

木曾広視野カメラ Tomo-e Gozen による 高速移動NEOの広視野探索

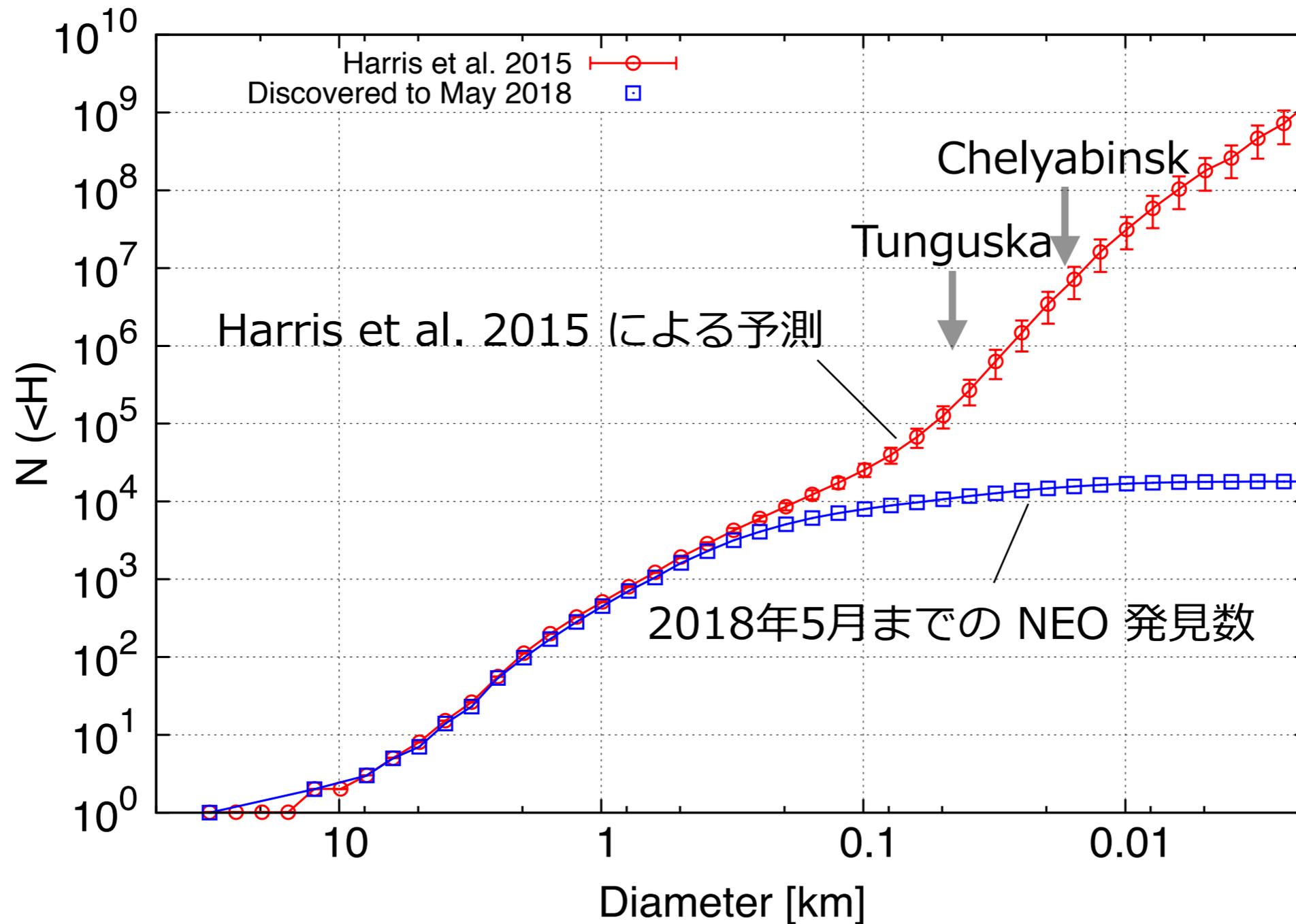
小島 悠人 (東京大学)

酒向 重行, 大澤 亮 (東京大学), 吉川 真 (宇宙航空研究開発機構), 奥村真一郎, 浦川聖太郎
(日本スペースガード協会), Tomo-e Gozen プロジェクトメンバー

アウトライン

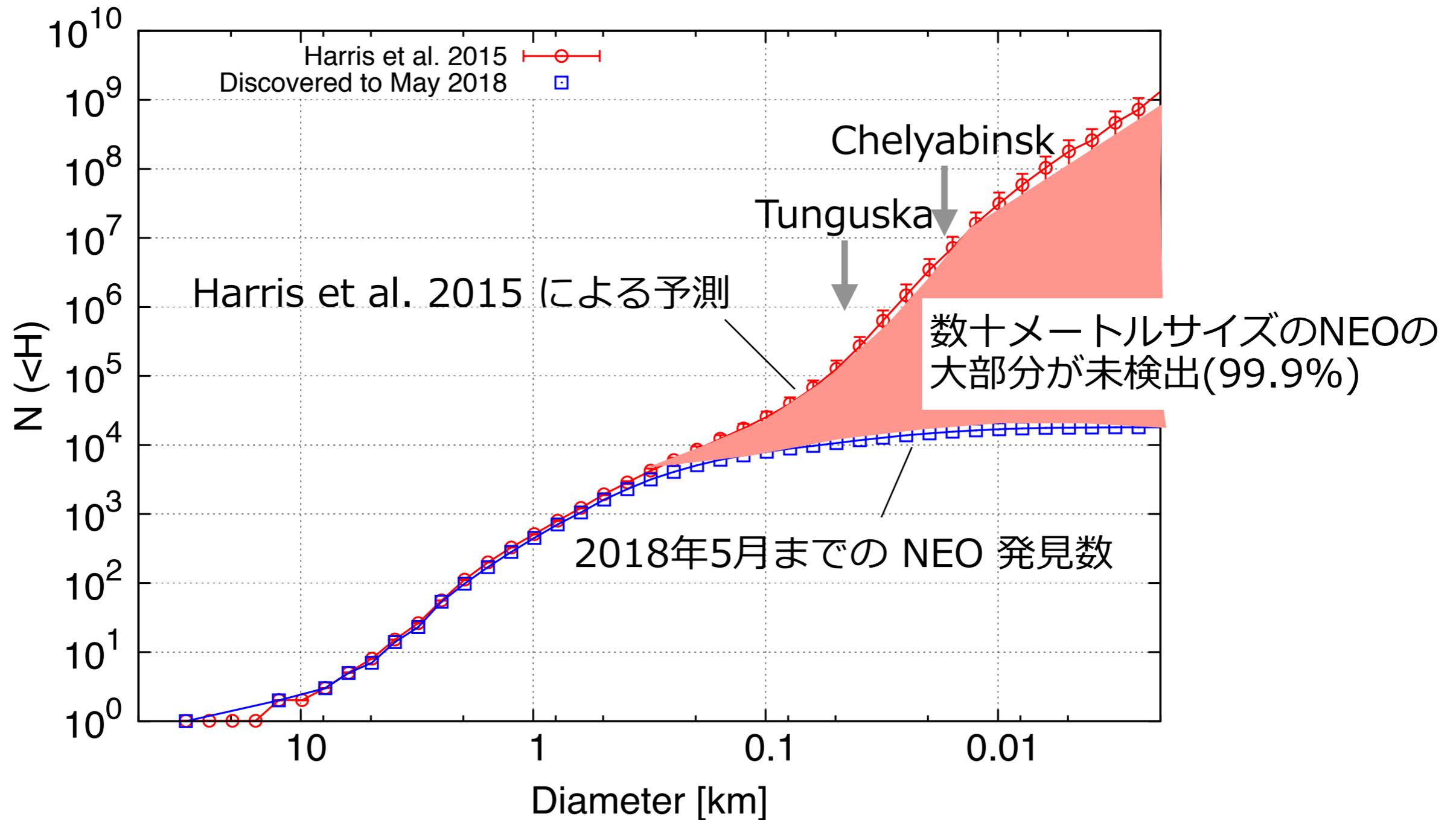
1. NEO 観測の現状
2. 木曾広視野カメラ Tomo-e Gozen
3. 動画データによる NEO の広視野観測計画
4. 機械学習による NEO の分類試験
5. Tomo-e Gozen Q1 によるサーベイ試験観測
6. まとめ

NEO 観測の現状



NEO の累積サイズ頻度分布(SFD)

NEO 観測の現状



NEO の累積サイズ頻度分布(SFD)

トレイルロス

微小NEO ($D < 100\text{m}$) は非常に暗い ($H > 22\text{mag}$)

地球に接近すれば, 明るくなるが見かけの速度が増す

→ トレイルロス



from the presentation by R.Ohsawa (2018)

木曾超広視野高速CMOSカメラ

Tomo-e Gozen

東京大学 木曾観測所

望遠鏡ドーム外観



超広視野105cmシュミット望遠鏡

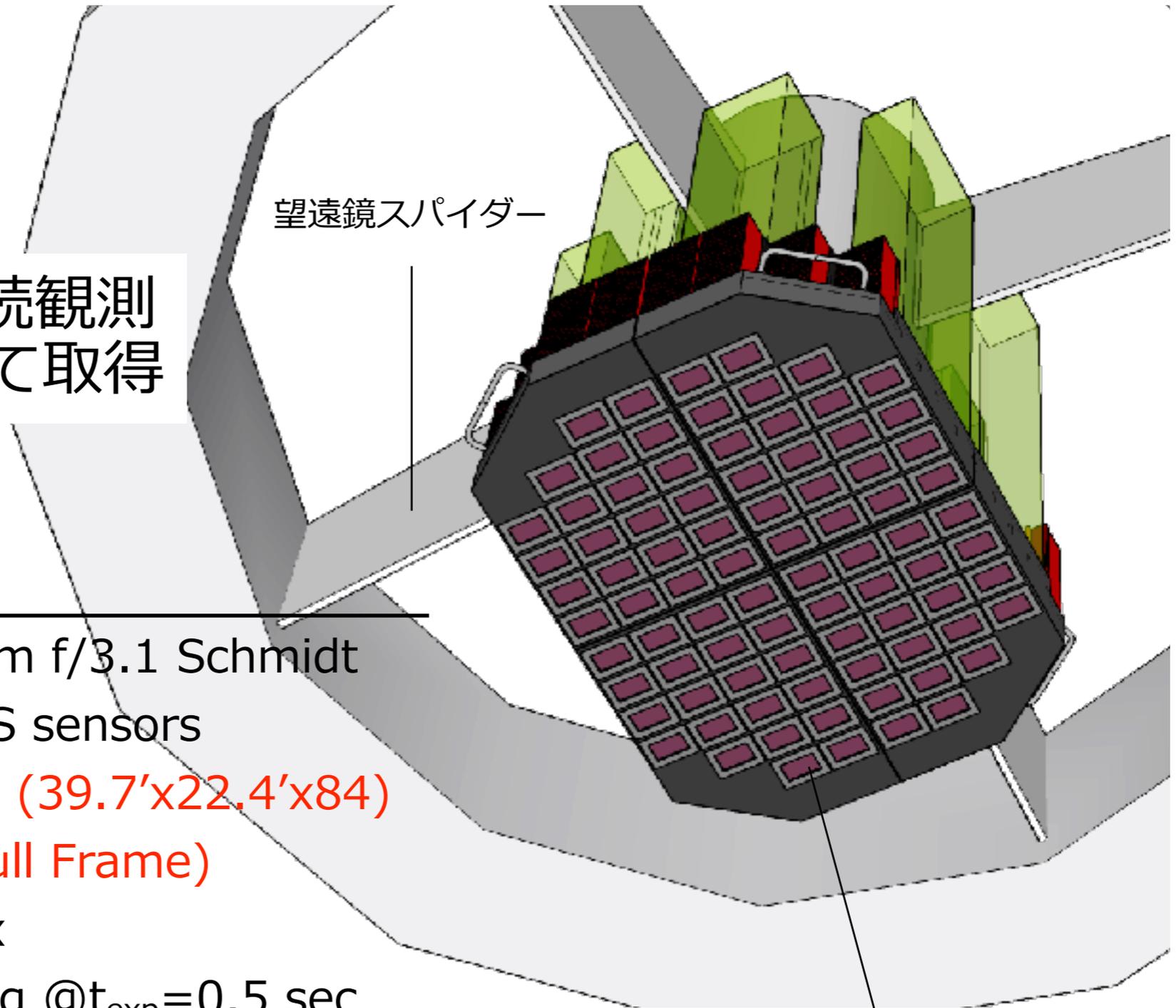
視野	$\Phi 9^\circ$
主鏡	口径150cm球面
補正レンズ	口径105cm
F値	3.1

木曾超広視野高速CMOSカメラ Tomo-e Gozen

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

20deg² を 2Hz で連続観測
→ 動画データとして取得

Telescope	Kiso 1.0m f/3.1 Schmidt
Detector	84 CMOS sensors
FoV	20 deg ² , (39.7'x22.4'x84)
Frame Rate	2 fps (Full Frame)
Pixel Scale	1.2 "/pix
5 σ Limiting Mag	18.7 mag @t _{exp} =0.5 sec
Data Rate	30 TB/night
Filter	transparent (350-800 nm)



Canon, フルHD, CMOSセンサー

Q2 Counterweight

Q1 w/ 21 CMOS sensors

Q3 w/o sensors

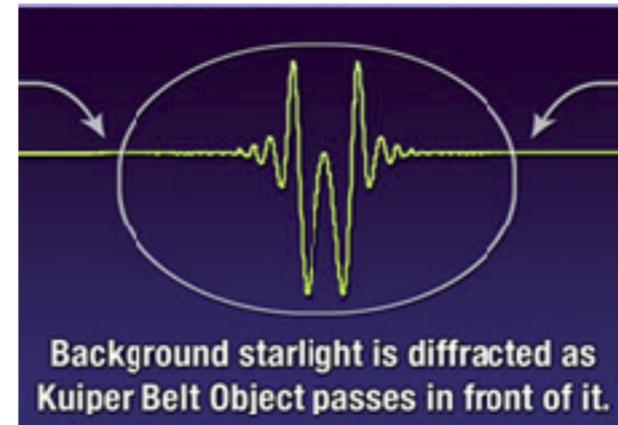
Q4 Counterweight

2018年6月の望遠鏡焦点面の写真

科学目的

稀で突発的な天体の探査

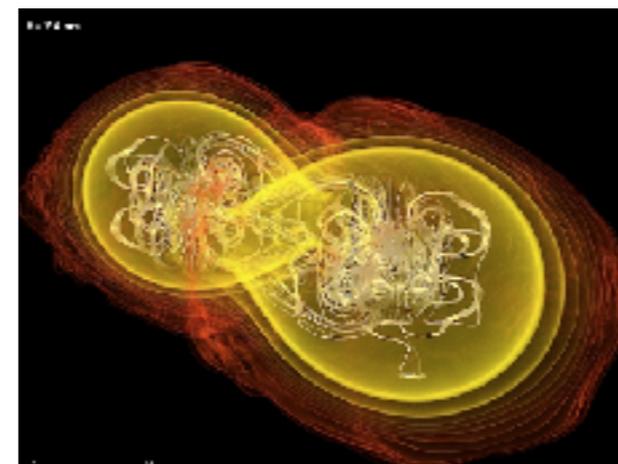
- 超新星ショックブレイクアウトの発見
- Gamma Ray Burst
- Fast Radio Burst
- 重力波可視光対応天体の探査
- 太陽系外縁天体による遮蔽
- 微光流星の検出
- 地球接近天体(NEO)の発見
- . . .



