

Tomo-e Gozen 突発現象アラート システムの開発と現状

笹岡大雅, 酒向重行, 瀧田怜, 新納悠, 森由貴 (東京大学), 富永望 (国立天文台),
高橋一郎 (東京科学大学), 田口健太 (京都大学), 田中雅臣 (東北大学),
Tomo-e Gozen コラボレーション

目次

1.イントロダクション

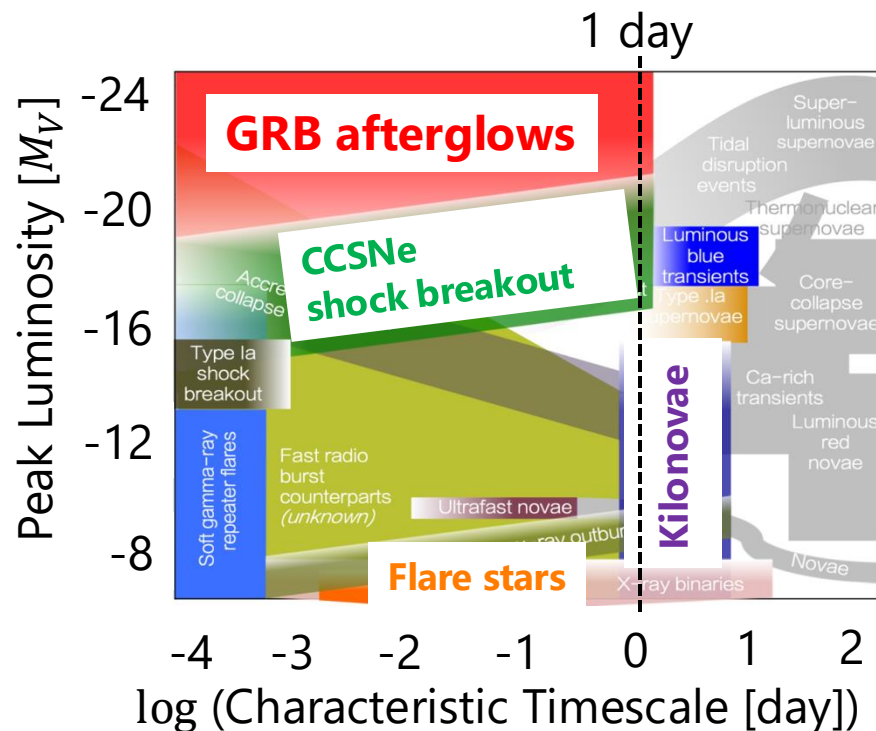
2.機械学習モデルの開発

3.機械学習モデルの導入および現状

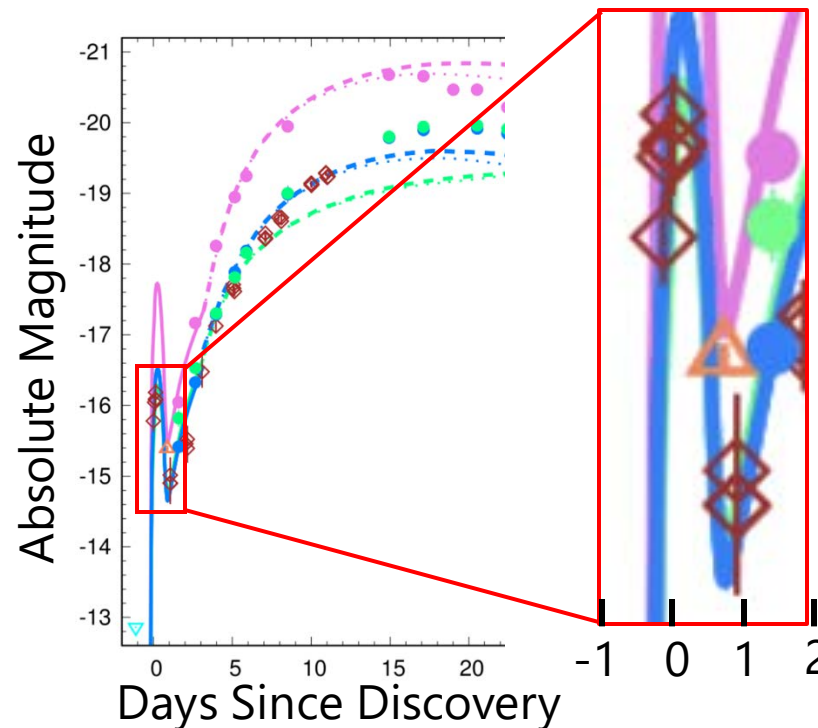
4.まとめ

Introduction: 時間軸天文学

- 時間軸天文学: 時間変動する天体をターゲットにした研究.
- **特に突発現象**(変動の時間スケール $\lesssim 1$ day) **については, 迅速なフォローアップ観測が不可欠.**
 - キロノバ, フレア星, 超新星のショックブレイクアウト etc.



Based on [Buckley et al., 2020](#), Fig. 1.



