

# JASMINEのデータ解析

Z203a

**山田良透(京都大学)**

河田大介(University College London)

上塚貴史、福井暁彦(東京大学)

片坐宏一、臼井文彦、河原創(宇宙研)

大澤亮、辰巳大輔、郷田直輝、矢野太平、泉浦秀行、三好真、  
宮川浩平(国立天文台)

平野照幸(東京工業大学)

服部公平(統数研)

大宮正士(ABC)

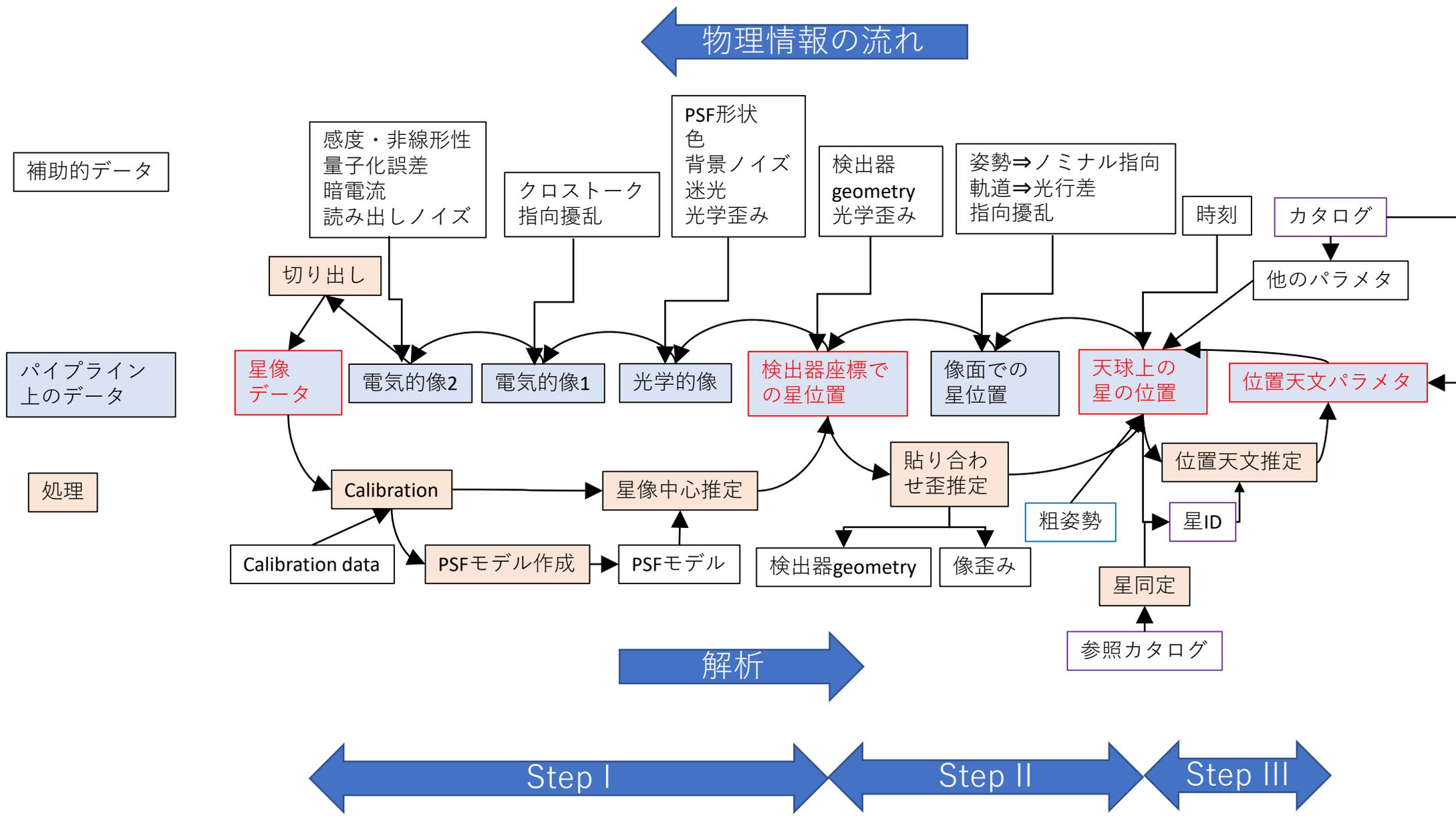
吉岡諭(東京海洋大学)

立川崇之(高知高専)

# 目次

- データ解析の概要
- 開発のタイムライン
- 開発の方法
- ソフトウェア設計
- ソフトウェアを用いた実現性検討
- 国際協力の状況
- まとめ

# 物理情報の流れと解析の流れ



# JASMINEデータ解析の概要

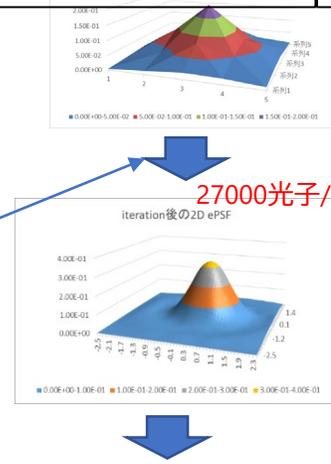
**特徴**  
 10万星  
 数万観測/星  
 25  $\mu$  秒角

**Gaiaとの違い**  
 観測方式  
 • Gaiaはscan衛星  
 • JASMINEはstep stair観測装置・波長  
 • CMOSはCCDよりnoisy  
 混雑領域

## I: 星像中心推定

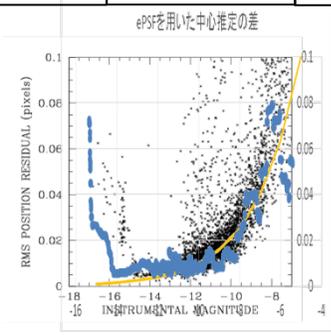
PSF形状をデータから推定し、Bayes Splineを用いてePSFを構築する  
 構築したePSFにfitし、星像の中心を推定

光学特性とその変動、7秒以下の姿勢擾乱、検出器特性、ePSF構築アルゴリズムが精度に影響する。



400mas (回折幅)

星像中に $N_{ph}=2.7$ 万個の光子がある。HSTで確立した手法を試し、結果を再現した。星像中心推定精度は回折幅の $1/\sqrt{N_{ph}}$ に低減、systematic誤差は $1/300$ pixel以下。

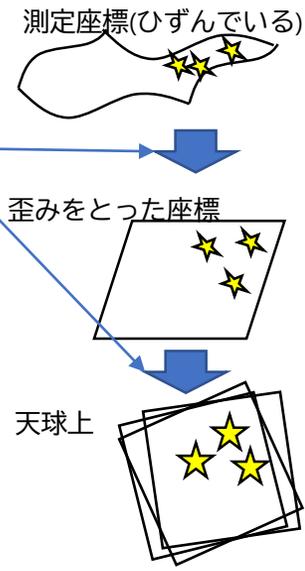


(付録 PSF推定)

## II: フレーム歪みの補正

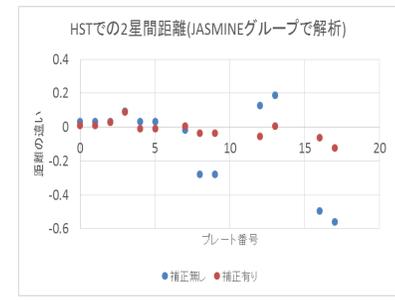
同じ星は動かないことを使って、5次多項式で表現した歪み、ピクセルごとのサイズ不均一、星位置を同時にを解く

