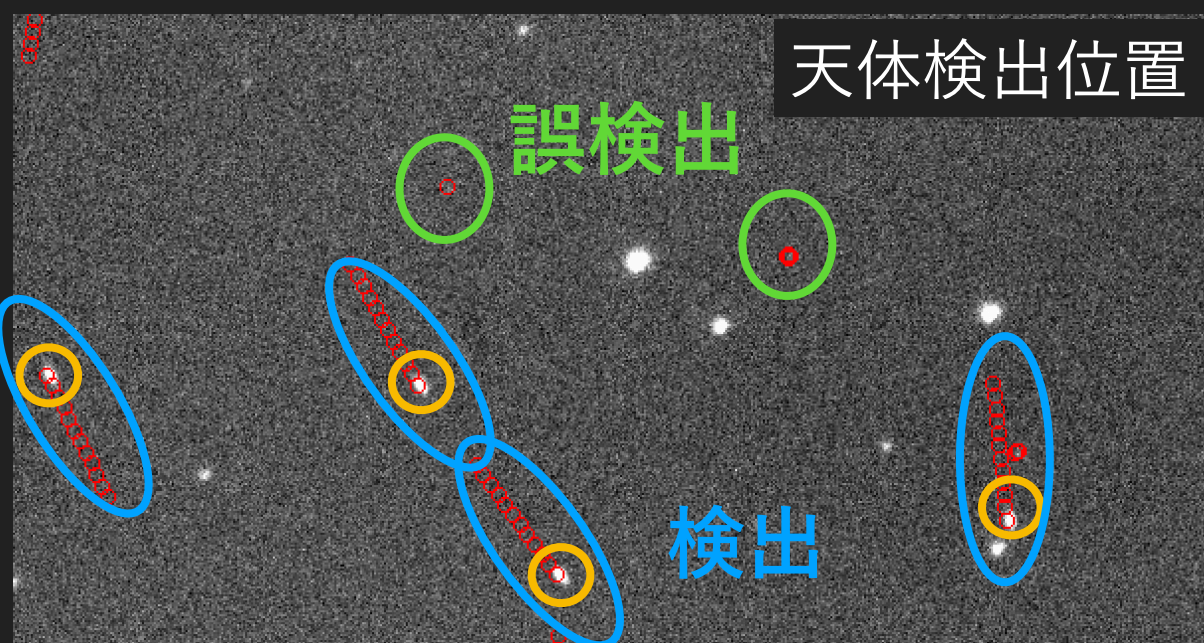
機械学習の特徴量の選択。

ハイパーパラメーターの選択

{ 木の深さ = 10
木の数 = 50
etc.

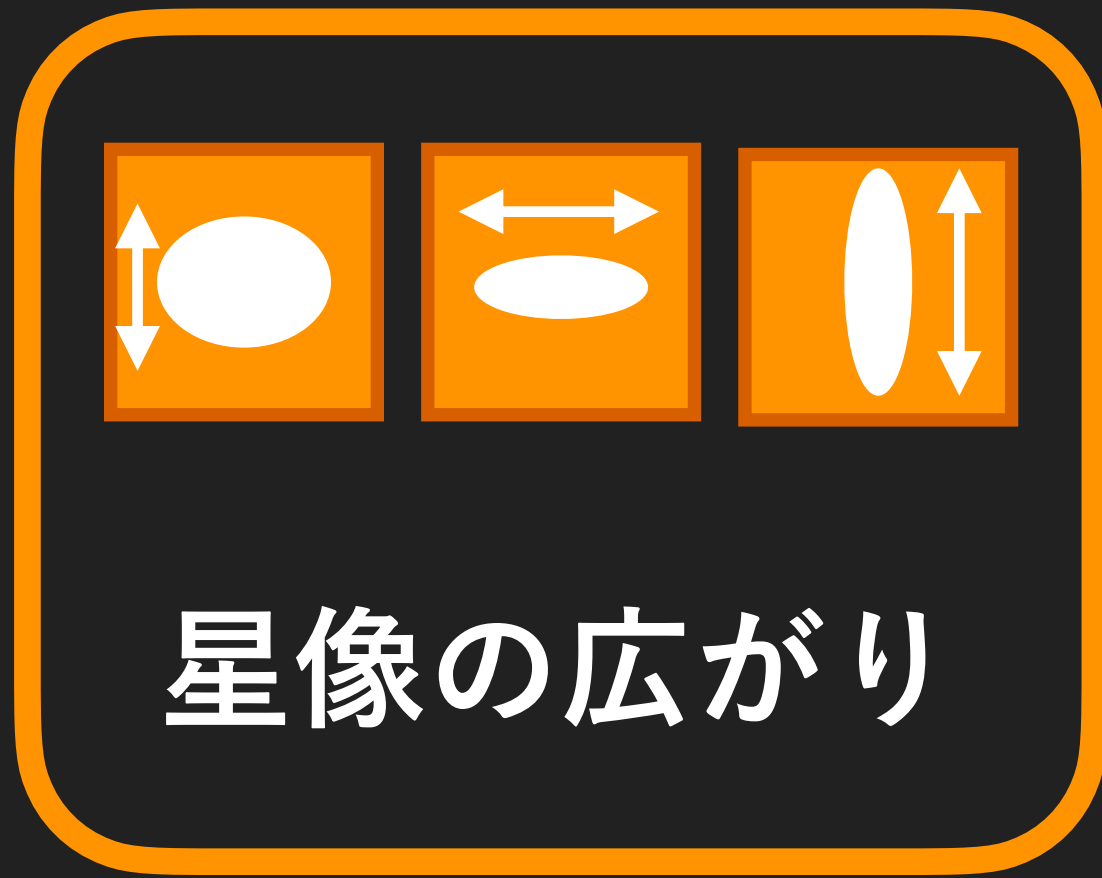
ラベルと特徴量のセット

	速度	x座標	検出数	ラベル
検出1	2	1	10	移動天体
検出2	1	4	4	誤検出
検出3	0.1	2	3	誤検出
検出4	4	102	10	移動天体

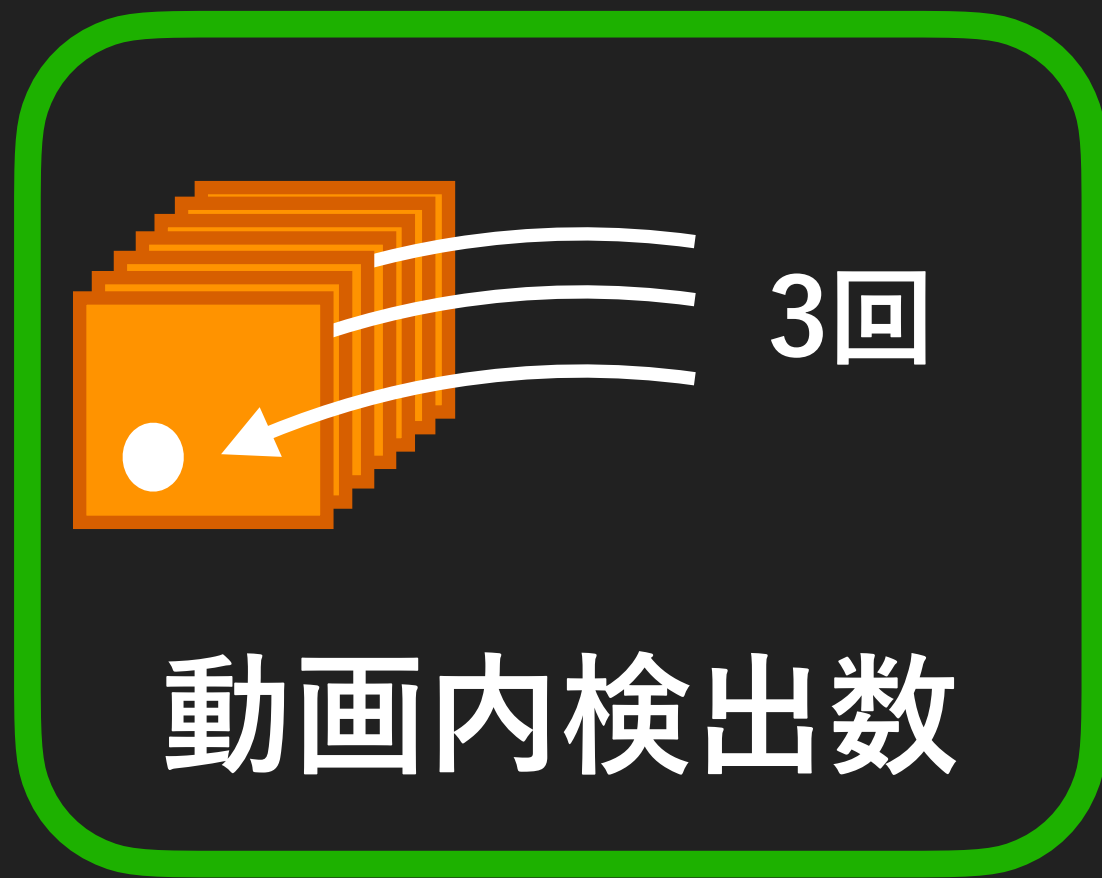


特徴量の選択

- 14の天体検出パラメーターを使用



静止画的
パラメーター



動画的
パラメーター

天体検出パラメーター	説明
x2, y2	PSFのx, y方向の2次モーメント
xy	PSFのx, y 方向の共分散
ferr	天体の明るさの誤差
peak	天体の明るさのピーク値
fop	開口内総フラックスとピーク値の比
fwhm	PSFのFWHM
bg_level	背景光の典型的カウント値
tracks	動画内検出数
vnorm	速度の大きさ
svx, svy	速度の標準偏差
cvx, cvy	速度の符号変化の割合

追跡観測のためのウェブアプリケーション開発

Moving Objects

elapsed_time: 0.13186955451965332
detections: 50
satenum: neonum: delnum:

既存天体との
マッチング

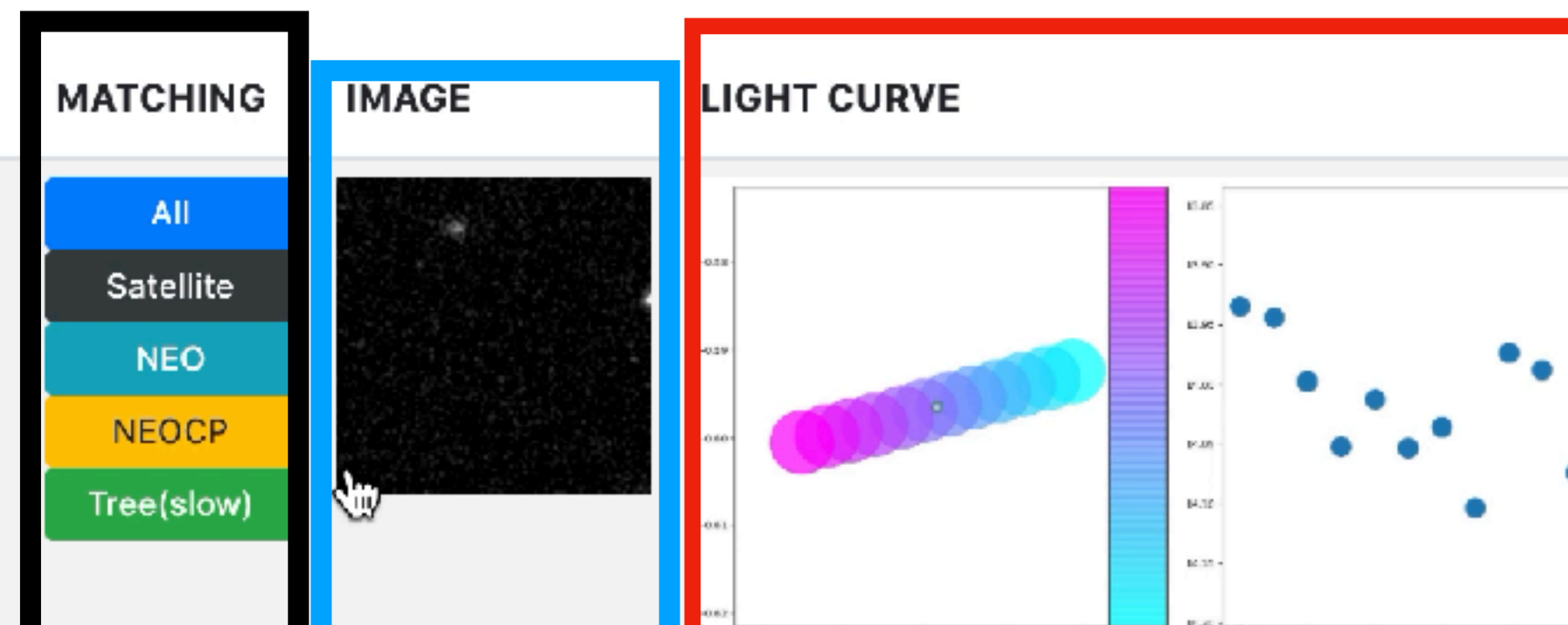
GIF動画

光度曲線

機
ス

NO.	OBSTIME	OBJECT FITS
1	2020-11-12T15:14:03.497 20Kawxlo_02776-00596 TMQ3202011120040252031.fits	Tracklet Search Circle fit

