

木曾超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e Gozen による高速移動する地球接近天体の広視野探査

東京大学 修士課程2年 小島悠人

アウトライン

1. 小惑星について
2. 木曾超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen
3. 小惑星探査システム
4. 広域試験観測



シュミット望遠鏡と木曾の星空

小惑星

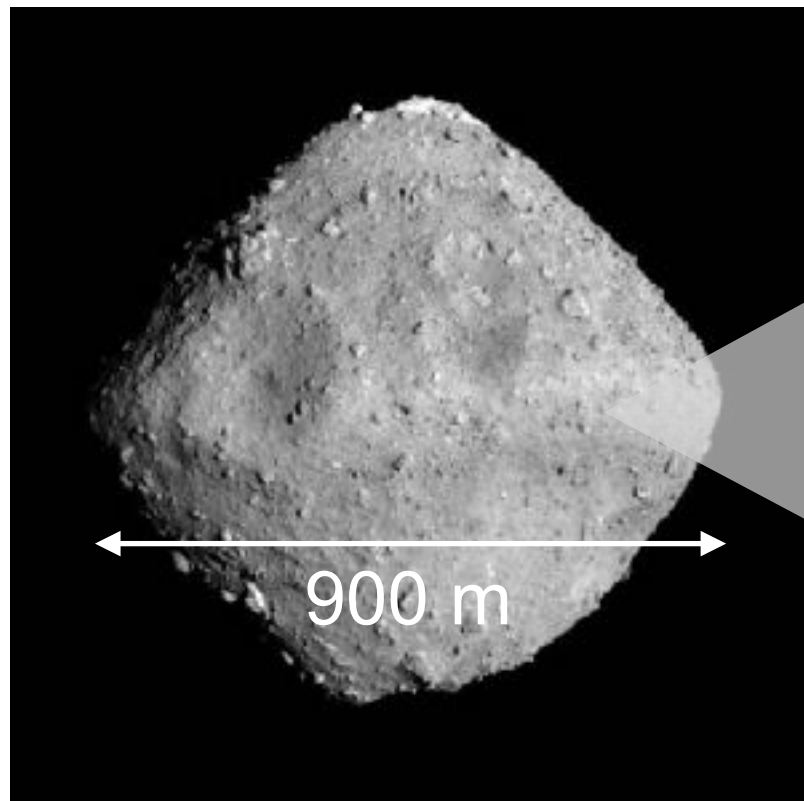
太陽系形成時の情報を保持 (組成, 衝突史)

ラブルパイル小惑星

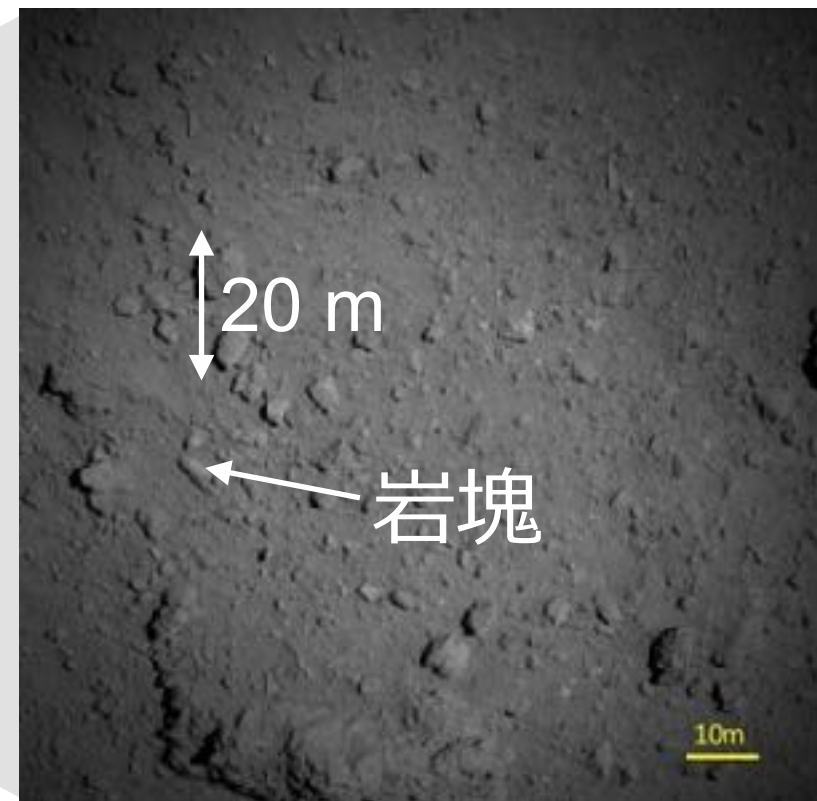
- 小さな岩塊が集積して形成
- 自転周期 < 2.2時間で分裂

一枚岩小惑星

- 一つの岩
- 自転が速くても安定

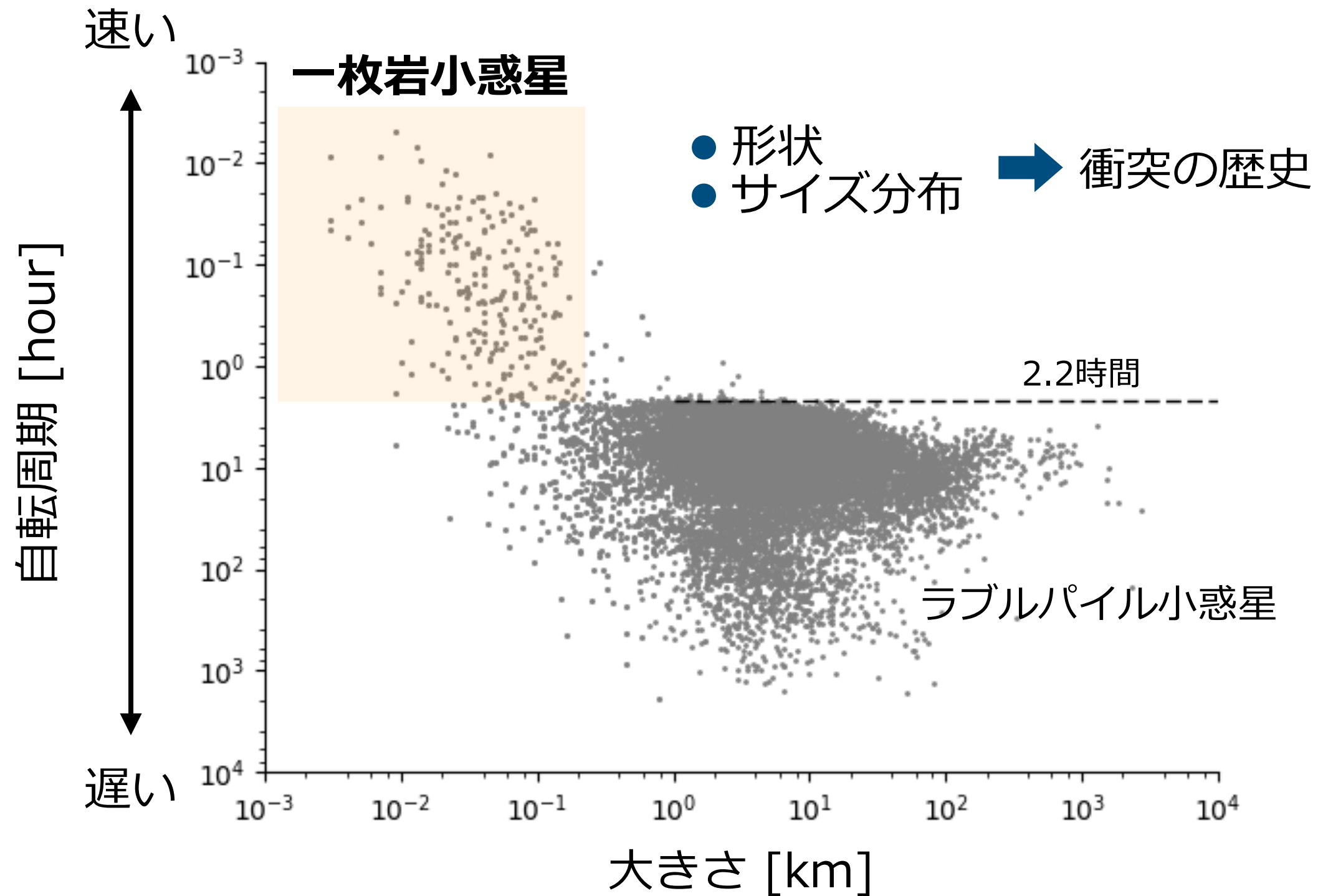


(162173) Ryugu



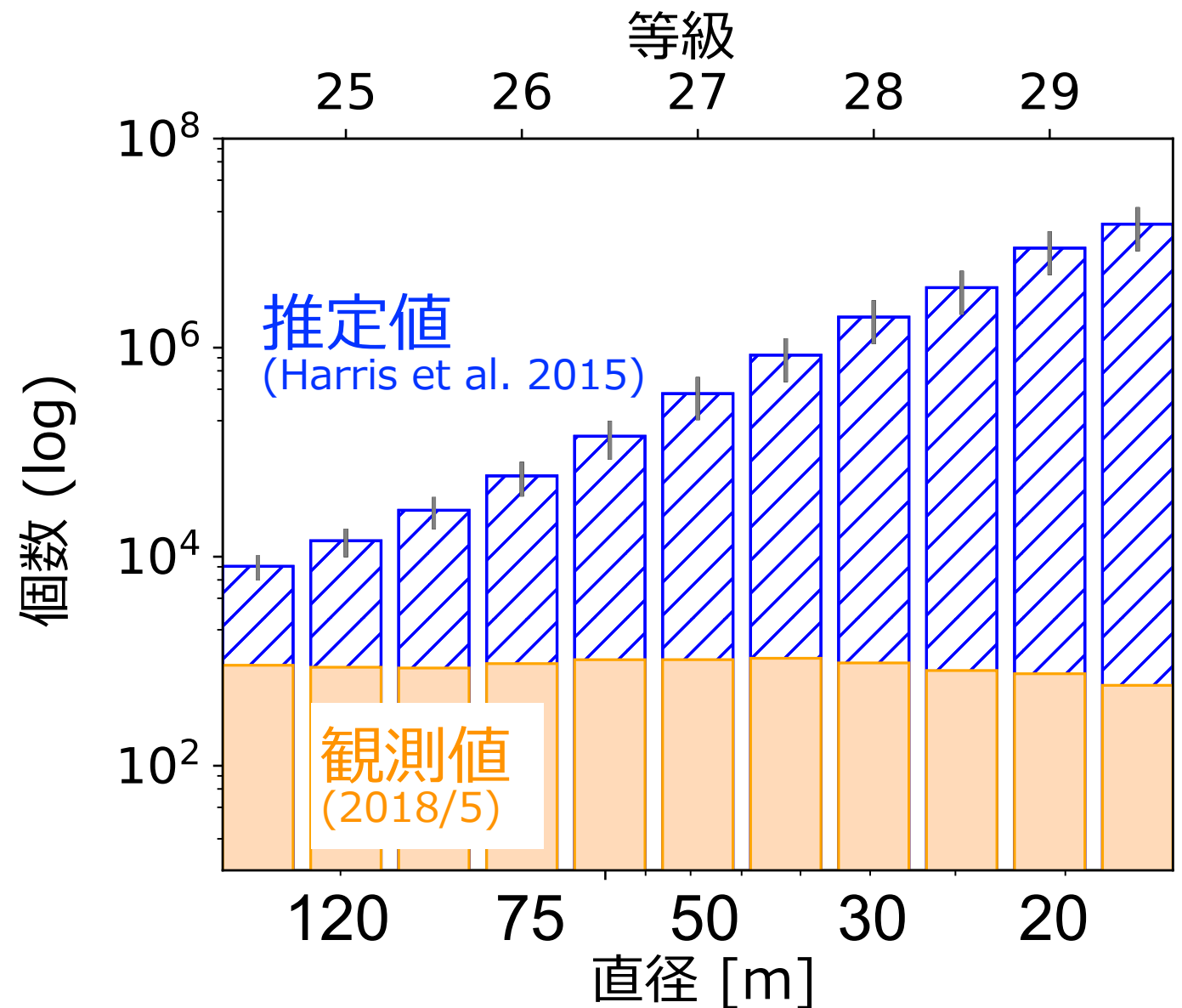
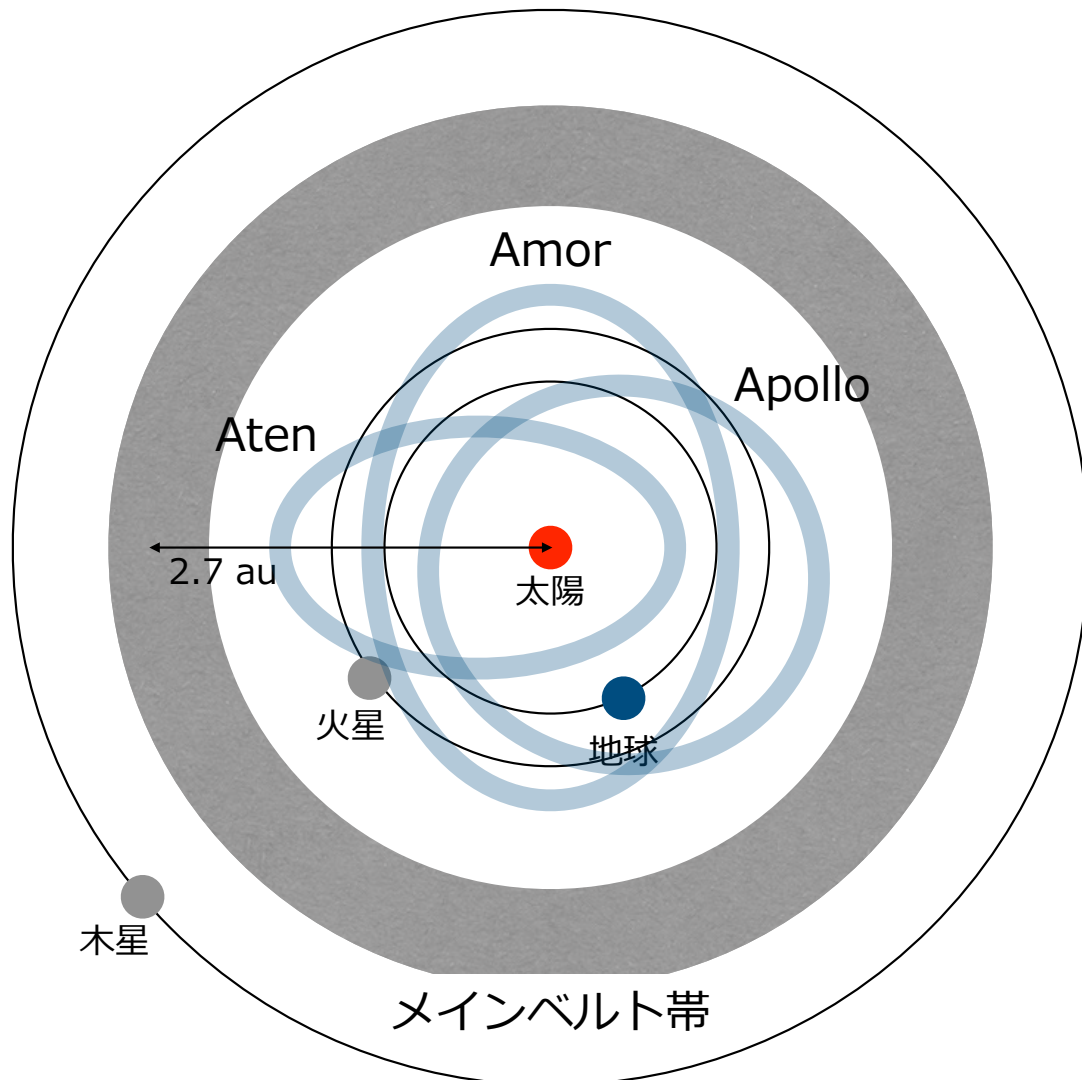
提供: JAXA