光学系性能、光行差、望遠鏡熱変動、検出器の製造由来誤差、フィルタのひずみ、照合する星の数や明るさが精度に影響する。



4mas

歪みを双多項式で表現、システム安定性を同時に要求することで、所定精度を得られることをシミュレーションとHST実データで確認した。



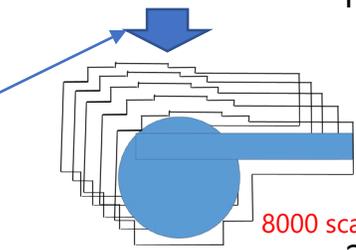
(付録 フレーム連結)

システム安定性は、温度制御と低膨張素材の開発で実現可能である見通しをつけている。(次ページ)

## III: 位置天文パラメータ推定

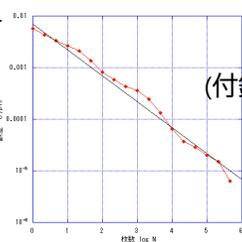
Step IIで解けない絶対位置とスケールはGaia星を頼りに、多項式、フーリエ級数、Bayes Spline回帰を用いて推定

参照するGaia星の明るさと数、近接する星のPSFのテール、拡散天体が精度に影響する。



1.5mas

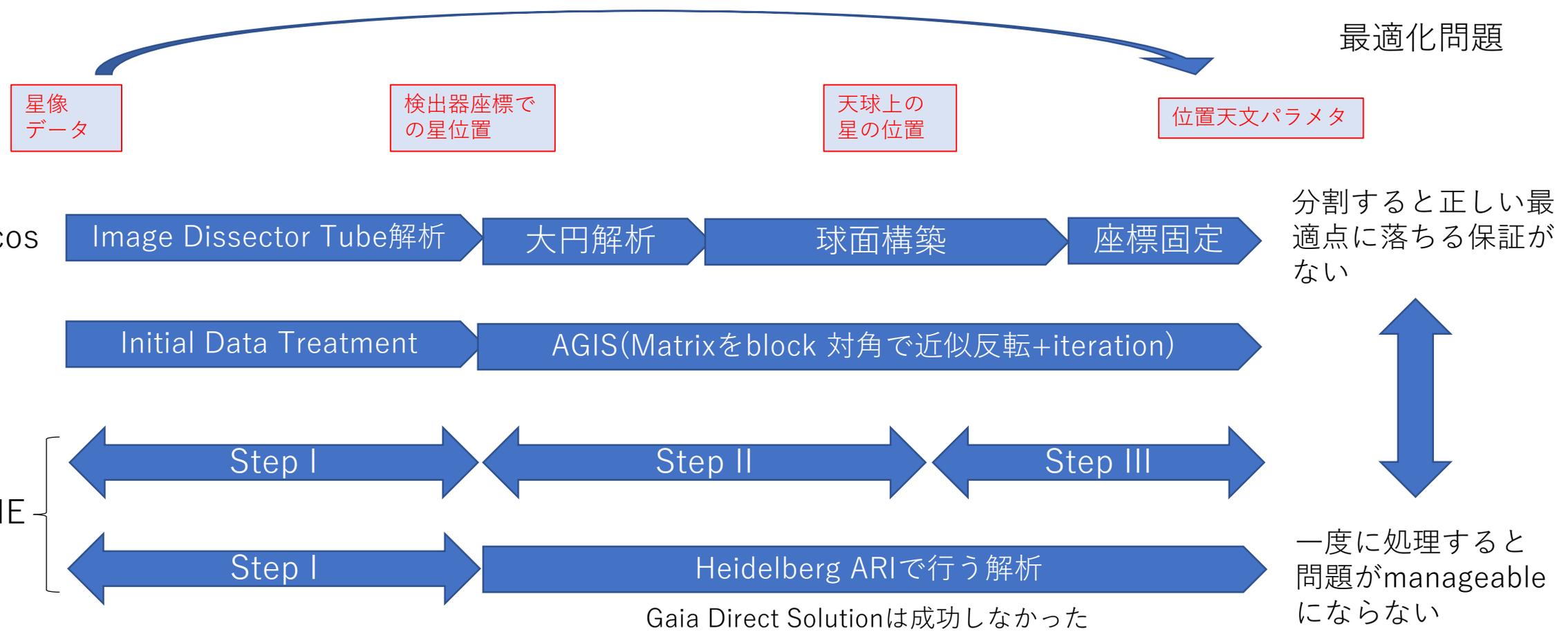
100万撮像で誤差が $1/\sqrt{N}$ 則で低減することを、模擬星像を使った地上実験で確認。



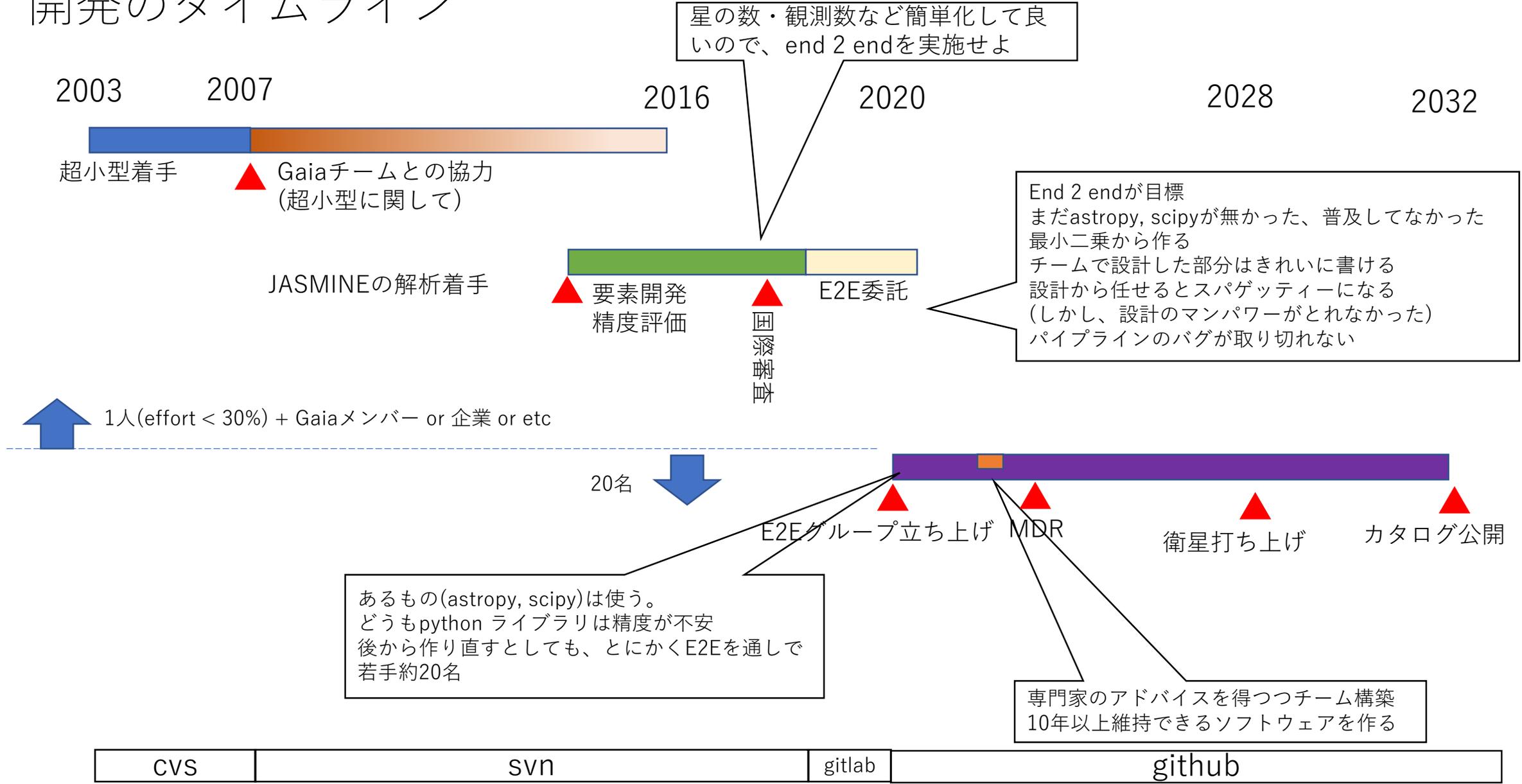
(付録 誤差低減実験)

