



# 木曾広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen による

## 地球接近小惑星の探索

~本格運用2年間での成果と課題~

2021年12月9日(木) 16:20-16:30 @ 可視赤外線観測装置ワークショップ2021

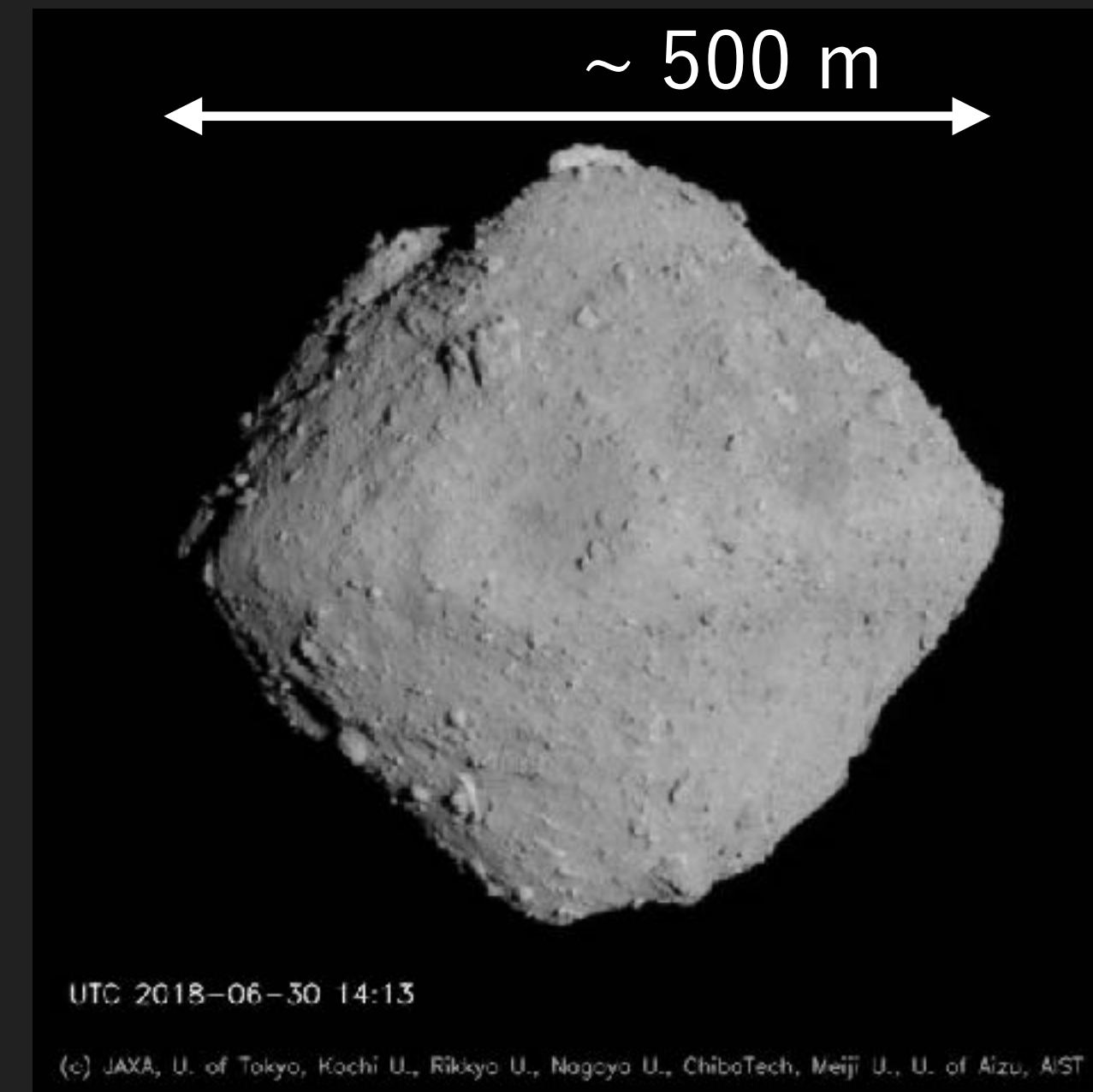
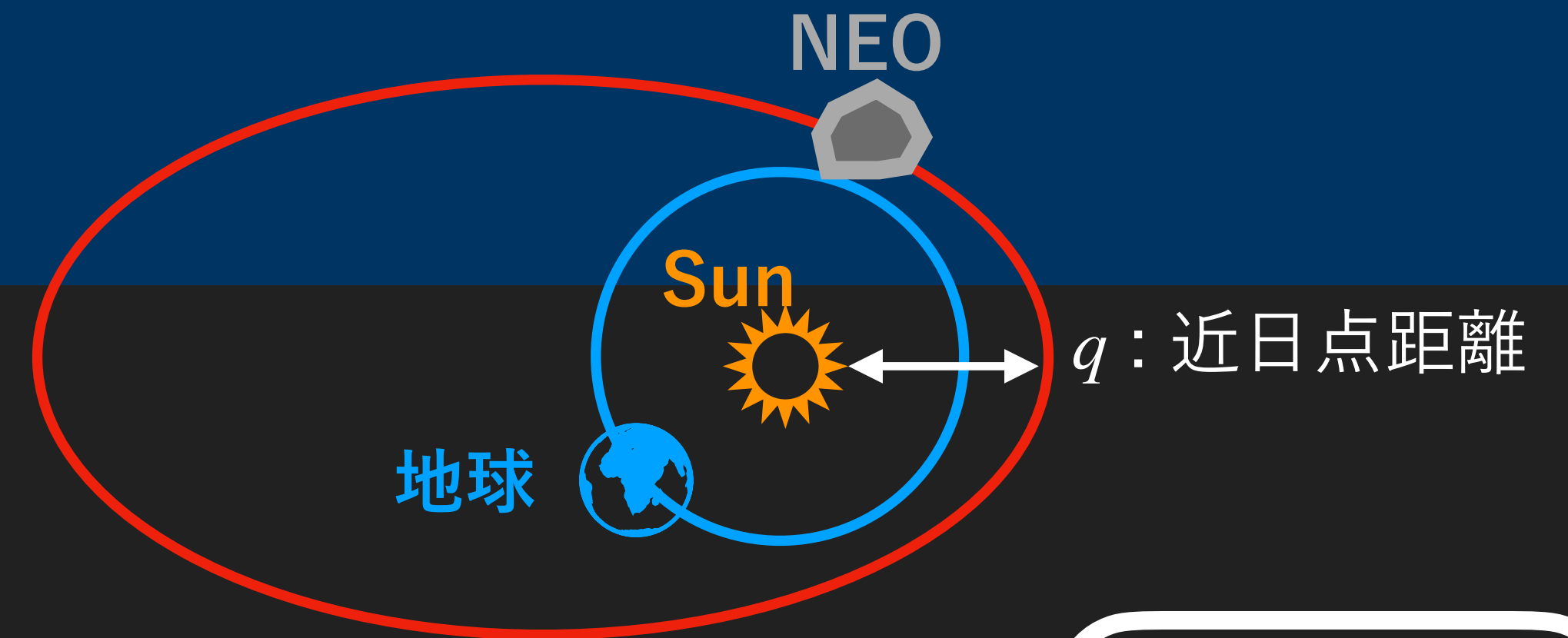
紅山 仁 (東京大学)

酒向 重行, 大澤 亮, 瀧田 怜, 諸隈 智貴, 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, 柳沢 俊史, 黒崎 裕久, 臼井 文彦 (宇宙航空研究開発機構), 吉田 二美(産業医科大学/千葉工業大学),  
佐藤 英貴(東京警察病院), Tomo-e Gozen Collaboration



