

# JASMINEのデータ解析 ソフトウェアの構築

山田良透(京都大学大学院理学研究科)、河田大介(Mullard Space Science Laboratory, University College London)、河原創(東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻)、上塚貴史(東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター)、大宮正士(自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター)、大澤亮(東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター)、服部公平(統計数理研究所統計思考院)、立川崇之(高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科)、吉岡諭(東京海洋大学海洋工学部海洋電子機械工学科)、辰巳大輔(国立天文台JASMINEプロジェクト)、片坐宏一(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)、臼井文彦(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)、平野照幸(自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター)、福井暁彦(東京大学地球惑星科学専攻)、越本直季(東京大学理学系研究科)、泉浦秀幸(国立天文台ハワイ観測所岡山分室)、郷田直輝(国立天文台JASMINEプロジェクト)、三好誠(国立天文台JASMINEプロジェクト)、矢野太平(国立天文台JASINEプロジェクト)、Wolfgang Löffler(ハイデルベルク大学)、JASMINEチーム

# Abstract

- 公募型小型3号機に選定されたJASMINEは、位置天文観測衛星であり、データ解析が非常に大きなウェイトを占める。解析と、より現実的な模擬データを生成するためのシミュレーションを行うため、2020年9月より約20名の解析チームで活動を行っている。衛星の姿勢擾乱を含む画像の生成と、これを基にする解析で、高精度を実現できることを実証することが目的である。本公演では、この進捗状況を報告する。

# 可視光位置天文観測衛星Gaia(ESA: 2013年~2025年?)

Gaia

- ・太陽系近傍
- ・広域のハロー星
- ・バルジ/バー構造の上層部
- ・銀河円盤上層部

相補的

Gaiaでは  
測定困難な  
領域あり!

# 赤外線(1.1~1.6 $\mu$ m)位置天文観測衛星

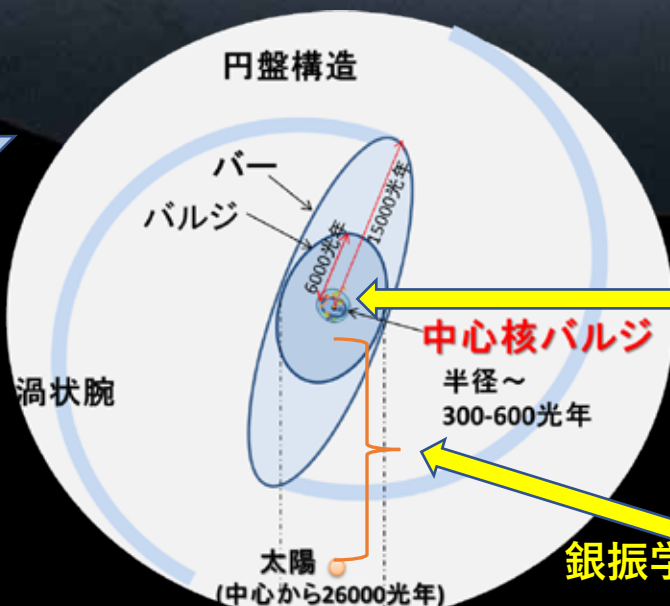
JASMINE

- ・中心核バルジ
- ・中心近くの銀河円盤
- ・星間ガスに覆われた  
星形成領域

- ・全天サーベイ
- ・3回目公開(2020.12)の  
中間データでは、  
約15億個の星の  
位置天文情報。  
年周視差精度は  
明るい星で20~30 $\mu$ as

画期的! 天の川銀河  
研究の大革命が  
起こって  
きている!!