8000 scan/ミッション  
 25 $\mu$ s

# 他のプロジェクトとの比較



# 開発のタイムライン



# 業務系ソフトウェアとの違い

衛星計画は計画からデータリリースまで30年程度=>長期に維持できるソフトウェア

業務系ソフトウェア	科学ソフトウェア
開発者は仕様通りのものを開発することが目的	開発者はできたものを使って論文を書くことが目的
いつも開発をしている	開発フェーズとそれ以外のフェーズがある
開発者は開発のために雇われている	研究のために雇われている人が、必要に迫られて開発をしている
従って、開発者は同一組織に居る	開発者の所属機関はバラバラ
従って、一日に一度の朝礼は可能	全員が時間を合わせることは難しい
必要に応じて関係者数名を集めることも可能	関係者が集まれる時間もなかなか決まらない
リリースしたソフトウェアに責任がある	ソフトウェアではなく計算結果に責任がある
後から見てわかるソフトであることが必要	論文を書いてしまえばソフトは不要
後から見てわかるソフトを書くスキルも大切	ソフトスキルは二の次
結果はたいてい離散的な状態	結果は実数値
テストが明確	テストを書くのが難しい。

# アジャイル開発を適用

今



1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020
------	------	------	------	------	------	------	------	------

機械語    高級言語    構造化プログラミング

Haskell等

λ式

関数型(宣言型)言語

論理型(宣言型)言語

オブジェクト指向の台頭

ウォーターフォール開発



アジャイル開発



アジャイルソフトウェア開発宣言

XP

SCRUM開発

カンバン、クリスタル、...

Pythonの台頭

マルチパラダイム言語

プログラミングパラダイム

開発手法

## アジャイルソフトウェア開発宣言

- 顧客満足が優先
- 要求の変更は歓迎
- 短期リリース(2-3w~2-3m)
- 顧客と開発者は日々一緒に働く
- 意欲に満ちた人を集めて彼らを信頼する
- Face to faceで話をする
- 動くソフトウェアを進捗の尺度とする
- 一定の開発ペースを維持する
- 技術的卓越性と優れた設計
- シンプルが本質
- 自己組織的なチーム
- チーム効率向上のため定期的な振り返り

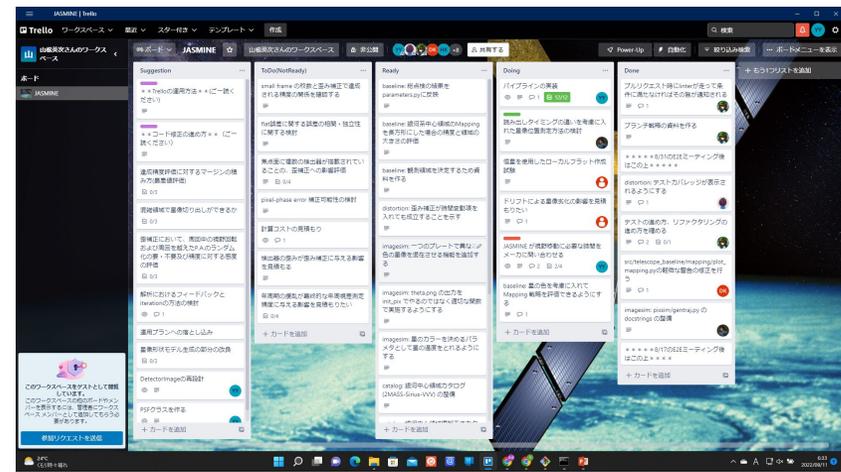
Scrum開発は不可能

## 開発の特徴

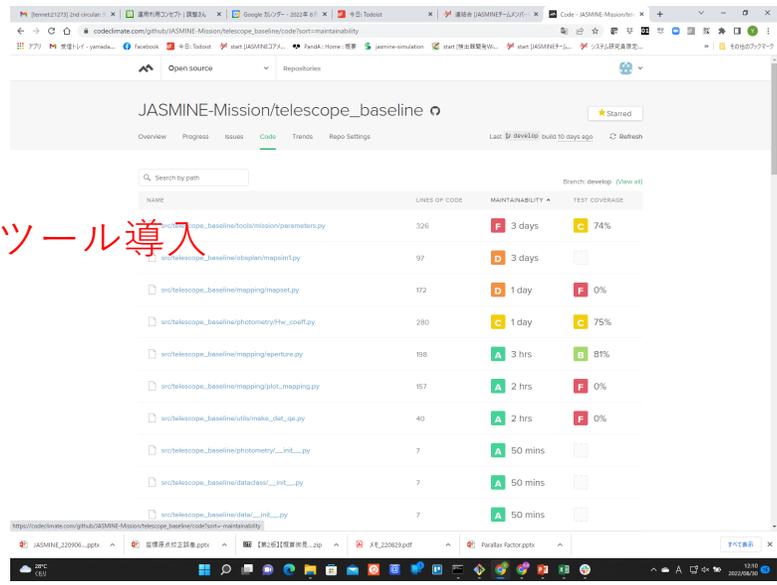
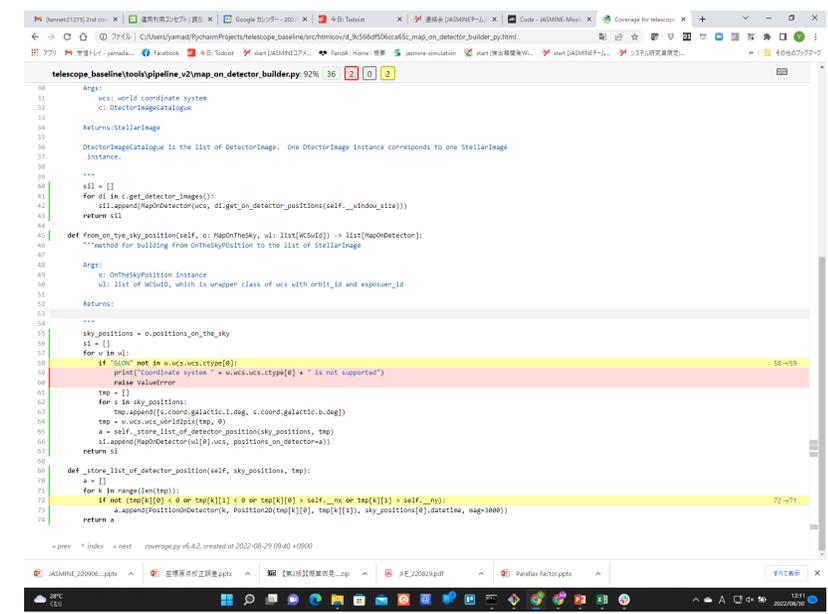
- 科学的な解析手法の検討にとどまらず、30年維持する開発手法やチーム構築が必要
- Open Source品質がキーワード
- 業務系ソフトの開発手法を、科学ソフト開発にマッチした形にアレンジ。
  - 設計の重視(モデル駆動)
  - テスト駆動開発
  - ~~スクラム開発~~ ⇒ チームに合った手法として、カンバン方式を適用
    - スクラムは同じ場所に居る、最低限同じ時間を共有できることが前提
- ツール
  - GitHub(コードの共有)
  - CodeClimate(コード品質の確保)
  - Trello(カンバン方式によるタスクの管理)
- 対話
  - 週一回のオンライン会合(毎日の朝礼は無理)
  - モデリングセッションの実施(小数人で)
  - Slack(共通の居場所)