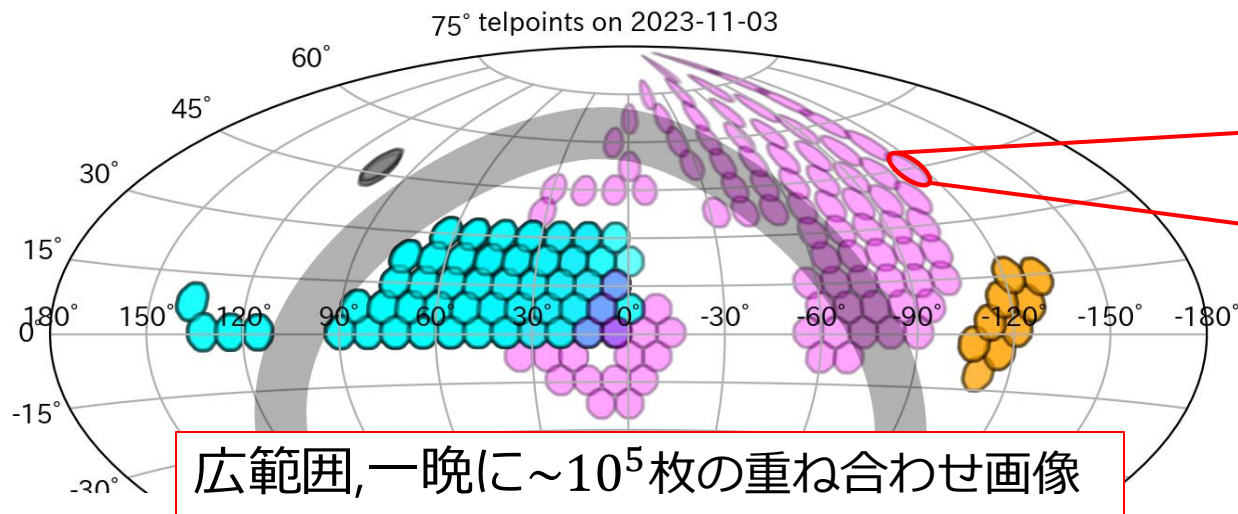
特異なIa型超新星
SN 2020hvf の初期増光
(Tomo-eによる発見！)
~ 1day

Based on [Jiang et al., 2021](#), Fig. 6.

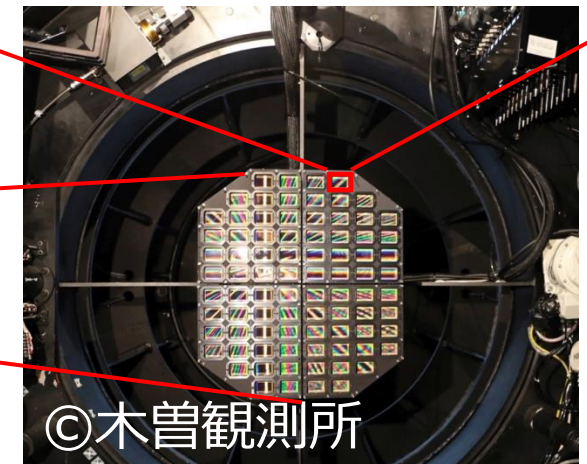
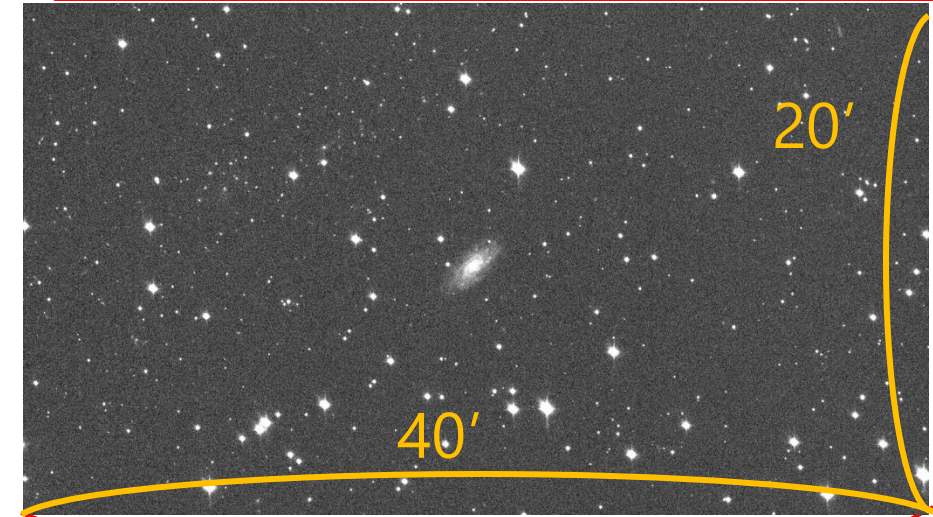
Introduction: Tomo-e Gozen による突発現象探査

Tomo-e Gozen 突発現象サーベイ

- **All-Sky Survey:** $\sim 9000 \text{ deg}^2/\text{夜}$ $\sim 1 \text{ visit}/\text{夜}$
- **High-Cadence Survey:** $\sim 2500 \text{ deg}^2/\text{夜}$,
2-3 visit/夜
- 2 fps 動画データ
 - 動画データの重ね合わせ画像(6 or 9 秒)
 - 限界等級 $\lesssim 19 \text{ mag}$



Tomo-e Gozenのセンサ1枚分の画像



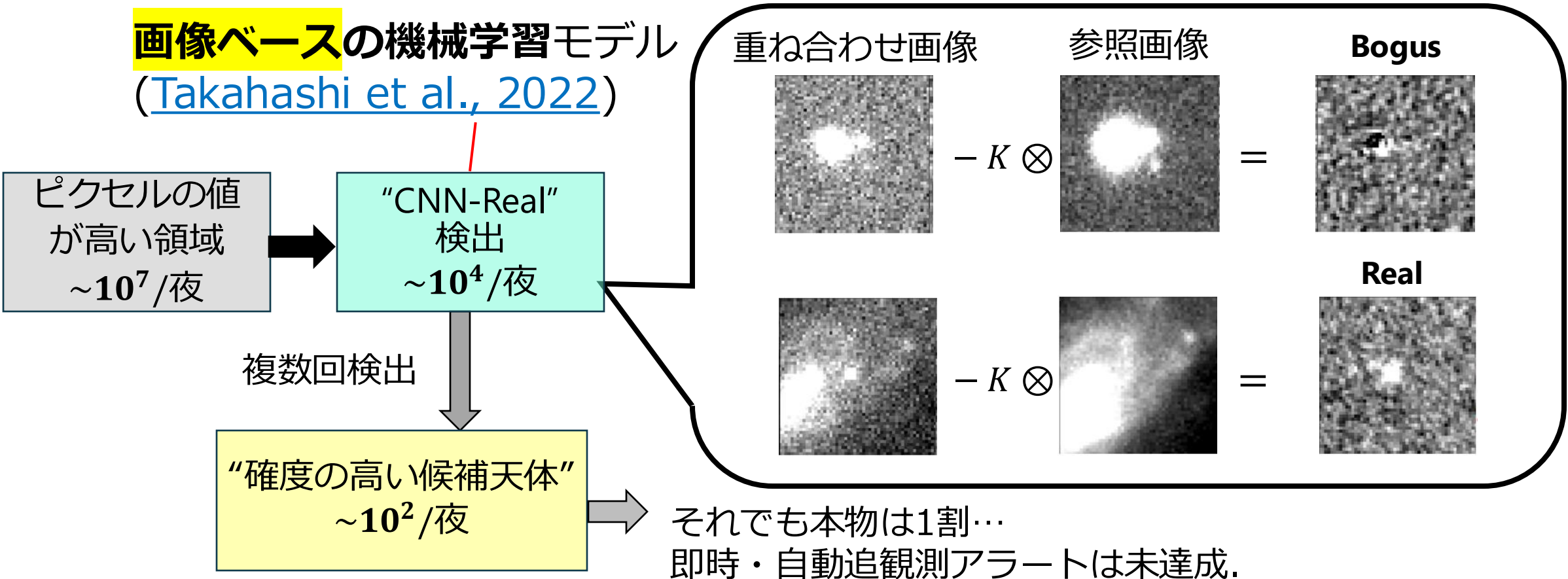
[Sako et al., 2018](#)