小惑星の大きさと自転の関係



地球接近天体 (Near Earth Object; NEO)

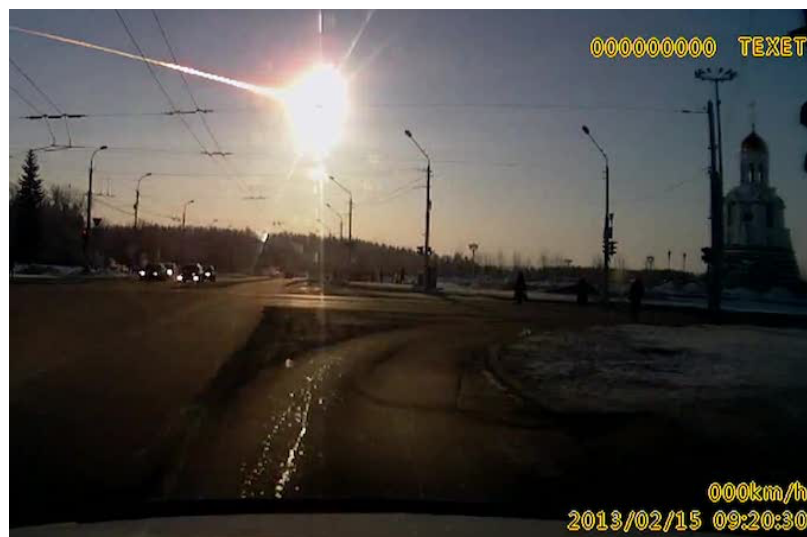
近日点距離が1.3天文単位未満の小惑星又は彗星
メインベルト帯から軌道進化した天体



