

# JASMINE アストロメトリ 解析ソフトウェアの開発

大宮 正士

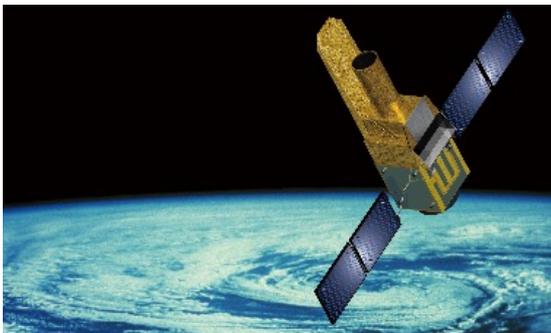
アストロバイオロジーセンター / 国立天文台

山田良透 (京大), 河田大介 (UCL), 上塚貴史, 河原創, 大澤亮 (東大), 片坐宏一 (JAXA),  
立川崇之 (高知高専), 服部公平 (統数研), 平野照幸 (ABC/国立天文台),  
福井暁彦 (東大), 吉岡諭 (海洋大), Wolfgang Löffler (ARI Heidelberg),  
臼井文彦 (JAXA), 泉浦秀行, 三好真, 矢野太平, 辰巳大輔, 郷田直輝 (国立天文台),  
JASMINE データ解析ワーキンググループ

---

## 目次

- ◆ JASMINE におけるデータ解析
- ◆ JASMINE データ解析WGの活動
- ◆ JASMINE 解析パイプライン開発の現状



# JASMINEにおけるデータ解析

## ◆ JASMINE成功に向けた4つのキー要素

- ◆ 望遠鏡組み立て調整
- ◆ 検出器サブシステム
- ◆ コスト
- ◆ 地上でのデータ解析 ← 重要！

## ◆ 目標： 最高 $25\mu$ 秒角の精度を実現するデータ解析

- ◆ 年周視差精度：25~125 マイクロ秒角
  - ◆  $25\mu$ 秒角 → 銀河中心での距離の誤差が20%に相当（銀河中心まで距離~8kpcと仮定）
- ◆ 固有運動精度：25~125 マイクロ秒角/年
  - ◆ 銀河中心での速度の誤差が1~5 km/sに相当

## ◆ JASMINEに合わせたデータ解析ソフトウェア制作の大きな方針

- ◆ HSTなどの衛星観測で用いられてきた解析手法を採用し独自の仕様に落とし込む
- ◆ コーディングとパイプライン構築をメーカーに委託
  - ◆ 高精度で可読性が高い解析ソフトウェアを効率的に開発が可能に
- ◆ データ解析ワーキンググループで議論・検討

# 推進体制

## JAXA宇宙科学研究所

片坐宏一(プリプロジェクト候補チーム長)  
臼井文彦、磯部直樹、和田武彦(検出器開発)

## 国立天文台 JASMINEプロジェクト

プロジェクト長:郷田直輝  
鹿野良平、上田暁俊、小宮山裕(併任)、辰巳大輔、辻本拓司、馬場淳一、三好真、矢野太平、鹿島伸悟、宇都宮真、間瀬一郎

## E2Eシミュレーショングループ(データ解析WG)

グループ長:山田良透(京都大学)

鈴木大介(ISAS)、河原創、上塚貴史、平野照幸、大澤亮、福井暁彦(東京大学)、大宮正士、泉浦秀行、津久井崇史(国立天文台)、服部公平(統数研)、立川崇之(高知工専)、吉岡諭(東京海洋大)

## 国立天文台 先端技術センター

センター長:鶴澤佳徳  
技師長:平林誠之、  
満田和久(技術主幹)、  
末松芳法(光学)、中屋秀彦(検出器)、大淵喜之 & 浦口史寛(熱構造)

## Exo-JASMINE チーム(トランジット観測による地球型惑星探査)

河原 創(チーム長:東大)、増田賢人(阪大)、小玉貴則、福井暁彦(東大)、葛原昌行、大宮正士、小谷隆行(ABC/NAOJ)、平野 照幸(東工大)、山田亨(ISAS)

## JASMINE Consortium

WG-A(Data Analysis) **WG-B(Science Validation and Preparation)** WG-C(Outreach)  
リーダー:河田大介 (MSSL/UCL)、国内外60名の研究者(2021年4月現在)

White  
Paper  
の  
執筆

# 国際協力

## ARI Heidelberg University

Michael Biermman, Wolfgang Löffler

## U.S. Naval Observatory

Bryan Dorland, Nathan Secrest



# データ解析ワーキンググループ

2021 年春季年会 V242a 講演参照

## E2Eシミュレーショングループ(データ解析WG)

グループ長: 山田良透(京都大学)

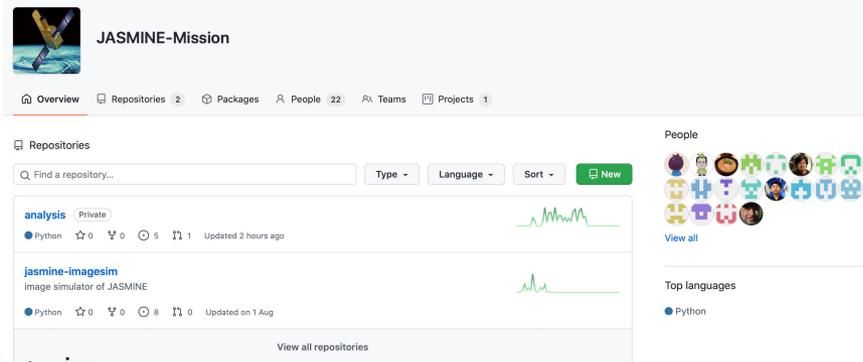
鈴木大介(ISAS)、河原創、上塚貴史、平野照幸、大澤亮、福井暁彦(東京大学)、大宮正士、泉浦秀行、津久井崇史(国立天文台)、服部公平(統数研)、立川崇之(高知工専)、吉岡諭(東京海洋大)