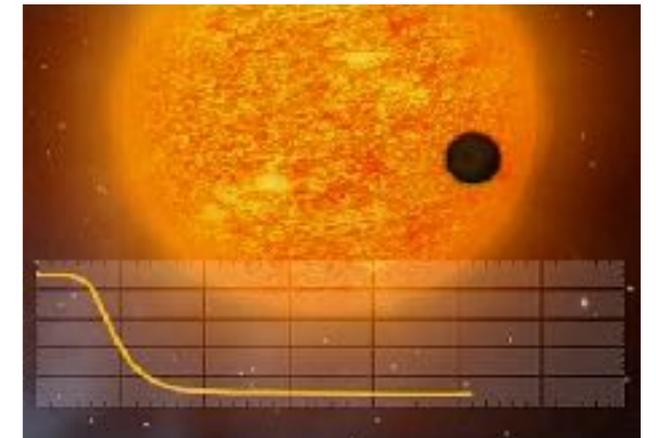
Occultation of TNO



Gamma Ray Burst

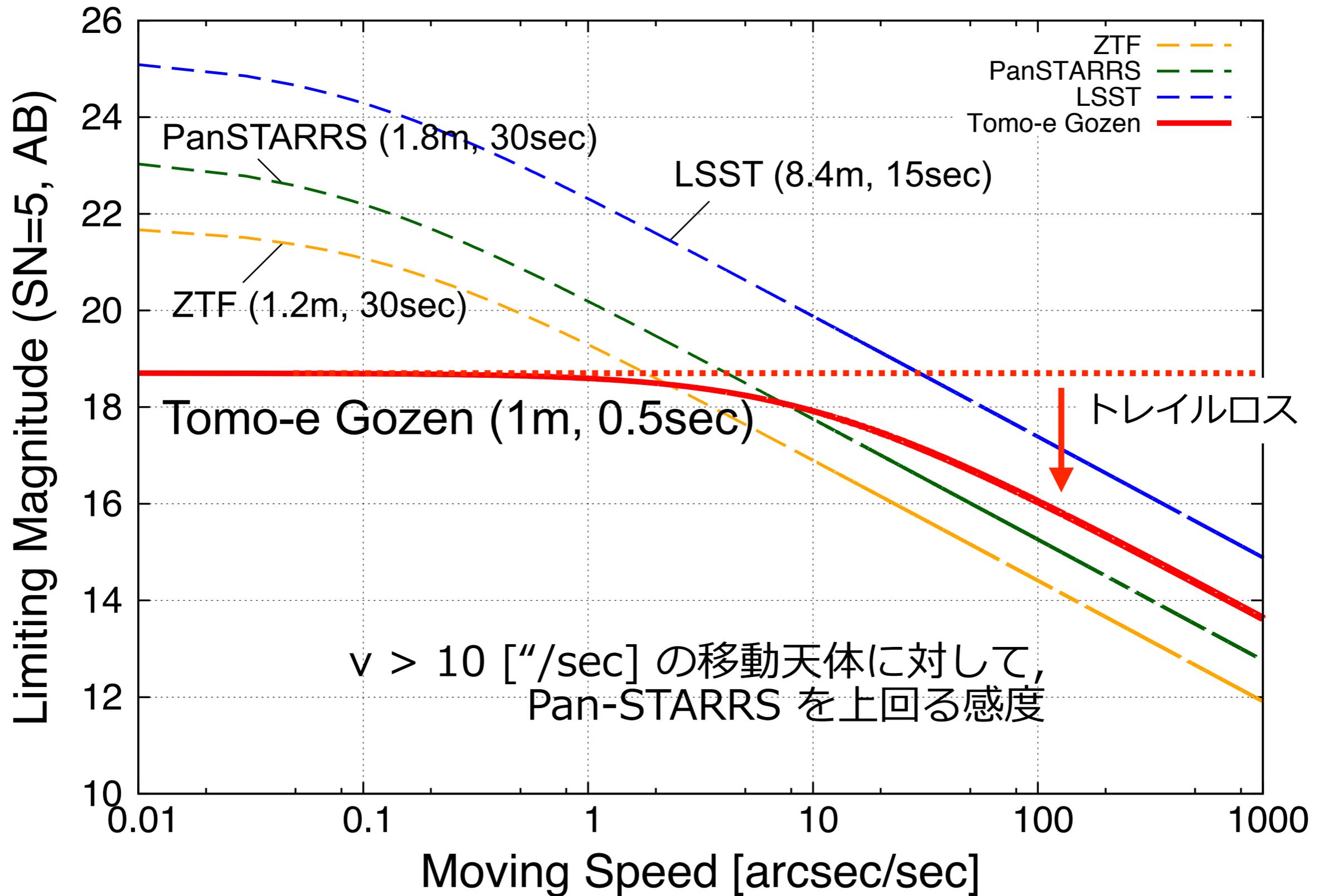


Neutron Star Marger



Planet Transit

移動天体への感度比較

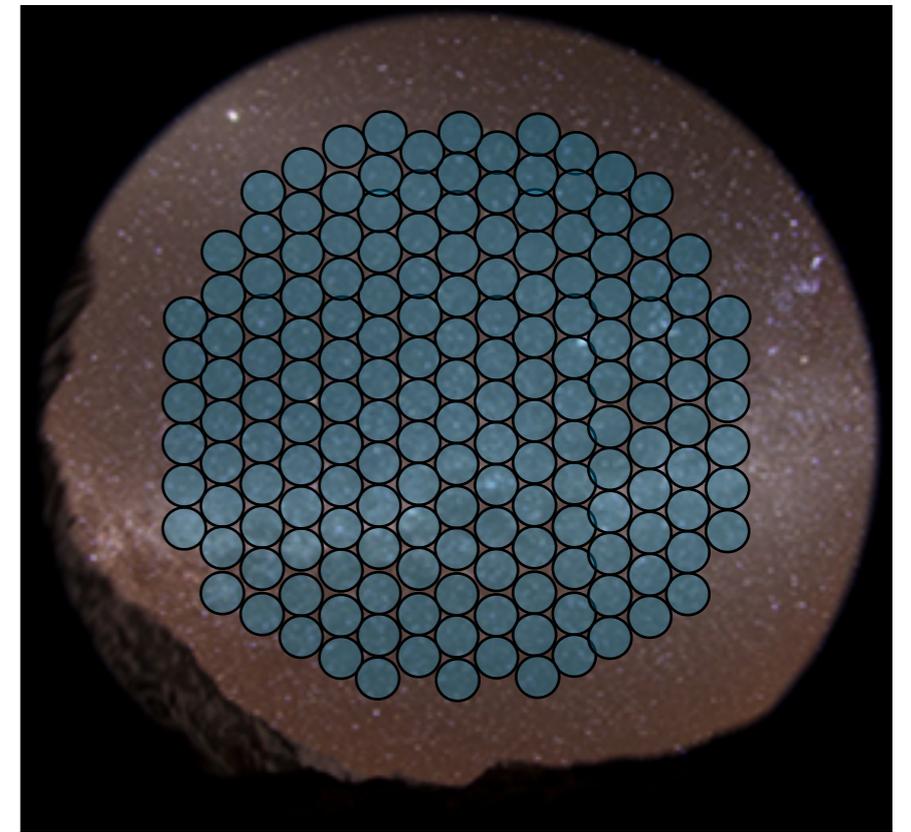


動画データによる
NEO の広視野観測

Tomo-e Gozen による動画サーベイ

超新星爆発の発見が主な目的

- 1視野につき, 0.5秒露光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



全天サーベイで観測される視野

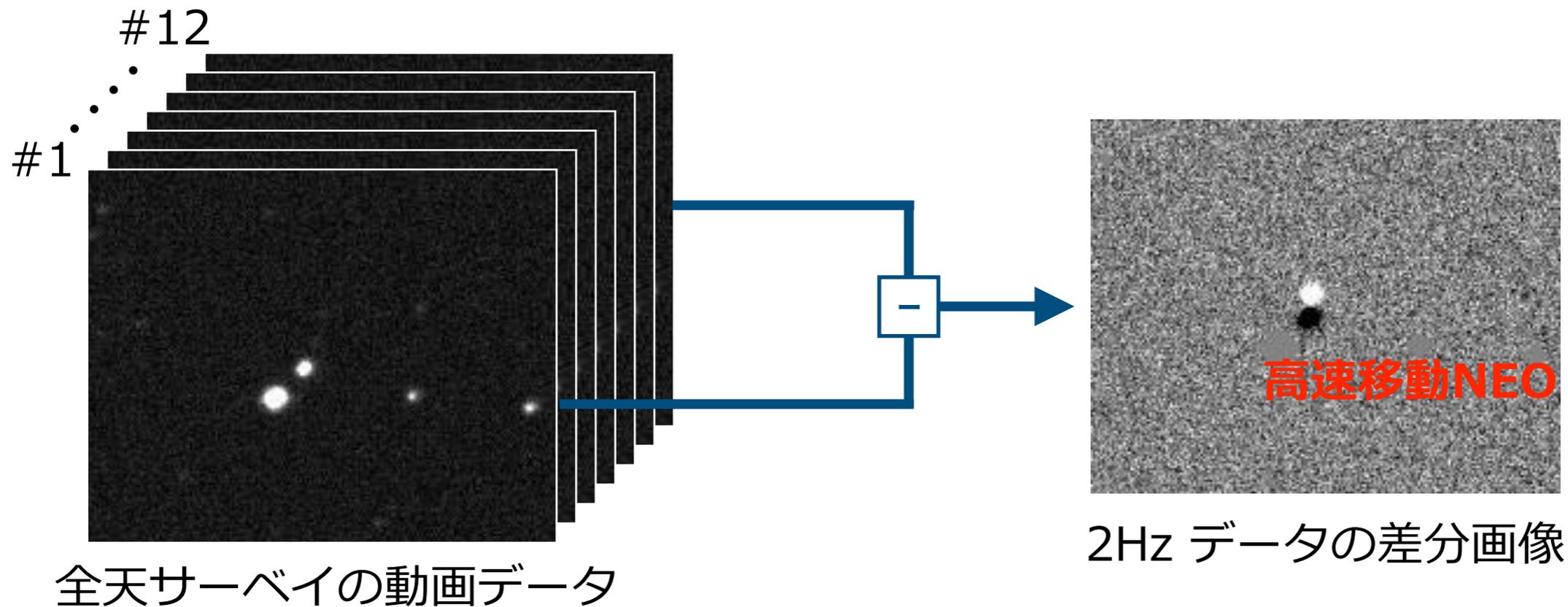
Tomo-e Gozen による動画サーベイ

超新星爆発の発見が主な目的

- 1視野につき, 0.5秒露光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

➡ 2Hz データの差分画像より,
高速移動NEO($\sim 1''/\text{sec}$)を検出