# 地球接近小惑星

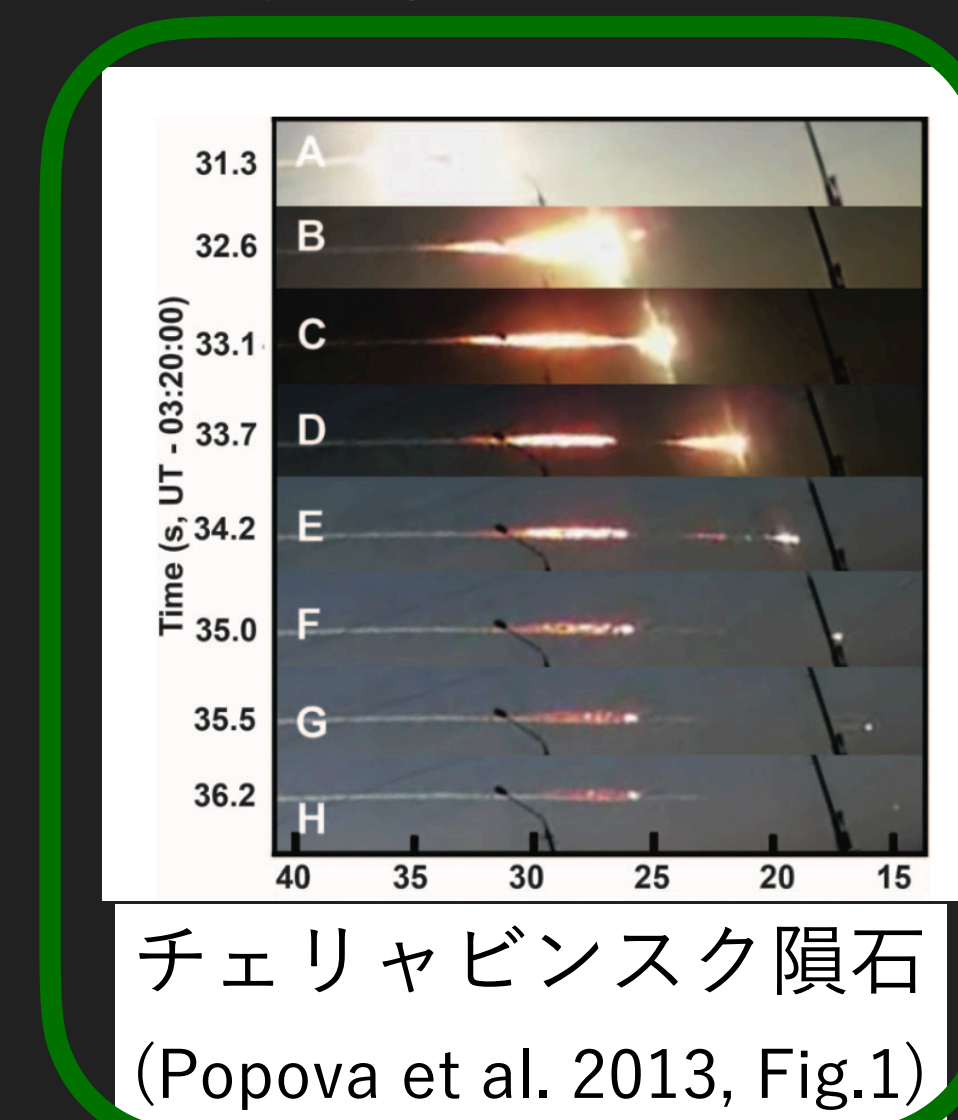
- 地球接近小惑星 (Near-Earth Objects, NEO)  
: 近日点距離  $q < 1.3 \text{ au}$  の小惑星
  - ▶ 地球に近いので探査機によるその場観測が可能
  - ▶ 地球への被害を軽減するスペースガード
  - ▶ 地球に近いので10 m 級の**微小小惑星**も観測可能
    - 小さい小惑星は岩石の集積体である大きな小惑星とは本質的に異なり一枚岩
    - 小さい小惑星を用いることで、地球接近小惑星の起源、進化史に関する情報が得られる



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



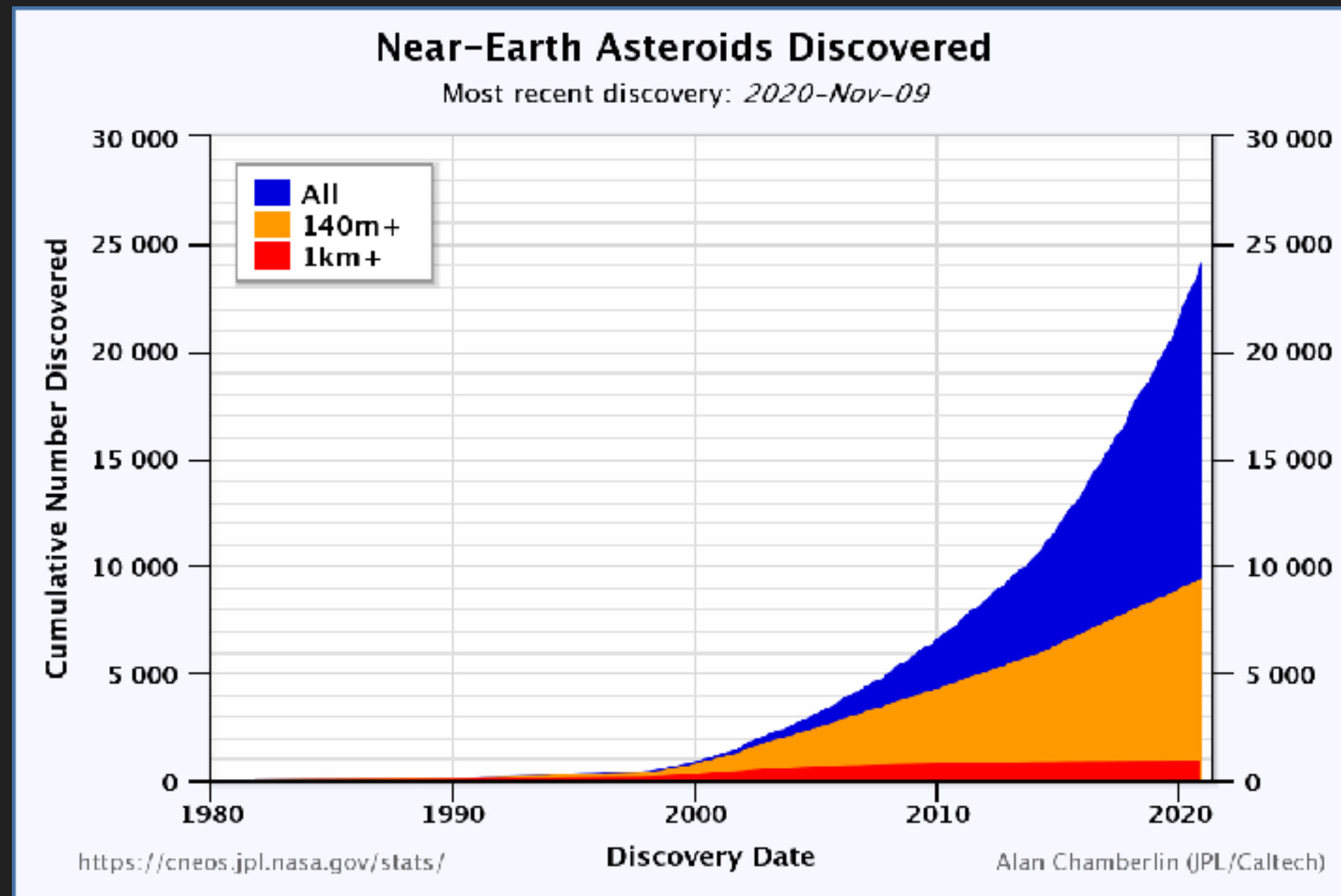
チェリャビンスク隕石  
(Popova et al. 2013, Fig.1)

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

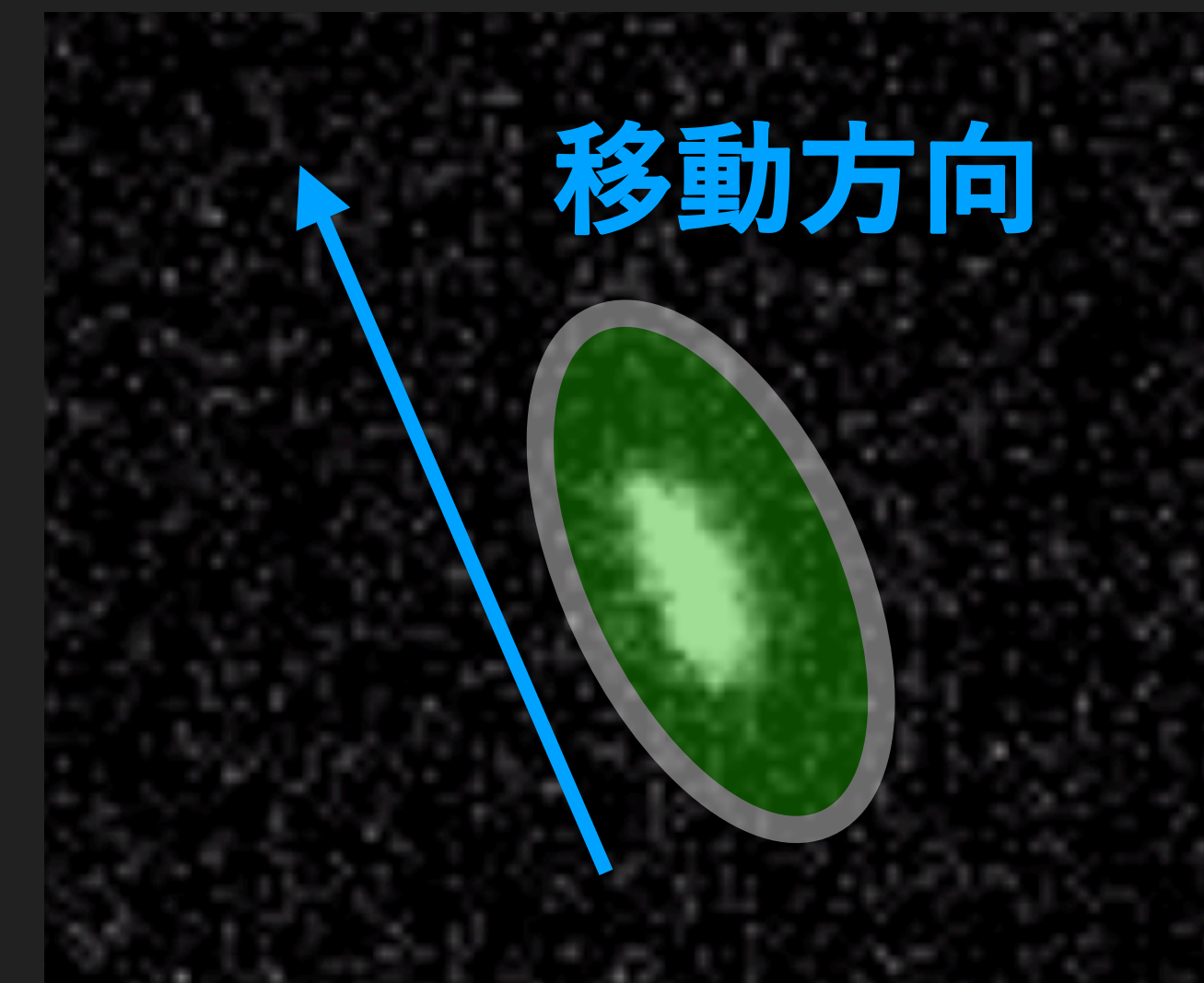
## 現状

- 大型サーベイ計画 (Pan-STARRS, CSS etc.) により3,000コ/年のペースでNEOが発見
- 微小NEOのほとんどが未発見 (直径 10m : 99.99 %が未発見)