諸元

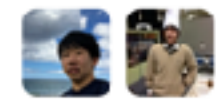


日本スペースガード協会(美星)とのリアルタイム連携



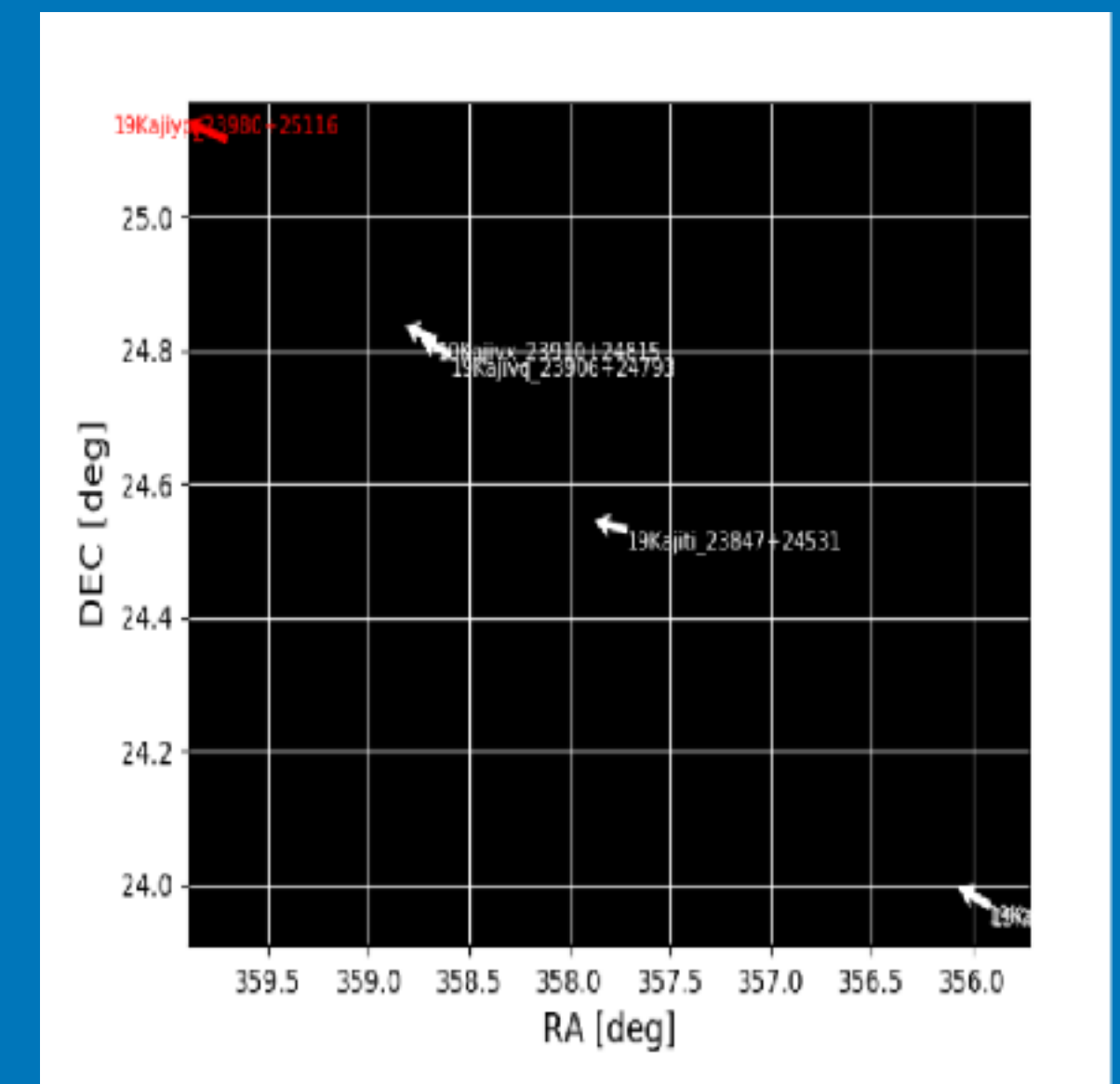
Seitaro Urakawa 01:29

TMG0063, TMG0064 追観測成功しました。両方ともあまり見たことない動きです。特にTMG0064は普通のサーベイでは見つかりそうにない高速移動天体ですね。



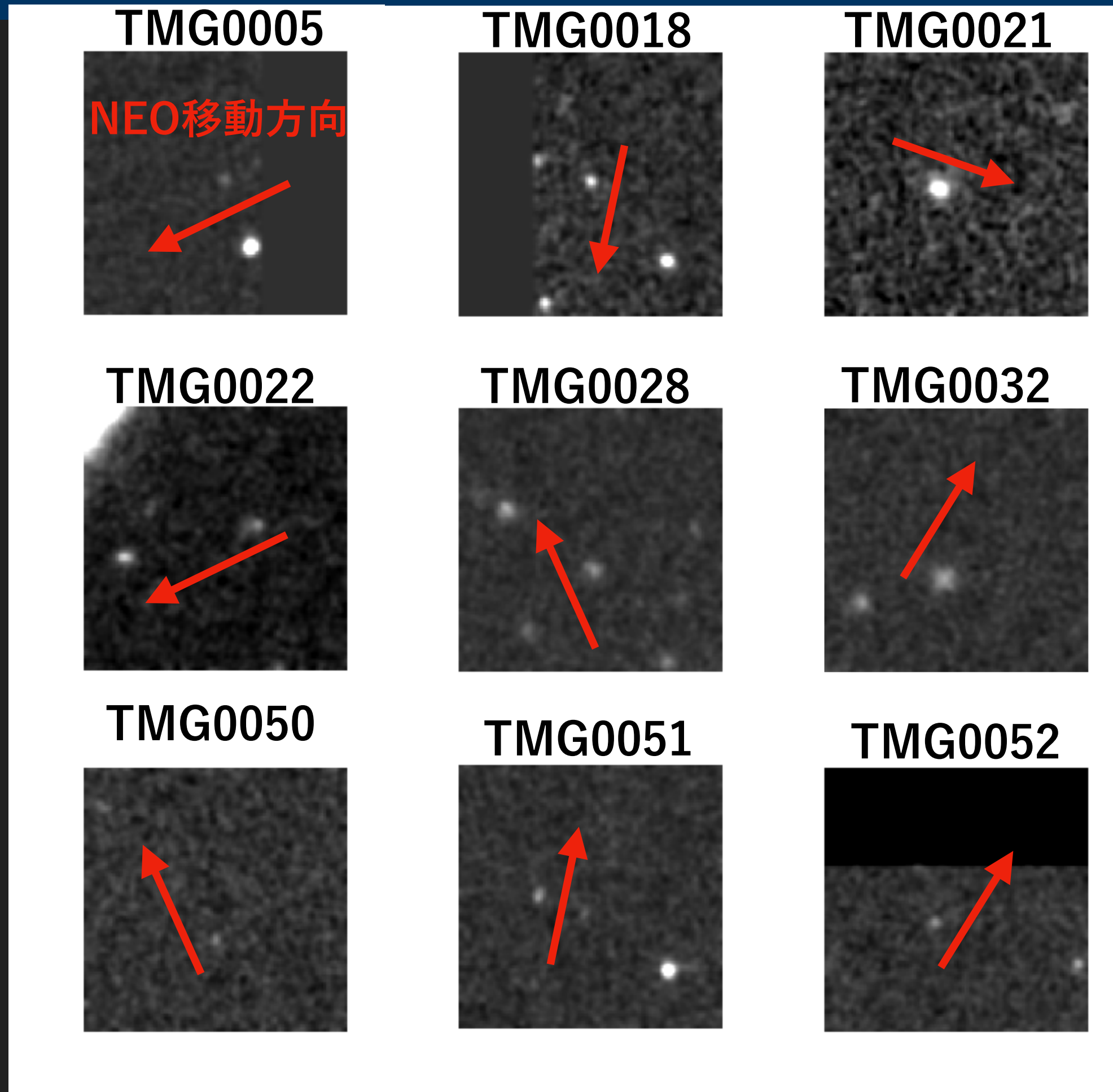
2件の返信 最終返信: 1ヶ月前

→ 候補天体を追観測



5回観測に成功した例
仮符号 2019 SU10 を取得
約1時間半で発見

発見したNEO



Tomo-e Gozenを用いてNEO 36天体を発見

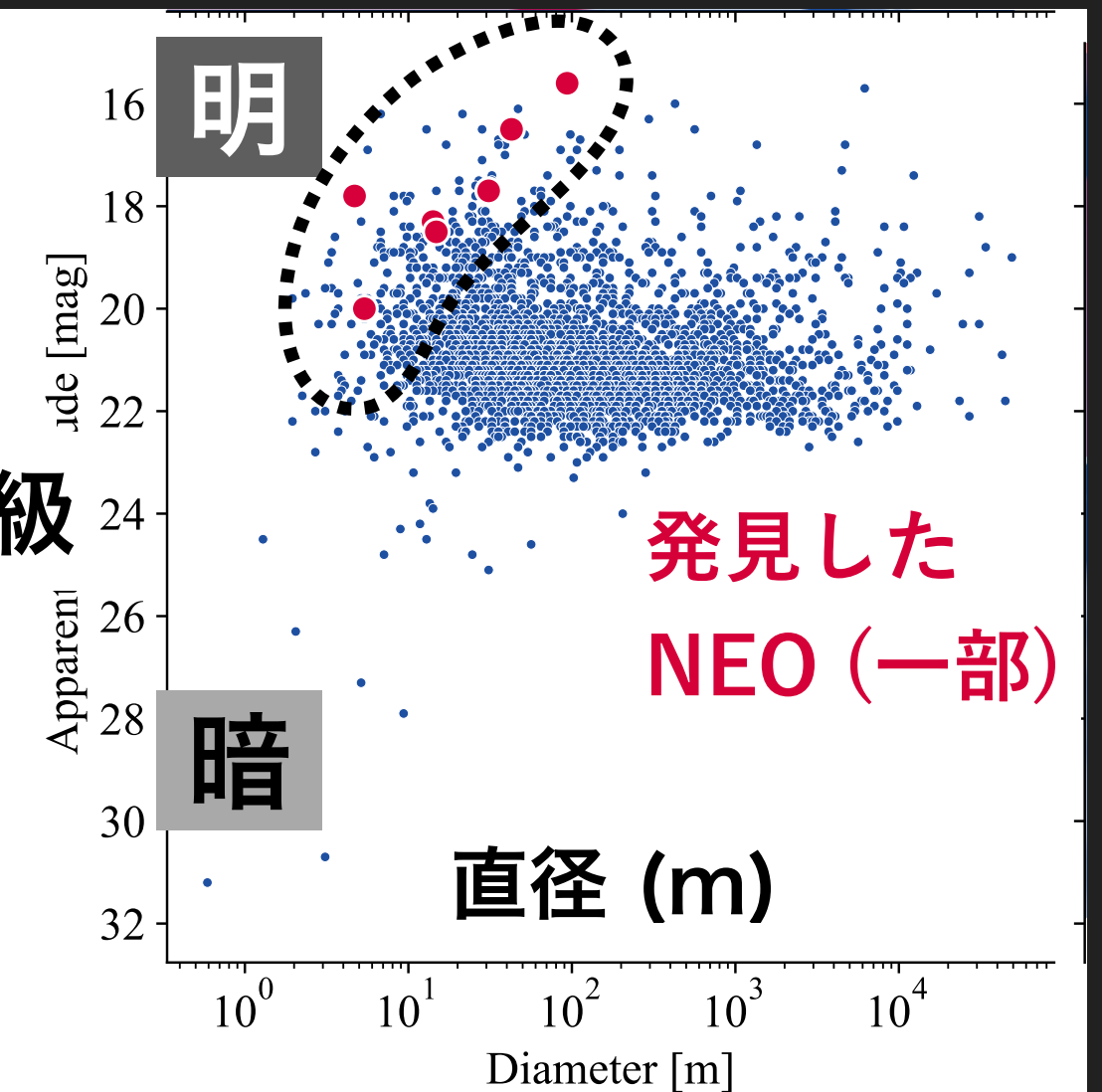
(2019.03 – 2022.02)

- ▶ 平均移動速度 ~ 3.0 arcsec/s
動画観測により感度低下の影響が小さい
- ▶ 平均直径 ~ 20 m *
他サーベイに比べ小さい
- ▶ 発見時可視等級 13.3 - 17.7 mag
明るく追観測が比較的容易

