突発天体の早期発見に向けた検出パイプラインの改修計画

笹岡大雅 (東京大学 M2)

2024/05/15 木曽シュミットシンポジウム2024

目次

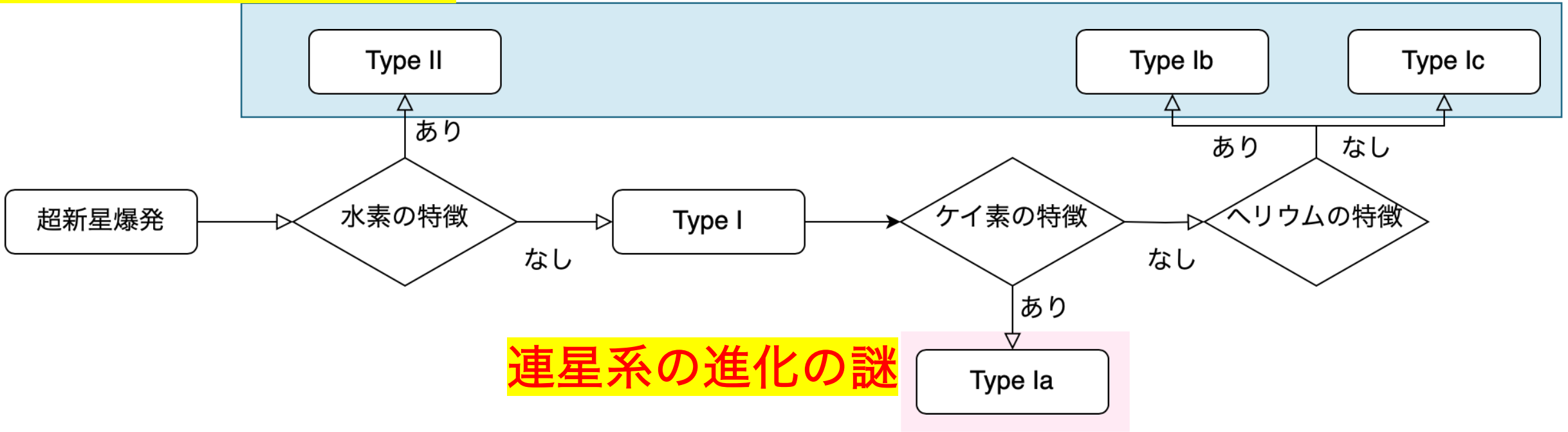
1. introduction
2. method
3. result
4. discussion
5. まとめ

突発天体探査の動機

超新星：一部の恒星が生涯の最後に起こす高エネルギーの爆発

- 観測的特徴により、いくつかの種類に分けられる。

大質量星の多様性の謎



突発天体の早期観測

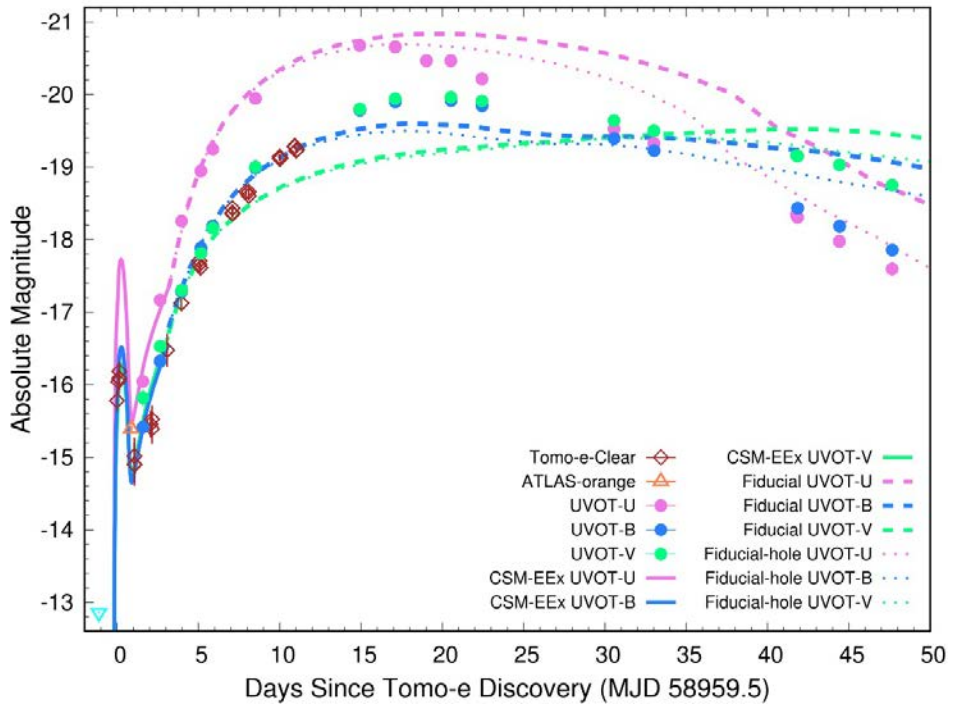
- 早期観測のターゲット：

1.超新星の初期の特徴

親星の外層の組成や状態を反映するため、
爆発メカニズムの理解が進むと考えられる。

- Shock breakout
- Ia型超新星の初期増光

e.g. SN2020hvf
(Jiang+21)

