すばるHyper Suprime-Cam（HSC)
の
大規模データ処理

高田唯史(国立天文台・天文データセンター）
HSCデータ解析ソフトウェア開発チーム

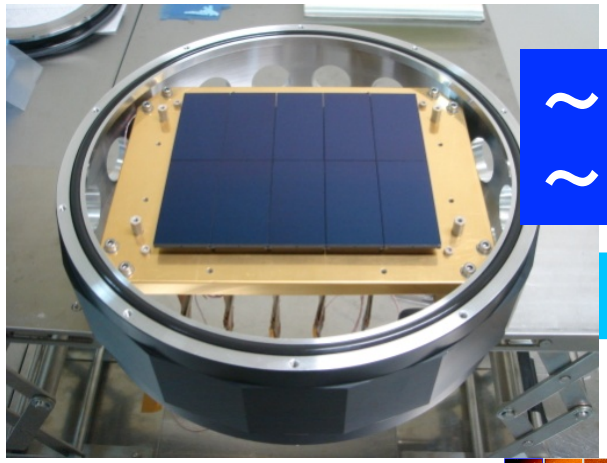
話の内容

- 開発の背景（すばるHSCとは、、）
- データフロー（取得->解析->DB）モデル
- 解析手順とアルゴリズム（今回はほぼスルー）
- 解析処理の効率化
- データベースの設計
- 計算機システム(多分スルー）
- まとめ

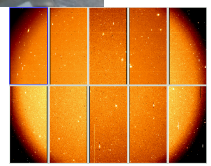
開発の背景

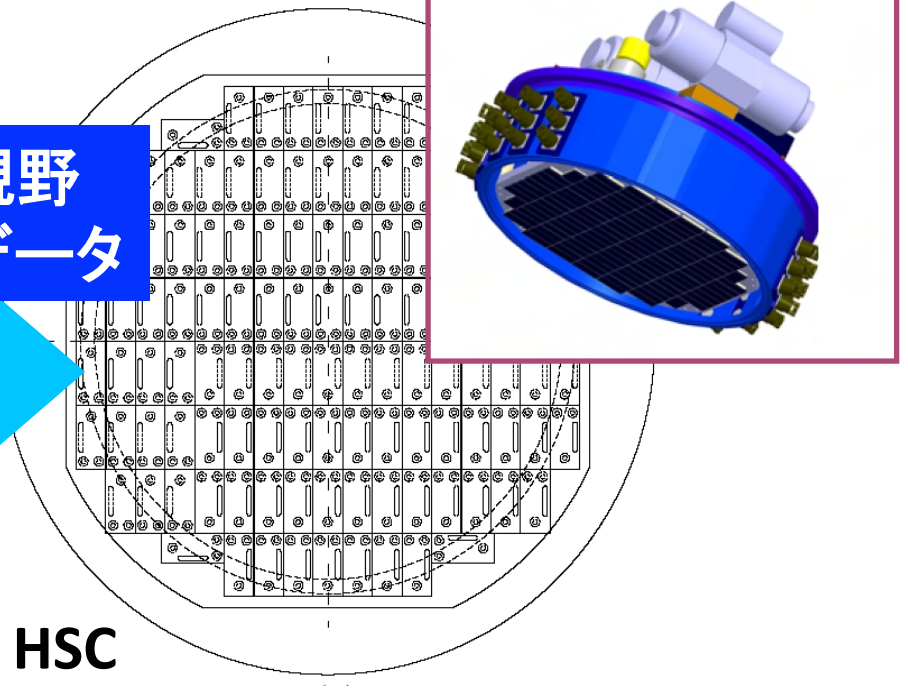
HSC (Hyper Suprime-Cam) とは

- 新しいすばる主焦点可視撮像カメラ
  - 宇宙論（ウイークレンズ）を中心とする戦略的観測
  - 2011年後半にFL予定



～10倍の視野
～10倍のデータ





Suprime-Cam

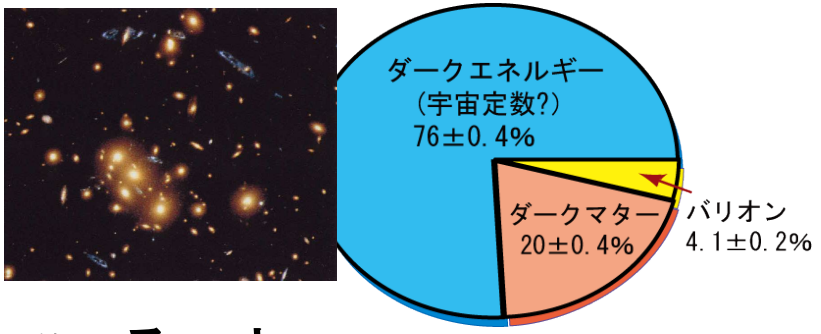
視野: 34′ ×27′ （10 x 2k4k CCDs）
データ量: 185MB/shot（～30GB/夜）
サーベイ領域: 1～10 平方度

HSC

視野: 直径1.5度（104 x 2k4k CCDs）
2GB/shot (～300GB/夜)
サーベイ領域 ～2000 平方度

HSC (Hyper Suprime-Cam) とは

- 特定領域科研費メンバーを中心に、多岐に渡る興味を持った研究者の共同研究を予定
  - 宇宙論（WL、BAO）、超新星、局所・遠方銀河形成進化、突発天体、太陽系天体 etc
- 国内・国際共同開発
  - 国立天文台、
    東京大学/IPMU、KEK、
    Princeton、ASIAA