動画サーベイからの NEO 検出



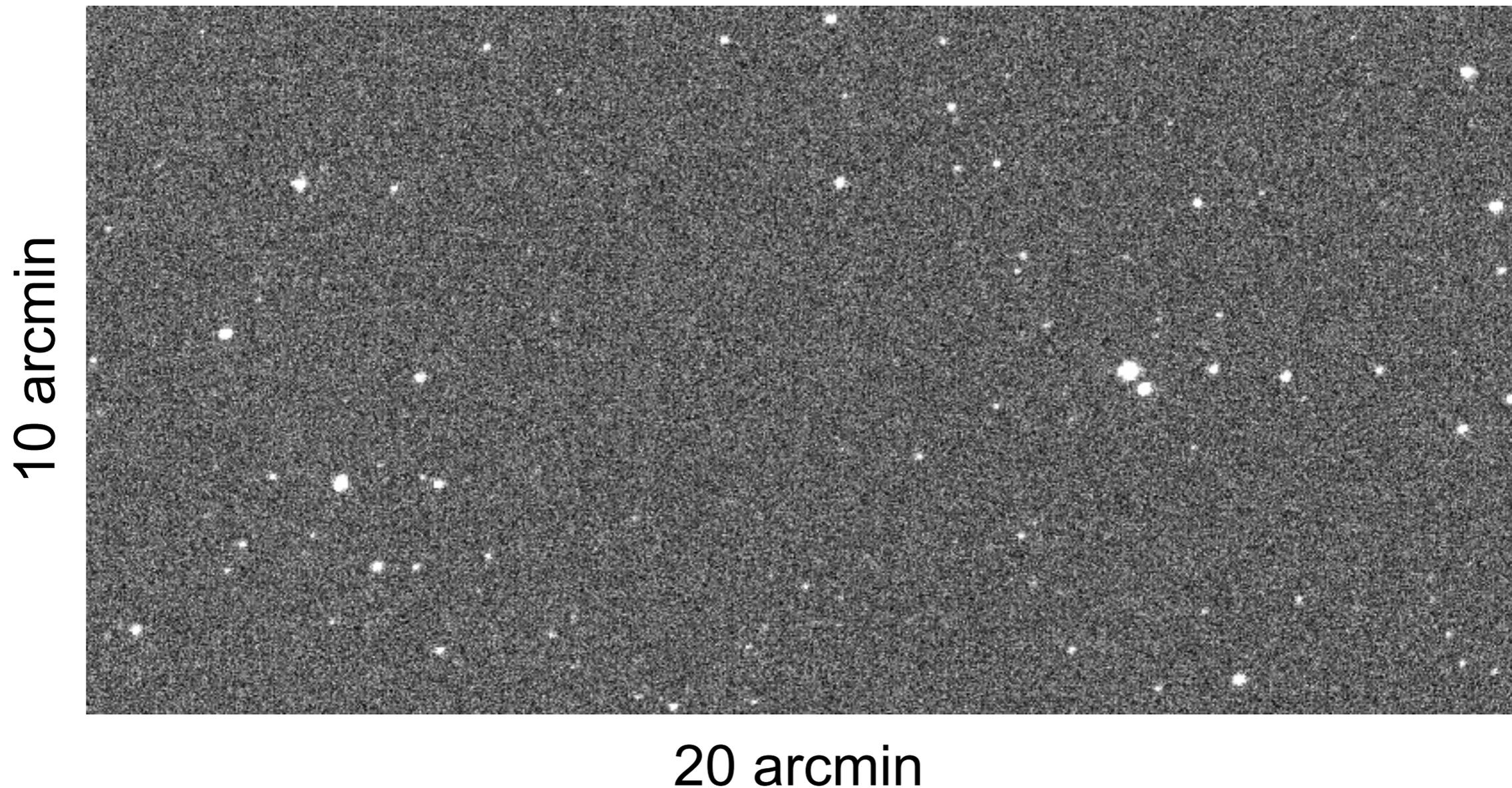
動画全天サーベイの利点

- 0.5秒露光により, トレイルロスの影響を受けづらい
- 一晩で同一の NEO を複数回観測可能

動画データからの検出例

$v \sim 1$ ["/sec] のNEO 2010 WC9 を実際に2Hzで観測

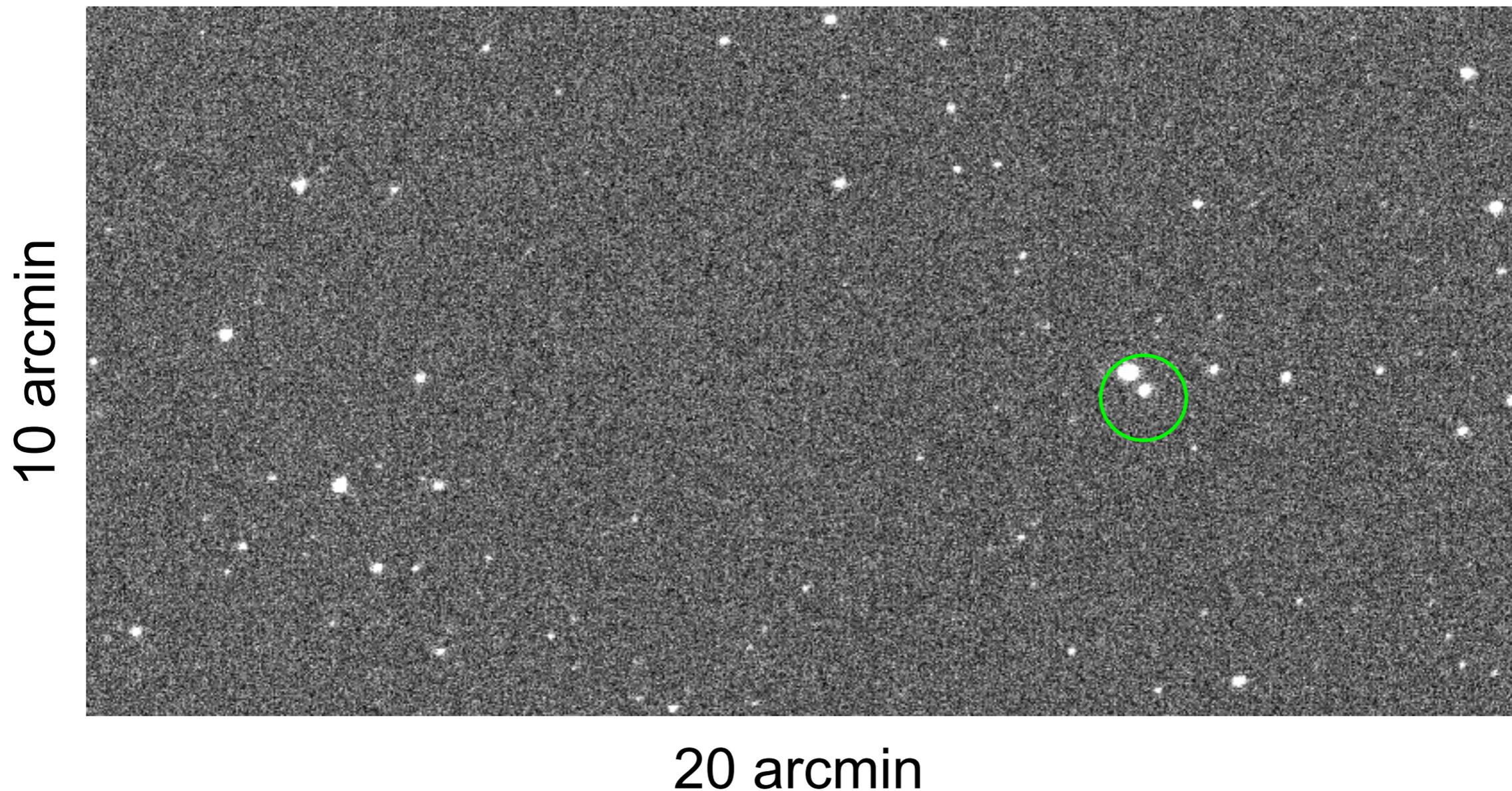
0.5秒露光, 12フレーム



動画データからの検出例

$v \sim 1$ ["/sec] のNEO 2010 WC9 を実際に2Hzで観測

1st フレーム

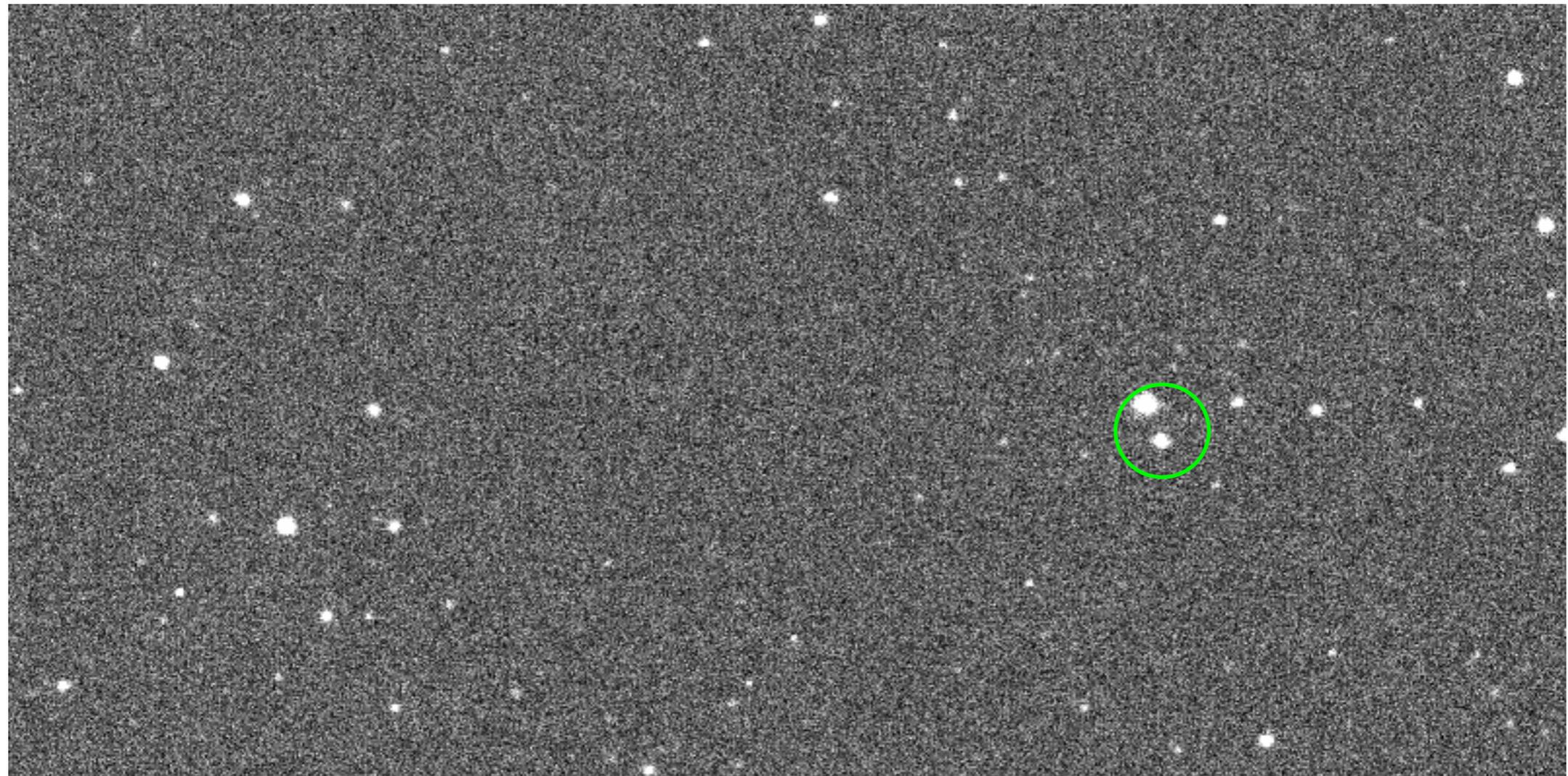


動画データからの検出例

$v \sim 1$ ["/sec] のNEO 2010 WC9 を実際に2Hzで観測

12th フレーム

10 arcmin

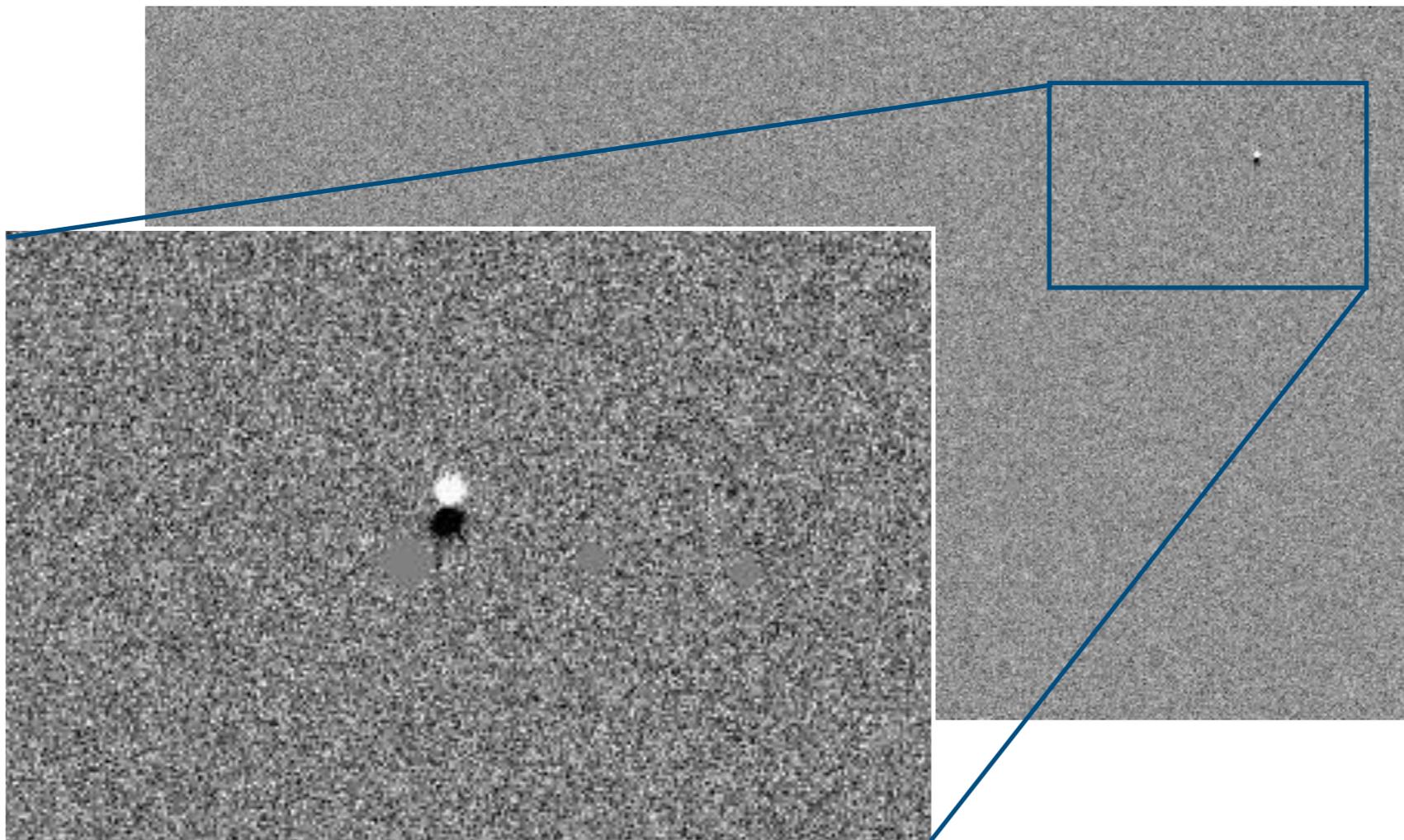


20 arcmin

動画データからの検出例

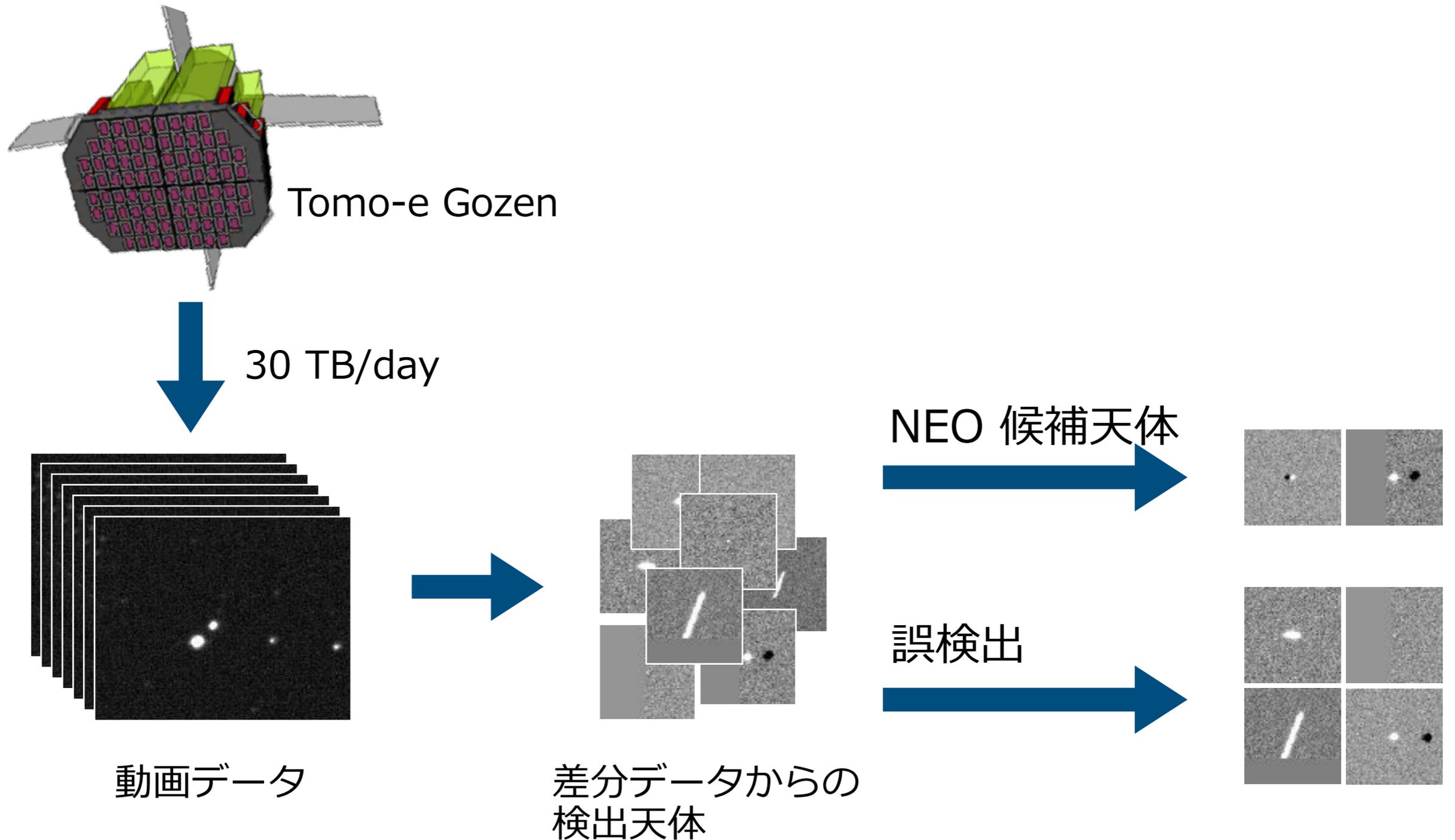
$v \sim 1$ ["/sec] のNEO 2010 WC9 を実際に2Hzで観測