## 困難性

- 小惑星は地球近傍ほど見かけ速度が大きい
  - ▶ 星像が伸びることによる感度低下  
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
  - ▶ 観測好機が非常に短い (数時間 - 数日)

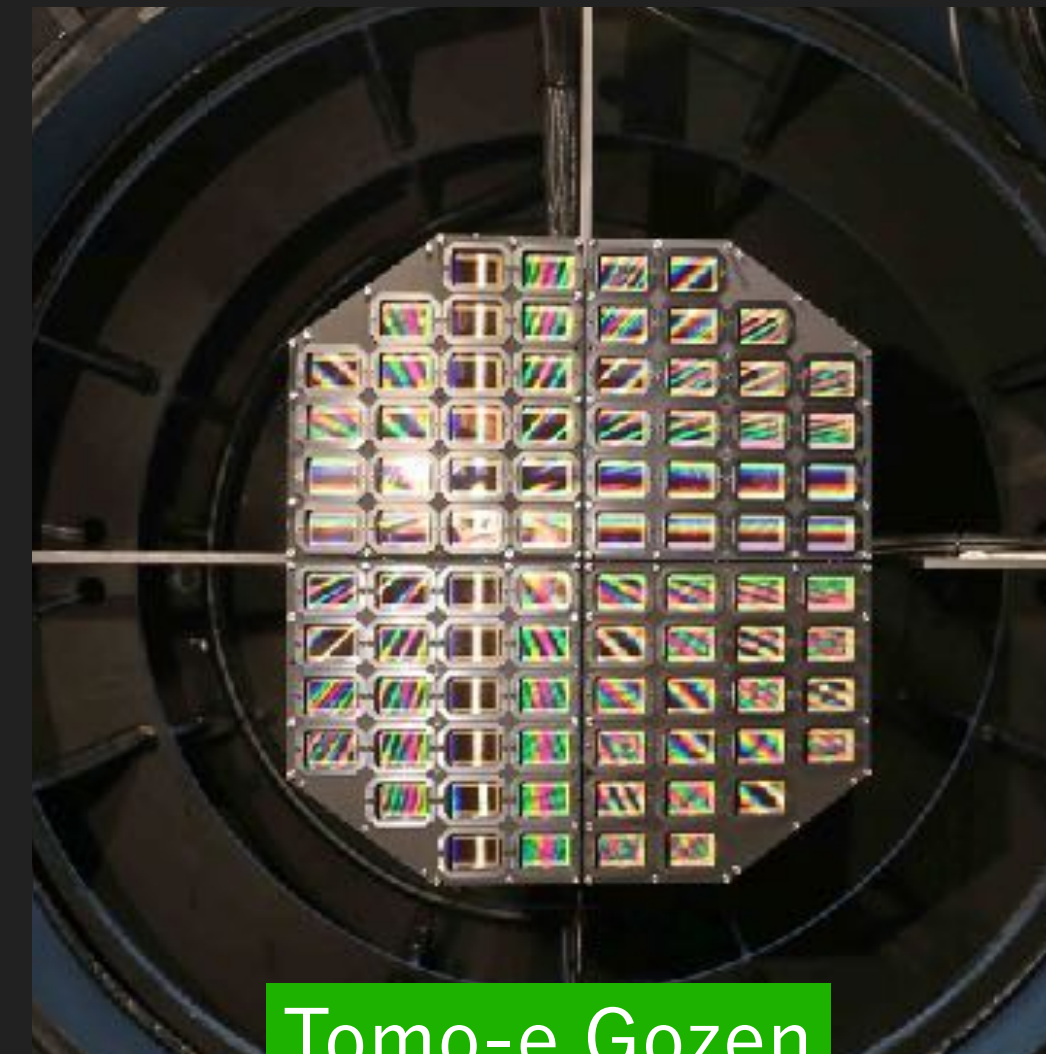


星像が伸びた高速移動天体の例



# Tomo-e Gozen (トモエゴゼン, 巴御前)

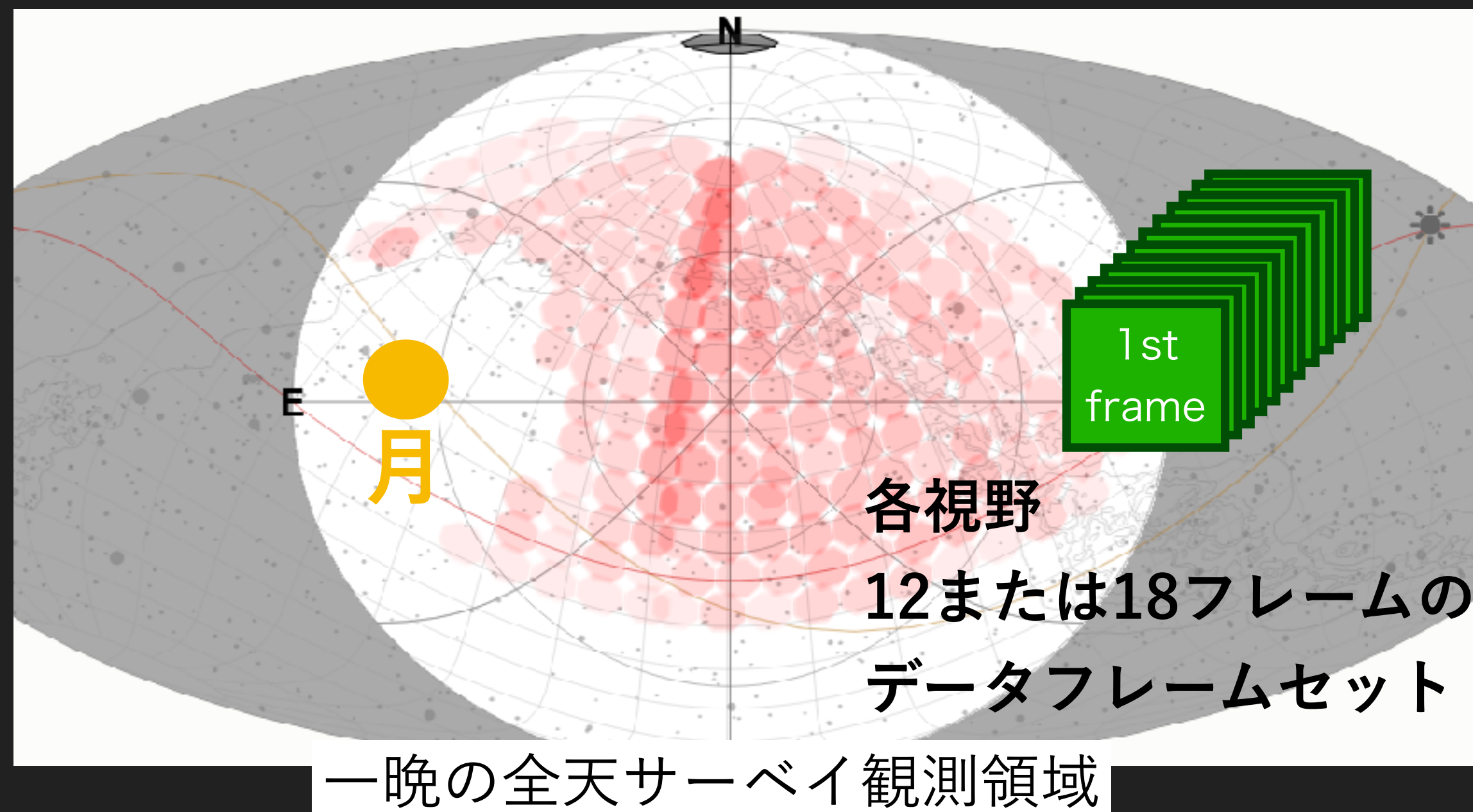
- 長野県木曾郡 東京大学木曾観測所 口径105 cm シュミット望遠鏡用に開発されたCMOSカメラ
- 84 枚のセンサが広視野20 平方度を覆う
- 2 Hz (0.5 秒積分) 動画観測による全天サーベイ
  - ▶ 毎晩30 TBのビッグデータを蓄積
  - ▶ この中から高速移動天体を検出する



Tomo-e Gozen



巴御前出陣図 (部分)

