

広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen のための短時間の突発天体検出パイプライン の開発

有馬 宣明 (東京大学)

共同研究者

笹岡大雅, 土居守, 酒向重行, 新納悠 (東京大学), 富永望, 大澤亮 (国立天文台),
田中雅臣 (東北大学), Michael Richmond (Rochester Institute of Technology),
and Tomo-e Gozen collaboration

発表内容

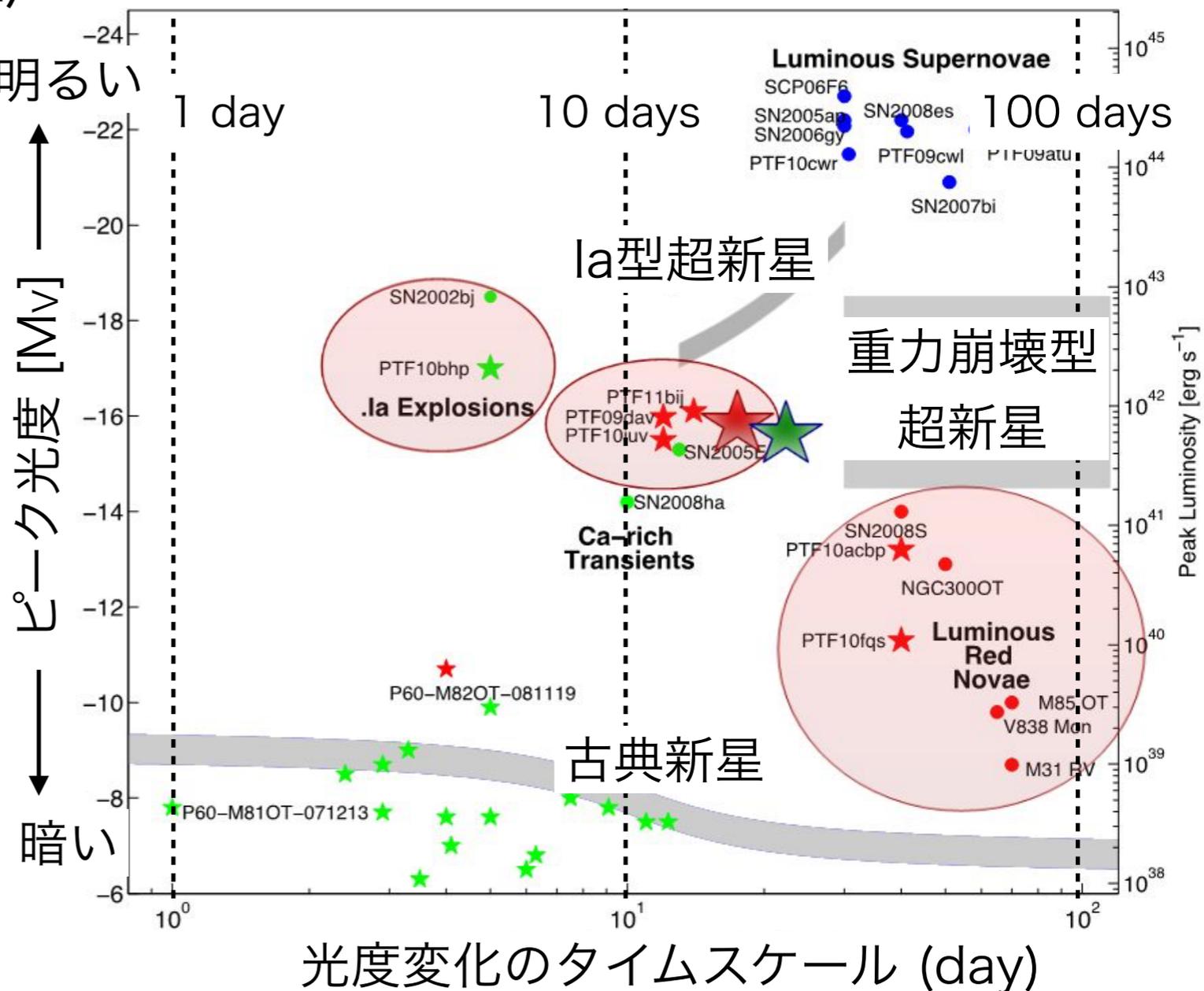
- イントロダクション
 - ▶ 可視光突発天体のphase space
 - ▶ 短時間で起こる突発天体現象
 - ▶ Tomo-eで切り開く秒スケールの突発天体探査
- 秒スケール突発天体検出パイプライン TomoePipe の開発
 - 3次元FITS（動画データ）を解析
 - ▶ PSFで重み付けをした天体検出
 - ▶ point sourceに絞る天体パラメータの導入
 - Tomo-eの実データへの適用
 - ▶ 動画データ
 - ▶ 差分画像（by 笹岡）
- まとめ & 今後の展望

可視光突発天体のphase space

- タイムスケール vs. ピーク光度 (絶対等級)

- ▶ 様々な種族のexplosive transients
- ▶ 短時間かつ明るい(図の左上)

種族は知られていなかった 明るい



Phase space of transients

暗い

可視光突発天体のphase space

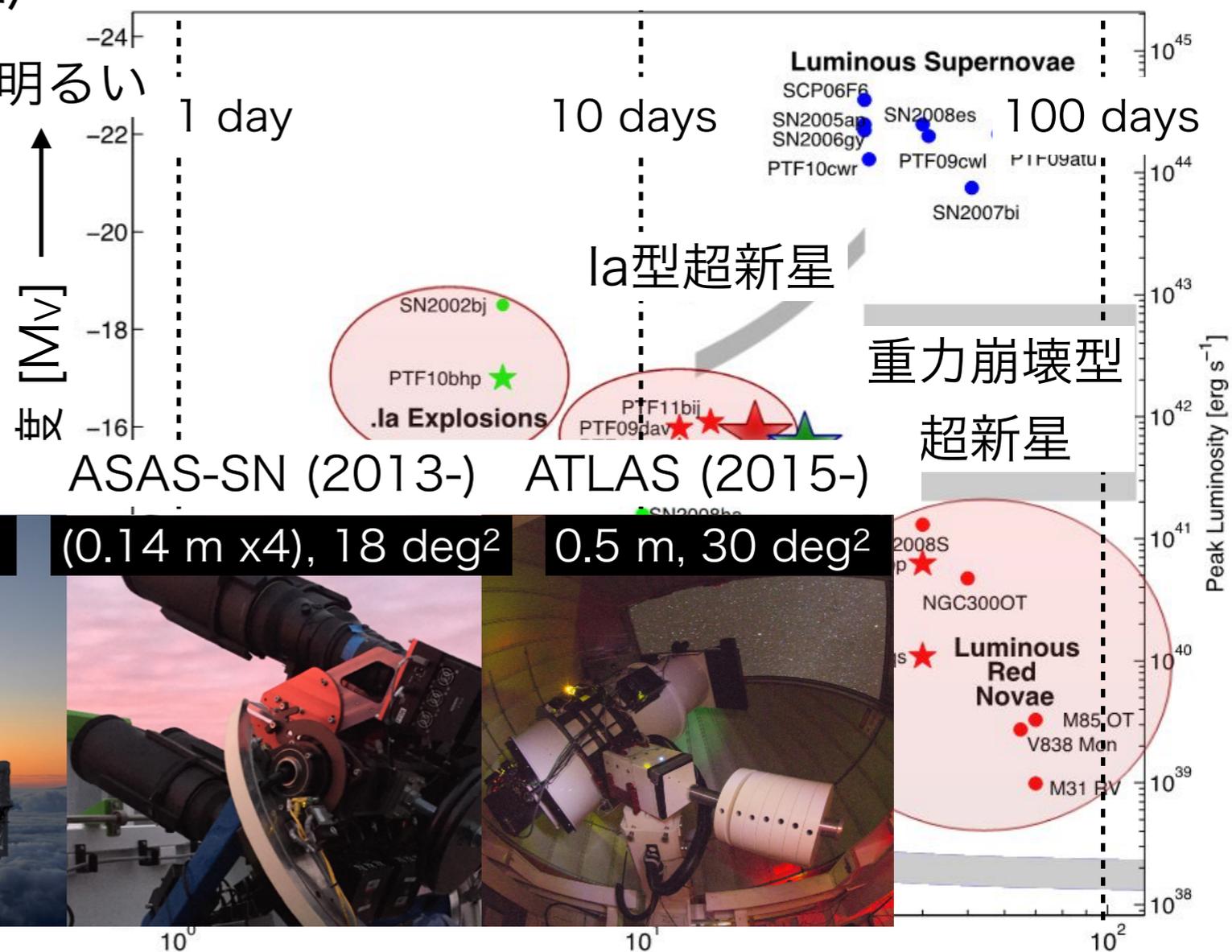
- タイムスケール vs. ピーク光度 (絶対等級)

- ▶ 様々な種族のexplosive transients
- ▶ 短時間かつ明るい(図の左上)

種族は知られていなかった 明るい

- ▶ 広視野 x 高頻度(≤ 1 day)な大規模サーベイが進む

Phase space of transients

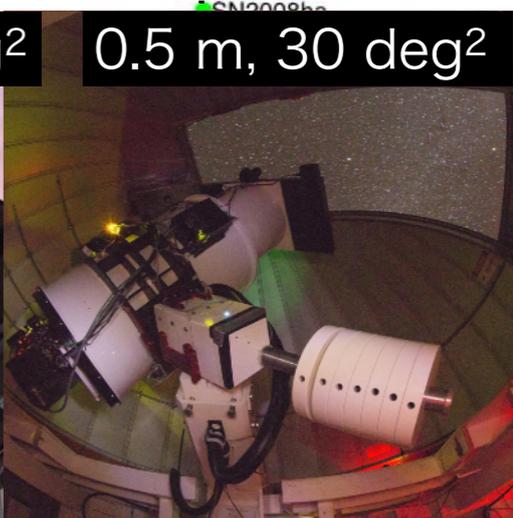
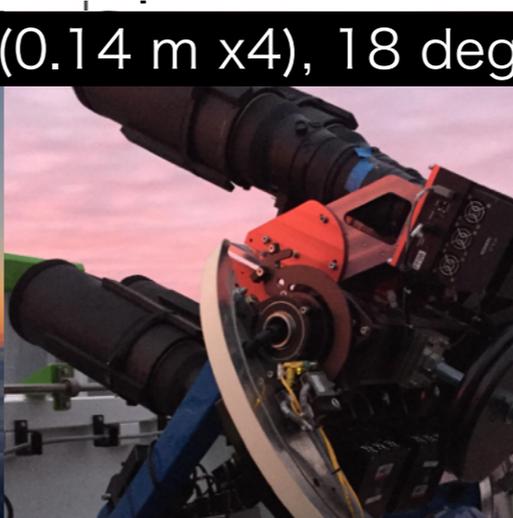
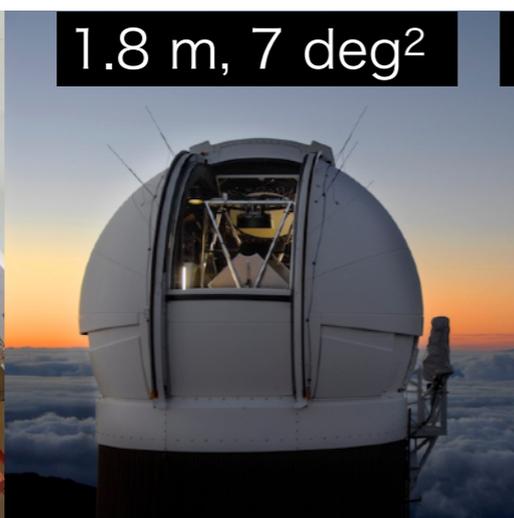