- （我々が考える）HSCに期待されていること
  - (1) Suprime-Camと同質かそれを上回る上質な可視Imagingデータを、
  - (2) Suprime-Camでは到達しえない 広さ＆深さ で得る（e.g., ~1000 sq.deg wide field, >>10 sqdeg deep field)
  - (3) そのデータはサーベイ観測のランドマークとなるべき（e.g., HDF, SDSS)

HSCデータ解析システムの役割

- 期待されている生成物はSCamのものとほぼ同じ
  - 整約済みCCD画像（g’,r’,i’,z’,Y）
  - モザイク・スタック（ショット合成済み）画像
  - マルチバンド天体カタログ
  - 精度: 位置<<0.1”, 明るさ<<0.05mag, 形状をきちんと把握
- ただし、以下を達成しなければならない
  - 公開に耐える・精度を保証できるプロダクトである
  - 共同研究者へ迅速に提供する
    - 個々人で解析するのはほぼ不可能な規模のデータセット
    - ある程度汎用・共同研究者の必要とする情報を網羅していなければならない

（WL研究→形状、銀河形成研究→深撮像の測光、測光の視野、バンドを通した整合性）

そのために解決しなければならないこと

基本的にはSCam解析の10倍スケールアップだが、、、

1. HSCというこれまでにない広視野データのための**解析手順・アルゴリズム**
2. **解析の効率化**
   - 大量のデータを迅速に的確に処理しアップデートするため
3. **サイエンスデータベース**

が必要。

- これらの完備は我々は未体験！
- もちろんこのほかに、フラックスキャリブレーションソースの確保、データの性質に影響の出る装置状態の把握といった、解析だけに閉じない課題はある

どのような運用でデータを効率よく解析し、成果の獲得を目指すのか？

（特に期待される大サーベイのデータからの成果の効率よい獲得を目指すには？）

↓

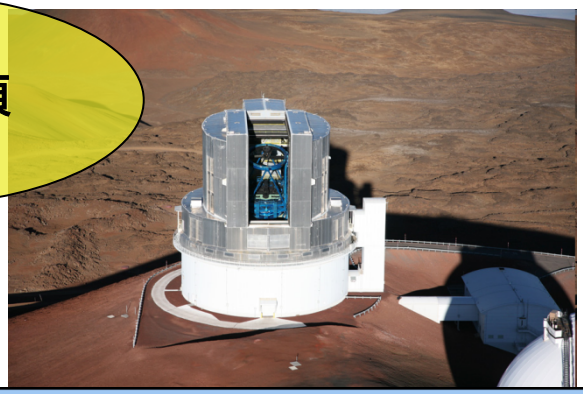
高速かつ精度の高い画像処理とそれに伴うデータのクオリティ・コントロールで無駄のない運用を行う。

↓

マウナケア山頂、ハワイ山麓施設、日本での処理の役割分担を考える

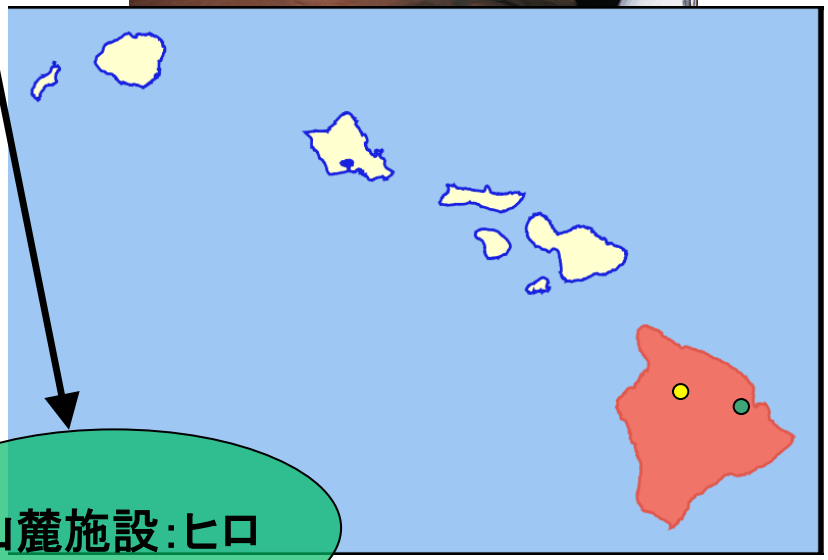
日本

マウナケア山頂



観測データ取得

1Gbps



ハワイ

山麓施設:ヒロ

オンライン解析
（~5分程度のサイクル）

?オフライン解析？
（数日程度のサイクル）

155Mbps

国立天文台:三鷹

東大IPMU:柏

オフライン解析＋アーカイブ
（数日程度のサイクルでフル解析）

OCS/ CoDM

HSC

HSC BEE

Data production rate:

- 2GB/shot
- ~ 500GB/night
- ~ 5TB/run
- ~150TB/300nights

Summit

observer

QL Health check

BEE PC OBCP

~20sec
~1Gbps

Gen2/ OBC

Feedback:
<< 3min

Summit-Hilo
1Gbps

3-run processed data ~30TB?
+ analysis DB

Hilo

Mitaka Or Hilo

Data evaluation

Meta data only

HSC-ANA On-site

OCS(HANA)/ STARS

HSC-ANA Off-site

MASTARS

Raw data

500GB/8hrs
~ 0.15Gbps

Full analysis

データベースを用いた解析管理
オンサイト解析と本解析の連携

- ハワイ観測所にオンサイト解析システムのプロトタイプを構築し、SCamの観測支援と、解析の効率化のためのデータベース＋ミドルウェアを試験。共同利用観測で運用試験している。

