

# 広視野・高速撮像装置 Tomo-e Gozen が 発見するトランジェントと 中小口径望遠鏡による追観測

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

2025年10月21日 第16回光・赤外線天文学大学間連携ワークショップ

# 目次

---

## 1. イントロダクション

- Tomo-e Gozen 突発天体サーベイ
- 発見報告・事例研究

## 2. Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発

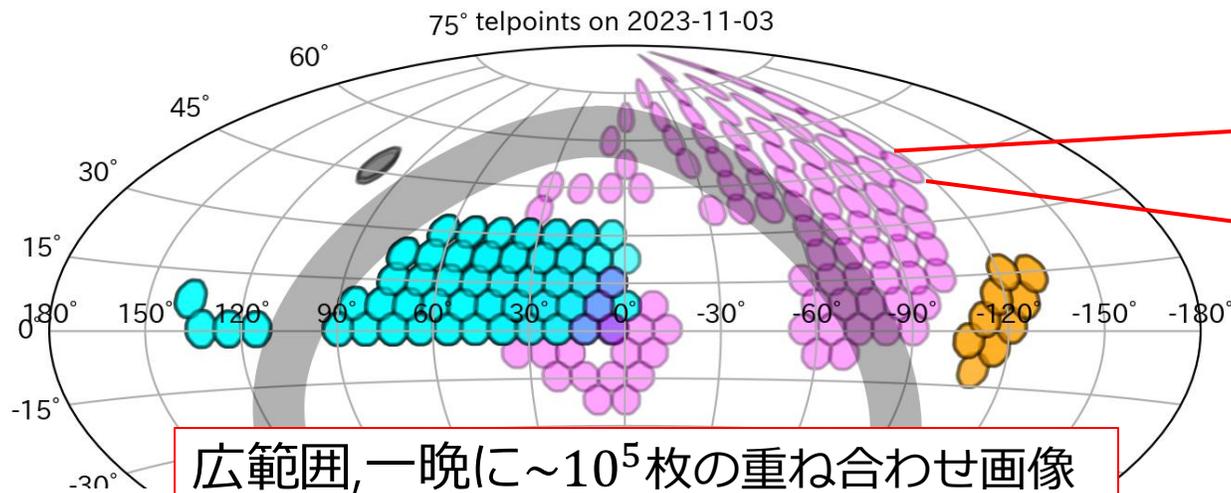
## 3. OISTERにおける連携観測と今後の展望

## 4. 全体のまとめ

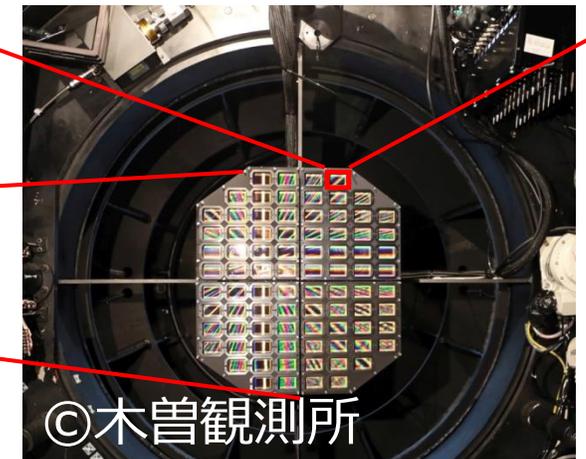
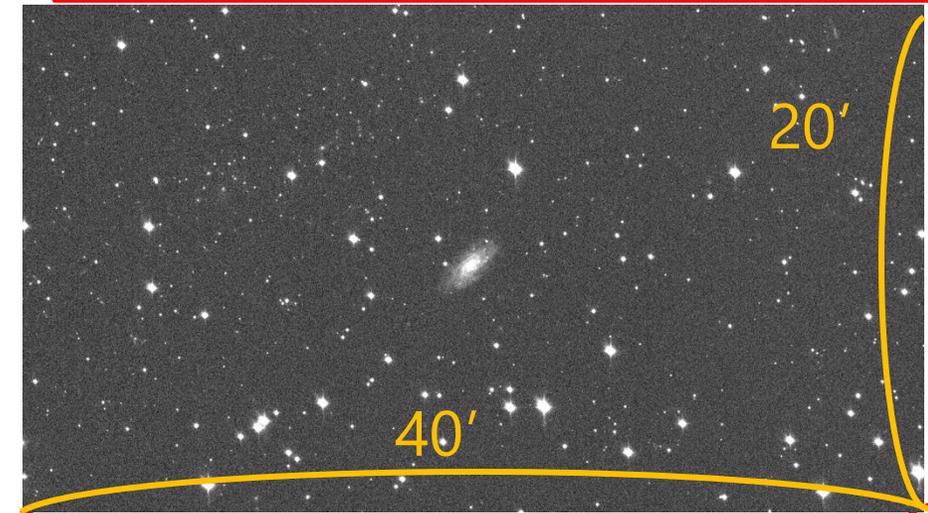
# Tomo-e Gozen 突発天体サーベイ①

## Tomo-e Gozen 突発天体サーベイ

- **All-Sky Survey:**  $\sim 5000 \text{ deg}^2/\text{夜}$   $\sim 2 \text{ visit}/\text{夜}$
- **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 秒)
  - 限界等級  $\lesssim 19 \text{ mag}$