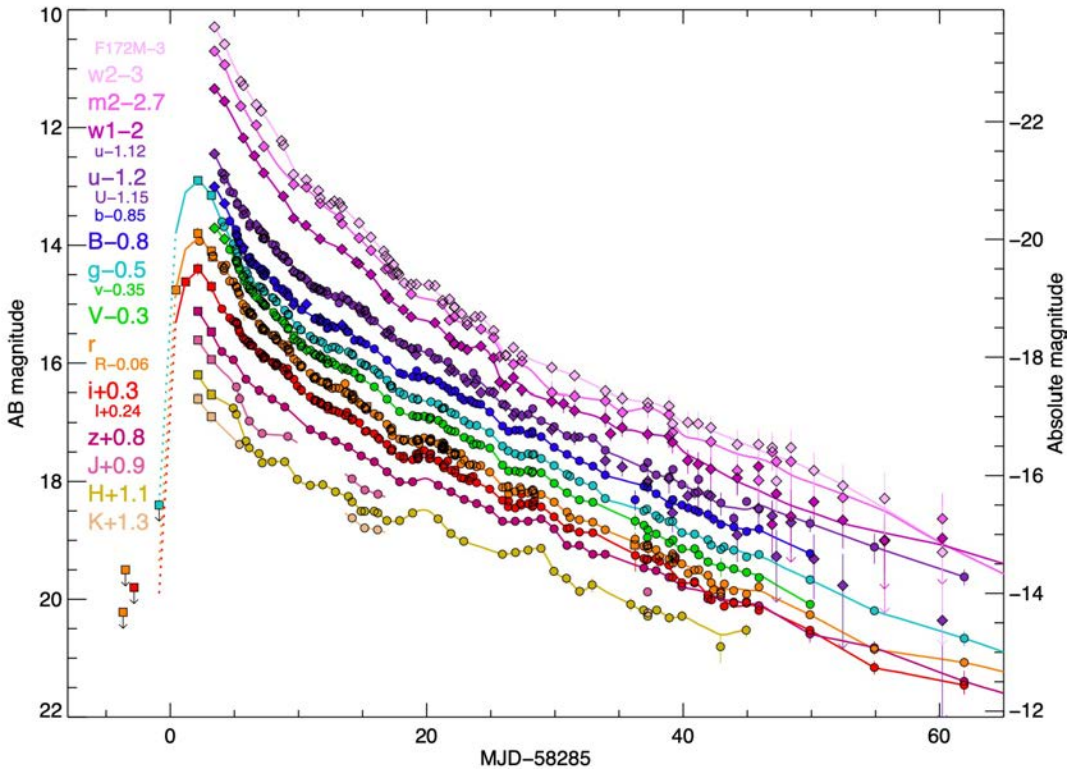


突発天体の早期観測

- 早期観測のターゲット：

2. Rapid Transient

ピーク光度が極めて明るく、急激に暗くなる天体。サンプルが少なく起源そのものが盛んに議論されており、時系列データが極めて重要。

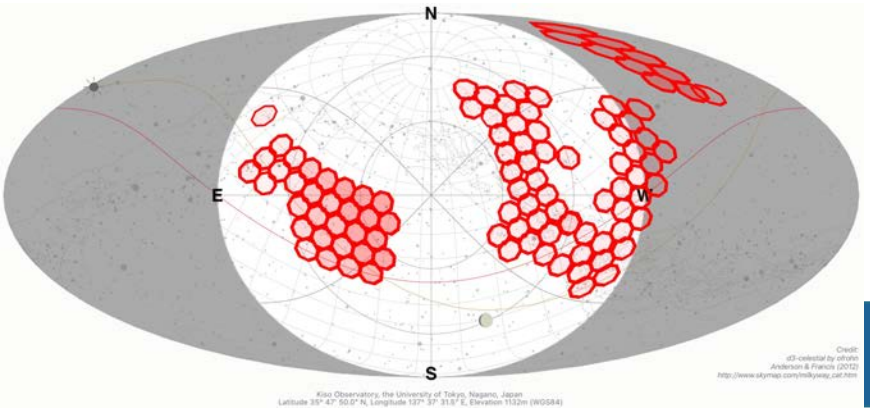


e.g. AT2018cow (Perley+19)

Tomo-e Gozen超新星サーベイ

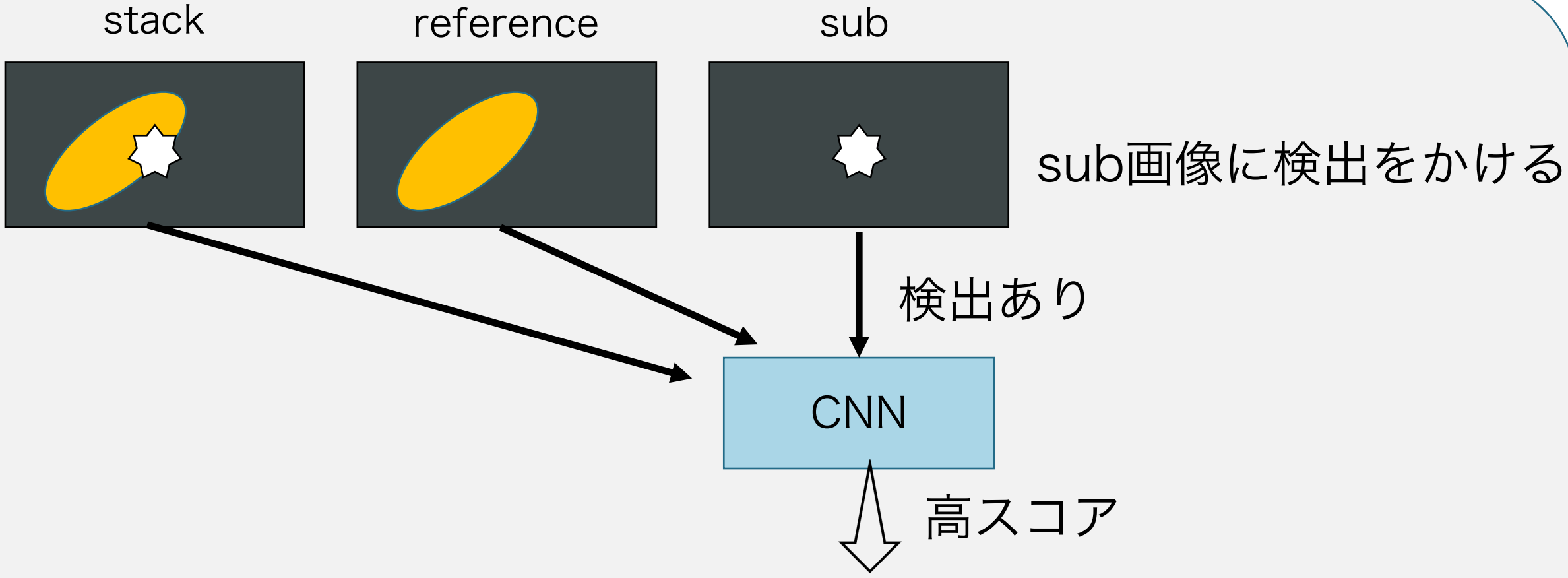
広範囲(前半夜) **高頻度(後半夜)**

	All-Sky	High-Cadence
観測面積(一晩)	**$\sim 9000\ \mathrm{deg}^2$**	$\sim 5300\ \mathrm{deg}^2$
各領域の観測回数(一晩)	1回	3-8回
露光時間	0.5s × 18	0.5s × 12