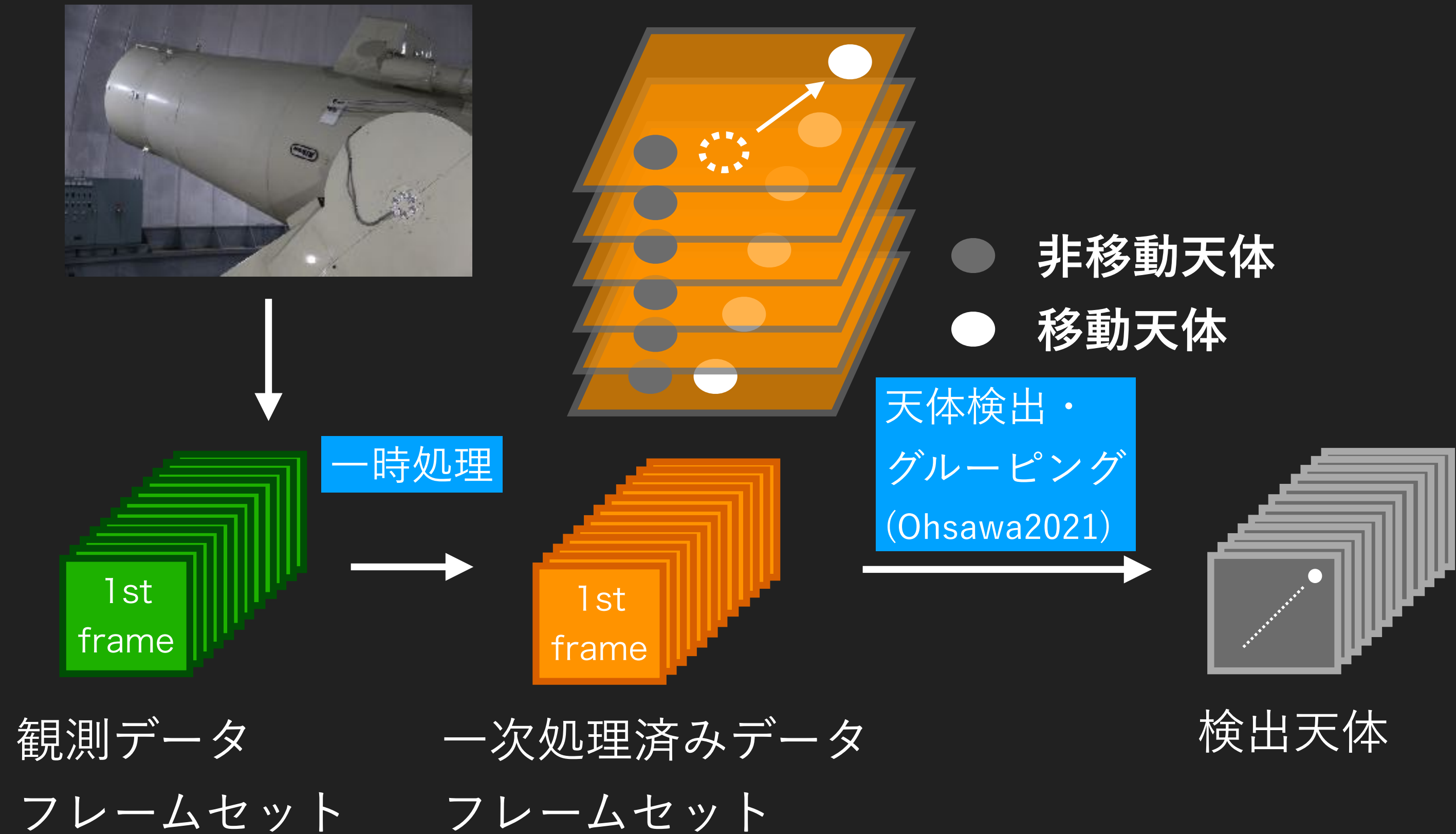


Tomo-e Gozen 全天サーベイ観測の諸元

	Tomo-e Gozen
有効視野	20 deg <sup>2</sup>
限界等級*	18 mag
サーベイ面積	30,000 deg <sup>2</sup> /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