Tomo-e Gozenのセンサ1枚分の画像



84枚のCMOSセンサからなる  
Tomo-e Gozenカメラ

# Tomo-e Gozen 突発天体サーベイ②

日々の変動を観測する上で、

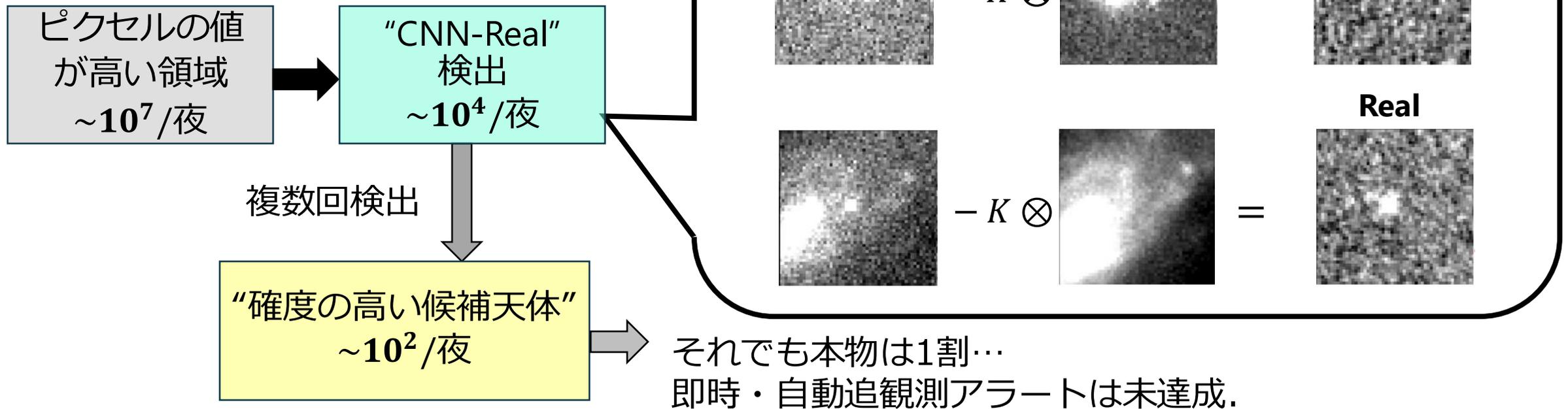
- 観測についての要求: 広範囲・高頻度
- 処理についての要求: **迅速**かつ結果に**アクセスしやすい**
- 手法: 平常時との**差分**を検出する



# Tomo-e Gozen 突発天体サーベイ③

- 大量のデータを扱うためにCNN機械学習モデルを採用.
- 突発天体アラートの実現に向けた候補天体の絞り込み.

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



# これまでの成果例①

- 2023年末までの Transient Name Server への発見報告: 1件 (SN 2019cxx)

**SN 2019cxx**

RA/DEC (2000) 11:17:48.187 +13:43:41.55 Type SN Ia Redshift 169.450779522 +13.7282095222

[Discovery Report](#) [Classification Report](#)

Reporting Group	Discovering Data Source	Discovery Date	TNS AT	Public
None	None	2019-04-05 12:08:47.000	Y	Y

Host Name	Host Redshift	Discovery Mag	Filter
SDSS J111748.57+134339.5	0.025	18.69	Clear-

Reporter/s  
Masaomi Tanaka (Tohoku U.), Nozomu Tominaga (Konan U.), Tomoki Morokuma (U. Tokyo), and Tomo-e Gozen collaboration



32187	2019-04-09 02:51:56	Masaomi Tanaka	Masaomi Tanaka (Tohoku U.), Nozomu Tominaga (Konan U.), Tomoki Morokuma (U. Tokyo) et al.	11:17:48.220	+13:43:42.00	2019-04-05 12:08:47.000	18.69	Clear-	PSN	SDSS J111748.57+134339.5	Tomo-e 201904aaski
-------	---------------------	----------------	---	--------------	--------------	-------------------------	-------	--------	-----	-----------------------------	-----------------------

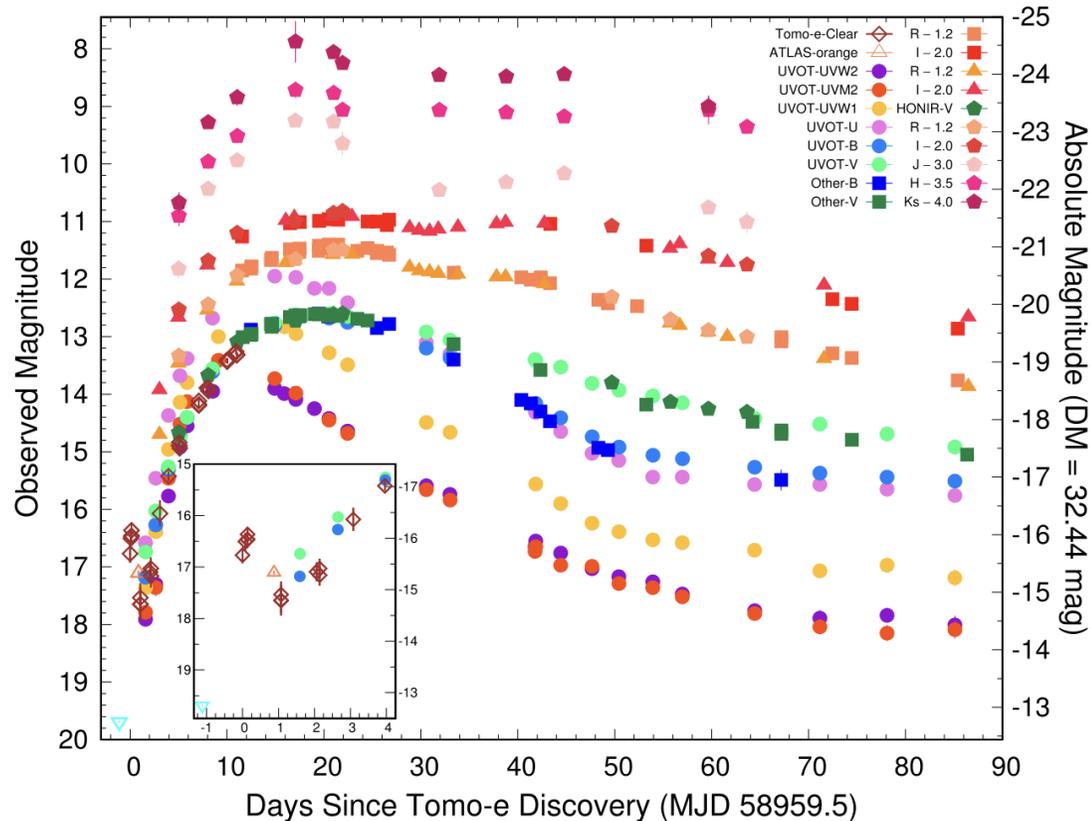
cf. 北天のサーベイプロジェクト

Tomo-e Gozen (2019-)

- ATLAS (米, 2015-)
- ZTF (米, 2017-)
- WFST (中, 2023-)

# これまでの成果例②

- SN 2020hvf ([Jiang+21](#))
  - Tomo-e Gozen の高頻度観測によって検出できていた例.
  - 特徴的な急峻な初期増光は, **Clear-filterでのみ観測**.