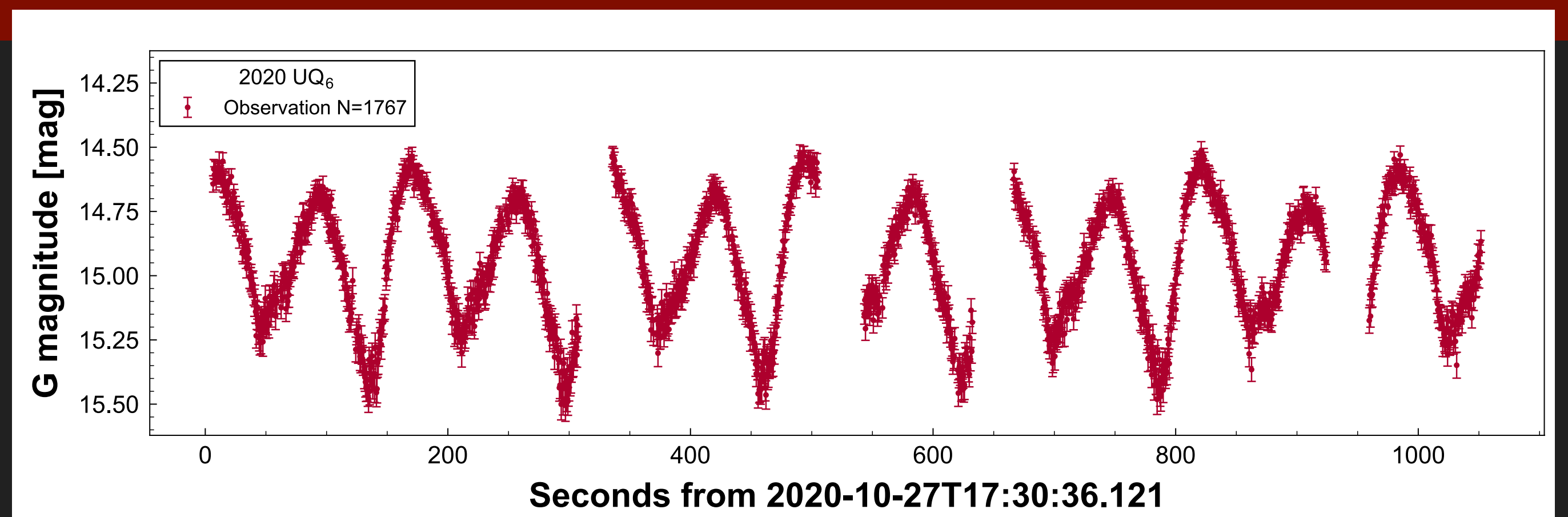


微小天体の自転周期分布を得るための即時追跡観測
→ 微小天体の力学史

視等級



Part2. 微小地球接近小惑星の 即時追跡観測によるサイエンス



科学的背景

- はやぶさ、はやぶさ2、OSIRIS-RExなどによる小惑星の詳細探査 + サンプル採取

-
- 100 m 級小惑星がラブルパイル
 - 宇宙風化作用に関する知見

- ラブルパイルの構成物である一枚岩の理解は乏しい。どのような**強度**、組成をもつのか？

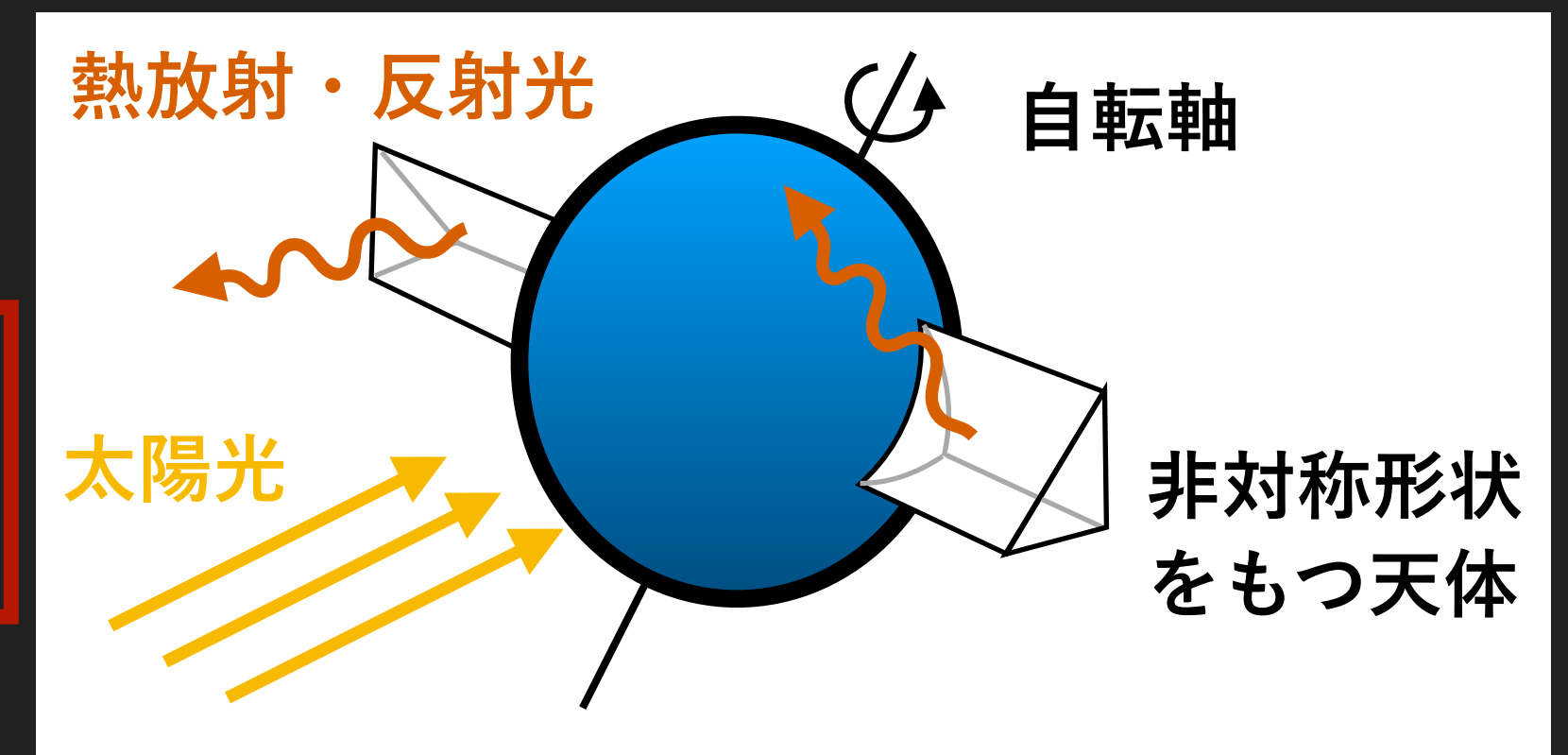
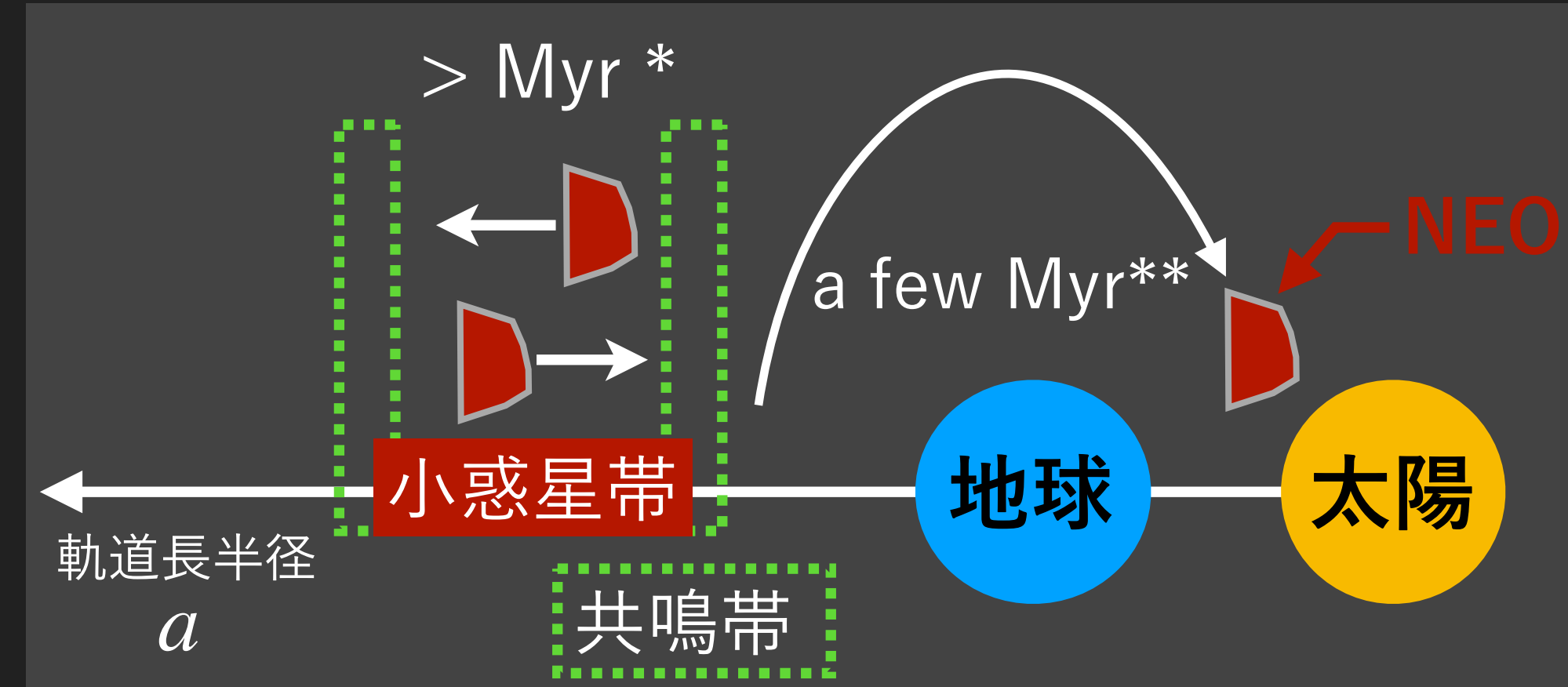
地球接近小惑星 (Near-Earth Objects, NEOs)

- ▶ 近日点距離 $q < 1.3$ au
- ▶ メインベルトから軌道発展 (~ 10 Myr)
→ 太陽輻射に起因し 自転状態が変化



小惑星 Ryugu

(クレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)



ヨーロッパ
YORP 効果 ***
(Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack)

YORP効果の概念図

* Greenberg+2020

** Gladman 1997

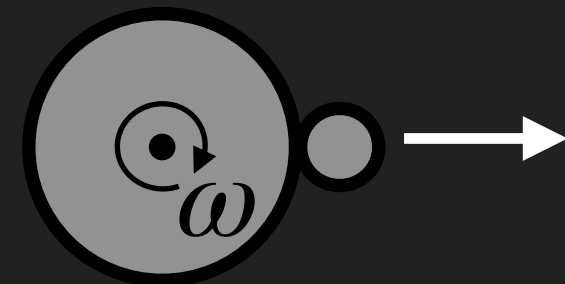
*** Rubincam 2000

直径-自転周期分布

・ 重力スピンバリア $P = \text{const.}$

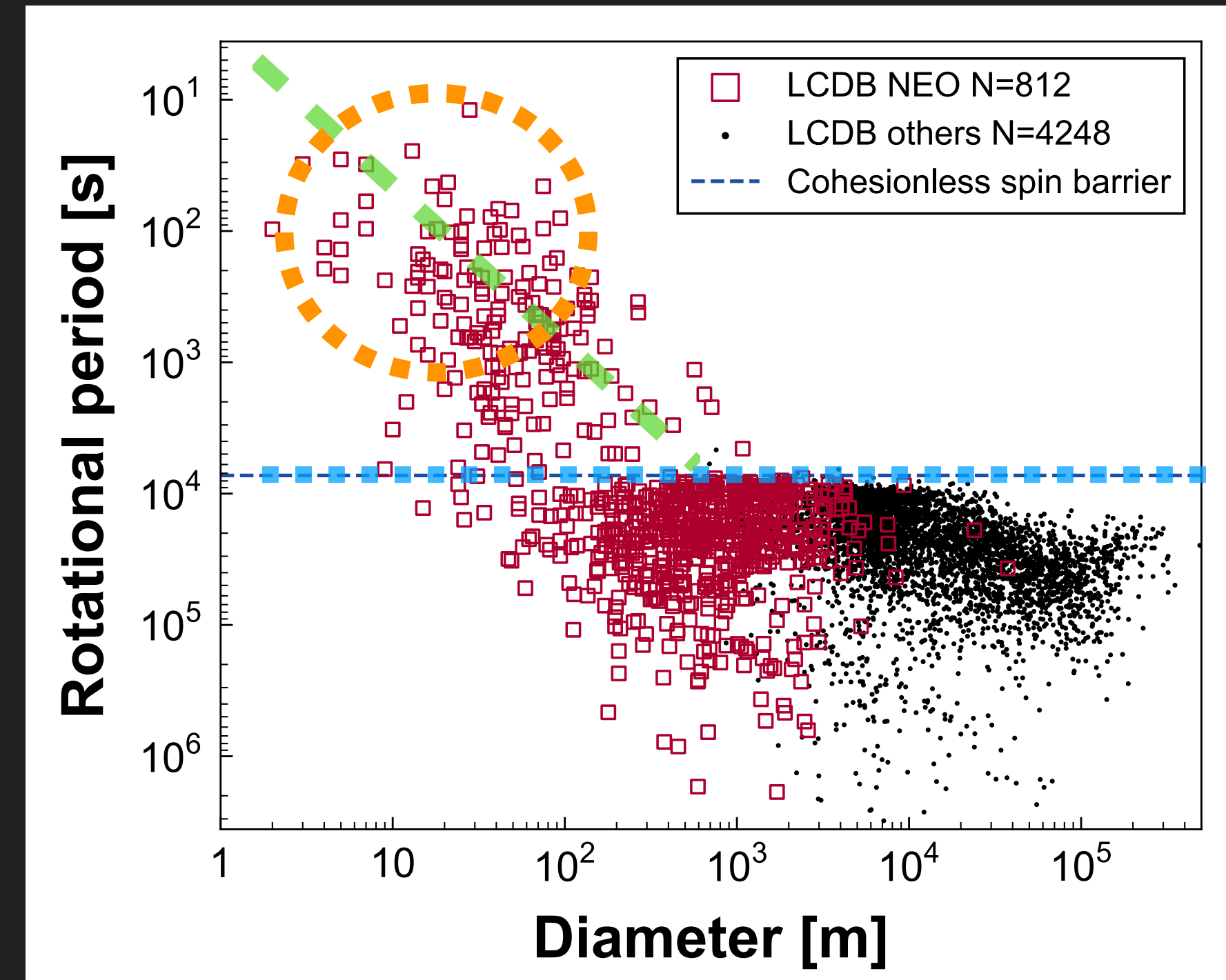
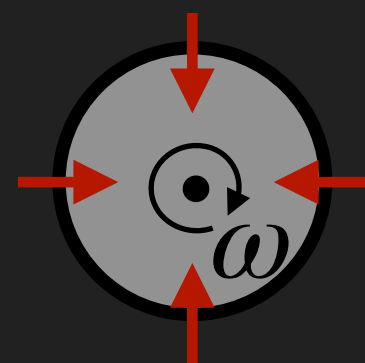
- ▶ 大きな小惑星 ($D > 100$ m)、観測数 **多**
- ▶ 自転周期2時間以下で遠心力に耐えきれず自転破壊 (Pravec & Harris 2000, Icarus, 148, 12)

$$mR\omega^2 = G\frac{mM}{R^2} \leftrightarrow \omega = \sqrt{\frac{4\pi\rho G}{3}}$$



・ 強度スピンバリア

- ▶ 微小小惑星 ($D < 100$ m)、観測数 **少**
- ▶ 一枚岩小惑星は引っ張り強度により構造を保持し、重力スピンバリアより高速自転可 (Holsapple 2007, Icarus, 187, 500)