# ソフトウェア開発技術の向上

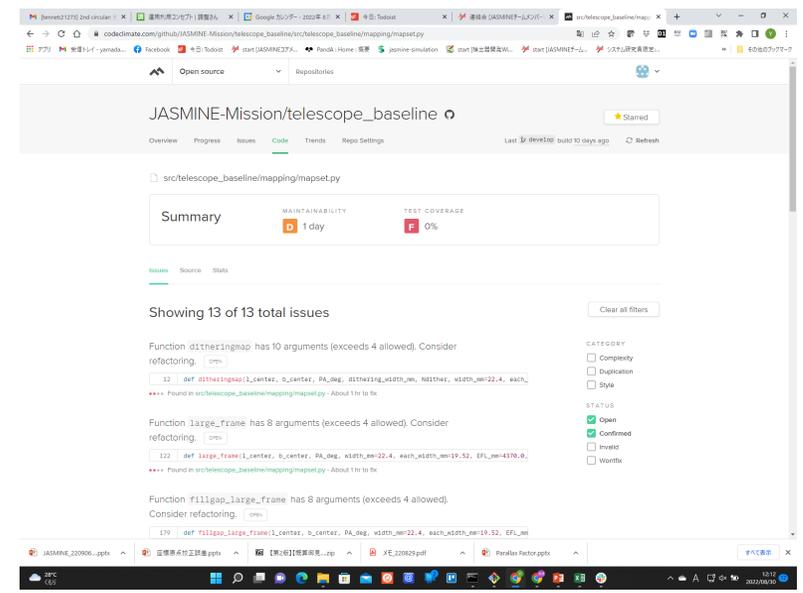
テストができていない行の表示



カンバン



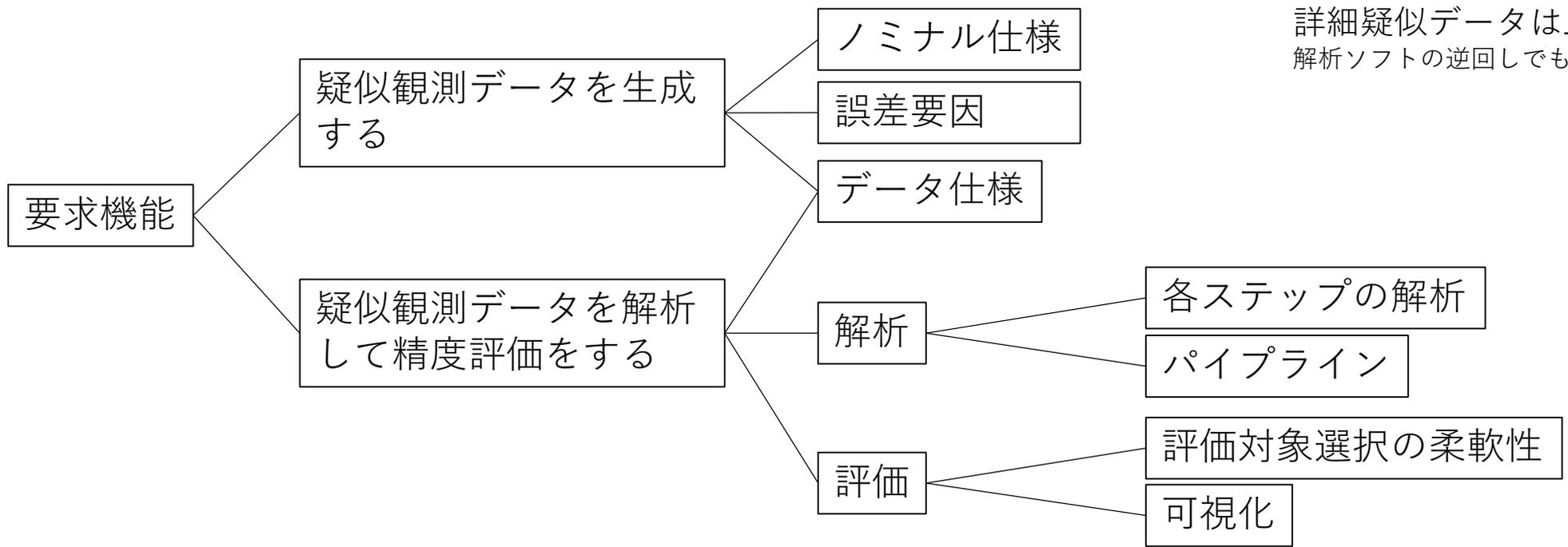
品質の可視化ツール導入



コードの品質(保守性、テストの充実度)