1. ハローの構造・形成史  
(銀河考古学)
2. 太陽系近傍や  
反中心方向の  
銀河円盤の速度構造
3. バー構造のサイズ・  
回転速度



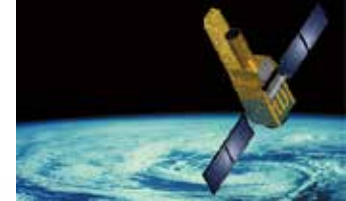
## 銀河中心考古学

1. 中心核バルジの構造  
(天の川銀河誕生時の構造の痕跡?)
2. 中心核バルジ内の円盤構造の形成時期  
→ バー構造の形成時期を決定  
→ 太陽系が銀河内部から移動を開始  
する時期  
→ 地球誕生や人類の誕生にも影響
3. 超巨大ブラックホールの質量成長
4. 内部円盤の振動

銀振学

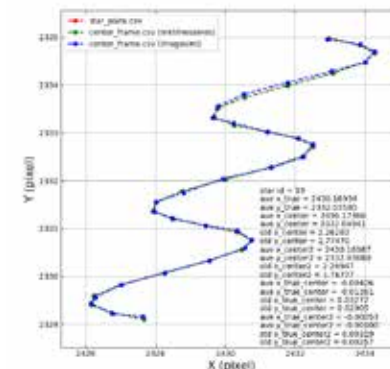
中心方向以外: 低質量星周りの  
生命居住可能領域にある地球型惑星探査  
(日本初の系外惑星探査衛星でもある)

ハロー  
円盤    バー    バルジ



# 位置天文にはデータ解析が重要

- 25マイクロ秒角～0.6nm
- 安定性を「測定」で保証する、較正することは不可能。



変動を抑える



$CTE < 5 \times 10^{-8}$ オーダーの素材を開発。  
1m程度の部材で、10mKオーダーの制御  
素材を選べない部分もある。

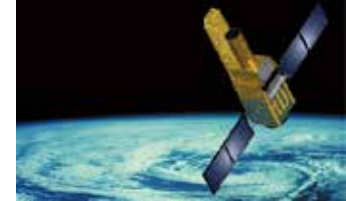
変動を制御 or 較正



0.6nmより十分高精度の測定が前提。  
Gaia衛星はレーザー干渉計併用

残る手段: 変動を推定する

この精度のモデルを作り、  
他の測定値から推定する。



# 位置天文データ解析

## • 問題規模

- 欲しいパラメータ: 50万個 (10万星 × 5)
- Nuisance parameter: 約1千万個
- 観測数: 500億データ
- 数mas →  $25 \mu\text{as}$ を実現