### ◆ 目的

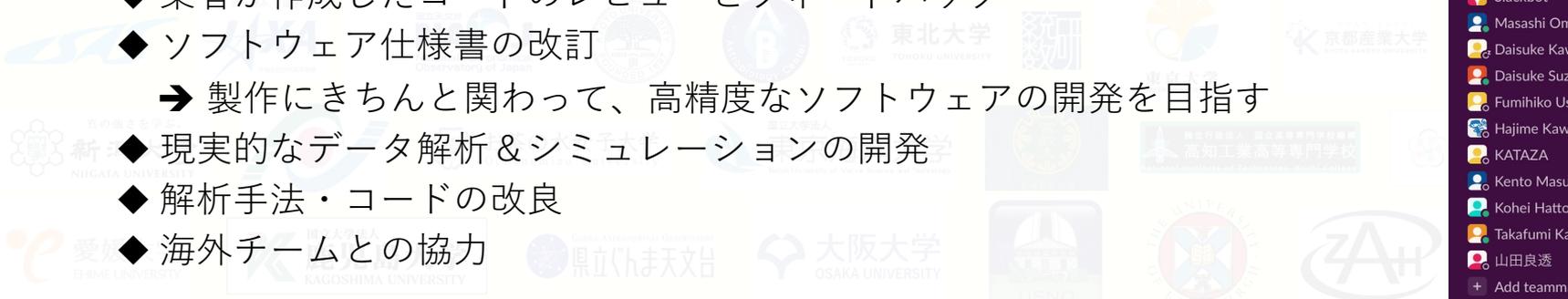
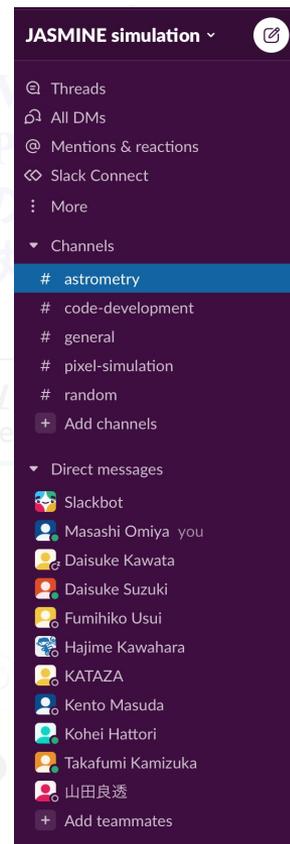
- ◆ JASMINE用データ解析ソフトウェアの製作
- ◆ End-to-End simulationの構築

### ◆ 仕事内容

- ◆ 週1回のミーティング
- ◆ slackでの議論
- ◆ githubでのコードの共有・開発
- ◆ 業者とのやりとり
- ◆ 業者が作成したコードのレビューとフィードバック
- ◆ ソフトウェア仕様書の改訂
  - 製作にきちんと関わって、高精度なソフトウェアの開発を目指す
- ◆ 現実的なデータ解析&シミュレーションの開発
- ◆ 解析手法・コードの改良
- ◆ 海外チームとの協力