小天体の直径-自転周期関係*

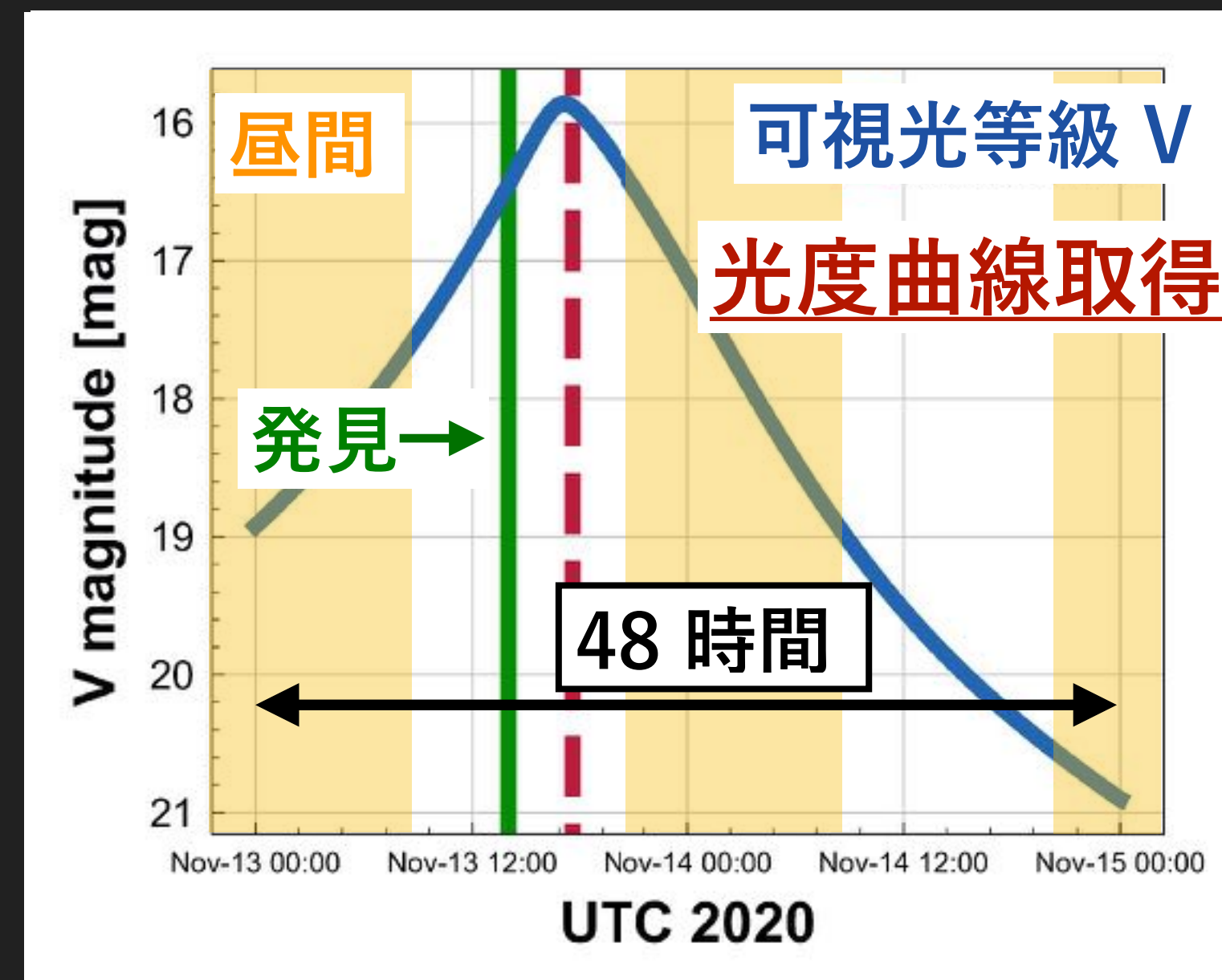
Question

微小小惑星の強度スピンバリアは観測的に存在するのか？

微小NEO観測の困難性

限られた観測可能時間

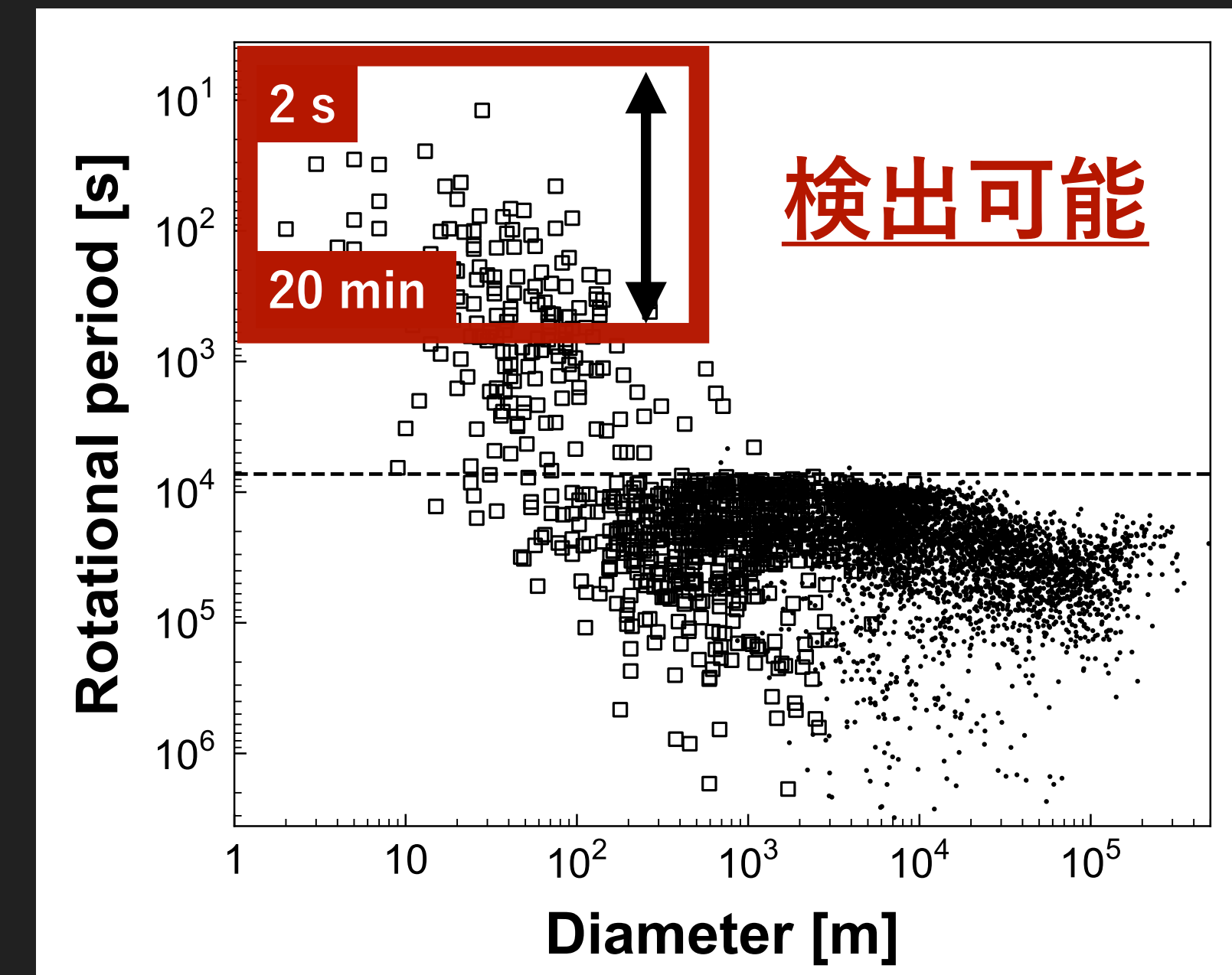
微小NEOは地球接近時に明るくなるが
その期間は数時間から数日と短い



直径 5 m NEO 2020 VH₅ 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

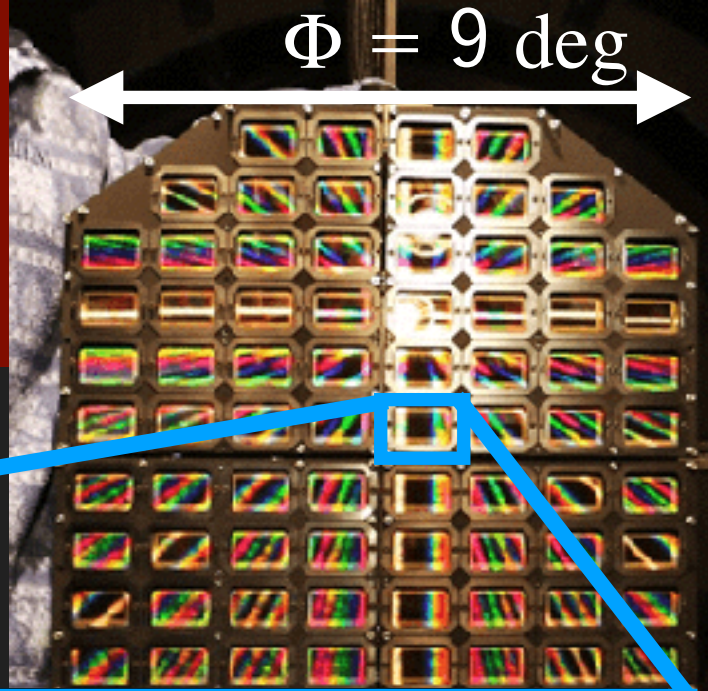


小天体の直径-自転周期関係

→ 本研究では、迅速な2 fps 高速撮像観測を実施

観測 & 解析

焦点面に搭載された
Tomo-e Gozen



- 観測装置: **Tomo-e Gozen** (Sako+2018)
 - 木曾 105 cm シュミット望遠鏡, 広視野高速カメラ
 - 2 fps 動画観測

観測対象

- $H > 22.5$ ($D < 100 \text{ m}^*$) かつ $V < 17.0$ を満たす **NEO 51天体**

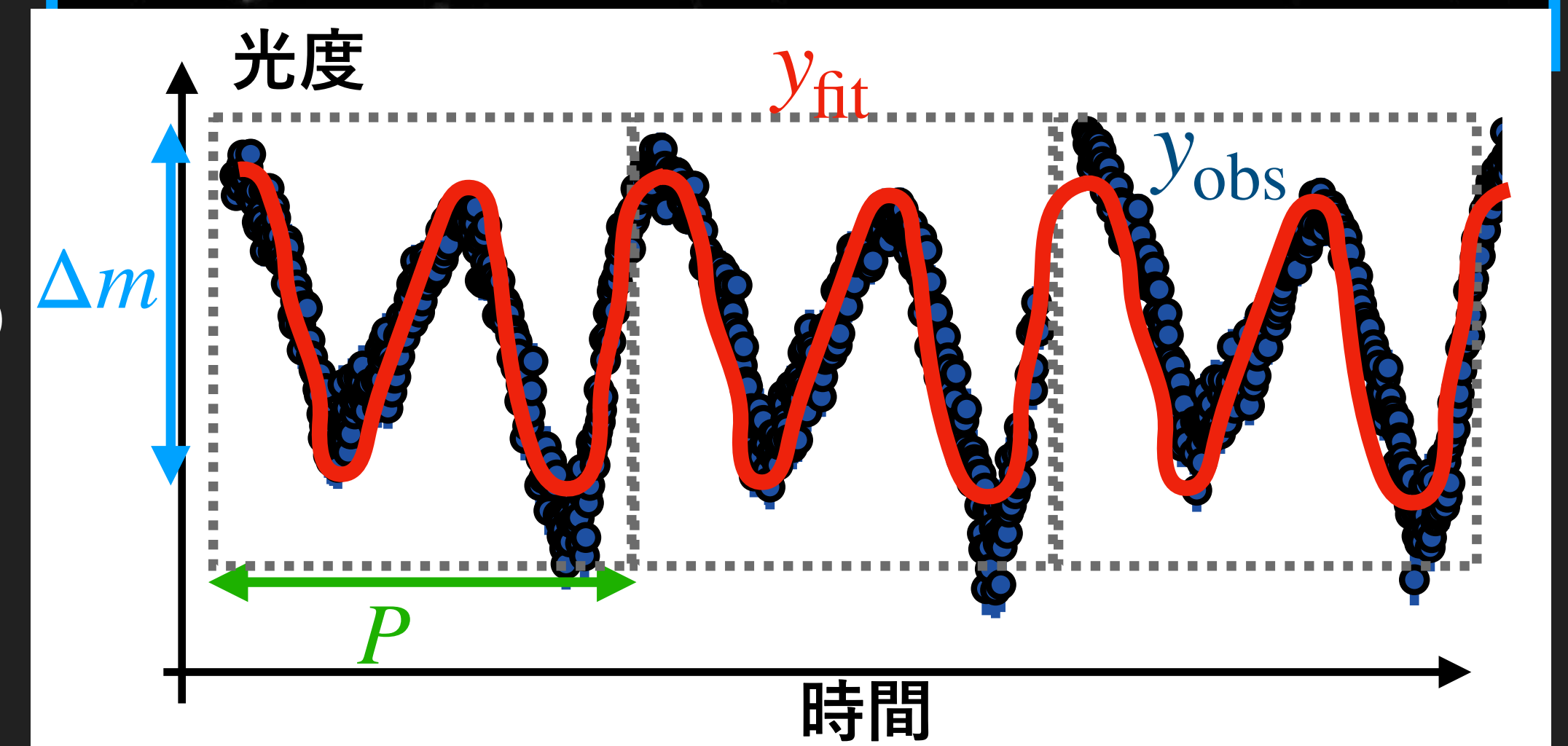
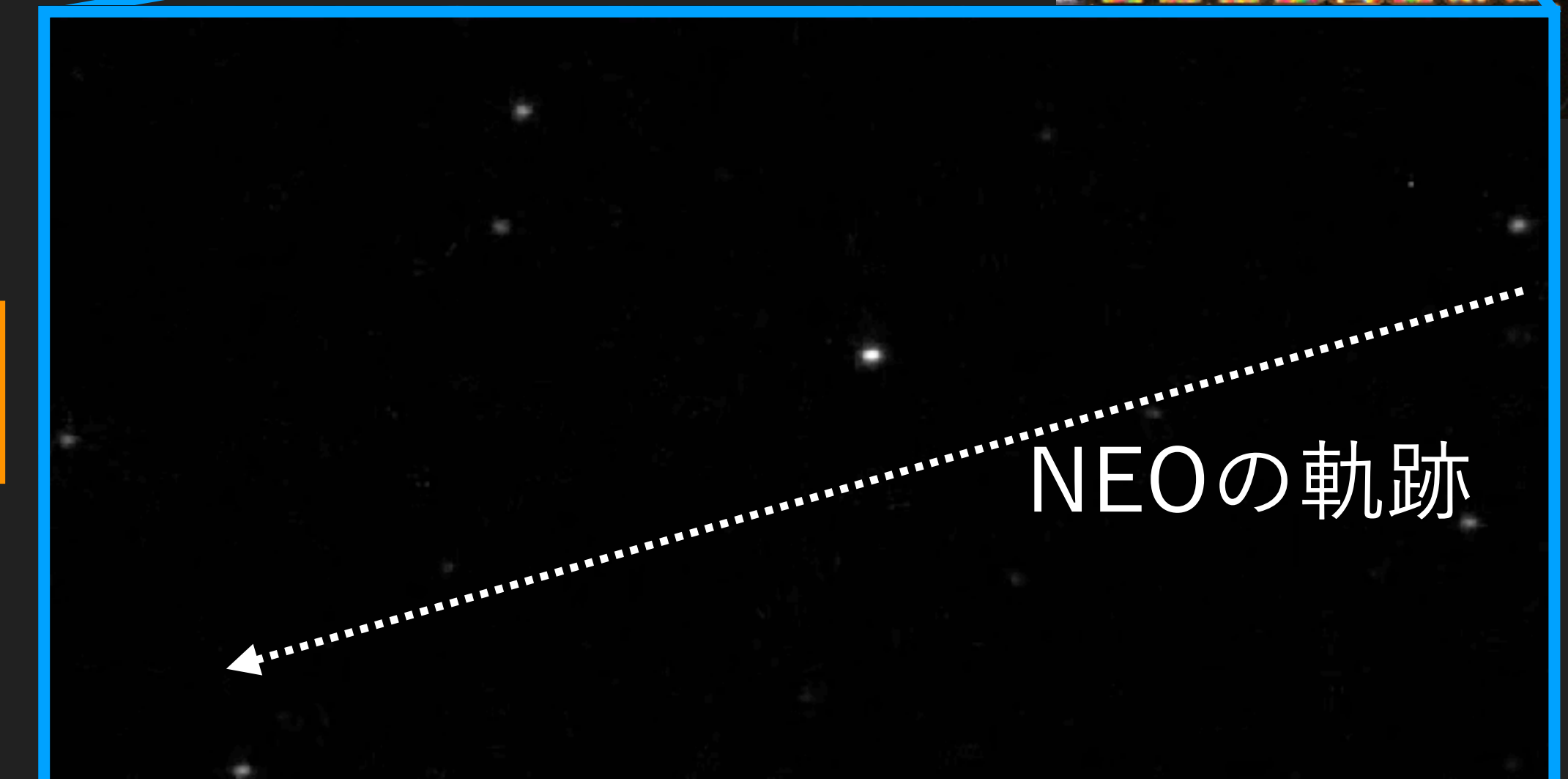
観測期間 & 時間