観測の
遂行・計画

オンサイトでの解析 (during run)

自動でデータのタグ付け
クオリティチェックと評価
バイアス、ノイズ、スカイシーイング、透過率
使えるデータかどうか？
装置の状態把握

解析履歴
（入力データ、
解析パラメータ）
Data tag

観測

連携

解析
Database

サーベイ達成度の管理
サーベイ計画

解析履歴
データ管理

Data tag

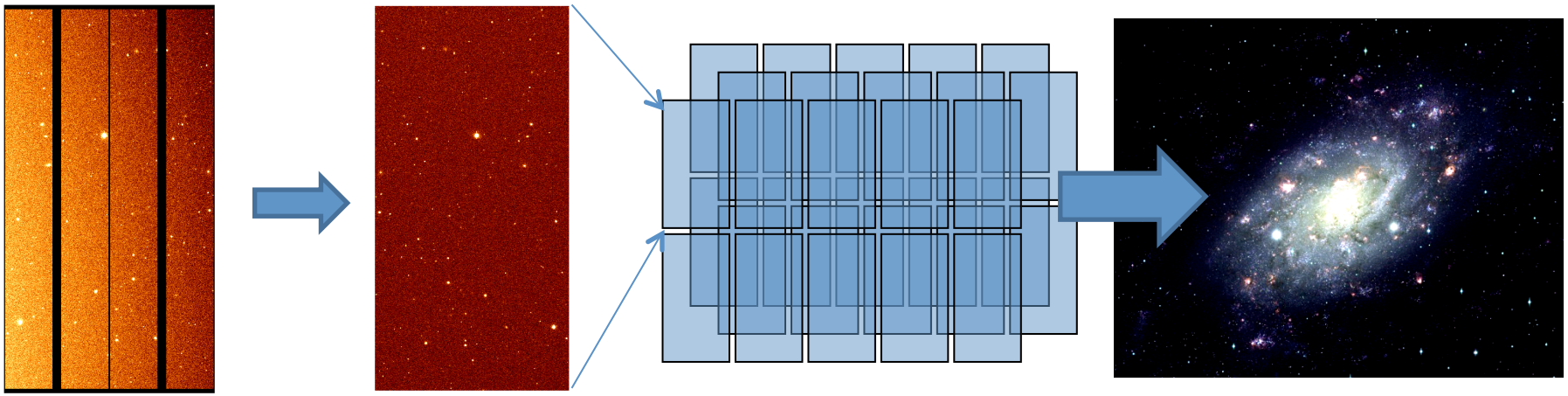
オフサイトでの本解析 (post-run)

HSCデータのための解析手順・アルゴリズムについて

（今回はあまり細かく述べない、、）

一般的な撮像データ解析手順＝HSC でもベースとする

1. 各CCDのバイアス除去・感度差補正（一次処理）
2. 必要な一次処理済みCCDデータを集め、
3. モザイクして足し合わせる
4. 位置情報、カウントを物理量に直す