jasmine-imagesim  
<https://github.com/JASMINE-Mission/jasmine-imagesim>



# データ解析の流れ

## A: 星像中心推定

1. PSF形状を観測データから推定
2. Bayes splineを用いてePSFを構築する
3. 構築したePSFをfitし、星像中心を推定

精度への影響：光学特性、変動、7秒以下の姿勢擾乱、  
検出器特性、ePSF構築アルゴリズム

## B: フレーム歪み（主に光学歪み）の補正

同じ星は1フレーム内では動かないと仮定して

- ・ 5次多項式で表現した歪み
  - ・ ピクセル毎のサイズ不均一
  - ・ 星位置
- を同時に解く

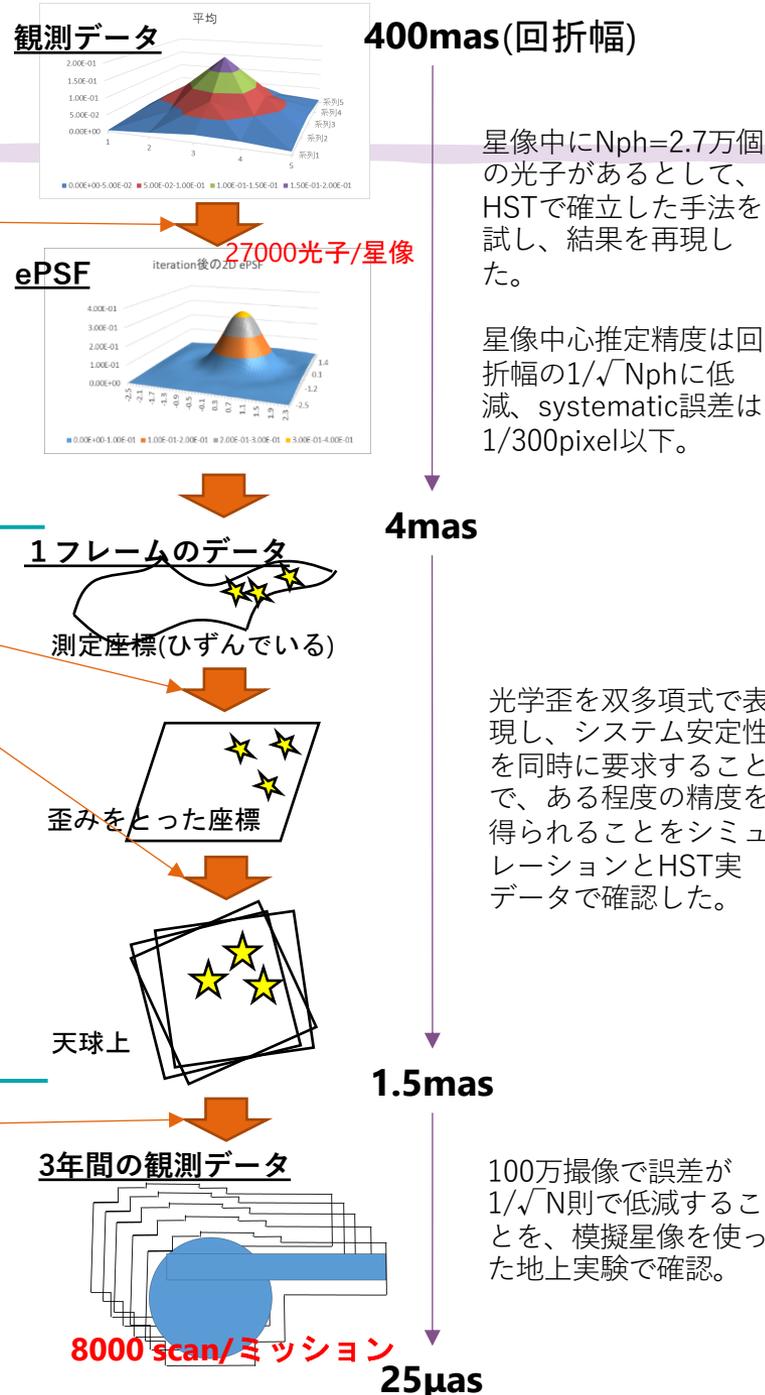
精度への影響：光学系性能、光行差、望遠鏡熱変動、  
検出器の製造由来誤差、放射線  
フィルタの歪み、照合する星の数や明るさ

## C: 位置天文パラメータ推定

8000 scan/ミッション（3年間）の観測データから、

1. 絶対位置とスケールをGAIA星を基準に決定する
2. 各星の位置天文パラメータを推定する

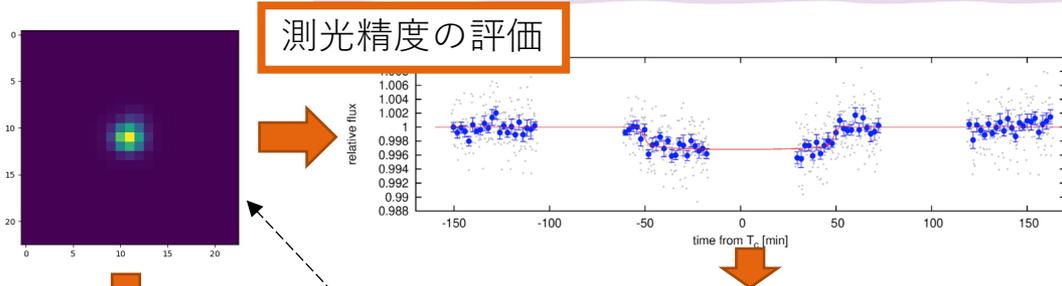
精度への影響：検出器歪み、参照するGAIAの星の明るさ  
近接する星のPSFのテール、拡散天体



# End to End (E2E) simulation

データ1 Jasmine-imagesim で  
<https://github.com/JASMINE-Mission/jasmine-imagesim>  
現実的な模擬データを作成した

データ2 PSFをガウス分布と仮定した  
単純な模擬データを作成した



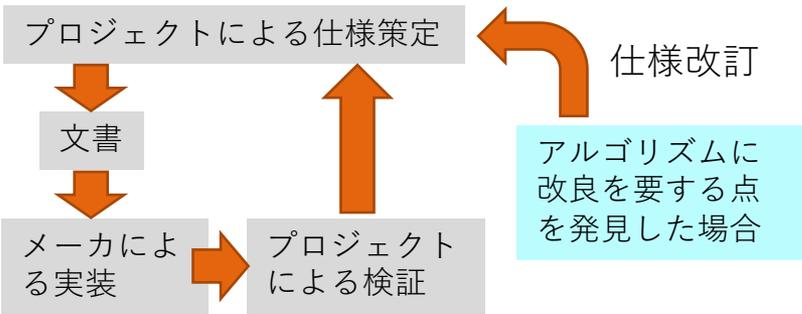
測光精度の評価

系外惑星トランジットの成果評価  
キャリブレーション方法の検討

位置解析精度の評価

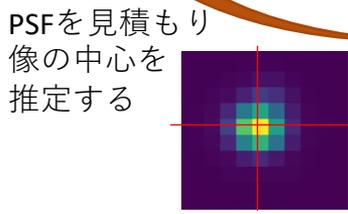
衛星の位置、速度⇒星が見える方向  
衛星の姿勢⇒像面で結像する位置  
画像歪、検出器歪⇒結像位置(pixel単位)  
PSF形状、星の色、ノイズ⇒光が作る像の形  
検出器特性⇒電氣的に得られる像の形

