

高速移動する地球接近天体の広視野探査

～ 小島悠人氏2018年度東京大学修士論文より ～

東京大学 酒向重行

木曽超広視野高速 CMOS カメラの性能評価及び
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

修士論文発表会 2019年2月8日 10:00-10:30



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

今日はココをお話します



シュミット望遠鏡と木曾の星空

小惑星

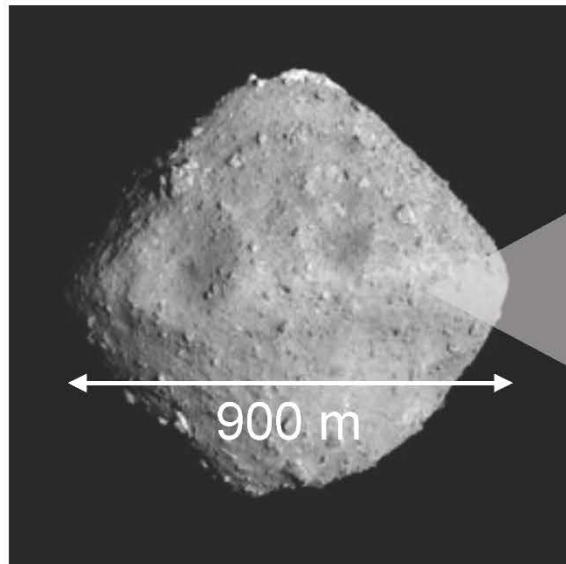
太陽系形成時の情報を保持 (組成, 衝突史)

ラブルパイル小惑星

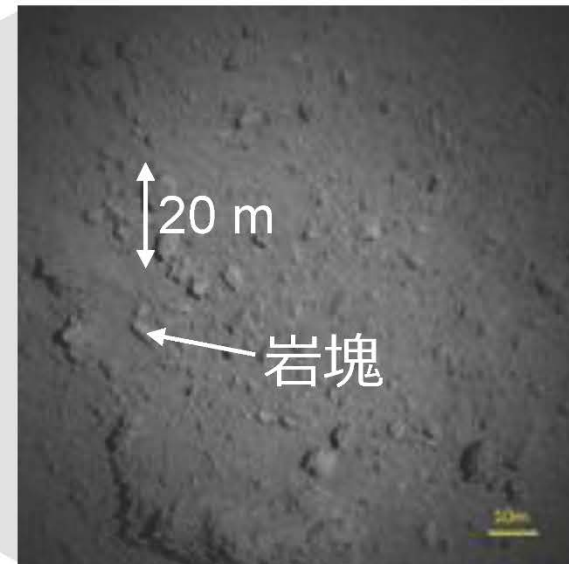
- 小さな岩塊が集積して形成
- 自転周期 < 2.2時間で分裂

一枚岩小惑星

- 一枚の岩として存在
- 自転が速くても安定に存在

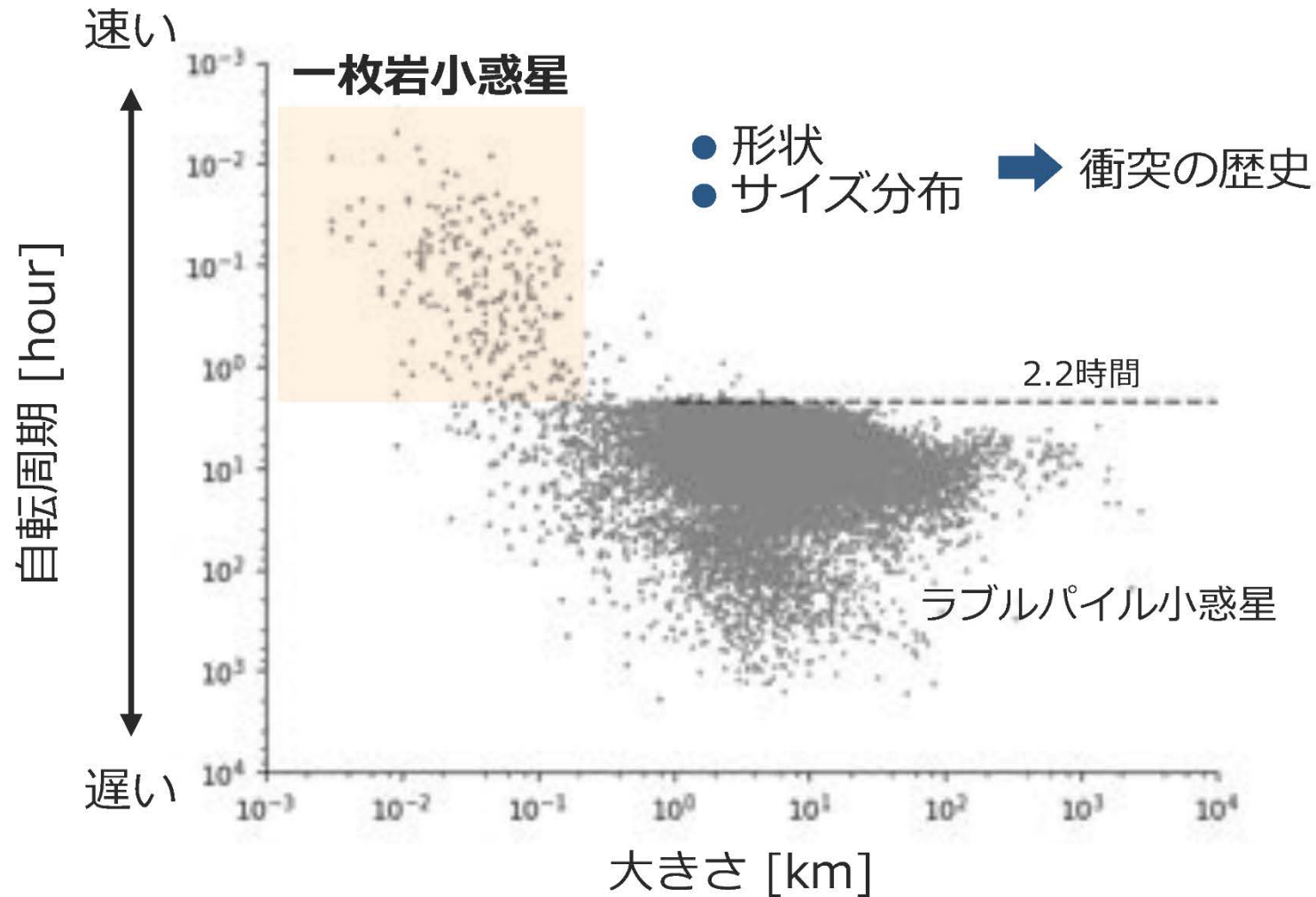


(162173) Ryugu



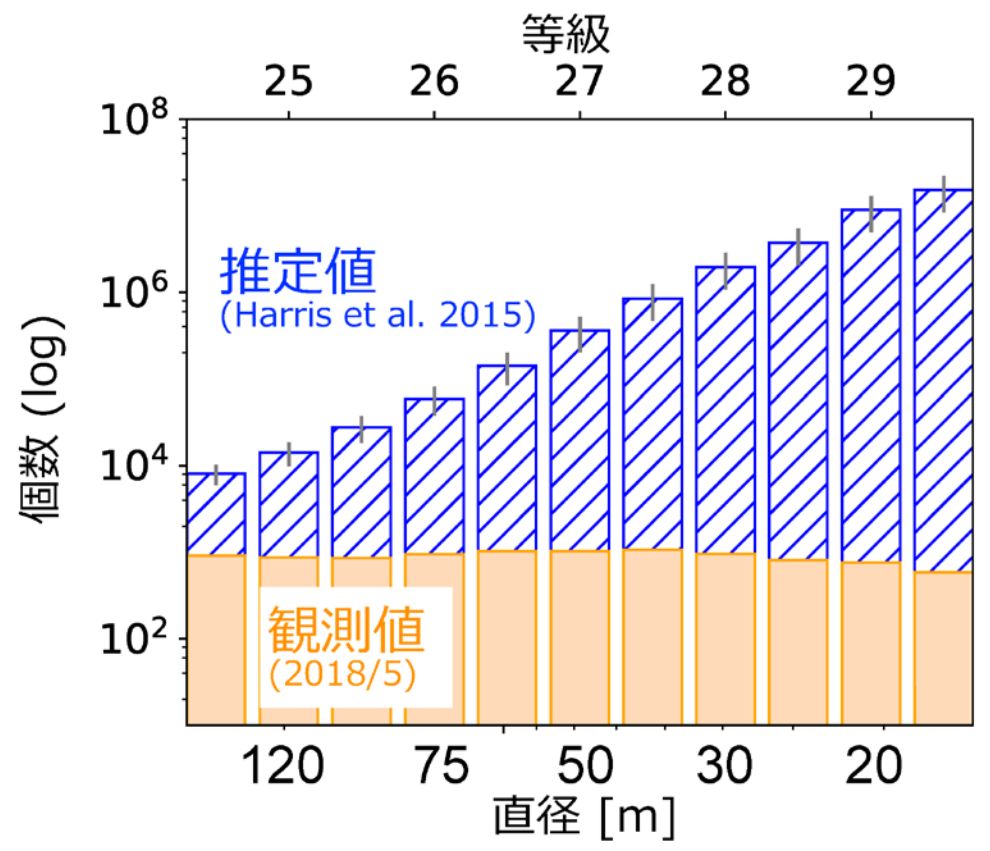
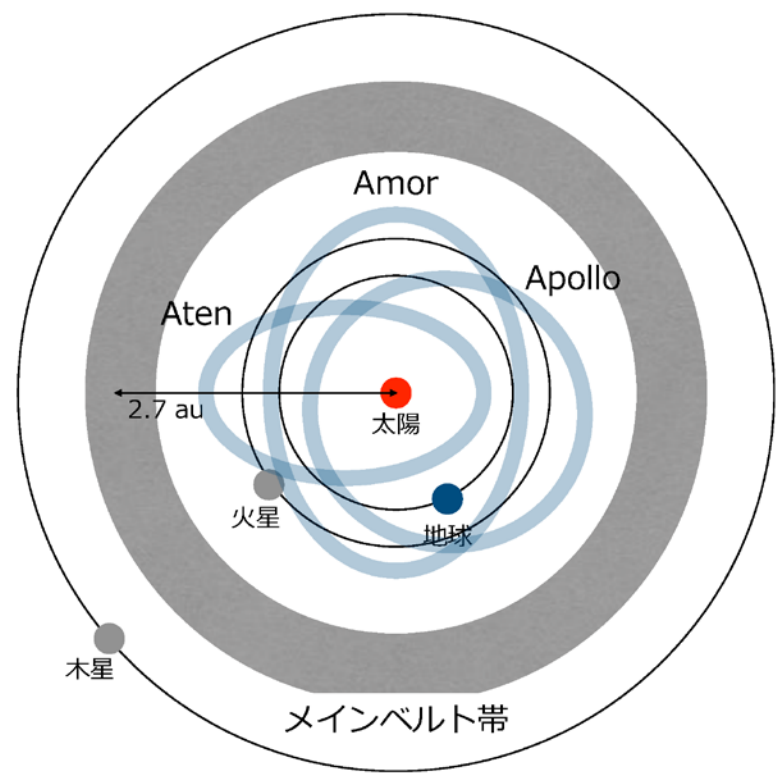
提供: JAXA

小惑星の大きさと自転の関係



地球接近天体 (Near Earth Object; NEO)