微小 NEO のサイズ分布

プラネタリーディフェンス

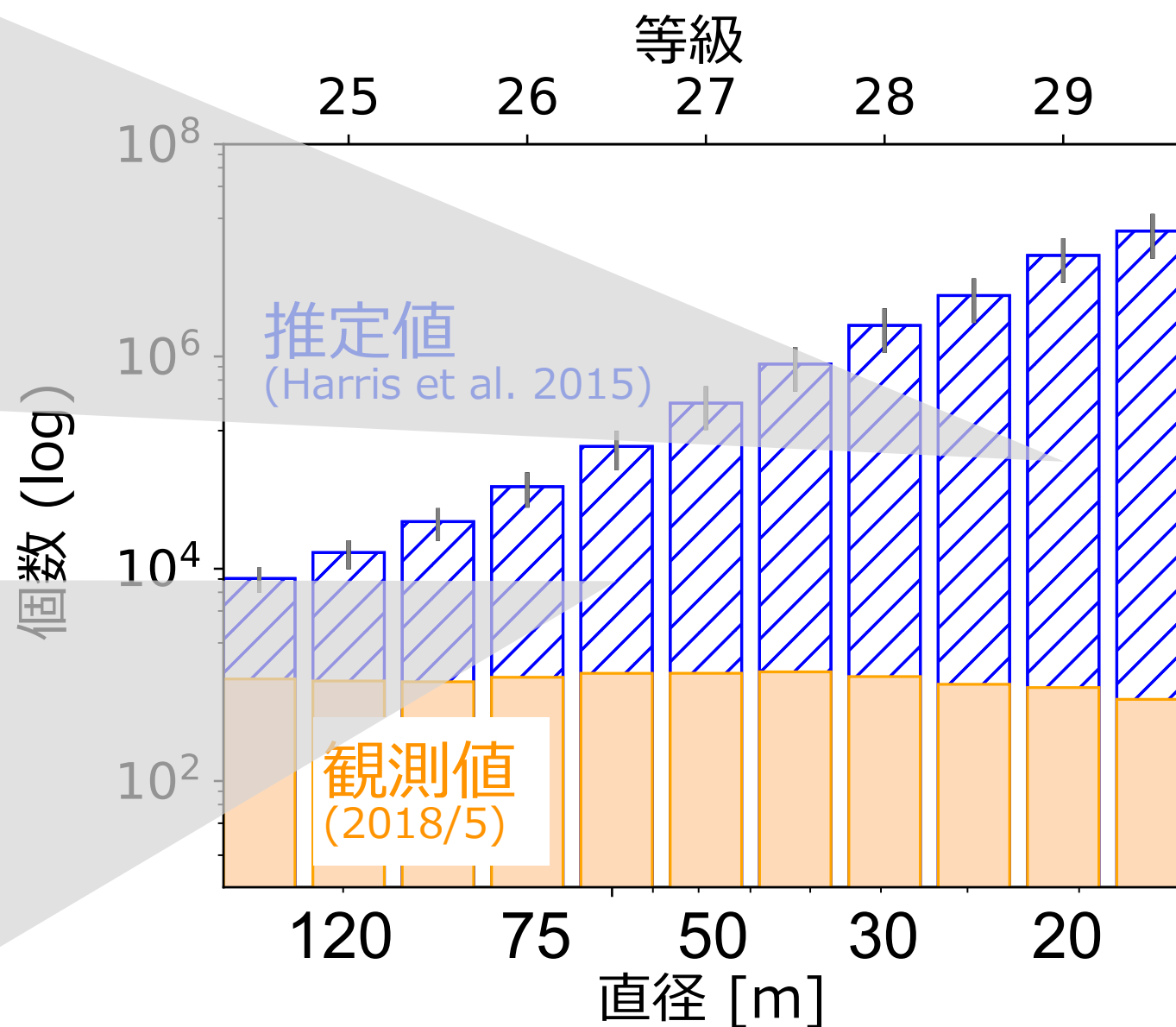
小さい小惑星ほど地球への衝突確率が高い



2013年 チェラビンスク隕石



1908年 ツングースカ隕石



微小 NEO のサイズ分布

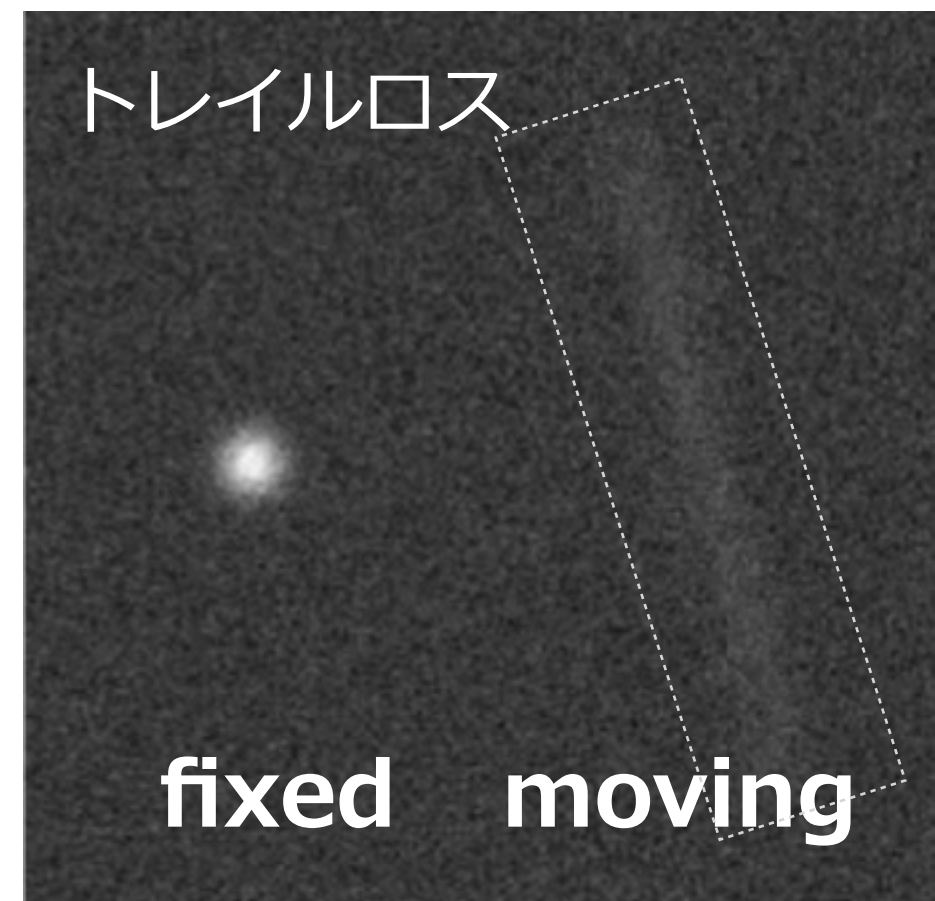
技術的な課題

地球に接近すれば明るくなるが、

- ① 見かけの速度が増す (高速移動 NEO)
対策：露光時間を短くして背景光ノイズを抑える

- ② 地球の近くにいる期間が限定
対策：広い視野で観測する

➡ **高速移動 NEO の検出には
広視野かつ動画観測が必要**



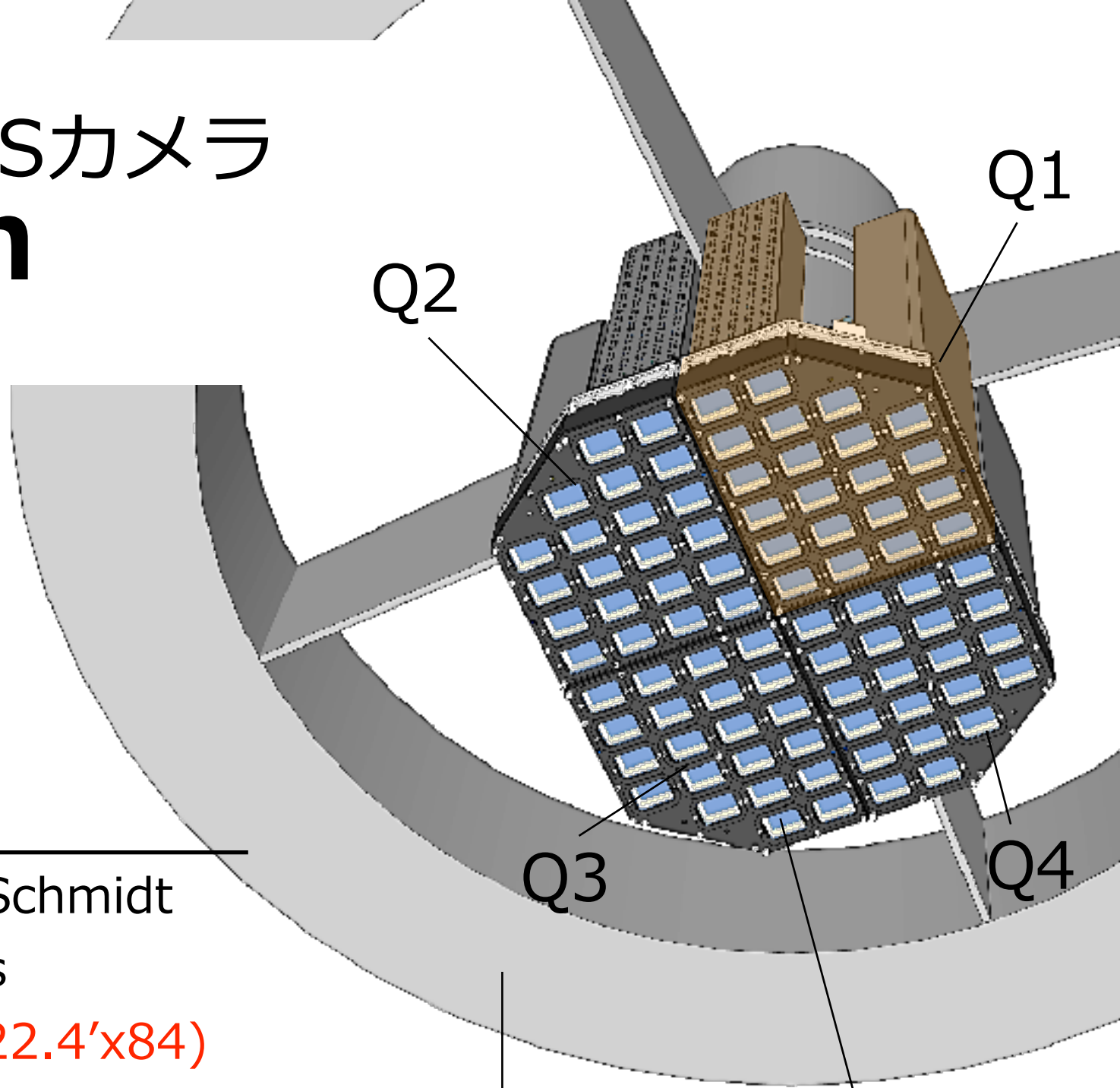
2. 木曾超広視野高速カメラ **Tomo-e Gozen** の全天動画観測計画



木曾 1m シュミット望遠鏡

木曾超広視野高速CMOSカメラ Tomo-e Gozen

- ✓ 広視野 (20deg²)
- ✓ 高速 (2Hz)



望遠鏡	Kiso 1.0m f/3.1 Schmidt
検出器	84 CMOS sensors
視野	20 deg ² , (39.7'x22.4'x84)
フレームレート	2 fps (Full Frame)
画素スケール	1.2 "/pix
限界等級(5 σ)	18.7 mag @t _{exp} =0.5 sec
データサイズ	30 TB/night
フィルター	transparent (350-800 nm)

2019年春完成予定

Canon, フルHD, CMOSセンサー
望遠鏡スパイダー

Sako et al. 2018, SPIE
Kojima et al. 2018, SPIE
Ohsawa et al. 2016, SPIE

全天動画観測計画

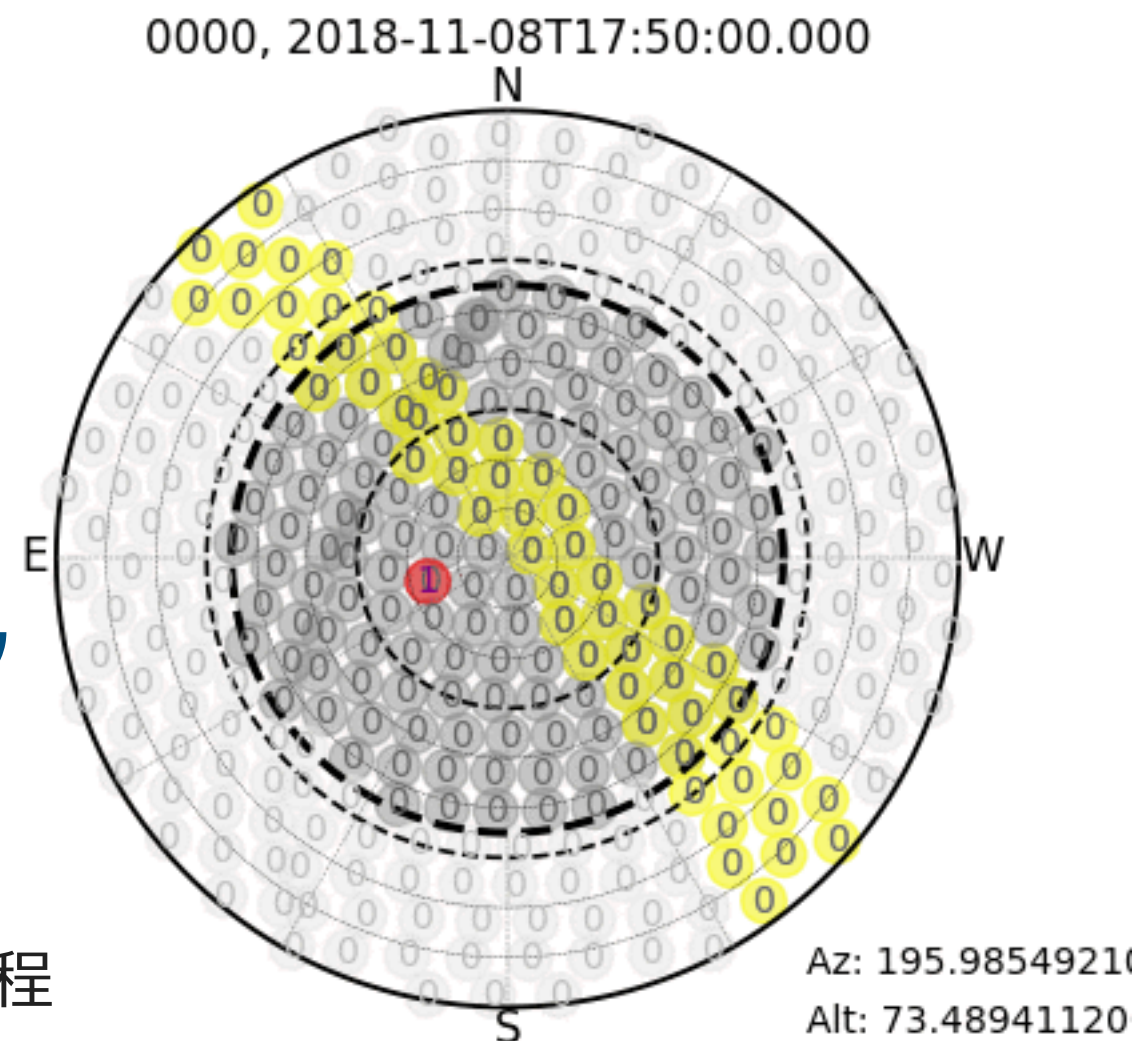
科学目的

- 小惑星
- 超新星爆発
- Fast Radio Burst
- 微光流星

観測

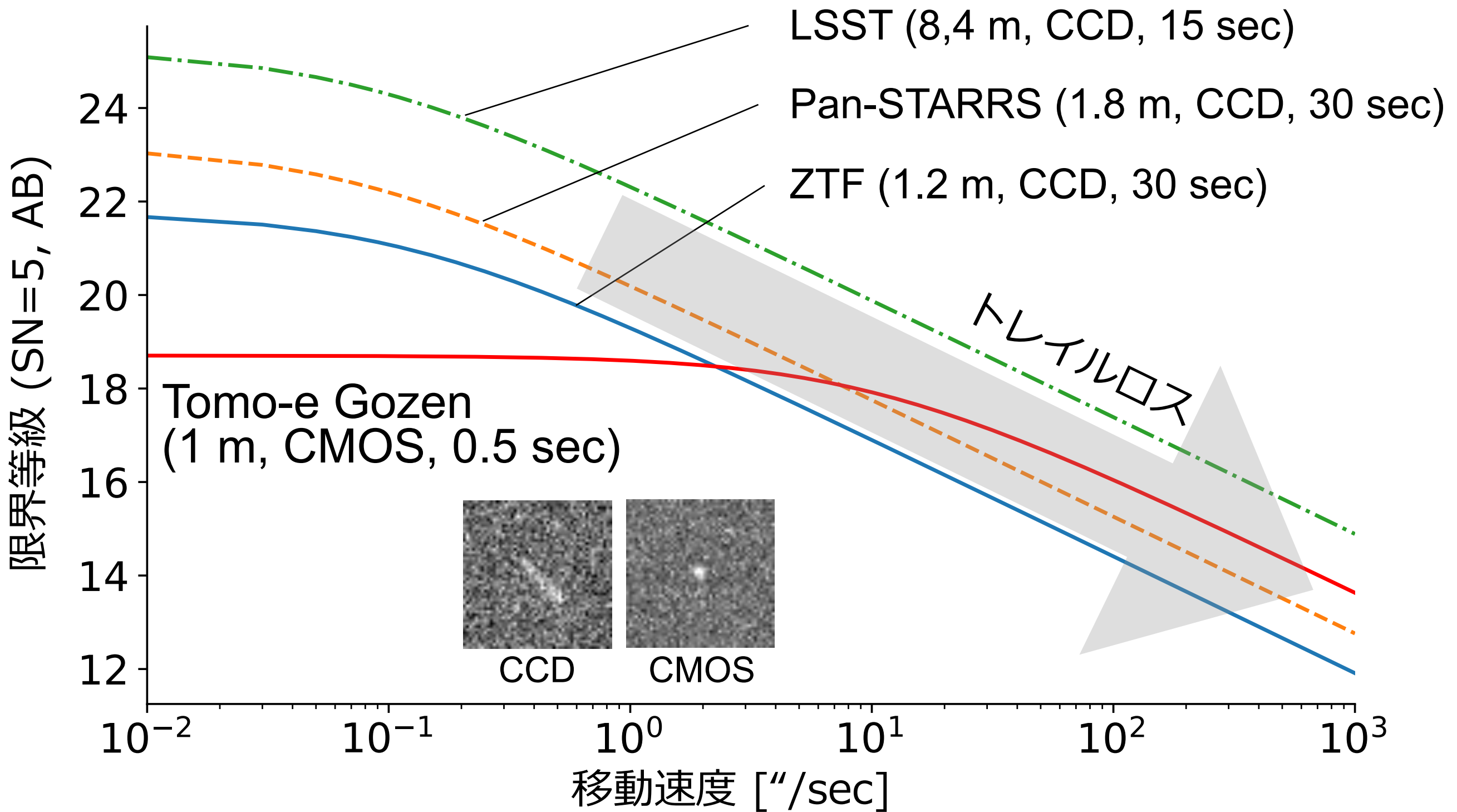
- 露光時間0.5秒12フレームの**動画データ**
- 約2時間で**10,000平方度**を掃く
- 一晩に同一視野を**2-3回観測**
- 年間100夜の観測 ※晴天率を30%と過程