## 位置解析ソフトウェアの制作

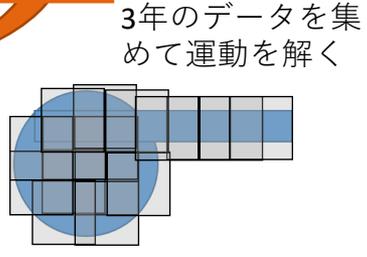


メーカーが制作したパイプラインを  
少し改良して解析し、結果を調べた

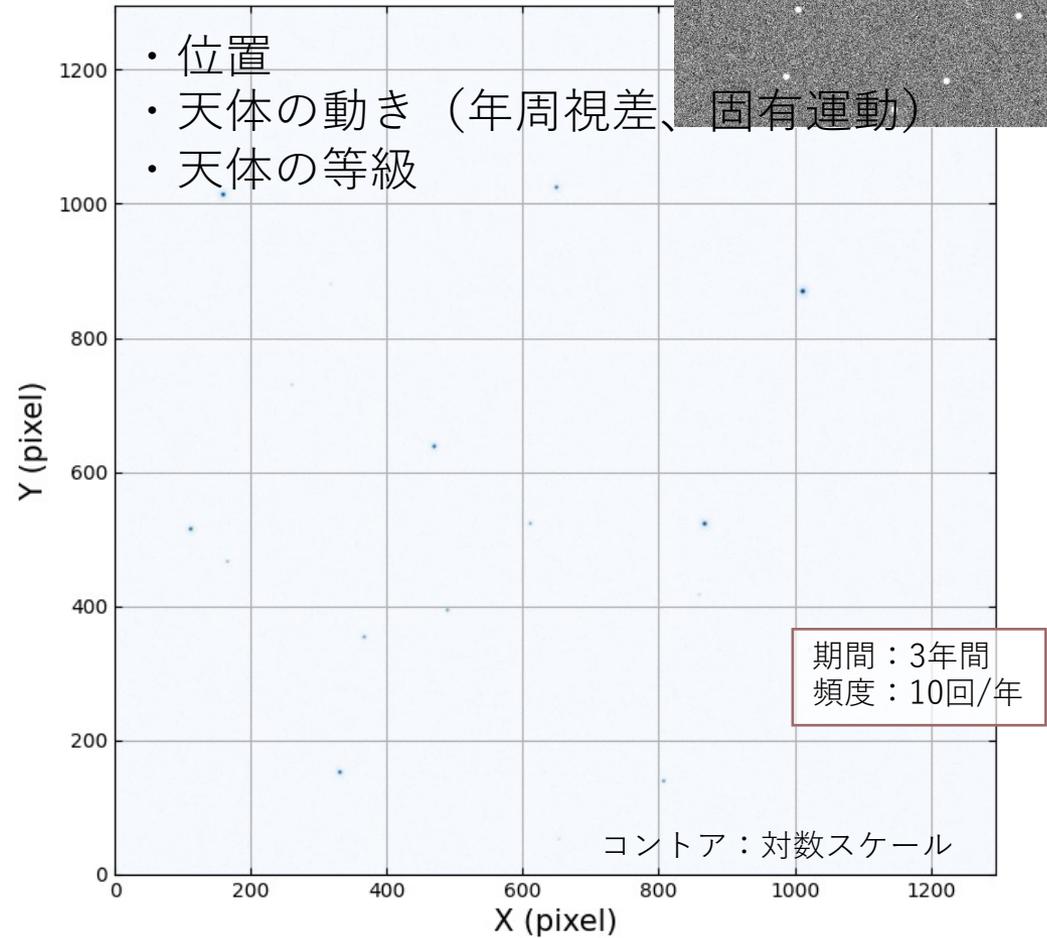
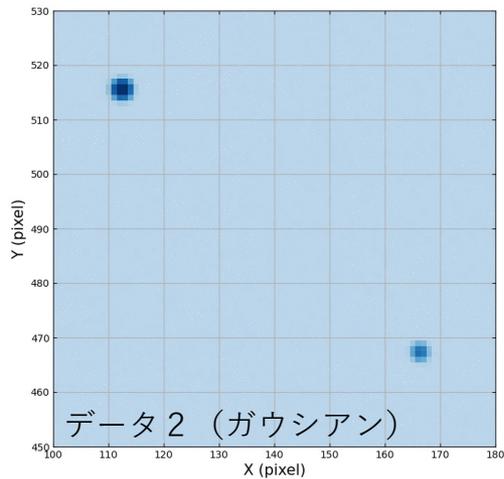
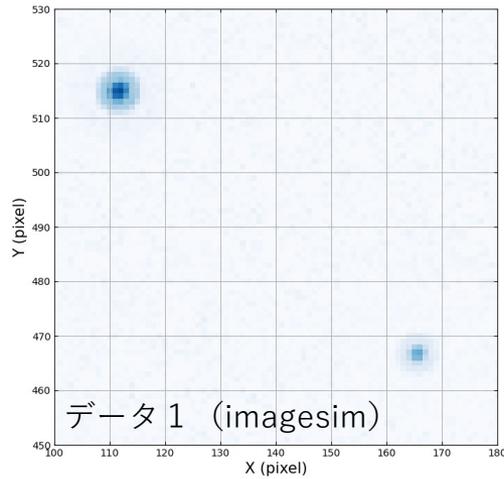
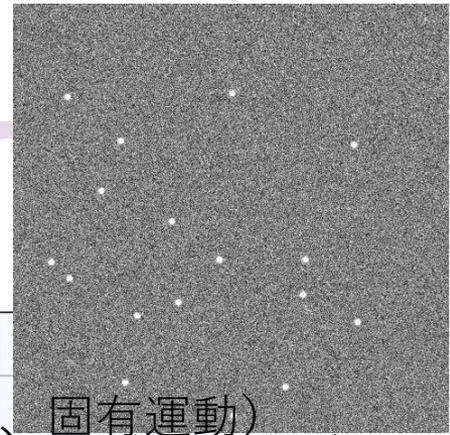
運用計画に反映 ← セルフキャリブレーションで解けない擾乱モードを発見した場合