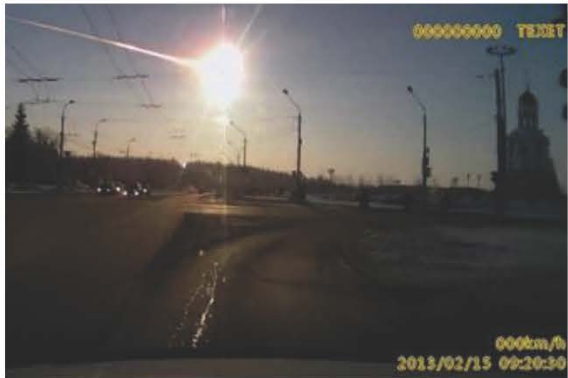
近日点距離が1.3天文単位未満の小惑星又は彗星
メインベルト帯から軌道進化した天体



微小 NEO のサイズ分布

プラネタリーディフェンス

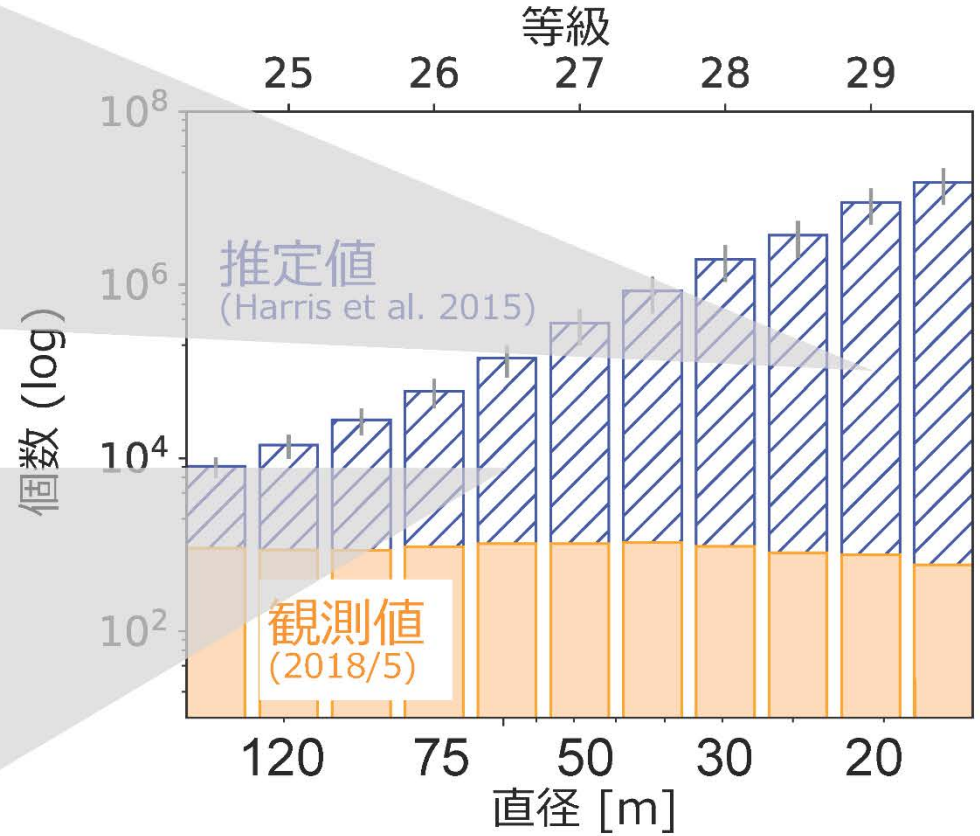
小さい小惑星ほど地球への衝突確率が高い



2013年 チェラビンスク隕石



1908年 ツングースカ隕石



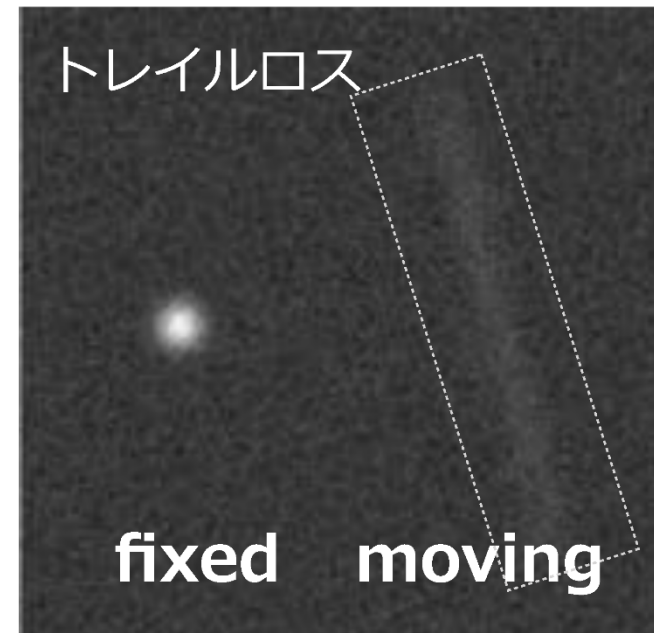
微小 NEO のサイズ分布

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
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

➡ 広視野かつ動画での観測



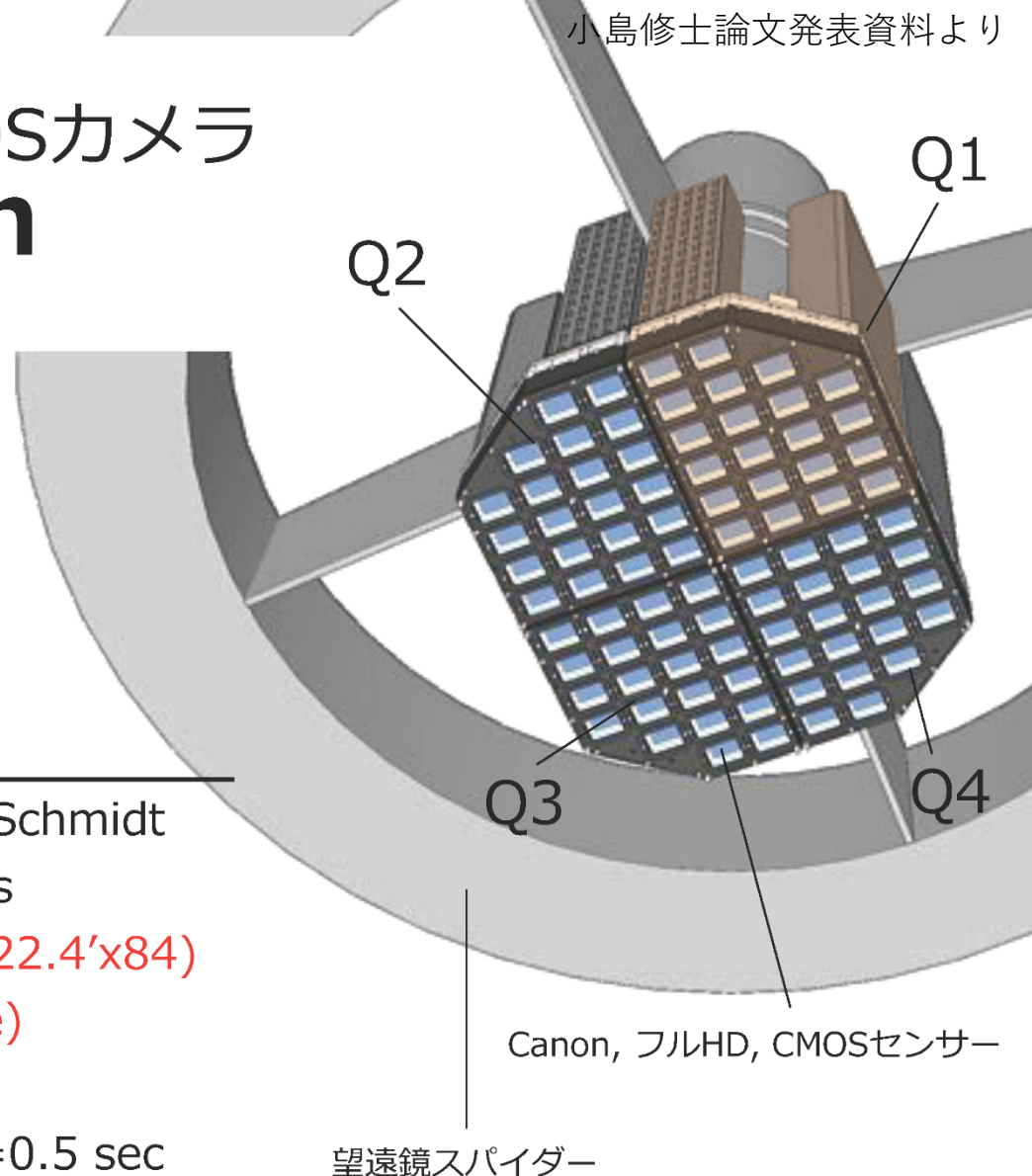
2. 木曾超広視野高速カメラ **Tomo-e Gozen** の全天動画観測計画