➡ 一晩あたり 20 TB



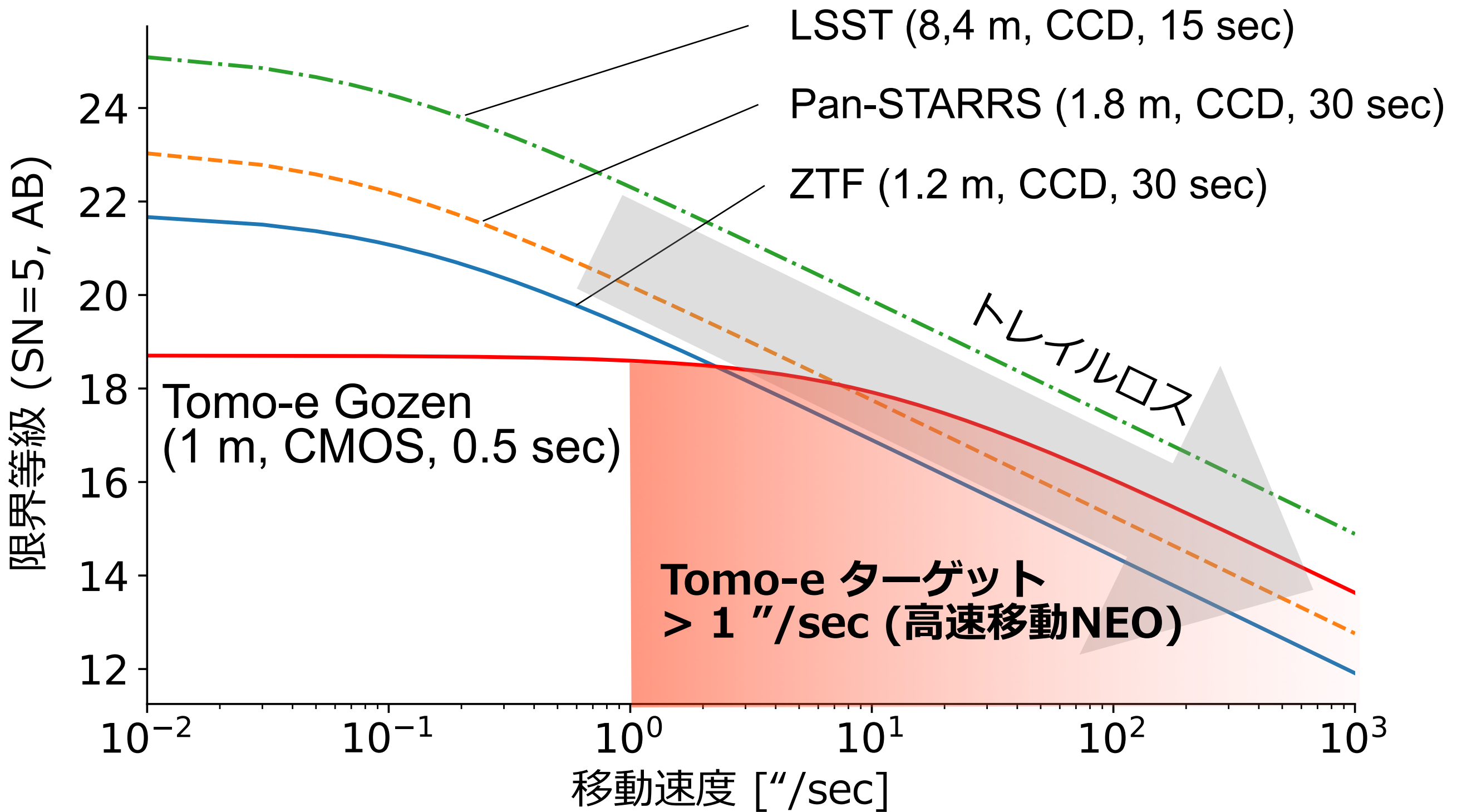
全天動画観測により観測される視野
from the simulation by T. Morokuma

移動天体への感度比較 (Kojima+2018)



※ 本研究の性能評価結果より算出

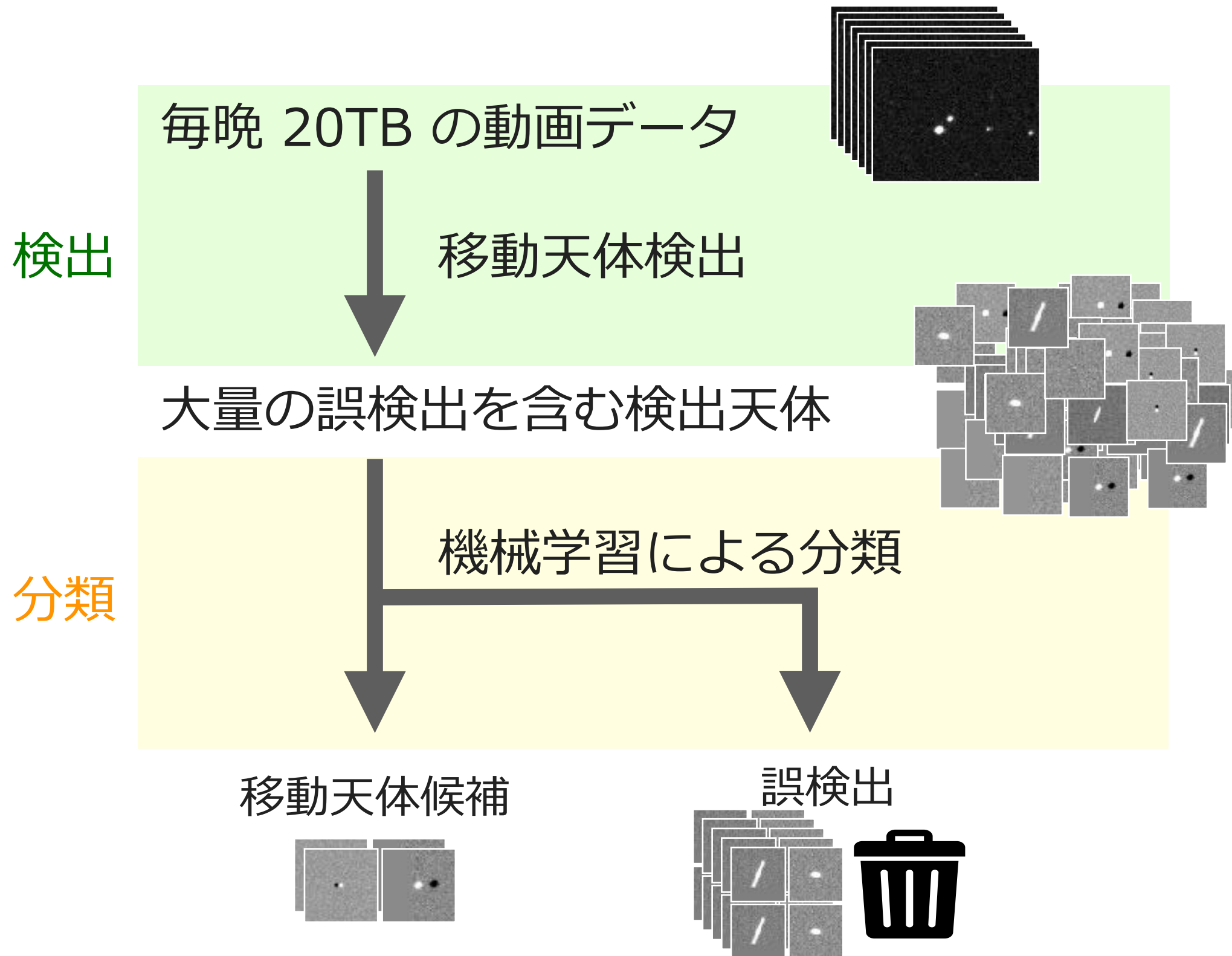
移動天体への感度比較 (Kojima+2018)