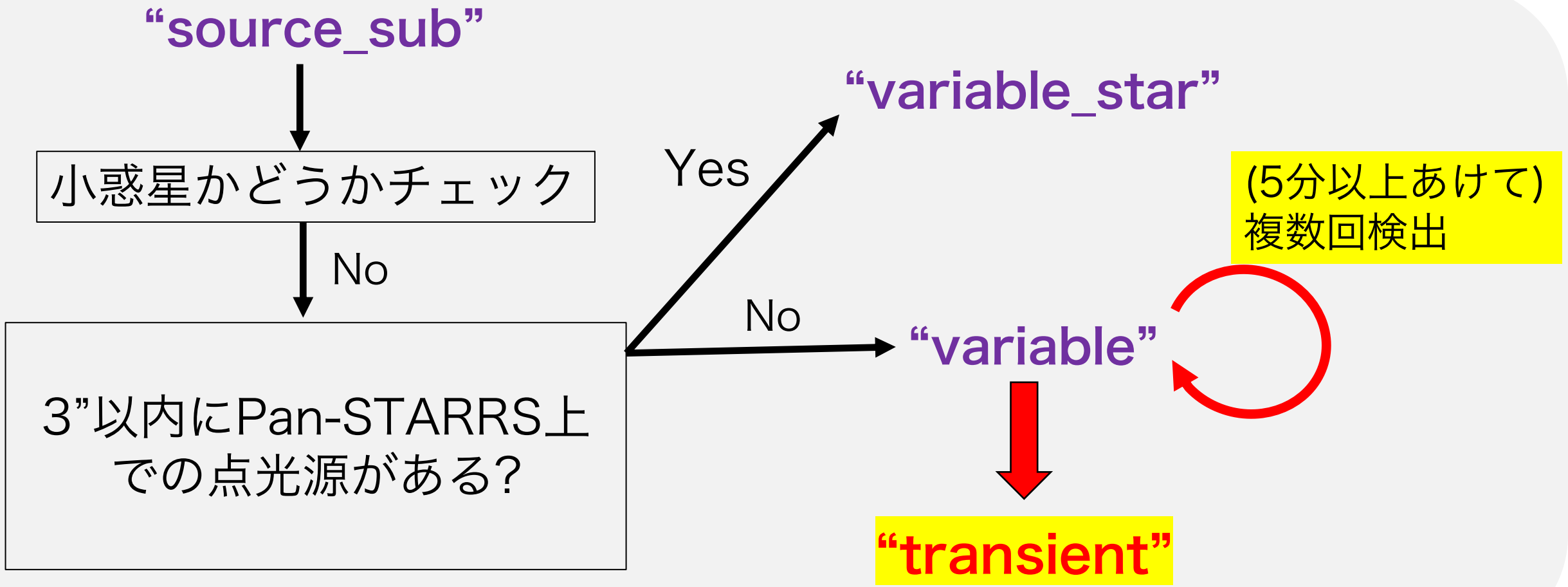


これらの観測で突発天体を捉えようとしている。

現状の突発天体検出パイプライン



現状の突発天体検出パイプライン



Tomo-e Gozen超新星アラート

もっともらしい1回検出は ”variable”

複数回 “variable” と判定されると “transient”に昇格。

- 星野さん(2023年度電通大卒)の取り組んだ超新星アラート：

transientの特徴量に対して機械学習を用い、

1. **真の天体か誤検出か**
2. 真の天体である場合、 **超新星かそうでないか**

のスコアを出し、高スコアのものについては通知する

Tomo-e Gozen超新星アラート

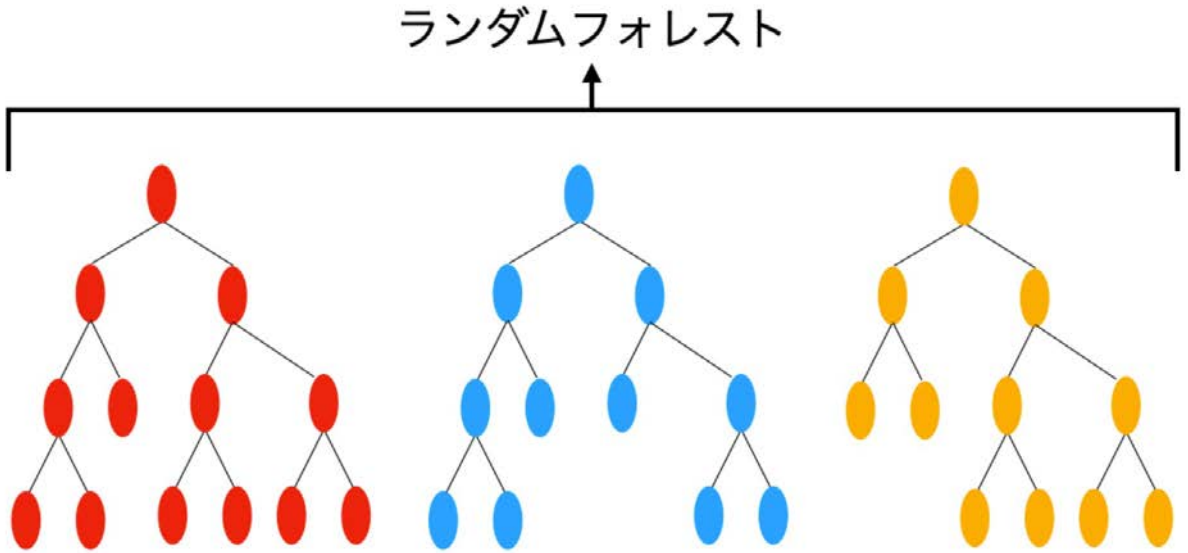
超新星アラートでは ランダムフォレスト を採用。

検出間隔、等級、近くの銀河までの距離 など

- 決定木
  木構造を用いて**特徴量**で**分岐**させ、データを分類する手法。

- ランダムフォレスト

  決定木を複数組み合わせ、
  それぞれの**結果を多数決**して
  結果を出力する手法。



星野さん修論より

Tomo-e Gozen超新星アラート

- 超新星アラートが導入されて以降、Tomo-e Gozenチームは複数の超新星の第一報告者となっている。

SN2024acn

- Discovery : 1/13
- Type : SN IIn
- z = 0.031
- peak : 1/26 (ZTF-r)

SN2024ahe

- Discovery : 1/12
- Type : SN Ia (91T-like)
- z = 0.014
- peak : 1/27(ZTF-g)