PSFの幅

400mas



光子数 $\sim 30,000$

$$400/\sqrt{30000} \sim 2.3$$

時々刻々の星像中心

4 $\sim$ 6mas

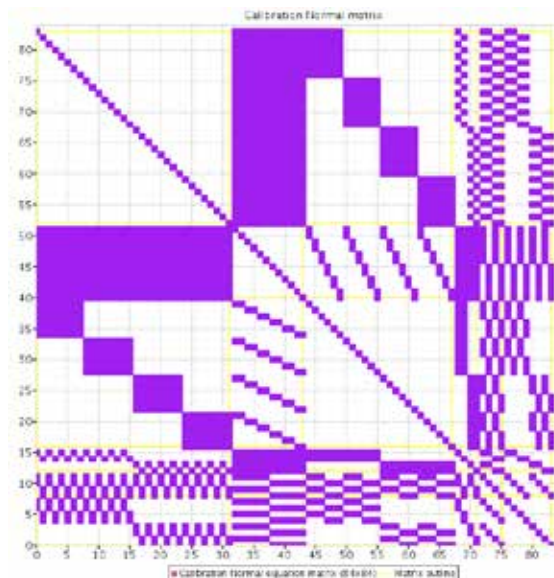


観測数 $\sim 500,000$

$$6000/\sqrt{500000} \sim 8.4$$

位置天文パラメータ

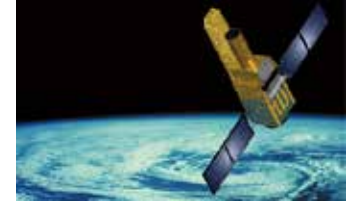
$25 \mu\text{as}$



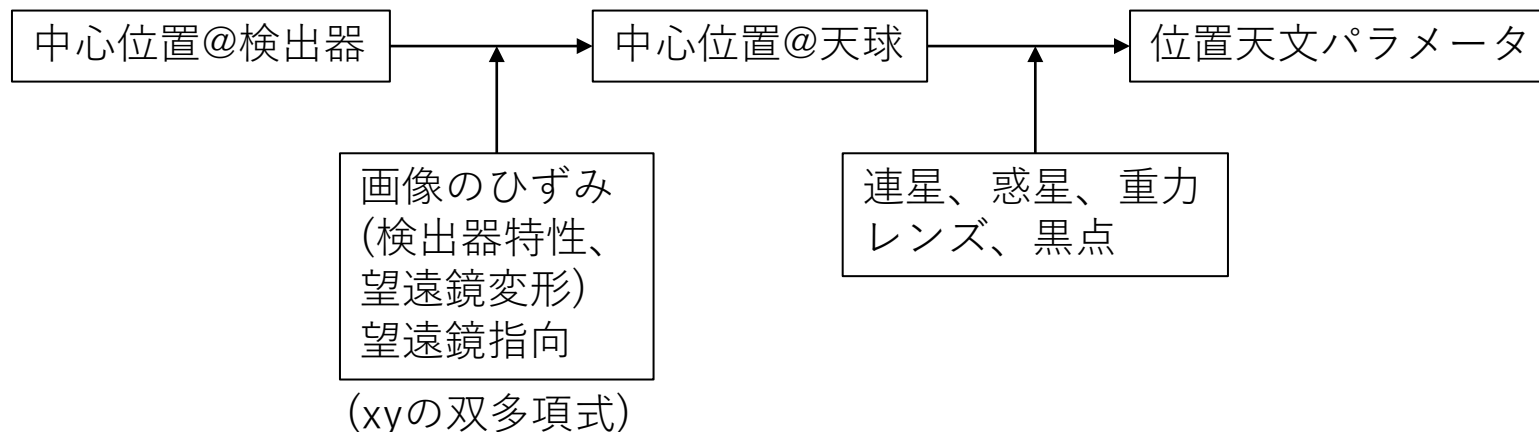
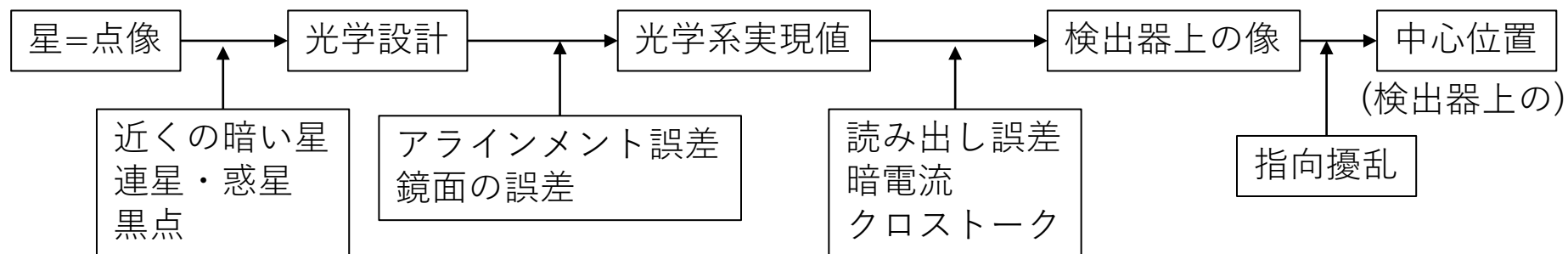
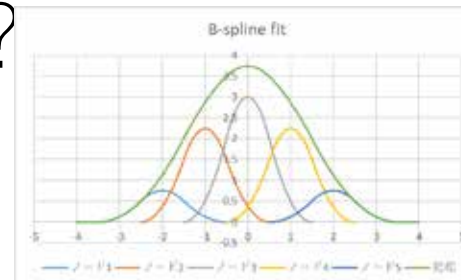
数stepに分けて、最小二乗推定