1-12フレームの差分画像

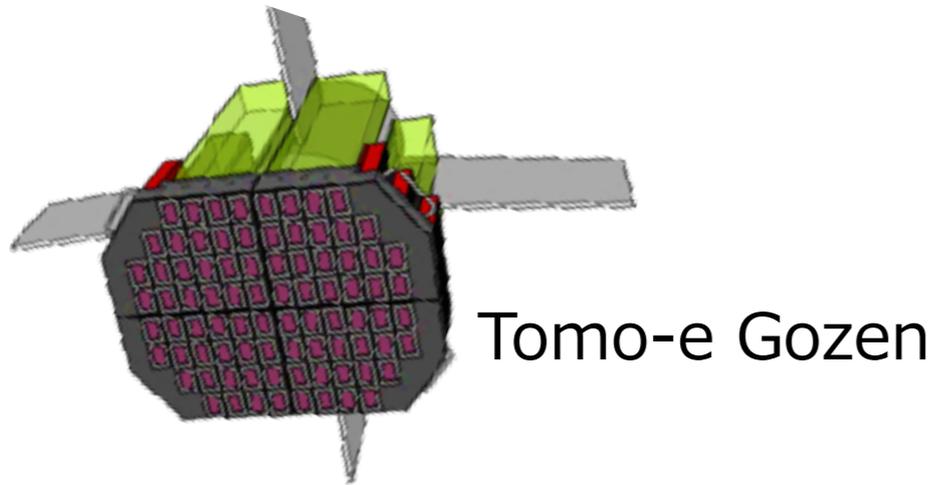


機械学習による NEO の分類試験

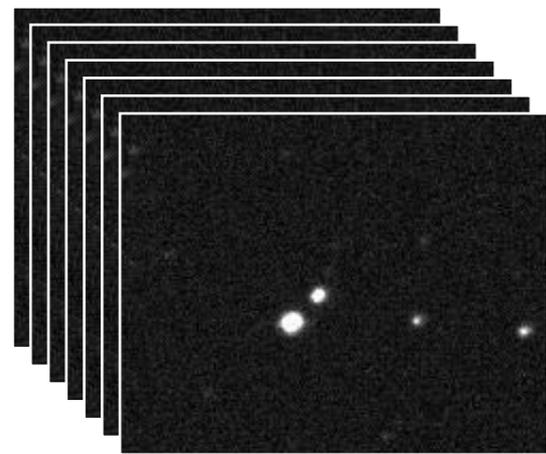
NEO 検出の流れ



NEO 検出の流れ

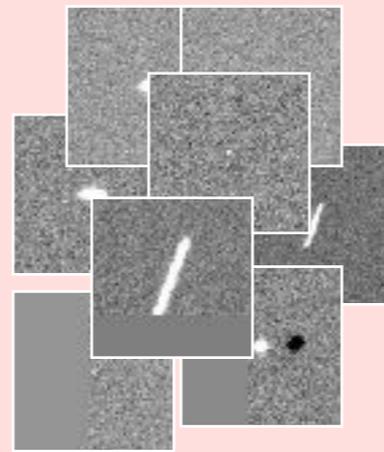


30 TB/day



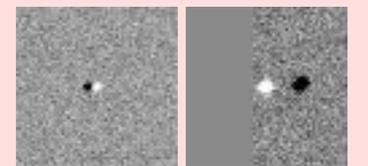
動画データ

機械学習の利用

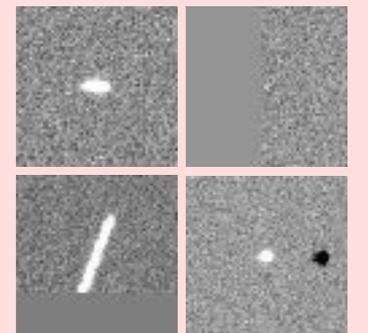


差分データからの
検出天体

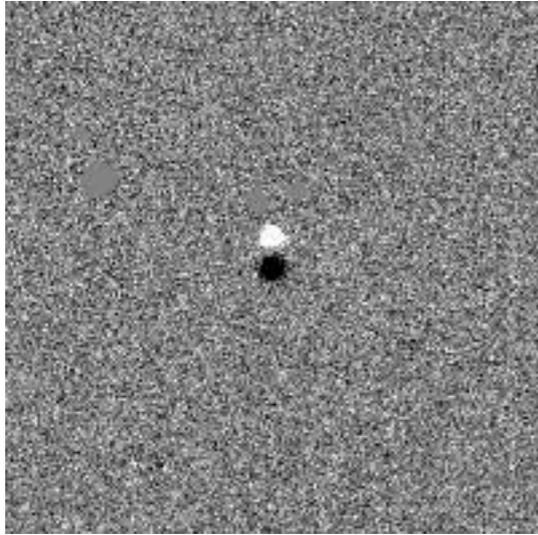
NEO 候補天体



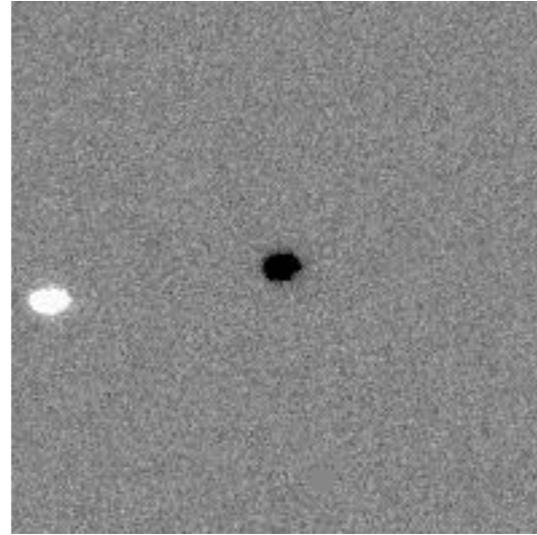
誤検出



差分画像からの検出例



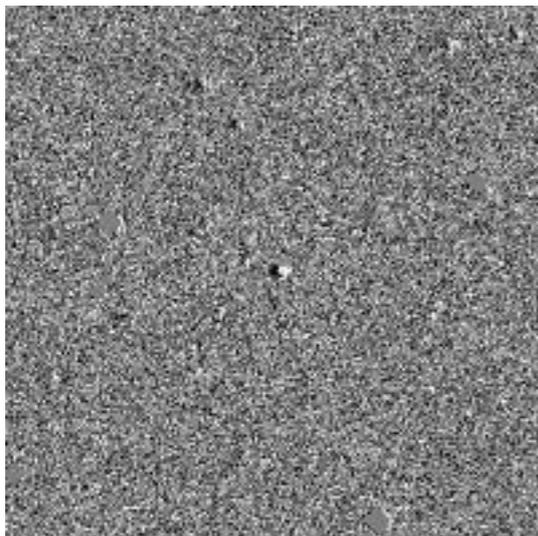
NEO



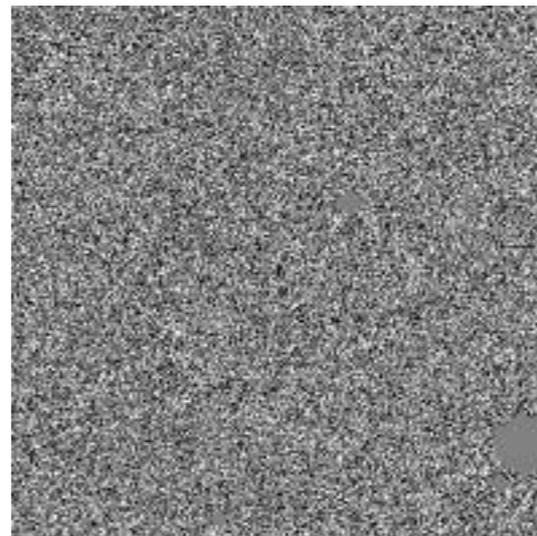
静止軌道衛星



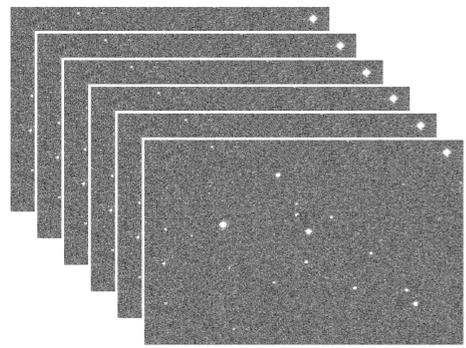
低軌道衛星



星のマスク失敗

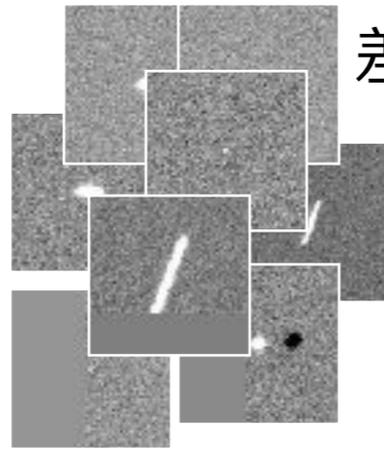


宇宙線



テスト用 NEO を埋め込んだ画像

検出



差分画像からの検出天体

約14,000件の分類済みデータ

FWHM	Variance_x	Variance_y	Variance_xy	FLUX	Velocity	...	LABEL
4.20	0.50	0.50	-0.01	3231	0.13	...	1
28.80	23.51	182.34	61.29	239325	0.22	...	0
1.81	0.52	0.24	0.11	766	0.05	...	1
15.88	15.52	5.15	5.17	140851	0.56	...	1
.
.
.
11.13	12.98	4.09	1.74	281985	0.31	...	0
3.77	0.67	0.89	0.66	921	0.98	...	1
11.33	6.63	2.79	-0.80	8600	1.13	...	0
1.62	0.46	0.41	0.12	739	0.11	...	1

ラベル付け

PSFの形状, 移動速度等の特徴量を抽出してテーブル化

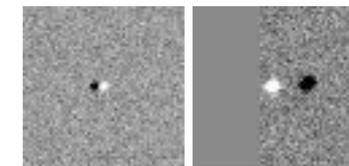
検証

学習

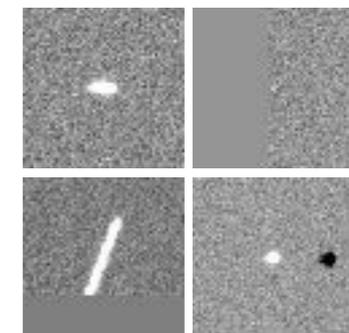
ランダムフォレスト

分類器

NEO 候補天体



誤検出



特徴量

機械学習で使用した特徴量の例

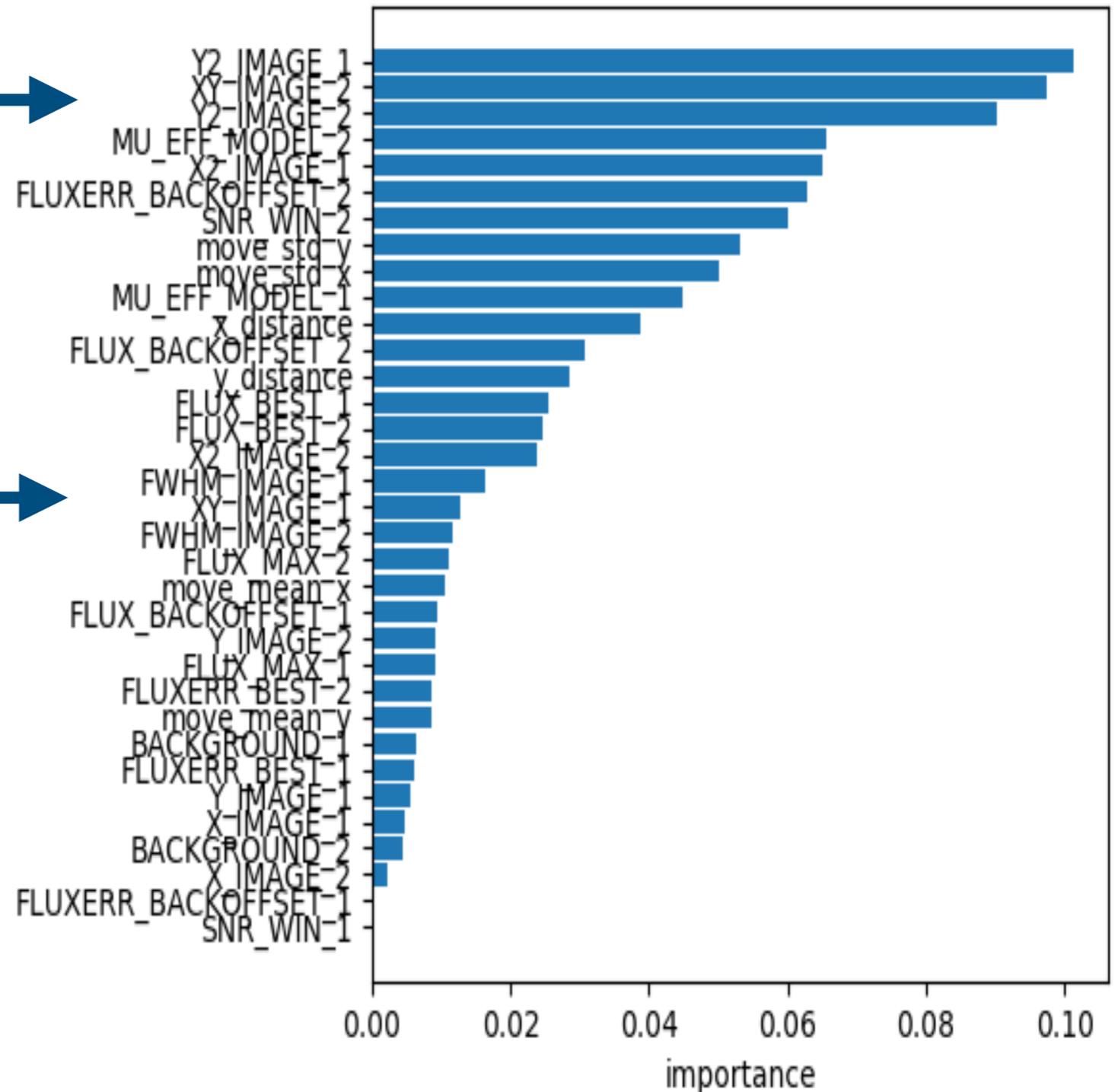
- PSFのFWHM [pix]
- PSFの二次モーメント [pix²]
- 天体の移動速度 [pix/frame]
- 天体の移動速度の分散 [pix²/frame²]
- 天体のフラックス [ADU]
- 背景光ノイズの大きさ [ADU]
- . . .

特徴量の重要度

PSFの2次モーメントは
重要度が高い



PSFのFWHMは
重要度が低い



機械学習で用いられる指標

$$\text{True Positive Rate} = \frac{TP}{TP + FN}$$

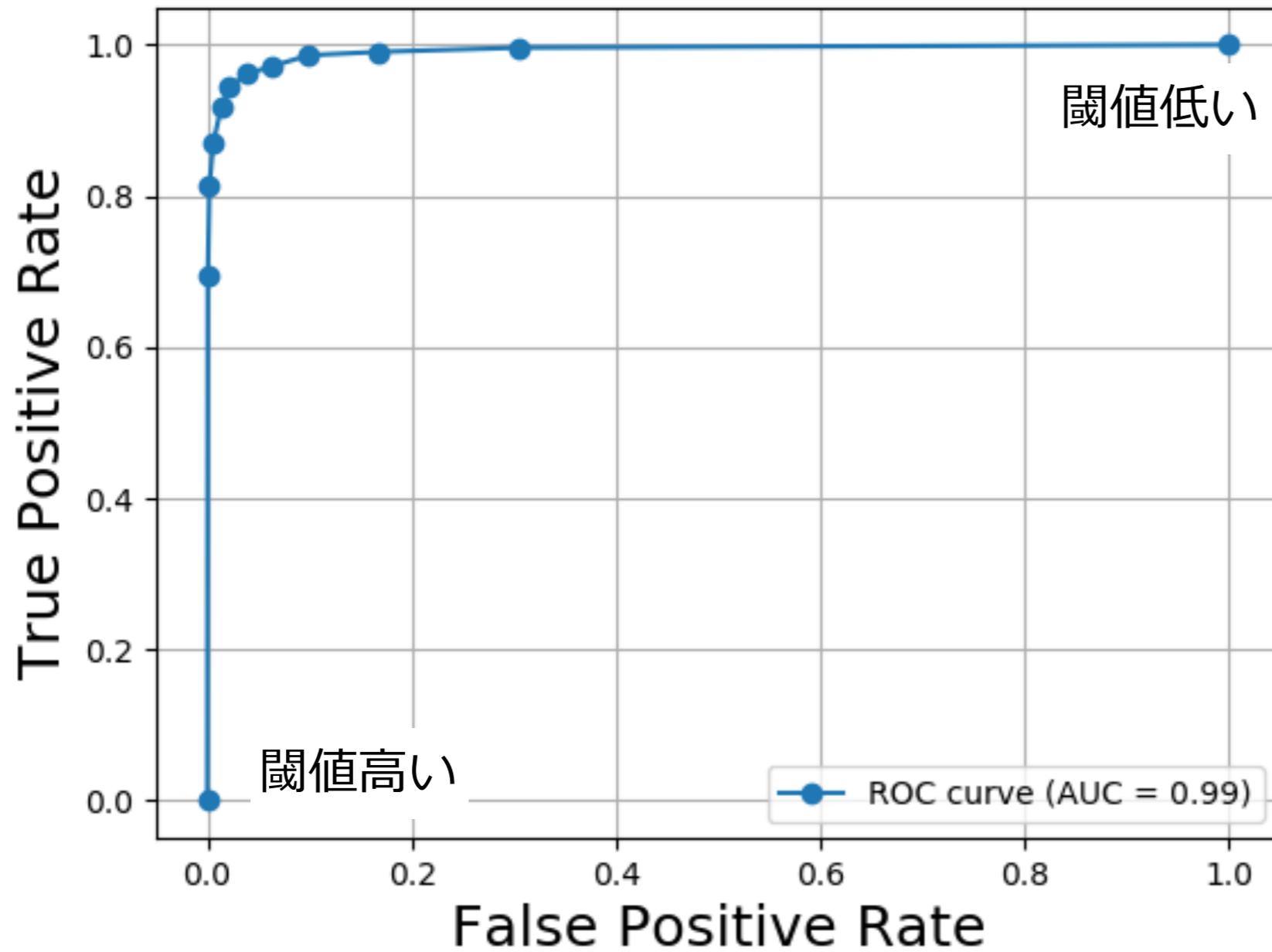
(NEOのうち, 機械がNEOと分類できた割合)