84枚のCMOSセンサからなる
Tomo-e Gozenカメラ

Introduction: 本研究の目的

- 特徴量ベースの機械学習モデルの開発(正誤判定器 & 分類器)
- 突発現象のアラートシステムの開発

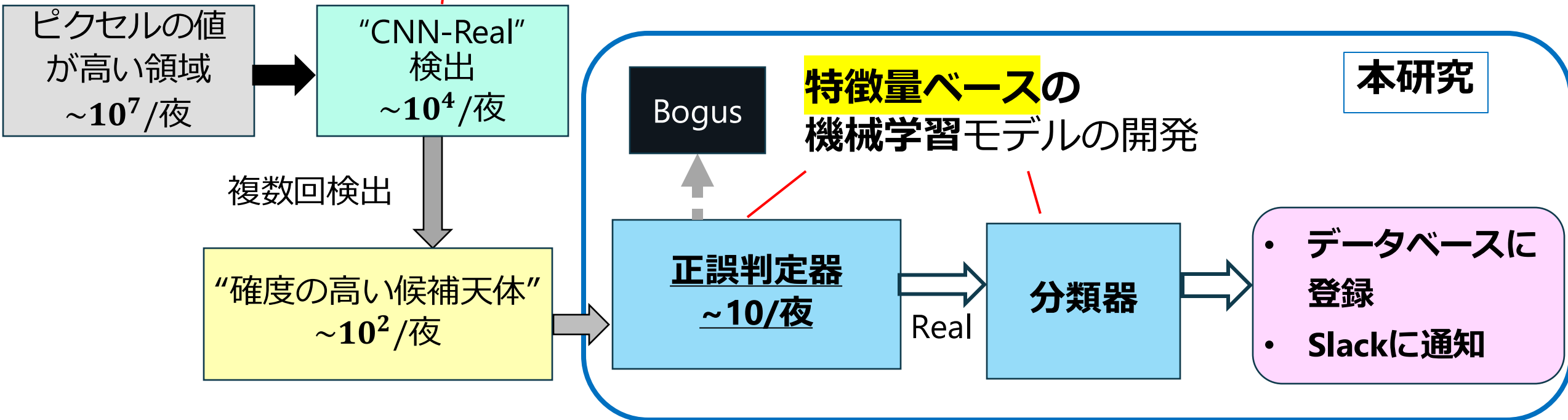
画像ベースの機械学習モデル ([Takahashi et al., 2022](#))



Introduction: 本研究の目的

- 特徴量ベースの機械学習モデルの開発(正誤判定器 & 分類器)
- 突発現象のアラートシステムの開発

画像ベースの機械学習モデル ([Takahashi et al., 2022](#))