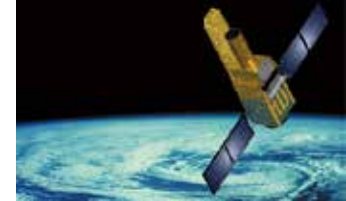
←Gaia衛星のあるステップの正規行列

スパースでもない、密でもない



# モデル駆動? データ駆動?





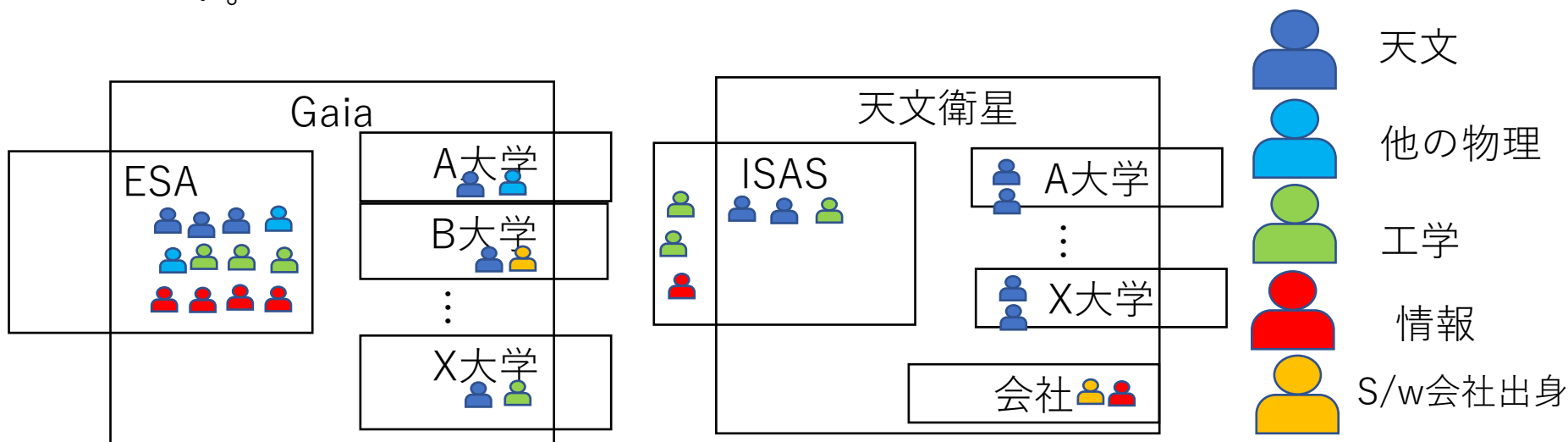
# 開発

- メーカーによる委託開発

- 長期戦である⇒山田は定年⇒**オープンソースQuality**が必要
- 開発はメーカーに委託し、発注側は仕様書の整備に努める
  - あとで引き継いだ研究者が見てもわかる。
- ISO12207:2017(software lifecycle process), ISO15288:2015(system lifecycle process)に出来るだけ沿う

- 研究者による開発

- 様々な誤差要因を入れ込み、精度を向上させる部分は、Astronomerでないと出来ない。





## E2E simulation groupの立ち上げ

- UCL河田氏(JASMINEのproject scientist)が声をかけ、20名強のE2Eチームを立ち上げ。
- 9月より毎週会合+GitHubによるコード共有+Slackによる日常的な議論。
- NAOJ, ISAS, 東大, 京大, 東工大, 海洋大, 高知高専, 統数研, 大学院生から教授クラスまで。
- 「解析」と「シミュレーション」の二本立て