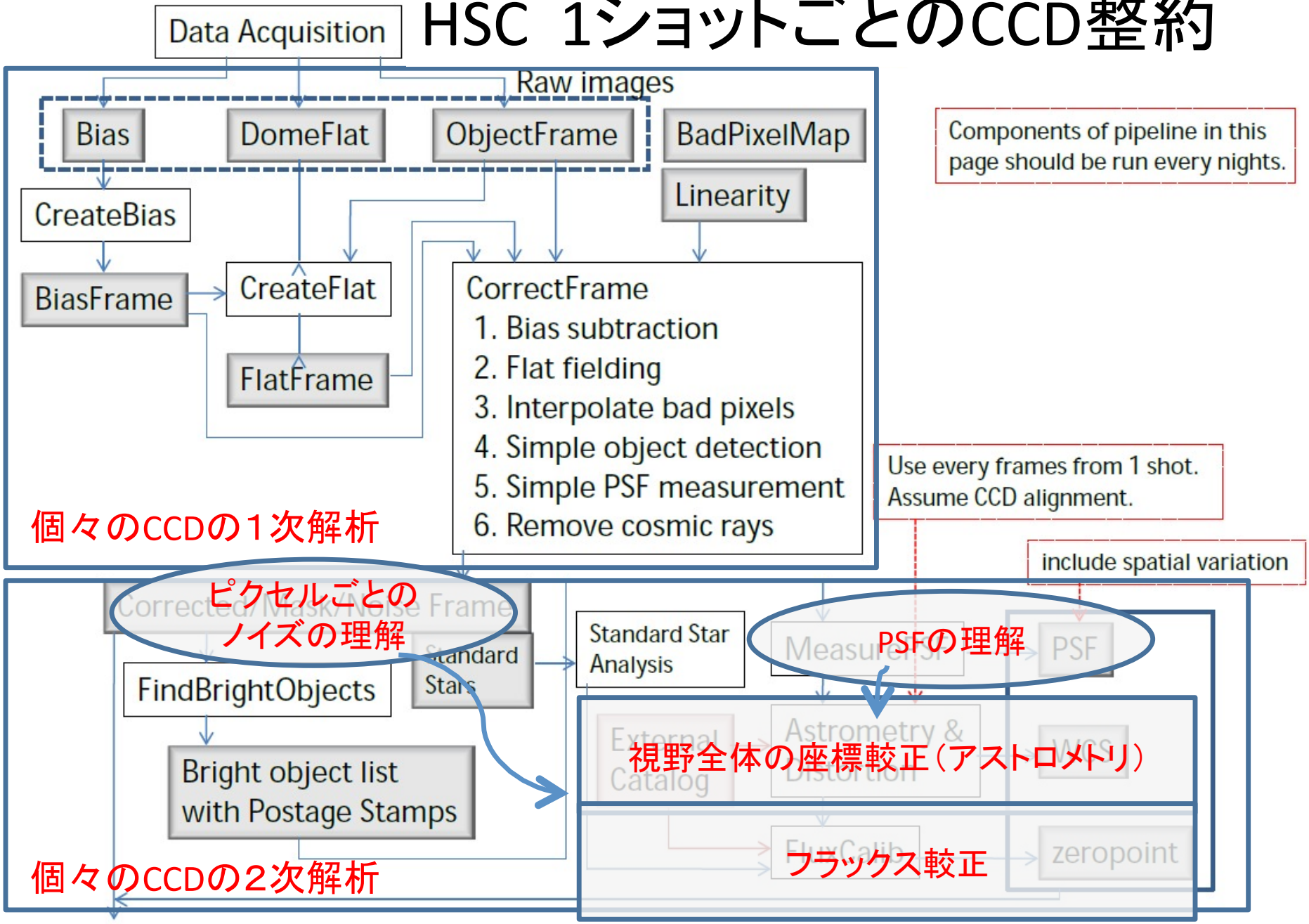
個々のCCD

ディザリングして
取得した複数ショット

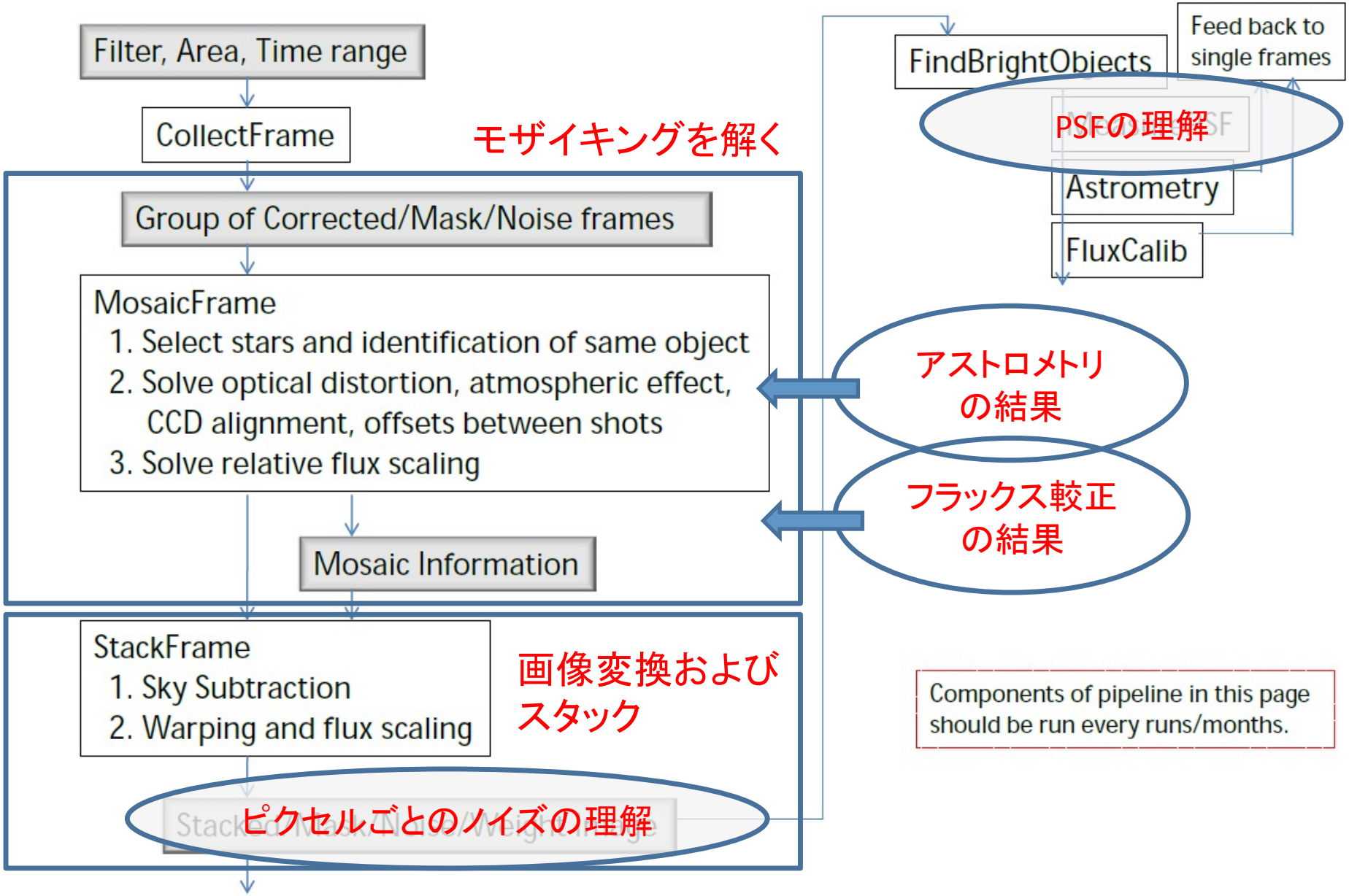
スタック画像
これを用いて天体カタログを作成

次の３枚のスライドでHSCでターゲット
とする解析手順を紹介します

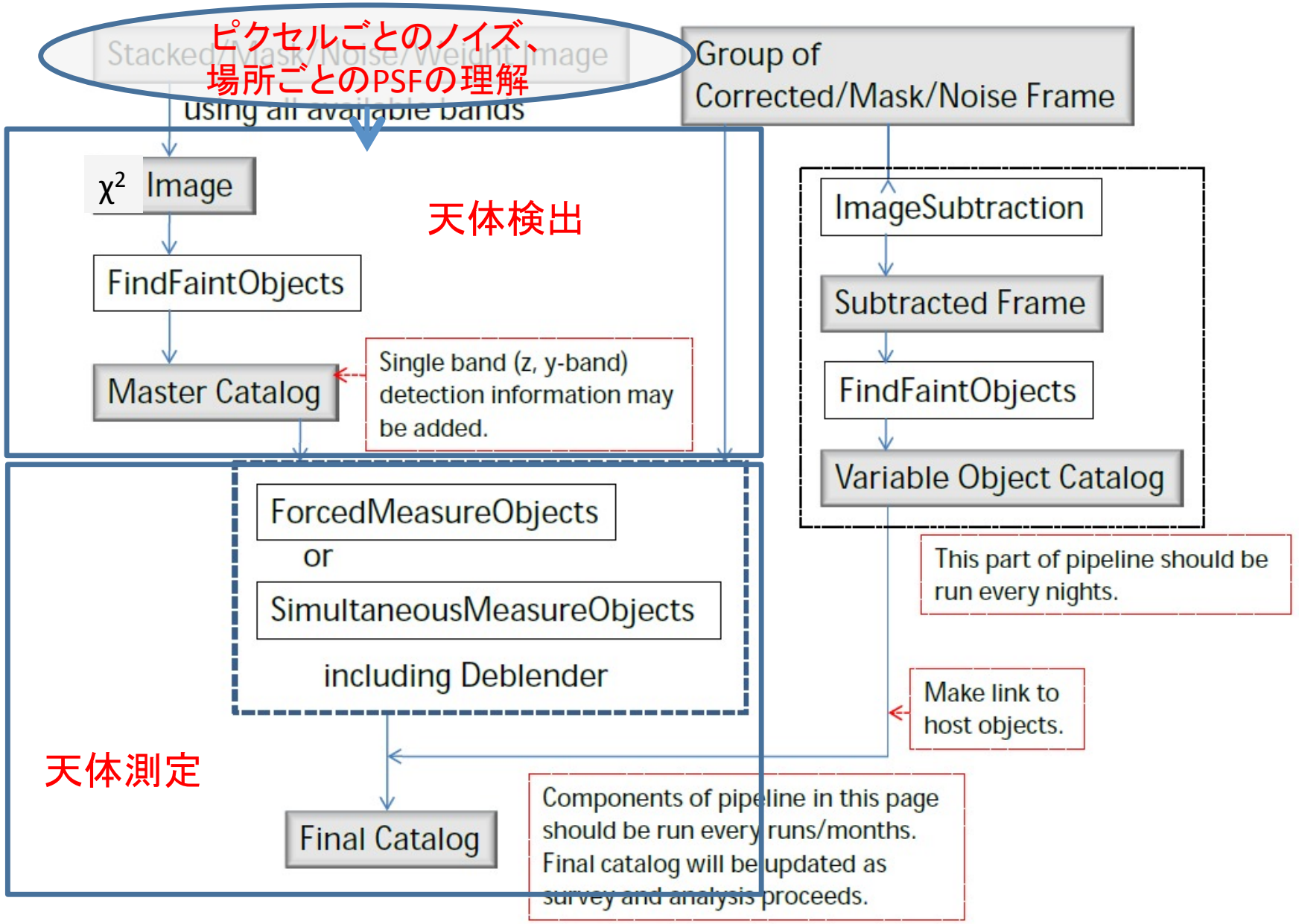