- 2018年5月 – 2021年5月
(現在も継続中、これまでに合計77天体)
- 典型的に1天体20分

40%にあたる19天体は
Tomo-e Gozenを用いて自ら発見

解析手法

- 開口測光 (SEP**を使用)
 - 視野内を移動するNEOを追跡
 - Gaia カタログ (G-band等級) で等級を決定 (Gaia Collaboration+2018)
- 周期解析 (Lomb-Scargle法, Lomb1976, Scargle1982)
三角関数での最小二乗フィッティングから
自転周期 P , **等級振幅 Δm** を推定

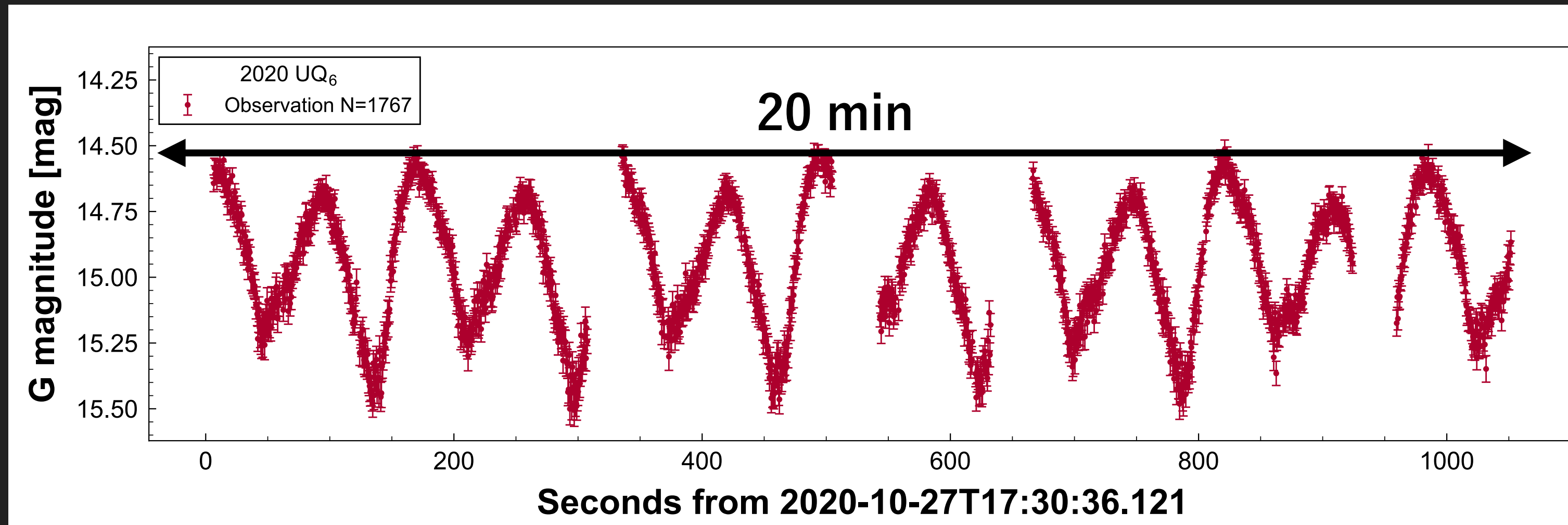


* 可視光幾何アルベド $p_V = 0.2$ を仮定

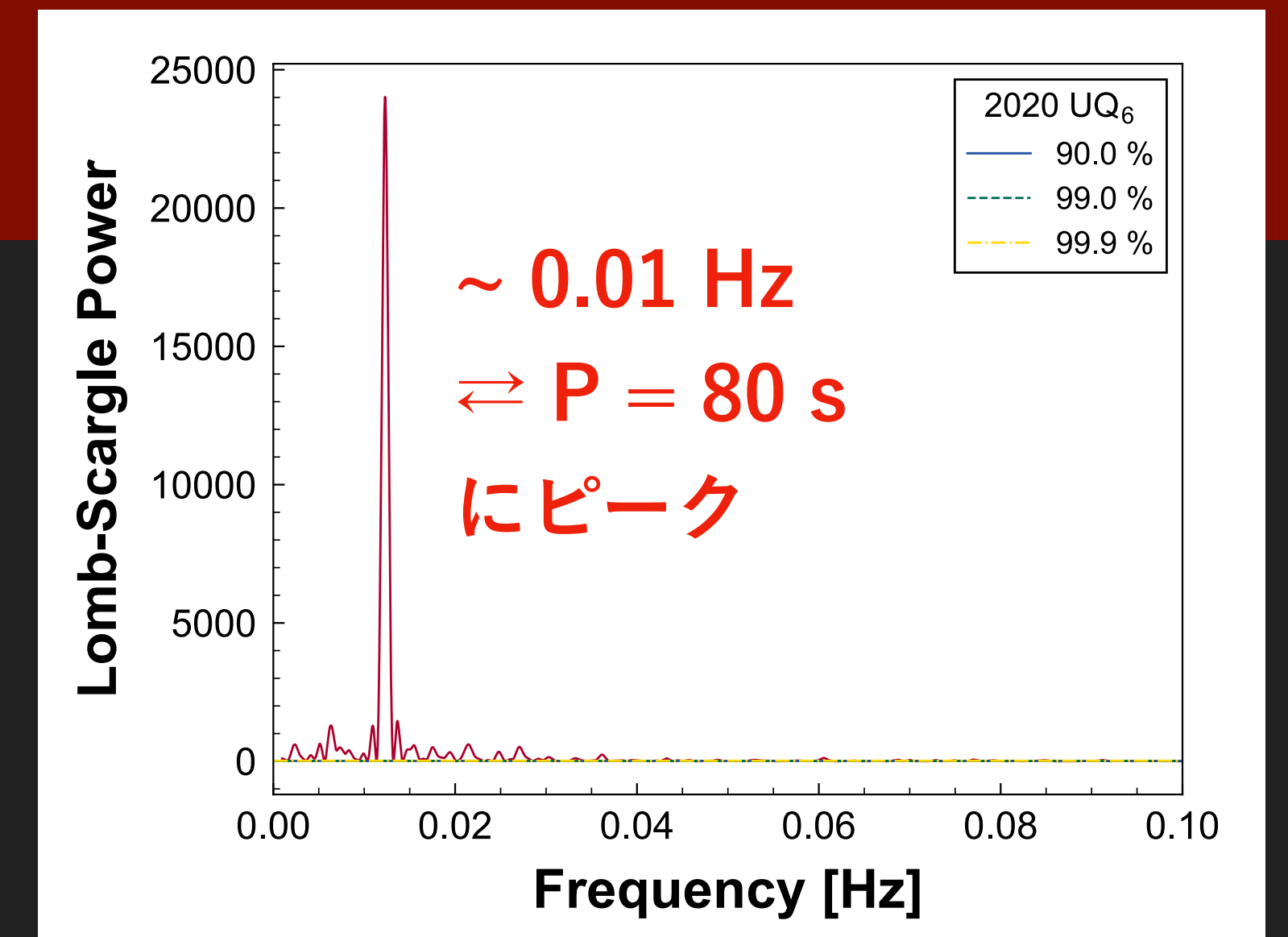
** <https://sep.readthedocs.io/en/v1.0.x/>

結果 ① 光度曲線

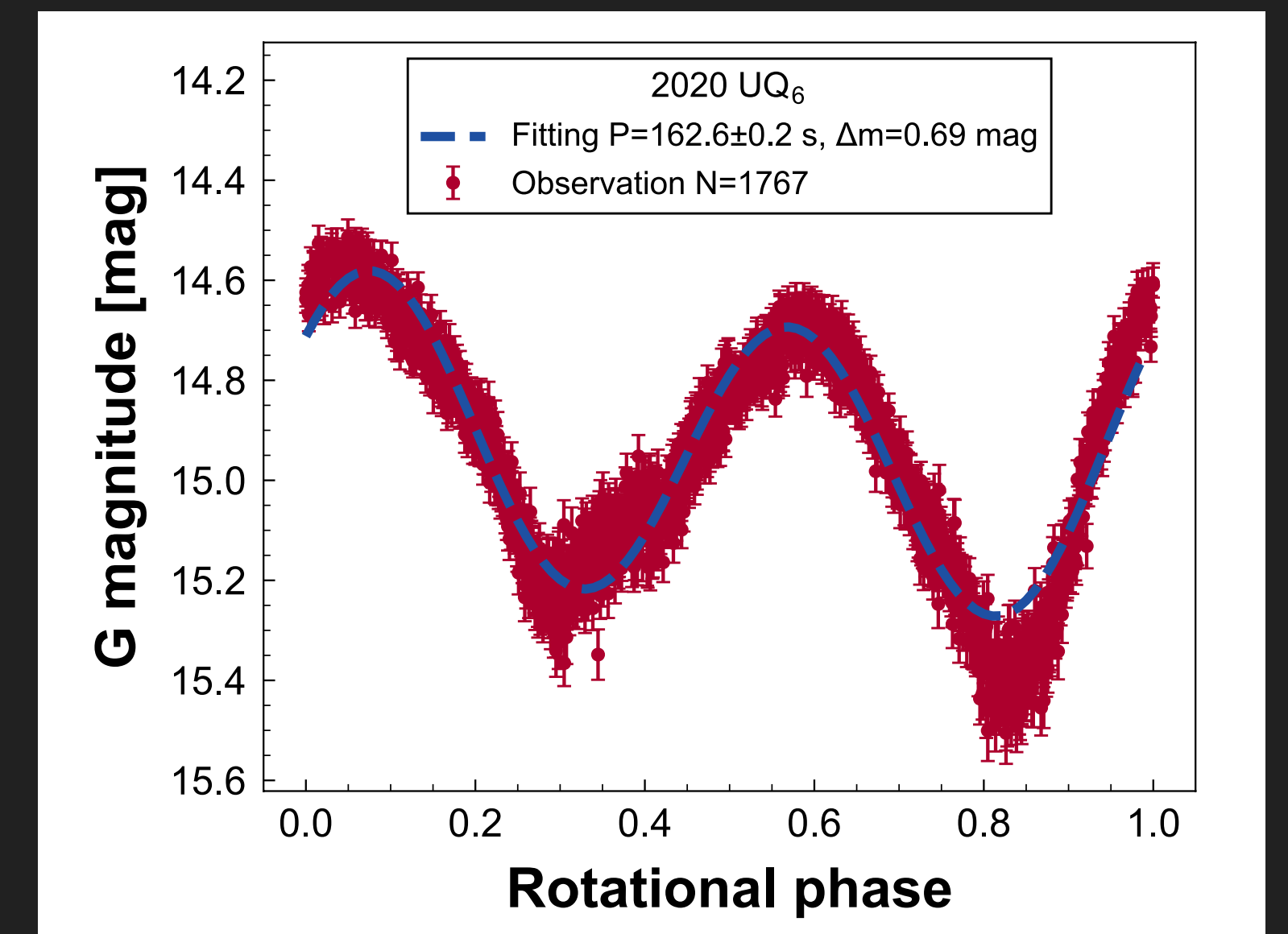
2020 UQ₆ (D = 86 m, 位相角 $\alpha = 16.0^\circ$)



光度曲線 (約20分間)