目次

1. イントロダクション

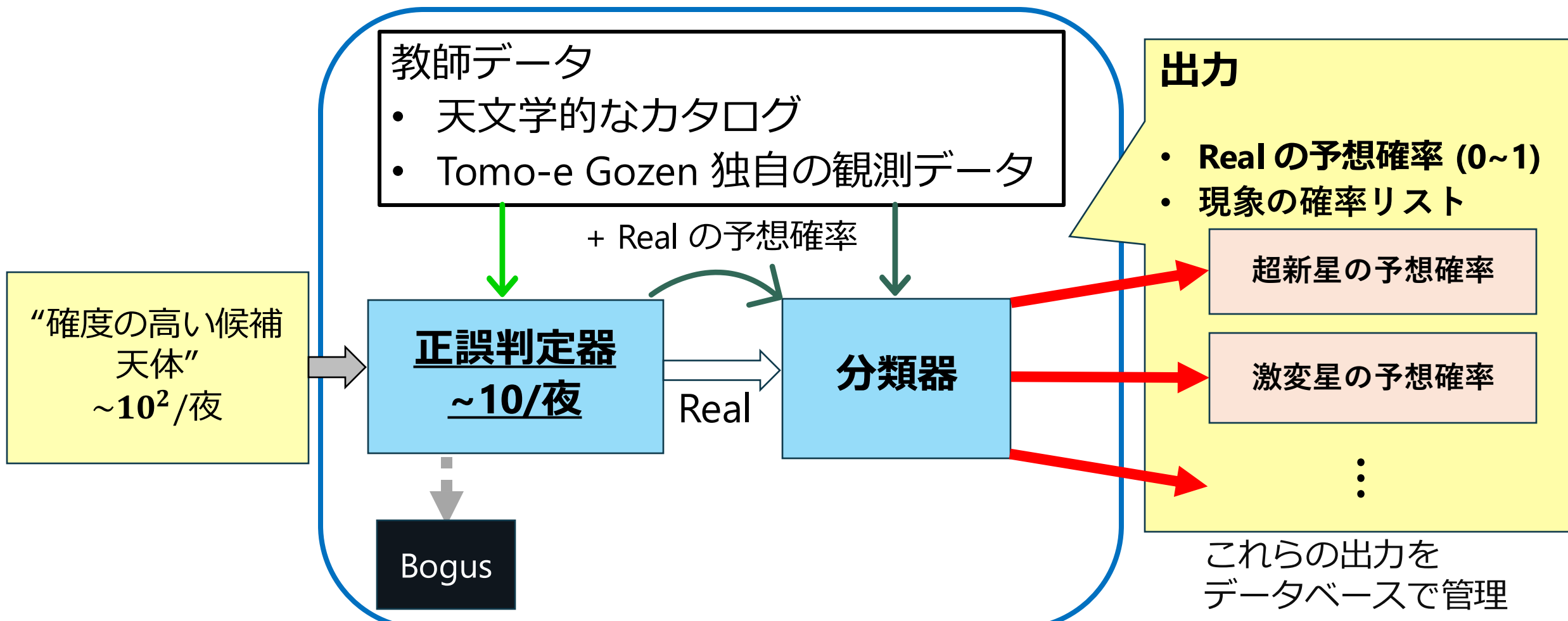
2. 機械学習モデルの開発（5月に実装した最新版モデルについて）

3. 機械学習モデルの導入および現状

4. まとめ

機械学習(ML)モデルの開発

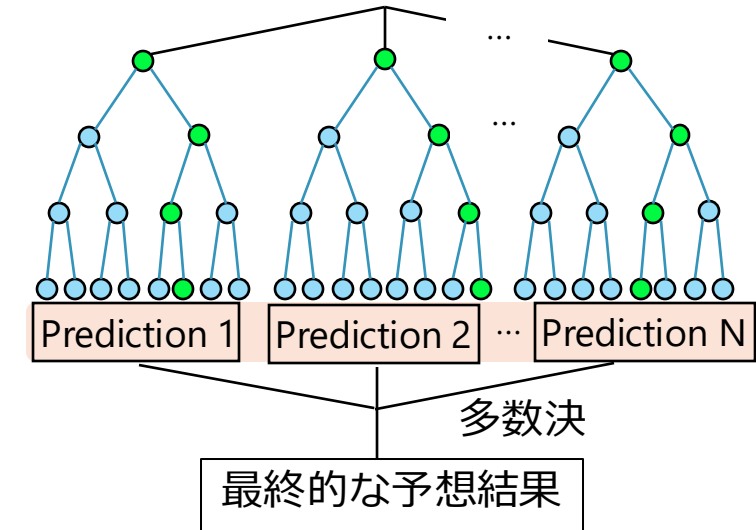
- Tomo-e Gozen パイプラインの**CNNは天文学的な情報を使っていない**.
- ランダムフォレスト(RF) アルゴリズムを採用し, 2つのモデルを開発.



機械学習(ML)モデルの開発

なぜ ランダムフォレスト(RF) アルゴリズム?

- ・ 特徴量ベース, モデルの作成・更新が簡単
- ・ 適切な特徴量を選ぶことで, 高精度かつ解釈しやすいモデルを比較的簡単に作ることができる.



正誤判定器のおおよその目標とする水準 :

$TPR \geq 0.8$ and $FPR \leq 0.05$.

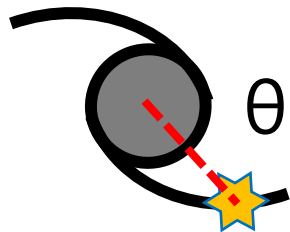
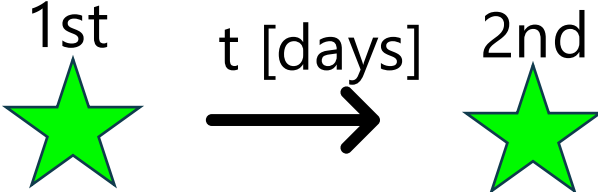
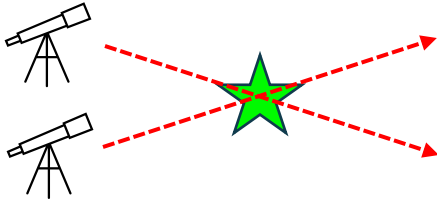
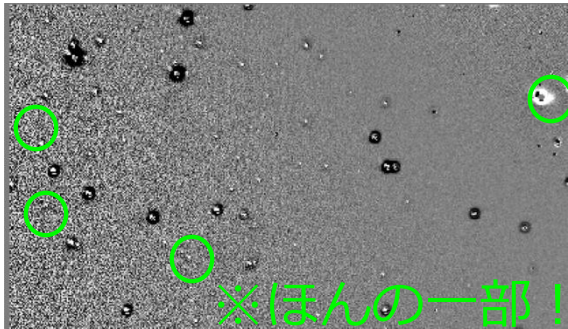
(本物を正しく本物
と予測する確率)

(偽物を間違って本物
と予測する確率)

1日100個の“確度の高い候補天体”のうち
10個が本物だとすると, 1日 **8 件の正しい
アラートと4.5件の誤報** に相当する.