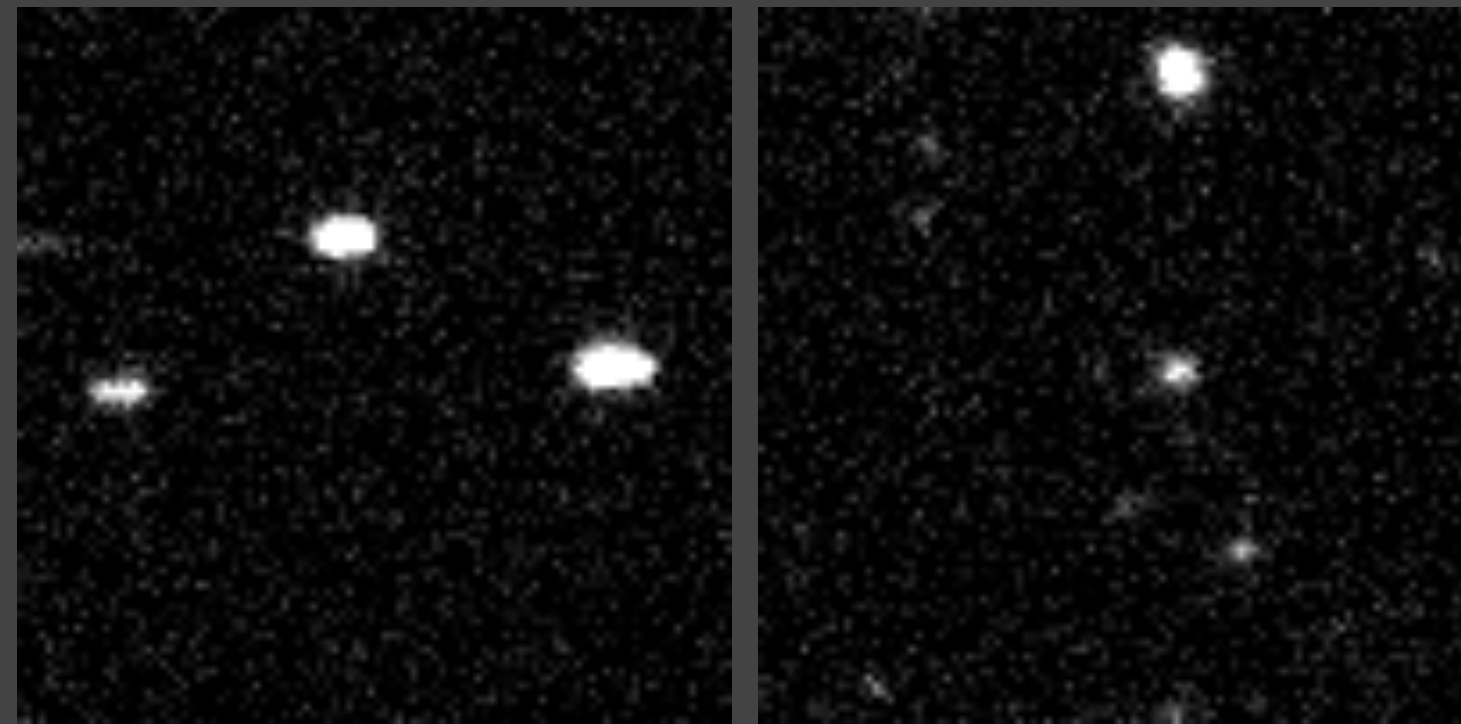
# 高速移動天体検出までの流れ



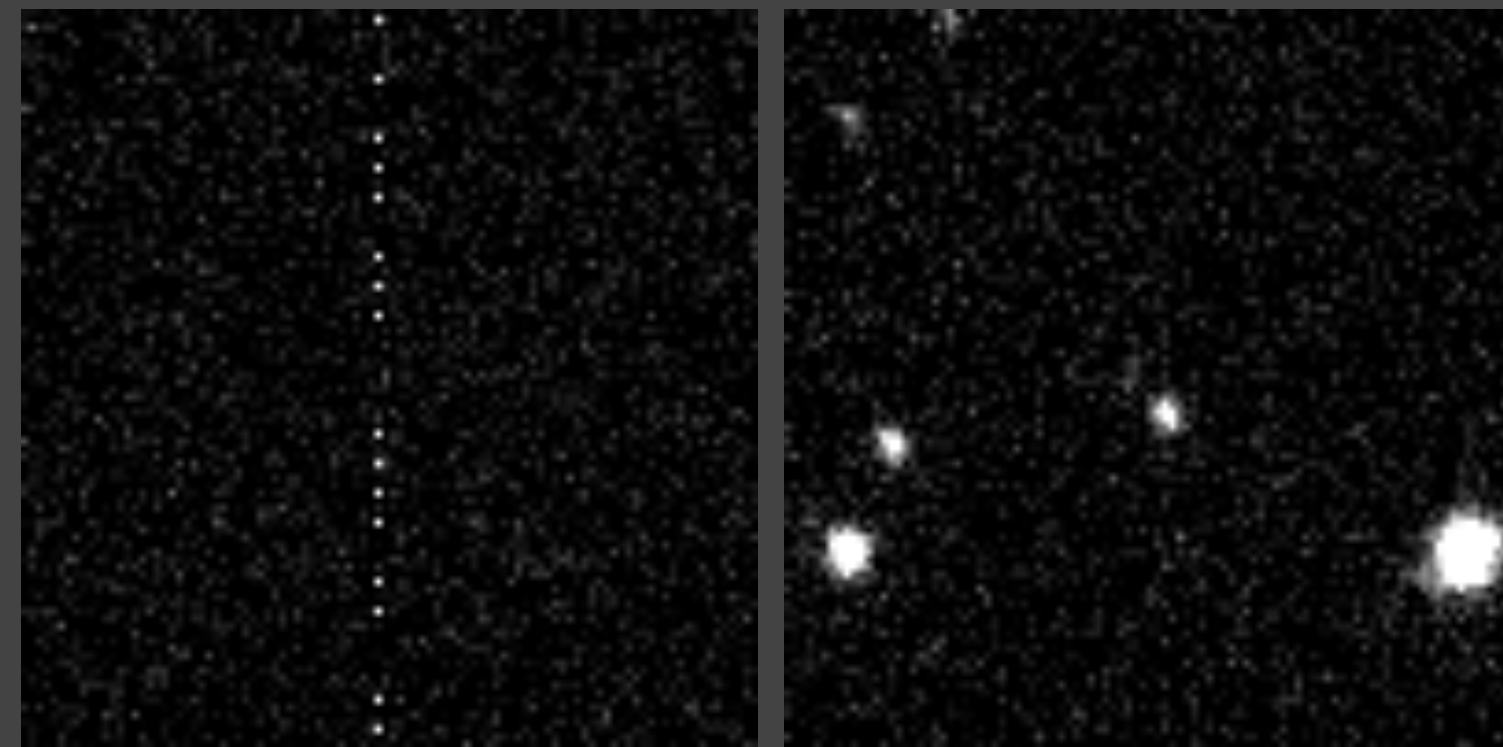


# 高速移動天体検出までの流れ

## 移動天体

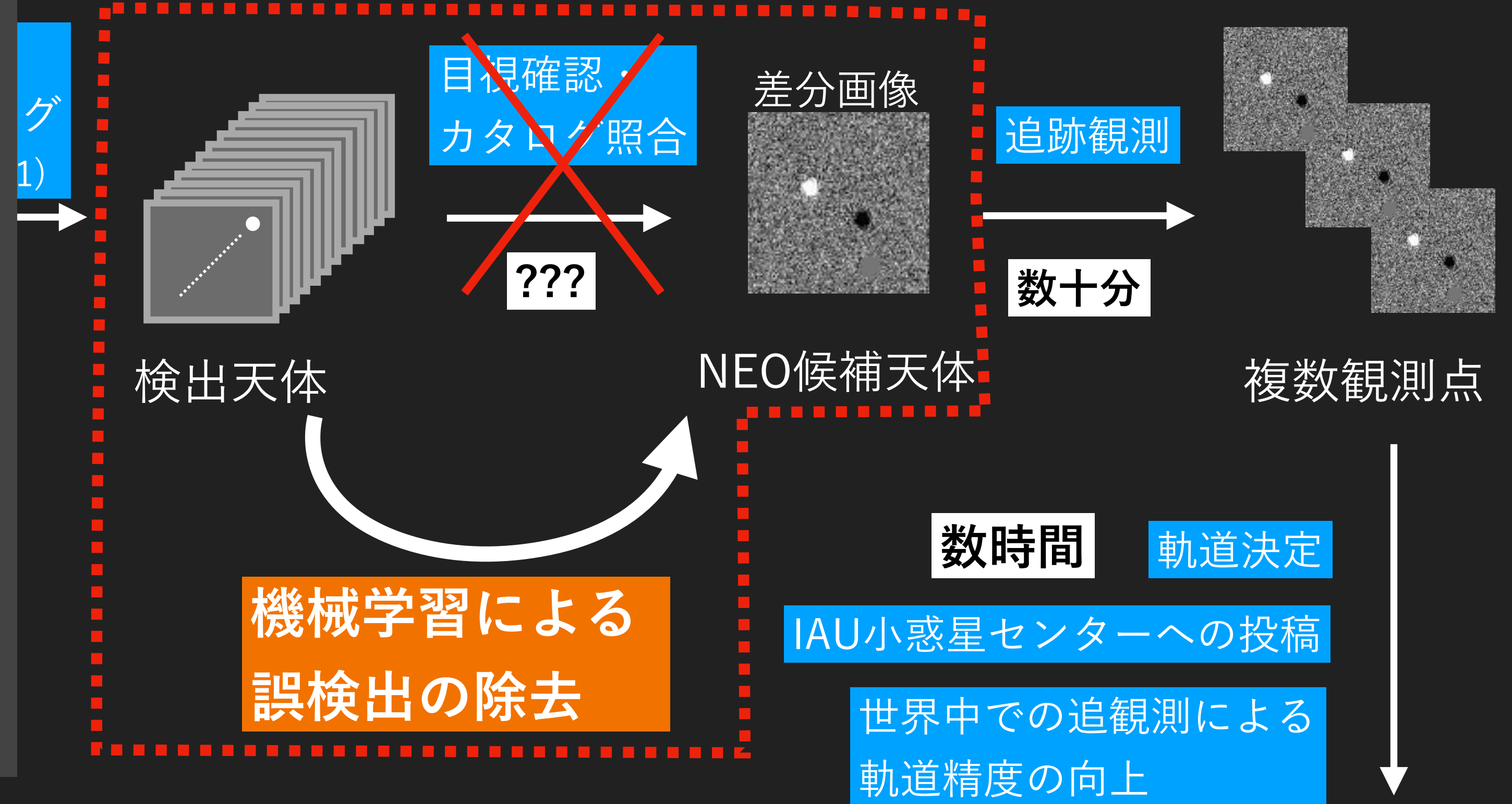


## 誤検出



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



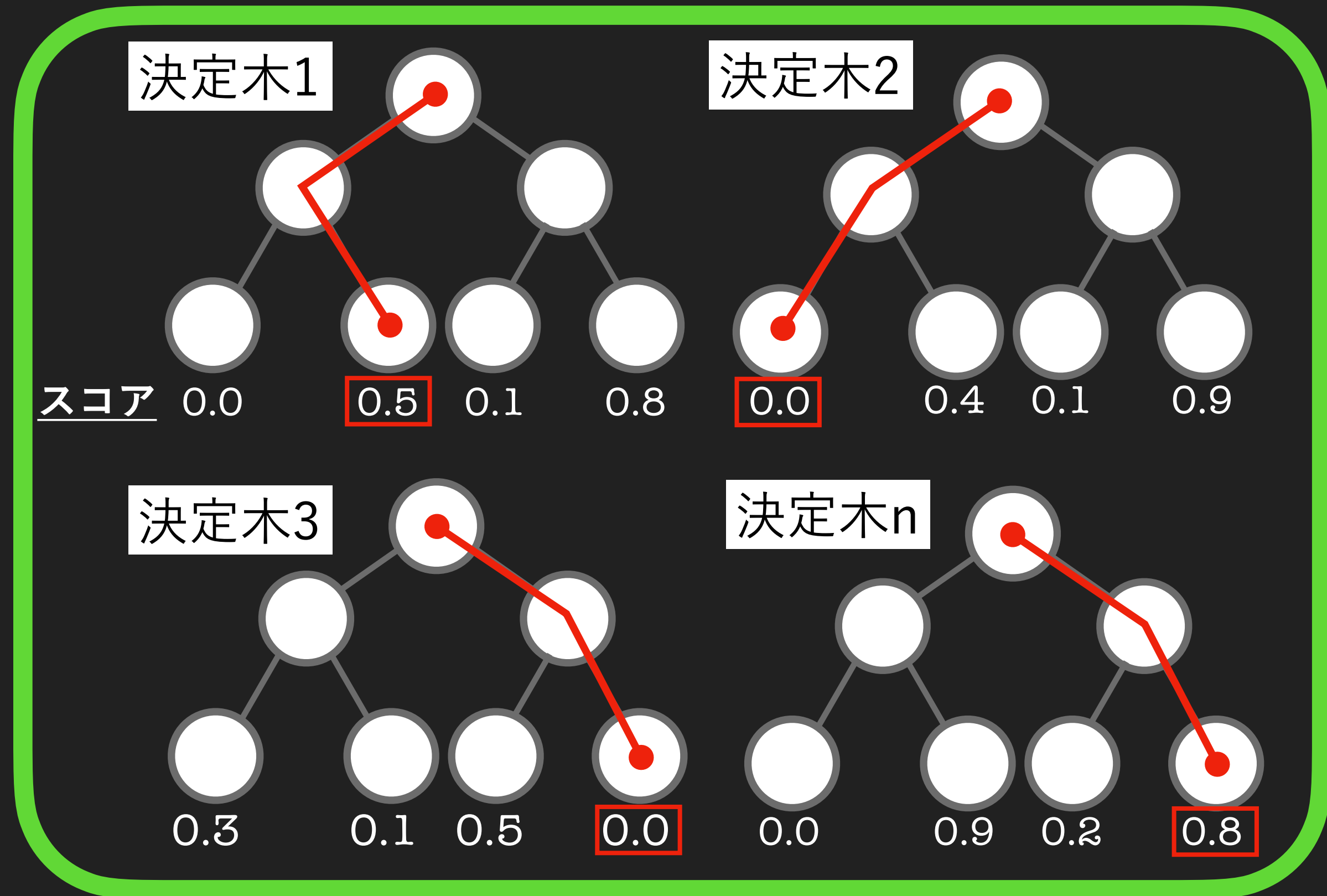