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

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

全天動画観測計画

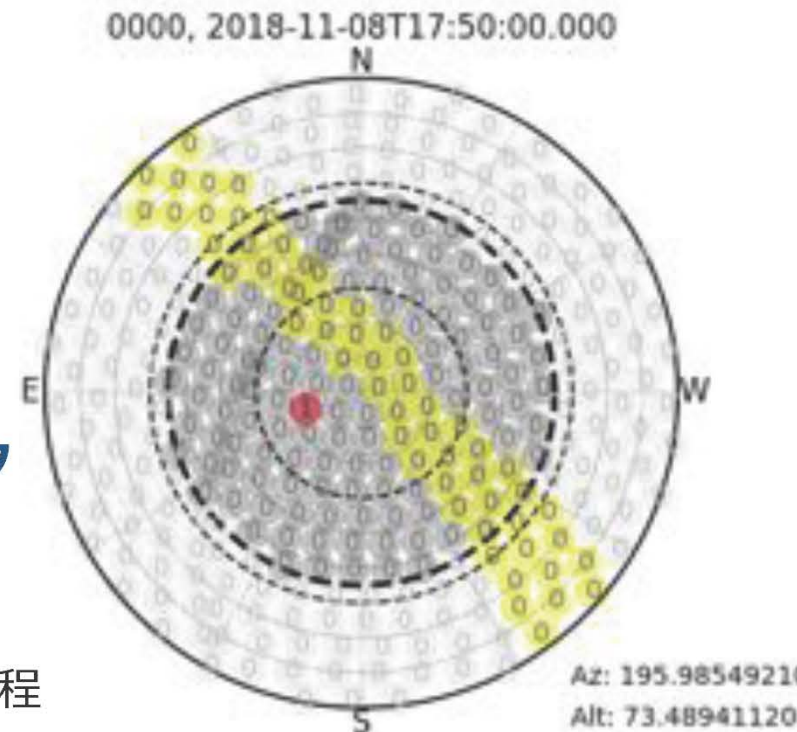
科学目的

- 高速移動NEO
- 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

本研究での実施内容

NEO 観測のための Tomo-e Gozen 装置開発

- 時刻取得システム
- 状態監視システム
- カメラの放熱機構の開発
- カメラの性能評価
- 感度計算



絶対時刻評価試験



効率測定試験

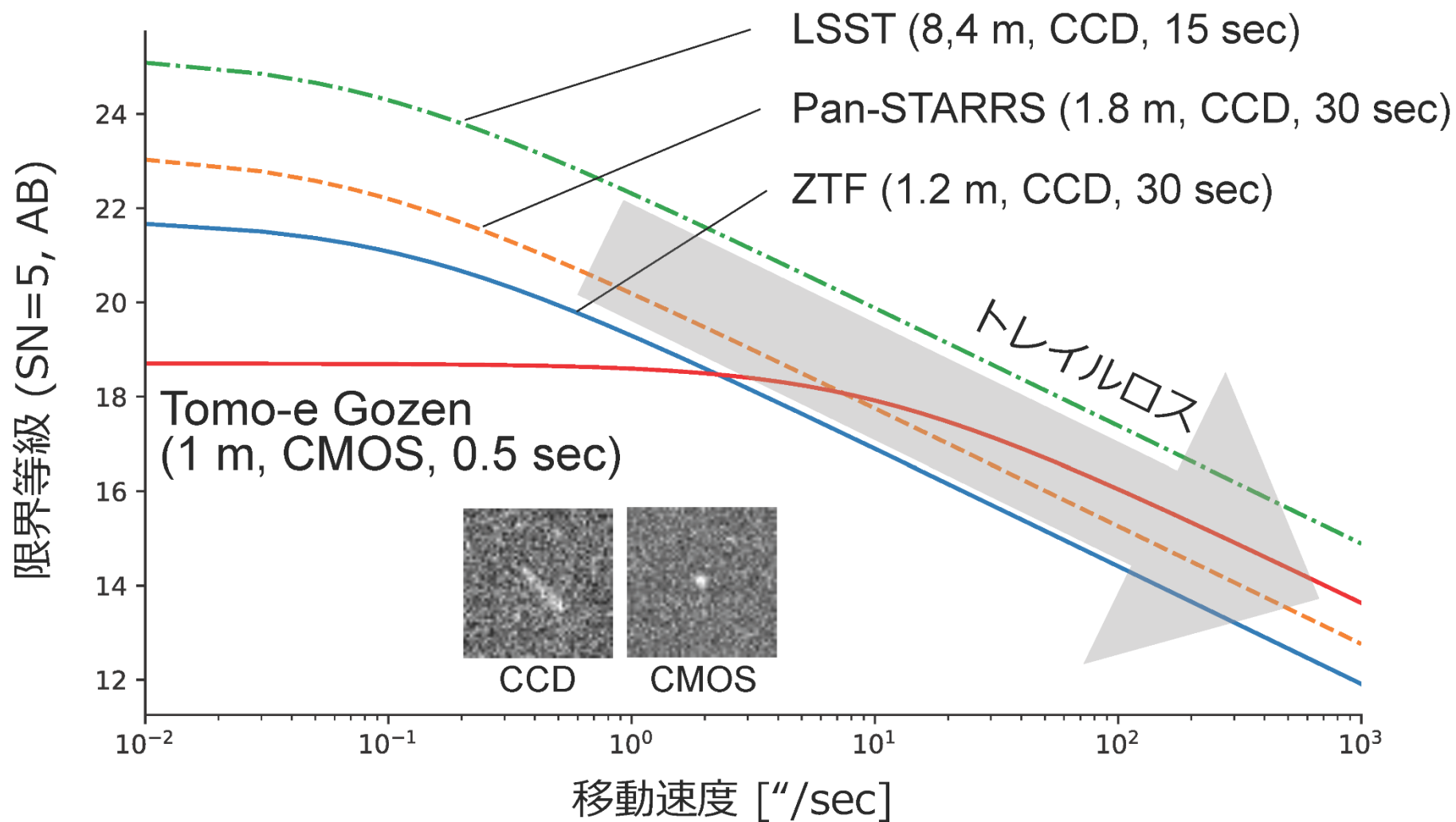
小惑星の検出システムの開発

- 動画データからの検出手法
- 機械学習の適用
- 試験観測



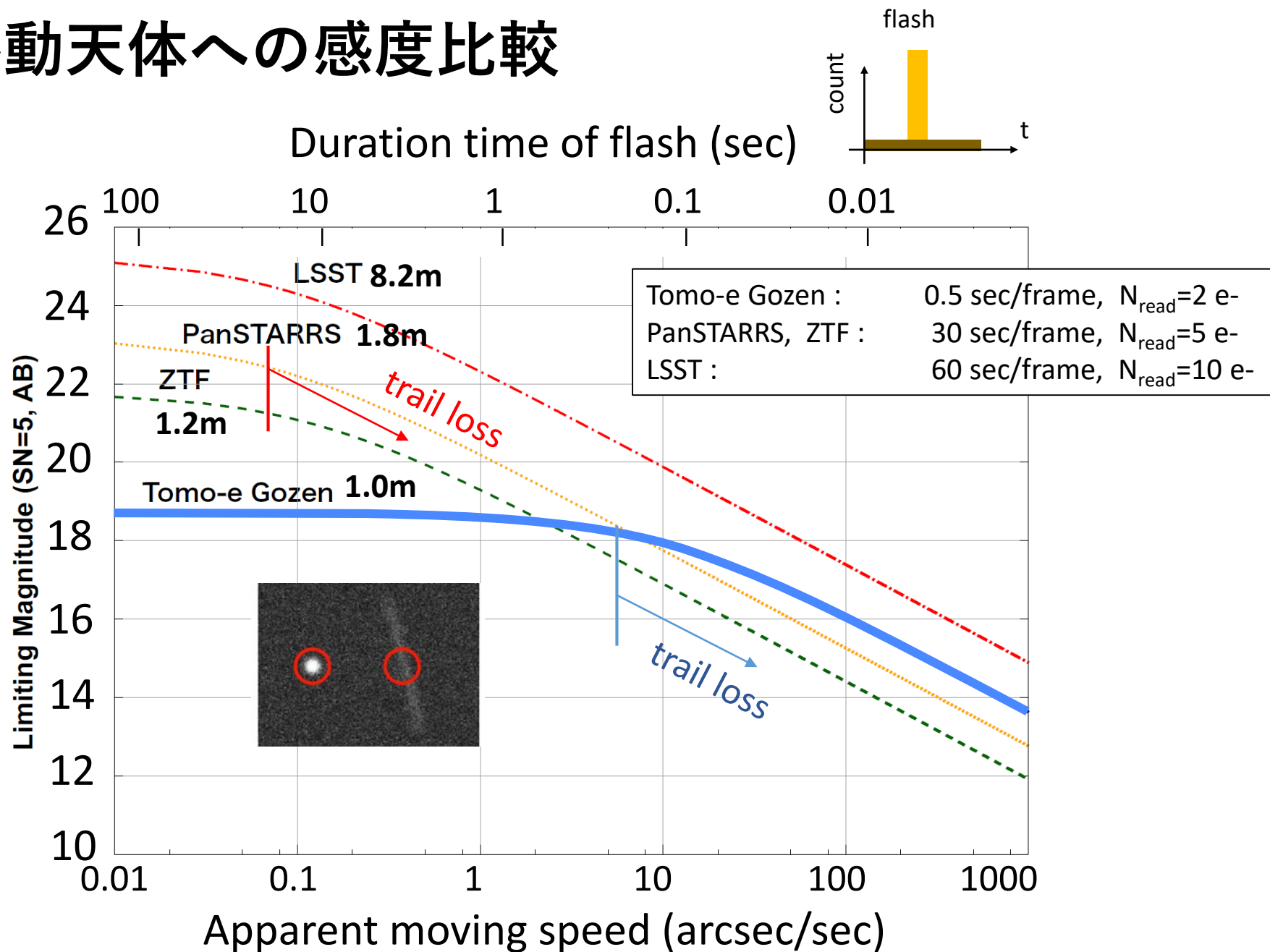
望遠鏡搭載・試験観測

移動天体への感度比較 (Kojima+2018)