SN2024iez

- Discovery : 5/3
- Type : SN Ia
- z = 0.075
- peak : ~5/10

現状の突発天体パイプラインの問題点

「複数回検出」により transient のラベルが付けられ、超新星アラートなどの処理に繋がる。

しかし、現状のパイプラインでは以下の問題点がある。

- **問題点①：2回目の検出まで間隔があくと初期の観測の機会を逃してしまう**
- 問題点②：現状では、再増光の情報が埋もれてしまう恐れがある

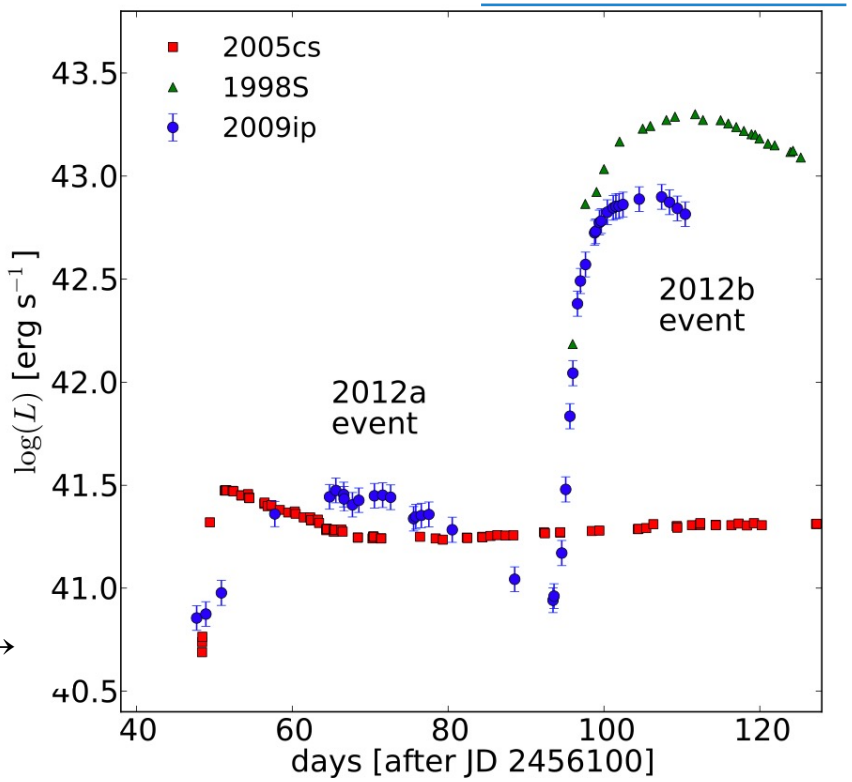
現状の突発天体パイプラインの問題点②

「複数回検出」により transient のラベルが付けられる。

- 問題点②：現状では、再増光の情報が埋もれてしまう恐れ

既知の天体の「再増光」に対応できる
アラートの作成

Pastorello+13



爆発前に増光を示した超新星の光度曲線 →

現状の突発天体パイプラインの問題点①

- 問題点：2回目の検出まで間隔があくと初期の観測の機会を逃してしまう

サーベイモード	All-Sky	High-Cadence
観測範囲	○	△
頻度	△	○
同日に追観測できるか？	○	△

1晩に1回しか観測しないため、“variable” 止まり

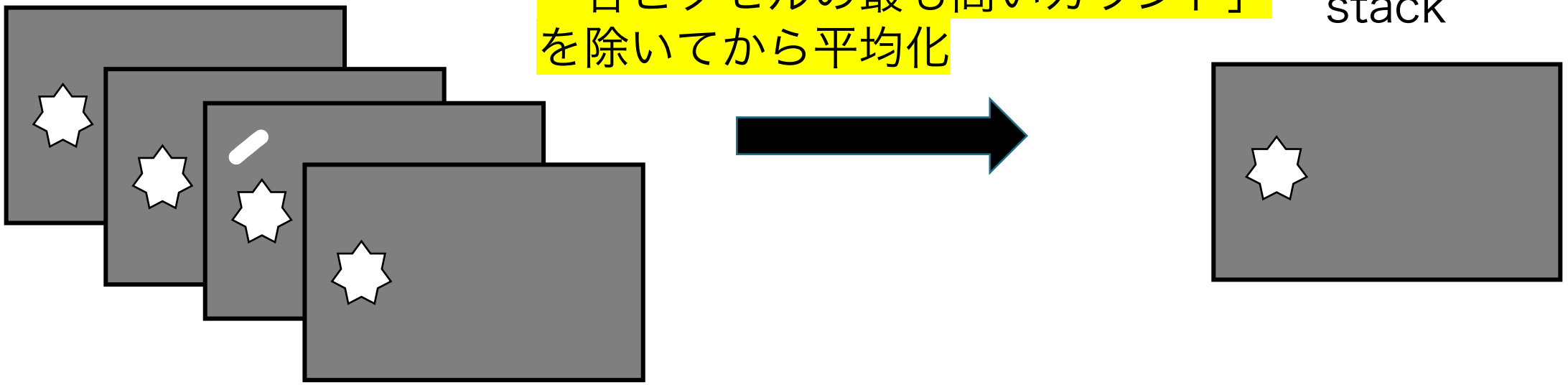
後半夜のため、同日の追観測は難しい

現状の突発天体パイプラインの問題点①

- 小惑星については、カタログとの付き合わせで
- 人工天体については、以下のstack画像を作る処理で

除くことができているはず。

「各ピクセルの最も高いカウント」を除いてから平均化