ZTF (2018-)

PS1 (2010-)

ASAS-SN (2013-)

ATLAS (2015-)



ZTF: <https://www.ztf.caltech.edu/multimedia.html#>

Pan-STARRS: <https://outerspace.stsci.edu/display/PANSTARRS/>

ASAS-SN: <https://users.obs.carnegiescience.edu/tholoiem/research/asas-sn.html>

ATLAS: <https://www.fallingstar.com/home.php>

典型的なタイムスケール (day)

Kasliwal (2011)

可視光突発天体のphase space

- タイムスケール vs. ピーク光度 (絶対等級)

- ▶ 様々な種族のexplosive transients
- ▶ 短時間かつ明るい(図の左上)

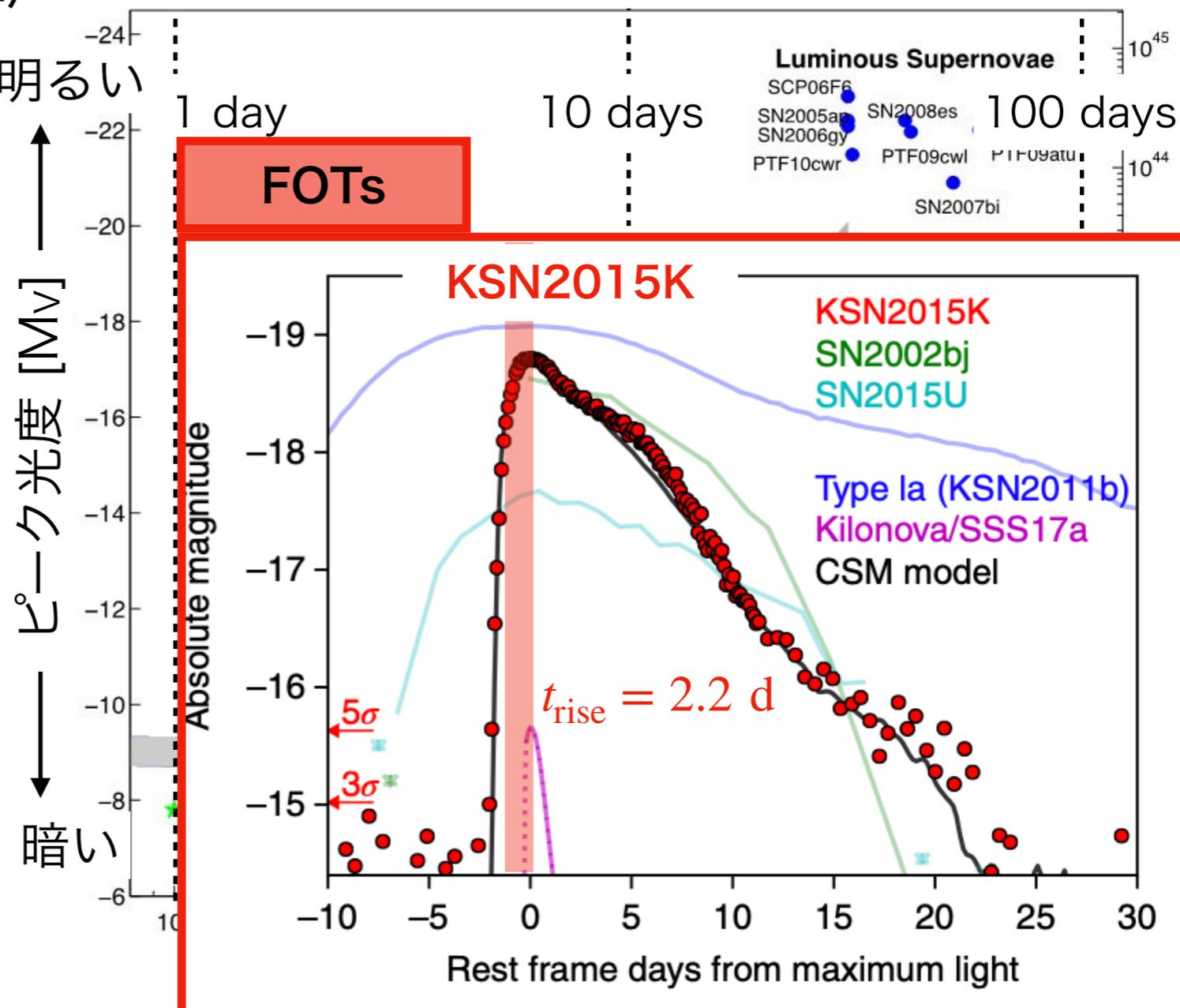
種族は知られていなかった 明るい

- ▶ 広視野 x 高頻度(≤ 1 day)な大規模サーベイが進む

- ▶ 短時間(< 10 d)で高光度なFast Optical Transients (**FOTs**) の発見 (現在 ~10)

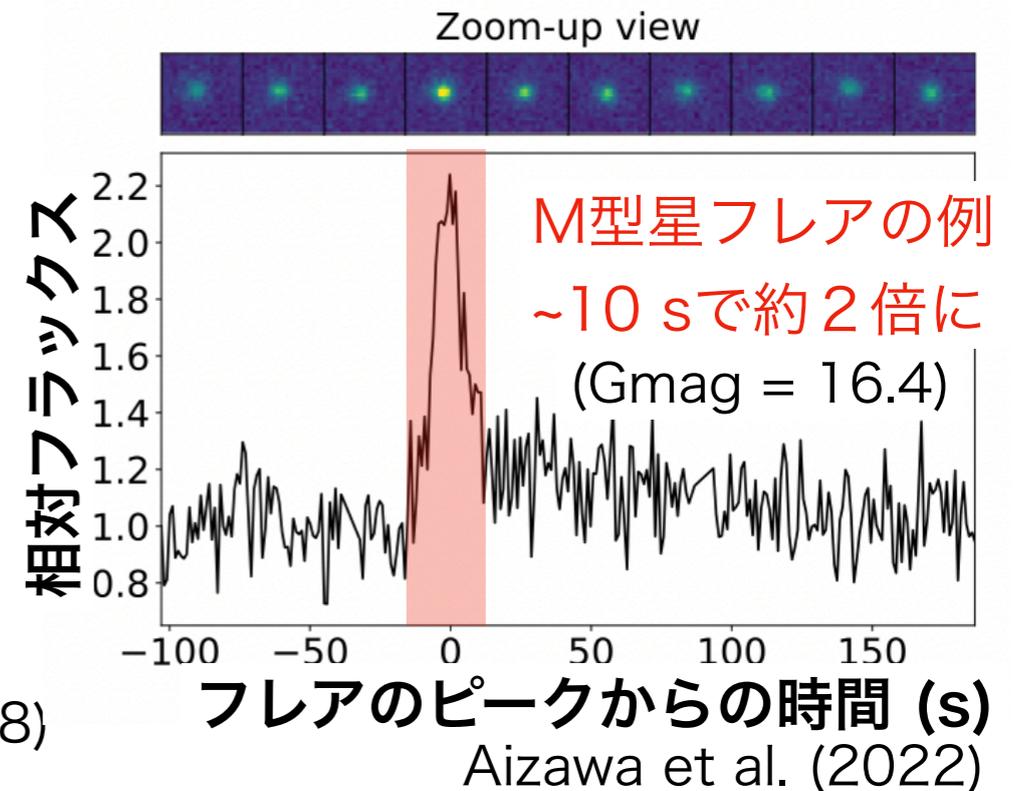
e.g.) PS1: Drout et al. (2014);
ATLAS: Prentice et al. (2018);
ZTF: Ho et al. (2020)

Phase space of transients

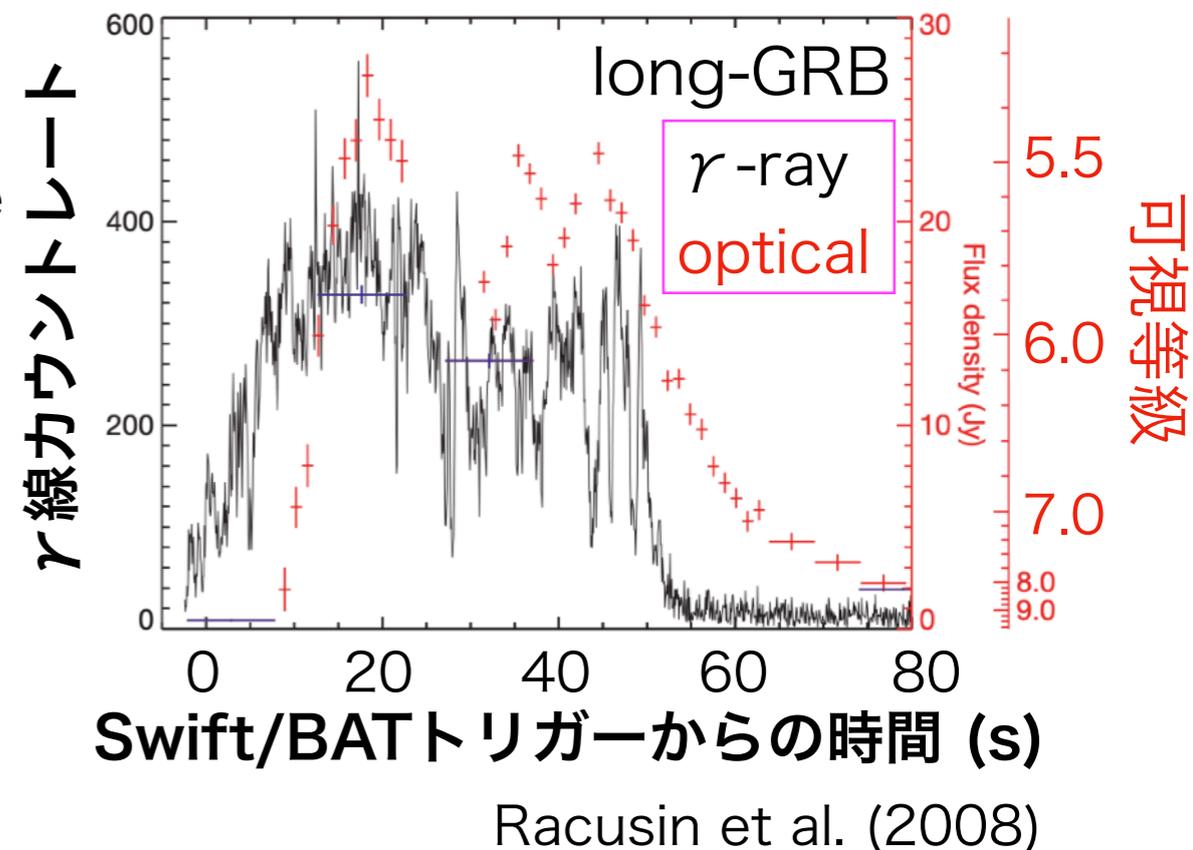


短時間で起こる突発天体現象

- 銀河系内
 - ▶ 主にM型星の高速フレア (sec ~ min)
e.g., Kowalski et al. (2016), Aizawa et al. (2022)