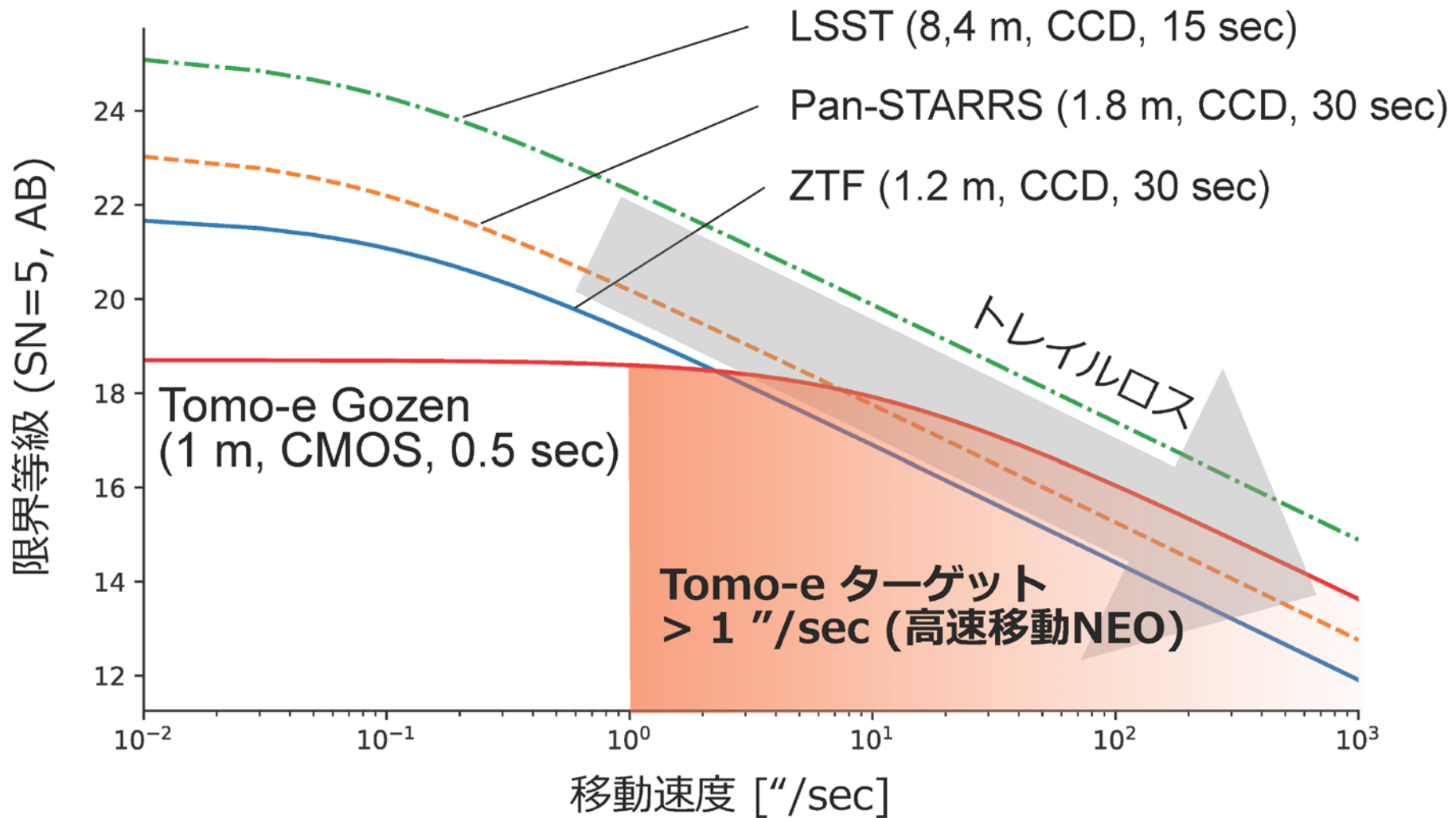


※ 本研究の性能評価結果より算出

移動天体への感度比較



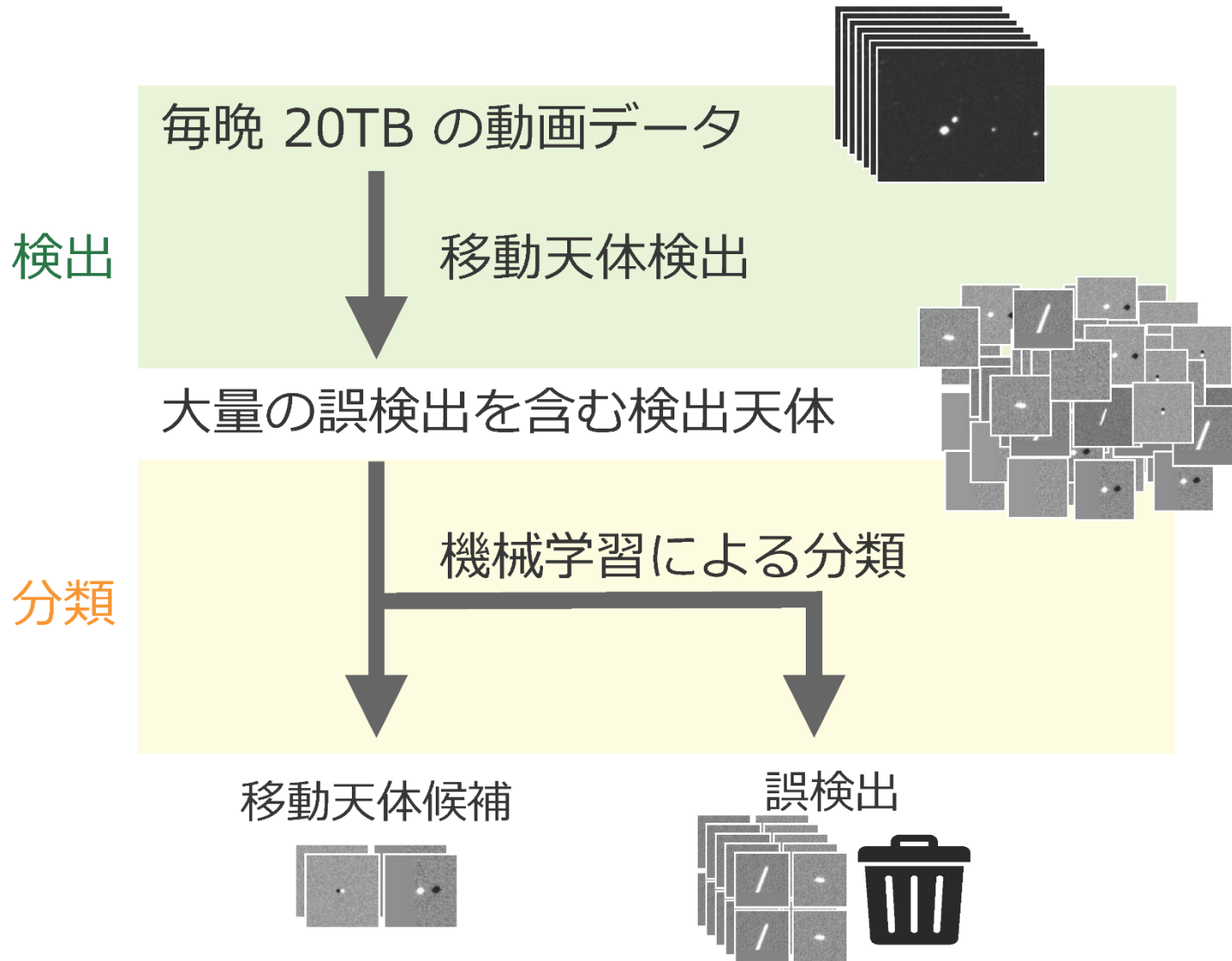
移動天体への感度比較 (Kojima+2018)



※ 本研究の性能評価結果より算出

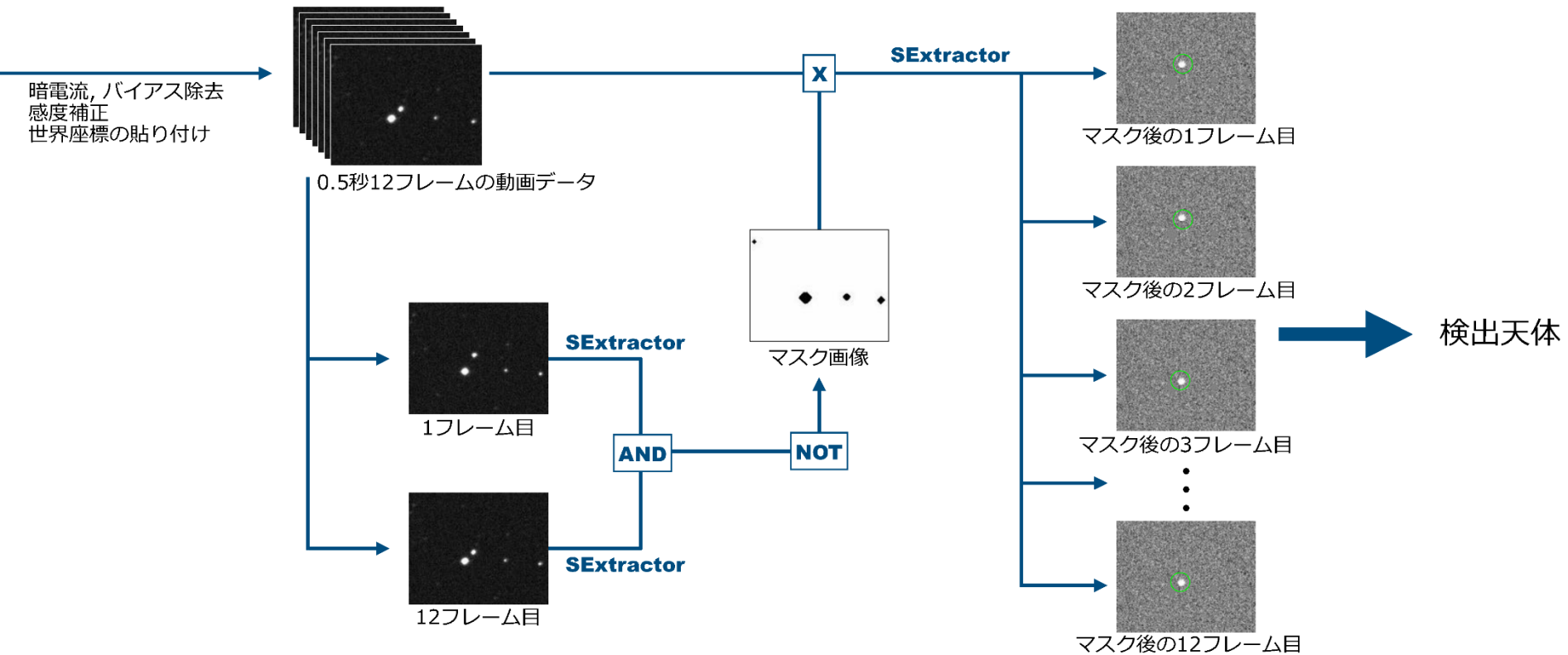
3. 機械学習を用いた 高速移動天体の探査システムの開発

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

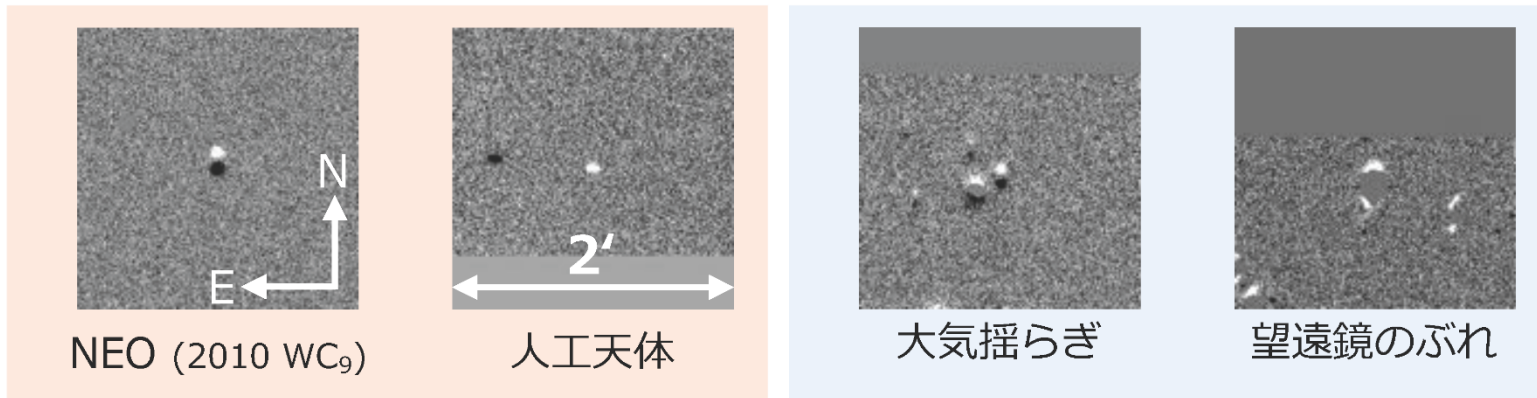
本研究では以下の検出アルゴリズムを開発



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

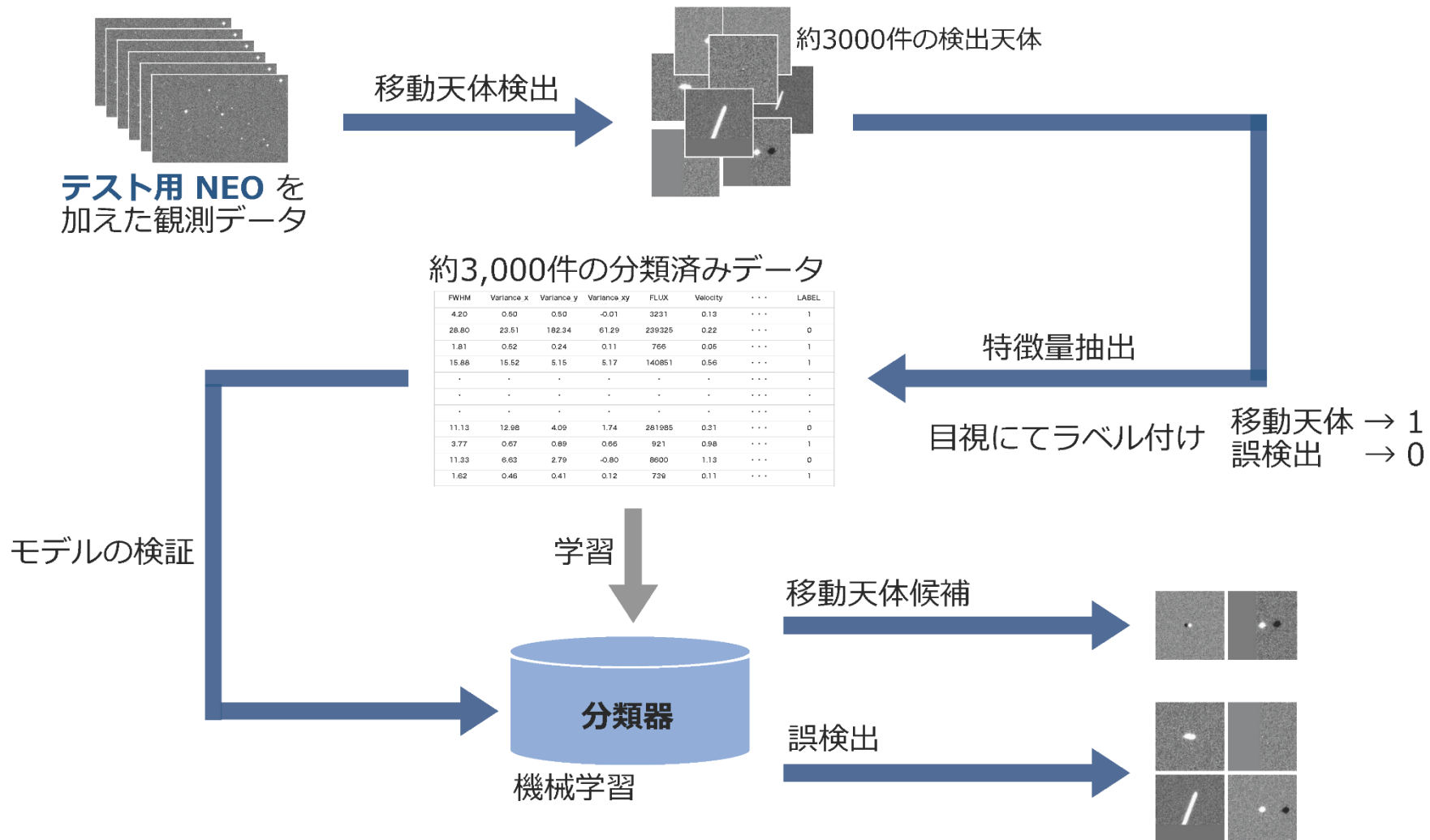


移動天体
($\sim 100/2,000$)