現状の突発天体パイプラインの問題点①

- 問題点：2回目の検出まで間隔があくと初期の観測の機会を逃してしまう

本研究の目的：

早期発見・将来的には即時追観測へ

All-Sky Survey の1回検出時点での情報を有効活用する

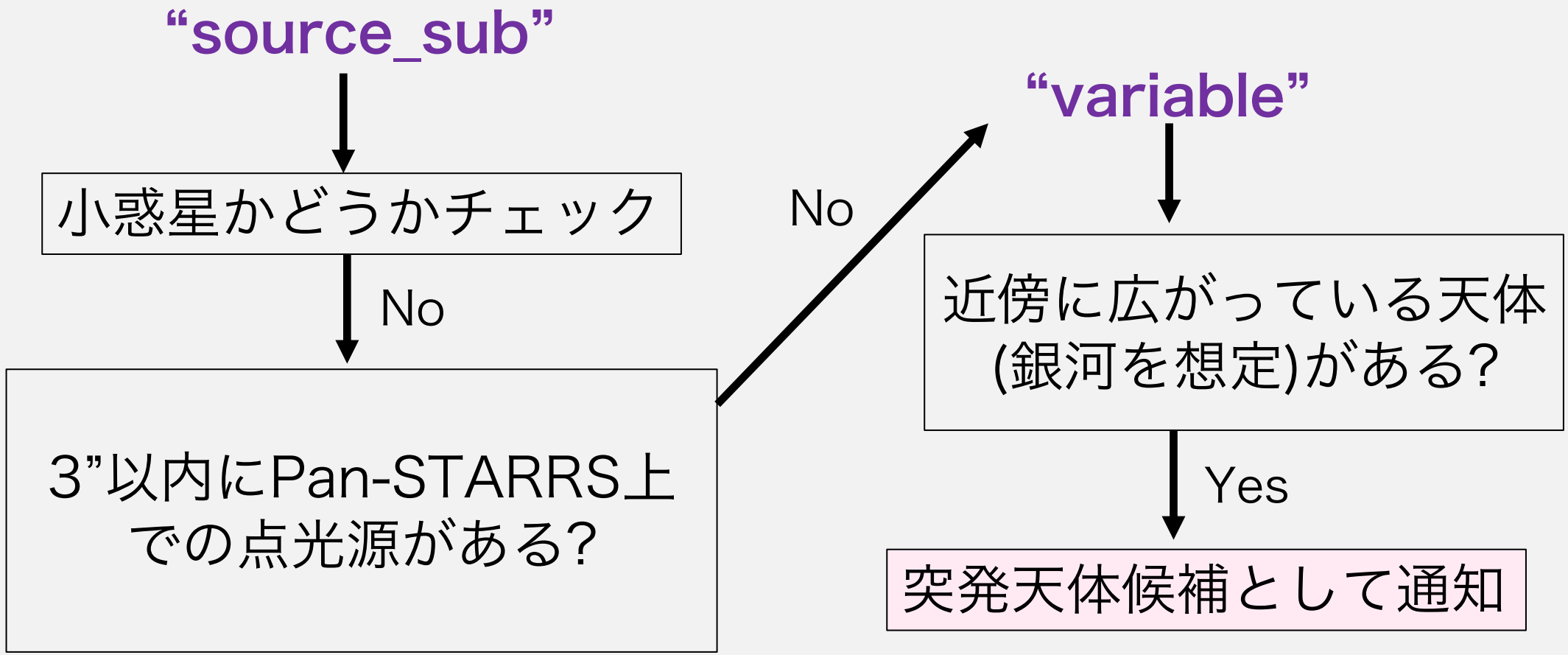
これを達成するため、

1. 試験的な1回検出アラートの作成、評価
2. 1回検出の誤検出についての調査　　を行った。

目次

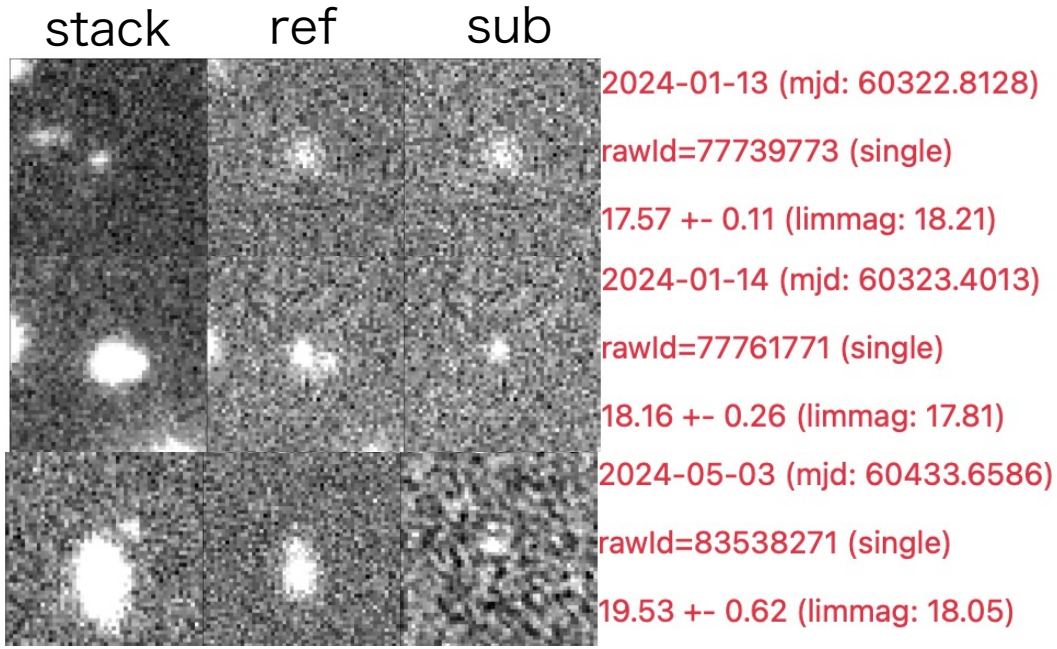
1. introduction
2. method
3. result
4. discussion
5. まとめ

試験的な「1回検出アラート」の作成



データ：Tomo-e 1回検出の候補天体

2024acn, 2024ahe, 2024iezの1回目の検出



右の条件を満たすものを抽出し、
その傾向を調査した。

- ‘variable’ ラベル
  - CNN score > 0.85
  - 対応する21等より明るい小惑星がない
  - 3”以内にPan-STARRS点光源がない
  - 1度目の検出
- CNN score > 0.999
- 50”以内に PS1-STRM銀河
  - ➢ (Pan-STARRSの機械学習分類)

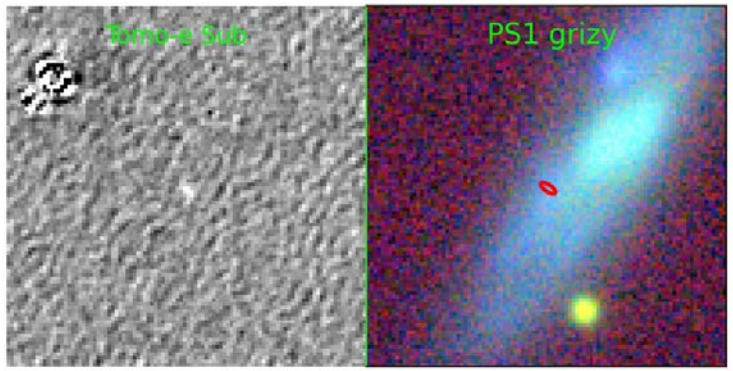
目次

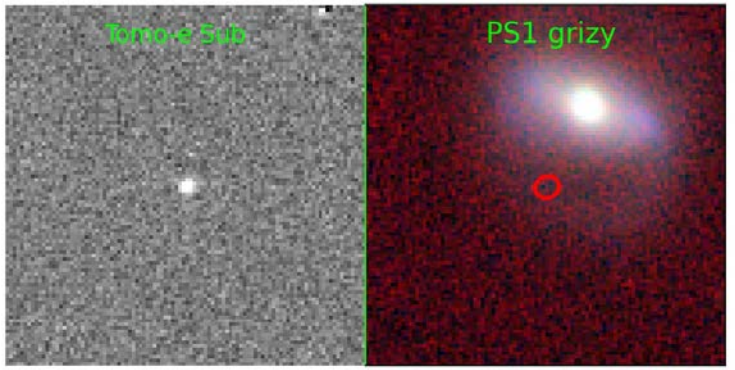
1. introduction
2. method
3. result
4. discussion
5. まとめ