- extragalactic
 - ▶ GRBの可視光即時放射
 - long-GRB ($t \geq 2s$): Racusin et al. (2008)
 - short-GRB ($t < 2s$): 未だ未検出
 - ▶ FRBの可視光成分 (理論モデル予測)
e.g., Beloborodov (2020): magnetar giant flare model by the synchrotron maser mechanism
 - 電波/可視同時観測 => 未だ未検出
e.g., Hardy et al. 2017, Niino et al. 2022



これまでの短時間の可視光突発天体探査

← CCDs → CMOS

	Berger et al. 2013	Andreoni et al. 2020	Wevers et al. 2018	Richmond et al. 2020
装置 (口径 / FOV)	Pan-STARRS1 1.8 m / 7 deg ²	DECam 4 m / 2.2 deg ²	Gaia satellite 0.7 m ² / 0.6 deg ²	Tomo-e PM 1.05 m / 1.9 deg ²
タイムスケール	30 min	1.2 min	15 sec	1.5 - 11.5 sec
深さ (限界等級)	~ 22.5 mag	~ 23 mag	~ 20.5 mag	~ 15.6 mag
発見天体	9 stellar flares	9 stellar flares	4 stellar flares	No candidates
イベントレート R _{trans} (deg ⁻² d ⁻¹)	≲ 0.12	≲ 1.6	NOT derived	≲ 1.46

(目的) Tomo-e Gozen 広視野動画観測による秒スケールの突発天体探査の実施
=> 動画データ解析パイプラインの開発 (本発表)

本解析パイプラインの概要

- 解析パイプラインの流れ

インプット：Tomo-eの3次元動画データ (FITSファイル)

Stack画像 & segmapの作成、PSF モデリング

フレーム画像のソース検出 & 秒スケールの突発天体の抽出

星のプロファイル(PSF)に似たソースに絞る

最後は目視チェック

- 上記の一連のプロセスを純Pythonで開発 ([TomoePipe](#))
 - ▶ ソース検出 & 測光：SEP^{*1} (SExtractorのコア機能のPython wrapper)
 - ▶ PSF モデリング：PythonPhot^{*2} (DAOPHOTのコア機能の翻訳版)
 - ▶ その他：astropy, numpy, pandas, など

^{*1} Barbary 2016, JOSS, 1, 58

^{*2} Jones et al. 2015, ascl:1501.010

Stack画像 & “segmap”の作成

① Nフレームのデータcubeを時間軸に沿って median stacking => stack画像

インプット：Tomo-eの3次元動画データ (FITSファイル)

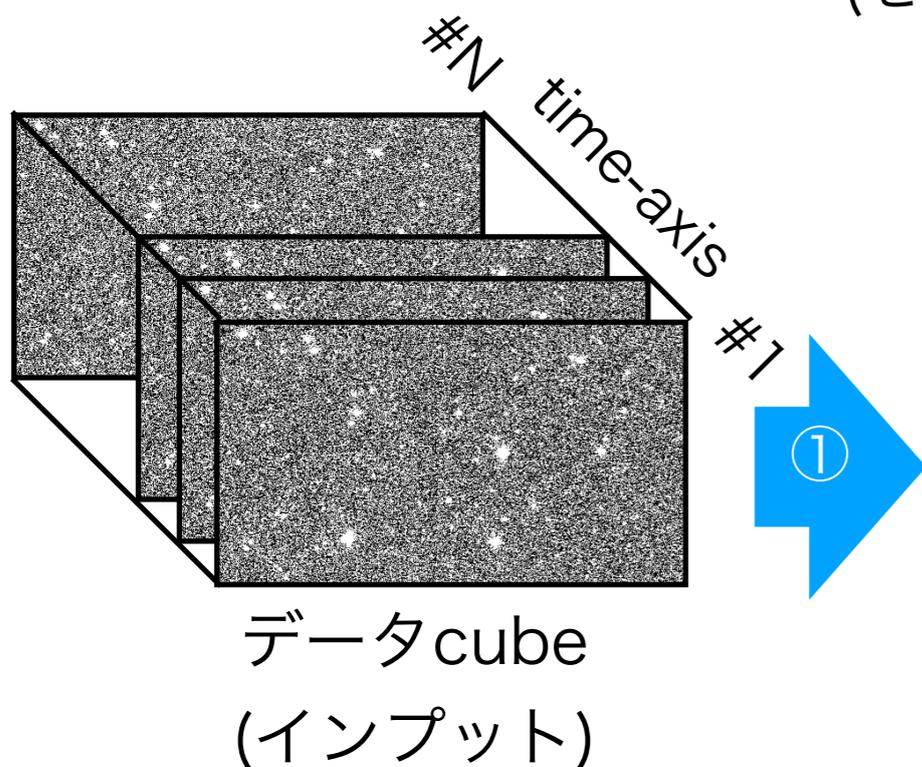
Stack画像 & segmapの作成、PSF モデリング

② stack画像上でソース検出 (with SEP)
=> 天体識別IDのついた “segmap”の作成
(セグメンテーションマップ)

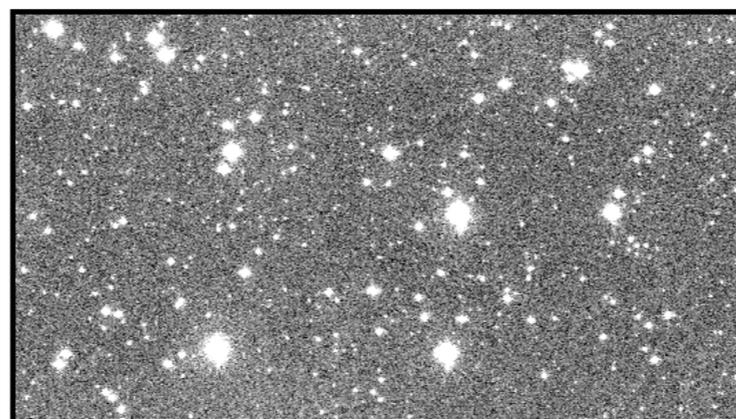
フレーム画像のソース検出 & 秒スケールの突発天体の抽出

星のプロファイル(PSF)に似たソースに絞る

最後は目視チェック



stack画像



segmap (白が検出天体)



天体ID (1, 2, 3, ..., N)のついた
2次元画像 (黒い領域 = 0)

PSF モデリング

- ① Stack画像で検出された天体から
S/Nの高いpoint source (=星)を選ぶ
 - ▶ 有効半径 R_{eff} を使用
 R_{eff} : 天体のフラックスの50%が入る半径
- ② PSF星のプロファイルを2D Gaussian
+ 残差成分の足し合わせでモデルPSFを作成

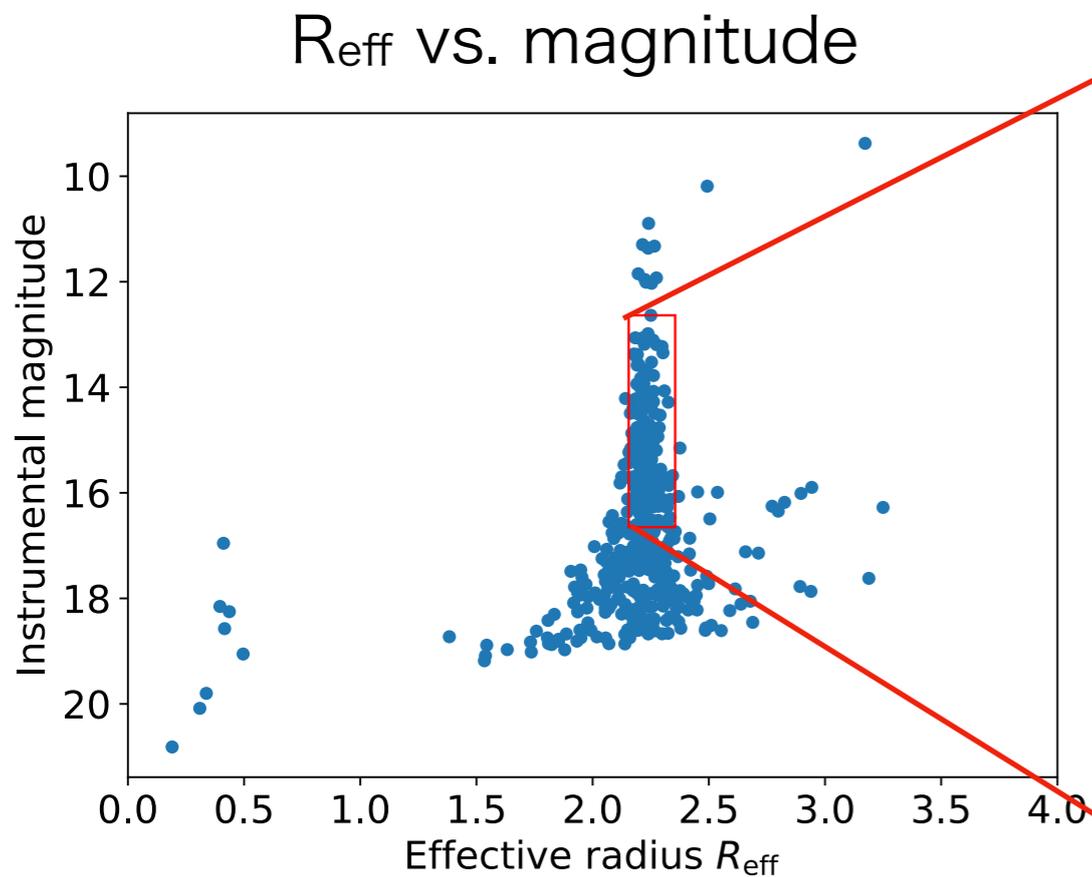
インプット：Tomo-eの3次元動画データ (FITSファイル)