HSC 1ショットごとのCCD整約



HSC モザイキング・スタッキング



HSC カタログ作成



HSCデータ解析の手順（アルゴリズム）における課題

（1）大きく、かつ変動するDistortion
（2）視野内の大きな大気差
} ジオメトリ

（3）広くて（CCD104枚）、円い視野、広いサーベイ面積
（4）大きな蹴られ
} 広視野

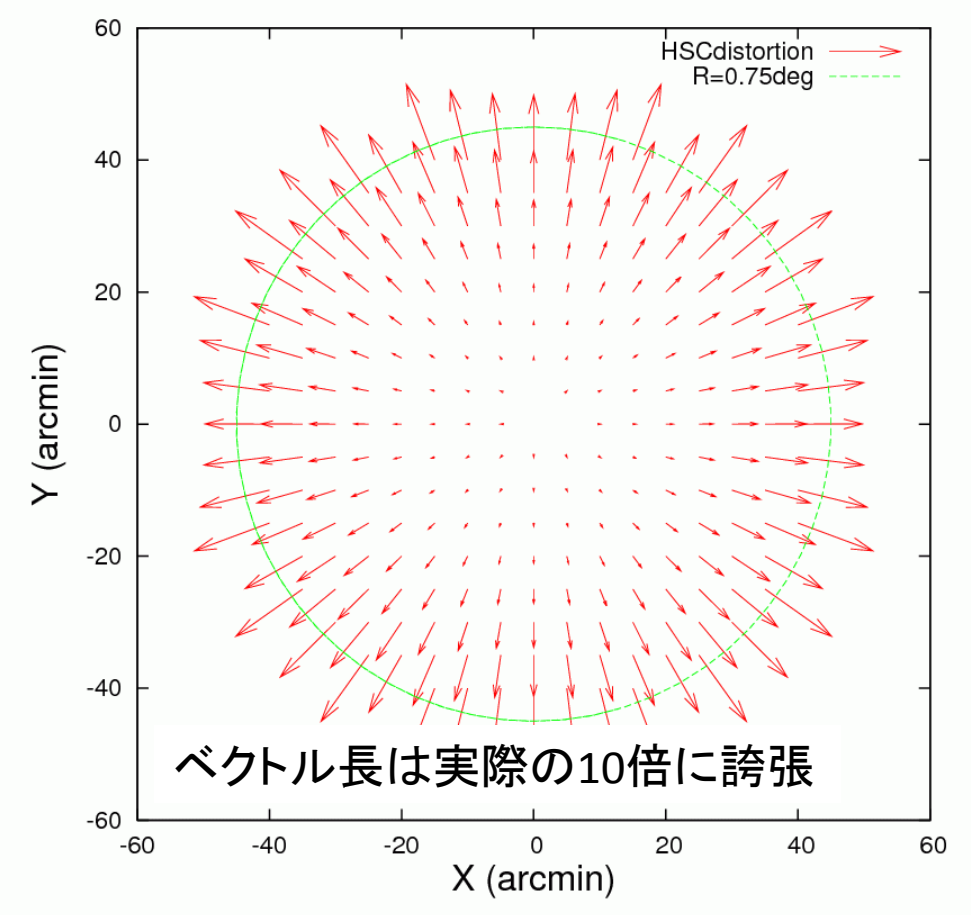