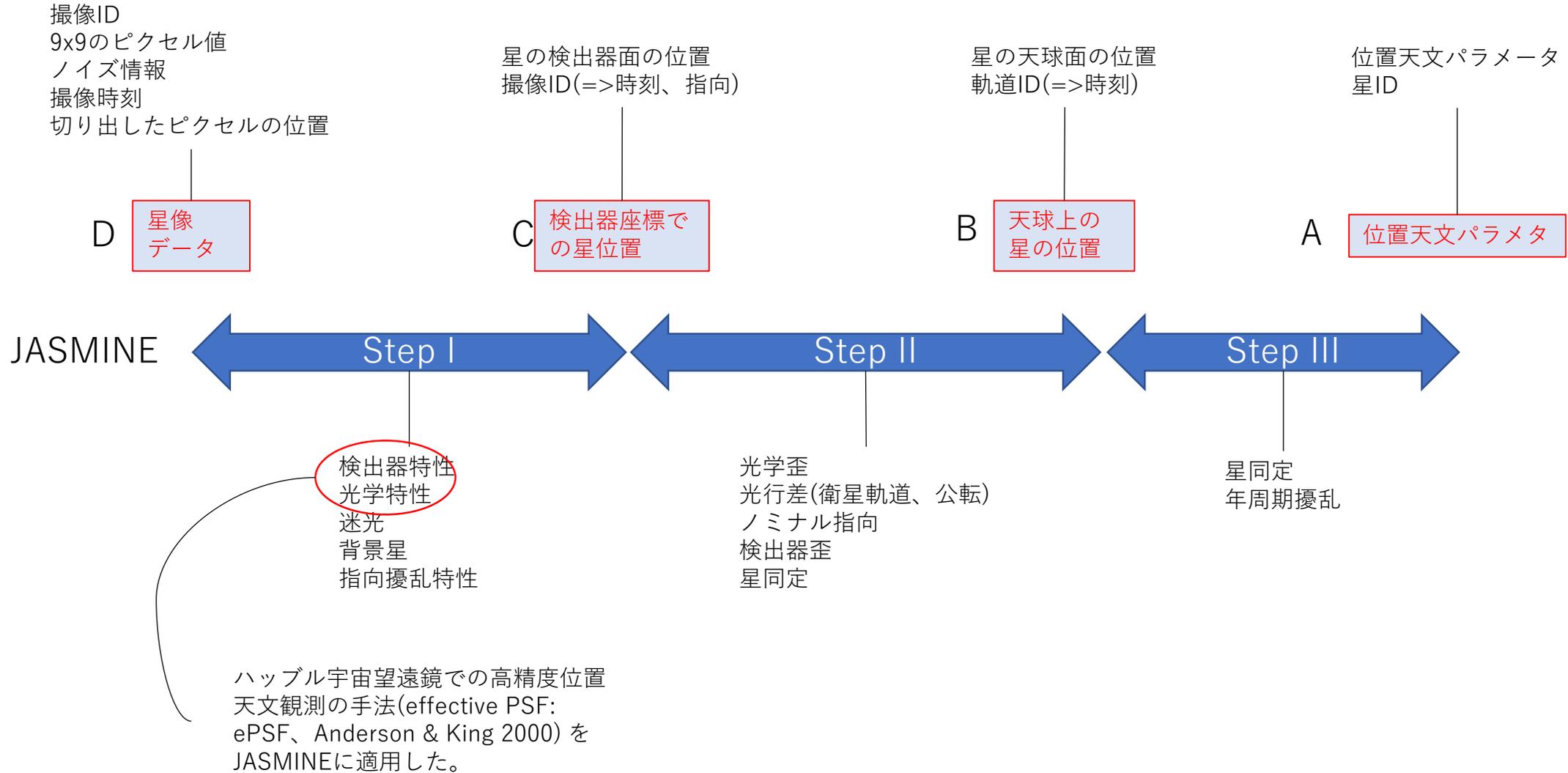
コードの要修正箇所の提示

# 機能設計

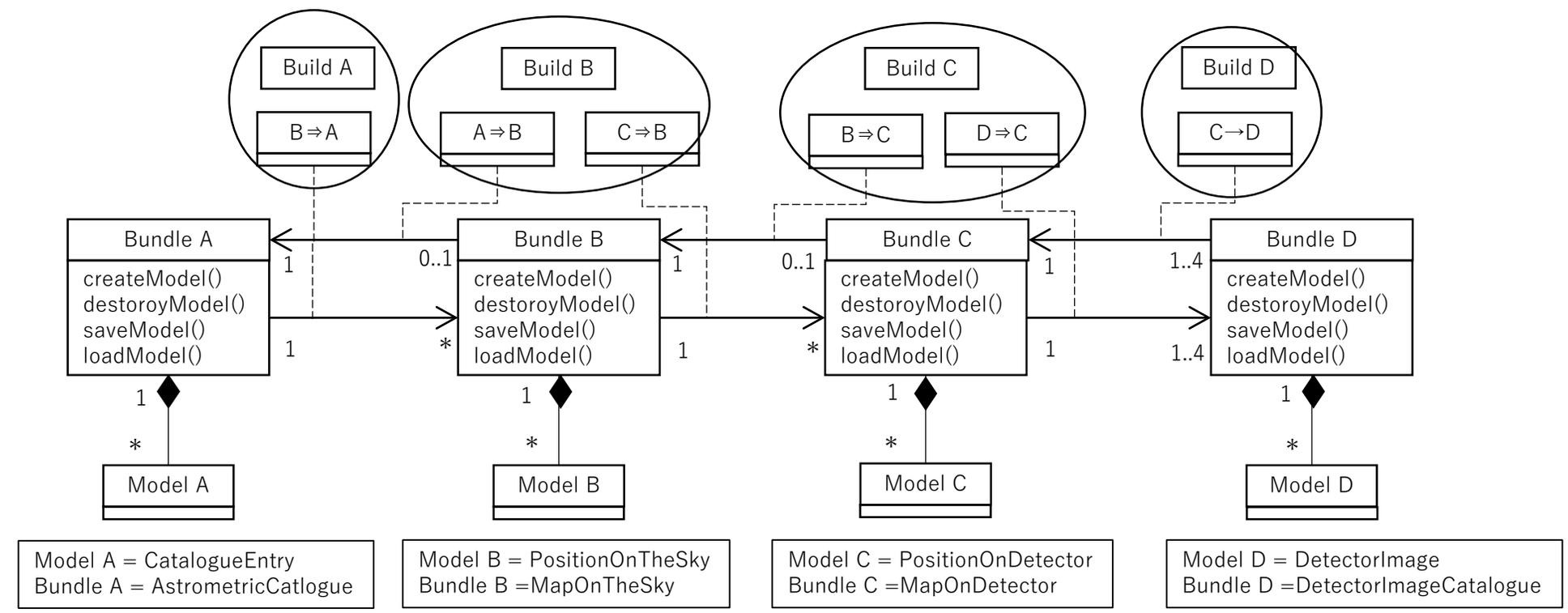


詳細疑似データはJasmine-imagesim  
解析ソフトの逆回しでも簡易simulation

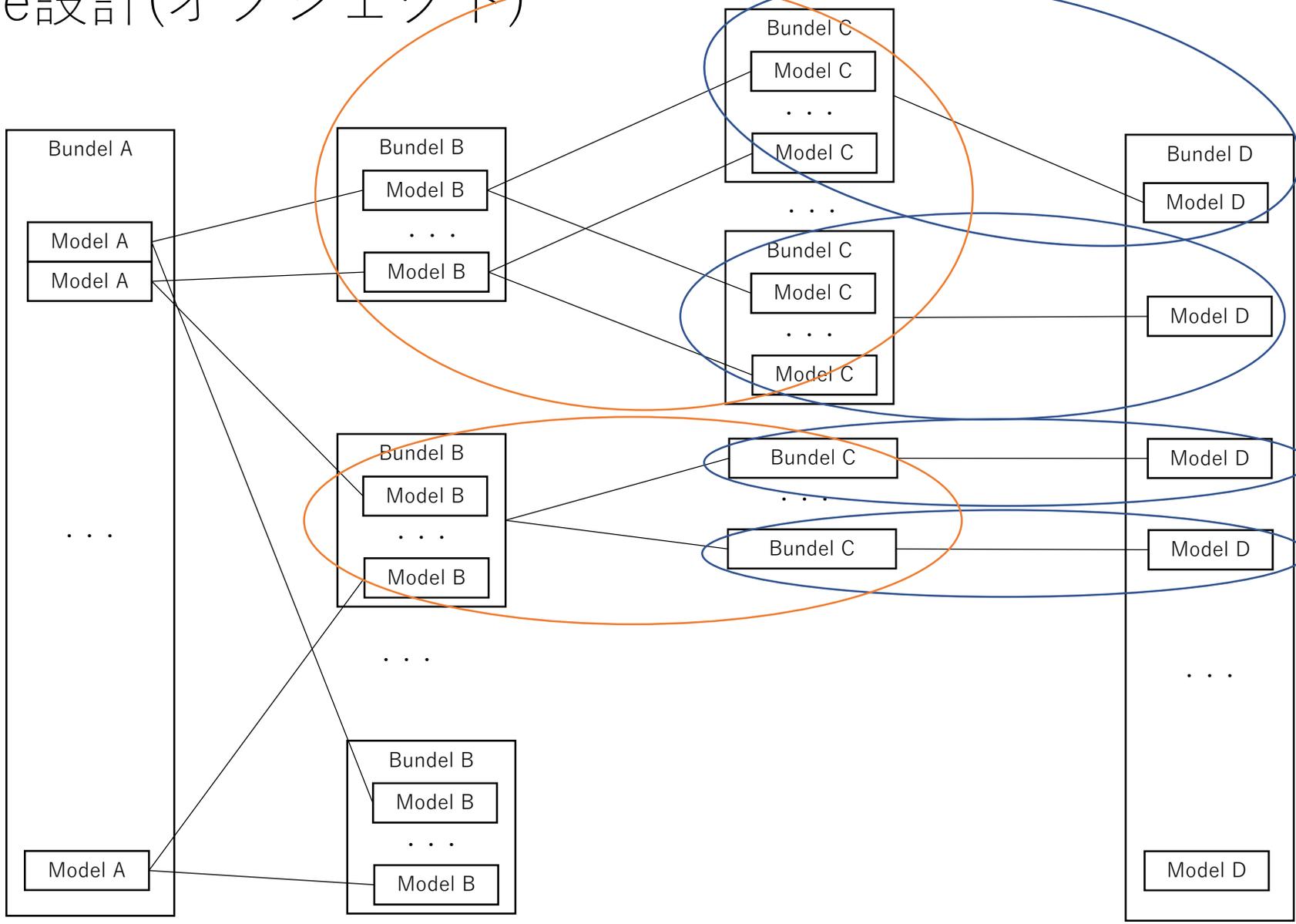
# データモデリング



# Pipeline設計(クラス)



# Pipeline設計(オブジェクト)

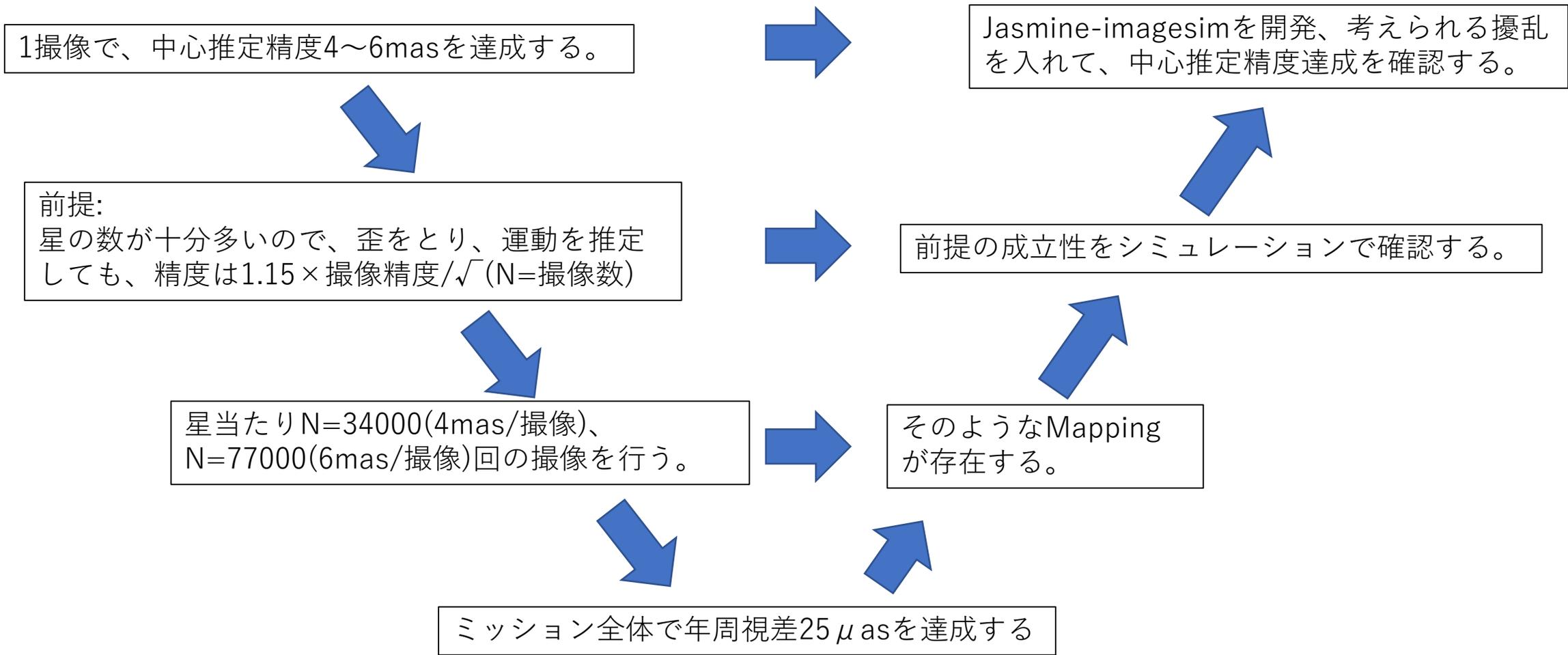


AB間: 星(ModelAに対応するModelB群)ごと独立で、並列化可能

BC間: Bundle Bごとに独立で、並列化可能

CD間: Model Dごとに独立で、並列化可能

# 精度達成確認のストラテジー(総点検)

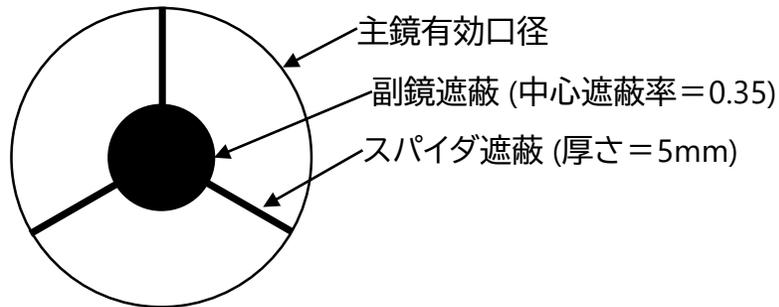


# Step 1

- 観測シミュレーションソフトウェアjasmine-imagesimを用いた系統的な調査に基づいて、望遠鏡口径および観測波長域の最適化を行った。
  - 実際に観測される状況を想定した星の明るさ(12-14.5等級)を設定して、視野内に400天体をランダムに配置した観測模擬データを作成した。これを用いて星像位置決定精度を評価した。