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**

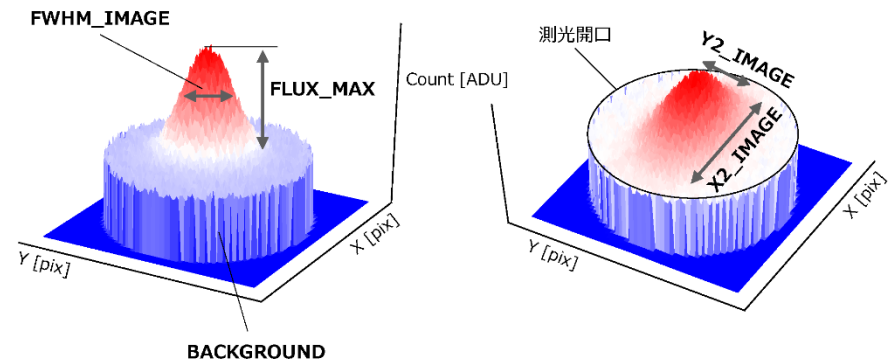
機械学習を用いた分類



特徴量の抽出

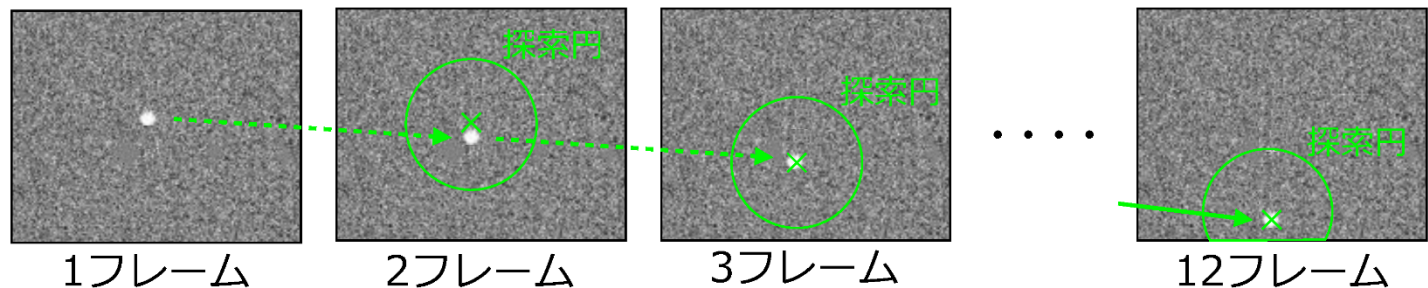
静止画的 (Morii et al. 2016, Waszczak et al. 2017)

- 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

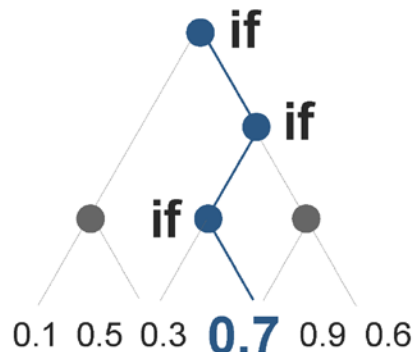
- フレーム間の移動量の平均, 分散
- フレーム間で同一天体を検出できた回数
- 移動の向きが変わった回数



分類器の作成

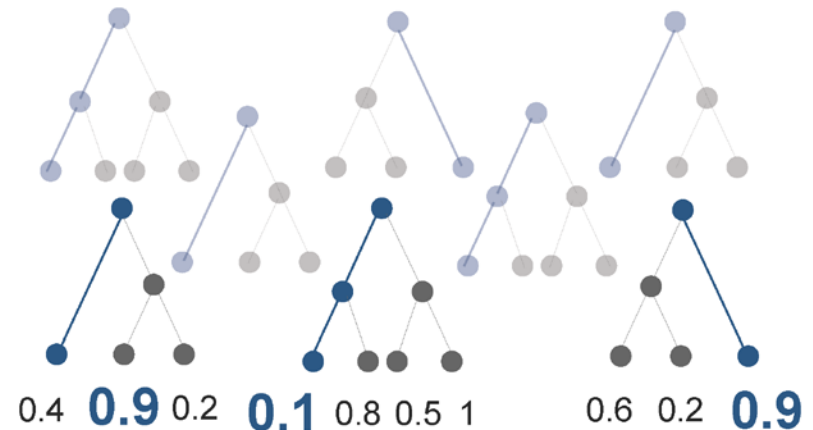
制限付き決定木 (従来の)

- 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]**

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

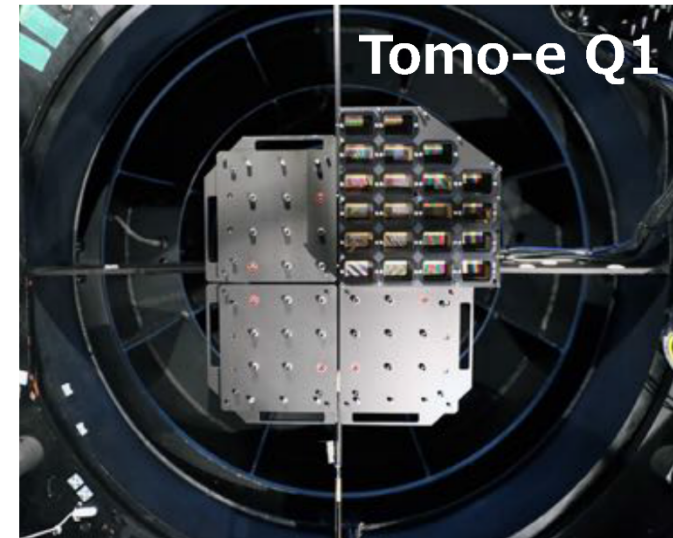
4. Tomo-e Gozen Q1 による広域試験観測

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, 2x2dithers
- データ量：3.5 TB/day

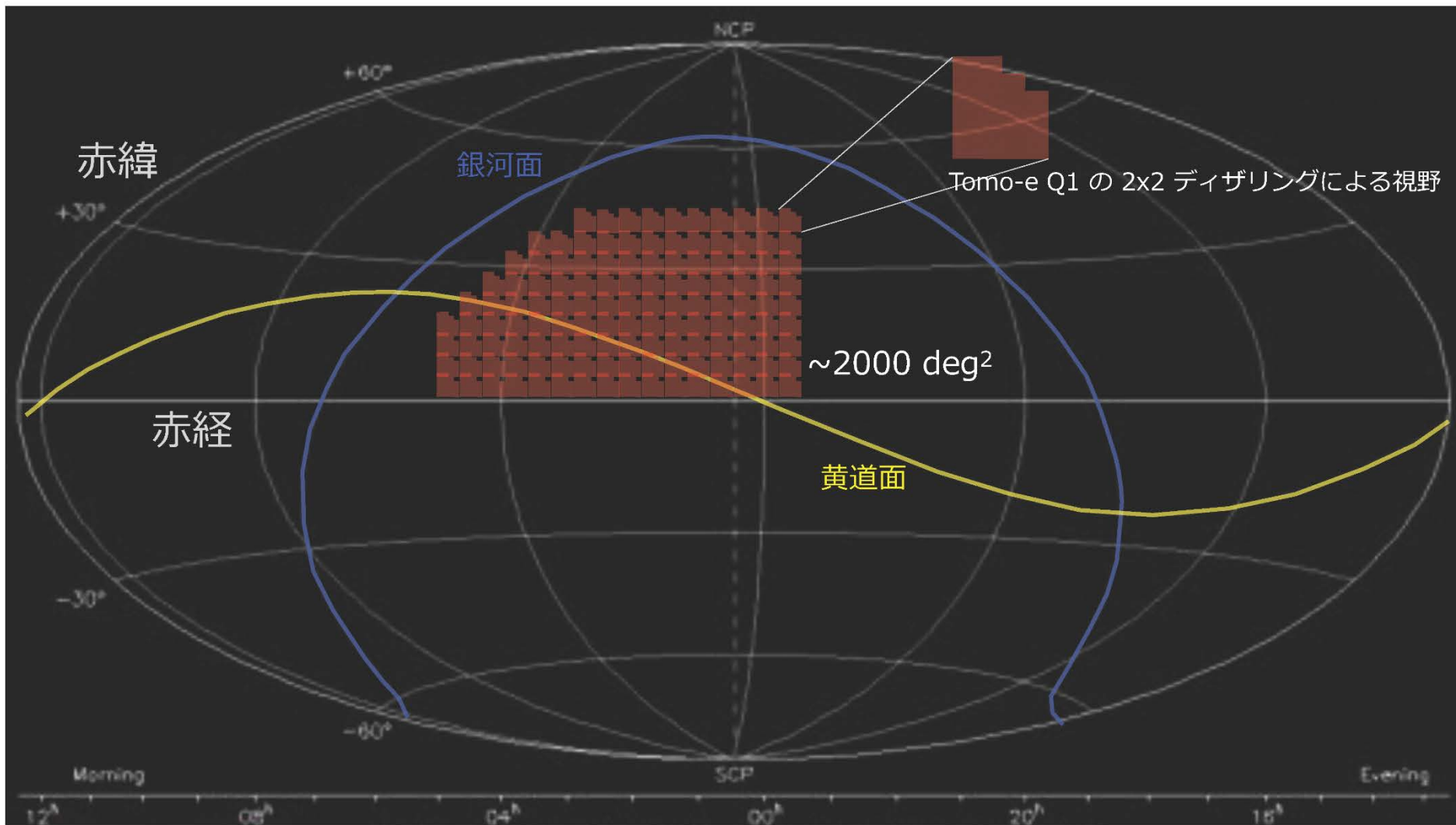
Tomo-e での高速移動 NEO 検出期待値

- ✓ 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 ($D > 20\text{m}$)