これらは相互に関連し、

1. 位置較正
2. フラックス較正
3. 天体の形状保存
4. モザイキング・カタログ作成　　を困難にする

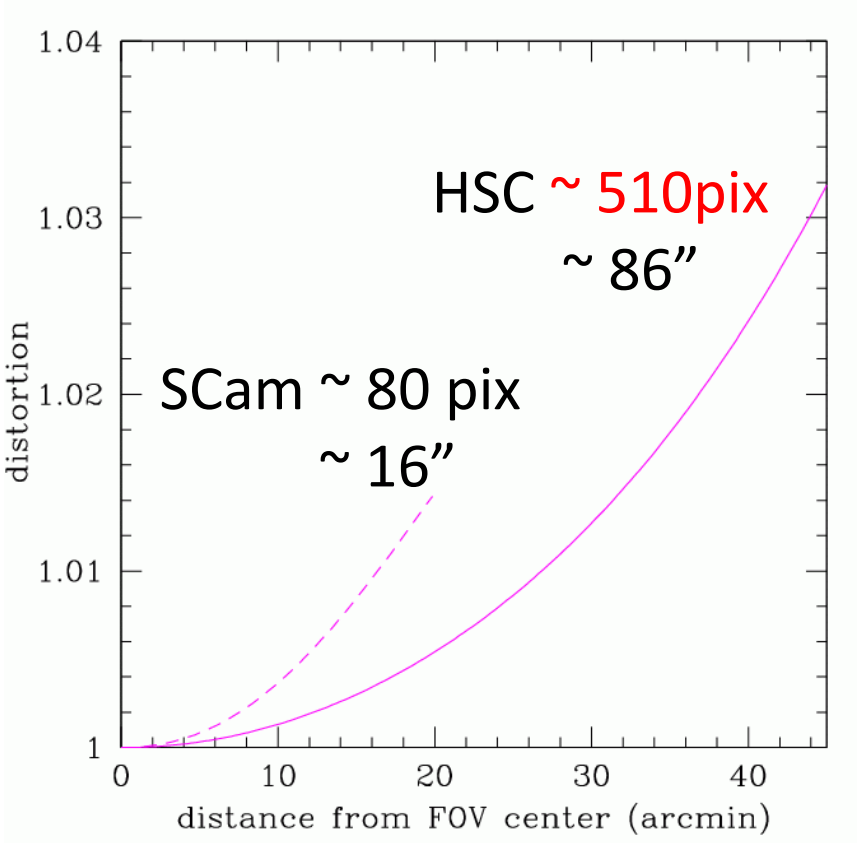
（１）（２）Distortion、大気差による困難

大きな Distortion

- 視野端ではSCamと比べて5倍歪む



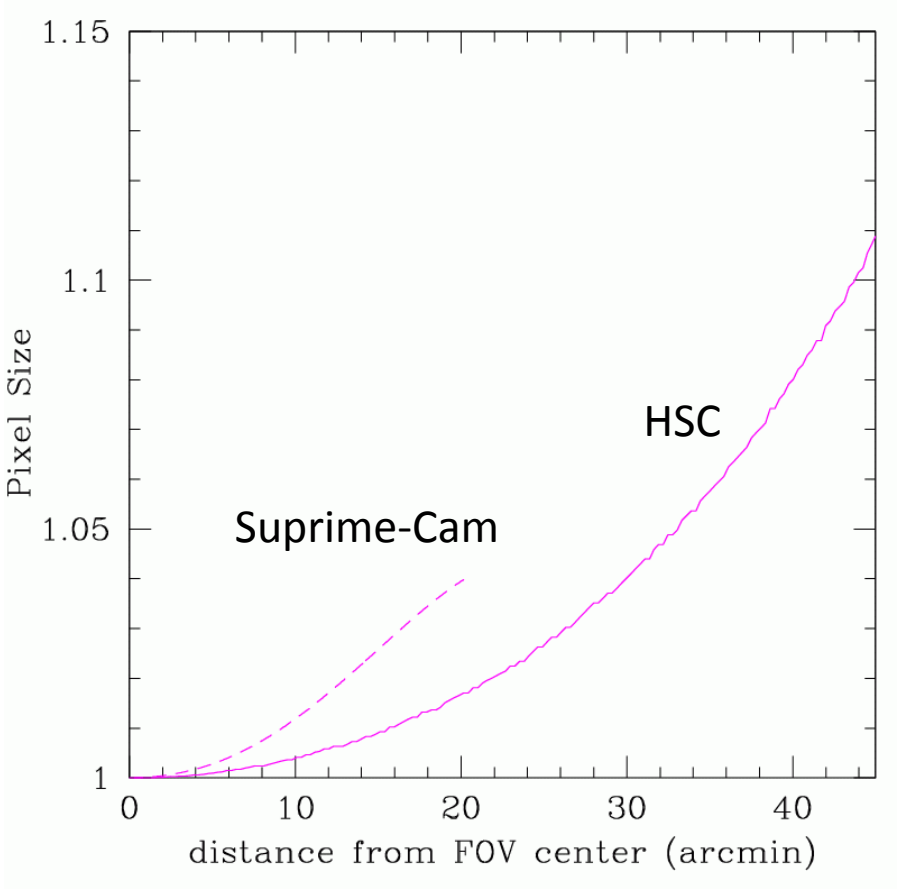