$$\text{False Positive Rate} = \frac{FP}{FP + TN}$$

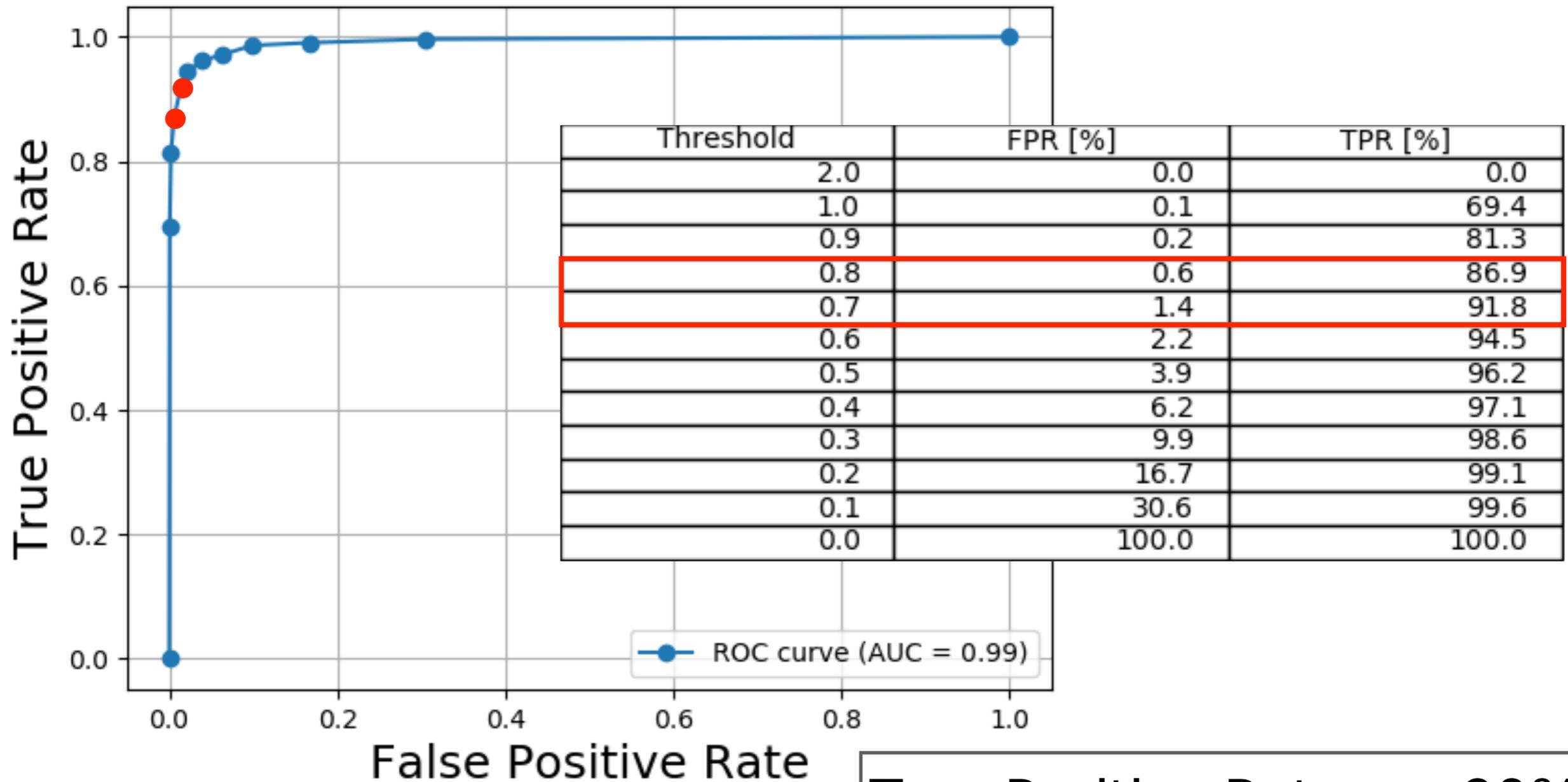
(誤検出のうち, 機械がNEOと分類してしまった割合)

2クラス分類		正解 目視で確認した結果	
		NEO	誤検出
予想 機械学習が分類した結果	NEO	TP (True Positive)	FP (False Positive)
	誤検出	FN (False Negative)	TN (True Negative)

ROC曲線



ROC曲線

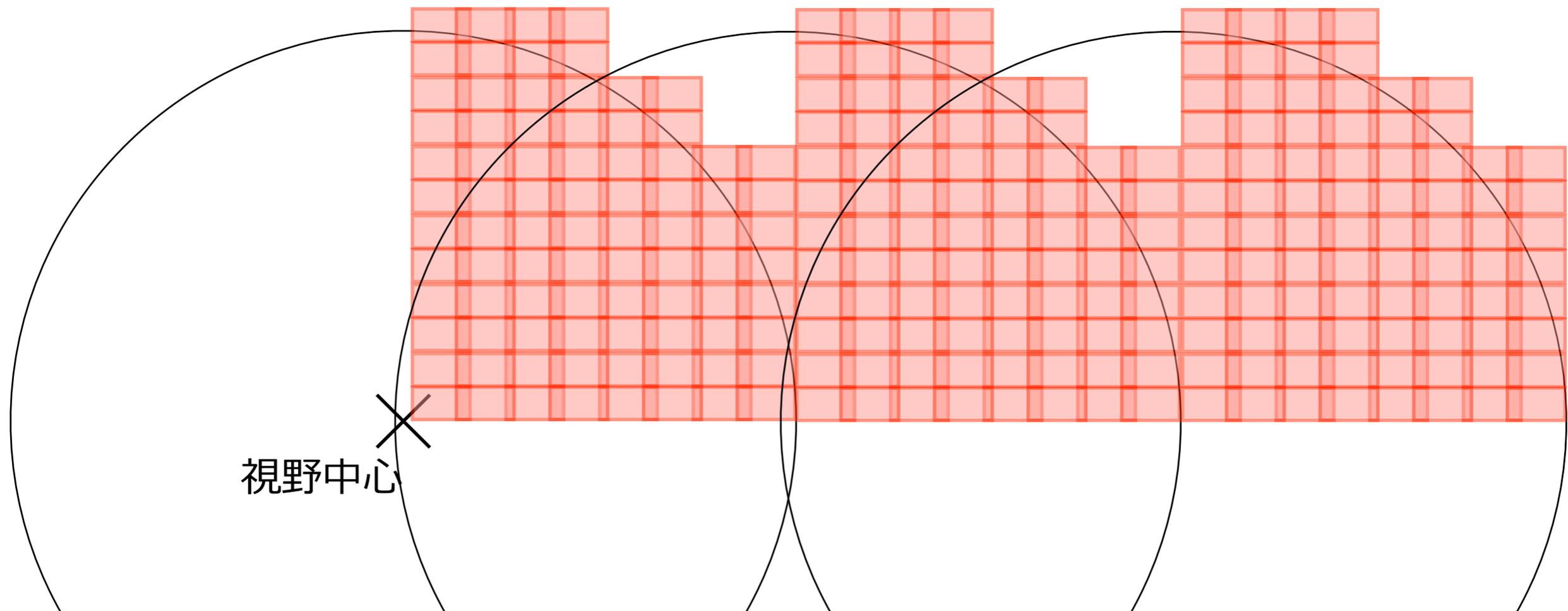


True Positive Rate : ~ 90%
False Positive Rate : ~ 1%

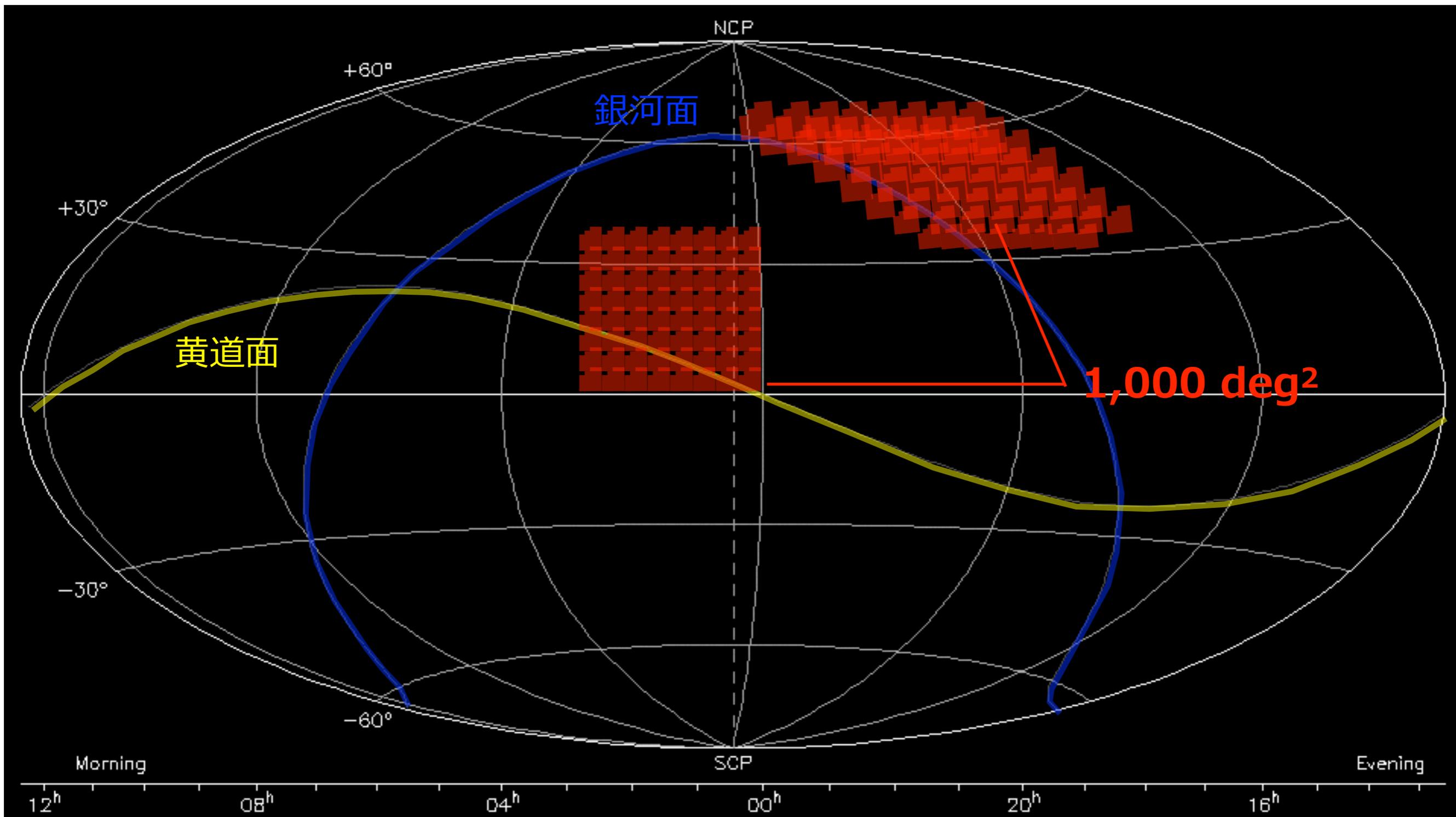
Tomo-e Gozen Q1 での
NEO サーベイ試験観測

試験観測

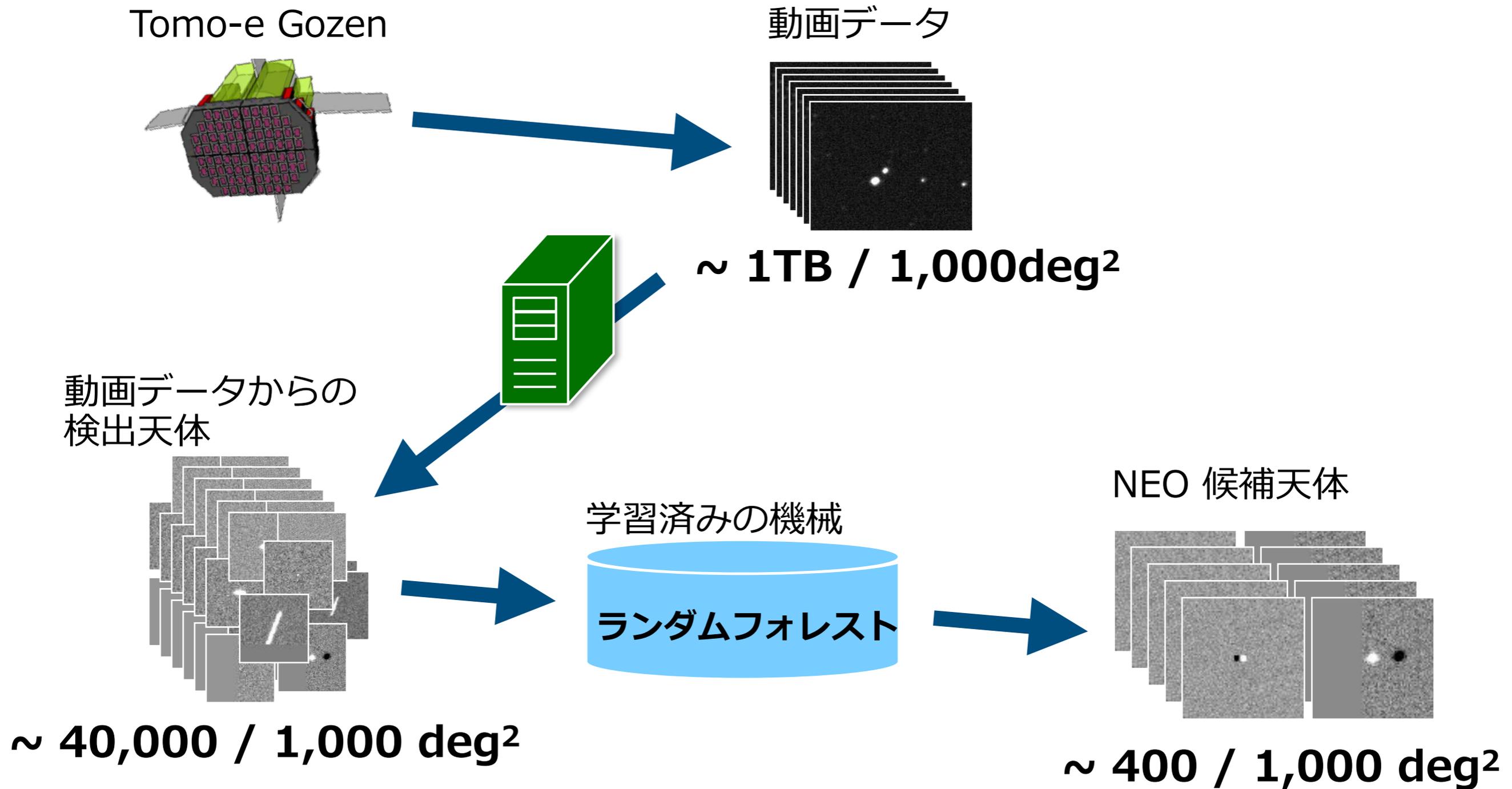
- カメラ : Tomo-e Gozen Q1 (21センサ)
- 観測日 : 2018/9/10, 9/27, 10/01
- 観測領域 : 春分点付近, 白鳥座付近を $1,000\text{deg}^2$
- 観測方法 : 64pointings, 2x2dithers, 0.5sec x 18frames