ピリオドグラム

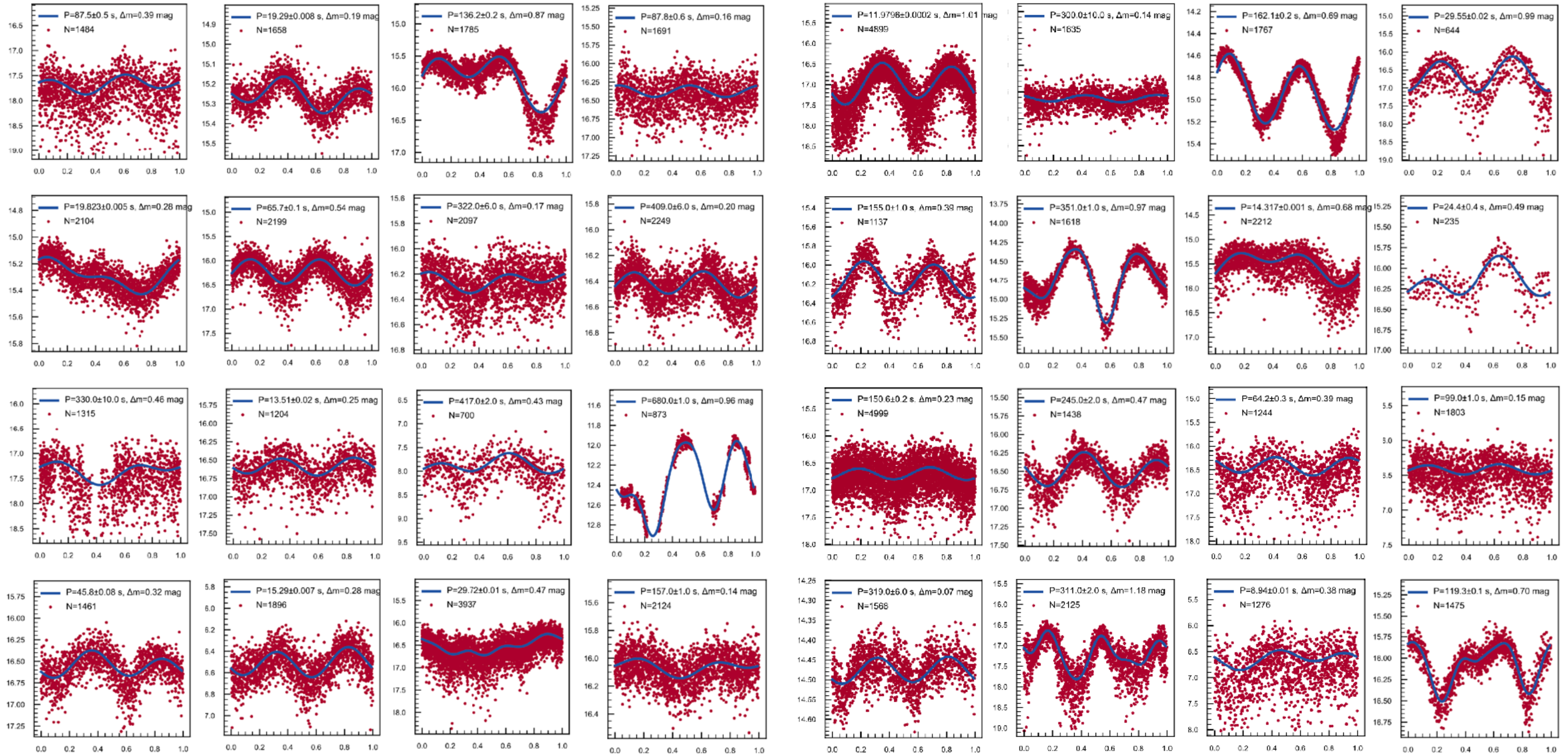


折り返し光度曲線

P = 162.6 s, $\Delta m = 0.69$

結果 ① 光度曲線

32天体の自転周期を推定



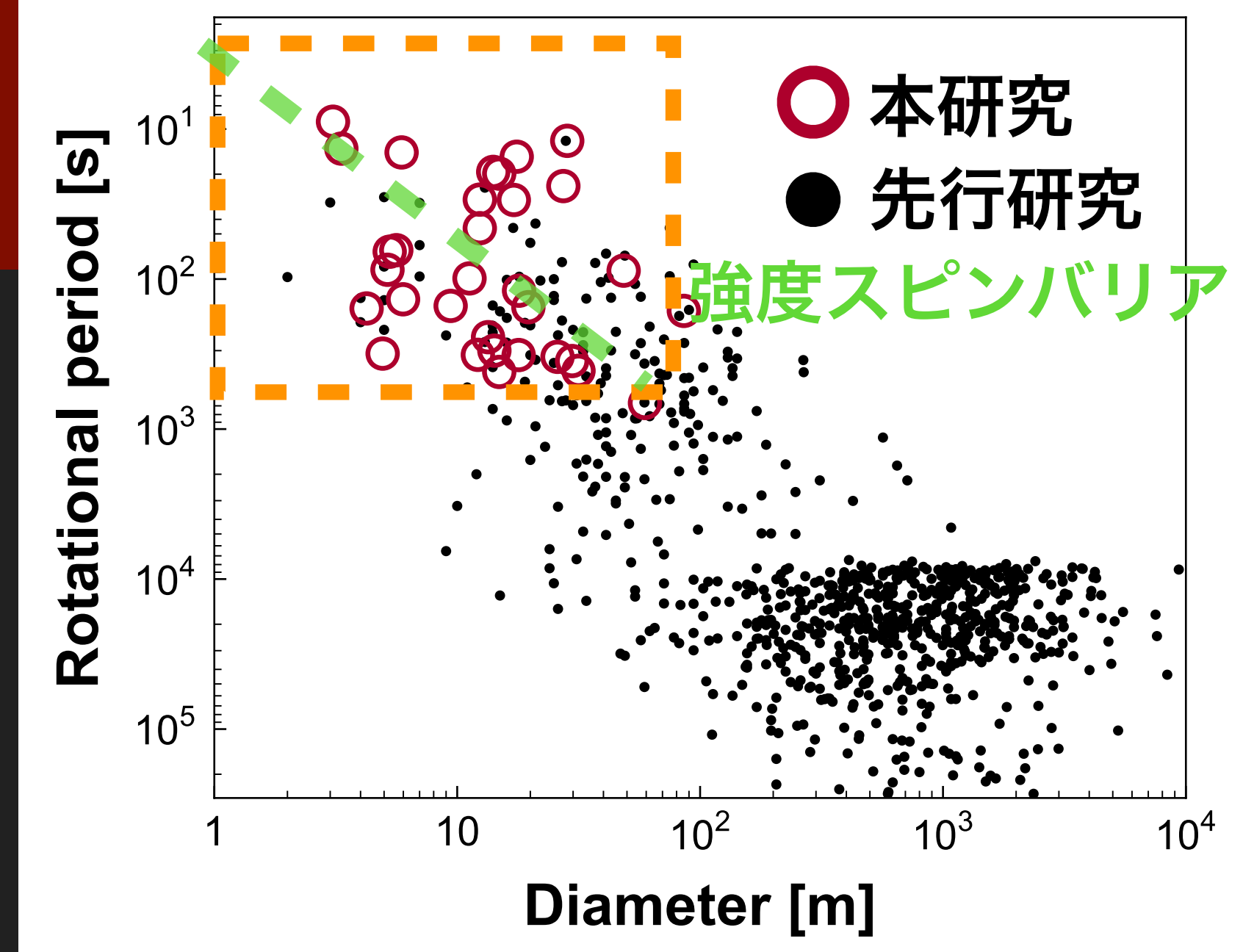
結果 ② 直径 - 自転周期関係

周期解析結果

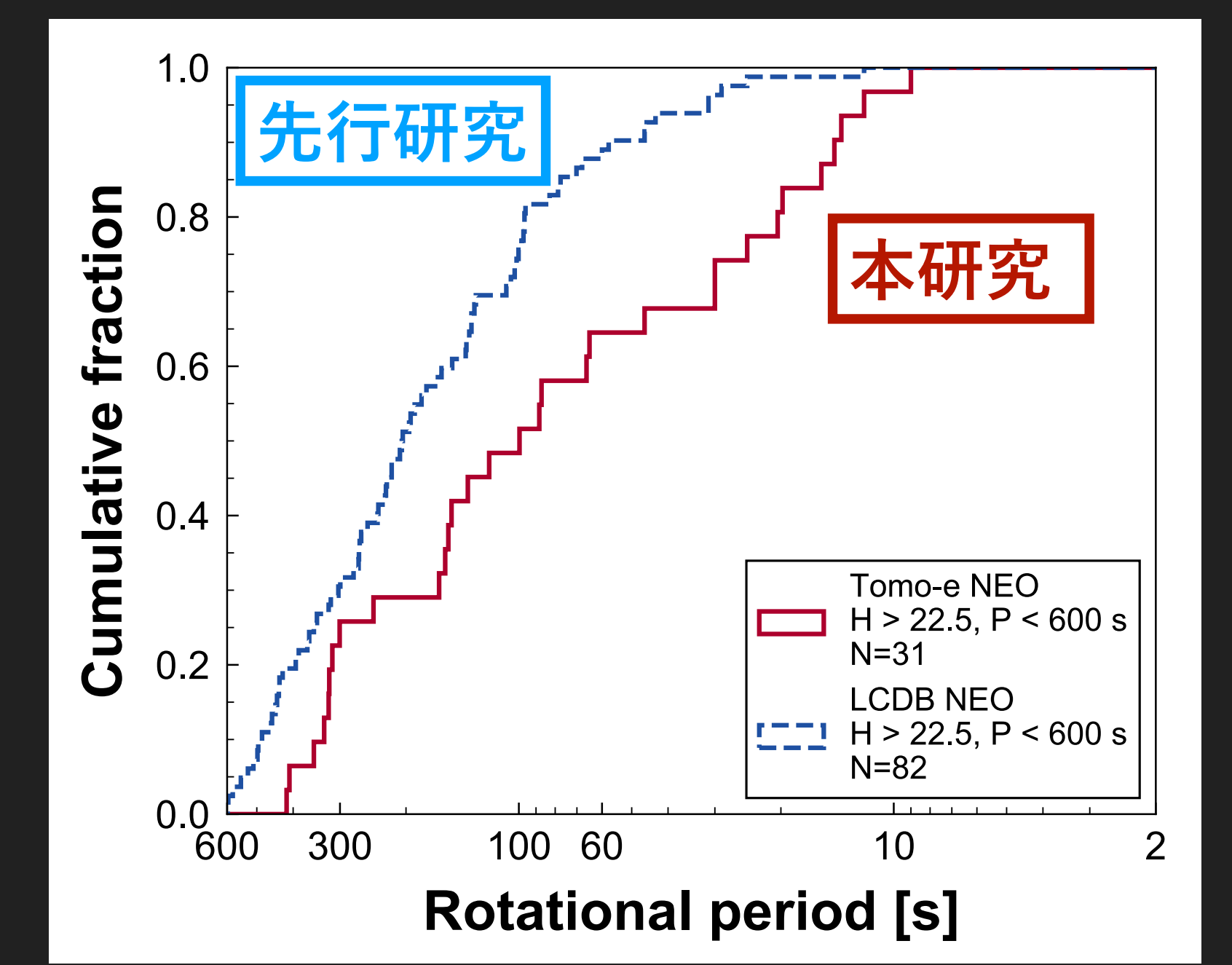
- ▶ 自転周期を推定 : 32天体
- ▶ 平坦な光度曲線 : 13天体
- ▶ 複雑な光度曲線 : 2天体
- ▶ 観測時間より長い周期での光度増減 : 4天体

先行研究(LCDB)と自転周期分布を比較

- ▶ Kolmogorov-Smirnov 検定
 帰無仮説: 「先行研究と本研究の自転周期分布が等しい」
 → p値: 0.026 3%の有意水準で帰無仮説を棄却
- ▶ 長時間露光による高速自転の見落としを示唆



観測天体を含めた小天体の直径 - 自転周期関係



* Warner+2009, Light Curve DataBase 2021年6月版, U >=3

YORP効果による自転加速

YORP効果によりNEOの自転周期をどこまで加速できるか計算

仮定

- ① NEOの初期自転周期は以下の式に従う
(Kadono+2009の図3より)

$$P_{init} = 10 \left(\frac{D_{NEO}}{1 \text{ m}} \right) \text{ [s]}$$

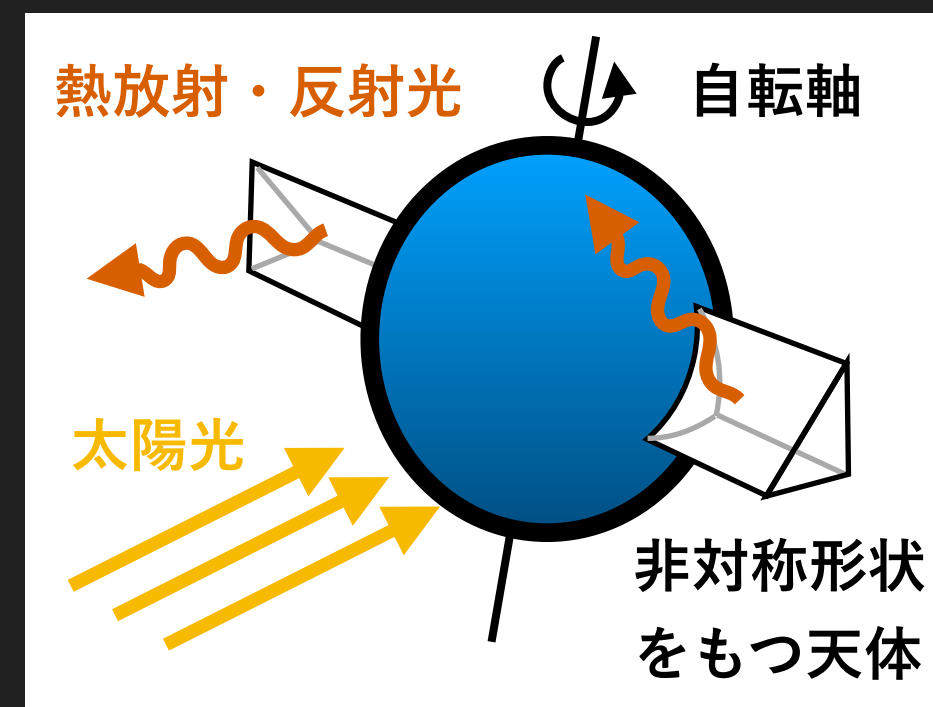
P : 自転周期 [s]
 D : 直径 [m]

- ② YORP効果はBennuの加速度をスケーリング
(Hergenrother+2019)