## 主鏡有効口径・開口形状(アパーチャ)

- PSF(Point Spread Function)を決めるパラメータとして導入。
- 主鏡有効口径は340-360mmを設定した。



## 衛星姿勢制御誤差 (姿勢安定度)

- 積分星像形状を決めるパラメータとして導入。
- 衛星姿勢制御誤差を規定するパワースペクトル密度(PSD)はひのでの実績に基づいて、-2乗則を仮定した。

## 波長特性・観測波長帯

- 「望遠鏡光学系効率」「フィルター効率」「検出器量子効率」をそれぞれ導入。
- 光学フィルターについてはカットオン波長 0.9-1.1 $\mu\text{m}$ 、カットオフ波長 1.6 $\mu\text{m}$  とする。
- 検出器量子効率は想定よりも良好な性能が得られている (右図;技術FL・FY2021の成果)。
- 基板除去・反射防止コートによって既存の地上用検出器より高い量子効率を実現
  - (本年会Z208c鹿野他)

## 焦点距離・ピクセルサイズ・フラット

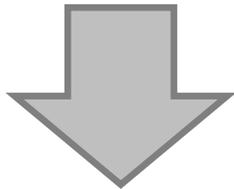
- 取得画像形状を決めるパラメータとして導入。
- 焦点距離 = 4369mm で固定とする。
- ピクセルサイズは浜ホトで開発中のInGaAsセンサとして 10 $\mu\text{m}$  とする。
- ピクセル間フラットは0-2%を標準偏差とする乱数で生成。