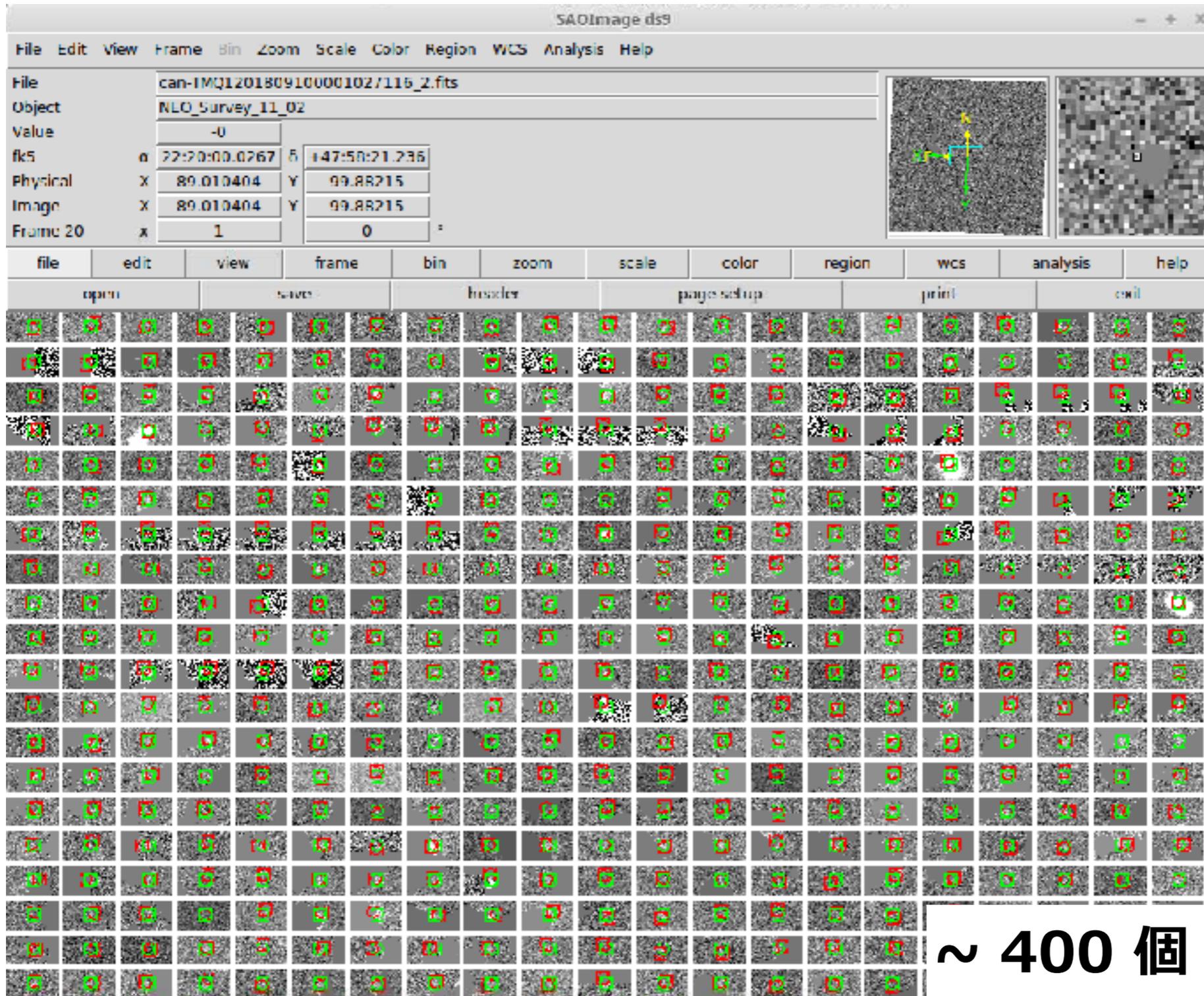
観測領域



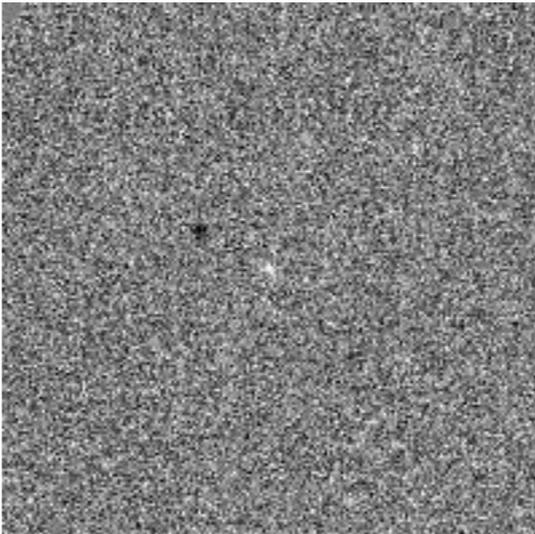
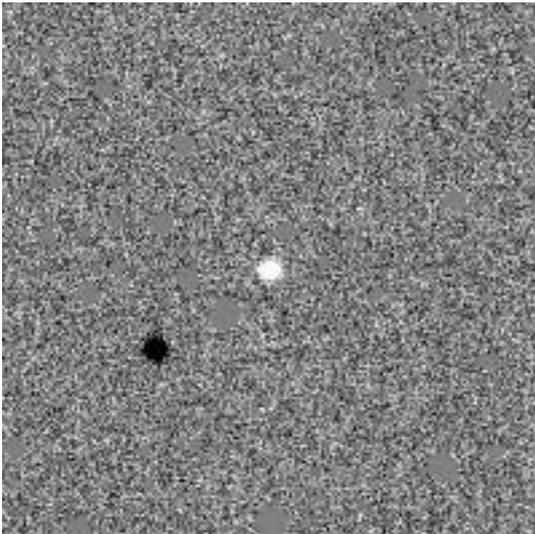
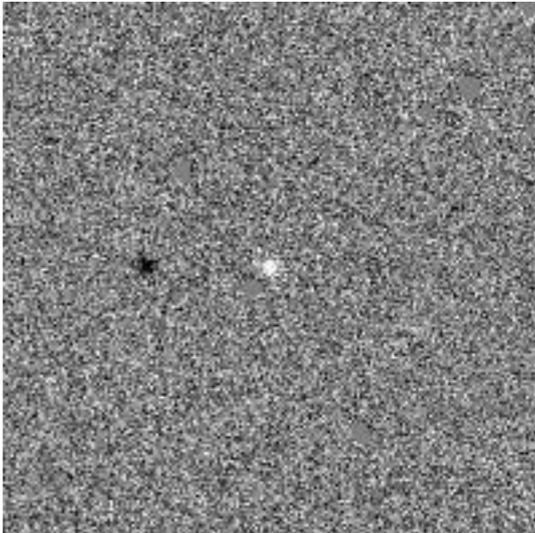
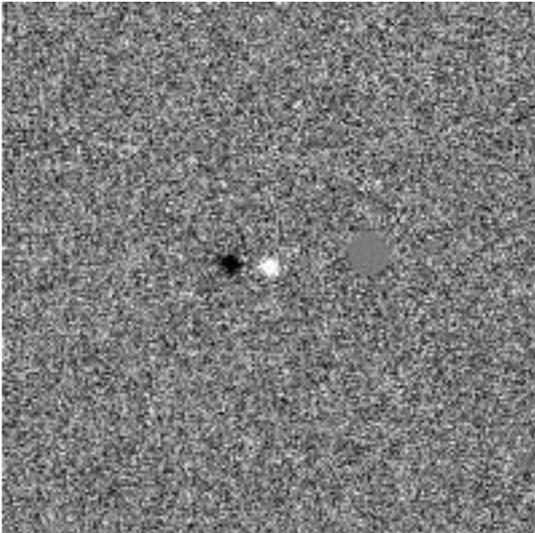
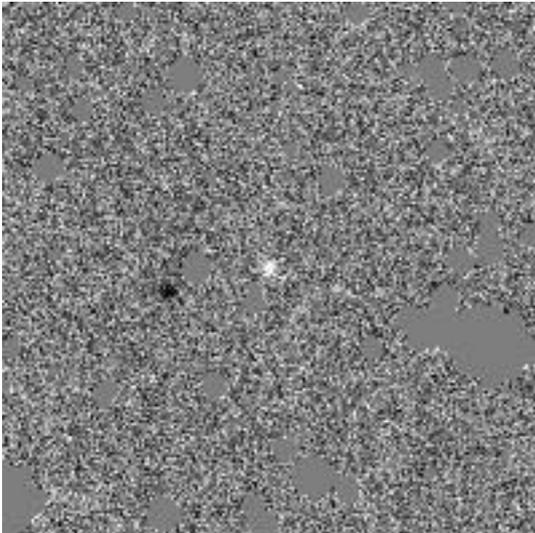
NEO 解析パイプライン