UT Date	Phase <sup>a</sup>	Tel <sup>b</sup>
Apr 20.5019	-19.1913	1
Apr 20.5830	-19.1107	1
Apr 20.6426	-19.0514	1
Apr 20.6439	-19.0501	1
Apr 20.6441	-19.0499	1
Apr 21.5771	-18.1223	1
Apr 21.5773	-18.1221	1
UVOT ● Apr 21.5809	-18.1185	1
Apr 22.5735	-17.1317	1
Apr 22.6559	-17.0497	1
● Apr 22.6561	-17.0495	1
Apr 23.55	-16.16	2
Apr 23.5969	-16.1142	1
● Apr 24.4829	-15.2333	1
Apr 25.51	-14.21	2
Apr 25.55	-14.17	3

Kanata/HOWPol

Kanata/HONIR

# 目次

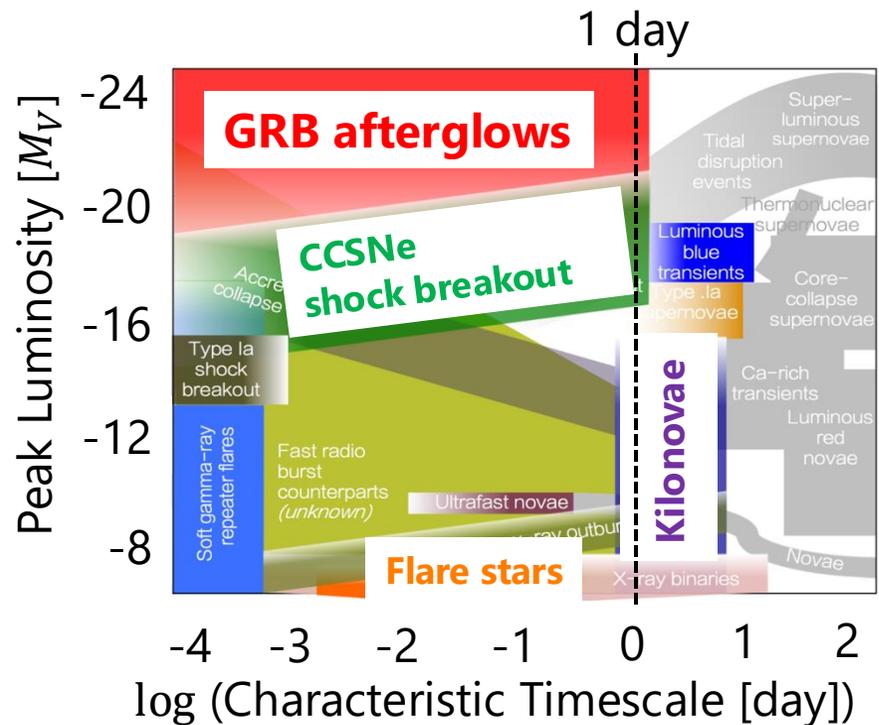
---

1. イントロダクション
- 2. Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発**
  - 目的
  - 機械学習モデルの開発・評価
  - アラートシステムの導入
3. OISTERにおける連携観測と今後の展望
4. 全体のまとめ

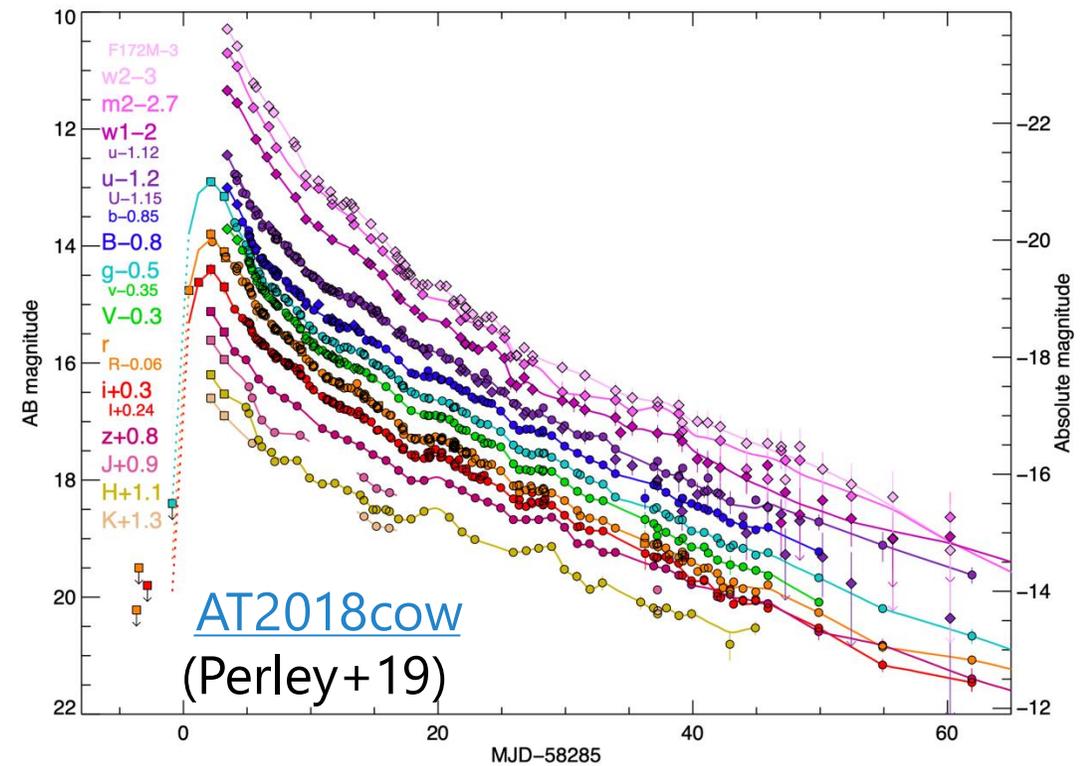
# Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発①

9/27

- 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.