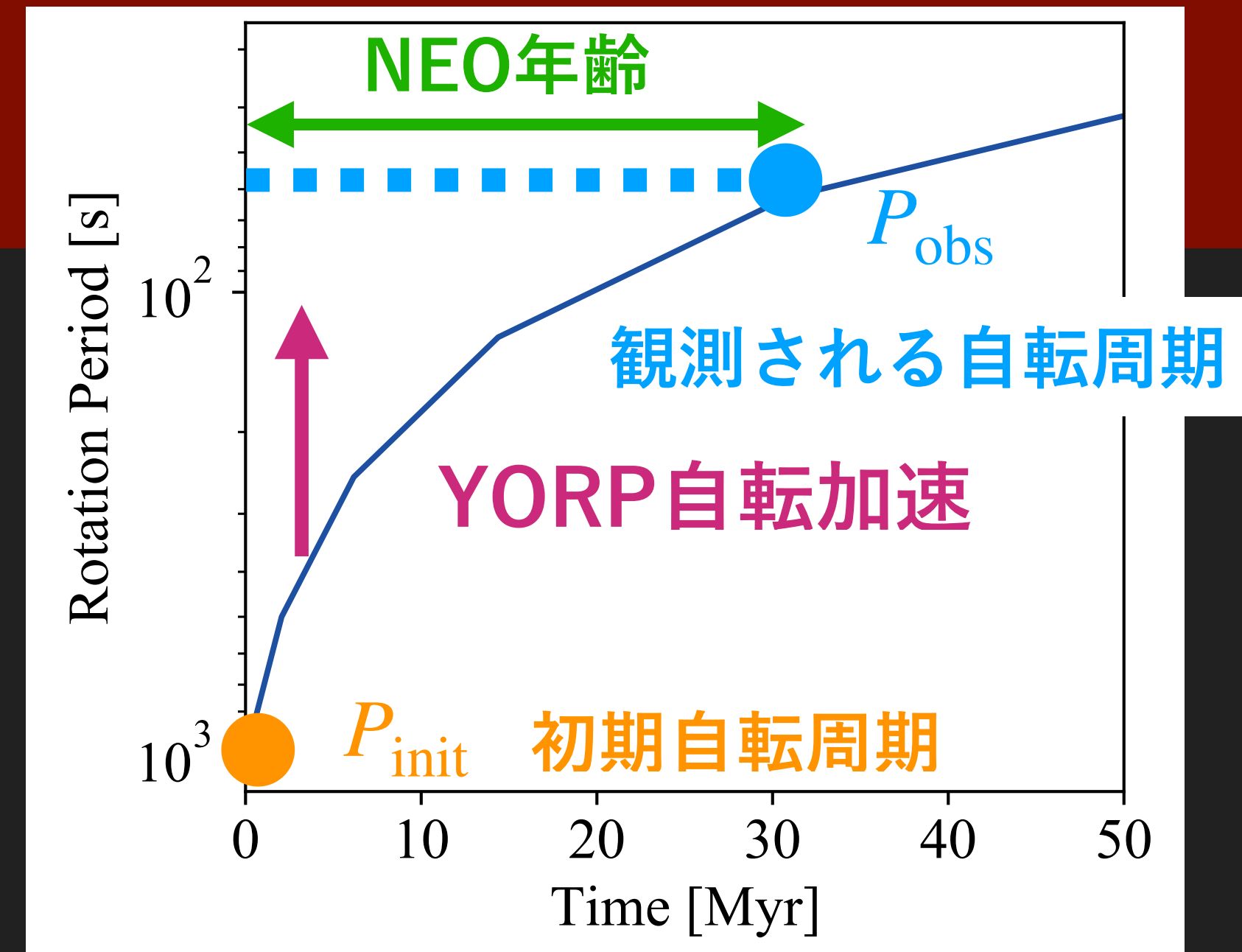
$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{a_{Bennu}^2 \sqrt{1 - e_{Bennu}^2}}{a_{NEO}^2 \sqrt{1 - e_{NEO}^2}} \right) \left(\frac{D_{Bennu}}{D_{NEO}} \right)^2 \left(\frac{\rho_{Bennu}}{\rho_{NEO}} \right) \cdot 3.63 \cdot 10^{-6} \text{ [deg/day}^2\text{]}$$

NEOの軌道要素は内側小惑星帯の値で固定 ($e = 0, a = 2$)

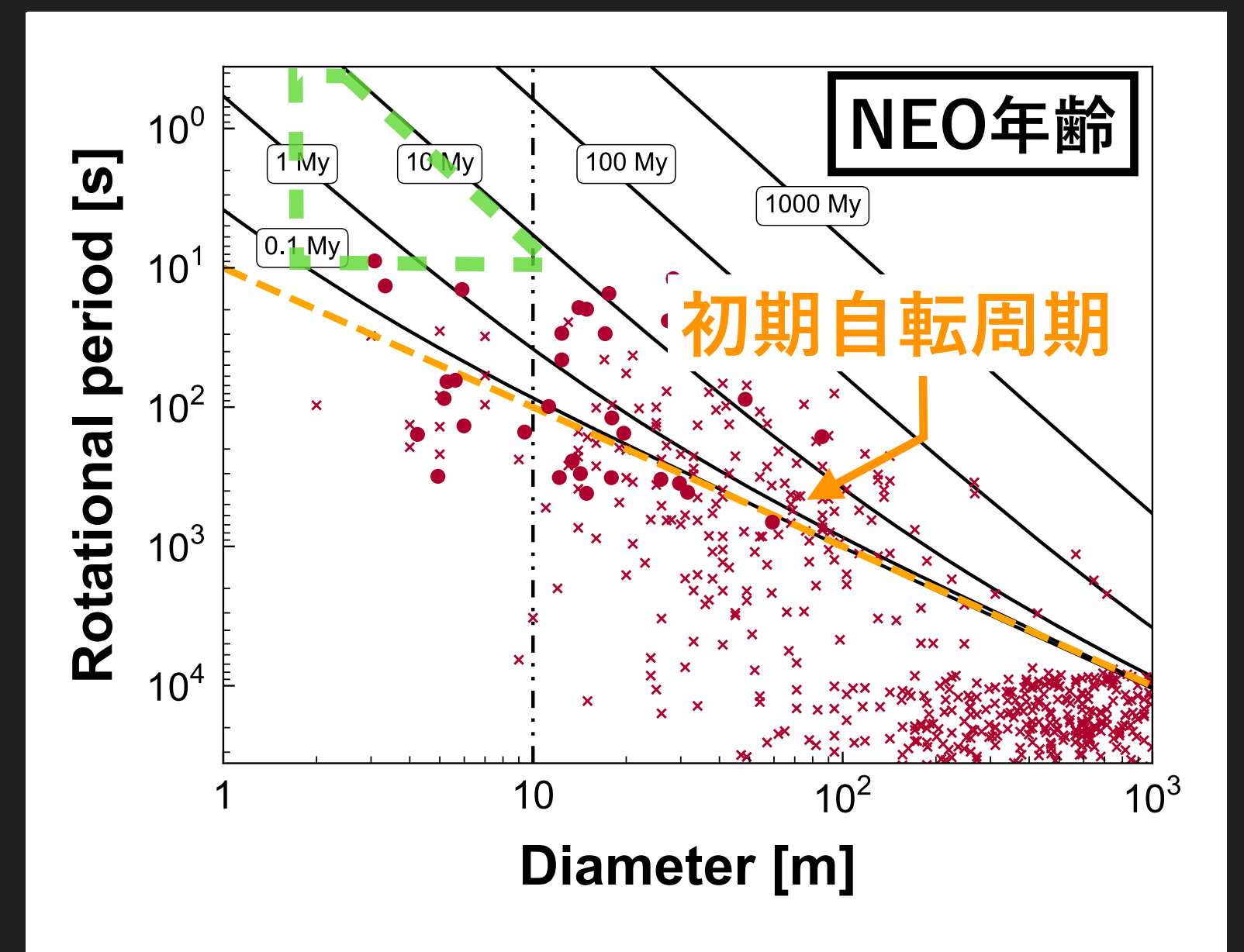
ω : 自転速度 [day/deg²]
 ρ : 密度 [kg/m³]
 a : 軌道長半径 [au]
 e : 軌道離心率



YORP効果の概念図



直径 100 m NEOの自転加速例



“NEO年齢”と直径-自転周期関係

議論：高速自転小惑星の欠如

解釈1：微小NEOが強度スピンバリアに達している

▶ 一枚岩小惑星が破壊せずに自転することができる臨界自転周期を以下の式で計算

臨界自転周期の算出 (Kwiatkowski+2010, Holsapple2007)

$$P_{\text{cri}} [\text{h}] = \frac{7.3 \times 10^{-4}}{C} \left(\frac{\rho}{\kappa} \right)^{1/2} \cdot D^{5/4}$$

C : 形状に関する無次元数

ρ : 密度 (kg/m^3)

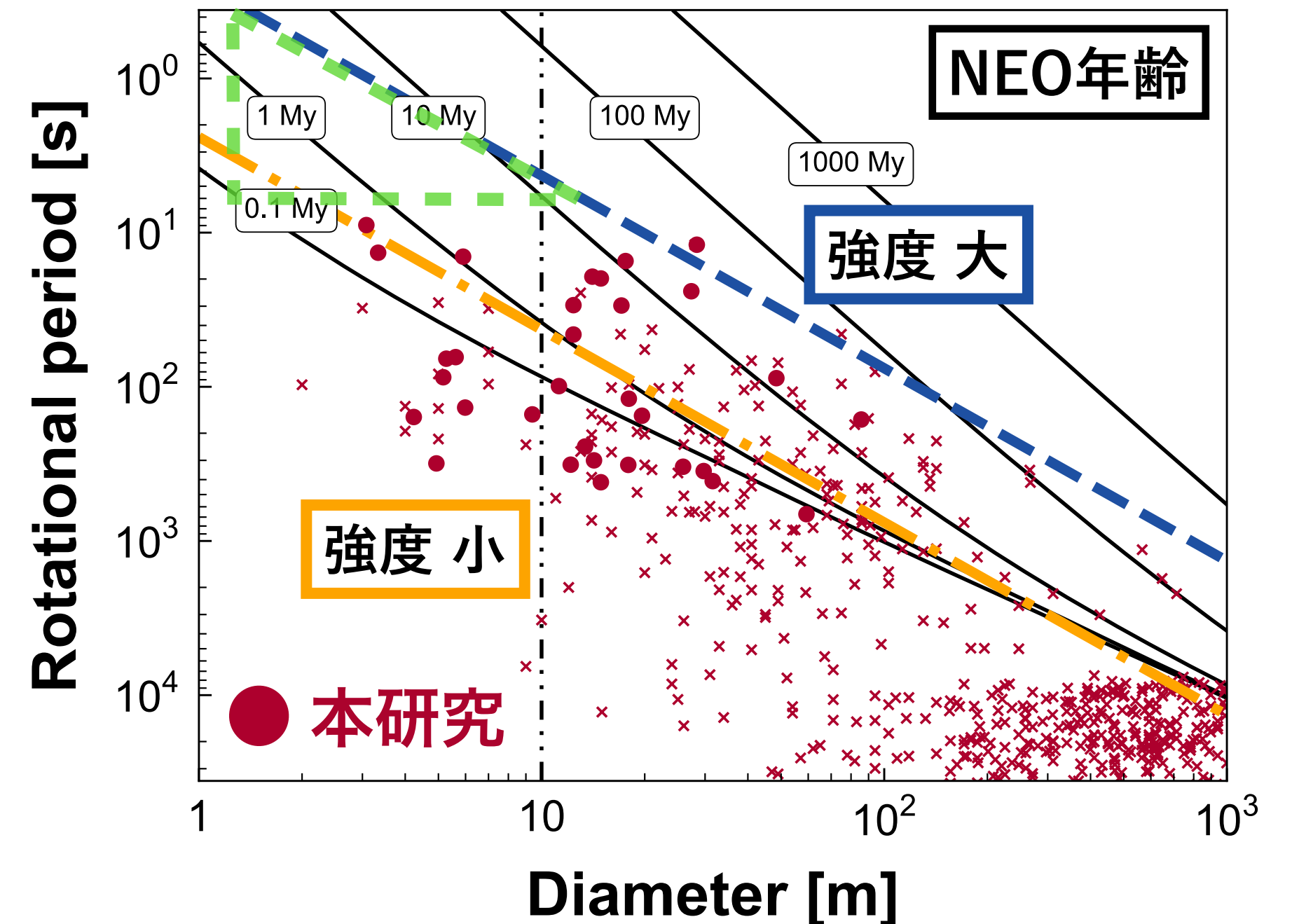
κ : 強度定数 ($\text{Nm}^{-3/2}$)

D : 小惑星直径 (m)

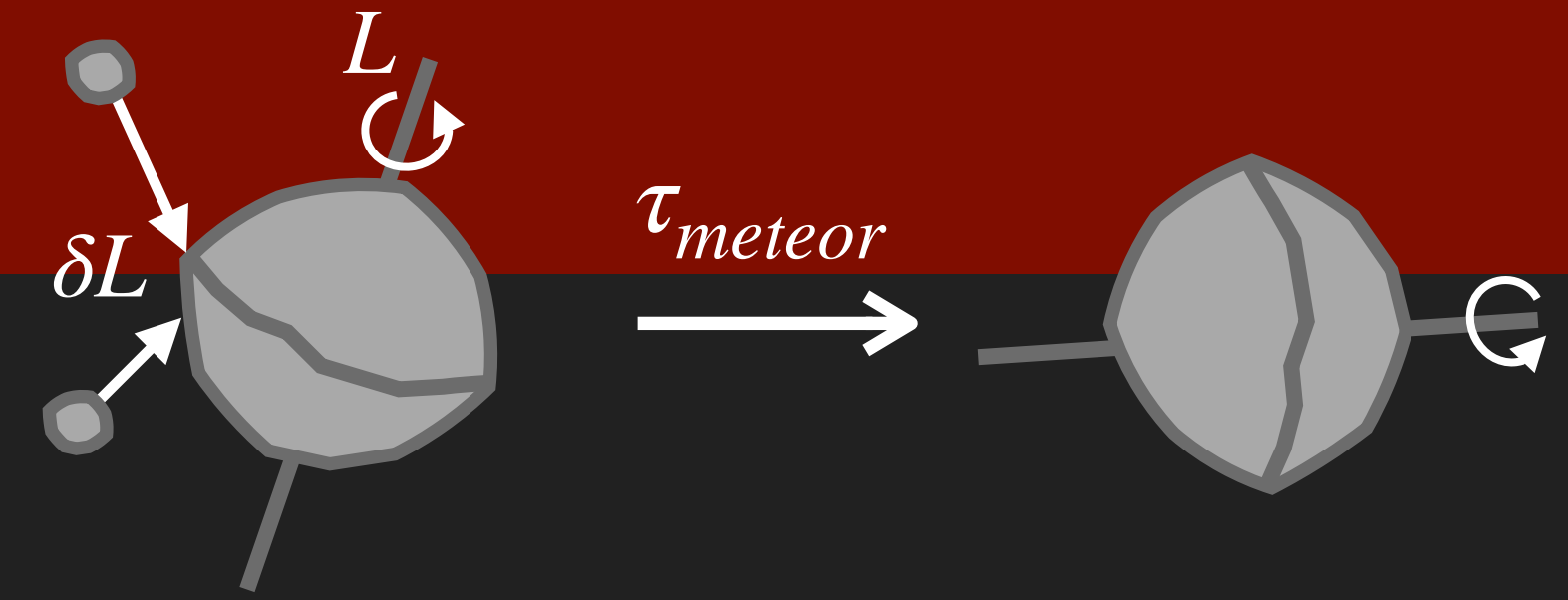
計算仮定

1. 形状は $\alpha = c/a = 0.7, \beta = b/a = 0.7$
2. 摩擦角 $\phi = 40^\circ$
3. 密度は2種類 $\rho = 2500 \text{ kg}/\text{m}^3, 5000 \text{ kg}/\text{m}^3$
4. 強度定数は2種類
 $\kappa = 10^3 \text{ Nm}^{-3/2}, 10^5 \text{ Nm}^{-3/2}$ ($k = \kappa(D/2)^{-1/2}$)
(Housen & Holsapple 1999)