50分の観測からある時刻の星位置を求める。

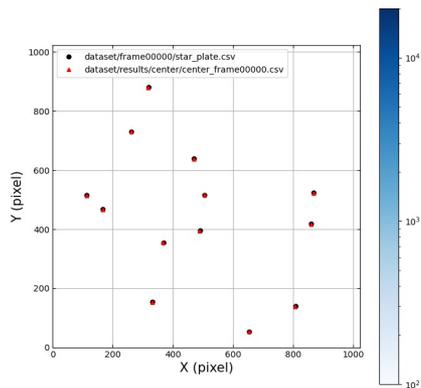


# E2E：模擬データ作成

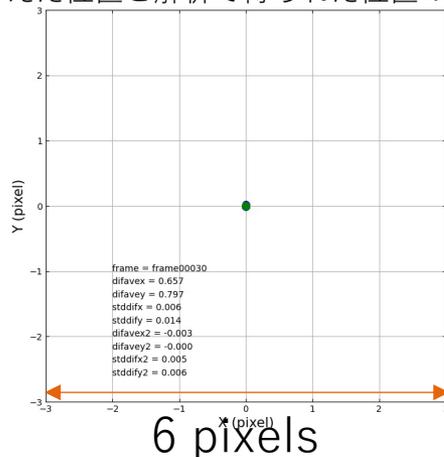


# E2E : 位置測定 1

全星同じ等級Hw=11mag  
PSF=ガウシアン

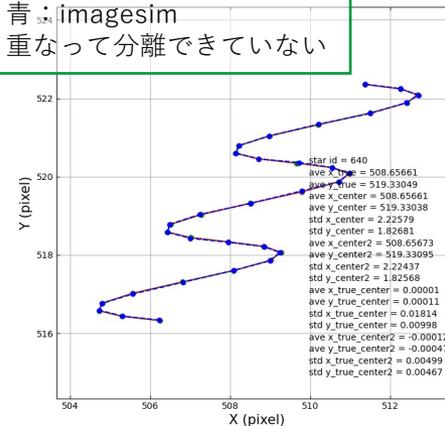


1 フレームの星のばらつき  
与えた位置と解析で得られた位置の差

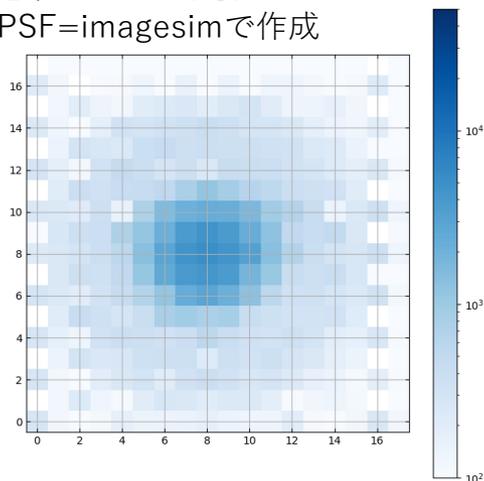


全て同じ等級にした場合

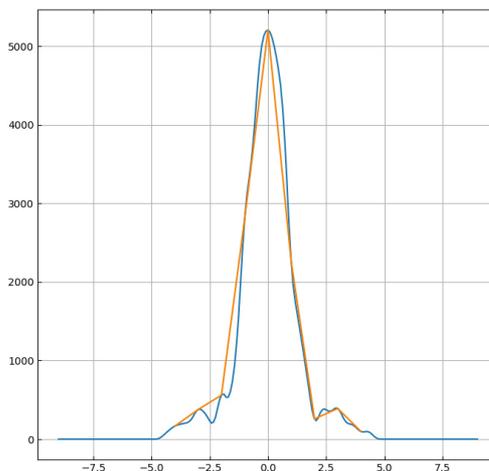
赤 : True  
緑 : mktimeseries  
青 : imagesim  
重なって分離できていない



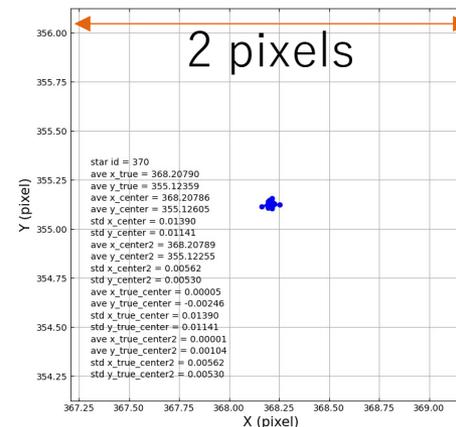
1 フレームのPSF  
PSF=imagesimで作成



1フレームのPSF (x=0)



1星のばらつき (31枚)