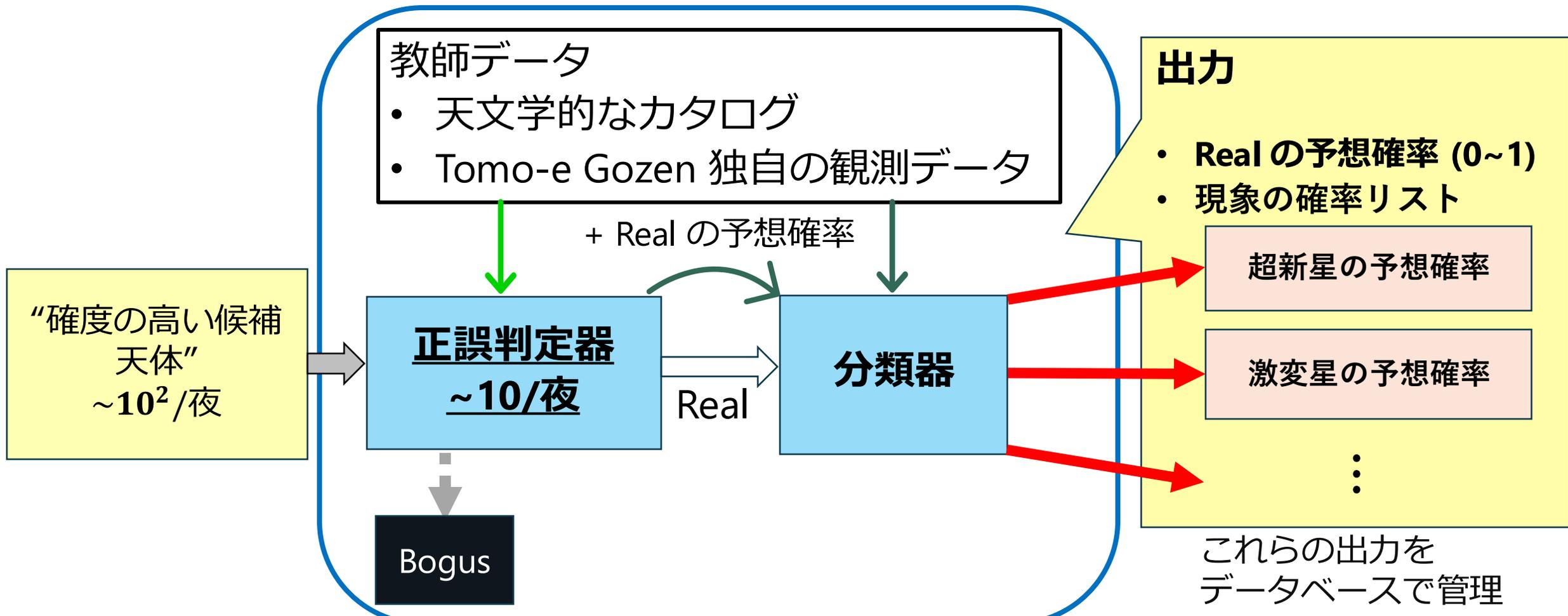
Based on [Buckley et al., 2020](#), Fig. 1.



AT2018cow  
(Perley+19)

# Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発② <sup>10/27</sup>

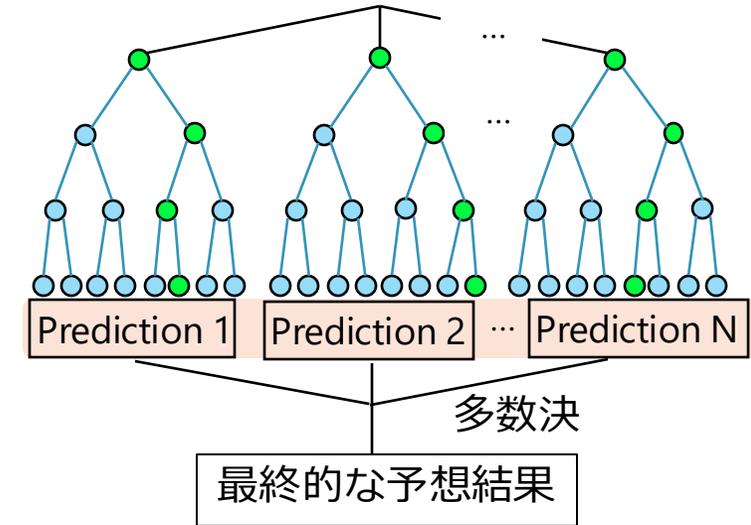
- Tomo-e Gozen パイプラインのCNNは天文学的な情報を使っていない。
- ランダムフォレスト(RF) アルゴリズムを採用し, 2つのモデルを開発。



# Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発③ 11/27

## 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  $FPR \leq 0.05$ .**

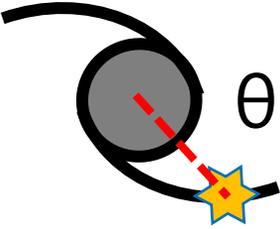
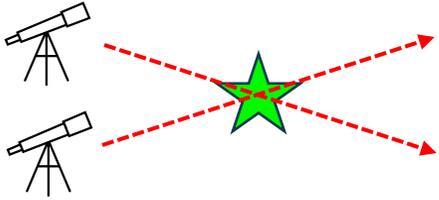
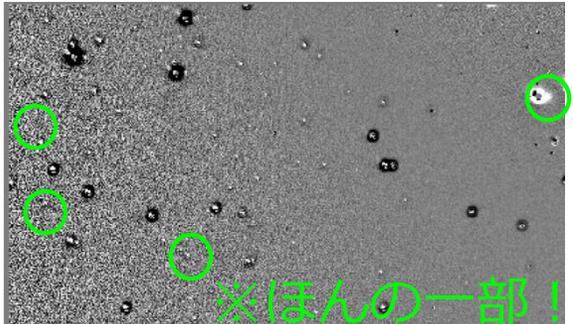
(本物を正しく本物  
と予測する確率)

(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)

# Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発④ <sup>12/27</sup>

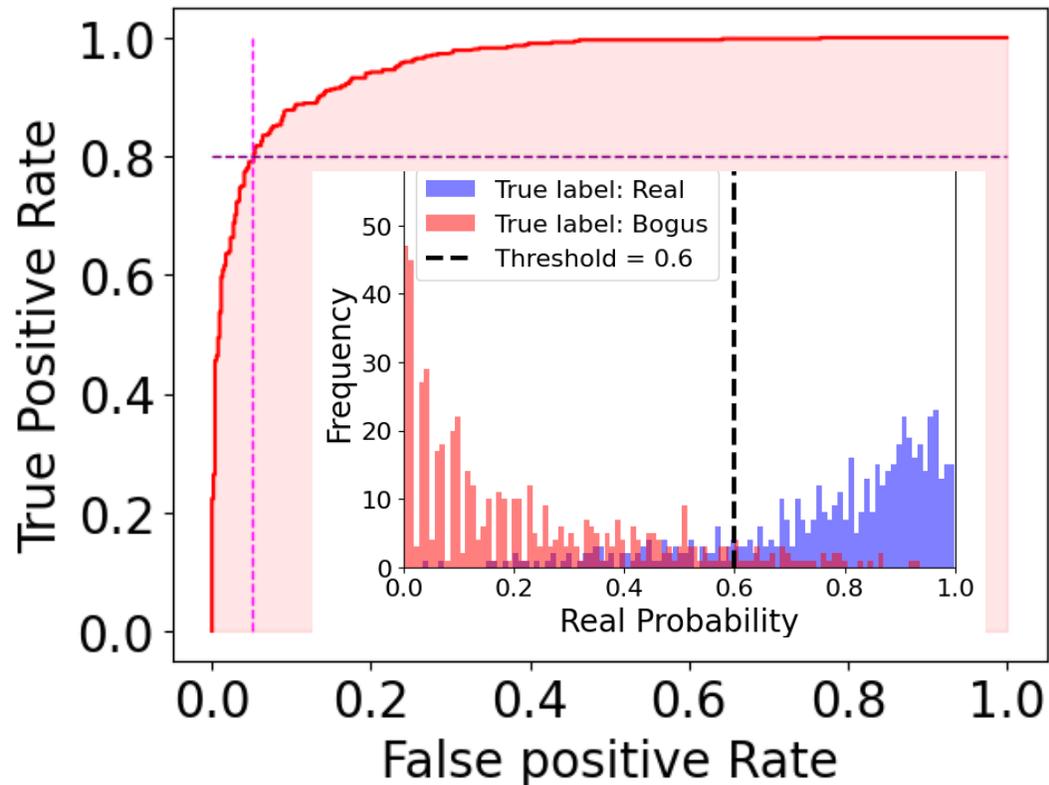
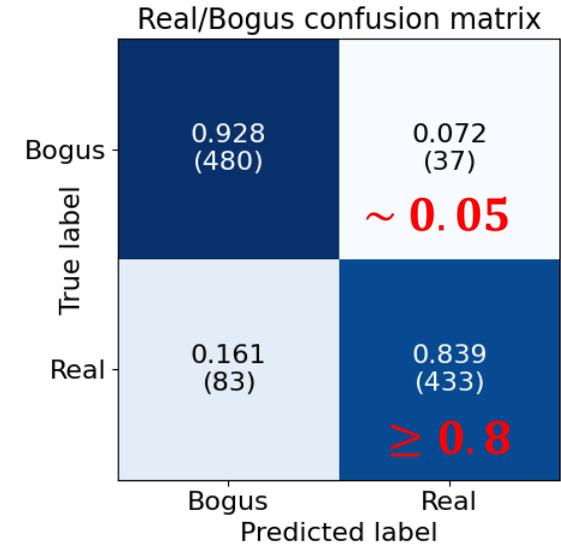
	天文学的なカタログ	Tomo-e Gozenの観測データ
特徴量の例①	見かけ上最も近い銀河までの角距離 (GLADE+銀河カタログ)	Tomo-e Gozenでの1回目の検出から2 回目の検出までの時間間隔
ねらい	銀河系外の現象かどうかを判定	突発的な現象かどうかを判定
図		1st  t [days]  2nd 
特徴量の例②	見かけ上最も近い天体の年周視差 (Gaiaカタログ)	差分画像ごとの検出数
ねらい	銀河系内の星に付随した現象か判定	差分失敗による誤検出かどうかの判定
図		 ※ほんの一部!

# Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発⑤ 13/27

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。

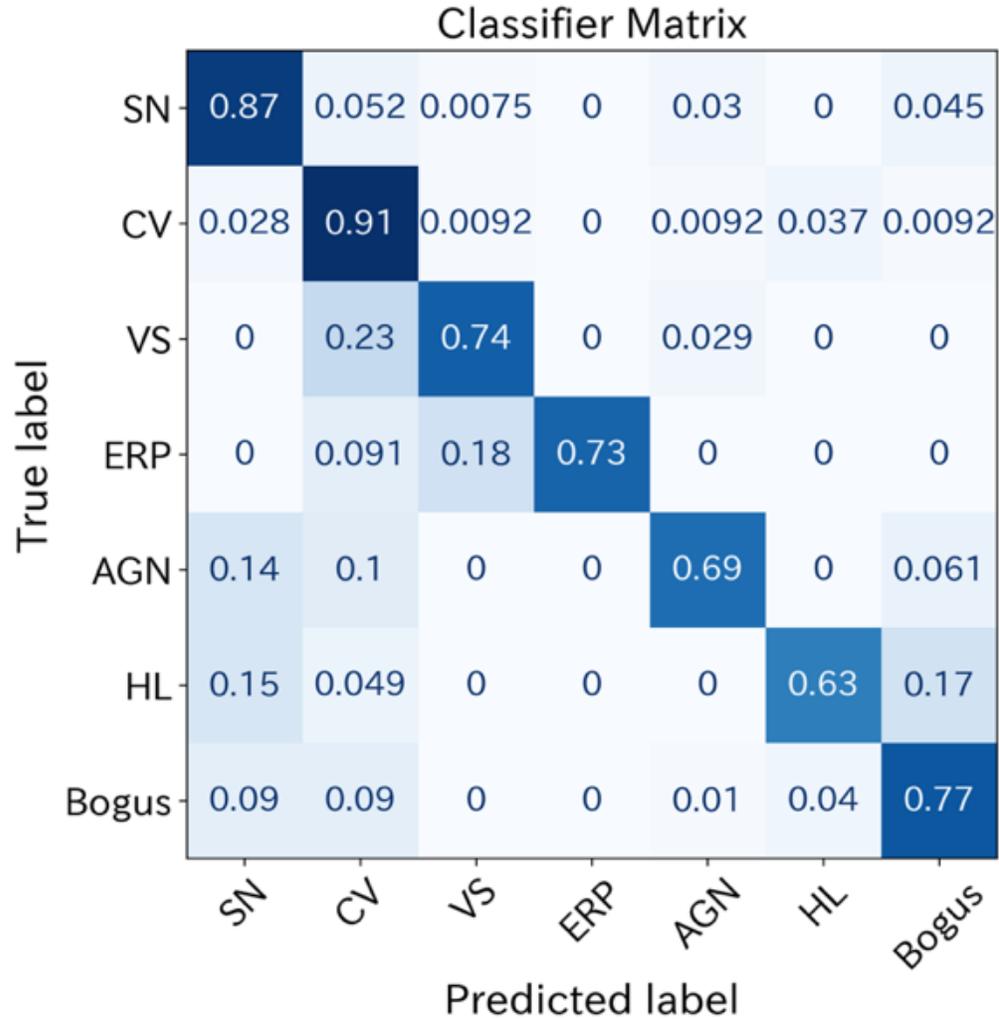
AUC (Area Under the ROC Curve) = 0.957

閾値は Real Prob  $\geq 0.6$  を“Real” と判定。



	特徴量名	重要度
1	CNNモデルで算出されるスコア	0.0919
2	対応するPan-STARRS (PS1) カタログ天体までの角距離	0.0691
3	対応するGaia天体の $G$ バンド 等級の時間平均	0.0445
4	対応するGaia カatalog天体 までの角距離	0.0442
5	二度目の検出時刻 - 一度目の検出時刻	0.0441

# Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発⑥ <sup>14/27</sup>



分類器モデルにおける、予測ラベルと正解ラベルの対応を7×7の行列で示したもの。各セルには行方向で正規化された割合を示す。

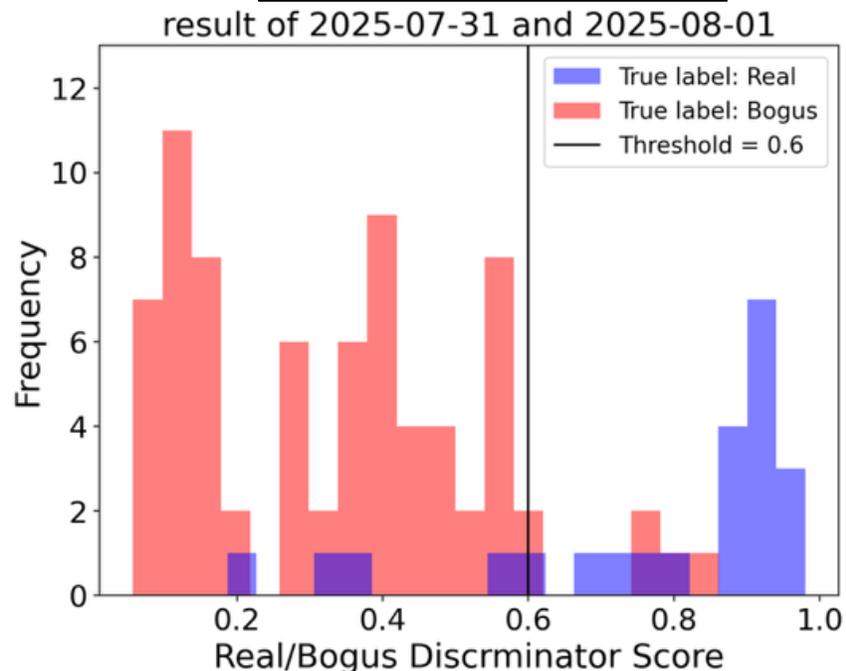
- 分類器によって出力される確率リストの分類は [SN, CV, long-term Variable Star, Eruptive Star, AGN, Hostless object, Bogus]

	特徴量	重要度
1	正誤判定器のスコア	0.0805
2	対応するGLADE+ カタログ銀河までの角距離	0.0480
3	対応するGaia カタログ天体までの角距離	0.0434
4	対応するPS1カタログ天体までの角距離	0.0442
5	対応するGLADE カタログ銀河までの角距離	0.0351

# Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発⑦ <sup>15/27</sup>

- 2025/7/31, 2025/8/1 の観測データによって, 実装後のモデルの評価を行った.
  - ランダムフォレスト機械学習モデルの対象になった検出: 98件
  - 外部カタログとの照合等によってラベル付けを行い, 検証.

正誤判定器モデル



分類器モデル

True label	実際の個数	正答率
AGN	1	0 (0/1)
SN	9	0.89 (8/9)
CV	7	0.71 (5/7)
VS	1	0 (0/1)
Bogus	6	0.83 (5/6)

# Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発⑧ 16/27

- 2024年以降の Transient Name Server への発見報告例: 4件  
(SN 2024acn, SN 2024ahe, SN 2024iez, AT 2024aexk)  
+ 複数の早期検出

Showing results 1 to 4 out of 4

ID	Name	Reps	Class	RA	DEC	Obj. Type	Redshift	Host Name	Host Redshift	Reporting Group/s	Discovery Data Source/s	Classifying Group/s	Disc. Internal Name	Public	Object Spectra	Discovery Mag/Flux	Discovery Filter	Discovery Date (UT)
168967	<a href="#">AT 2024aexk</a>	2		20:47:03.957	+10:20:57.55					Tomo-e Gozen, ZTF	Tomo-e Gozen, ZTF		Tomo-e 202412aaaasgbxl	Y		18.66	Clear-	2024-12-25 09:21:36.000
151055	<a href="#">SN 2024iez</a>	3	1	14:48:19.684	+20:49:43.43	SN Ia	0.075			Tomo-e Gozen, GOTO, Pan-STARRS	Tomo-e Gozen, GOTO, Pan-STARRS	TCD	Tomo-e 202405aaafx	Y	1	19.24	Clear-	2024-05-03 16:22:04.800
144583	<a href="#">SN 2024ahe</a>	5	2	23:02:37.838	+41:13:57.58	SN Ia-91T-like	0.014			Tomo-e Gozen, ATLAS, ZTF, GOTO, Pan-STARRS	Tomo-e Gozen, ATLAS, ZTF, GOTO, Pan-STARRS	None, LIONS		Y	2	18.94	Other-	2024-01-12 09:49:23.000
144460	<a href="#">SN 2024acn</a>	5	2	11:10:40.441	+21:06:26.87	SN II	0.031			Tomo-e Gozen, ATLAS, ZTF, Pan-STARRS, BlackGEM	Tomo-e Gozen, ATLAS, ZTF, Pan-STARRS, BlackGEM	LIONS, None	Tomo-e 202401aaayb	Y	2	17.57	Other-	2024-01-13 19:30:26.000

# Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発⑨ <sup>17/27</sup>

## • 直近の通知例

### M33 の Nova を早期検出！ (9/23)



Transient Candidates アプリ 06:30

transientId: 10555476, RealProb: 0.922, CV-Prob: 0.396  
TNS: None, VSX: None

Detail → AT 2025yhk

Tomo-e\_transient\_server TNS ZTF  
VSX SDSS SIMBAD PS1

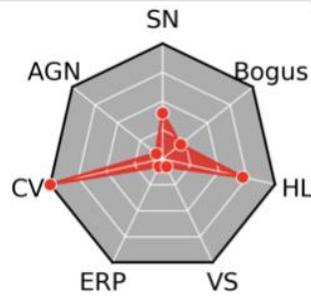
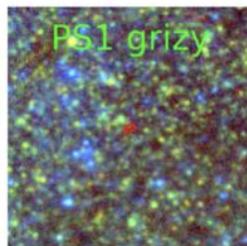
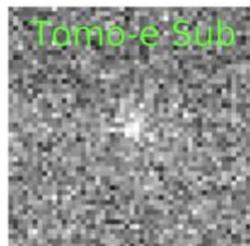


玲央 4 件の返信 最終返信: 21日前



Transient Candidates アプリ 06:30

trid\_10555476.png ▼

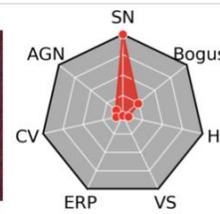


transientId: 10605712, RealProb: 0.915, SN-Prob: 0.667, ReactProb: 0.400  
SN 2025zto, VSX: None

Detail

Tomo-e\_transient\_server TNS ZTF  
VSX SDSS SIMBAD PS1

trid\_10605712.png ▼



## SNの通知例 (10/17)

transientId: 10607608, RealProb: 0.955, SN-Prob: 0.912, ReactProb: 0.300  
SN 2025ytg, VSX: None

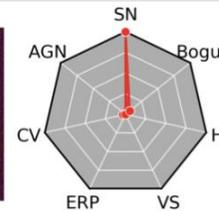
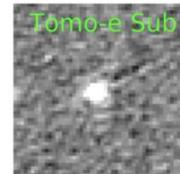
Detail

Tomo-e\_transient\_server TNS ZTF  
VSX SDSS SIMBAD PS1



Transient Candidates アプリ 21:02

trid\_10607608.png ▼



## SNの通知例 (10/17)

- **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 超新星や激変星を高い(> 80%) TPRで予測できている。
- 2024年中に**4つの突発天体の発見報告**を行った。またそれ以降も、  
**早期に検出した突発天体の通知**を実現している。

# 目次

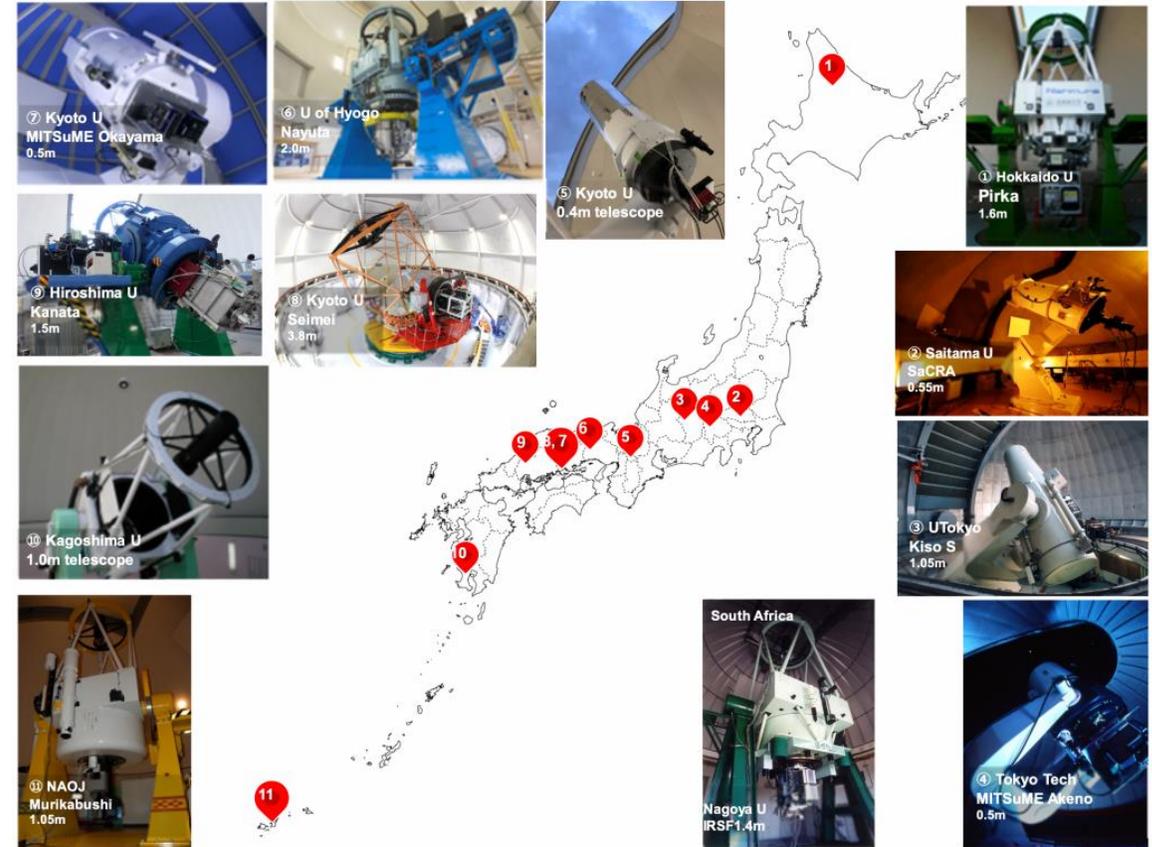
---

1. イントロダクション
2. Tomo-e Gozen 突発天体アラートの開発
- 3. OISTERにおける連携観測と今後の展望**
  - アラートを起点とした追観測の例
  - アラートの出力の共有
  - 今後の展望
4. 全体のまとめ

# 中小口径望遠鏡による追観測

- OISTER: 多機能性を活かした連携観測
  - 多波長撮像観測 (U-Ks)
  - 分光観測 (Opt-NIR)
  - 機動力 etc.
- Tomo-e Gozen がアラートを提供し、(ToO要請だけでなく) **受信者側が選択**して、それぞれの科学目標・装置適性に応じた追観測を行うことが最終目標.