▶ 典型的な地上隕石の強度 ($\kappa = 10^5 \text{ Nm}^{-3/2}$) では
微小高速自転小惑星の欠如を説明できない



議論：高速自転小惑星の欠如



解釈2：微小隕石衝突によるYORPの抑制

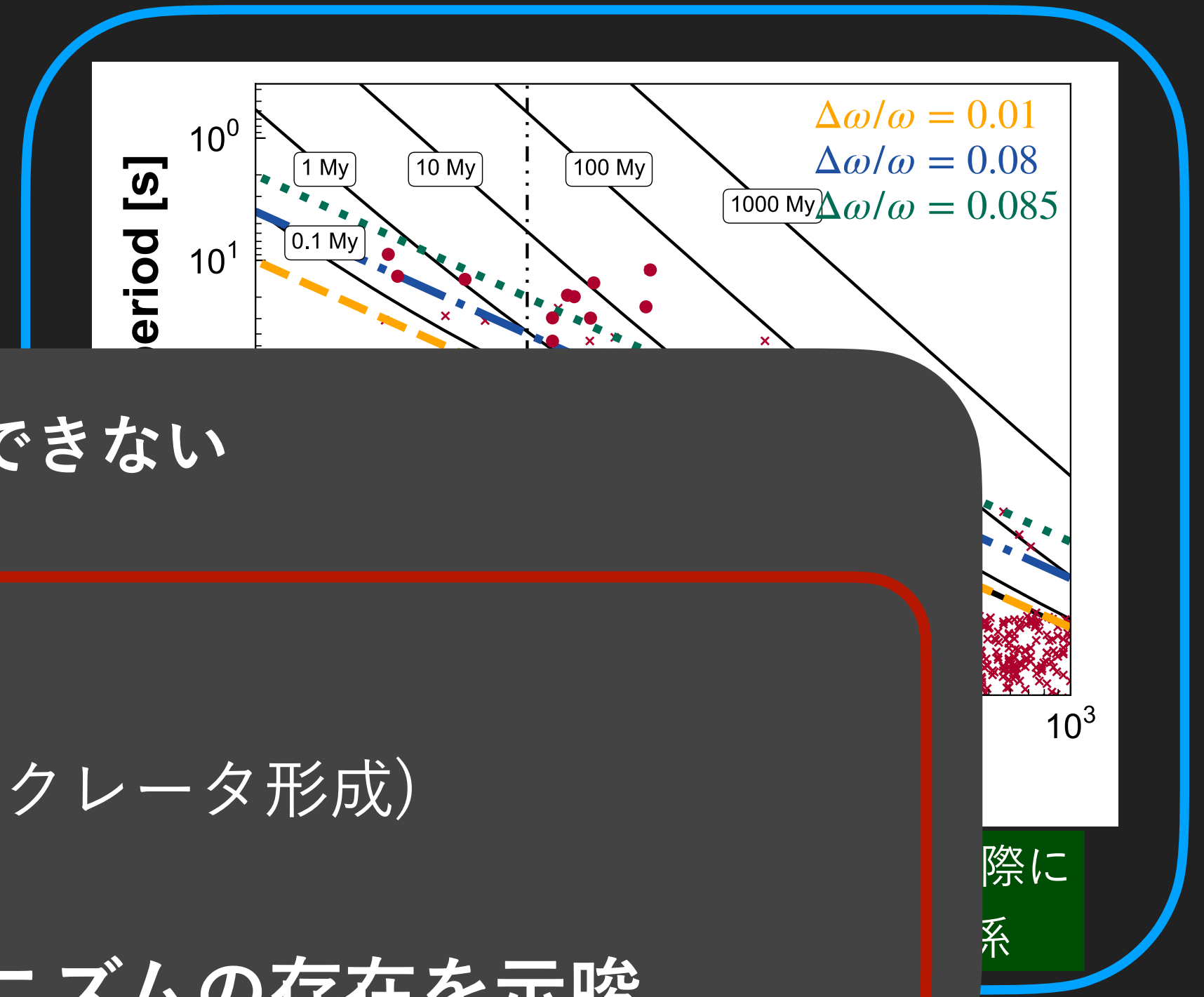
①角運動量輸送

NEOがもつ角運動量に対して $\delta L/L$ の角運動量変化をもたらす微小隕石が衝突するとそれ以上YORP自転加速できない

(Wiegert2015, Campbell2011, Brown2002, Brown2013)

典型的タイムスケール

$$\tau_{meteor} \sim 1.1 \times \left(\frac{\delta\omega}{\omega} \right) \left(\beta \right)^{-1} \left(v_{imp} \right)^{-1}$$



同様に微小隕石による②クレータ形成でも分布を説明できない

結論

1. 微小NEOが強度スピンバリアに達している
2. 微小隕石衝突によるYORPの抑制（角運動量輸送、クレータ形成）では微小高速自転NEOの欠如を説明できない

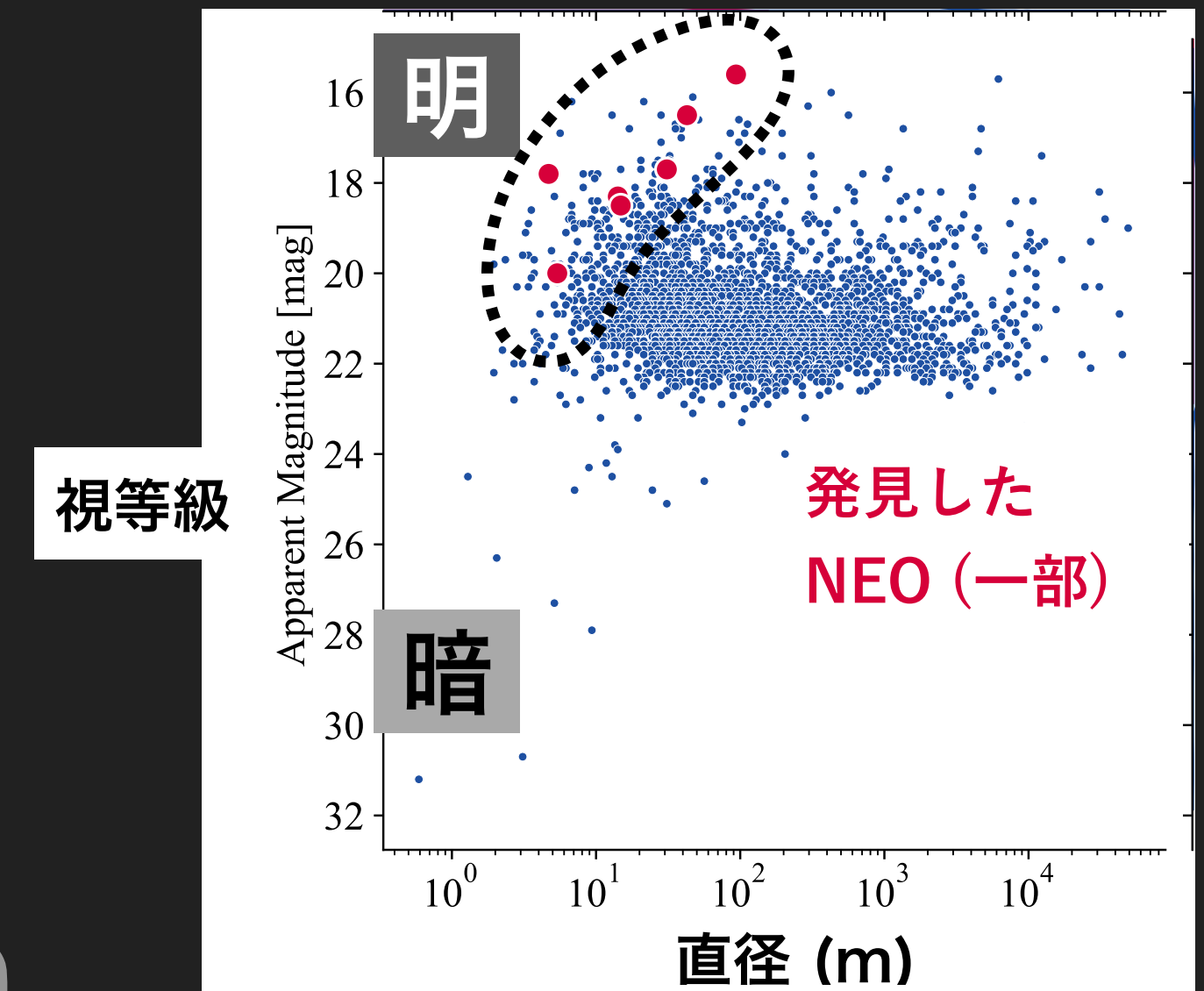
→ NEOのYORPをサイズ選択的に抑制するメカニズムの存在を示唆

まとめ



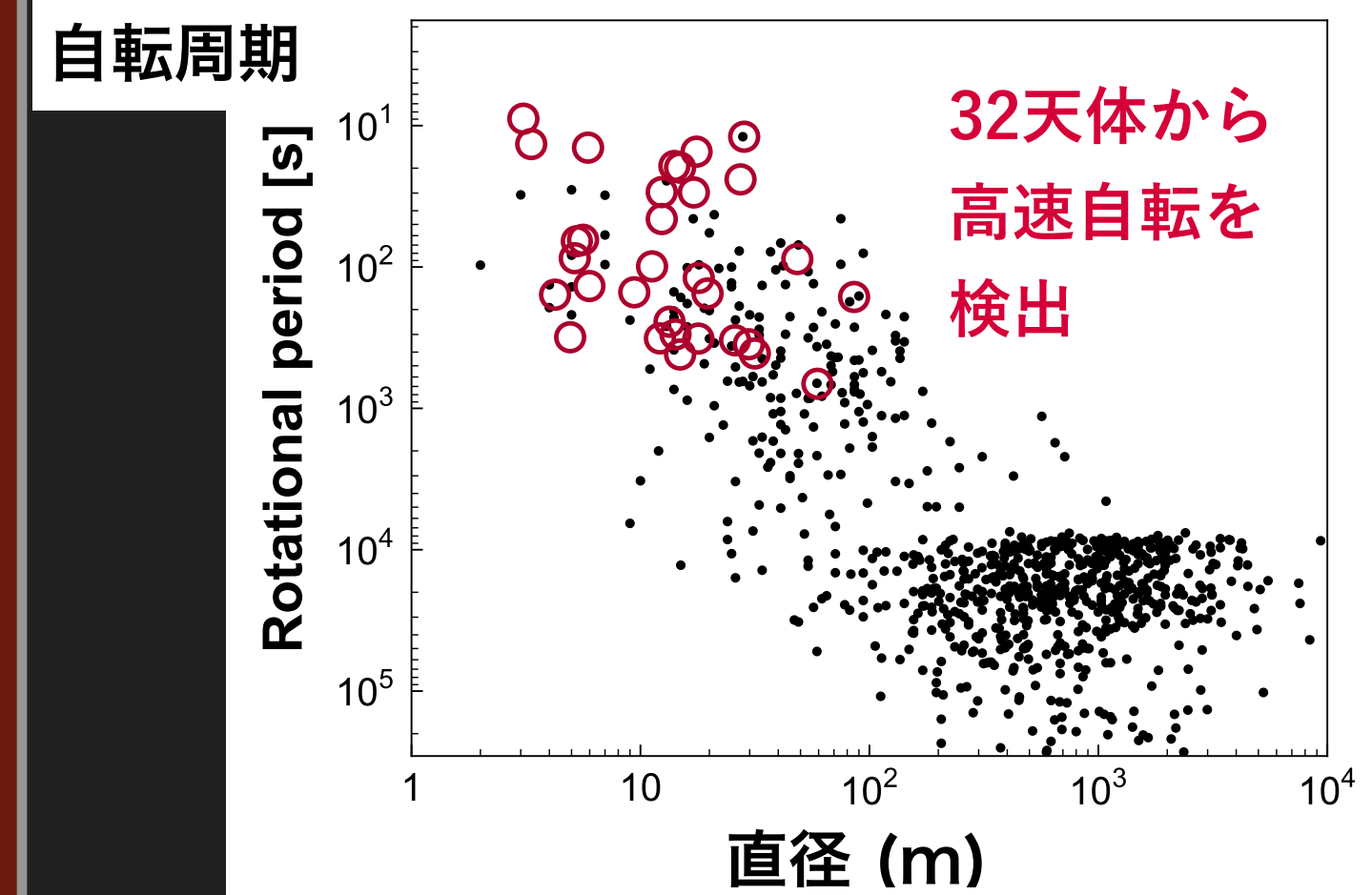
Part 1. Tomo-e サーベイ観測データからの小惑星の探索

- 地球近傍を通過する小惑星 (NEO) の観測には多くの意義
 - ▶ プラネタリーディフェンス、探査機によるその場観測、微小天体を用いたサイエンス
- Tomo-e Gozenのサーベイ観測ビッグデータからNEOを探索
 - ▶ サーベイビッグデータに対する移動天体検出システムを開発
 - ▶ ランダムフォレストを用いた機械学習モデルを用い誤検出を除去
- リアルタイム解析 → 迅速な追観測により約3年でNEOを36天体発見



Part 2. 微小地球接近小惑星の即時追跡観測によるサイエンス

- 直径 100 m 以下のNEO51天体の連続撮像観測 → 32天体の自転周期を推定
 - ▶ 従来の観測で高速自転を検出できていないことを示唆
- 高速自転する微小NEOが欠如。YORP自転加速のモデル計算から
 - 微小NEOの強度スピンバリア
 - 微小隕石によるYORP自転加速の抑制では微小高速自転NEOの欠如を説明できない。
NEOのYORPをサイズ選択的に抑制するメカニズムの存在を示唆



観測天体を含めた小天体の直径 - 自転周期関係