ただ、これ以降は、想定される値が出てこない。。。

# E2E : 位置測定 2

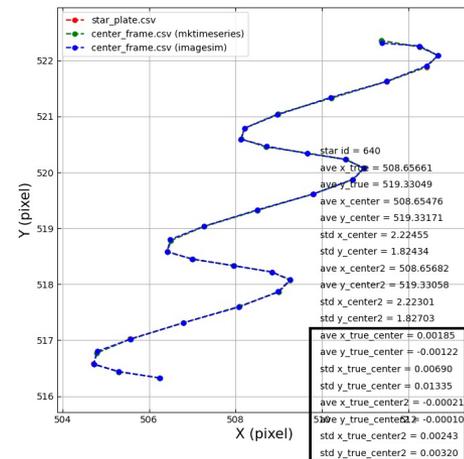
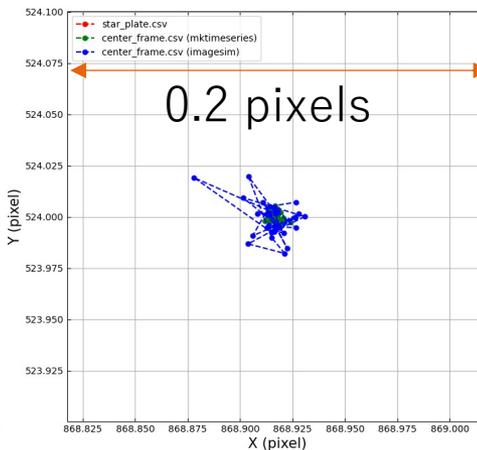
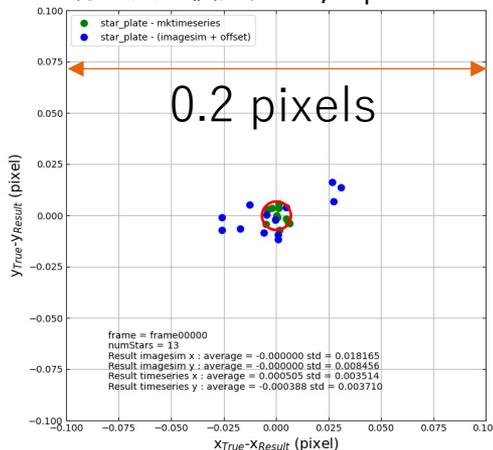
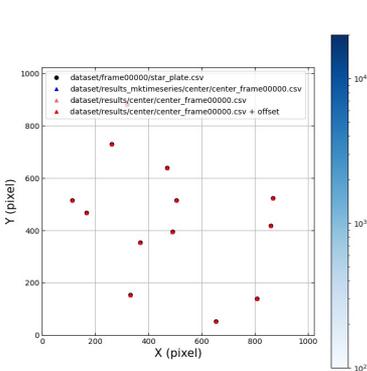
青 (データ1) : imagesim

緑 (データ2) : ガウシアン

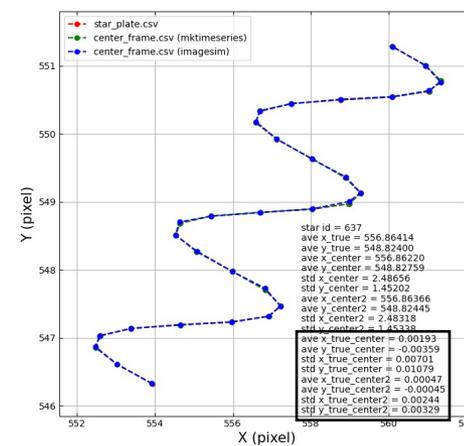
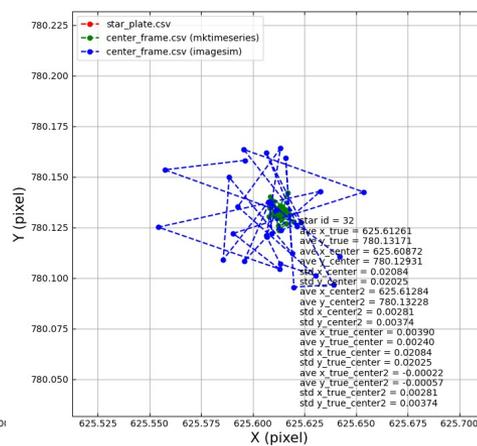
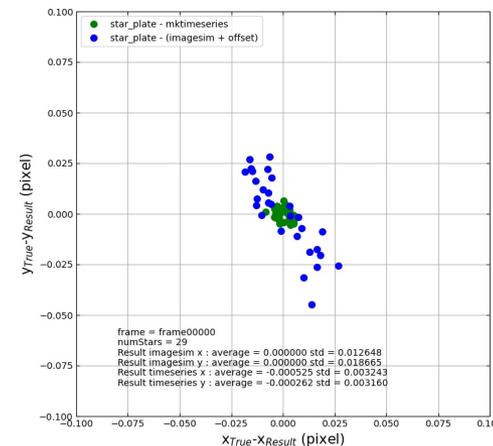
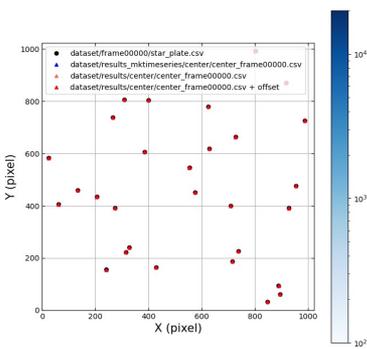
星の数を増やした場合