## TELESCOPES OF THE OISTER



[OISTER web page](#)

# アラートを起点とした追観測の例

---

- SN 2024acn (Type IIn)

Koshi et al. (in prep)

- SN 2025qe (Type Iax)

Sasaoka et al. (in prep)

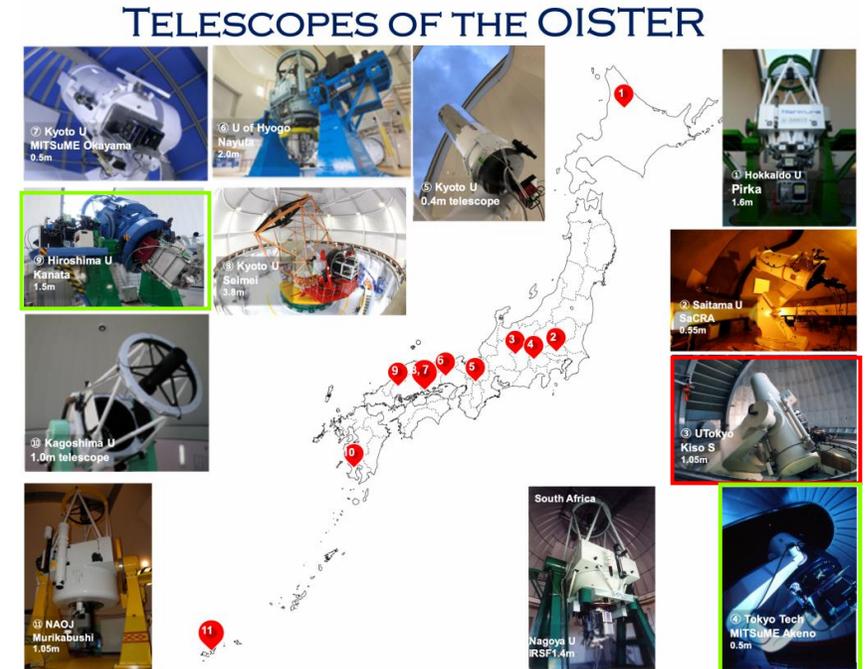
# アラートの出力の共有

- 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	VSX1min, 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, 0.0, 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, 0.3	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, 0.02, 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, 0.04, 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, 0.02, 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, 0.32, 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, 0.3, 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, 0.32	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**



# 自動フォローアップ観測の取り組み

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_agf,	prob_cv,	prob_erp,	prob_vs,	prob_mp,	prob_bogus,	VSX1min,	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,	0.3,	False,	False,	None,	0	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,	0.02,	0.48,	False,	None,	0	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,	0.04,	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,	0.02,	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,	0.32,	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,	0.3,	0.36,	False,	None,	0	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,	0.32,	False,	True,	2025-01-18 04:07:36,	0

- 現状は, 上記の追観測flagを手動で1に変更すると MITSuME 明野が追観測を行う。
- “機械学習とロボット望遠鏡を使用した自律観測システムによる特異な突発天体の研究” (科学大・高橋さん)の一環として, **自動追観測の対象となりそうなアラートの抽出**(電通大・和泉さん)に取り組んでおり, 段階的に実装中。

# 今後の展望

- 自動追観測を実現する上で、「既知の突発天体か否か」や「発見直後か」など、どのようなものが追観測に値するかの検討を行う。
- 本講演では超新星にのみ言及したが、NovaやQSOなども通知されている。このような様々な天体についても追観測ネットワークを充実させていきたい。

**Transient Candidates** アプリ 06:30  
transientId: 10555476, RealProb: 0.922 , CV-Prob: 0.396  
TNS: None, VSX: None

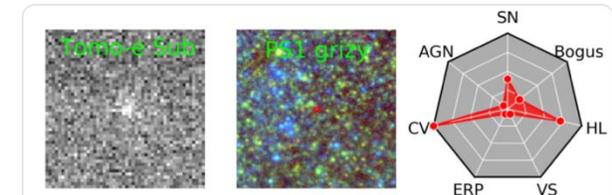
Detail

[Tomo-e\\_transient\\_server](#) [TNS](#) [ZTF](#)  
[VSX](#) [SDSS](#) [SIMBAD](#) [PS1](#)

2

4件の返信 最終返信: 21日前

**Transient Candidates** アプリ 06:30  
trid\_10555476.png ▼



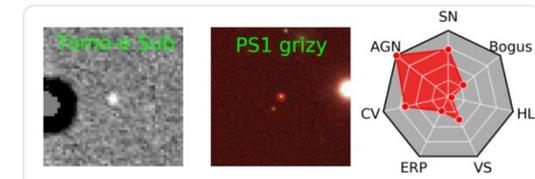
**Transient Candidates** アプリ 18:30  
transientId: 10605897, RealProb: 0.812 , AGN-Prob: 0.300 , ReactProb: 0.171  
TNS: None, VSX: None

Detail

[Tomo-e\\_transient\\_server](#) [TNS](#) [ZTF](#)  
[VSX](#) [SDSS](#) [SIMBAD](#) [PS1](#)

1件の返信 2日前

**Transient Candidates** アプリ 18:30  
trid\_10605897.png ▼



# OISTERにおける連携観測と今後の展望のまとめ<sup>25/27</sup>

---

- **Tomoe- Gozen 突発天体アラート**を起点とし, 複数の超新星について**OISTER**を活用した**追観測**を行っている.
- アラートの出力はwebページに掲載されており(要パスワード), MITSuME望遠鏡, Smart-Kanata の巡回先となっている.
- **自動追観測**の実現を目標とし, MITSuME望遠鏡と共同で追観測候補の抽出に取り組んでいる.

# 全体のまとめ

---

1. Tomo-e Gozenは広視野・高速可視撮像装置であり, 突発天体サーベイを毎晩行っている.
2. ランダムフォレスト機械学習を用いた正誤判定器・分類器の開発により, **確度の高い突発天体アラートを出すことが可能**になった.
3. **アラートを起点としたOISTERでの追観測**を複数回行った.
4. 今後は観測ネットワークと対象とするサイエンス, 双方の拡大に向けて, 処理速度の向上やモデルの精度向上, 自動追観測システムの構築に向けて取り組んでいきたい.

# おわりに

---

本講演で話したように, Tomo-e Gozen から突発天体アラートが出せるようになってきました.

こうしたアラートをOISTERに広く利用していただけるには, 今後, どのように整備を進めていけば良いか議論させていただけると幸いです.