Stack画像 & segmapの作成、PSF モデリング

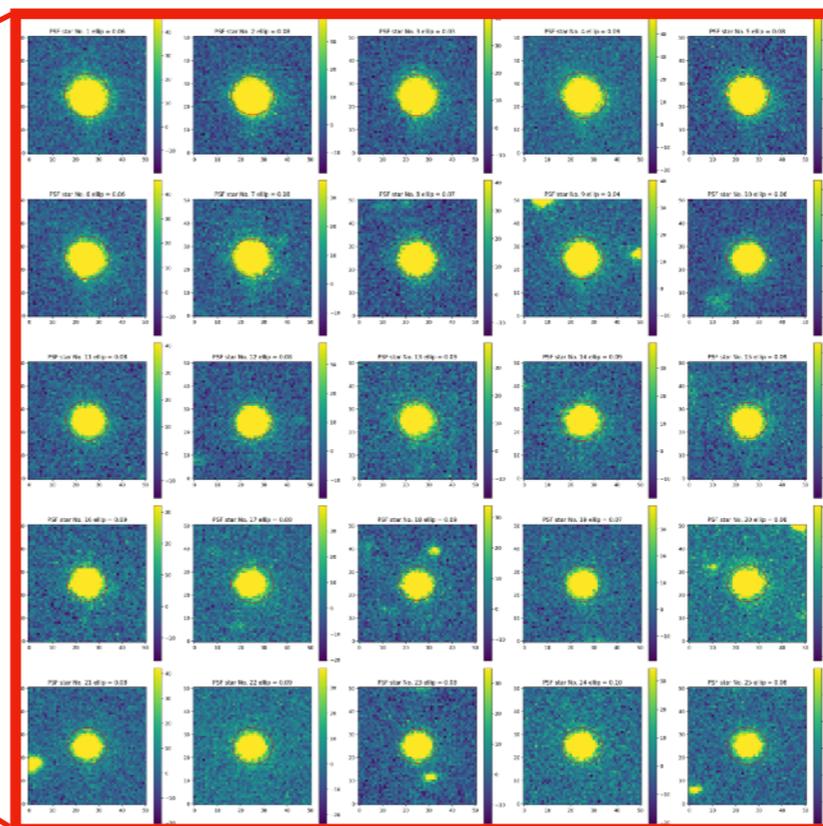
フレーム画像のソース検出 & 秒スケールの突発天体の抽出

星のプロファイル(PSF)に似たソースに絞る

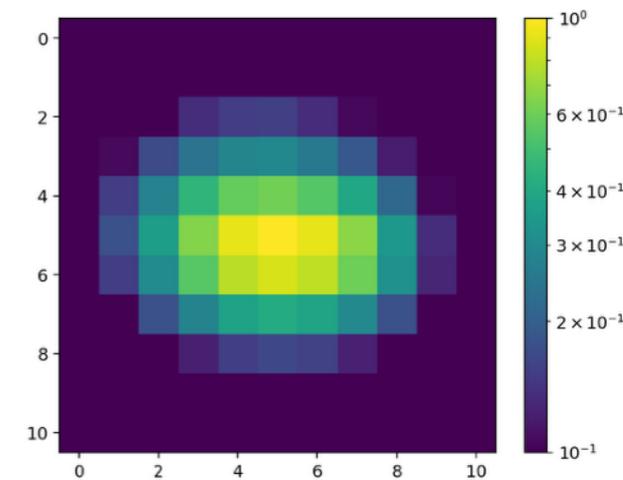
最後は目視チェック



① PSF星



② モデルPSF



秒スケールの突発天体の検出

- データcubeの各フレーム画像に対してモデルPSFでconvolutionした天体検出

- ▶ point sourceに感度を最適化

原理: Bigaoui & Dantel 1970

適用: e.g., Bosch et al. 2018 for Subaru/HSC pipeline

インプット: Tomo-eの3次元動画データ (FITSファイル)

Stack画像 & segmapの作成、PSF モデリング

フレーム画像のソース検出 & 秒スケールの突発天体の抽出

星のプロファイル(PSF)に似たソースに絞る

最後は目視チェック

- segmapを参照しフレーム画像のみで検出された天体を抽出

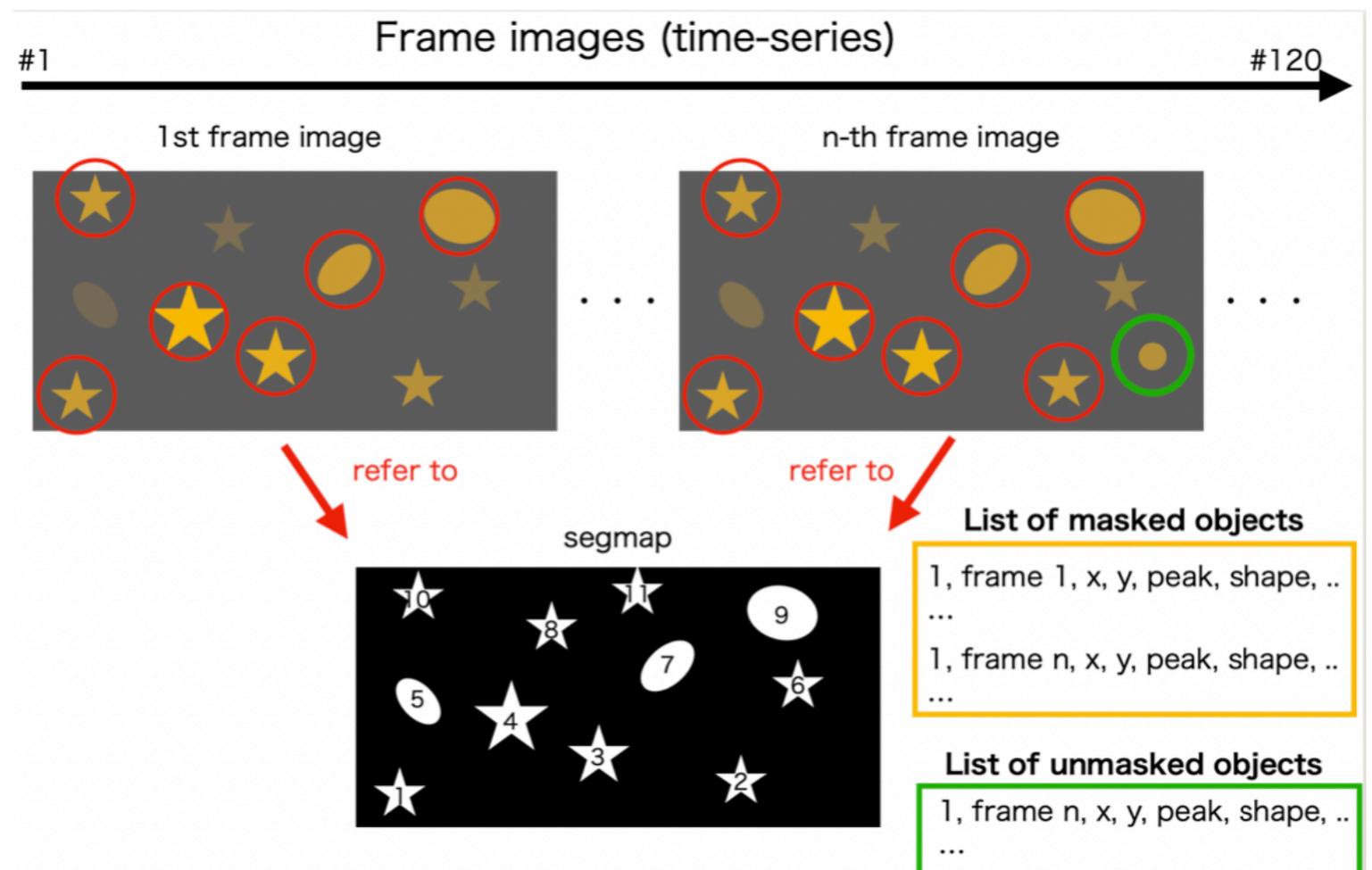
- ▶ segmapにある天体

=> 星系列の定義に使用

- ▶ segmapに無い天体

(= stack画像で非検出)

=> 候補天体リストへ



突発天体候補の選択 (星系列)

- c_{peak} vs. $\text{peak} / \sqrt{n_{\text{pix}}}$ プロットで選択
=> 以降 **CP-P diagram** と呼ぶ

インプット：Tomo-eの3次元動画データ (FITSファイル)

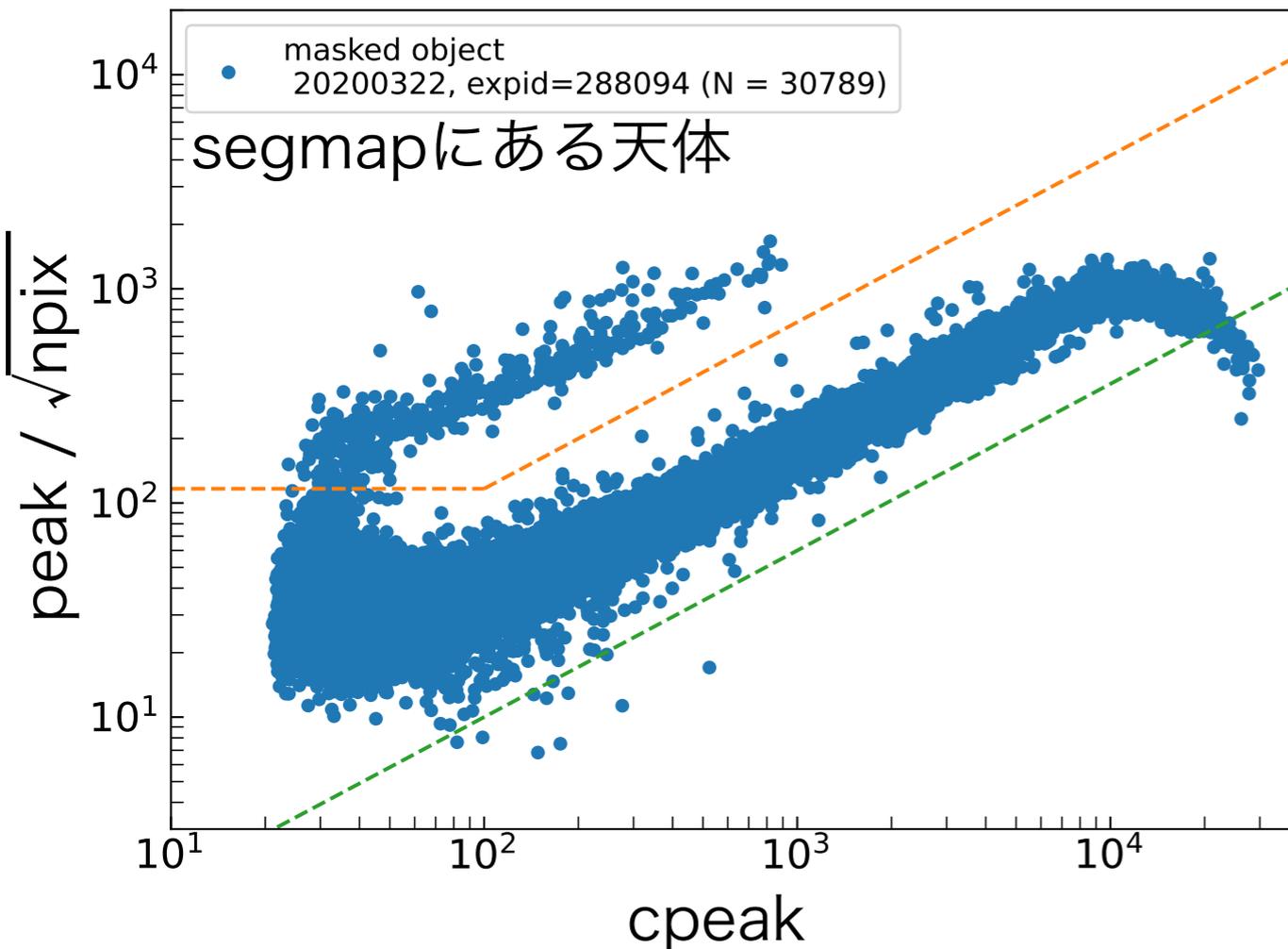
Stack画像 & segmapの作成、PSF モデリング

フレーム画像のソース検出 & 秒スケールの突発天体の抽出

星のプロファイル(PSF)に似たソースに絞る

最後は目視チェック

CP-P diagram



cpeak: convolved **peak**

PSFで畳み込んだ画像でのpeak ($\propto S/N$)

peak / √npix

= (peakピクセル) / √(天体の見かけの面積)