## 「シミュレーション」の活動状況

- 現段階で想定できるノイズ要因はほぼ実装済み
- 系外惑星探査に必要な測光精度を得られるかどうか検証
- 「解析」のinputにできるようなI/Fを実装。

## 「解析」の活動状況

文書

仕様改訂

プロジェクトによる仕様策定

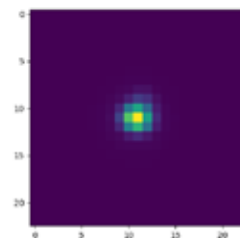
メーカーによる実装

プロジェクトによる検証

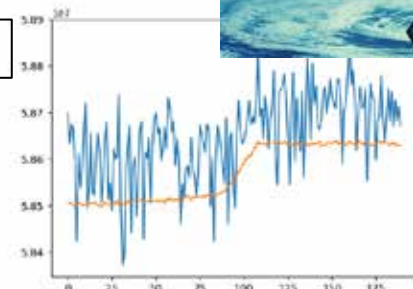
導入するノイズによって、アルゴリズムに改良を要する点を発見した場合

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



測光精度の評価



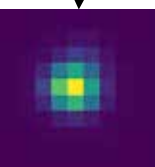
系外惑星探査の成果評価  
キャリブレーション方法の検討

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

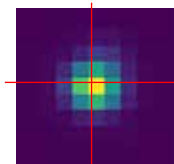
星の運動5  
パラメータ



3年のデータを集めて運動を解く。

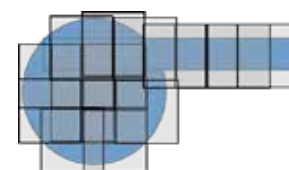


像の中心を推定



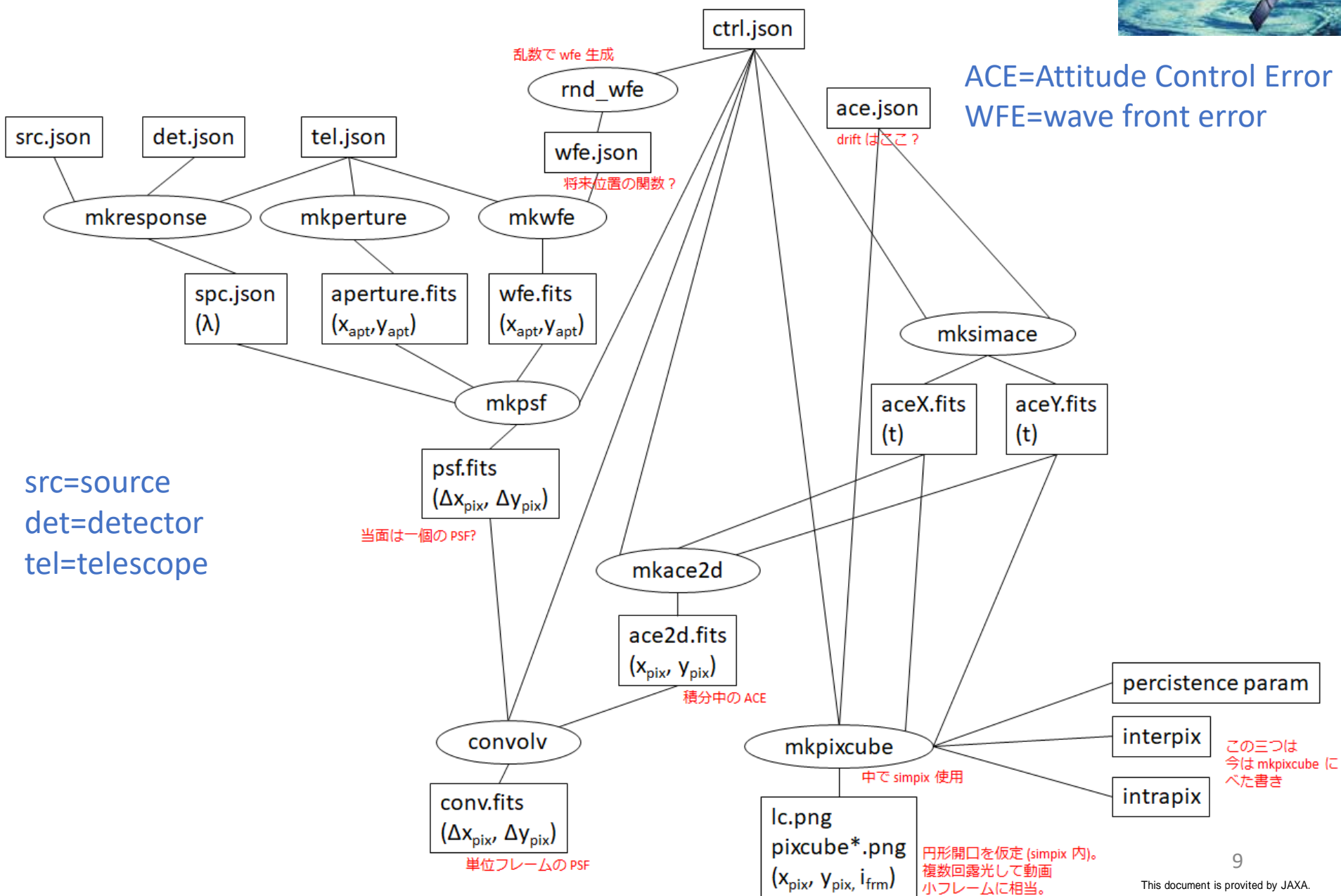
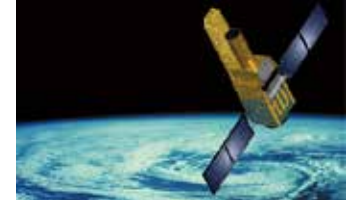
データ解析は問題