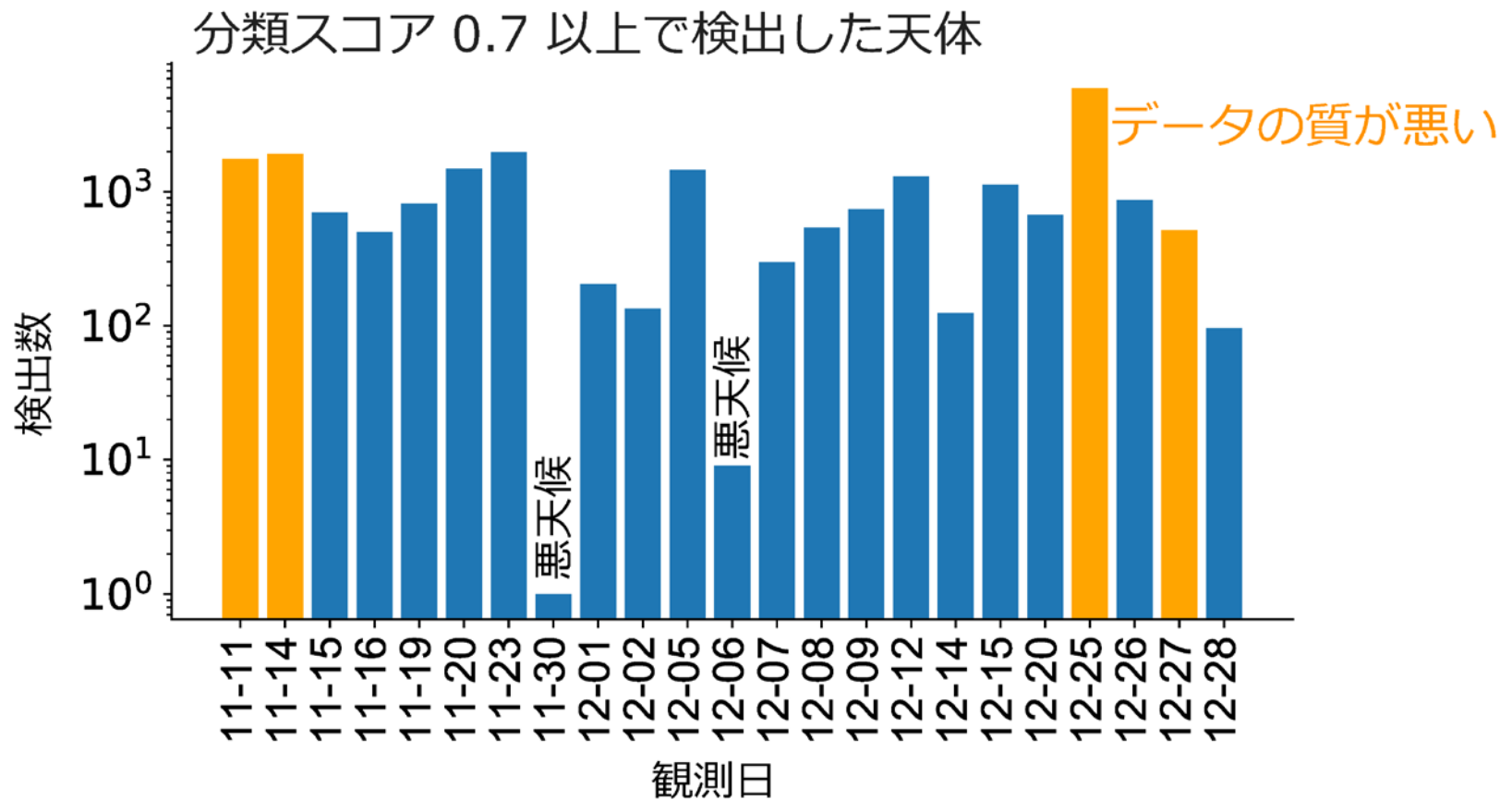


観測領域

一晩あたり2.5時間間隔で2000平方度を観測

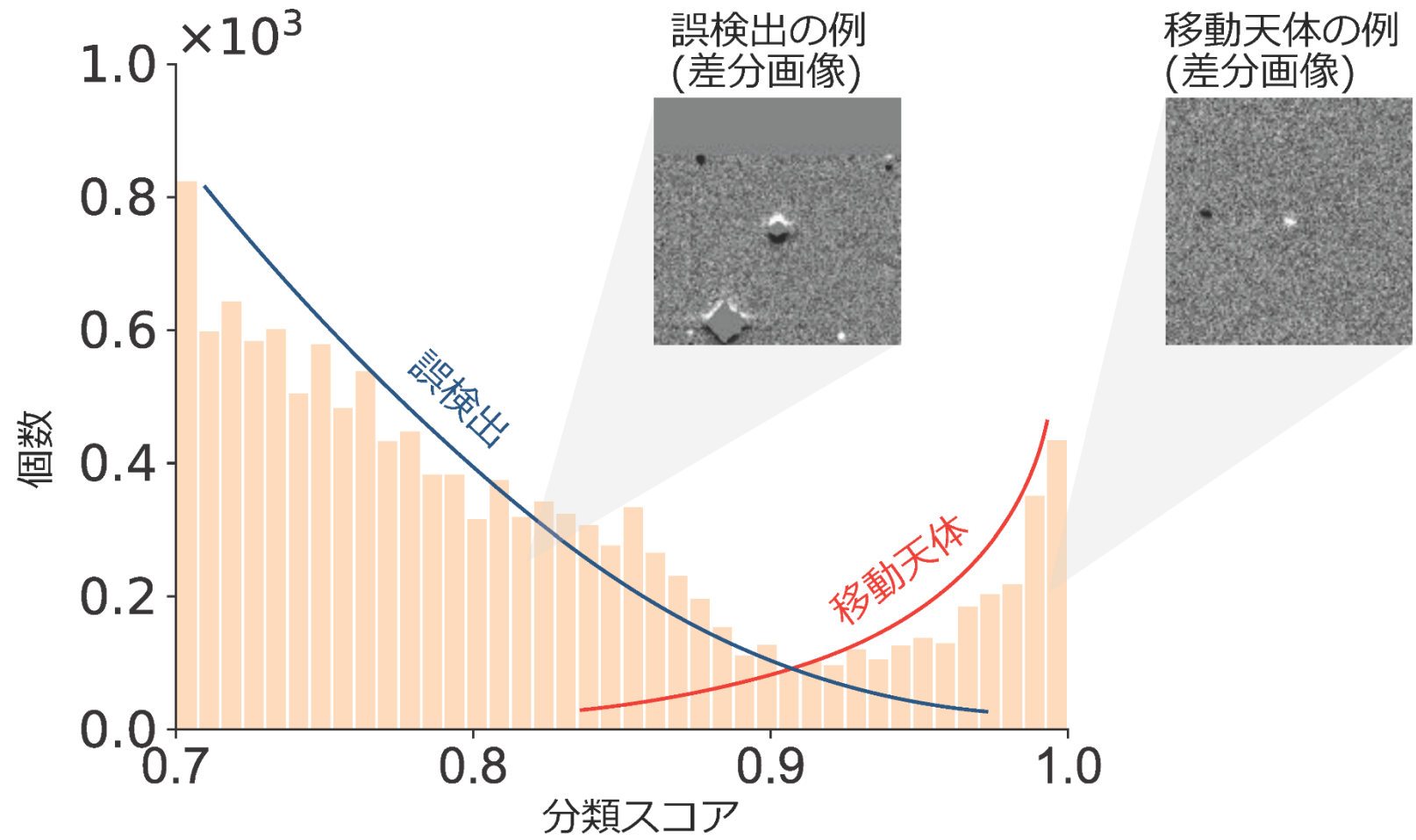


移動天体候補の検出数



質の高いデータが取得できた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

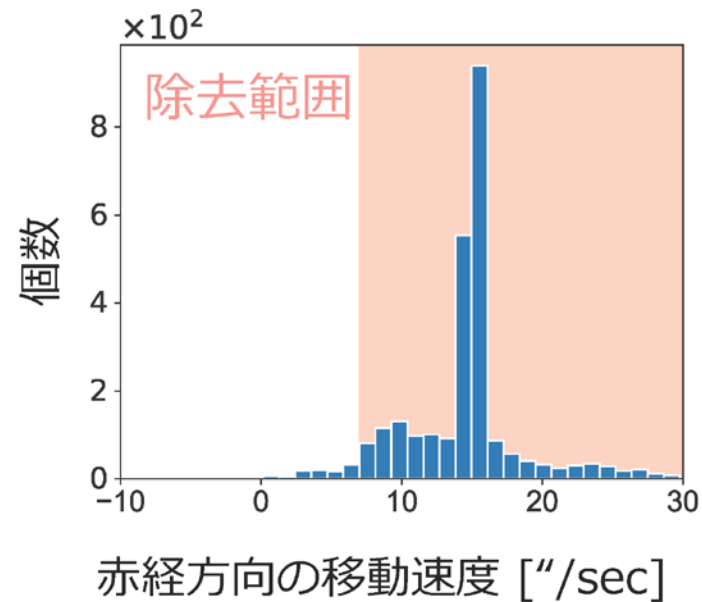
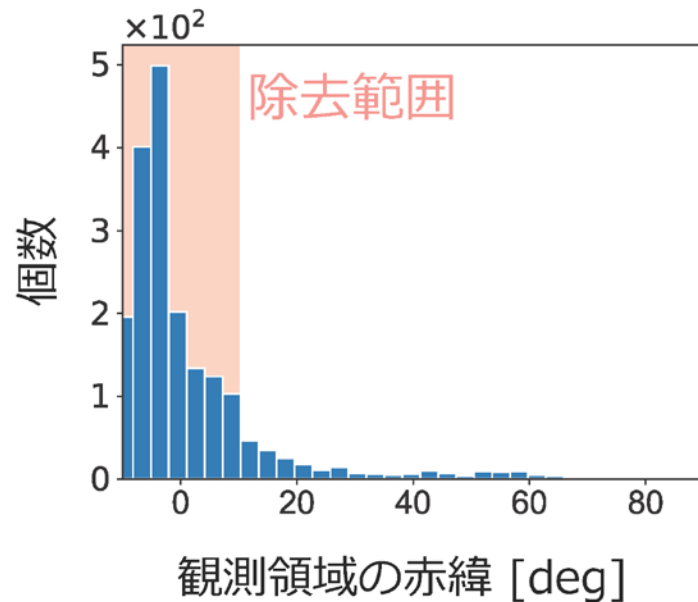
—人工天体の除去—

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

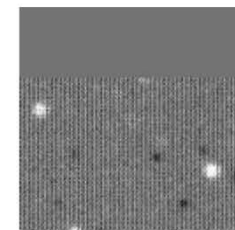


Space-Track カタログの人工天体の分布

高速移動NEOの抽出 —目視による確認—

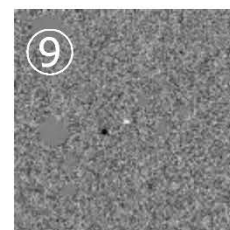
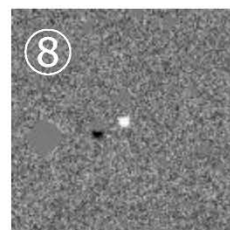
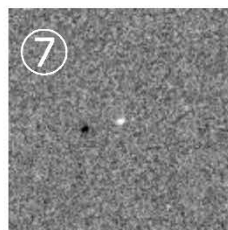
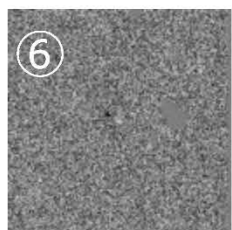
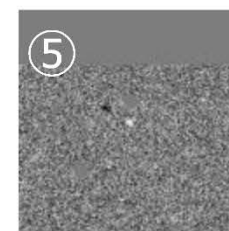
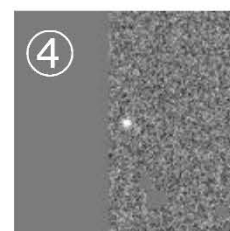
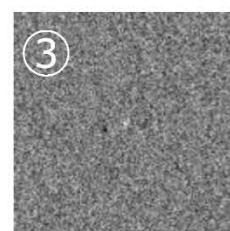
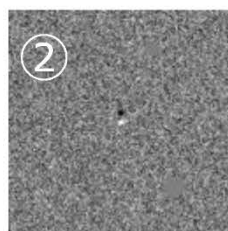
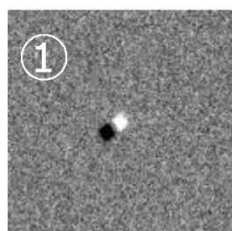
③ 残った173件を目視により確認