\propto (peakピクセル) / (天体の見かけの半径)

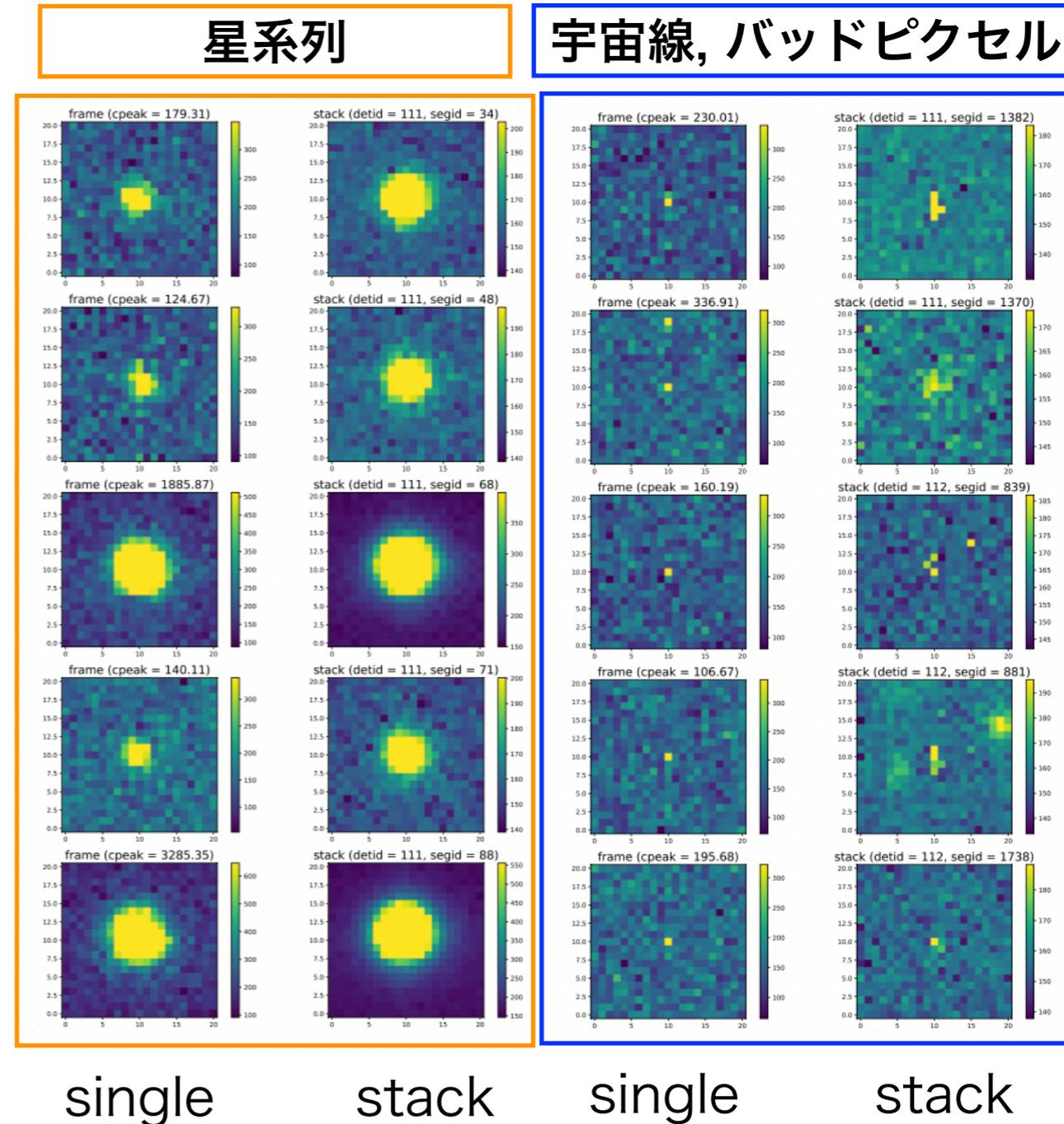
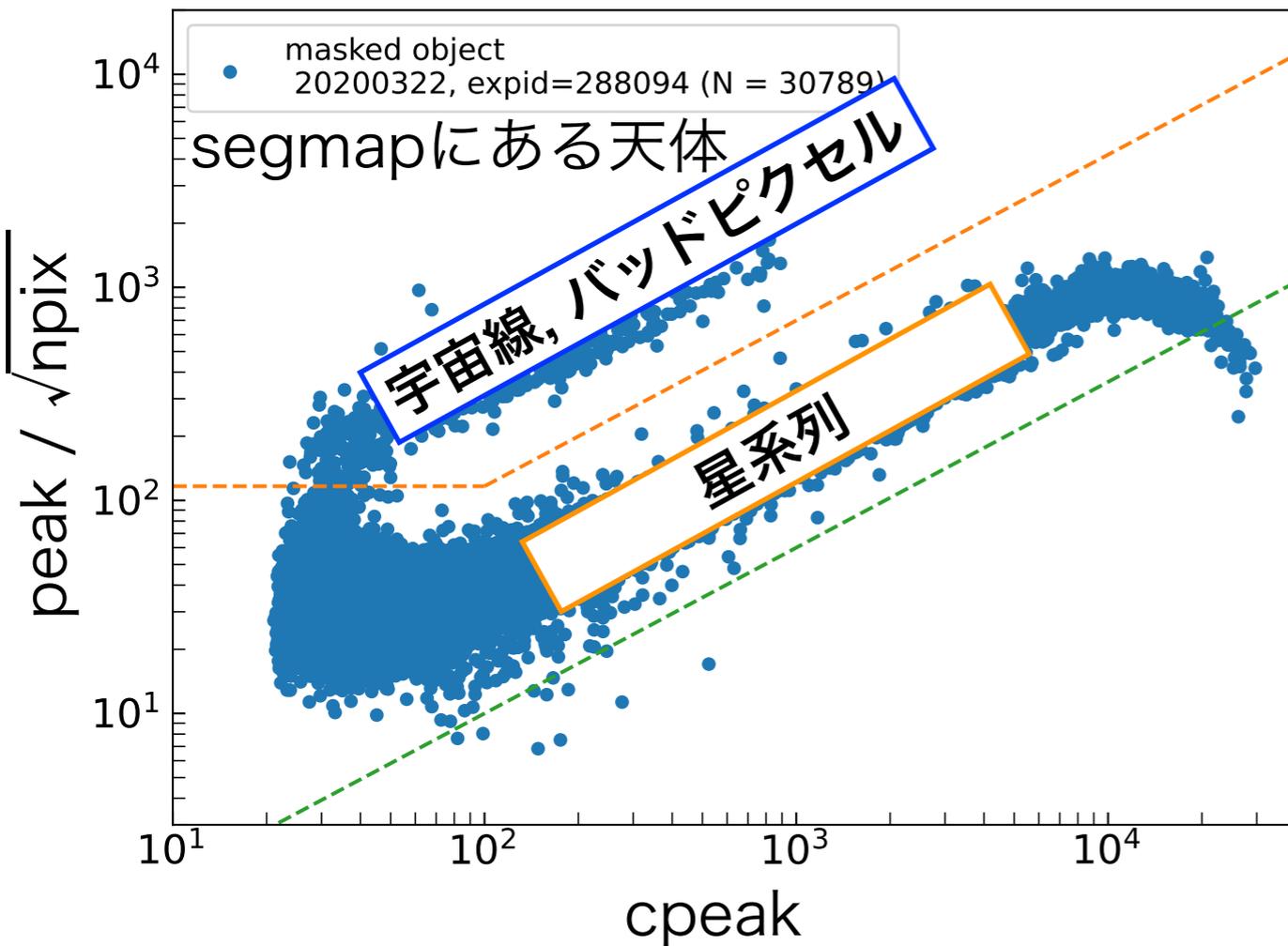
→ 天体の輝度プロファイルを反映

Yamagata (1986) for 星/銀河分類

突発天体候補の選択 (星系列)

- c_{peak} vs. $\text{peak}/\sqrt{n_{\text{pix}}}$ プロットで選択
=> 以降 **CP-P diagram** と呼ぶ