※ 本研究の性能評価結果より算出

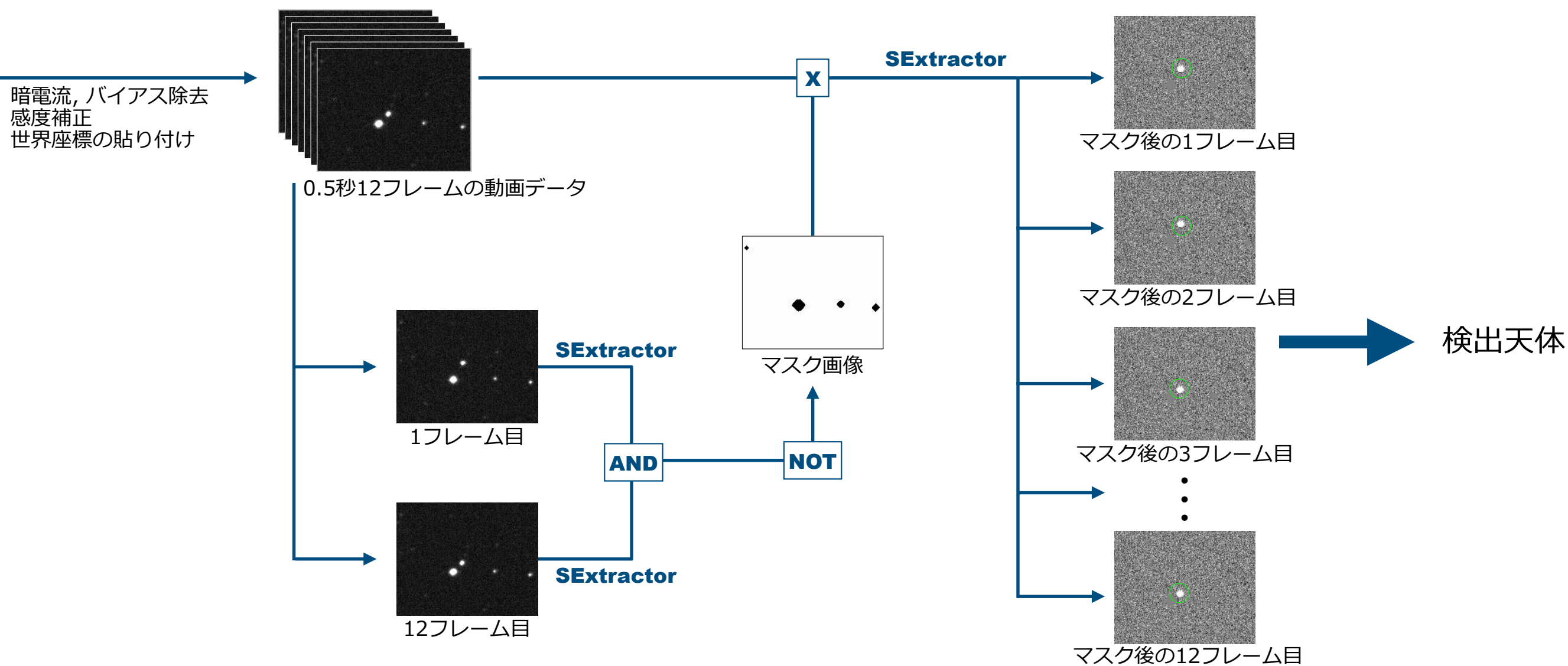
3. 機械学習を用いた 高速移動天体の探査システムの開発

高速移動天体探査システムの概要



移動天体候補の検出手法の開発

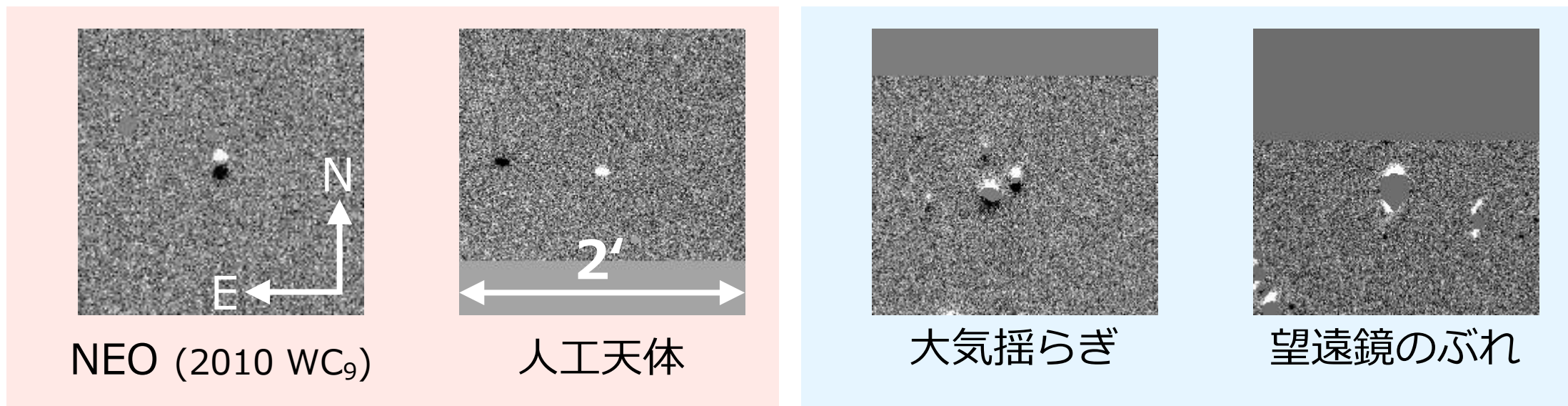
本研究では以下の検出アルゴリズムを開発



移動天体候補の検出手法の評価

205個の動画データに対して本検出手法を適用して目視で評価

動画データの1フレーム目と12フレーム目の差分画像

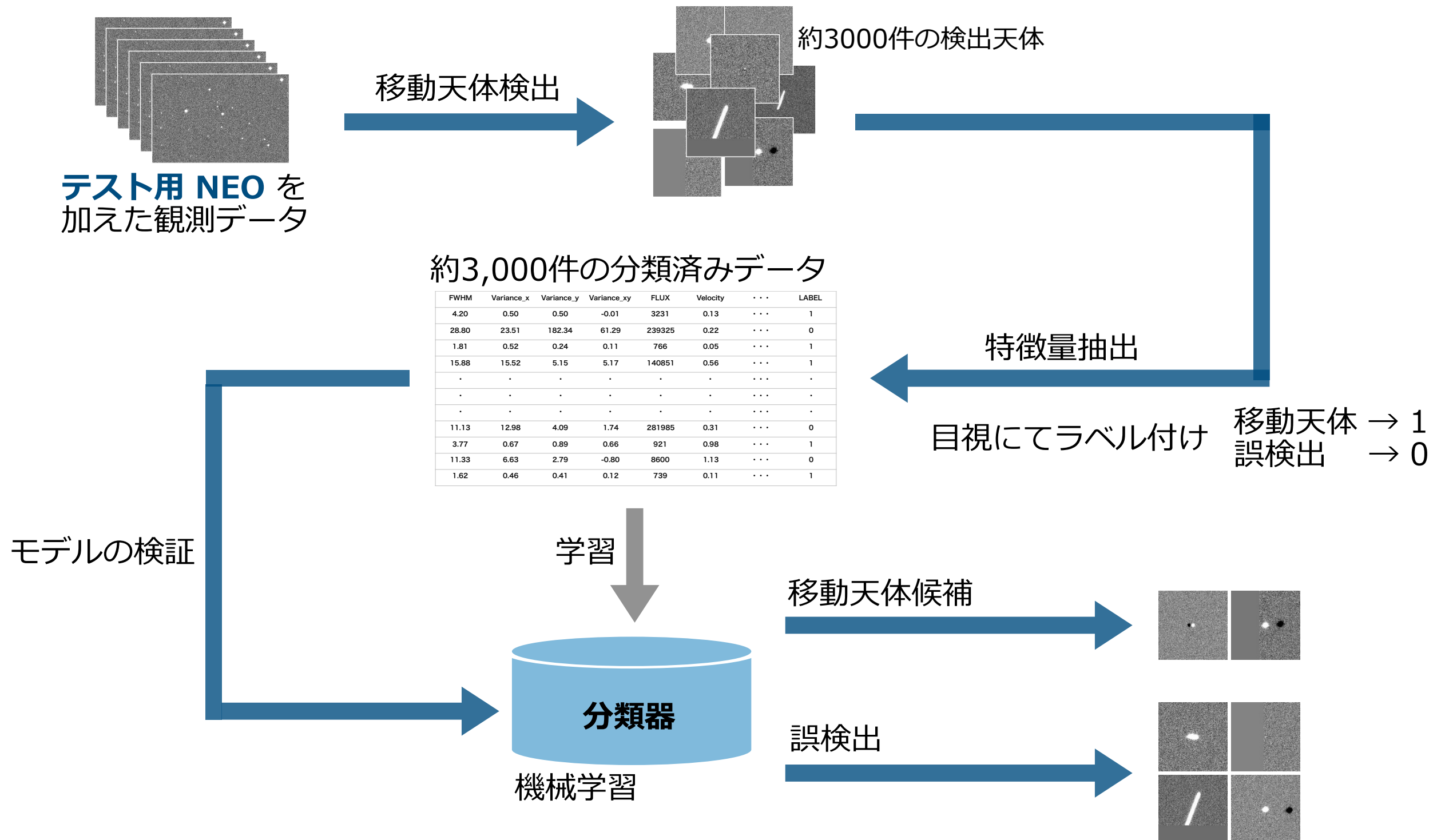


移動天体
($\sim 100/2,000$)

誤検出
($\sim 1,900/2,000$)

➡ 一晩の全天動画観測を行った場合, **約100万件の誤検出**

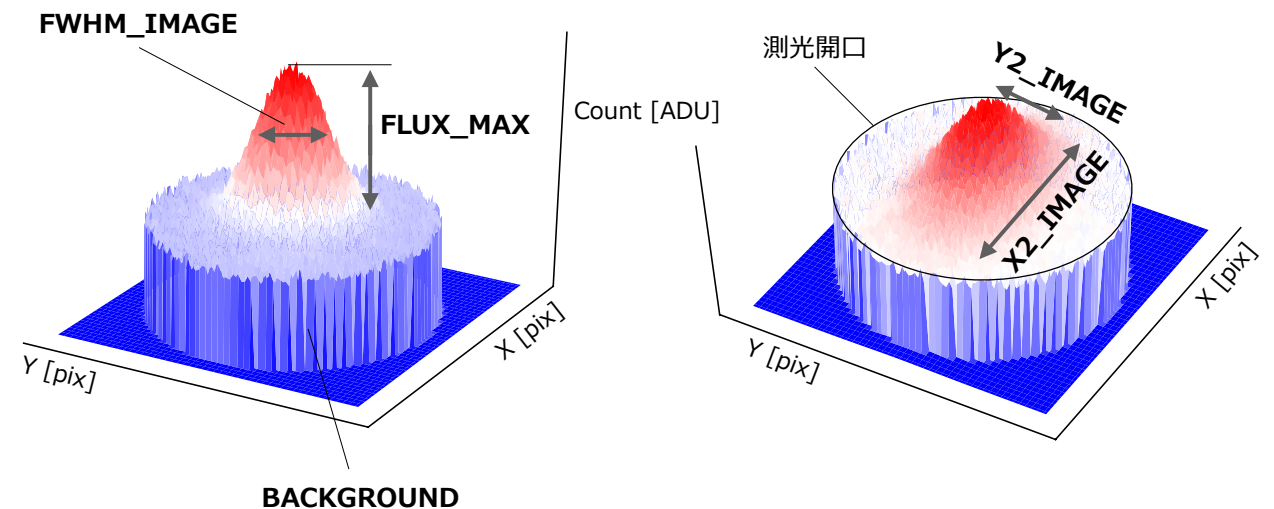
機械学習を用いた分類



特徴量の抽出

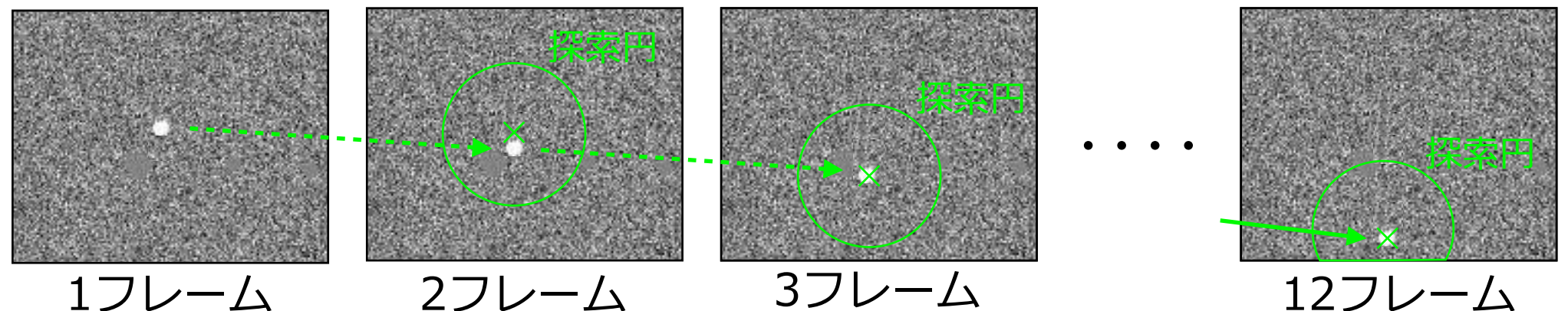
静止画的 (Morii et al. 2016, Waszczak et al. 2017)

- PSF の FWHM
- PSF の二次モーメント
- 天体からのフラックス
- フラックスのエラー
- 背景光フラックス



動画的

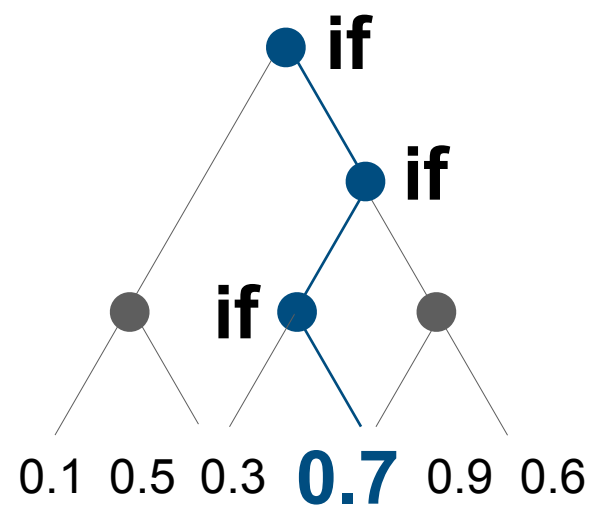
- フレーム間の移動量の平均, 分散
- フレーム間で同一天体を検出できた回数
- 移動の向きが変わった回数



分類器の作成

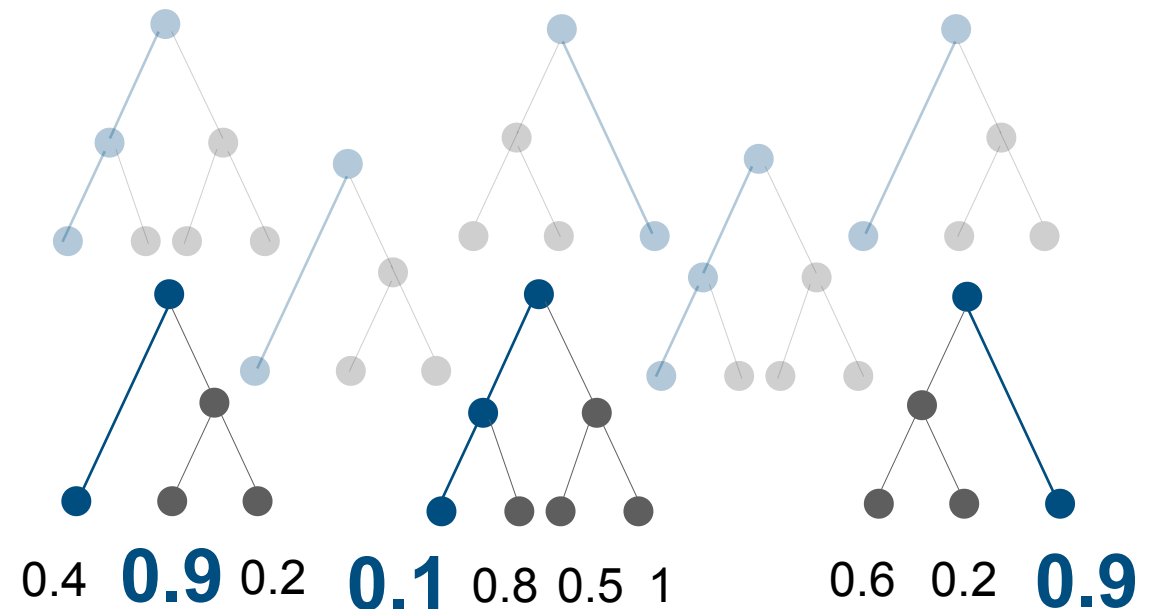
制限付き決定木 (従来の)

- 決定木の本数は1
- 木の深さを3に固定
- 特徴量の数を3に制限



ランダムフォレスト (機械学習)

- 決定木の本数は100
- 全ての特徴量を使用



出力は移動天体らしさを表す**分類スコア [0,1]**

分類閾値を設定することで真の検出率と誤検出率を計算可能

真の検出率 (TPR) : 真の移動天体の中で正しく正解できた割合

誤検出率 (FPR) : 誤検出の中で移動天体と分類してしまった割合

※分類器の作成には python の機械学習ライブラリ scikit-learn を使用

分類モデルの評価

	従来的な方法 (制限付き決定木)	機械学習 (ランダムフォレスト)
TPR [%]	FPR [%]	FPR [%]
95	20	0.2
90	10	0.2
85	4	~ 0
80	2	~ 0
75	1	~ 0
70	1	~ 0

TPR を 90% と設定した場合,

従来的な方法では FPR ~ 10%

誤検出の数は 100万件 から 10万件へ

機械学習では FPR ~ 0.2%

誤検出の数を **100万件 から 2000件へ**

↓
→ 機械学習により
誤検出が大幅に減少

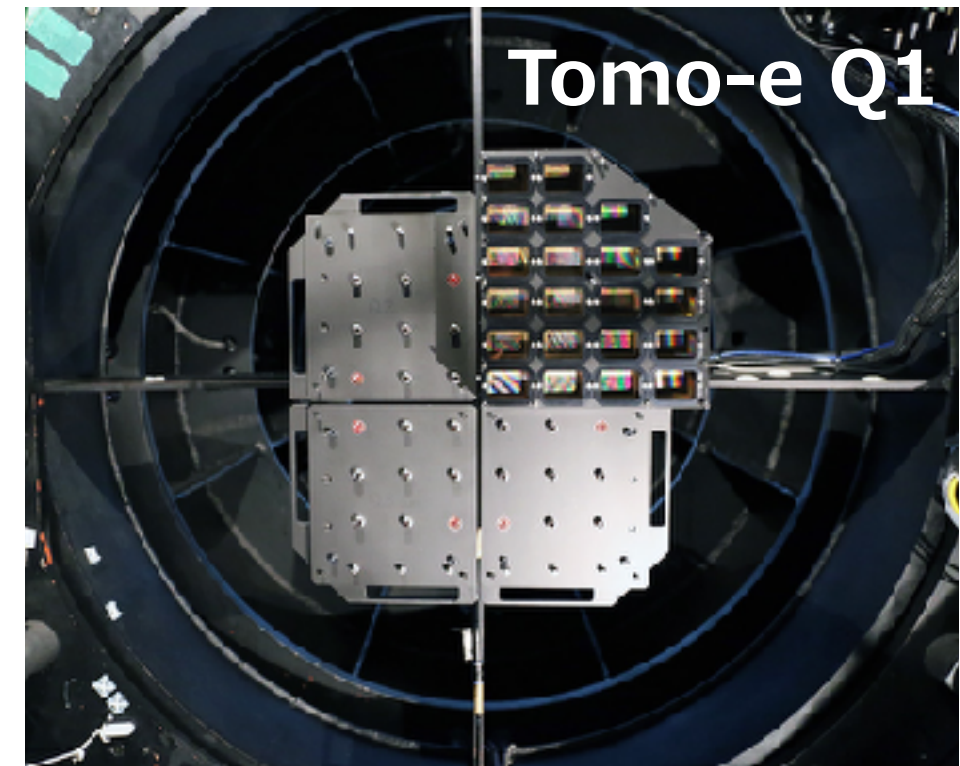
4. Tomo-e Gozen Q1 による広域試験観測

試験観測概要

- カメラ : Tomo-e Gozen Q1 (21センサ, 全体の4分の1)
- 観測期間 : 2018/11/08 — 2018/12/28 の23夜
- 観測方法 : 露光時間0.5秒12フレーム
- データ量 : 3.5 TB/day