50分の観測からある時刻の星位置を求める。



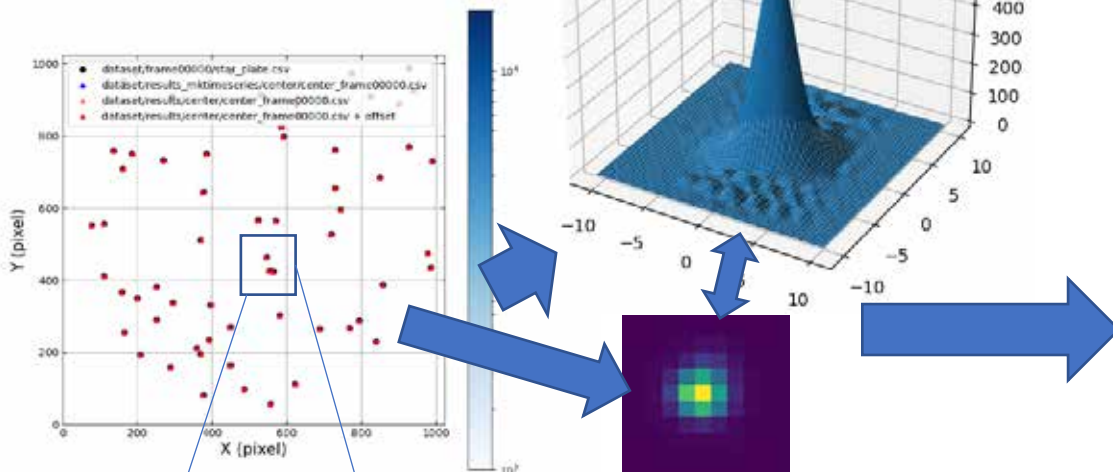


# シミュレーションに取り入れたもの

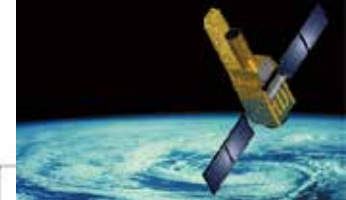


# 現状

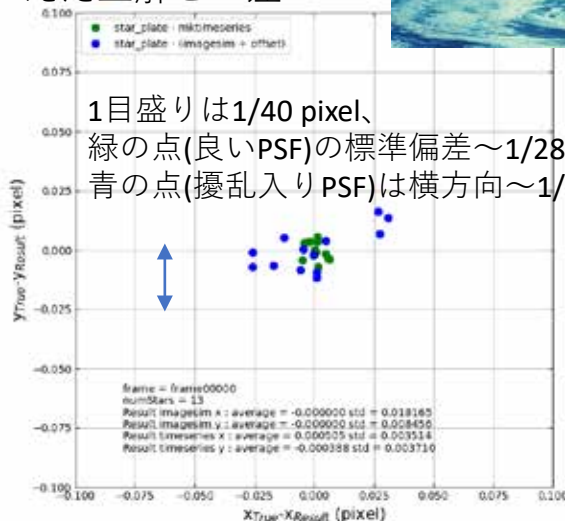
## PSFを推定する



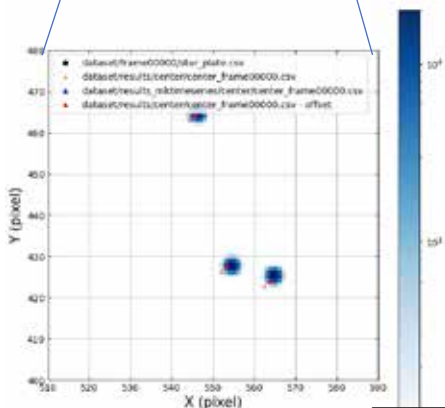
推定した星像の中心と、画像生成時に与えた正解との差



1目盛りは1/40 pixel、  
緑の点(良いPSF)の標準偏差 $\sim 1/280$ pixel、  
青の点(擾乱入りPSF)は横方向 $\sim 1/50$ pixel