HSCのDistortion設計値

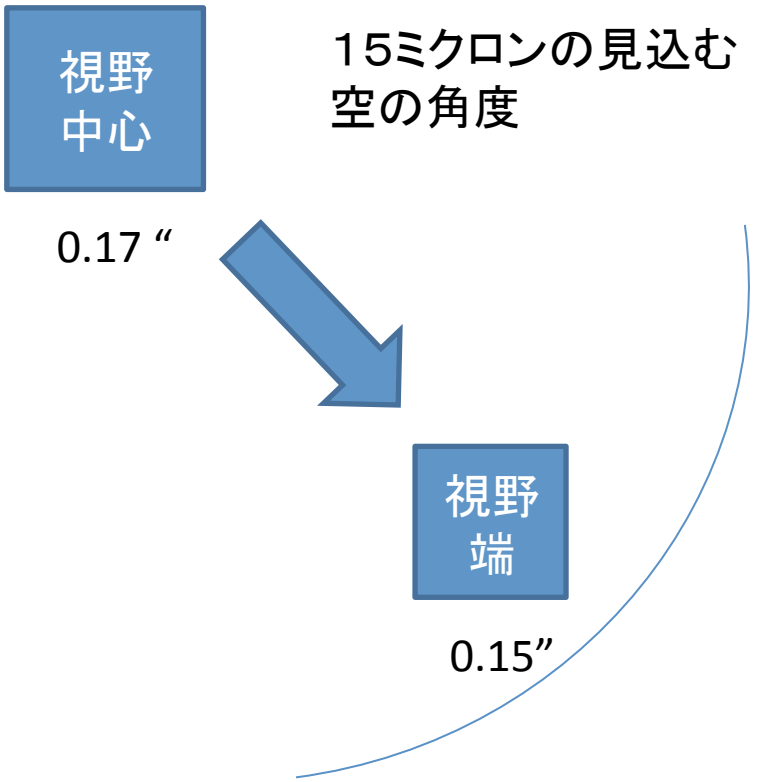


Thanks to 小宮山、諸隈、大倉

大きなDistortion

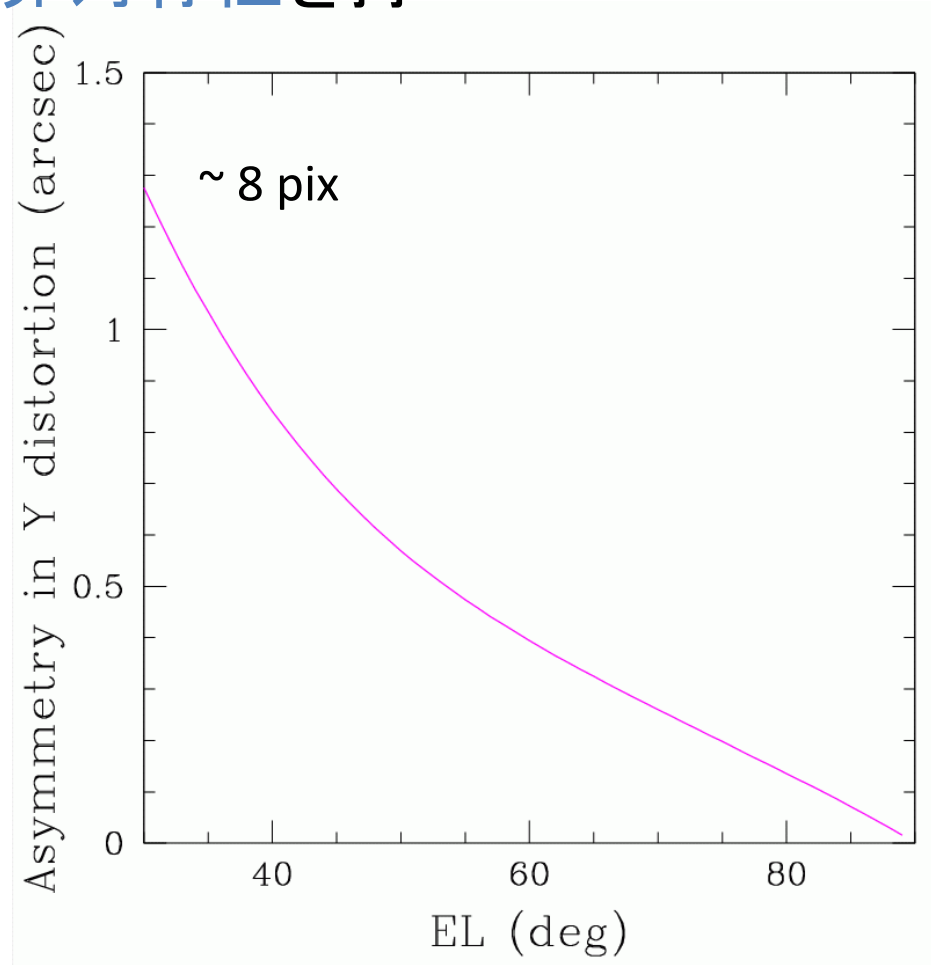
- 視野端でピクセルスケール（ゼロ点）差~11%
  - <<0.05 magレベルの測光で無視できない