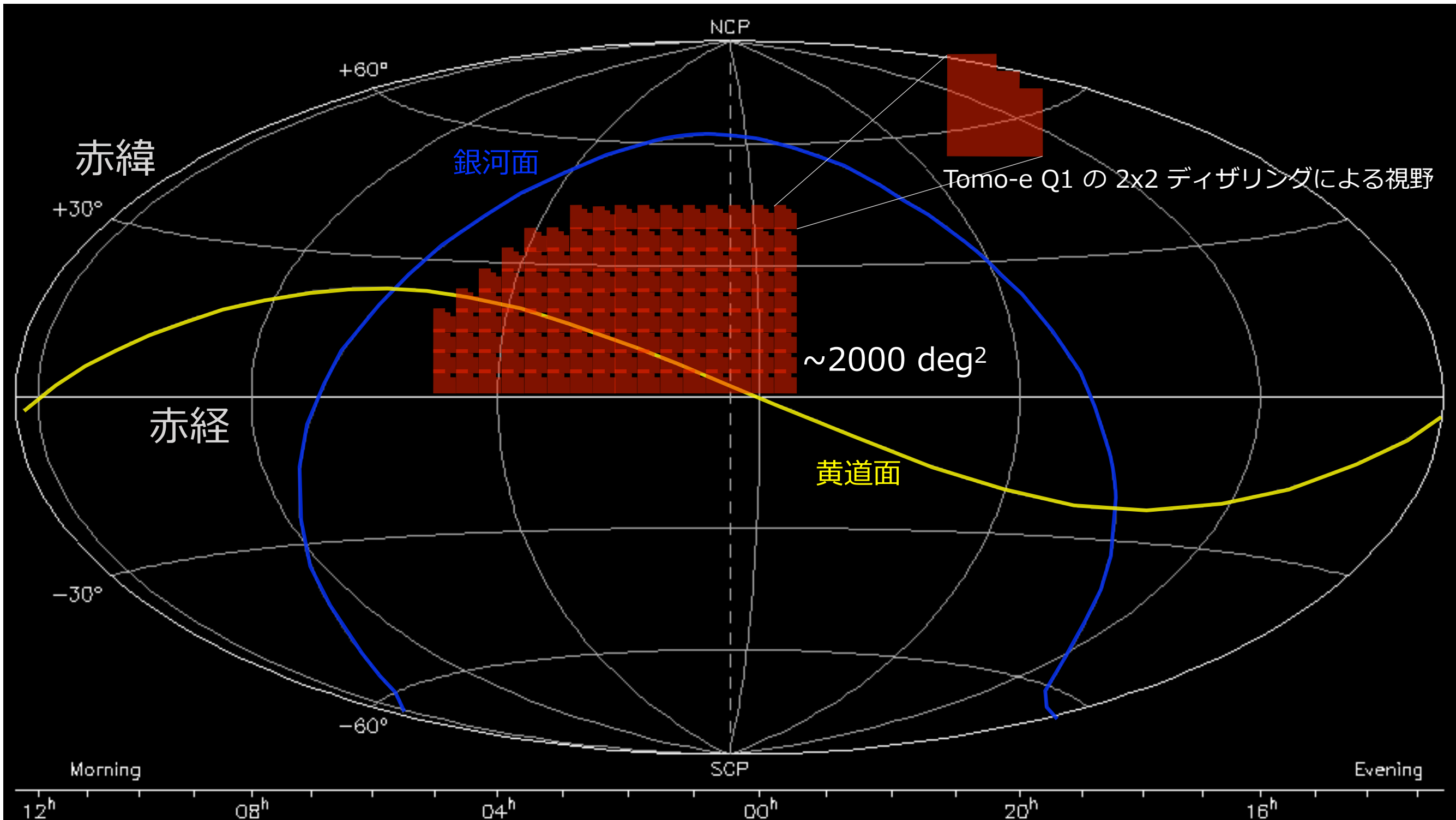
Tomo-e での高速移動 NEO 検出期待値

- ✓ NEO の総数の推定値 (Harris et al. 2015)
- ✓ 月軌道まで接近する NEO の割合
→ 0.4-4 件/夜 ($D > 20\text{m}$)