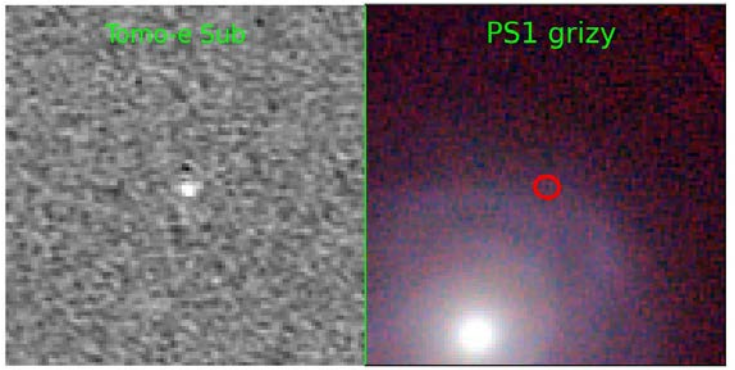
1回検出候補天体の結果

- 5/4以降の 高スコア “variable” 625個のうち、50”以内にPS1-STRM銀河があったのは87個。
- 1つの画像に複数枚該当する天体があり、画像の枚数は73枚

- 3つについては真の突発天体



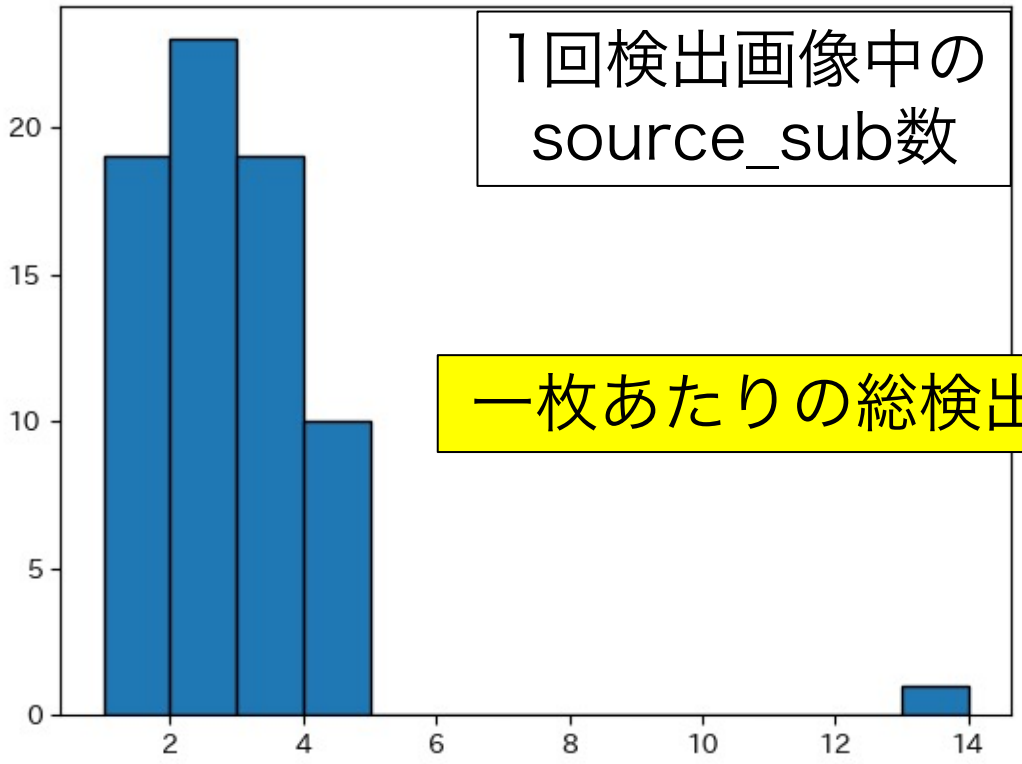


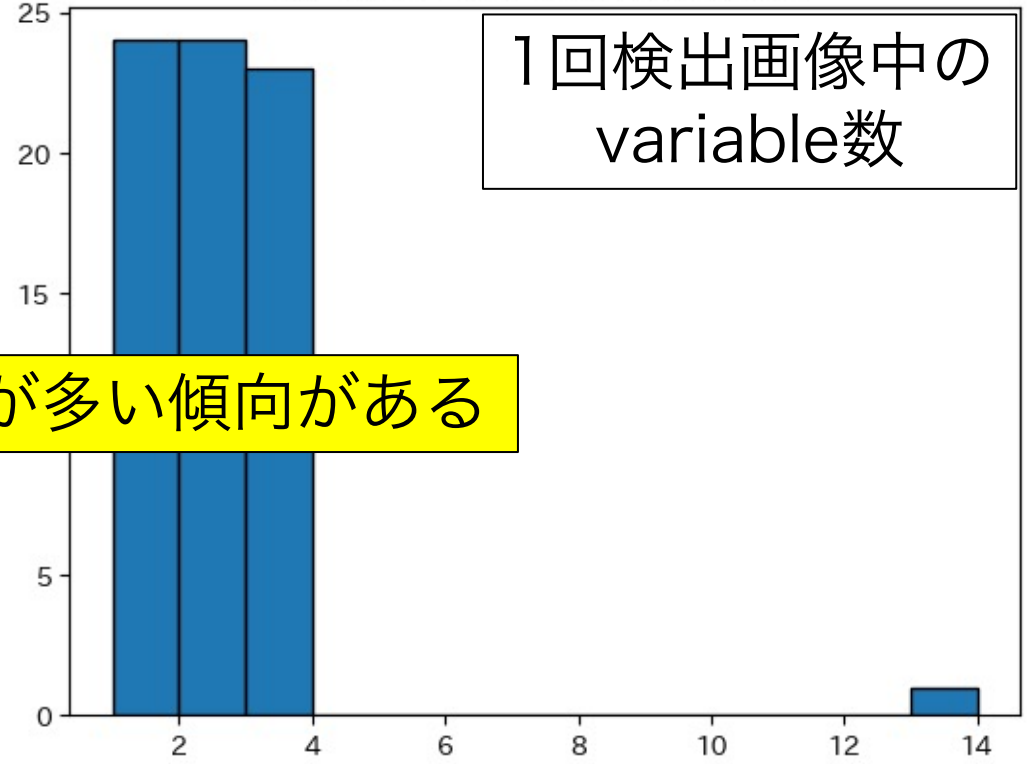