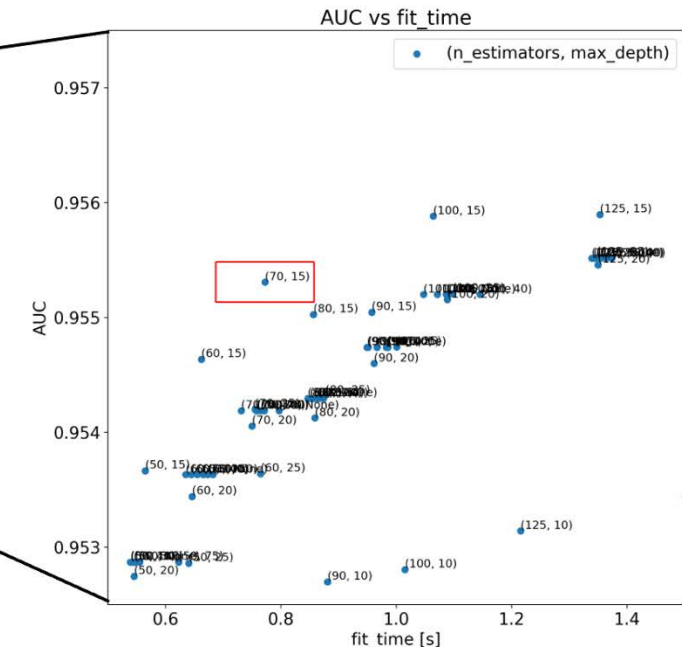
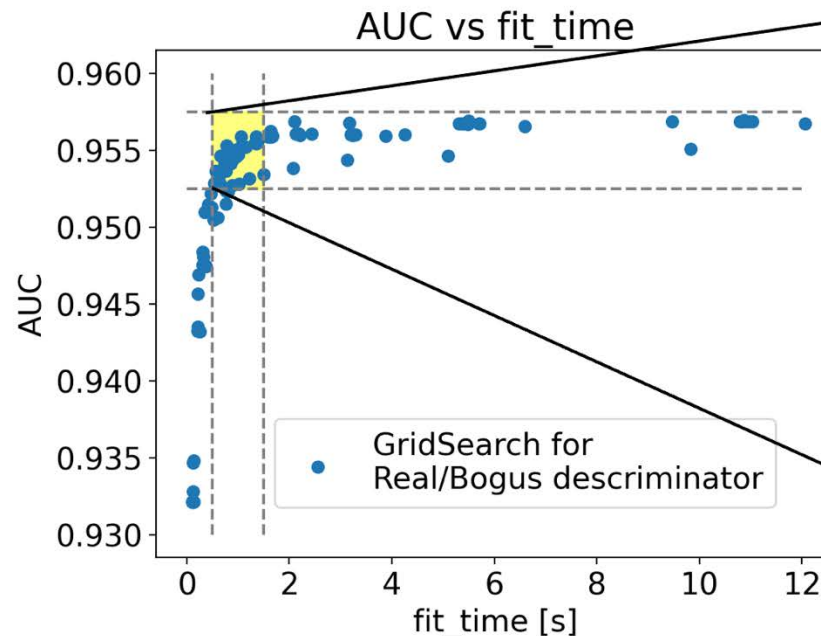
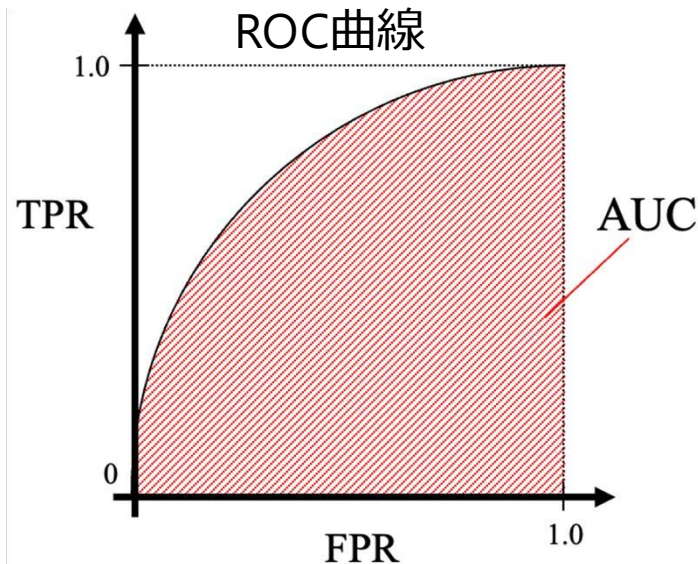
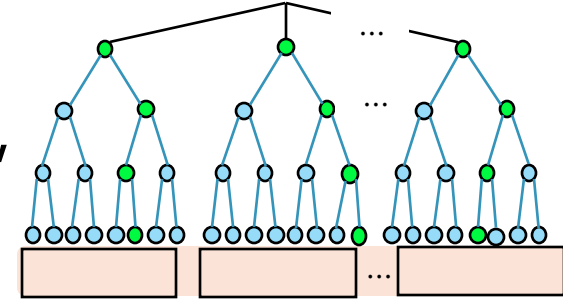
Confusion matrix		予想	
		Negative	Positive
実際	Negative	TN (True Negative)	FP (False Positive)
	Positive	FN (False Negative)	TP (True Positive)

MLモデルの開発：特徴量の選択

	天文学的なカタログ	Tomo-e Gozenの観測データ
特徴量の例①	見かけ上最も近い銀河までの角距離 (GLADE+銀河カタログ)	Tomo-e Gozenでの1回目の検出から2 回目の検出までの時間間隔
ねらい	銀河系外の現象かどうかを判定	突発的な現象かどうかを判定
図		
特徴量の例②	見かけ上最も近い天体の年周視差 (Gaiaカタログ)	差分画像ごとの検出数
ねらい	銀河系内の星に付随した現象か判定	差分失敗による誤検出かどうかの判定
図		

MLモデルの開発：ハイパーパラメータの決定

- **“木の本数”**: 大きいほど精度が高くなるが, 計算時間が大幅に増える.
 - **“木の深さ”**: ある程度までは大きいほど精度が上がるが, 大きすぎると教師データに過剰適合する.
- 短い計算時間と高いAUCスコアを両立させる.