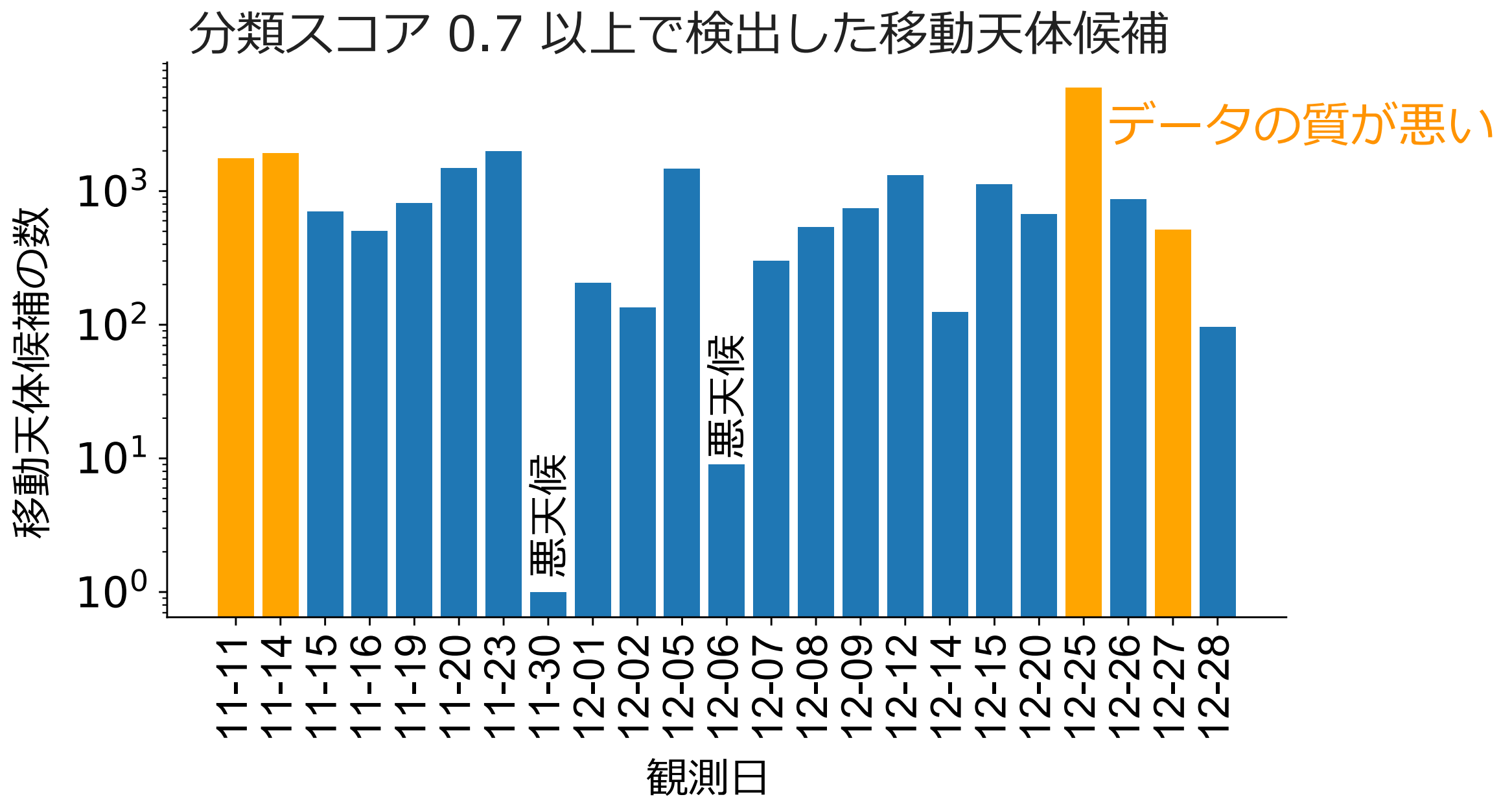


観測領域

一晩あたり2000平方度を約2.5時間間隔で観測

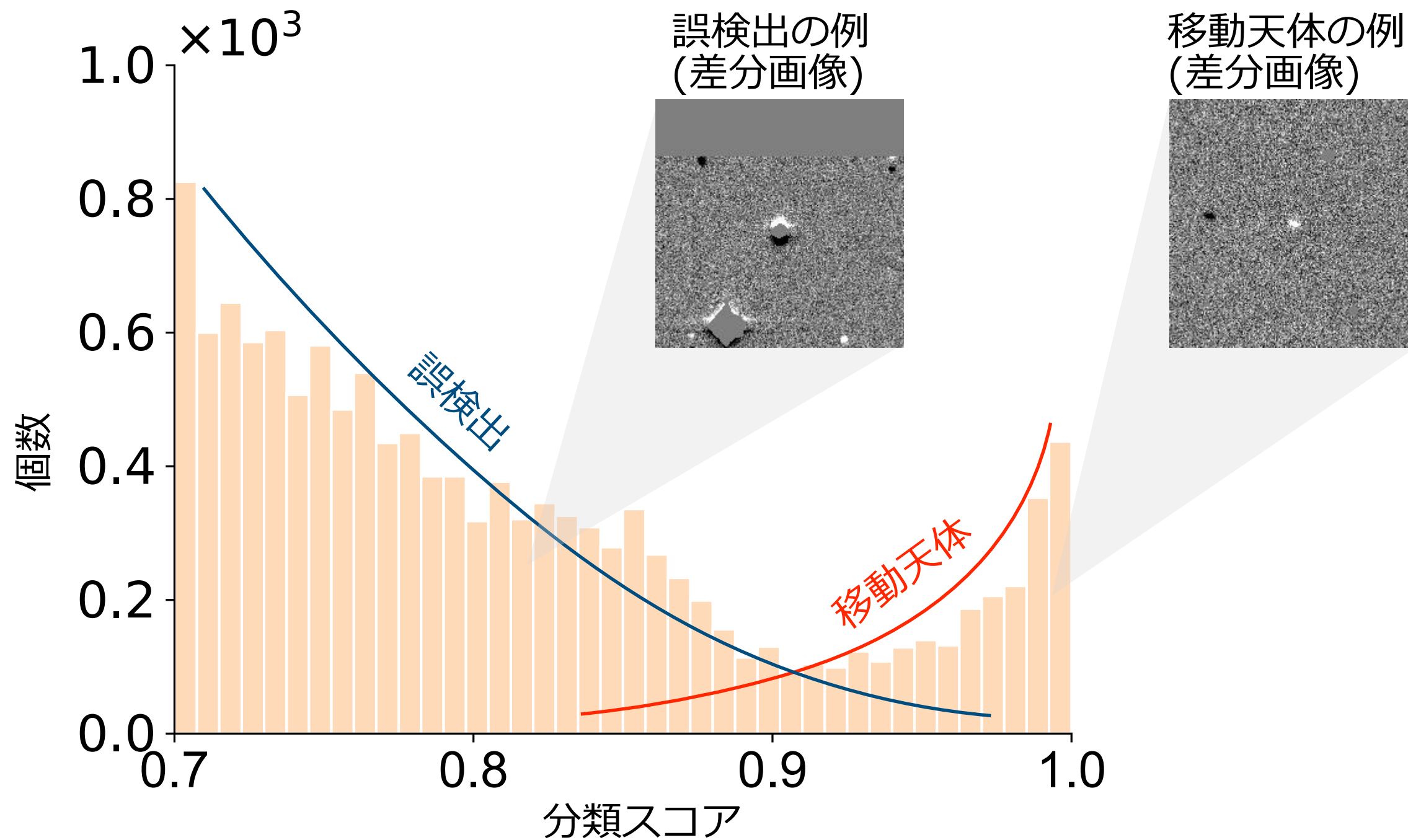


移動天体候補の検出数



19日間の観測により、**13069件**の移動天体候補を検出

分類閾値の最適化



➡ 分類スコア 0.9 以上の移動天体候補は**2378件**

高速移動 NEO の抽出

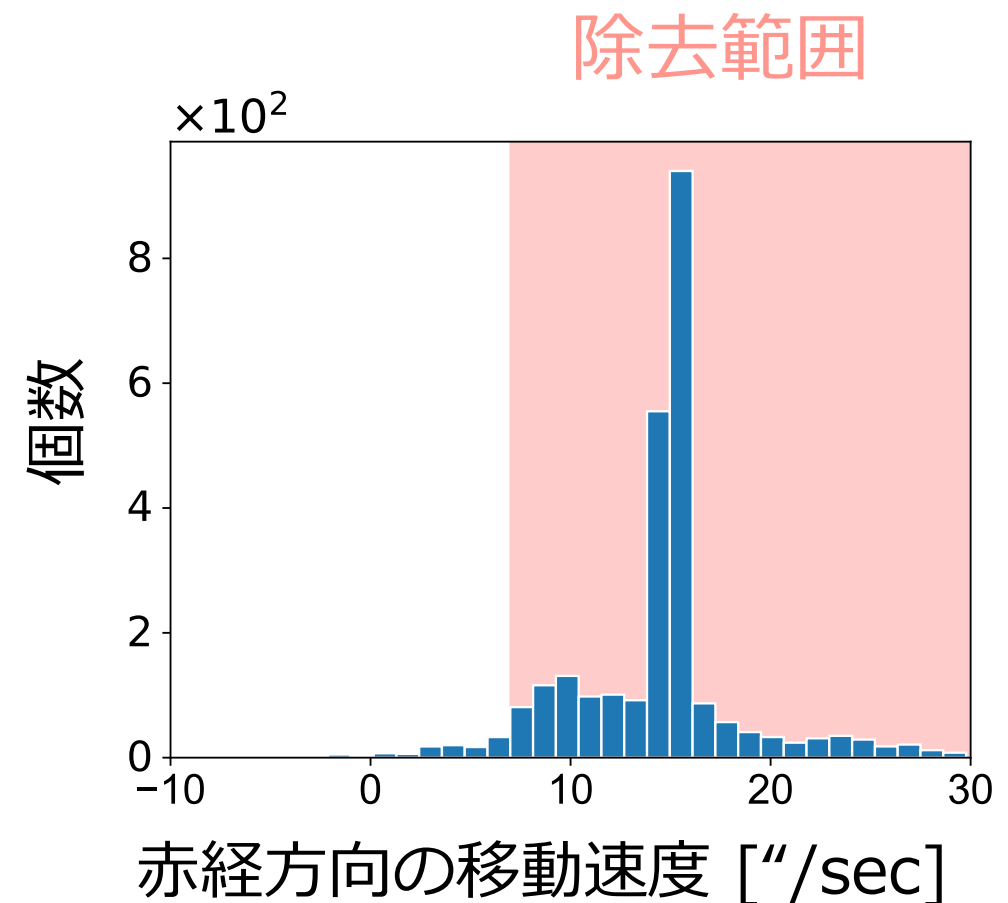
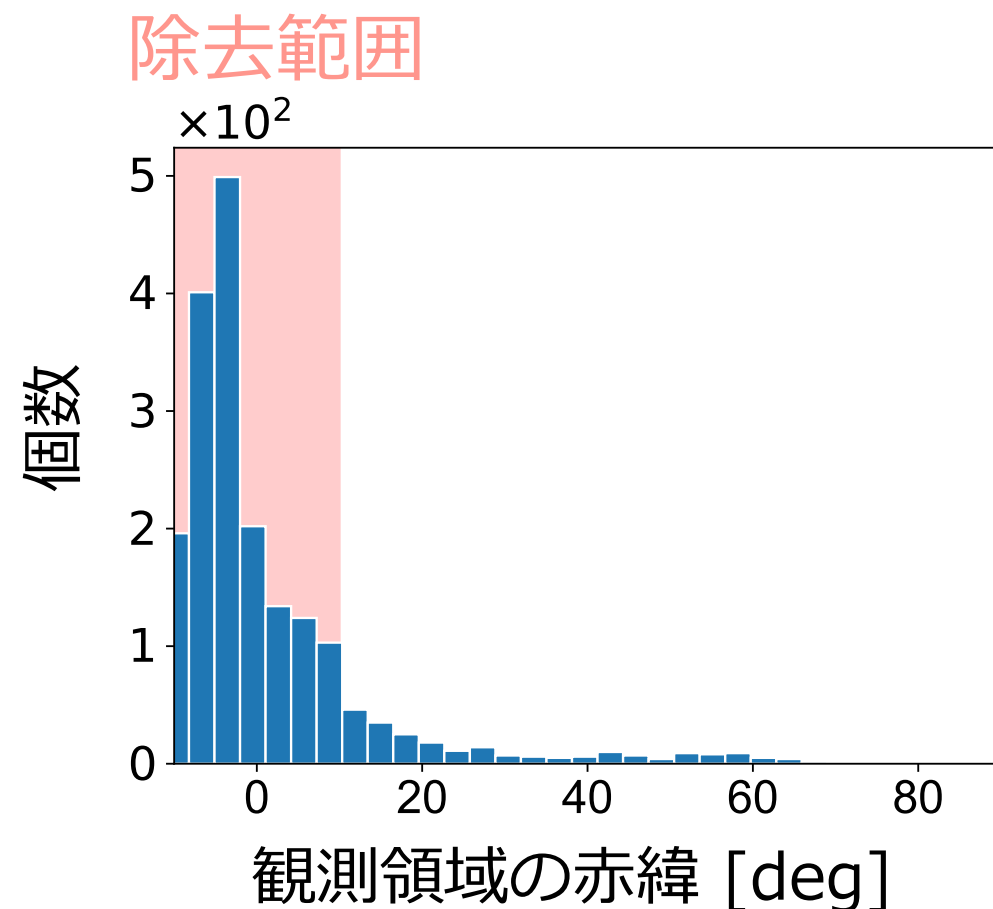
—人工天体の除去—

- ① カタログ化された人工天体を除去

2378件 → 1136件

- ② 人工天体に類似した見かけの動き・位置を示す天体を除去

1136件 → 173件

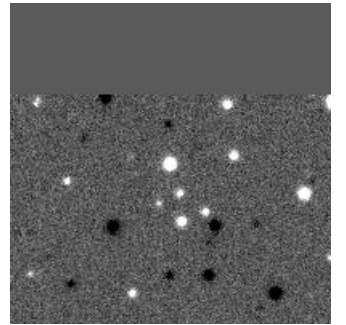


Space-Track カタログの人工天体の分布

高速移動 NEO の抽出 — 目視による確認 —

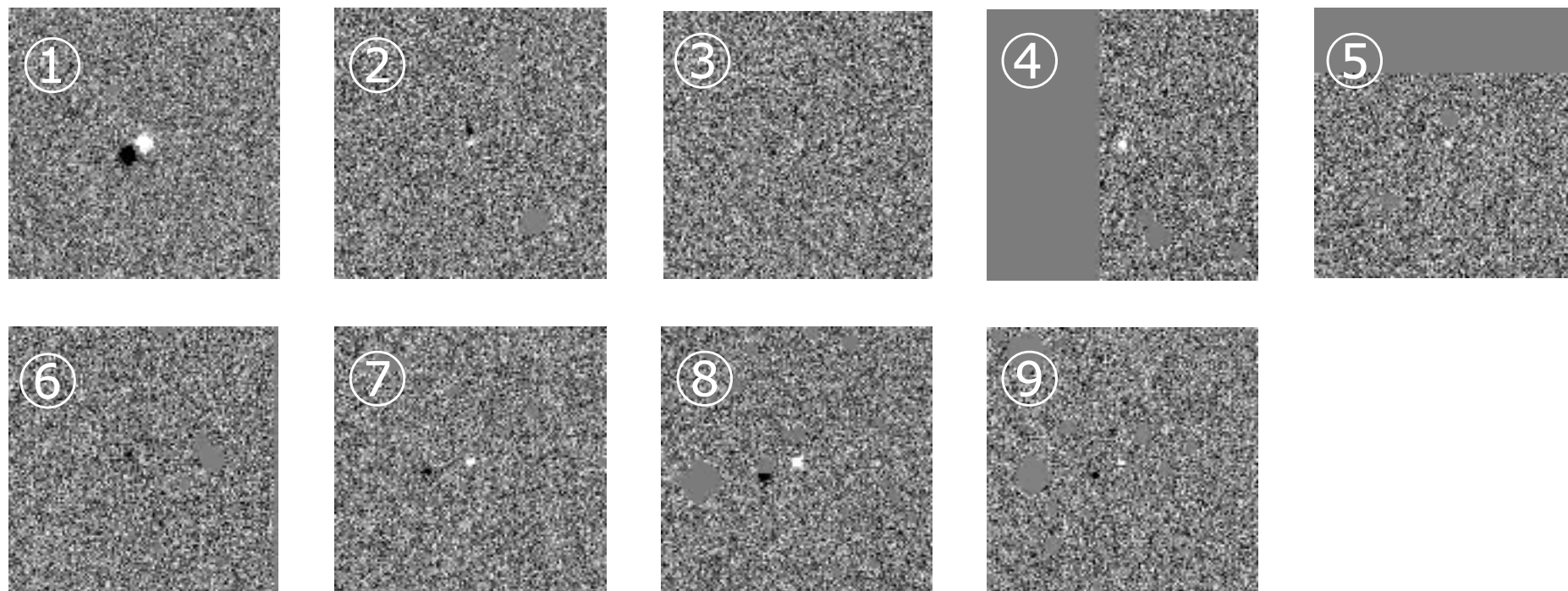
③ 残った173件を目視により確認

移動天体: 110件, 誤検出(多くは電気的エラー): 63件



電気的エラーの例
(差分画像)

110件の移動天体のうち, 一晩で3回以上検出でき
軌道を推定できた天体は **9件**
(NEOカタログに対応天体は存在しないことを確認)