Nstar = 13

緑の点の標準偏差 $\sim 1/280$ pixel、  
青の点は横方向 $\sim 1/50$ pixel



Nstar = 29

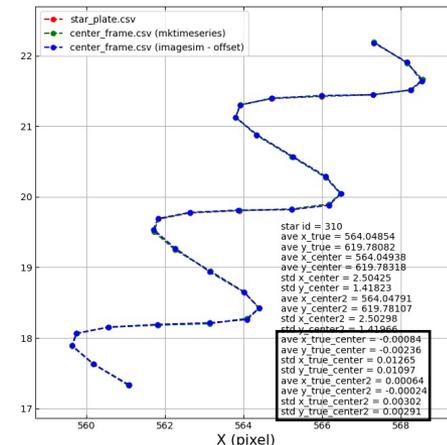
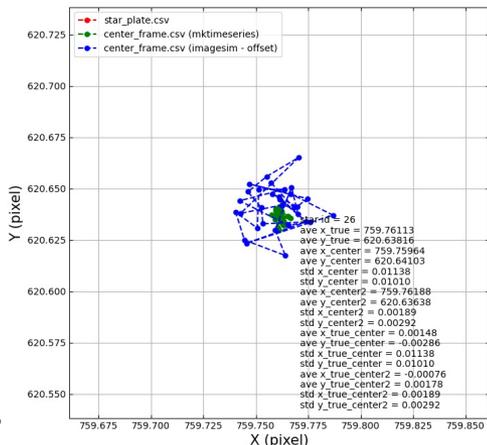
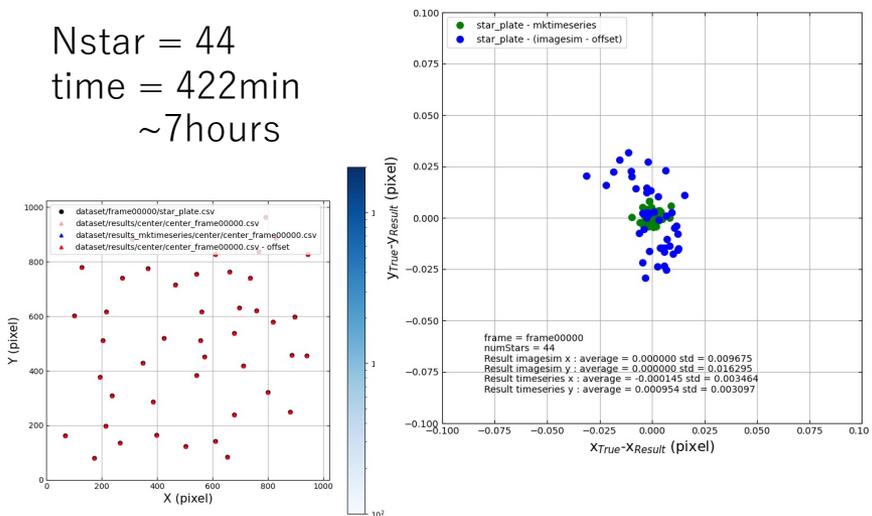


これ以上星の数を多くすると、星が近すぎて解析に悪影響が出る  
 ➔ <50ピクセル以内に別の星を作らないようにした

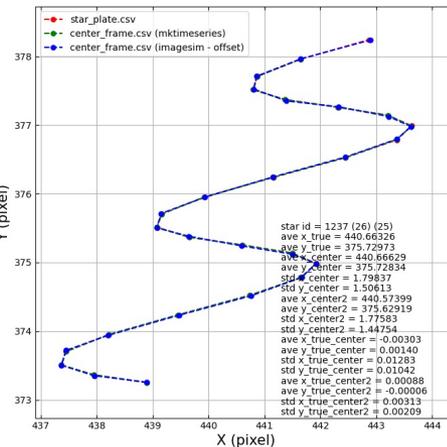
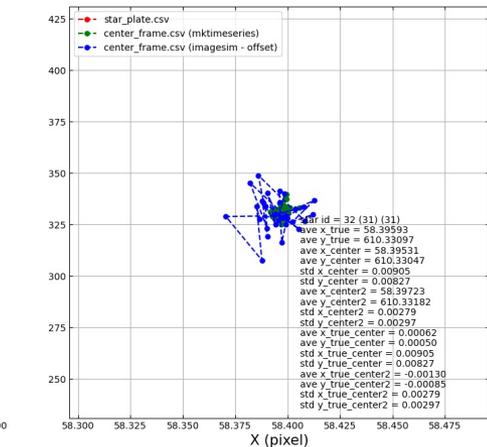
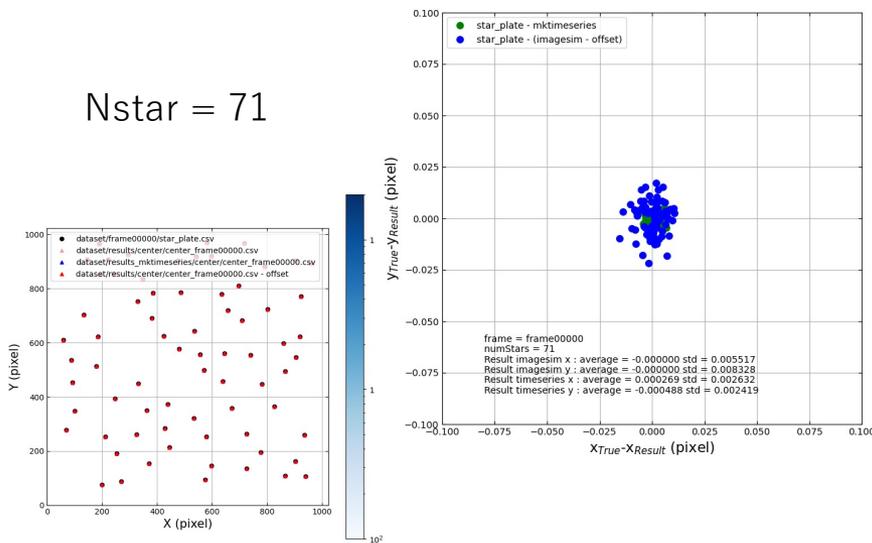
# E2E : 位置測定 3