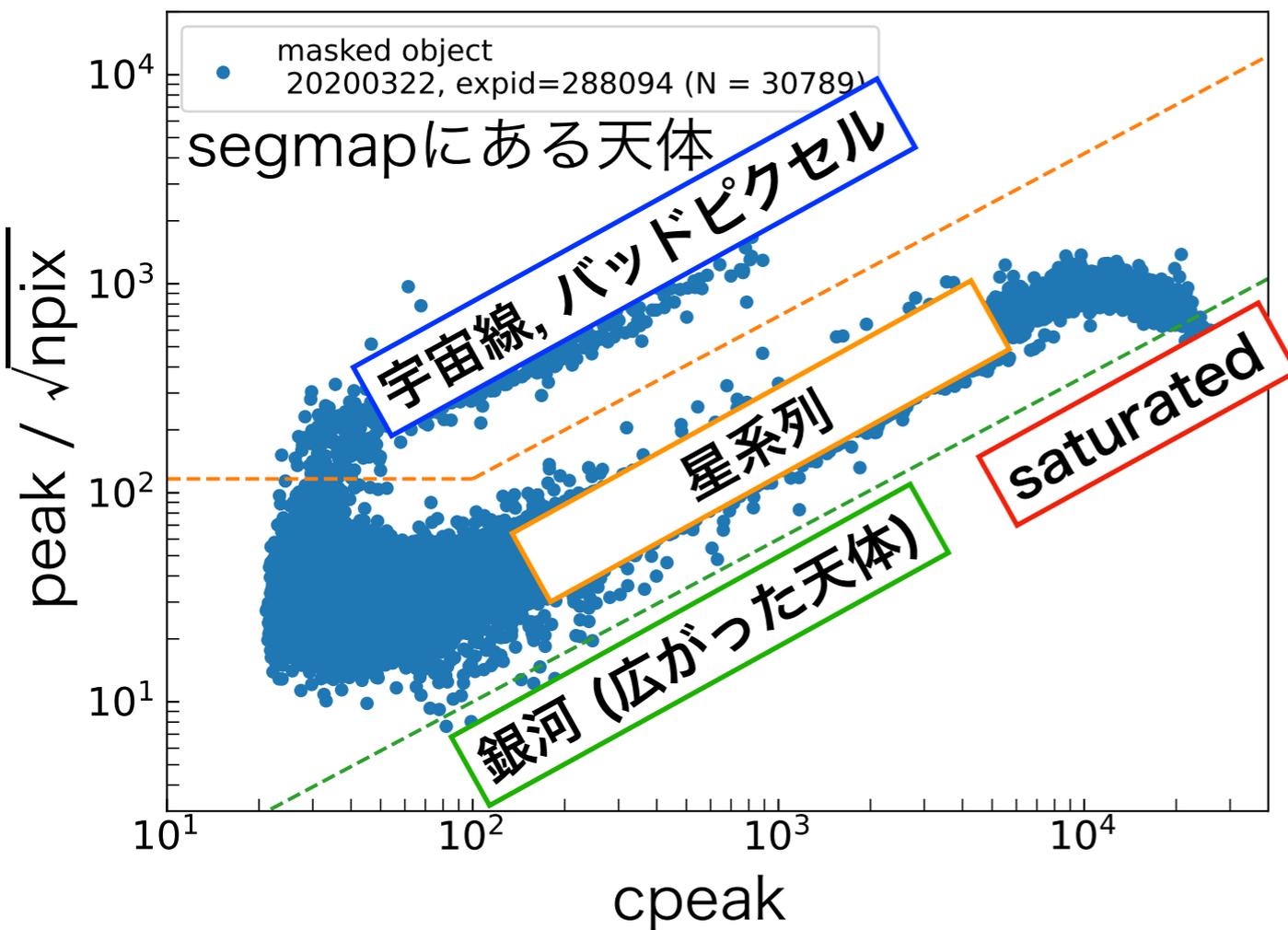
CP-P diagram



突発天体候補の選択 (星系列)

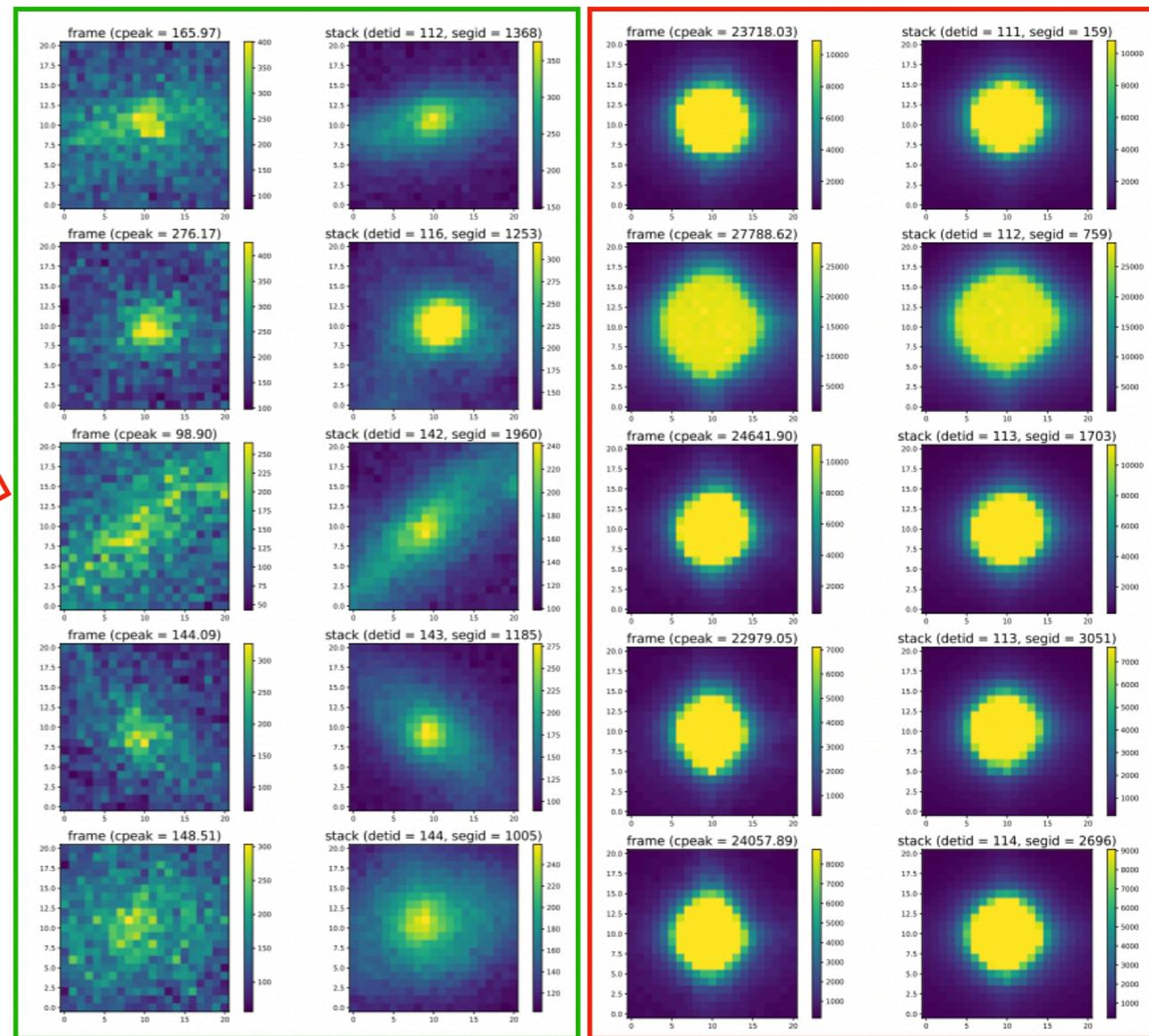
- c_{peak} vs. $peak/\sqrt{npix}$ プロットで選択
=> 以降 **CP-P diagram** と呼ぶ

CP-P diagram



銀河 (広がった天体)

saturated



single

stack

single

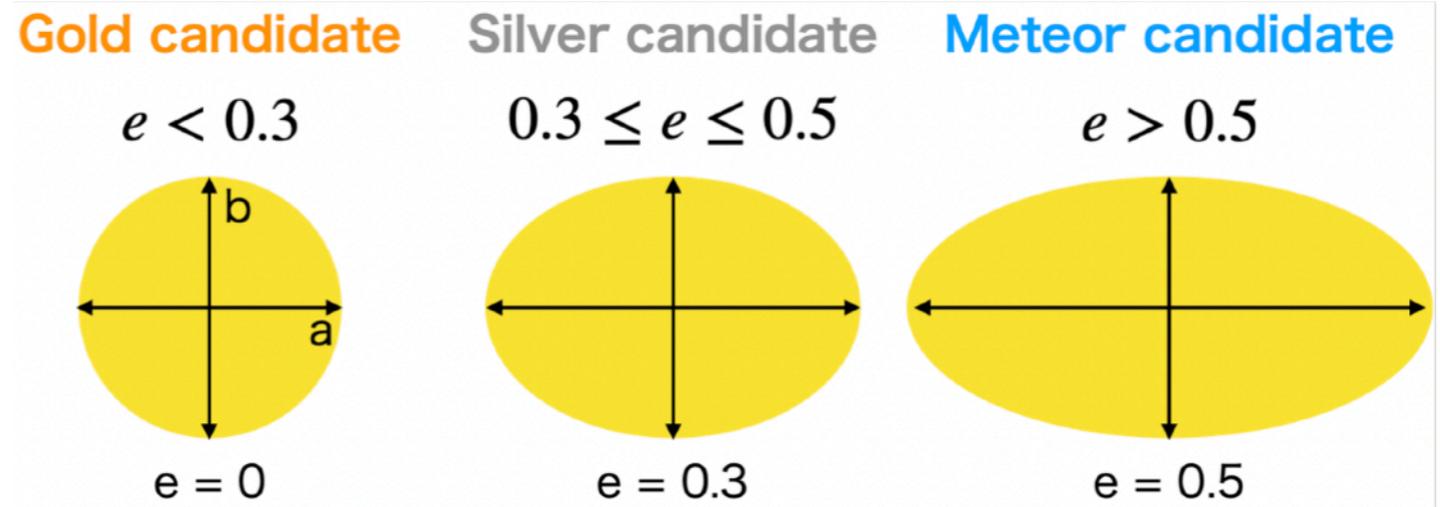
stack

突発天体候補の選択 (楕円率)