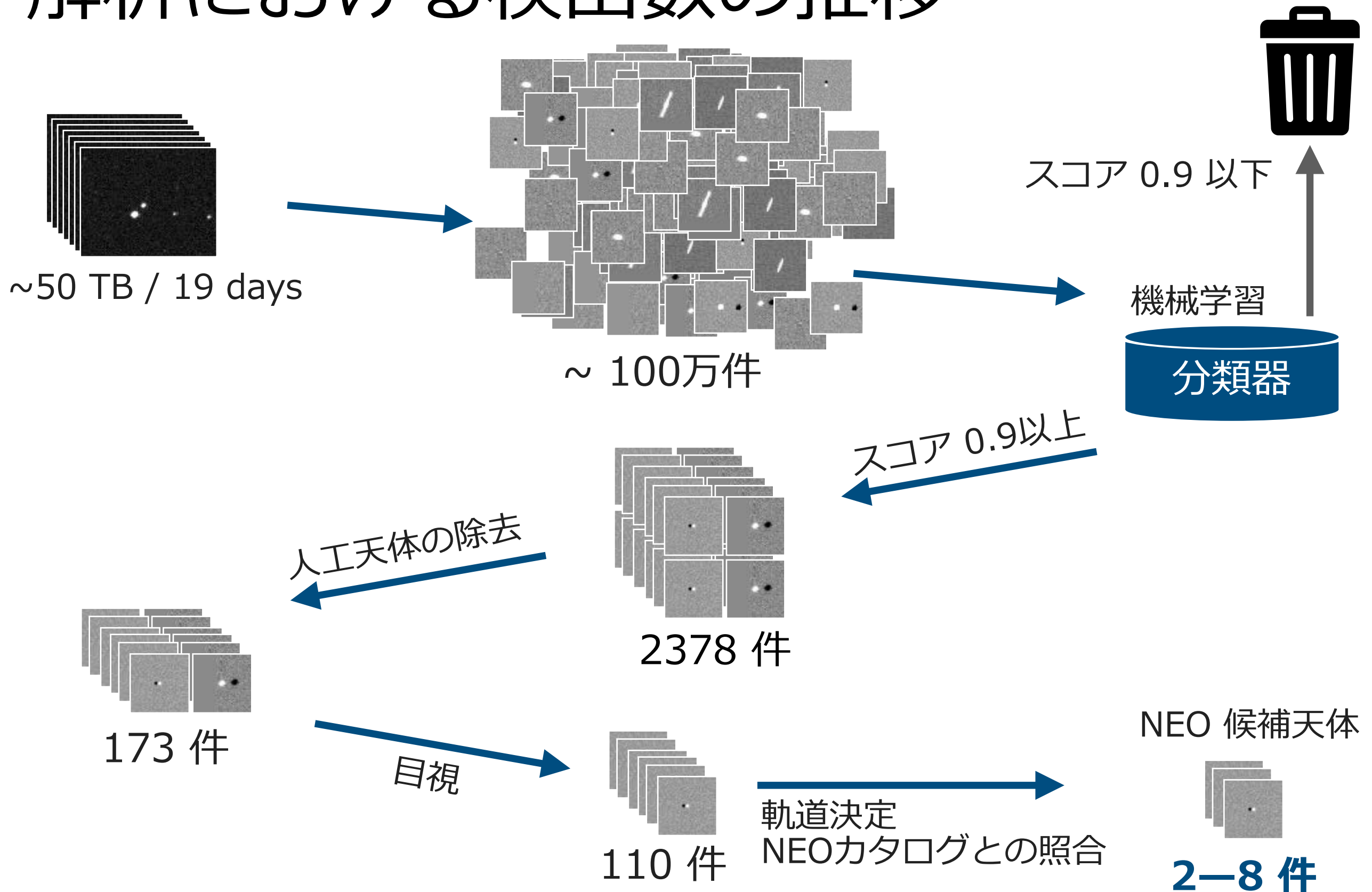
軌道を推定できた天体の軌道情報

	大きさ	arc	残差 ^b ["]	離心率 ^b	公転周期 ^b	近点距離 ^b	
天体① ^a	~40 m	2.2 hr	0.79	0.37	1.96 y	0.99 au	太陽周回
天体②	~20 m	2.6 hr	0.38	0.50	2.77 y	0.97 au	
天体③	~1 m	1.5 hr	1.62	0.96	89.78 d	3200 km	
天体④	~1 m	15.1 min	3.76	0.65	0.56 d	9900 km	
天体⑤	~0.2 m	40 min	2.44	0.51	0.93 d	20000 km	
天体⑥	~20 m	2.4 hr	0.61	0.77	0.89 d	8900 km	地球周回
天体⑦	~0.2 m	12.7 min	1.15	0.73	0.85 d	10000 km	
天体⑧	~1 m	35.7 min	5.34	0.57	0.80 d	16000 km	
天体⑨	~0.5 m	2.9 hr	1.05	0.56	1.01 d	19000 km	

a) 中野主一氏に軌道計算を依頼

b) 軌道決定ソフトウェア Find_Orb により算出, 有効数字2桁まで表示

解析における検出数の推移

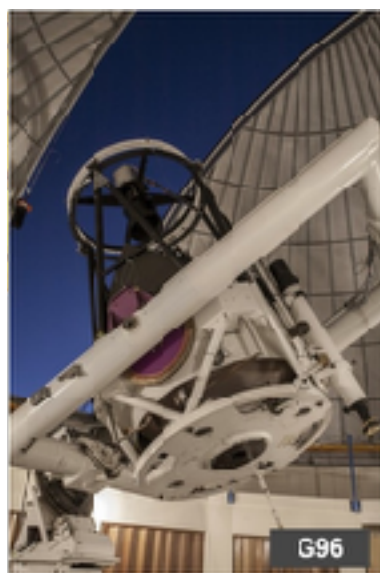


検出数の比較

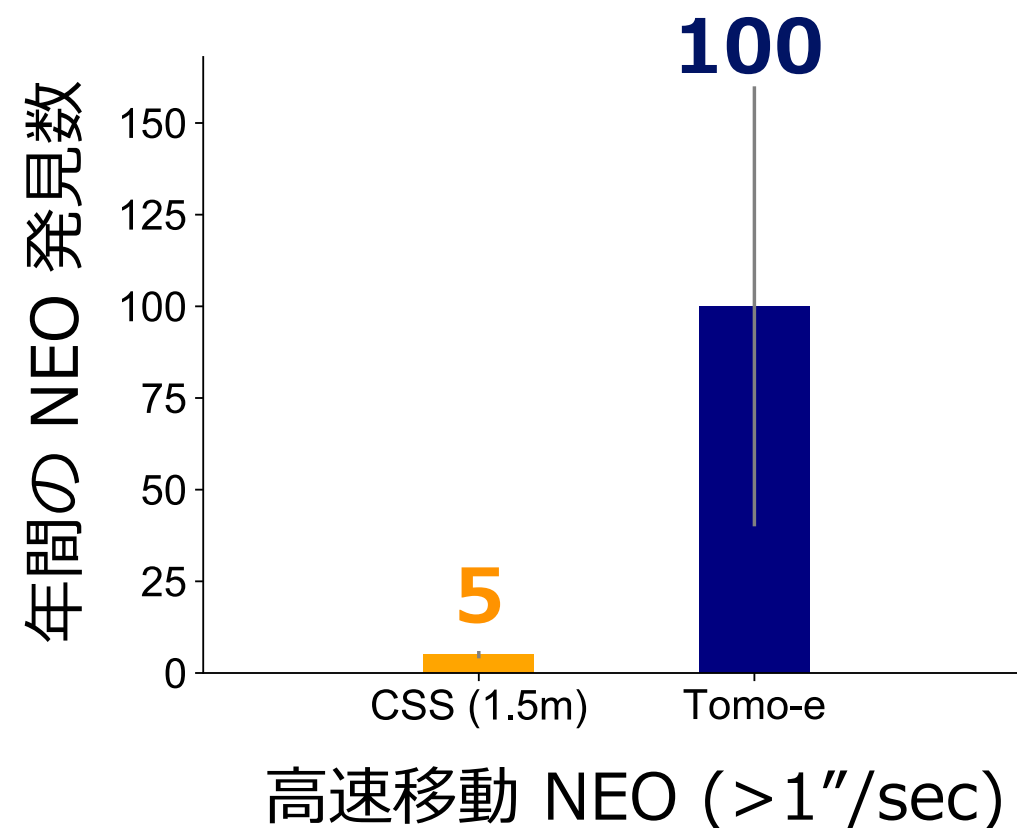
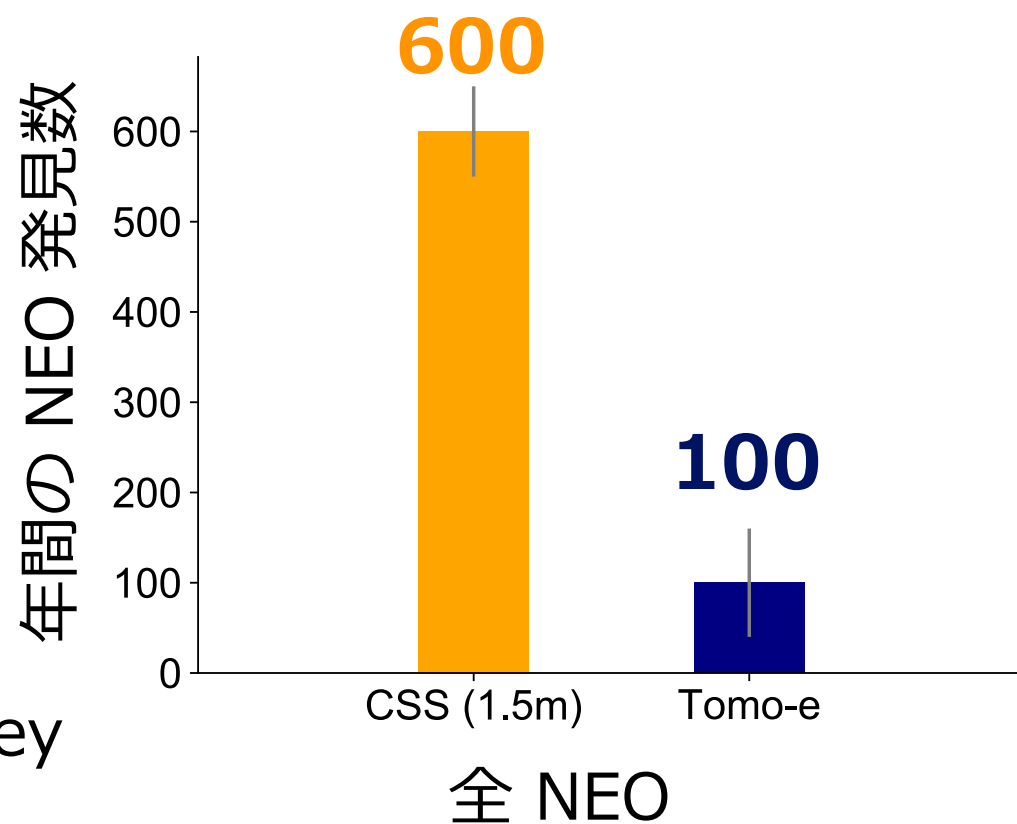
約20日間の観測により, NEO 候補天体を2件検出 ($D > 20\text{m}$)

➡ 1日あたりの予想検出数 (0.4—4件/夜) と桁で一致

84枚のCMOSによる全天観測では
年間40—160個の高速移動 NEO の検出が期待



Catalina Sky Survey
(1.5m)



今後の研究への課題

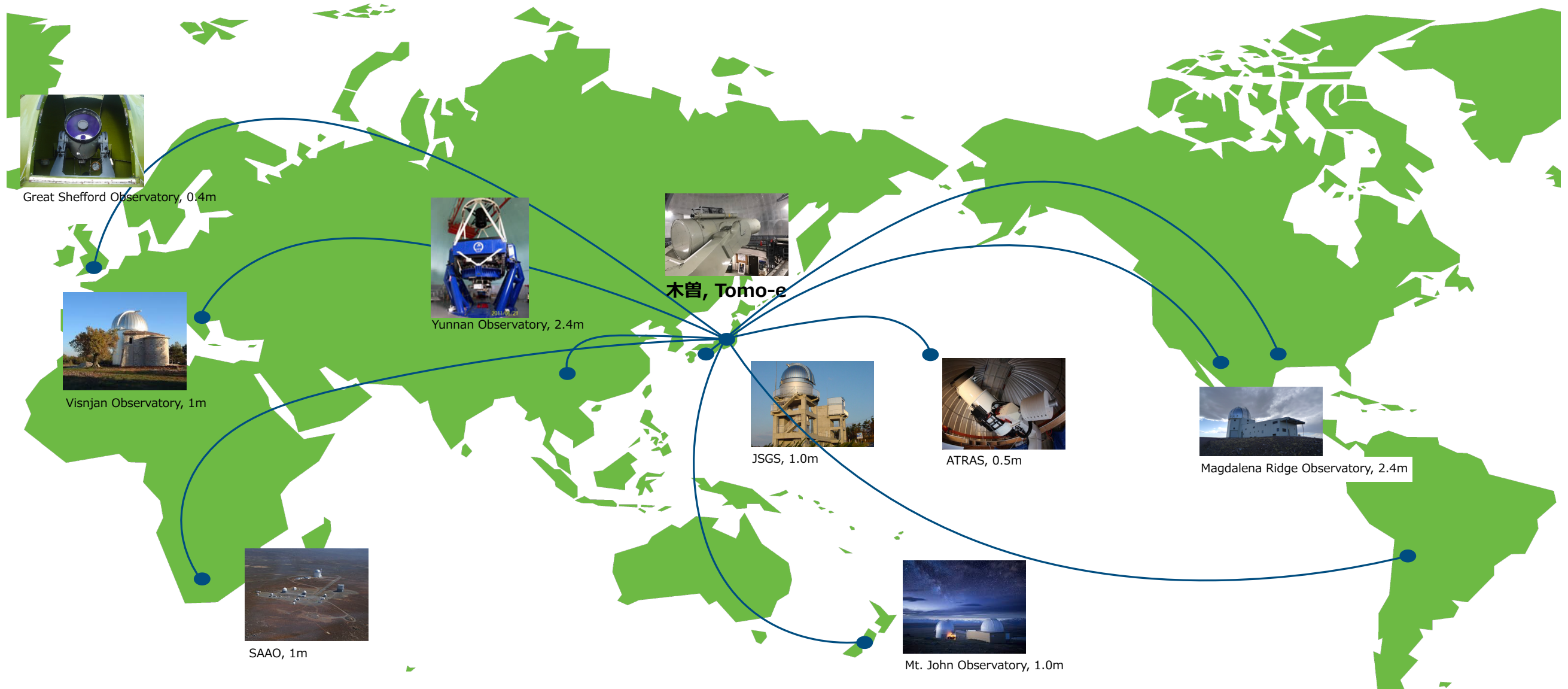
—迅速な追観測と軌道決定—

高速移動 NEO の確認には発見から数時間以内の追観測が重要

- 対象天体を見失う
- 急激な明るさの減少

➡ 世界的な連携

NEOCP
APAON



まとめ

- 一枚岩小惑星は太陽系科学において重要
- Tomo-e Gozen は高速移動NEOを高い感度で検出可能
- 動画データからの高速移動天体の探査システムを開発
 - 機械学習は従来の方法に比べて, 誤検出の数を10万件から2000件へ削減
- Tomo-e Q1 (21センサ) により, 広視野試験観測を実施
 - 2-8天体のNEO候補天体を検出
 - 来年度より年間40-160件の高速移動NEOを検出できる