# ランダムフォレスト機械学習アルゴリズム

- ・ 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

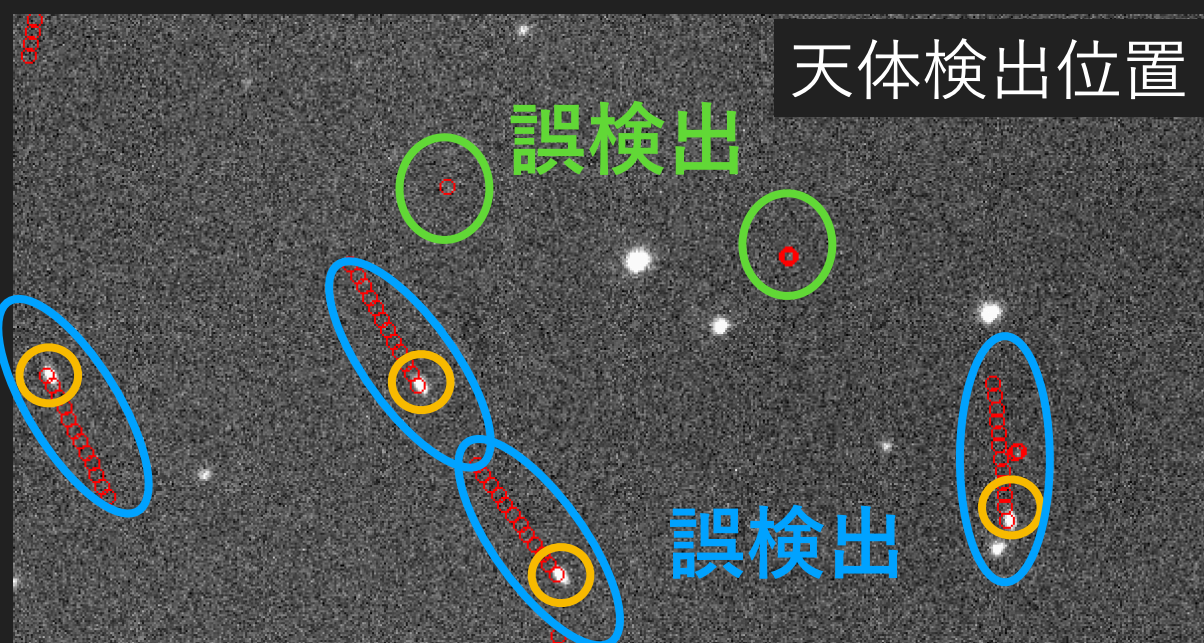
機械学習の特徴量の選択。

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

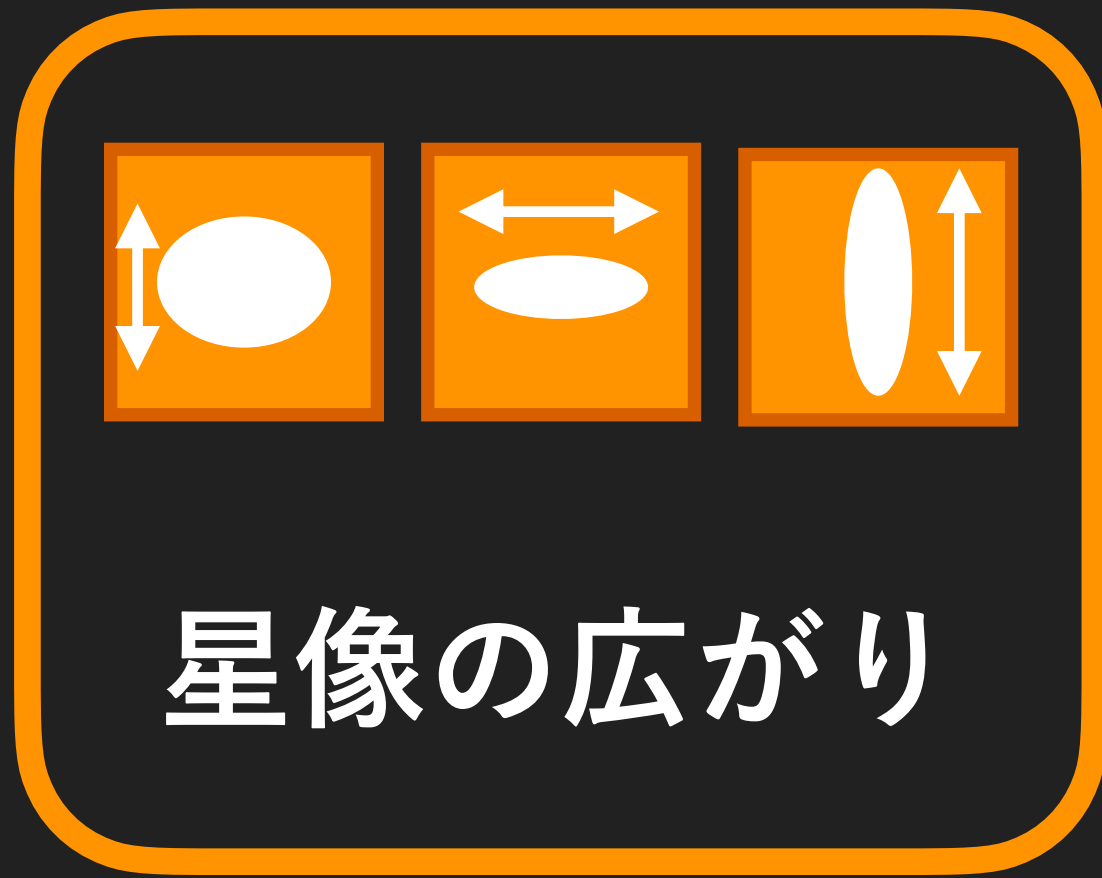
	速度	x座標	検出数	ラベル
検出1	2	1	10	移動天体
検出2	1	4	4	誤検出
検出3	0.1	2	3	誤検出
検出4	4	102	10	移動天体