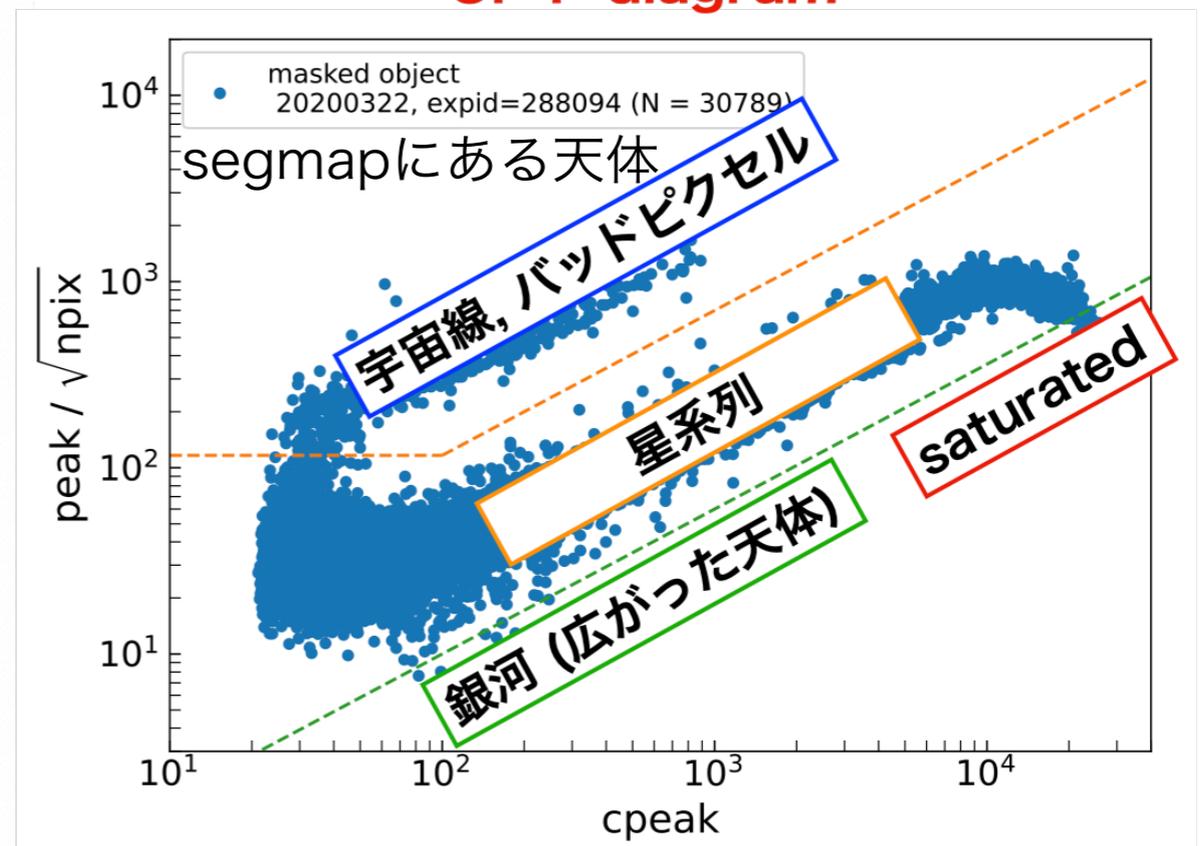
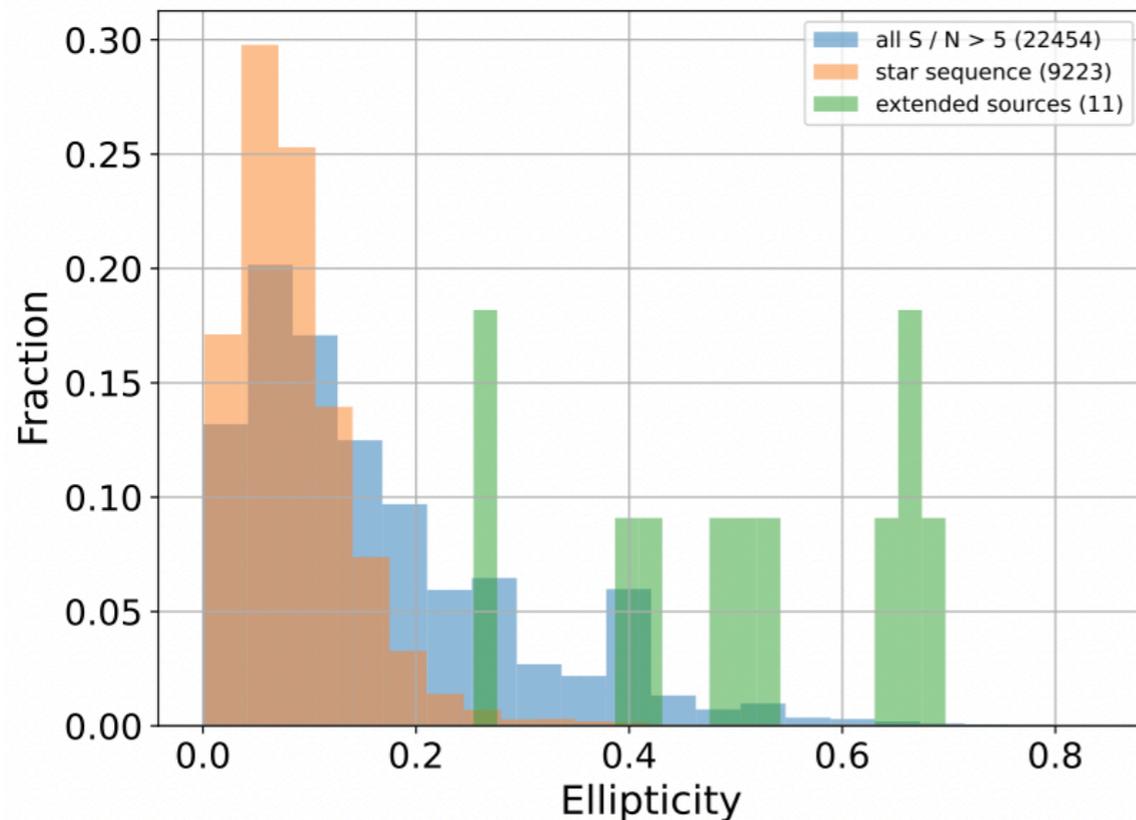
楕円率： $e = 1 - \frac{b}{a}$ 、 a および b は天体の長軸と短軸方向の分散

- 星系列の楕円率分布から $e < 0.3$ を選択条件に設定

Gold candidate を定義



CP-P diagram



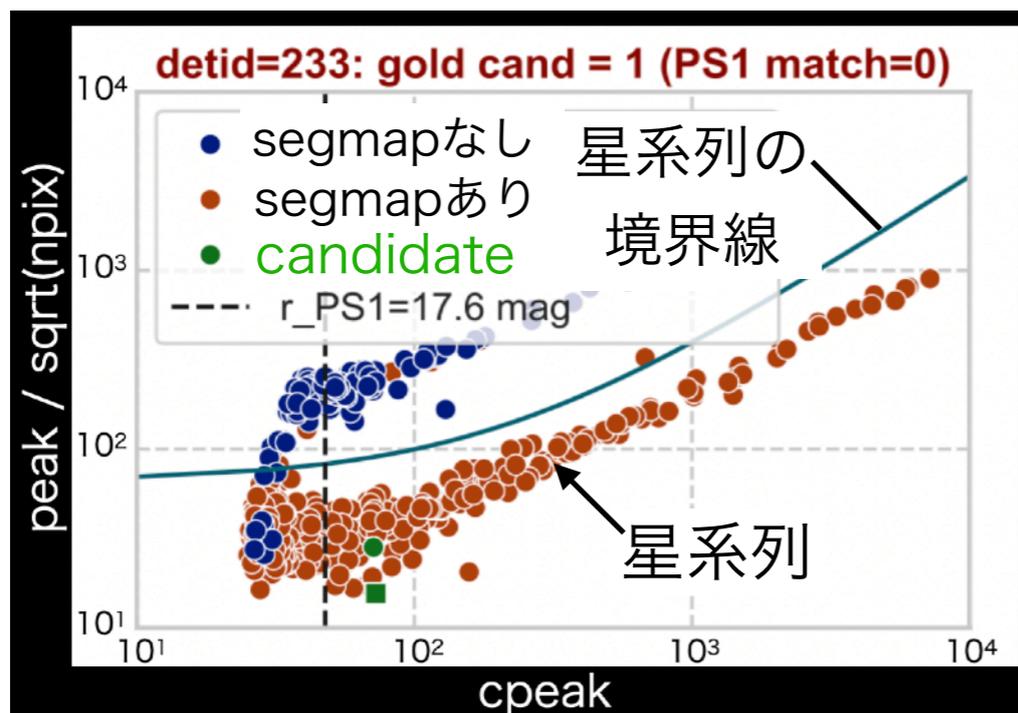
TomoePipeのまとめ

インプット：Tomoe-eの3次元動画データ (FITSファイル)

Stack画像 & segmapの作成、PSF モデリング

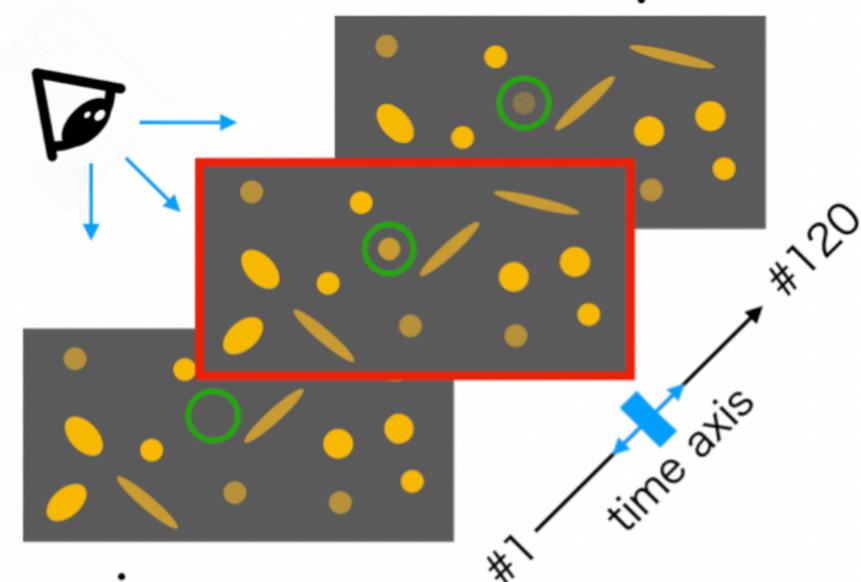
フレーム画像のソース検出 & 秒スケールの突発天体の抽出

星のプロファイル(PSF)に似たソースに絞る
CP-P diagram & ellipticity $e < 0.3$
PS1 3π カタログ(g,r,i,z,y)とのクロスマッチ



if Gold candidate

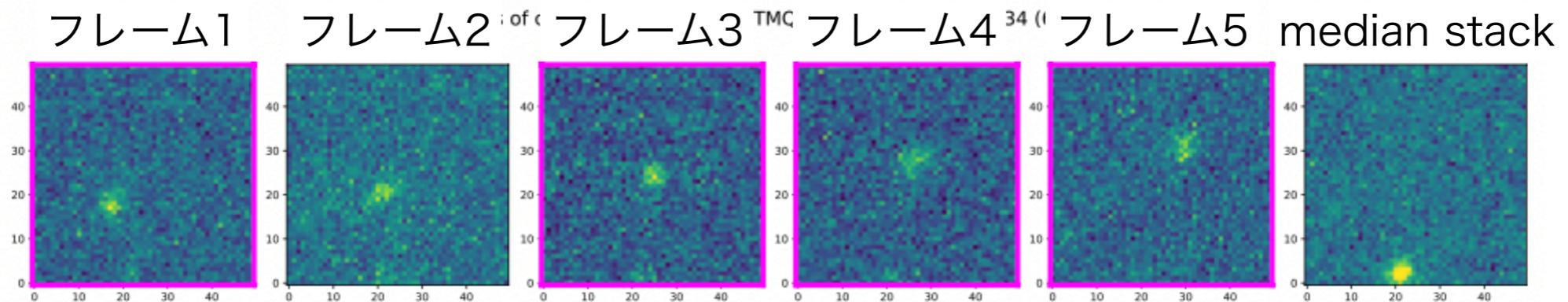
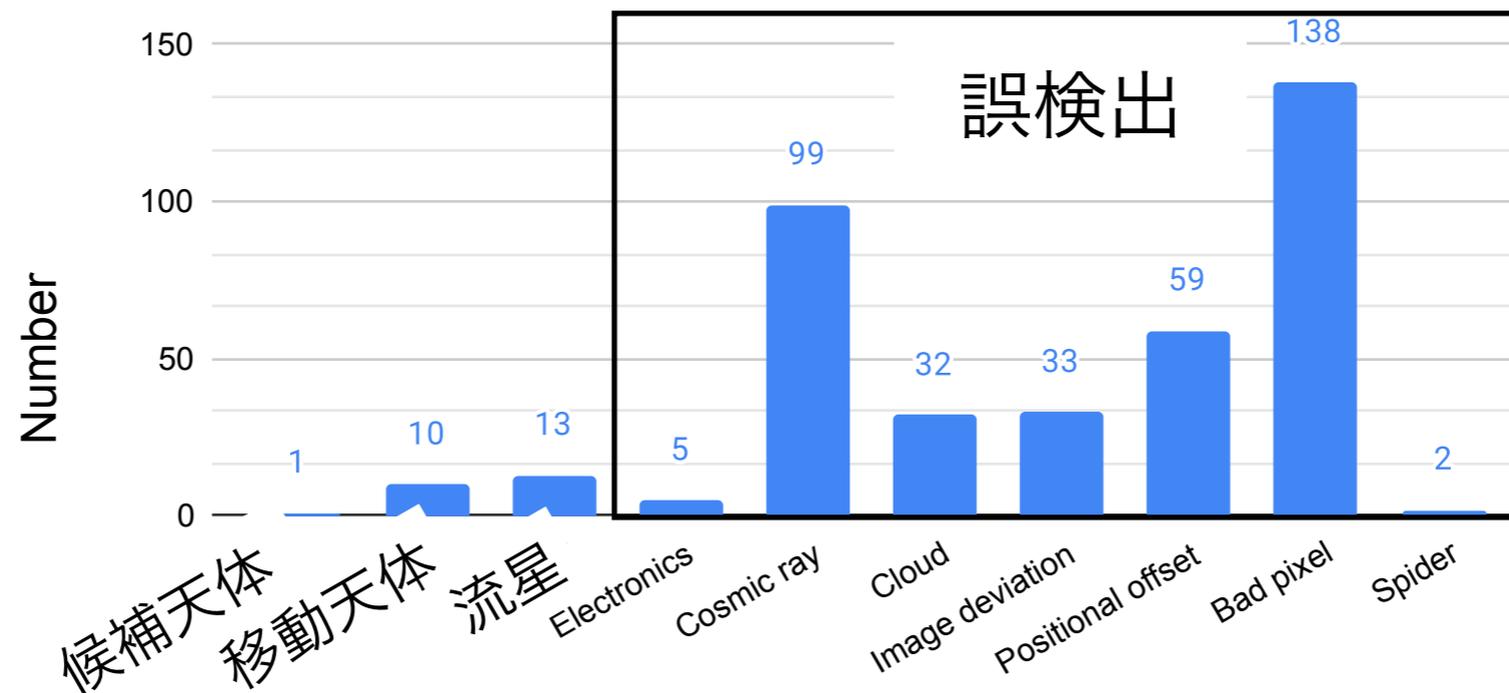
最後は目視で画像チェック