# Step I

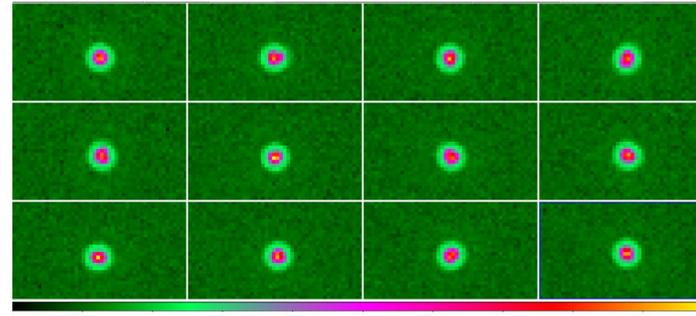
■ シミュレーションの結果、星像の位置決定精度を支配するのは以下の組み合わせであることが明らかとなった。

- 星像の回折パターン
- 衛星の姿勢安定度 (指向擾乱)
- ピクセル間フラット
- 検出器の読み出しタイミングの違い

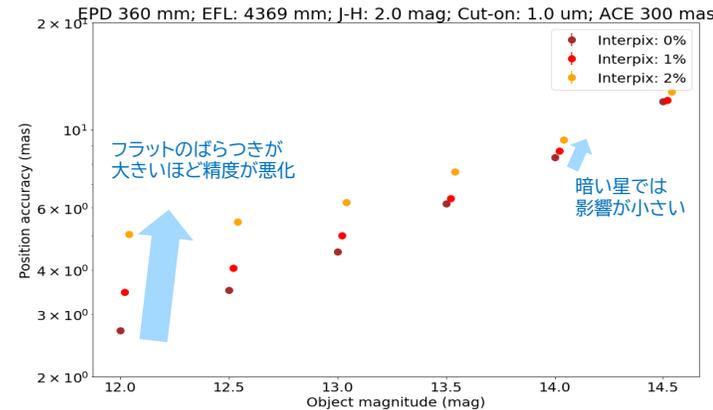
■ 位置決定精度の向上には光子数を稼ぎ、星像をシャープにすることが重要である。すなわち、口径は大きく、カットオン波長は短い方が望ましい。



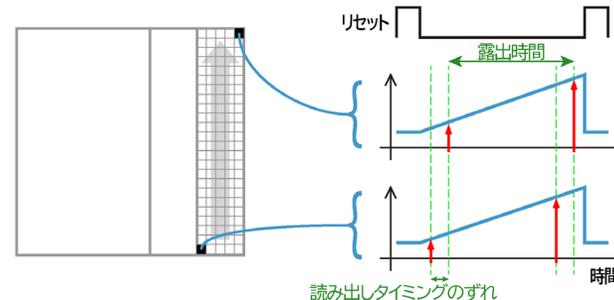
- 望遠鏡口径は400mm→360mmに縮小する。
- カットオン波長を1.1um→1.0umに広げて、観測波長帯は1.0-1.6umとする。
- ただし、メニスカスフィルターの導入を検討



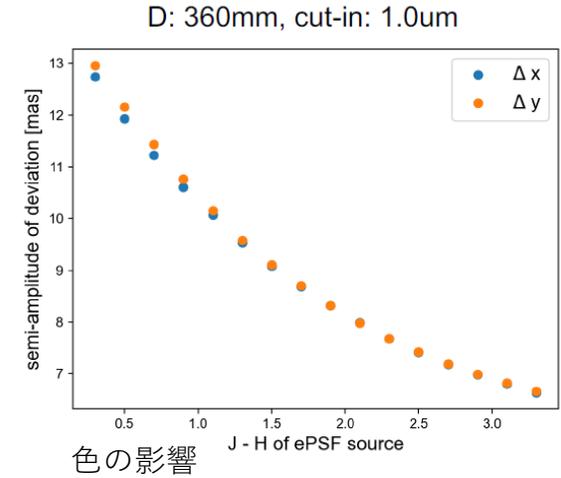
シミュレーションで得られた星像。衛星の姿勢安定度を考慮すると星像の形状が球対称から外れている。



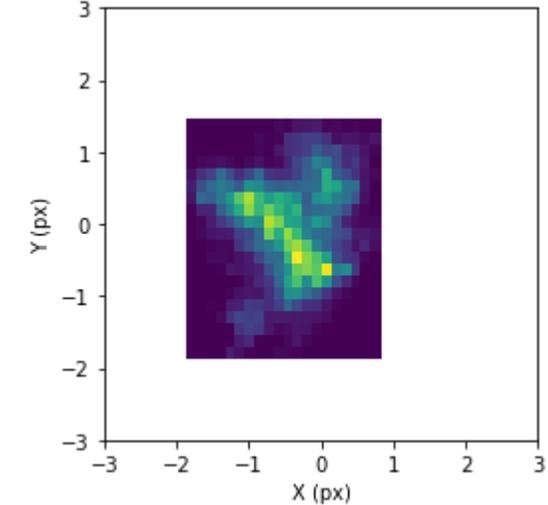
ピクセル間フラットの影響を星の明るさ(等級)と位置決定精度の関係で見たもの。⇒LED光源で補正



検出器フォーマットと、1ピクセルの読み出しタイミング。200kHz (5μs/pix)で読み出す場合、1ch(123×1968ピクセル)の中で最大1.2秒の読み出しタイミングのずれが生じる。



色の影響

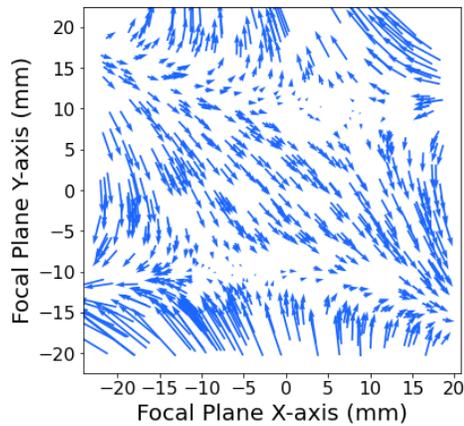


指向擾乱による視野中心の滞在時間分布  
タイミングの違いによる誤差はモデル化で吸収できそう

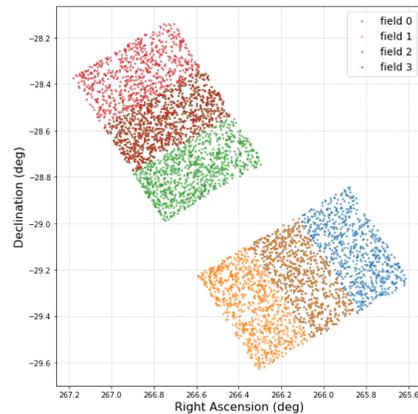
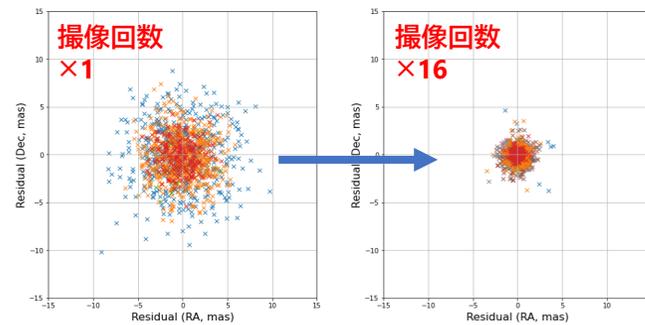
# Step II