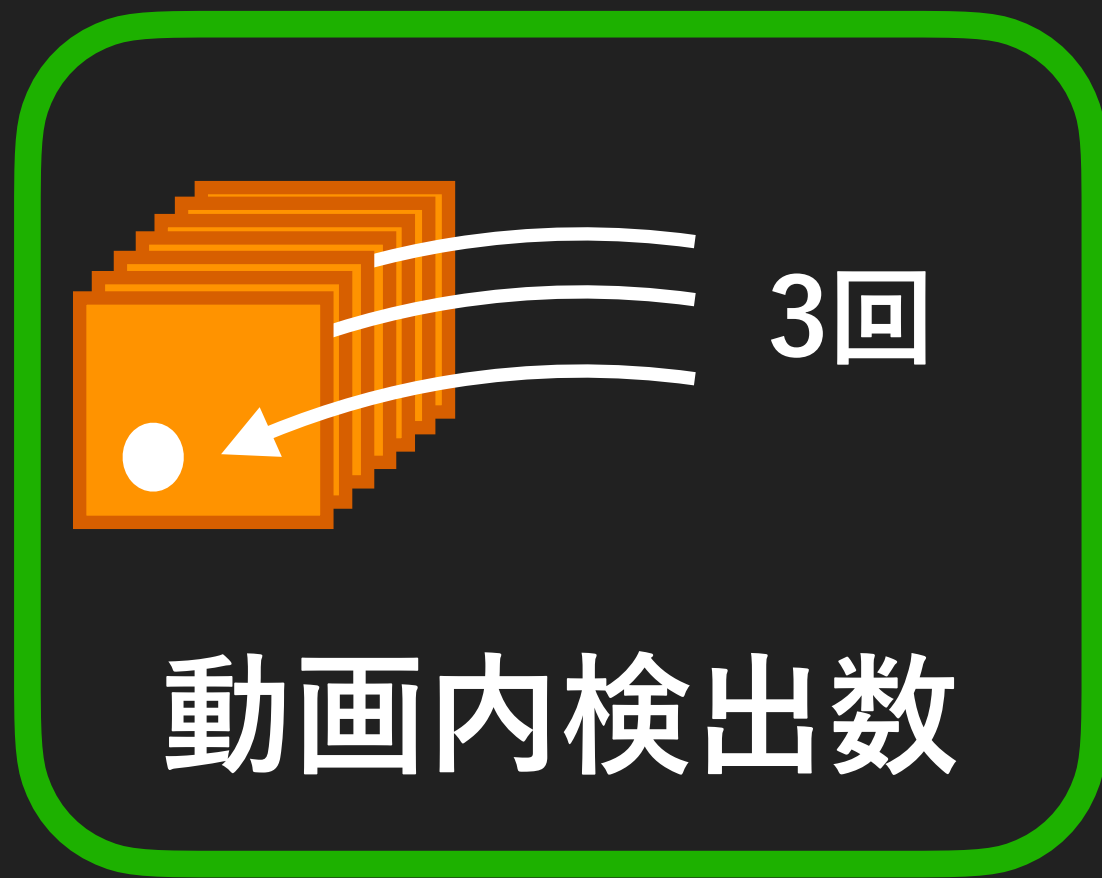


# 特徴量の選択

- 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



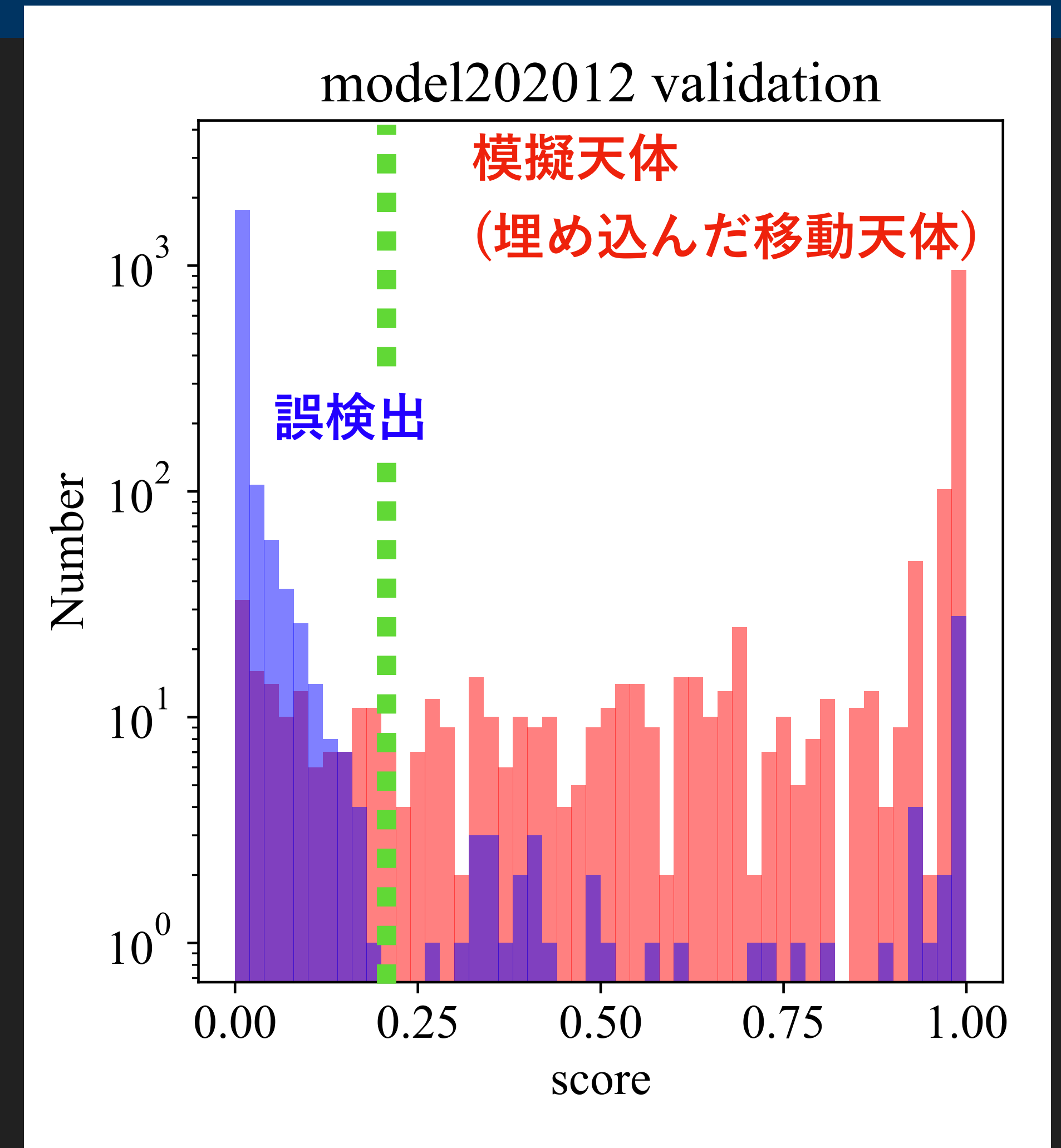
動画的  
パラメーター

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



# 検証用データに対する性能

- モデル作成と独立なデータフレームセットに模擬天体を埋め込み、作成したモデルで検出天体の分類(スコアリング)を行う
- 模擬天体(赤)に対して高いスコア、誤検出(青)に対して低いスコアを与えられている
- スコア 0.2 以上の検出天体を追跡対象とする



スコア > 0.2の  
検出天体を移動天体と判断



# 追跡観測のためのウェブアプリケーション開発

機械学習の導入により、ほぼリアルタイムでもっともらしい移動天体を抽出することに成功

Moving Objects

elapsed\_time: 0.13186955451965332  
detections: 50  
satenum: no

既存天体との  
GIF動画

課題：  
高速移動天体に対する低いスコア（学習不足）

解決策：  
実際の検出データを用いた新モデルの作成

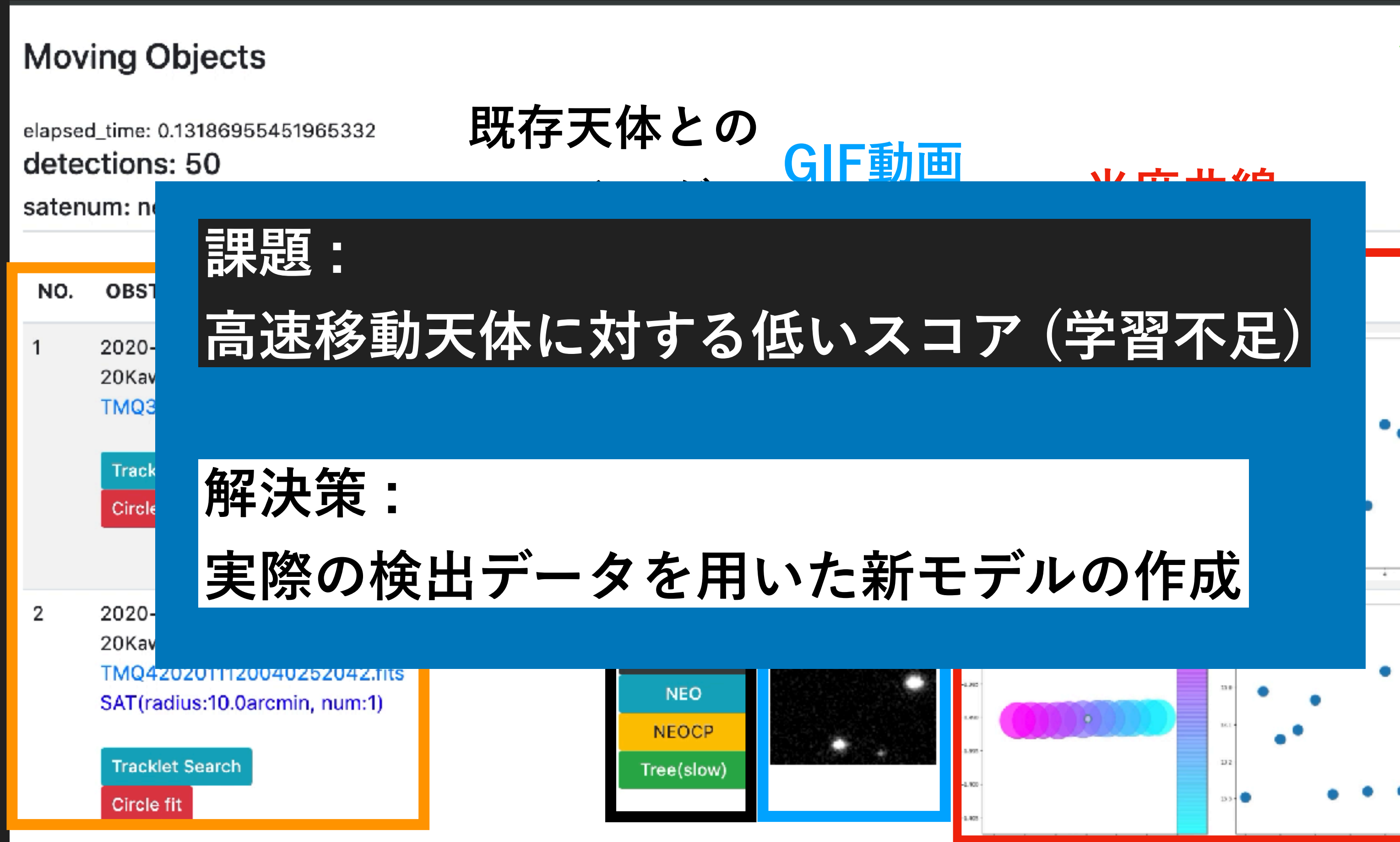
NO. OBST  
1 2020-  
20Kav  
TMQ3

Track  
Circle

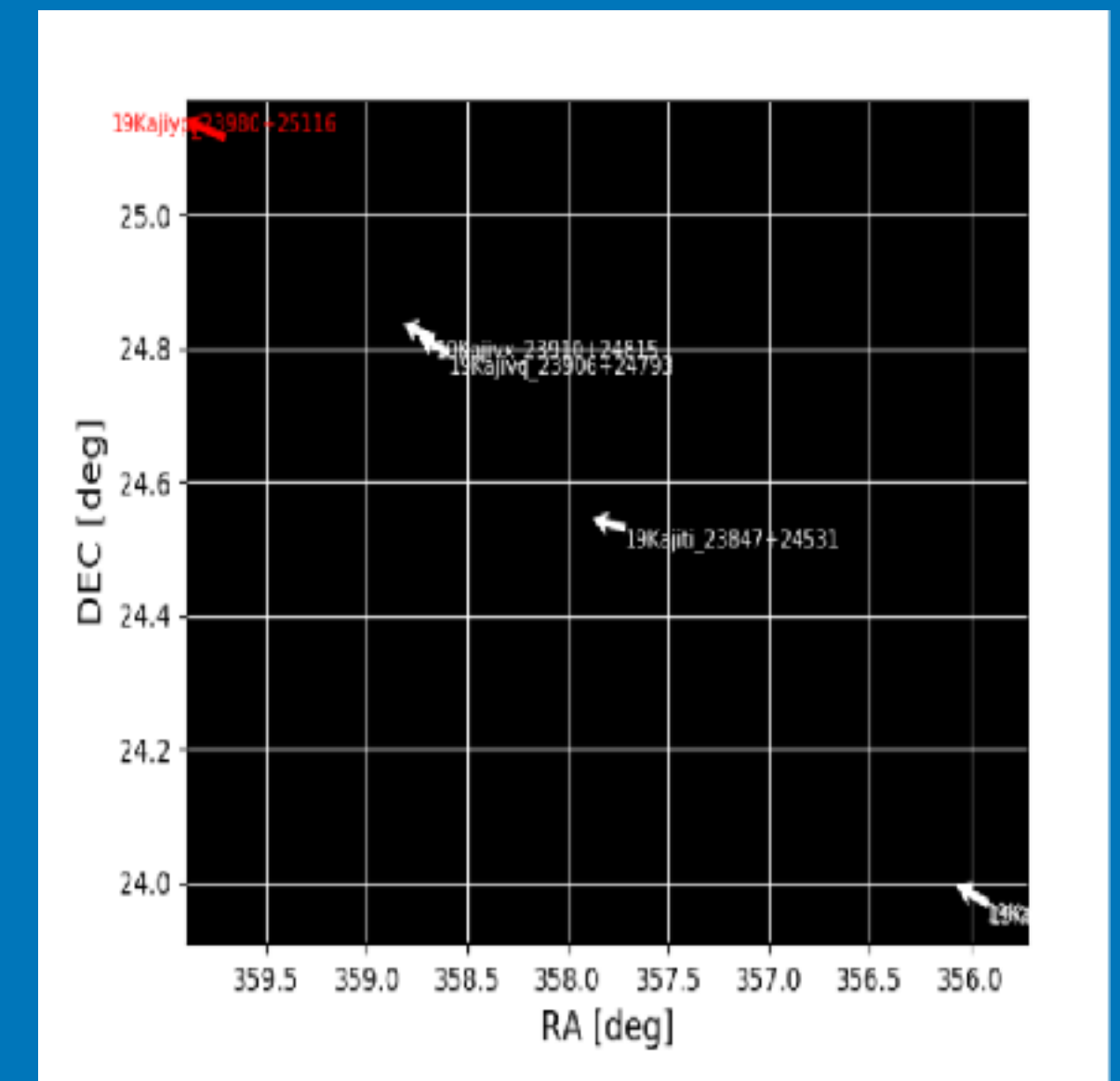
2 2020-  
20Kav  
TMQ420201120040252042ans  
SAT(radius:10.0arcmin, num:1)