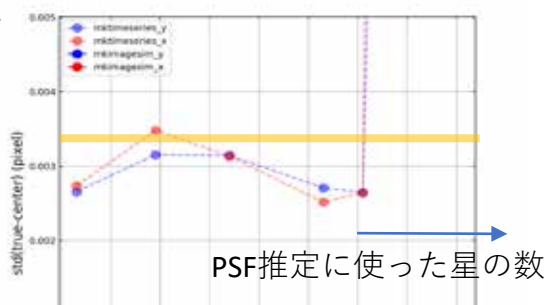
## 画像の生成



精度が十分でないケースの理由が分かってきた $\Rightarrow$ アルゴリズムの改良中

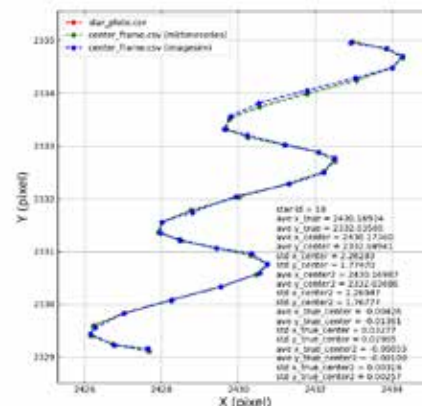
視野の端で星像が切れている場合  
近接した星がある場合

推定



PSF推定に使った星の数

パラメータとの関係を実証  
例:星の数を増やすとPSF推定精度が上がる。

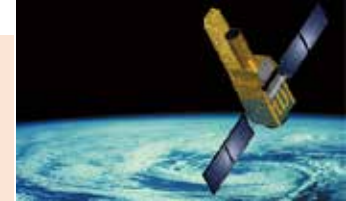


運動の推定部分は今後検証

# 今後

## End to end (E2E) simulation:

位置天文学では観測システムのモデル化、擾乱要因のモデル化により、星の運動と装置モデルパラメータの同時推定を行い、精度を出す。このプロセスがうまく機能し、目的の精度を達成できることを確認することが、end to end simulationの目的である。



FY2016	FY2017	FY2018	FY2019	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

担当者(1名)による開発

NAOJ資金で招聘

Heidelberg大学資金でHeidelberg大と共同研究

DLR資金apply

ソフトウェアメーカーへの委託⇒



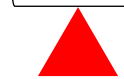
日ΔMDR



国際審査



プリプロ候補選定審査



ダウンセレクト前審査

予備的计算で、解析の各要素で期待する精度が出ることを確認した。

解析各要素の実装  
End to end計算のパイプライン開発

原理的に可能である。

End to end計算が有効と示唆

ノイズ入り画像生成

研究者に依るEnd to end simulationチーム活動

- ・ 想定する誤差導入
- ・ 対処法を検討
- ・ 精度達成に必要な較正法確立

- ・ 更なる精度向上
- ・ 処理高速化

マイルストーン  
理想的な状況で、end to endで解ける(要素ではなく)

国産のInGaAsセンサー使用  
⇒感度ムラの情報などは得られやすい  
必要なデータは実験で取得可

## Heidelberg大学チームとの共同開発の狙い:

- ・ Gaia衛星の経験を持ち、ソフトウェア開発実績があるチームの知見とノーハウを取り入れたい。

## ソフトウェア会社への委託開発の狙い:

- ・ 委託に伴って、専門家への聞き取り(システムライフサイクルの専門家)
- ・ 長期の計画(=衛星計画)に耐えるquality(可読性や設計柔軟性)のソフトウェアの開発。(オープンソース品質)
- ・ プロジェクト側にしっかりとしたドキュメントを残すこと。
- ・ スケジュールのキープ