shape, brightness, position variations as time

動画データへの適用

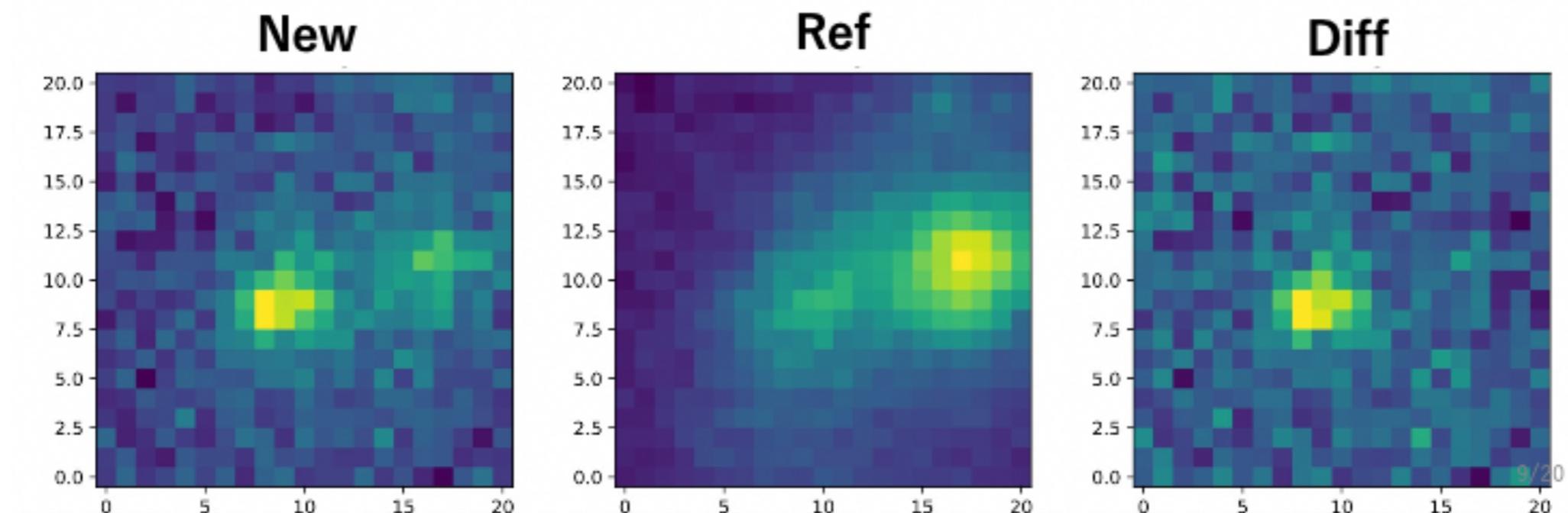
- データ：地球影領域の動画観測（1フレーム/秒、120フレーム/動画）
 - ▶ 2019/11 - 2020/03 (28 夜) にかけての計約54時間のデータ
- Gold candidate 392天体の目視チェック結果
 - ▶ 既知の地球接近小惑星NEOCP JNS043の検出にも成功している (下図)



(a) Moving object of 20200322_objid1

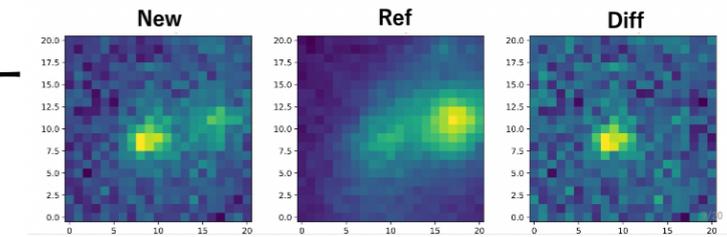
差分画像への適用

- 毎晩行われているTomo-eの全天サーベイデータ（スタック画像）
 - 差分解析による突発天体検出が行われている（transient パイプライン）
 - 差分画像（Diff）に TomoePipe の手法を導入（by **東大、笹岡くん**）
 - ▶ CP-P diagramによってtransient候補の絞り込みができないか検証（Tomo-e自動アラートへ向けて誤検出を減らしたい）
- テストデータ
 - ▶ Transient Name Server (TNS) に登録されている天体のうち、
現行のパイプラインでS/N > 5で検出されている 235 枚の画像を使用



差分画像への適用（結果）

- Diffに写る突発天体をNew画像の星系列領域に探す

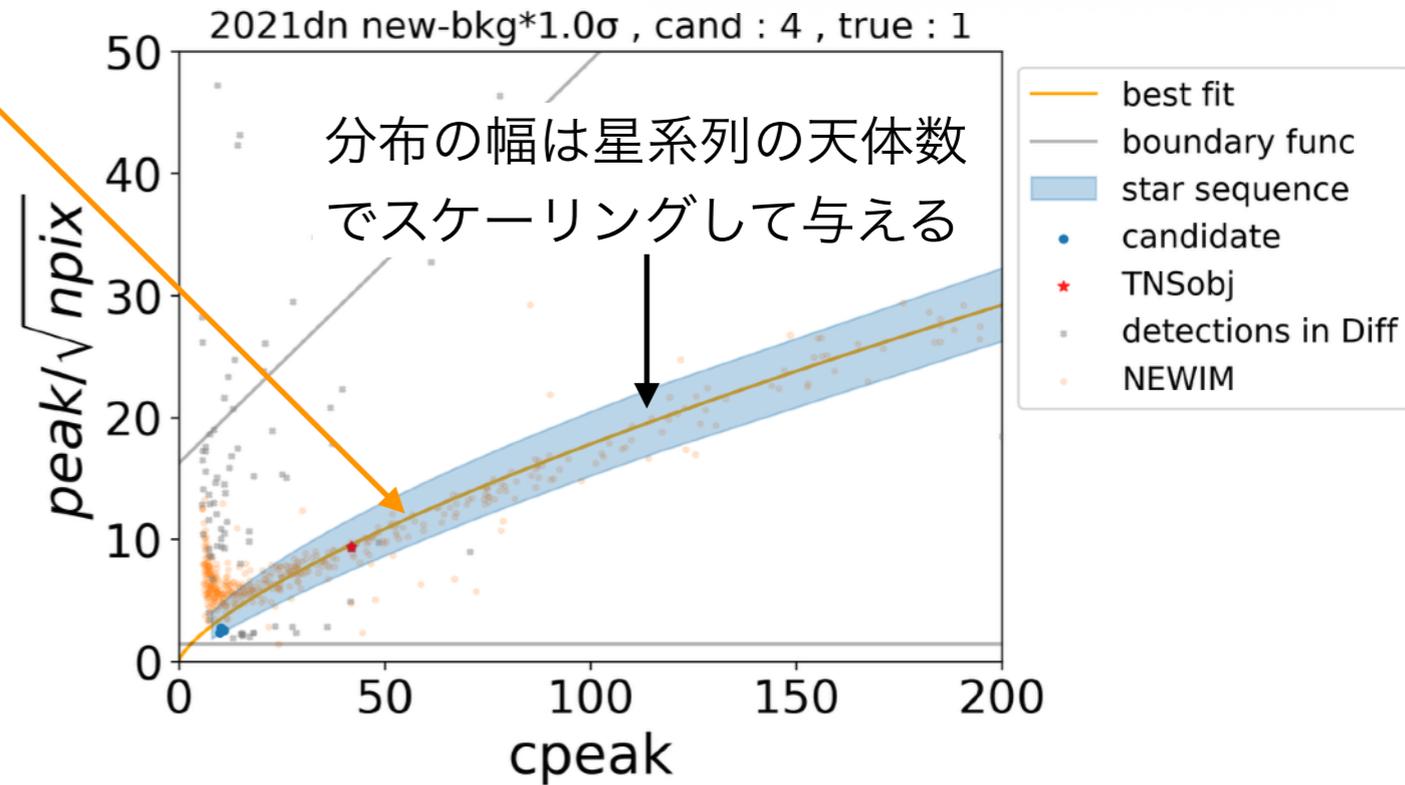


- ▶ 星系列をべき関数でフィット

$$y = ax^b$$

- Diff画像上のTNS天体の多くは星系列の上に乗る (右図)

- ▶ CP-P diagramが差分画像にも適用できることがわかった



- TNS天体の検出成功率および誤検出の割合

手法	検出成功数	検出成功率	成功した画像の中の誤検出 (median)
従来	235	100%(基準)	89
今回	139	59%	4

発表のまとめ & 今後の展望

- Tomo-eで切り開く秒スケールの突発天体探査のための動画データ解析パイプライン TomoePipe を開発した。
 - ▶ PSFで重み付けをした天体検出
 - ▶ point sourceに候補天体を絞るCP-P diagramの導入
- Tomo-e実データに適用した結果、
 - ▶ 動画データからは既知のNEO (point source) が検出された
 - ▶ 差分画像データにも適用できることが確かめられた
- 今後の展望
 - 星系列領域をseeing(+ α)依存の関数で定義する方法の検討
 - 動画データに対して差分画像 \rightarrow TomoePipe を使った解析の実施
 - 将来的にはサーベイデータから自動即時解析まで行えるように