Tracklet Search  
Circle fit

NEO  
NEOCP  
Tree(slow)



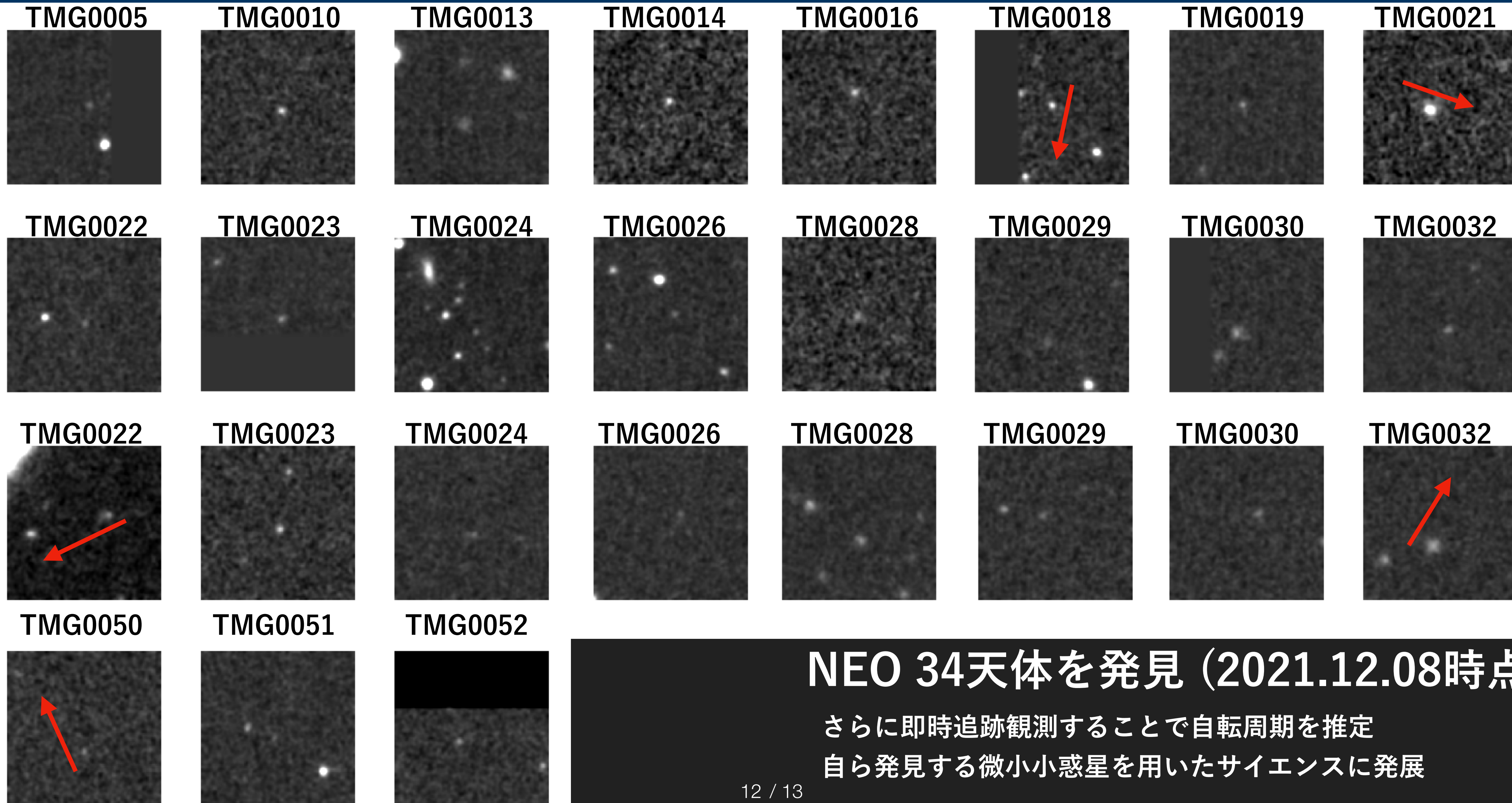
→ 候補天体を追観測



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



## NEO 34天体を発見 (2021.12.08時点)

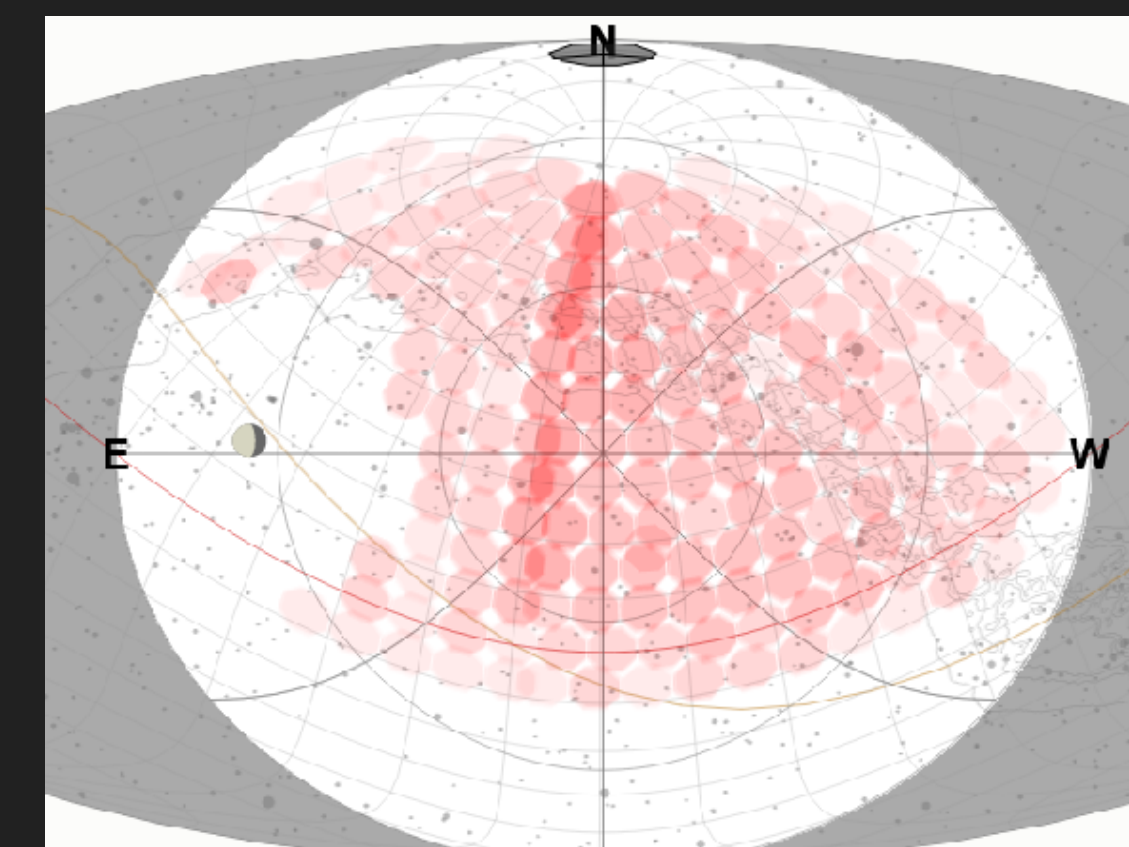
さらに即時追跡観測することで自転周期を推定

自ら発見する微小小惑星を用いたサイエンスに発展



# まとめ

- **地球近傍を通過する小惑星の観測には多くの意義**
  - ▶ 探査機によるその場観測が可能
  - ▶ 地球への被害を軽減するスペースガード
  - ▶ 10 m 級の微小小惑星も観測可
- **Tomo-e Gozenの毎晩 30TB のサーベイビッグデータから小惑星を探索**
  - ▶ 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。
  - ▶ 実際の観測でのリアルタイム解析に成功。  
約2年半の運用で地球接近小惑星を34個発見！



Tomo-e Gozenのサーベイ観測領域

# 今後

- 蓄積した実際の検出（真の移動天体, 誤検出）を用いたモデル作成
- 追跡観測から小惑星発見までの自動化
- (今は追跡していない)高速移動天体の追跡