<50以内に別の星を作らないようにした場合

Nstar = 44  
time = 422min  
~7hours



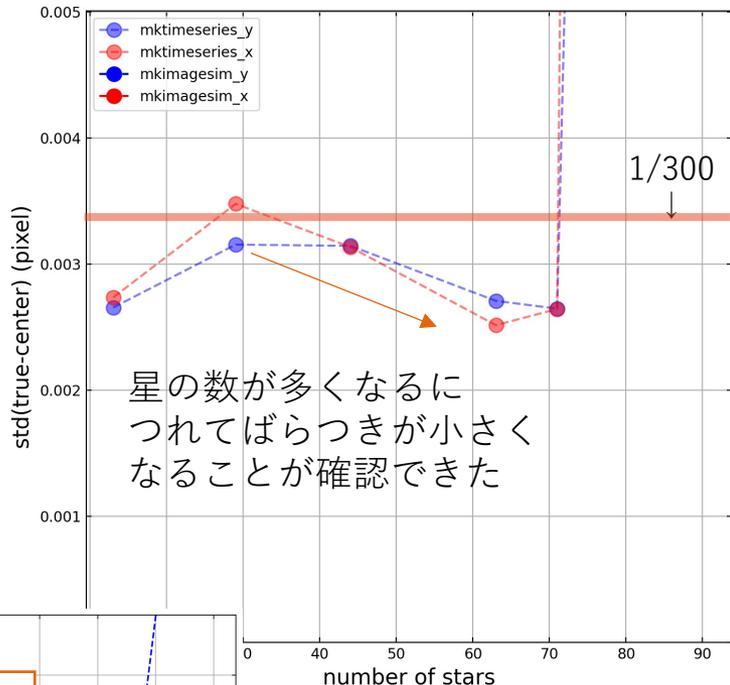
Nstar = 71



# E2E：位置測定 of 星数依存性

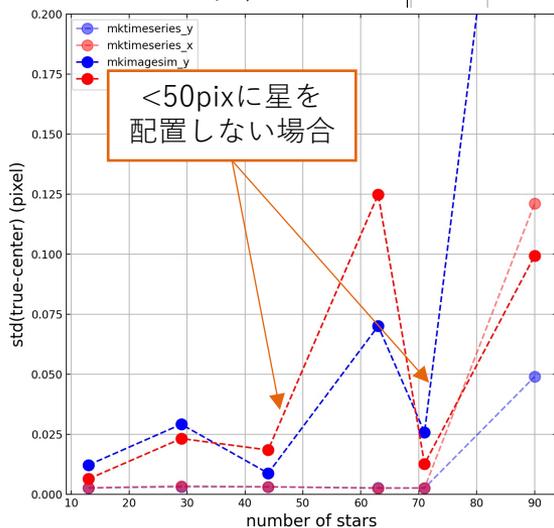
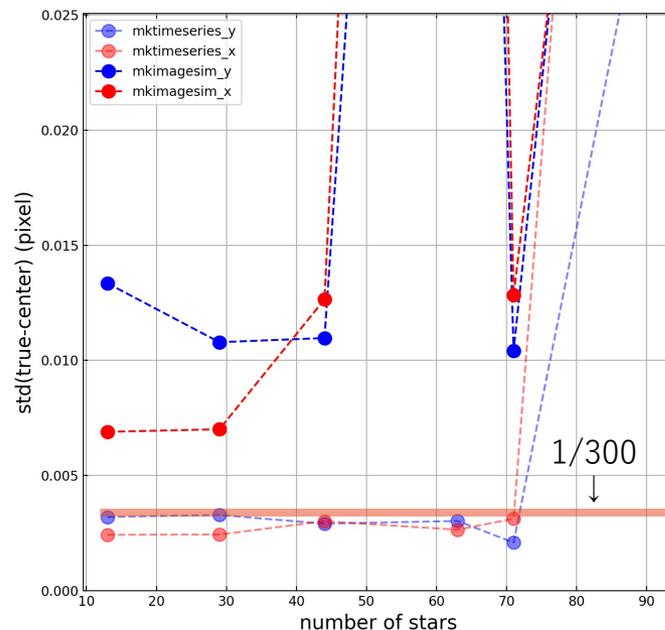
1フレーム内に含まれる星の位置のばらつき

データ作成時に指定した天体位置と解析で推定された位置の差の標準偏差



Nstar = 90以上になるとバラツキが大きくなる → 原因究明必要

解析に用いる星数毎の1星の31フレーム内のばらつき (true - result の標準偏差)



<50pixに星を配置しない場合

星の数

# まとめ&今後の方針

## ◆ JASMINEコンソーシアム データ解析ワーキンググループ

- ◆ JASMINE用データ解析ソフトウェアの製作
- ◆ End-to-End simulationの構築

## ◆ ワーキンググループでの仕事内容

- ◆ 週1回のミーティング、slackでの議論、githubでのコードの共有、海外チームとの協力
- ◆ 業者が作成したコードのレビューとフィードバック、業者とのやりとり、仕様書の作成
  - ◆ 製作にきちんと関わって、可読性が高い高精度な解析ソフトウェアの開発を目指す
- ◆ 現実的なデータ解析&シミュレーションの開発、解析手法・コードの改良

## ◆ 今日の話の内容：E2E simulationで、業者が作成したソフトウェアを検証した

- ◆ シミュレーションと解析のソフトを組み合わせ、模擬データの作成から解析までの流れは作成できた
- ◆ 単純な模擬データを用いた場合、1フレームで~1/280pixelの位置測定精度が達成できることがわかった
- ◆ 歪み推定以降のプロセスは桁外れの値を出力する → コード内の複数のバグなどの原因が考えられる

## ◆ 今後の方針

- ◆ 業者との意思疎通の改善（これまでに困難があった）
- ◆ 解析方法の再検討（特に、歪みの見積もり、星IDの方法、位置天文パラメータ導出）
- ◆ シミュレーションを用いた各パートにおける系統誤差と低減方法の検討
  - ◆ 特に、PSF推定、データの重ね合わせ、位置測定、位置天文パラメータ導出
- ◆ 解析精度のパラメータ依存性調査
- ◆ 星のカタログの情報、観測時刻などを入れた、より現実的なシミュレーションと解析
- ◆ 高速な処理の実現