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

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)



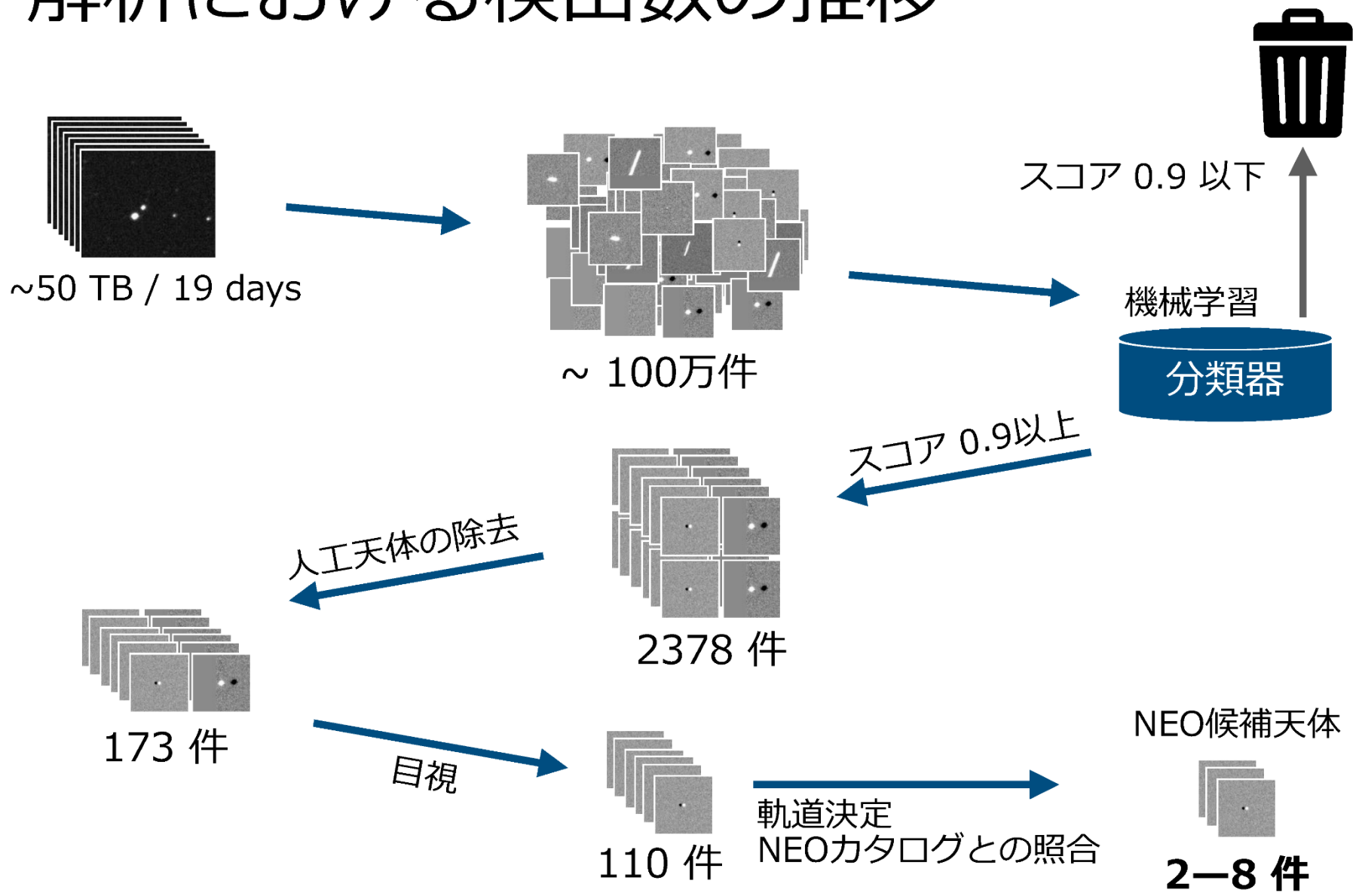
軌道を推定できた天体の軌道情報

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

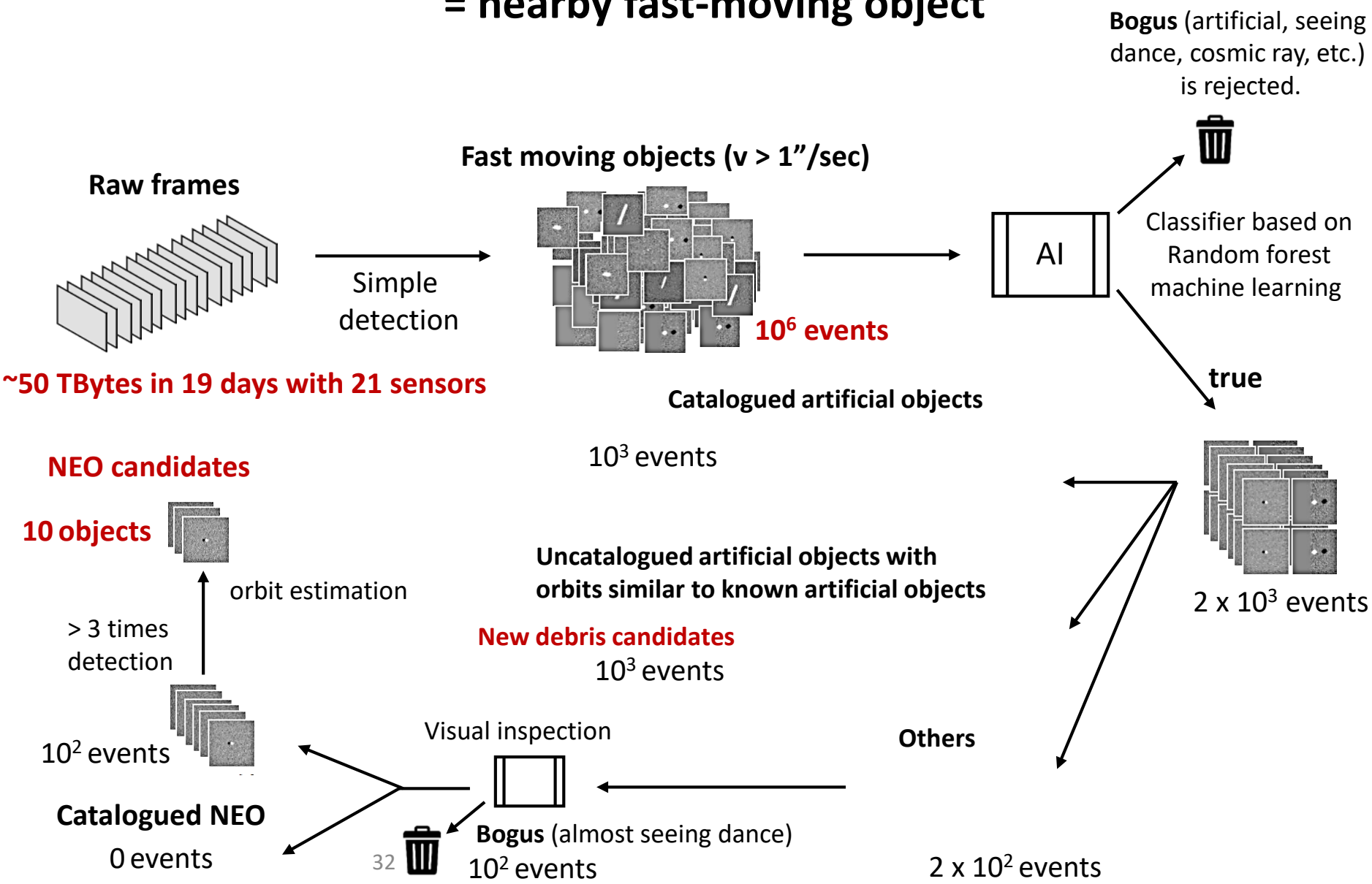
a) 中野主一氏に軌道計算を依頼

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

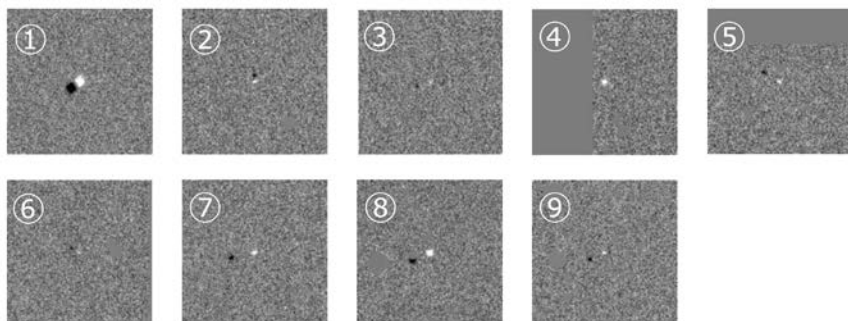


Trial of survey for 10-m size NEOs = nearby fast-moving object

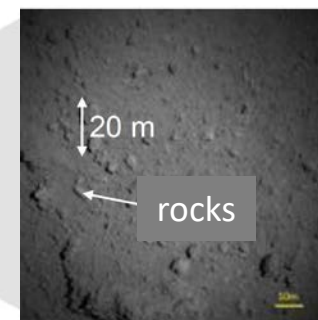
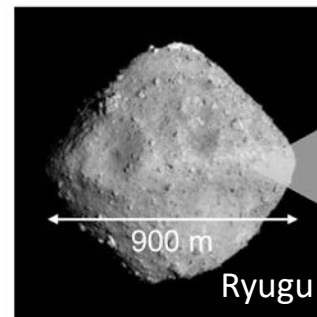


Derived orbits and sizes

object	size	arc	fitting err(")	e	P	closest distance
#1	~40 m	2.2 hr	0.79	0.37	1.96 y	0.99 au
#2	~20 m	2.6 hr	0.38	0.50	2.77 y	0.97 au
#3	~1 m	1.5 hr	1.62	0.96	89.78 d	3200 km
#4	~1 m	15.1 min	3.76	0.65	0.56 d	9900 km
#5	~0.2 m	40 min	2.44	0.51	0.93 d	20000 km
#6	~20 m	2.4 hr	0.61	0.77	0.89 d	8900 km
#7	~0.2 m	12.7 min	1.15	0.73	0.85 d	10000 km
#8	~1 m	35.7 min	5.34	0.57	0.80 d	16000 km
#9	~0.5 m	2.9 hr	1.05	0.56	1.01 d	19000 km



Heliocentric orbit



Geocentric orbit



NEO follow up network: NEOAP, APAON
NEO DB: MPC

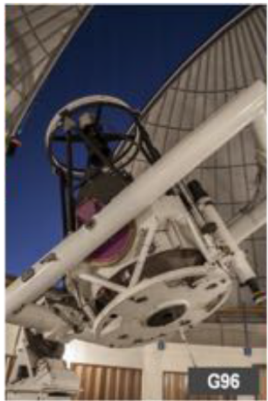
Quick follow ups in a few hours are required to confirm NEO orbits.