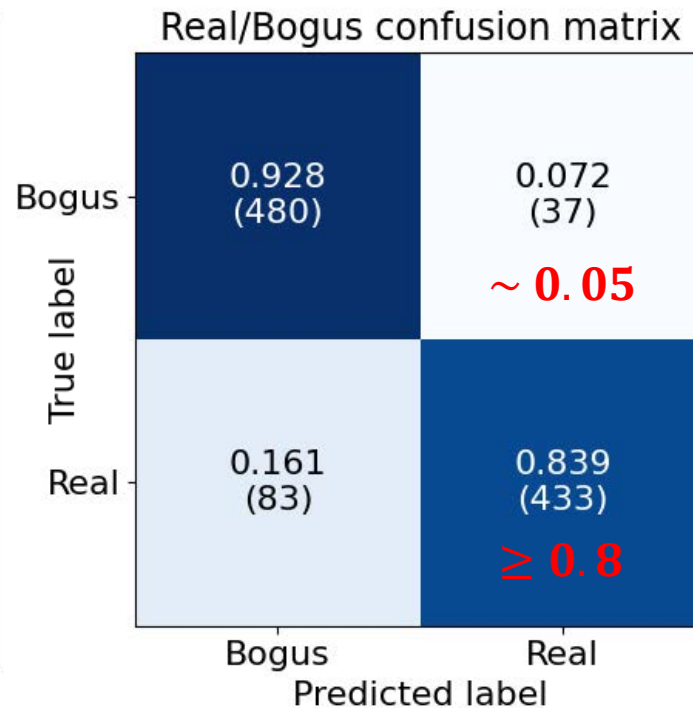
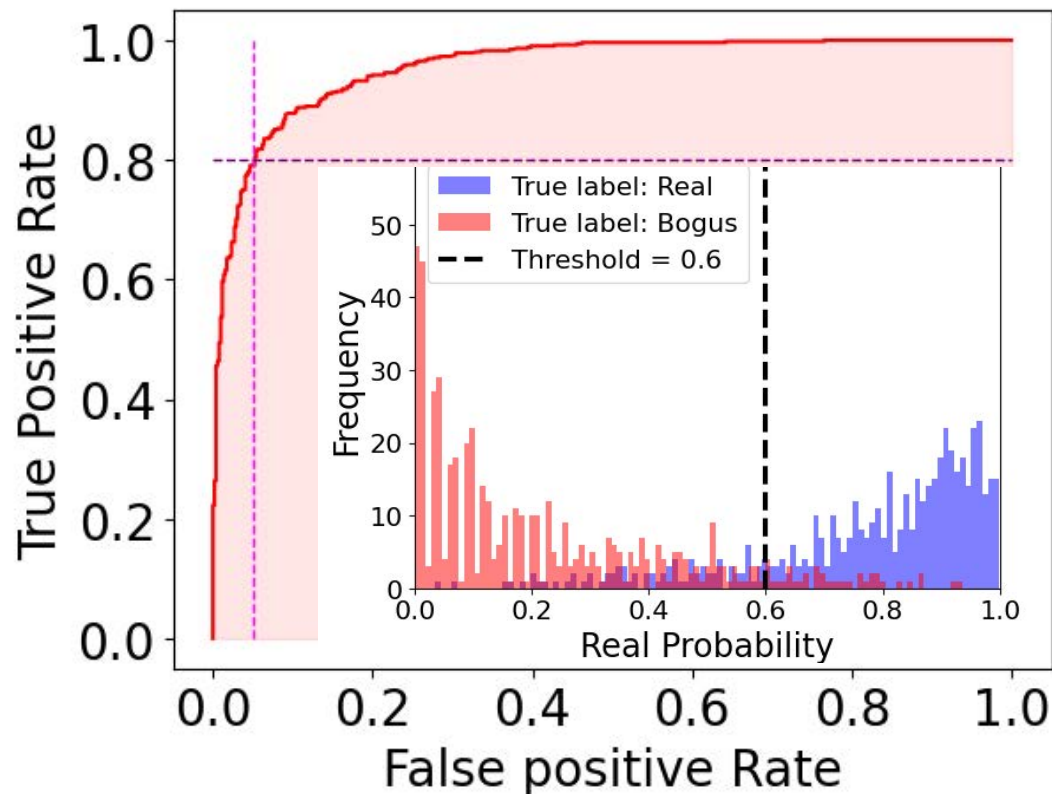


正誤判定器の結果

正誤判定器はテストデータセットに対し、
 $TPR \geq 0.8$ & $FPR \leq 0.05$ をほぼ達成。

AUC (Area Under the ROC Curve) = 0.957

閾値は Real Prob ≥ 0.6 を“Real” と判定。

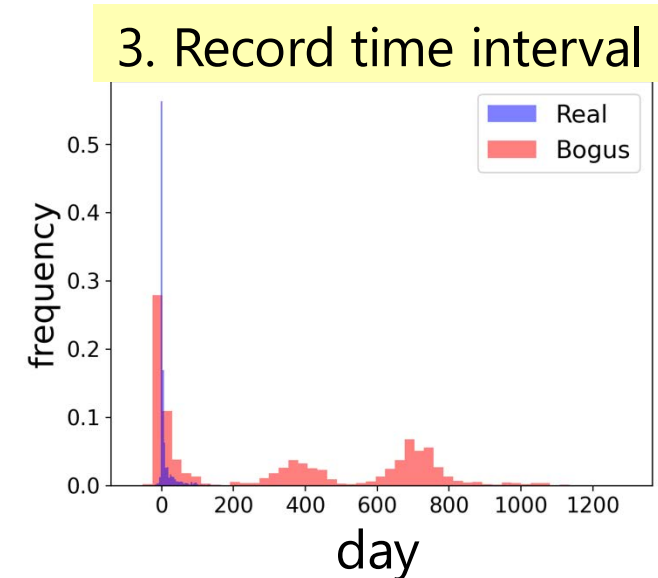
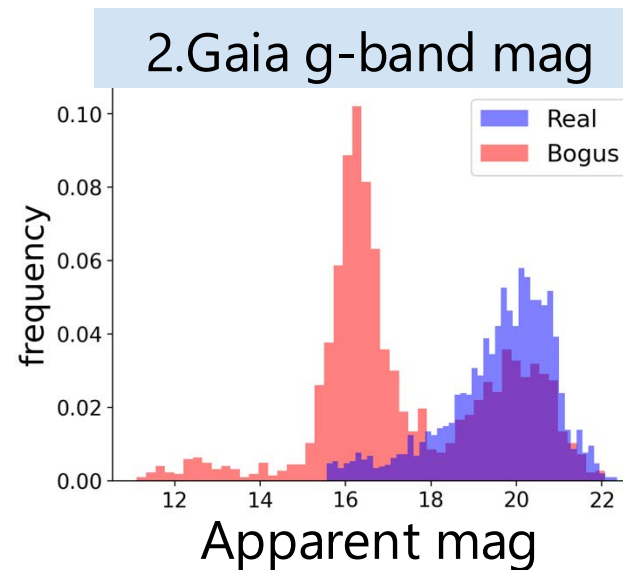
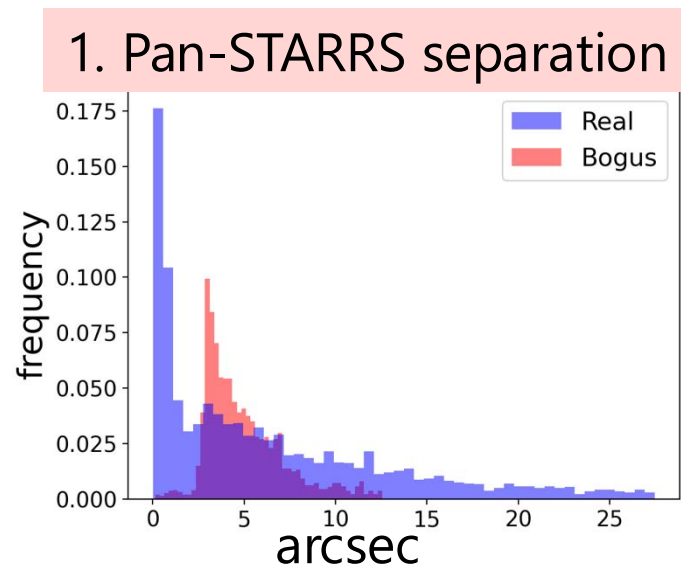