検出した NEO 候補天体

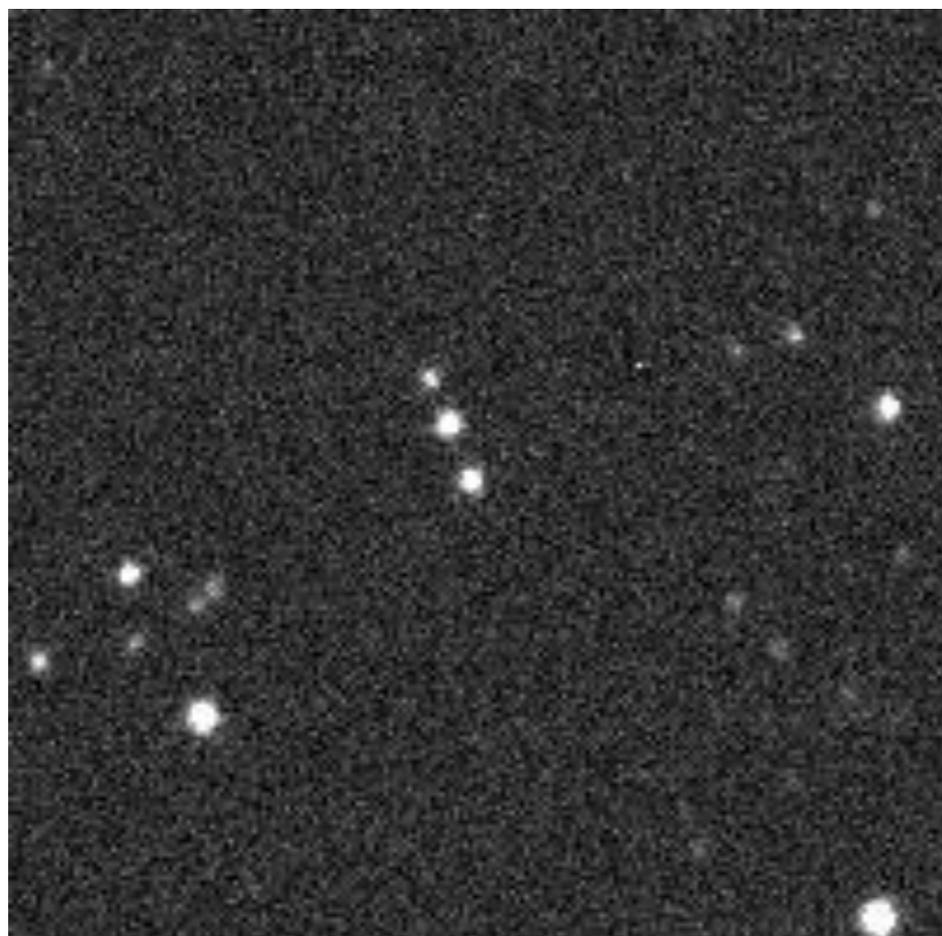


検出した NEO 候補天体の例

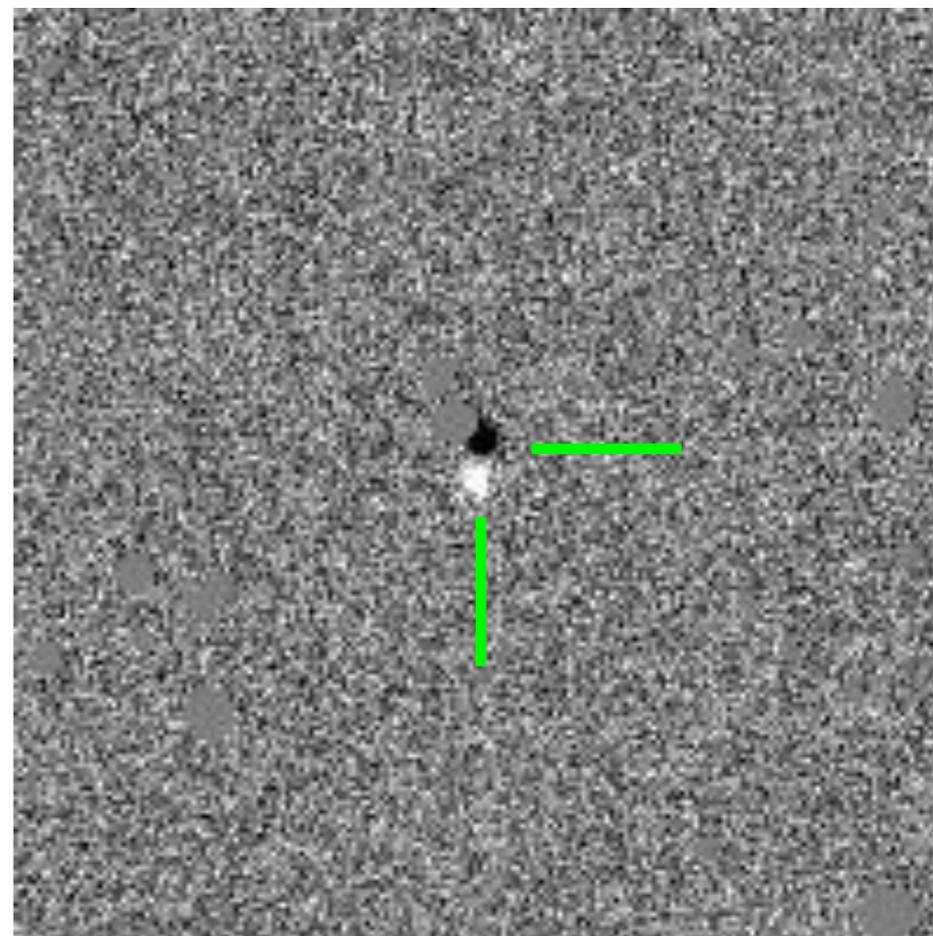


衛星, デブリ等の
移動天体

検出した NEO 候補天体の例

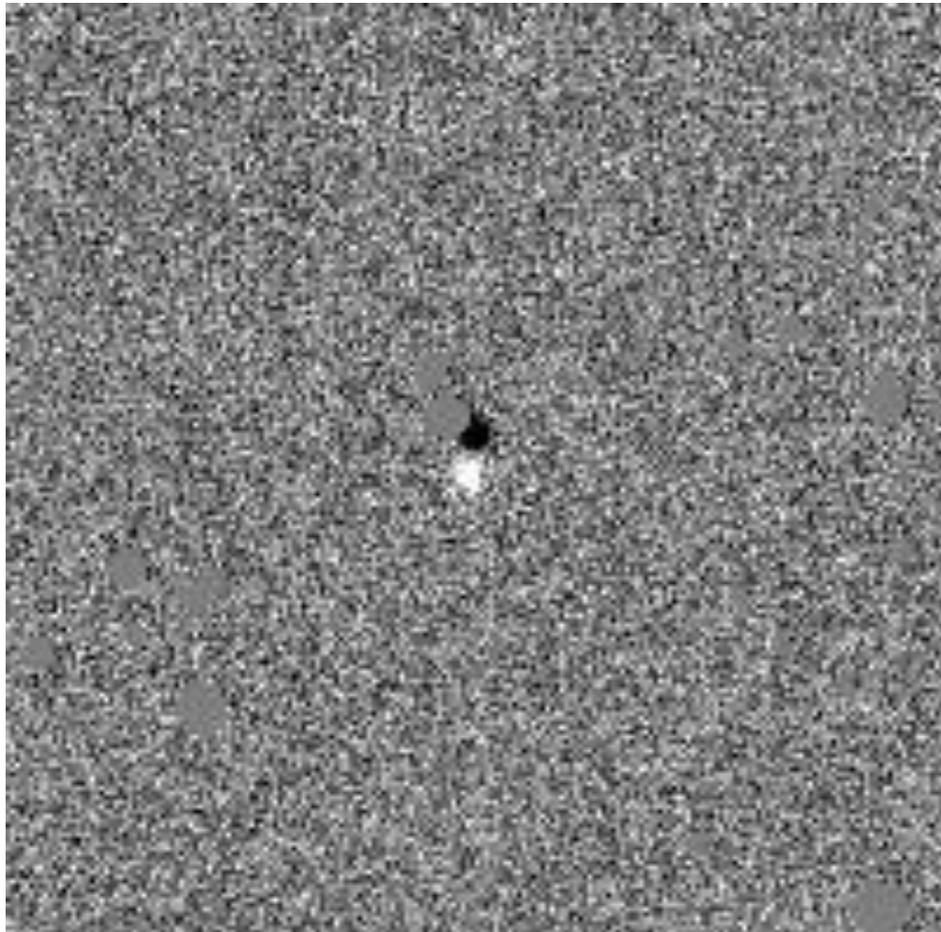


0.5sec x 18frames



マスク後の差分画像

検出した NEO 候補天体の例



Date(UT)	2018/10/01 15:48:55.46
RA	22:05:36
DEC	+33:44:16
Mag	~ 16-17 mag (V-band)
V	~ 1.3 "/sec

- ✓ 対応する NEO なし
- ✓ 対応する衛星・デブリなし

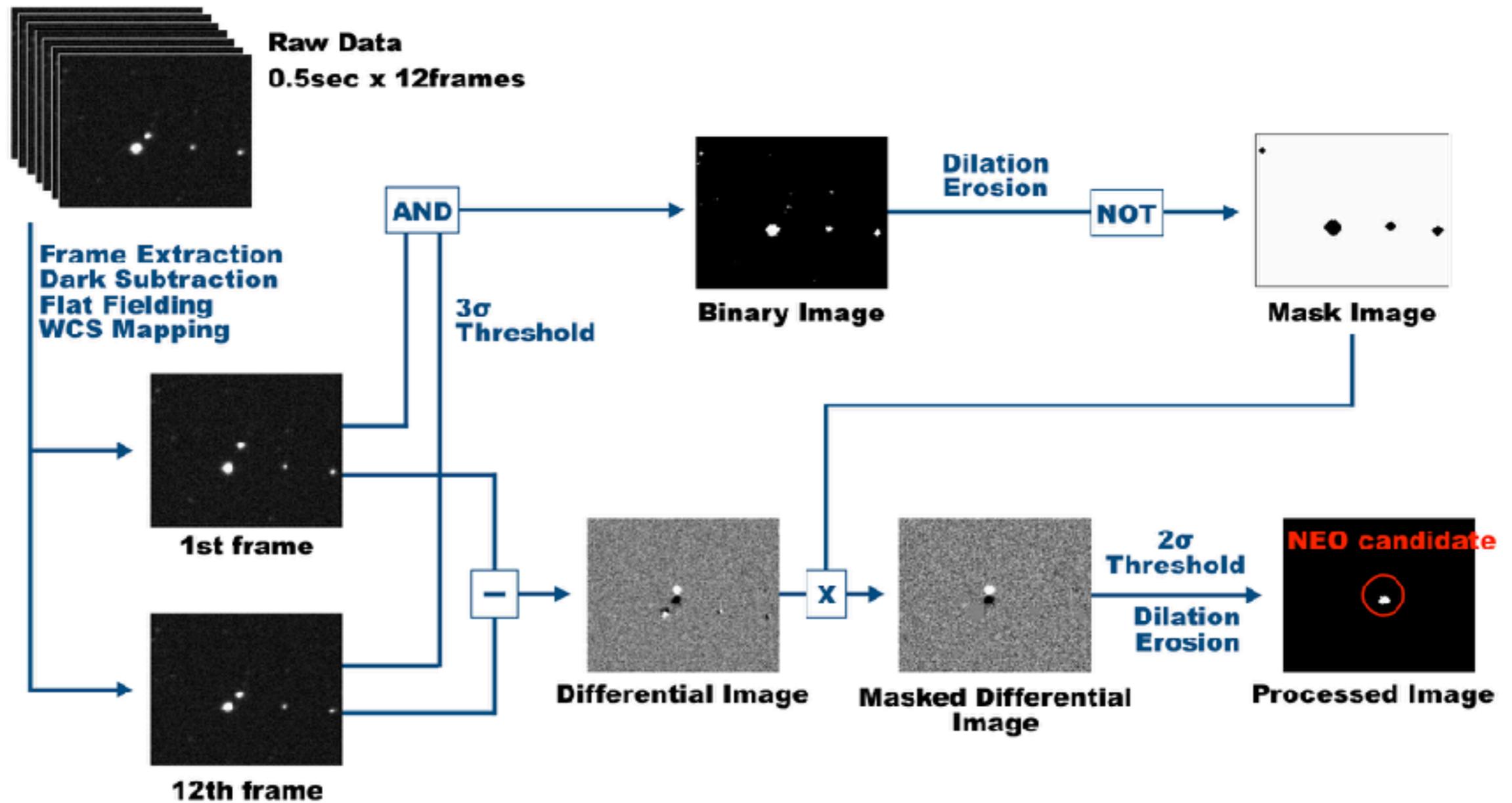
➡ NEO の発見？

まとめ

- NEO 探査の現状
 - 数十メートルサイズのNEOの大部分(99.9%)が未検出
- Tomo-e Gozen による NEO 観測
 - Tomo-e Gozen は20平方度を2Hzで動画観測
 - 2Hz 観測は, 高速移動天体に対して有効
 - 全天動画サーベイのデータで NEO の広視野探査
高速移動NEOを"点源"として検出可能
 - 差分画像からの検出天体を機械学習によって分類
TPR=90%, FPR=1% を達成
 - サーベイ試験観測を実施
NEO候補天体を検出

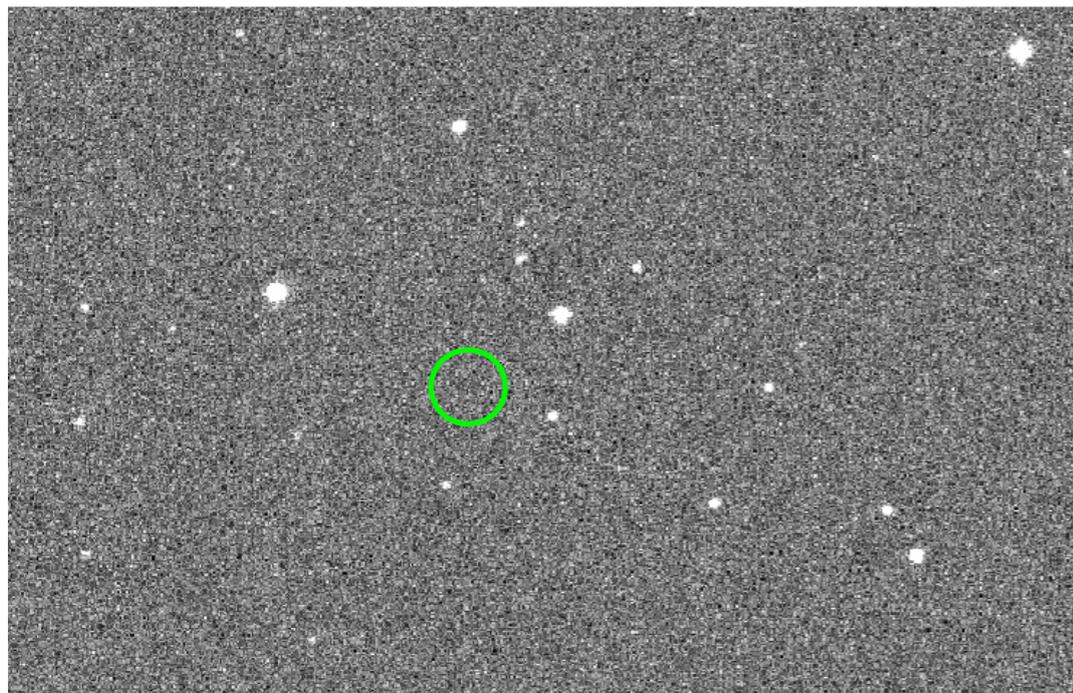
Appendix

高速移動 NEO 検出システム

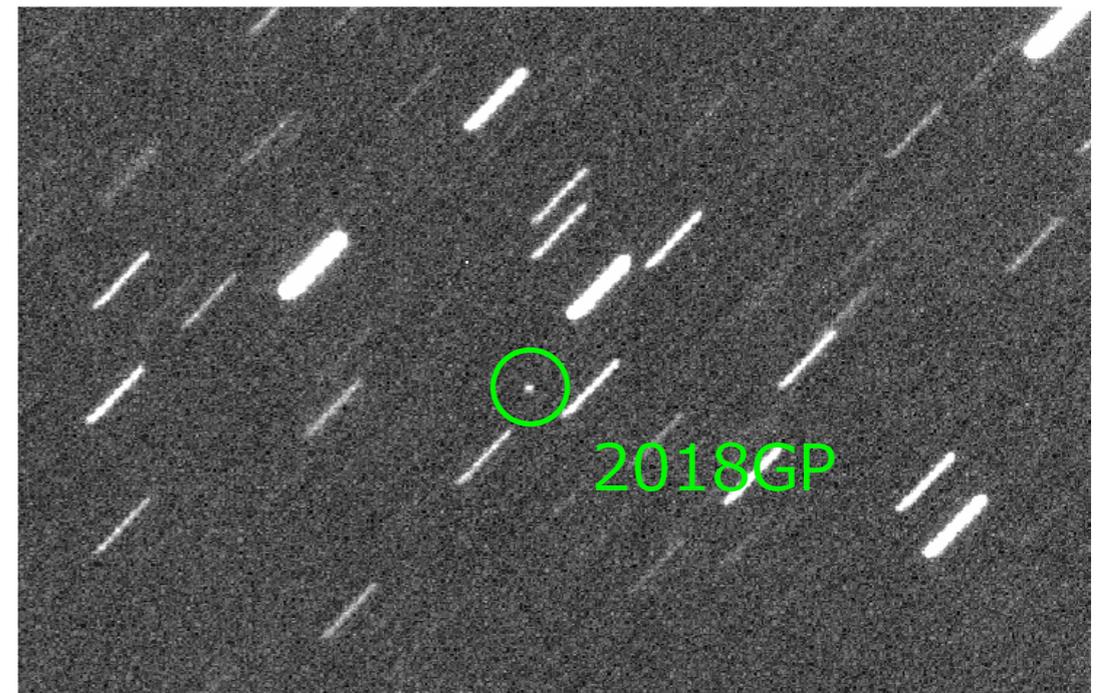


動画観測の重要性

メリット①: 高速移動NEOに対して, **重ね合わせ法の適用**



0.5 sec, 1 frame

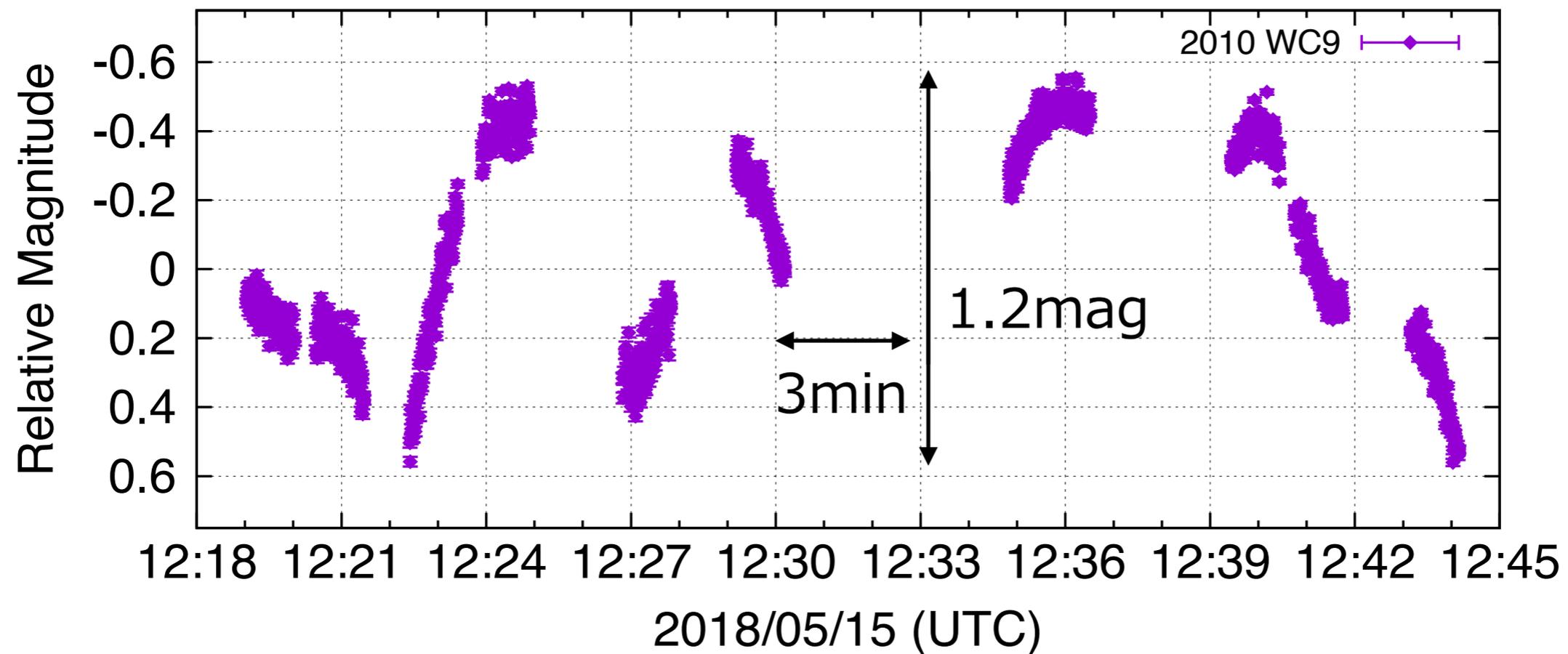


0.5 sec, 120 frame
(shift coadd)