検出数の比較

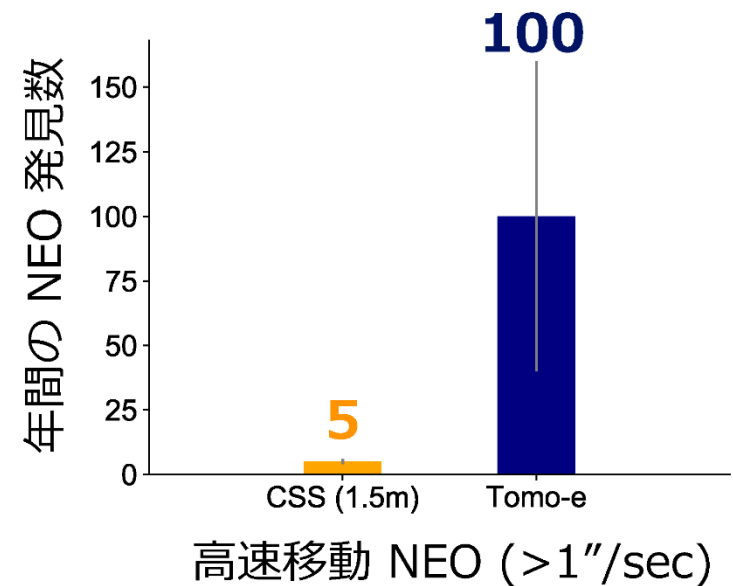
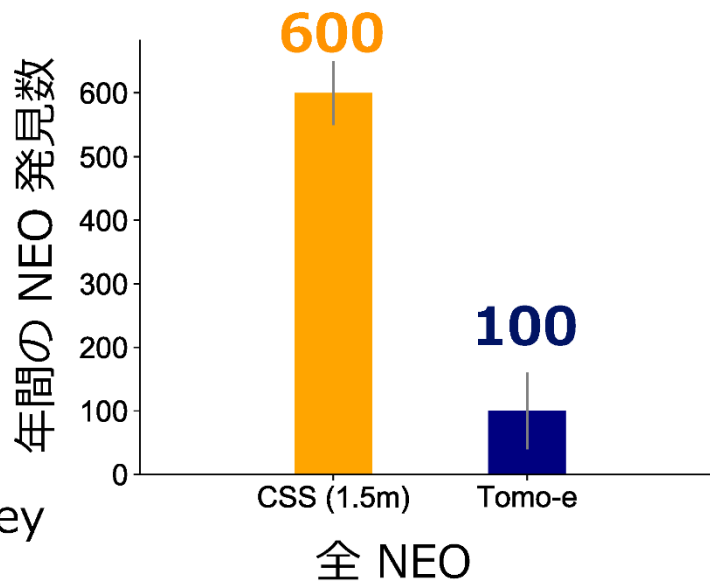
約20日間の観測により, NEO候補天体を2件検出 ($D > 20\text{m}$)

➡ 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)



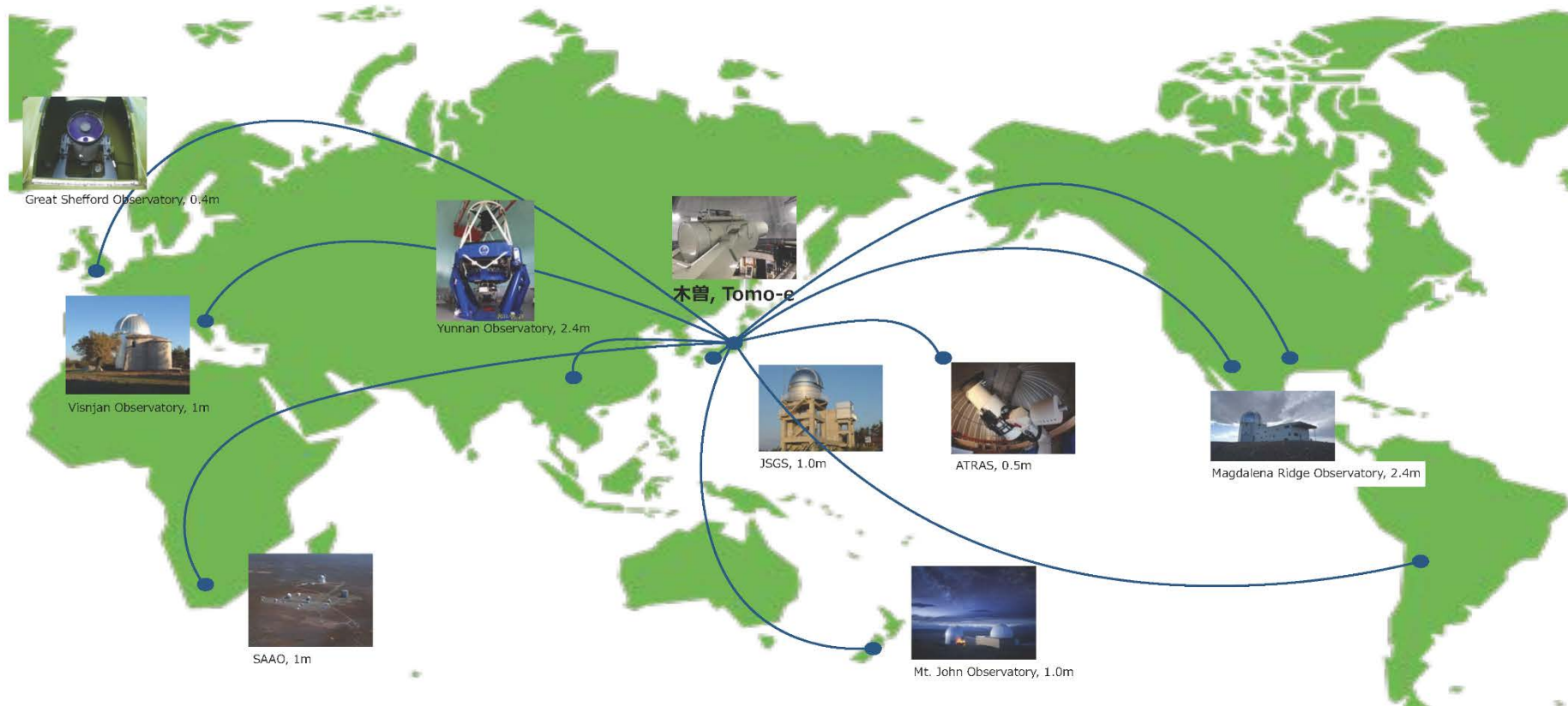
今後の研究への課題

—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

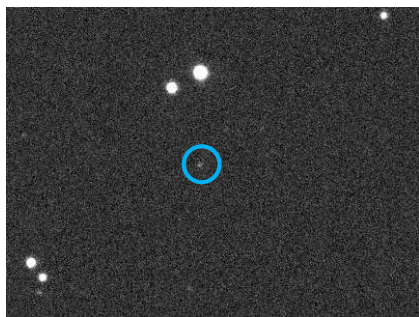
NEOCP
APAON



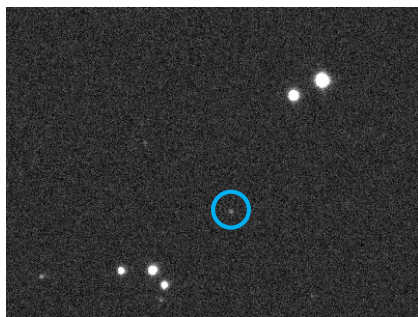
地球接近小惑星2019 FA (2019年3月16日)

発見

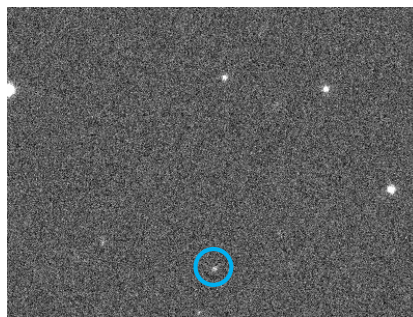
- 2019年3月16日, 東京大学木曾観測所Tomo-e Gozen Q1+2+3



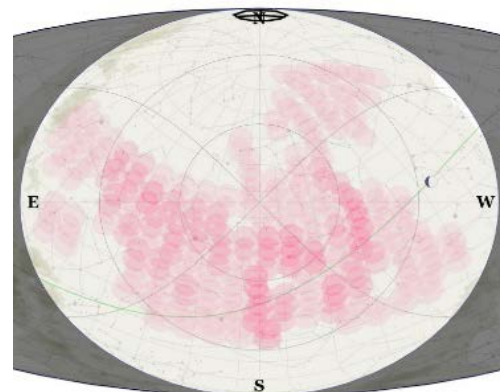
20時51分29秒



20時52分13秒



01時57分48秒



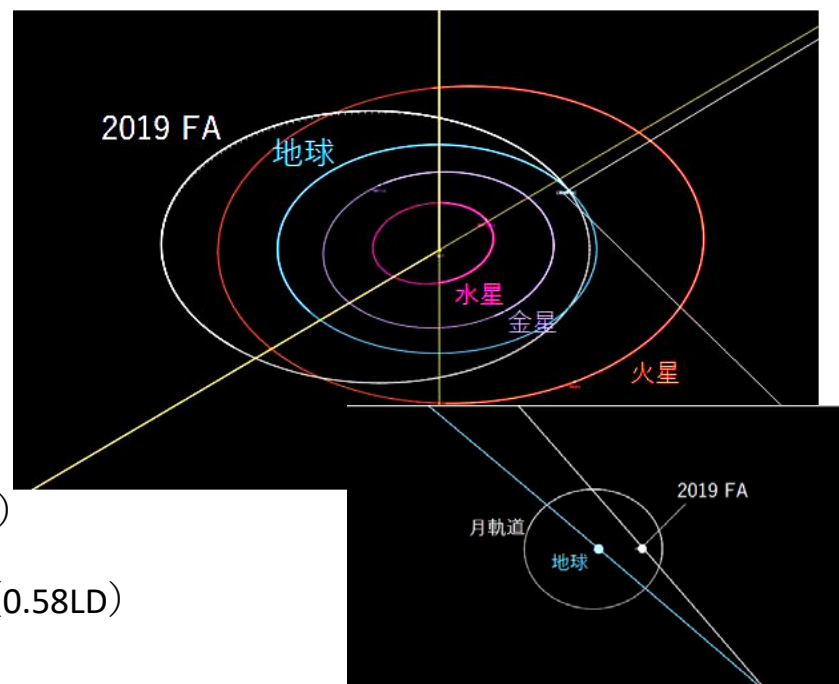
2019年3月16日夜にトモエゴゼンが観測した領域

追観測

- 2019年3月17日04時16分 美星スペースガードセンター
- 2019年3月18日00時44分 井狩康一氏 (滋賀県守山市)

軌道決定と仮符号授与

- 近日点通過時: $T = 2019$ 年2月10日
- 近日点距離: $q = 0.94$ 天文単位
- 周期: $p = 1.56$ 年
- 直径: 約8メートル (表面アルベド0.1を仮定)
- 発見時の地球からの距離: 32万キロメートル (0.84LD)
- 地球最接近の時刻: 2019年3月16日01時30分頃
- 地球最接近時の地球からの距離: 22万キロメートル (0.58LD)



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
- 動画データからの移動天体検出システムを開発
 - 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
 - Tomo-e Gozen により年間40–160件の高速移動NEOを検出