	特徴量名	重要度
1	CNN Real Probability	0.0919
2	Pan-STARRS separation	0.0691
3	Gaia g mag	0.0445
4	Gaia separation	0.0442
5	Time interval between two records	0.0441
6	PS1 r mag	0.0310
7	N(CNN-Real)_1	0.0301
8	N(stack)_2	0.0290
9	Gaia rp mag	0.0258
10	N(CNN-Real)_2	0.0250

正誤判定器の結果を受けての議論

重要度の大きい特徴量について, その傾向は3つに分類される.

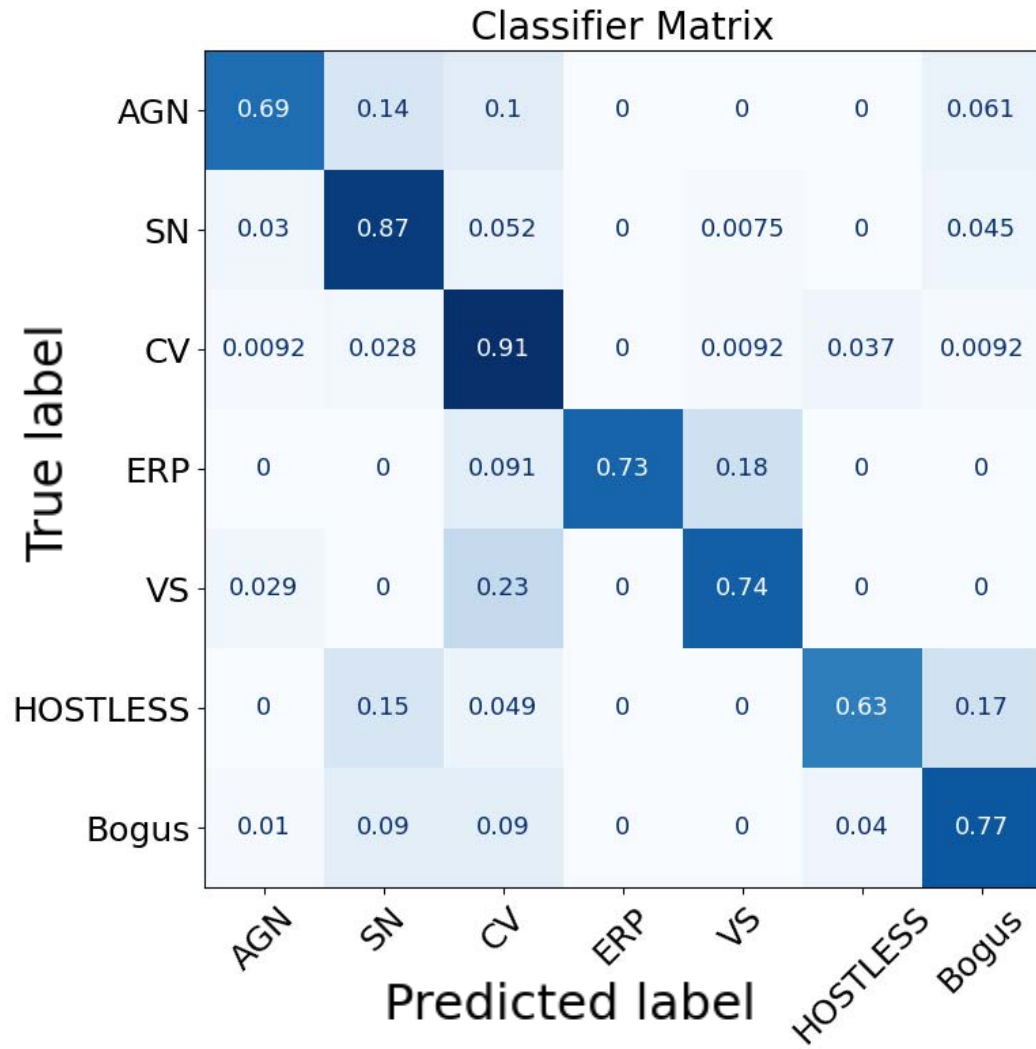
1. 真の検出は **Pan-STARRS/Gaia 天体の近くに位置している**.
2. 誤検出は比較的**明るい天体の残差**である.
3. **Tomo-e Gozenの観測に基づいた特徴量**は高い重要度を示した.