2Hz画像をNEOの移動方向に沿って重ね合わせた例

動画観測の重要性

メリット②: 高時間分解能(2Hz)のライトカーブの取得



移動速度が $1''/\text{sec}$ となった 2010 WC9 の 2Hz ライトカーブ

機械学習で用いられる指標

機械学習で“NEO”と“誤検出”を分類する場合

2クラス分類		正解 目視で確認した結果	
		NEO	誤検出
予想 機械学習が分類した結果	NEO	TP (True Positive)	FP (False Positive)
	誤検出	FN (False Negative)	TN (True Negative)

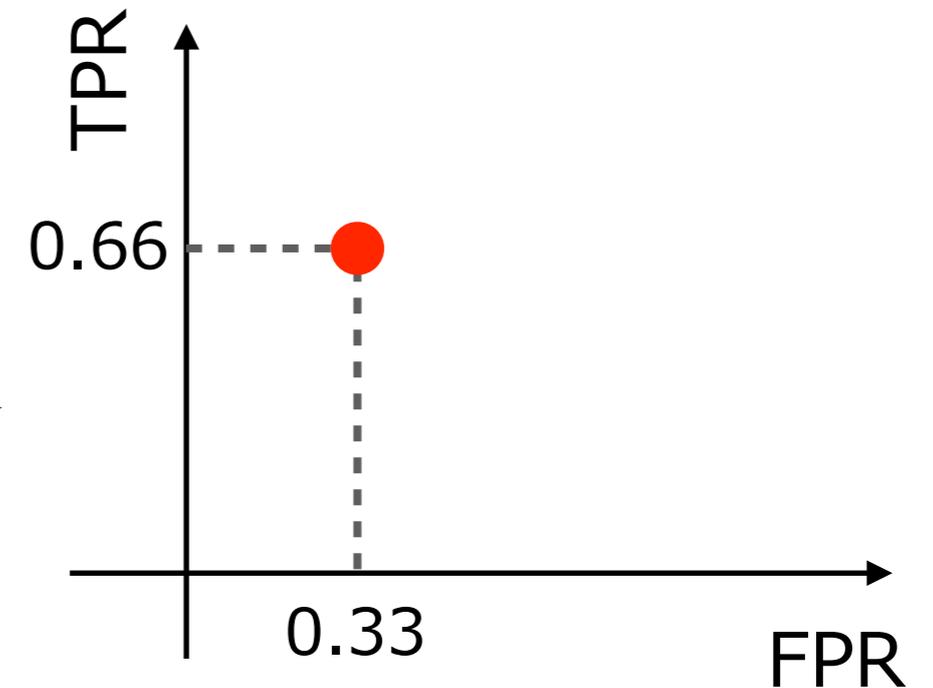
ROC曲線

検証用データの予想スコアの閾値を変えながら, FPR と TPR をプロットした曲線

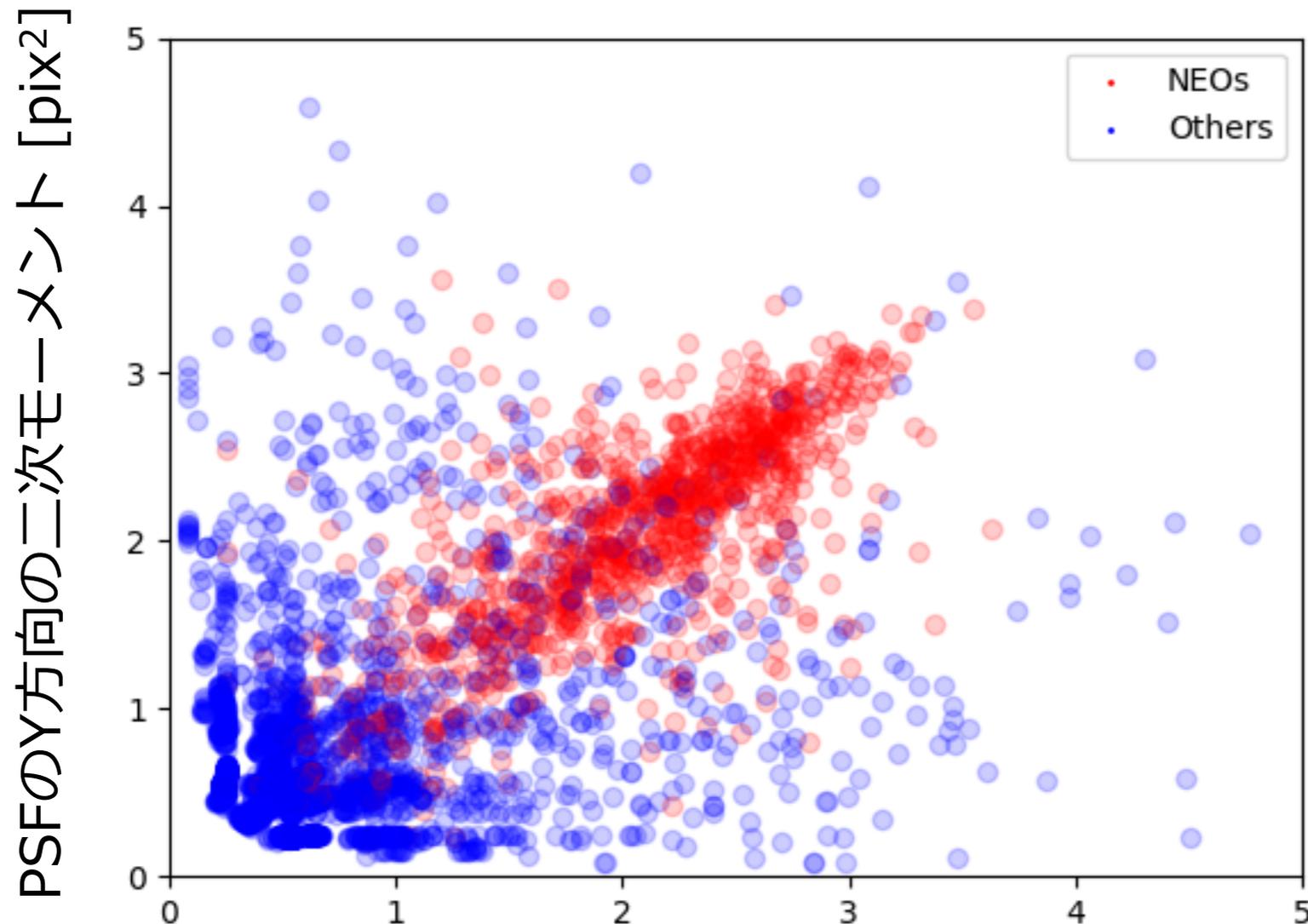
例) 閾値を0.5とした時

正解	ラベル	予想スコア	閾値 =0.5
NEO	1	0.9	1
NEO	1	0.7	1
誤検出	0	0.3	0
誤検出	0	0.6	1
NEO	1	0.4	0
誤検出	0	0.1	0

$$\begin{aligned} \text{FPR} &= 0.33 \\ \text{TPR} &= 0.66 \end{aligned}$$



モデルの評価結果



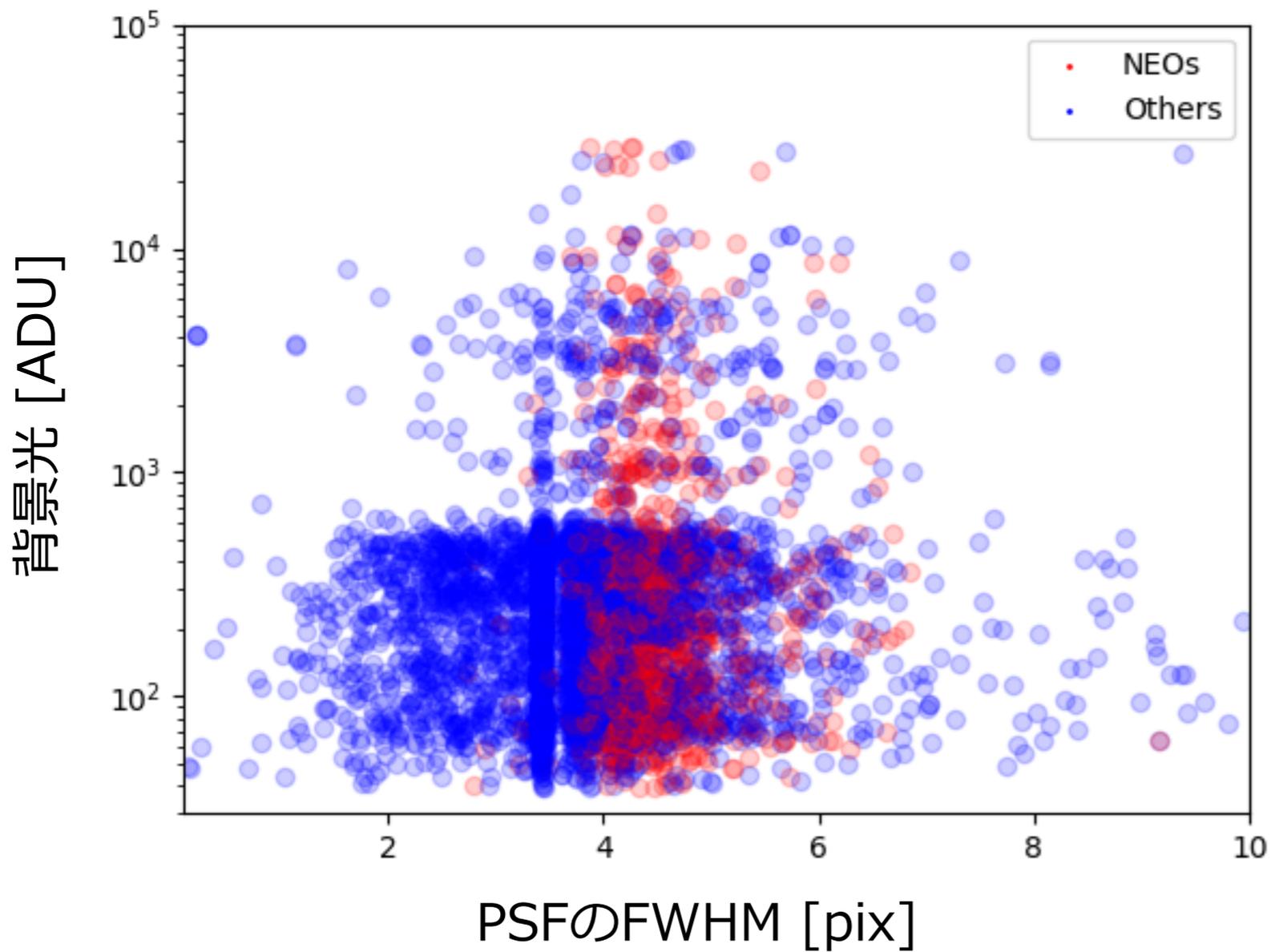
PSFのX方向の二次モーメント [pix²]

重要度の高い特徴量同士の相関図の例

重要度の高い特徴量

- PSFの二次モーメント
- 移動量
- 移動量の分散

モデルの評価結果

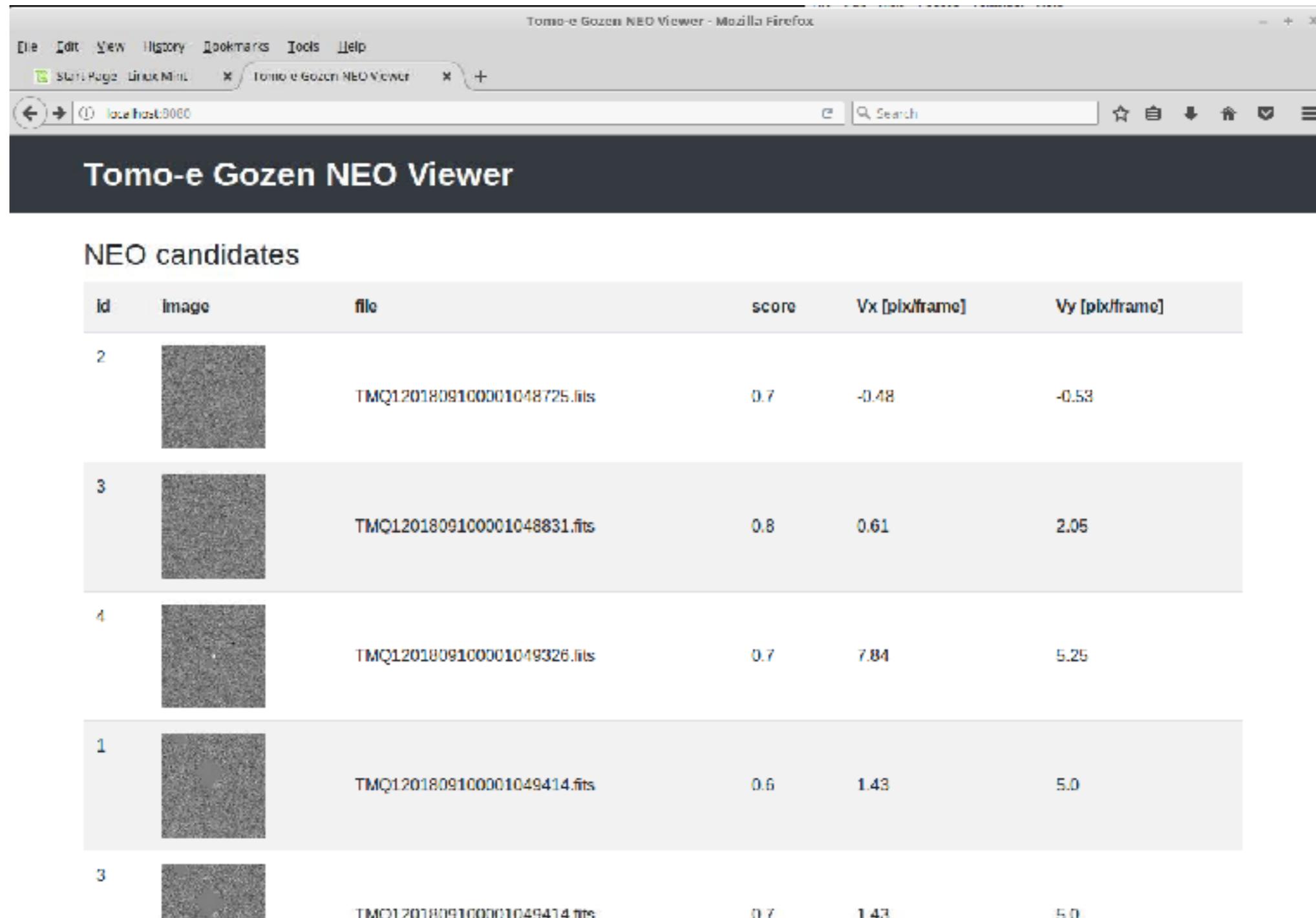


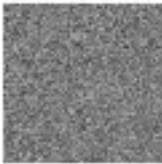
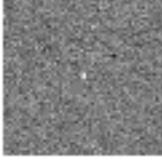
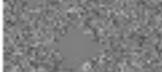
重要度の低い特徴量

- PSFのFWHM
- 天体の明るさ
- 背景光の明るさ

重要度の低い特徴量同士の相関図の例

NEO 候補天体の確認システム



id	image	file	score	Vx [pix/frame]	Vy [pix/frame]
2		TMQ1201809100001048725.fits	0.7	-0.48	-0.53
3		TMQ1201809100001048831.fits	0.8	0.61	2.05
4		TMQ1201809100001049326.fits	0.7	7.84	5.25
1		TMQ1201809100001049414.fits	0.6	1.43	5.0
3		TMQ1201809100001049414.fits	0.7	1.43	5.0