1回検出候補天体の結果

直近100万枚 ：source_sub→ 0.23件/画像1枚

variable → 0.04件/画像1枚 と比較。





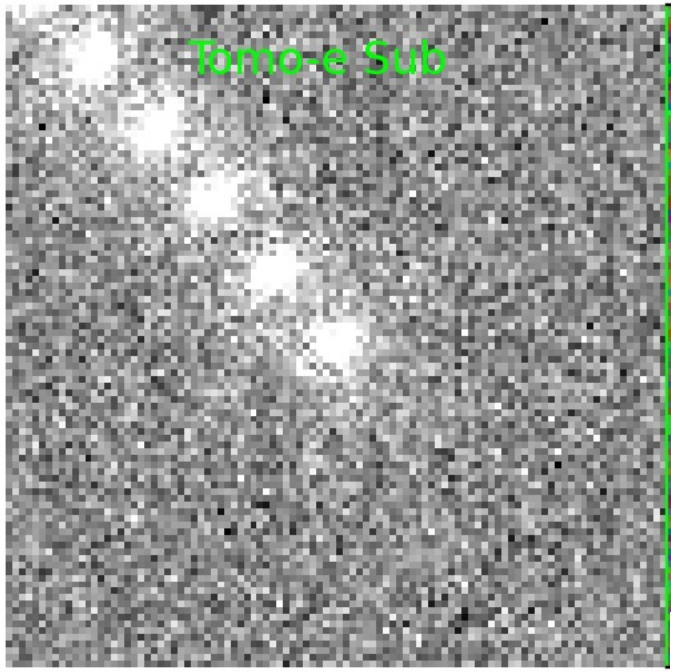
一枚あたりの総検出数が多い傾向がある

Tomo-e 1回検出の候補天体

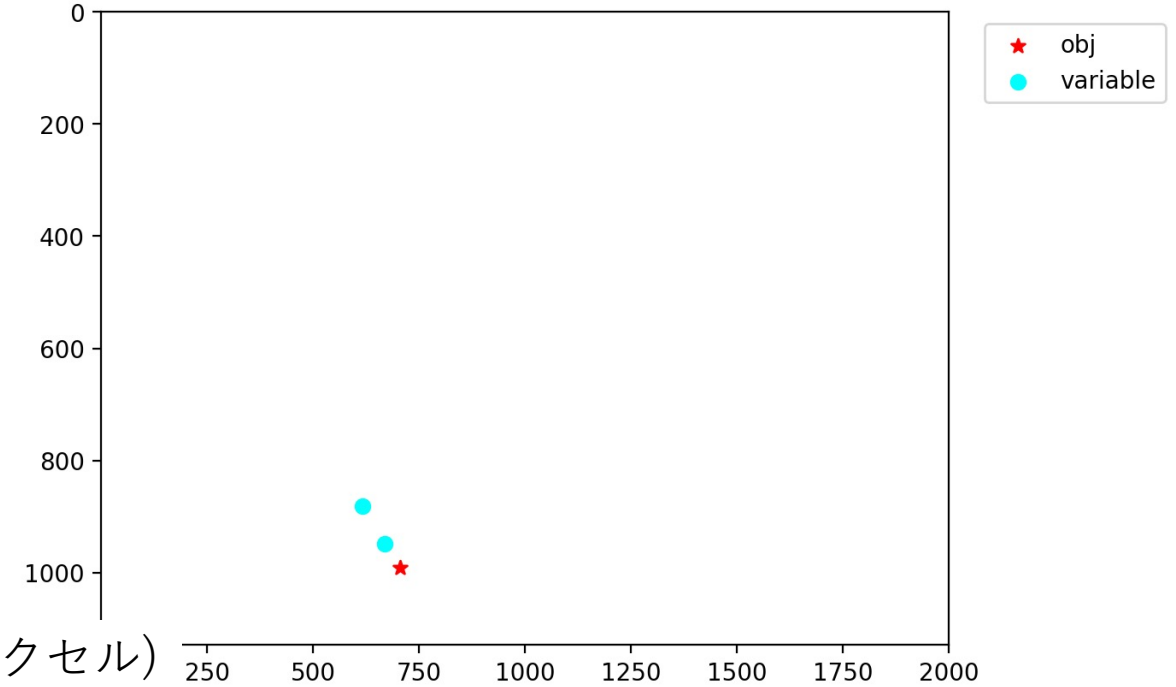
- 「1回検出」でのコンタミの多くは速い人工天体と考えられる。
  - ➢**2回検出 という条件は有効である。**