分類器の結果

出力される確率リストの分類は

[AGN, SN, CV, Eruptive Star, long-term Variable Star, Hostless object, Bogus]



	特徴量	重要度
1	RF Real Probability	0.0805
2	GLADE+ separation	0.0480
3	Gaia separation	0.0434
4	Pan-STARRS separation	0.0370
5	GLADE separation	0.0351
6	Time interval between two records	0.0341
7	N(stack)_2	0.0332
8	N(stack)_ 1	0.0306
9	Galactic longitude	0.0269
10	Galactic latitude	0.0259

分類器の結果を受けての議論

重要度の大きい特徴量について, その傾向はここでは2つに分類される.

1. **カタログにある天体との角距離** (特に, **GLADE+ 銀河カタログ**) が非常に重要度が大きくなっている.
 - 銀河系内外の分類, 対応天体があるかどうかの分類
2. **Tomo-e Gozen の観測に基づいた特徴量**は高い重要度を示した.
 - RF Real Probability (1位) が CNN Real Probability (13位) に取って代わった.
 - N_{stack} も高い重要度を示している. 見立て通り, 銀河系内の現象と銀河系外の現象を分類するのに効果的であった.

*ERP, VS, HOSTLESS は 他のクラスよりもサンプル数が小さいことに留意.

目次

1. イントロダクション

2. 機械学習モデルの開発

3. 機械学習モデルの導入および現状

4. まとめ

Tomo-e Gozen 突発現象アラートシステムの実装・追観測

2024年11月末の実装以来, 突発現象アラートシステムにより突発現象候補の独自発見や近傍超新星の早期通知に成功している.

Tomo-e Gozen 突発現象アラートの報告例 :

Transient Candidates アプリ 19:17
transientId: 8332310, RealProb: 0.620 , SN-Prob: 0.440
TNS: None, VSX: Matched within 1'

GW-Detail

Tomo-e_transient_server TNS ZTF

**AT 2024aexk として
独自発見, 報告**

Transient Candidates アプリ 19:18
trid_8332310.png ▼



Transient Candidates アプリ 13:33
transientId: 8391561, RealProb: 0.760 , SN-Prob: 0.820
AT 2025qe, VSX: Failed

Detail

Tomo-e_transient_server TNS ZTF

VSX SDSS SIMBAD PS1

**SN 2025qeを独立に
早期検出, 通知**

Transient Candidates アプリ 13:33
trid_8391561.png ▼



東京科学大学MITSuME望遠鏡
と連携, 発見1日後からのgRI
画像を取得.



Tomo-e Gozen 突発現象アラートシステムの実装・追観測

- 2025年5月からは新モデルを導入.
 - 望遠鏡の揺れや全天サーベイ以外の観測のため運用を止めているが, 過去のテストデータで動作は確認済み.
- webページに高スコア天体を掲載 (PWが分かればwgetで取得可).

通知時刻	等級	RA	Dec	ID	Real確率	各種分類確率	外部カタログとの マッチング結果	追観測flag											
recorded_time	mag	ra	dec	transientid	real_prob	prob_sn	prob_agn	prob_cv	prob_erp	prob_vs	prob_mp	prob_bogus	VSXlmin	TNS3min	TNSdiscovery_UT	obsflag			
2025-01-19 13:33:43.55		18.901163280765047		139.6175115	73.7625354	8391561	0.76	0.82	0.0	0.04	0.0	0.0	0.04	0.1	False	True	2025-01-18 06:17:58	1	
2025-01-19 15:33:30.28	nan	132.1208712		32.3029475	8391912	0.6	0.36	0.3	0.04	0.0	0.0	0.0	0.3	False	False	None	0		
2025-01-19 16:34:03.44	22.5	136.6886354		71.7463344	8392028	0.677715053763441	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.48	False	False	None	0	
2025-01-19 17:03:34.97	19.590762639778305	109.056907		60.012682	8392069	0.88	0.24	0.04	0.2	0.0	0.0	0.0	0.04	0.48	False	True	2025-01-11 05:49:33	0	
2025-01-19 17:04:13.95	20.626809657779667	133.0126699		29.7219778	8392071	0.659679254378917	0.28	0.1	0.04	0.0	0.0	0.0	0.02	0.56	False	False	None	0	
2025-01-19 18:03:23.04	22.5	106.6698544		37.0114011	8392204	0.819047619047619	0.060307692307692305	0.02	0.28	0.0	0.04	0.28	0.3196923076923077	False	False	None	0		
2025-01-19 18:33:33.68	18.775904392930684	129.0936683		42.0256334	8392296	0.9798367346938776	0.28	0.0	0.06	0.0	0.0	0.0	0.32	0.34	False	True	2025-01-06 10:40:57	0	
2025-01-19 18:34:12.73	21.667159093200457	130.5249754		41.9839934	8392309	0.6962061560486756	0.3	0.0	0.04	0.0	0.0	0.0	0.3	0.36	False	False	None	0	
2025-01-19 23:31:33.50	17.6164803522667	136.1601526		18.466771	8394127	0.9597999999999999	0.52	0.12	0.02	0.0	0.02	0.0	0.02	0.0	0.32	False	True	2025-01-18 04:07:36	0

- MITSuME明野(科学大・高橋さん), Smart-Kanata(広島大・植村さん)にご協力いただき, 上記ページをそれぞれの参照先に追加.

➤OISTER所属望遠鏡をはじめとした観測ネットワークへの提供を目指す

まとめ

- Tomo-e Gozenプロジェクトの突発現象探査は広範囲を観測しているが、検出される候補のほとんどは誤検出である.
- 本研究では、**天文学的なカタログ**と**Tomo-e Gozenの観測データ**を用いながら、2つの**特徴量ベースの機械学習モデル**を作成した.
 - **正誤判定器**は $TPR \geq 0.8$ & $FPR \leq 0.05$ の水準をほぼ達成.
 - **分類器**は 超新星と激変星を高い(> 80%) TPRで予測できている.
- 突発現象の迅速な連携追観測に向け、**ネットワークを拡大中!**