## ■ 光学歪みの補正および位置天文較正試験:

光学収差と天体位置を同時に解く試験を実施、撮像回数に応じて測定精度が向上することを実証した。

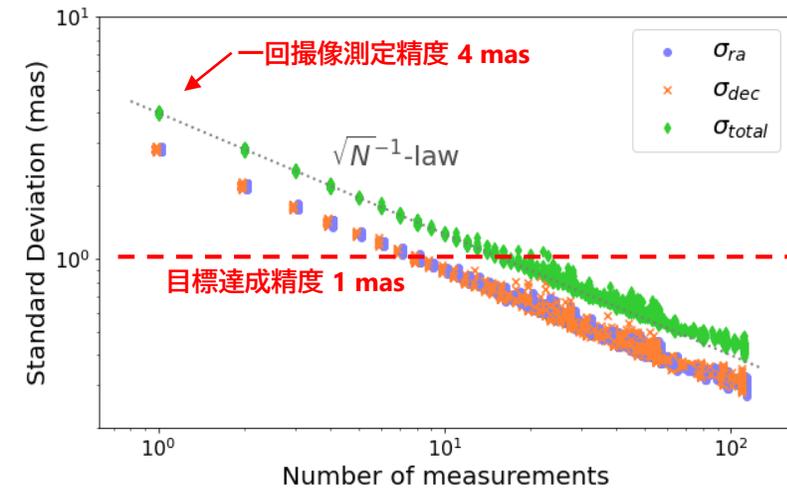


左図: 使用した光学収差のパターン  
下図: 天体位置の測定精度と撮像回数の関係



視野の張り合わせ方の評価

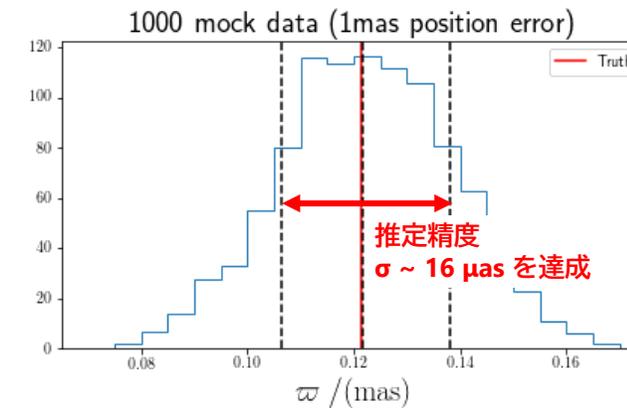
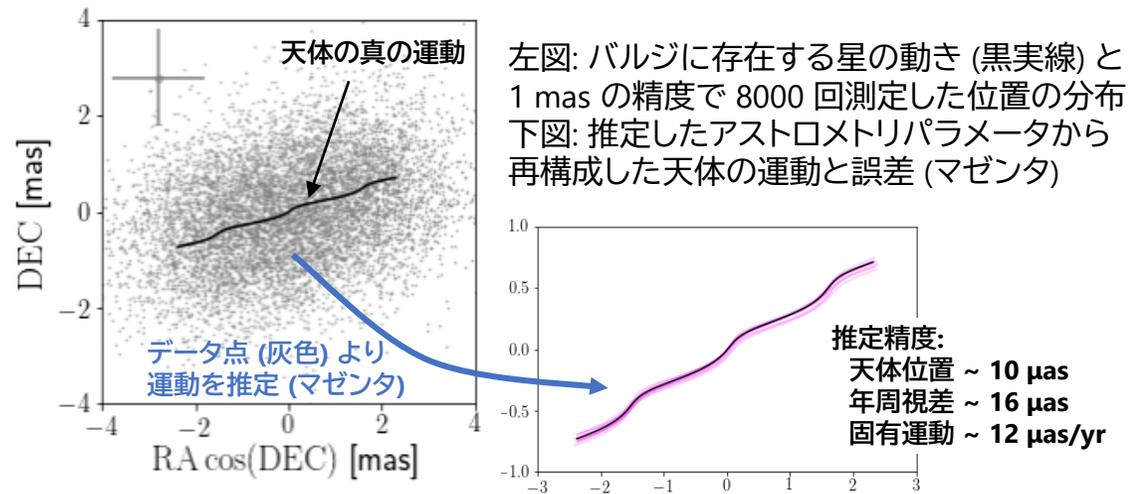
下図: 天体の測定回数と位置測定精度の関係



# Step III

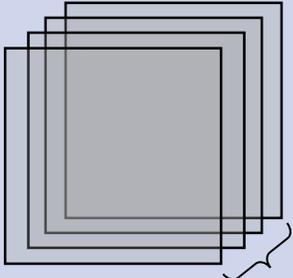
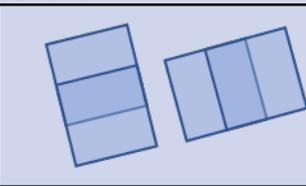
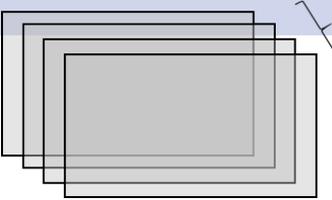
## ■ アstrometriパラメータの推定:

観測を模擬したデータセットを作成して推定問題を解く試験を実施した。  
 多数回の測定によって目標とする精度でアstrometriパラメータを推定できることを実証した。



上図: 1000 回の試験で得られた年周視差の分布

# チームによる総点検の実施(サマリー)

	2020年までの検討	2021年度の検討
<p>Step I(星像中心推定) 単位フレーム12.5秒</p>  <p>N回観測で<math>1/\sqrt{N}</math>で低減</p>	口径=約40cmあれば十分	更新された数値をもとに、口径36cmでの成立性を確認した。
	中心遮蔽率0.35	
	検出器感度・読み出しノイズ・暗電流は20年4月の実績値	感度が過去の実績値より高いことが確認されたので、組み入れ
	上記前提で星像中心推定精度を、誤差伝搬を考慮して評価	
	指向擾乱、背景の暗い星の影響は別途簡易モデルでの評価を実施し、RSSで積み上げ	指向擾乱・背景の暗い星を含めた模擬データを作成して、中心推定精度を評価した。(RSS積み上げではなく)観測領域の星データベース作成。
	軌道周回50%を観測に使う前提	迷光影響とのトレードオフを行い、軌道周回49%を観測に使う
	波長は1.1~1.6 μm固定とした	波長域の最適化を行った。(1.0~1.6 μm)
<p>Step II(歪推定)</p> 	NEC速報値の柔構造を含まない視野変更後の静定時間を用いて、軌道半周で全領域をカバーする運用を前提	静定時間が長かったため、軌道半周でカバーする領域は観測領域の一部として、最適化を行った。
	張り合わせによる視野パラメータの誤差の影響は、誤差伝搬を考慮して評価。	左影響を、模擬データを用いて評価した。
	周回で観測領域全体を掃く	Gaiaを頼ると、周回で一部だけ掃くで良い
<p>Step III(星運動推定)</p>  <p>6000周回</p>	3年、一年の半分がバルジ観測期間として、8200周回にマージを入れた7400周回を観測期間として評価	放射線帯の影響などを考慮して、観測周回が6000周回で成立する解を検討した。

## 国際協力の状況

- Heidelberg
  - Gaia DPAC CU3(core processing) FL(First Look)チーム
  - DLRの予算を獲得して、共同研究をスタート
  - 今月日本からHeidelberg訪問(1週間のワークショップ)
  - 11月末( or 12月初)にHeidelbergから来日
- Barcelona
  - Gaia DPAC CU2(Simulation)およびCU5(Photometry processing)チーム

## まとめ

- ソフトウェア開発のチームビルディングを行った
- ソフトウェア開発の環境構築を行った
- ソフトウェア開発のための、品質可視化ツールを整備した
- ここで開発したソフトウェア部品を使って、JASMINEの実現性を確認した
- 今後はソフトウェア部品を組み合わせて解析ソフトを作り、end to endシミュレーションを行う。