1回検出でのコンタミの例

カットアウト



同一画像全体での検出位置

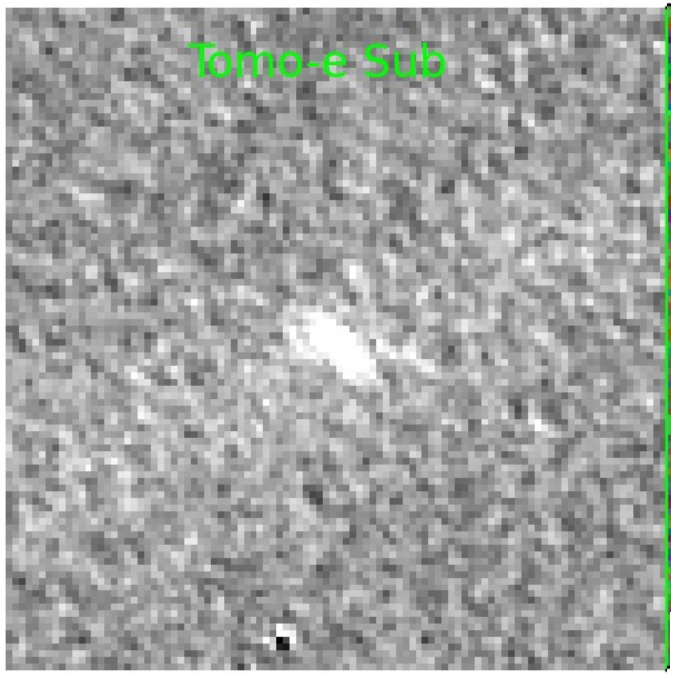


Tomo-e 1回検出の候補天体

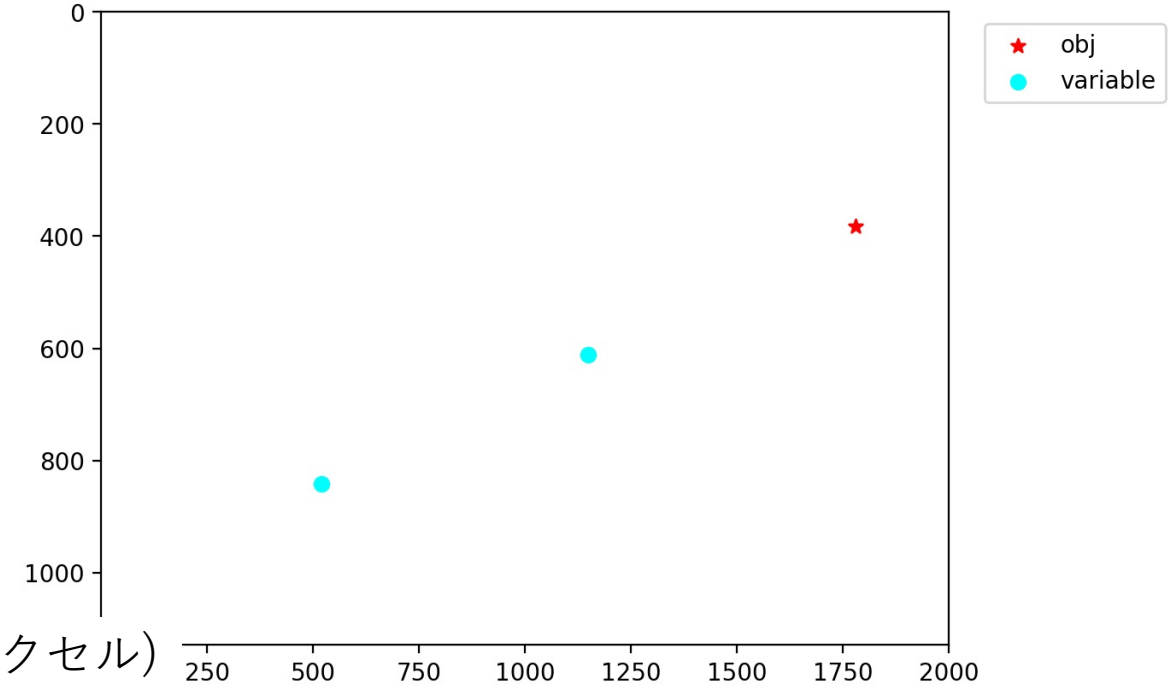
進行方向と長軸が直交する楕円が目立つ。

1回検出でのコンタミの例

カットアウト



同一画像全体での検出位置

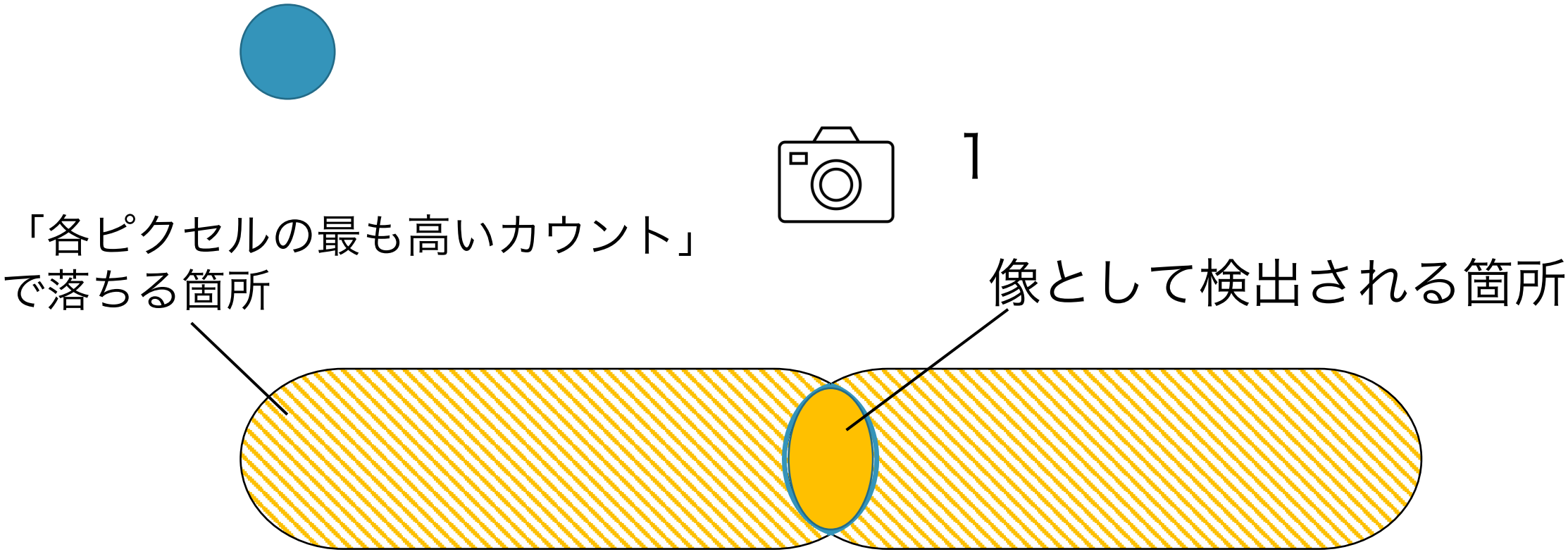


目次

1. introduction
2. method
3. result
4. discussion
5. まとめ

議論：どのように楕円の特徴を解釈する？

- 人工天体(速い移動天体)の像



議論：即時性と正確性の両立

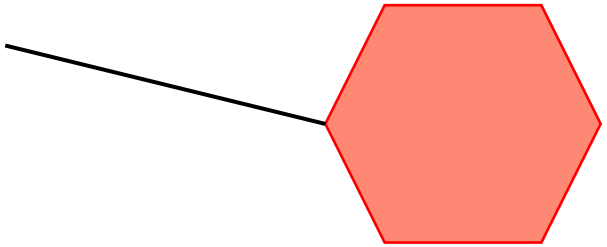
- 「1回検出」でのコンタミの多くは移動天体、特に人工天体。
  - **2回検出 という条件は有効である。**
- 一方、All-Sky Surveyの1日1回の観測では早期に発見して、同日の追観測まで行うのは難しい。

一回のpointingで「2枚続けて撮る」観測の提案

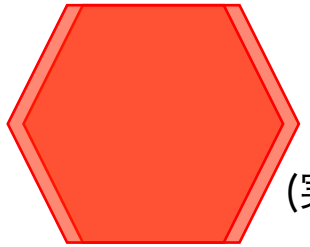
議論：「2枚続けて撮る」観測の実現可能性

現行のAll-Sky：
1回のpointingで1回撮影

Tomo-e
1回の撮影範囲



提案：
1回のpointingで2回撮影（**超短時間間隔**）



(実際には完全に重なる)

All-Skyのサーベイ面積を維持する場合：

望遠鏡の移動時間は抑えられるため、**必要な観測時間は2倍ではなく1.5倍程度**になる。

現実的な即時追観測のためには、サーベイパターンの修正が必要

今後の展望

- 移動天体と思われる像の傾きについて、像が並んでいる方向との関連性を調べる。
  - パラメータの議論に結びつけ、解釈が正しいか、**候補天体絞り込みパラメータとして有用かを判定**する。

- **「2枚続けて撮る」観測の実現可能性を議論**
  - サーベイ範囲の減少率・取得データ枚数の増加率を詳細に計算
  - ~5分間隔の観測 (GW/GRB follow-up) の結果の調査

まとめ

- Tomo-eで複数個の突発天体の発見報告
  - ➢突発天体の早期発見・追観測が期待される
- より多くの天体を発見するために、All-Sky Surveyの1回検出を活用したい
  - ➢一回検出の突発天体候補(“variable”) の多くは速い人工天体
- 速報性の観点から、同一箇所を2枚続けて撮るサーベイ が有効だと考えた。

今後はその実現可能性・有効性を検証していく。