非対称で変動するDistortion

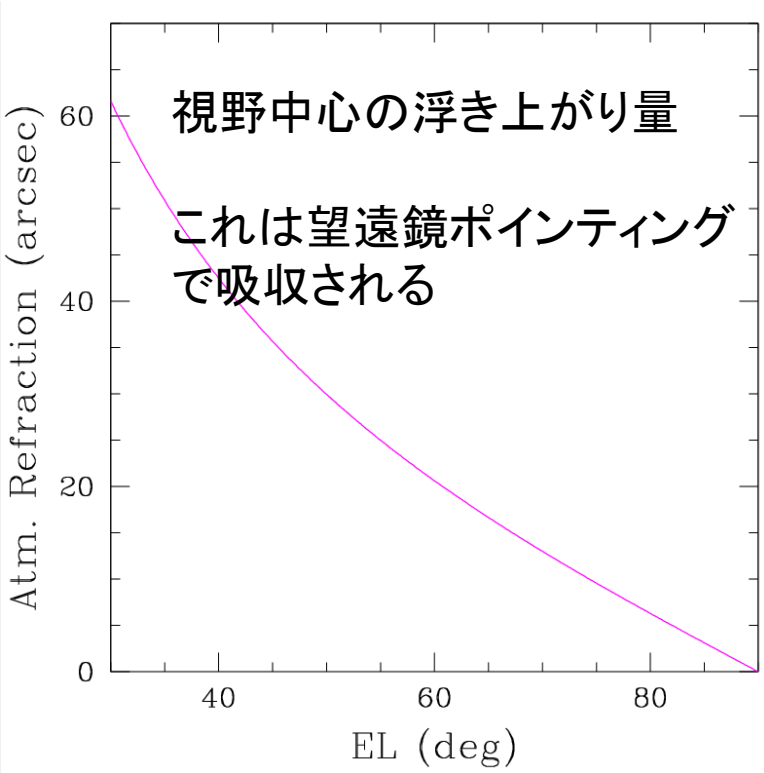
- ADC(大気分散補正光学系)の影響でDistortionパターンが、視野の重力方向に非対称性を持つ
- EL = 30 – 90　で
  ~1.3 arcsec程度の変化

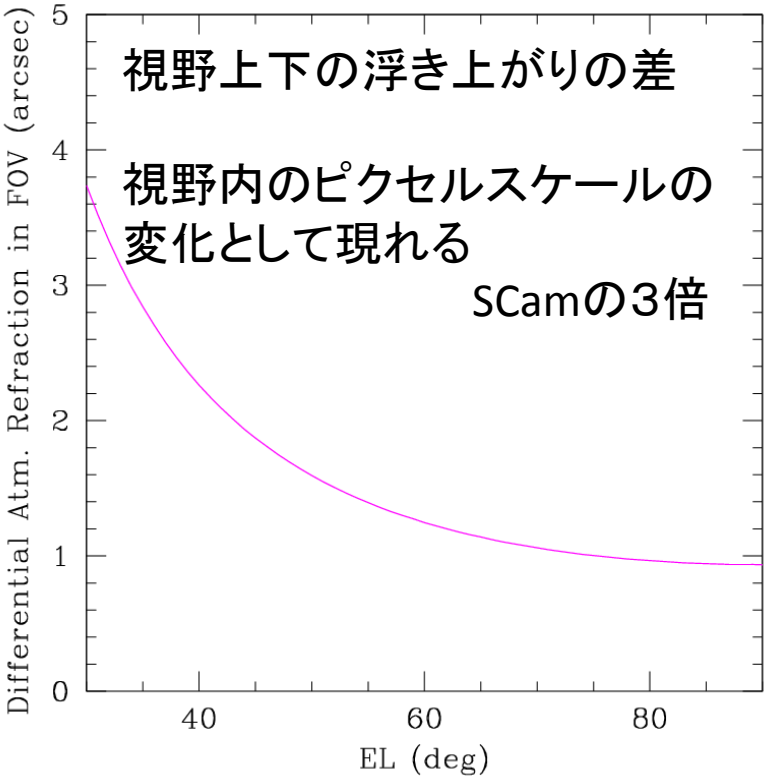


0.1pixオーダーでの
形状測定、モザイキング
にはDistortionを正しく決定
しなければならない
最長積分時間にも影響する

大きな微分大気差

- 視野上下の浮上量の差はEL = 30 – 80で2.5秒角
  - dr/dz = 0.”624 $\sec^2 z$ ($\deg^{-1}$)　(Tanaka 1993; ~V band)
- 視野が広いので実は水平方向に1”差がある





解決策の開発：ジオメトリ編

これまでの困難の影響をまとめると

- 位置・座標較正が非常に行いづらい
  - 参照星とのクロスID（マッチ）も困難
- 決めうちの補正では誤差も大きくなる
- ピクセルスケールがショットごと、視野内の場所ごとに変化するので
  - 天体形状の測定に系統誤差が入りやすい
  - 測光に場所に依存する系統誤差が入りやすい
  - 実は追尾にも影響する

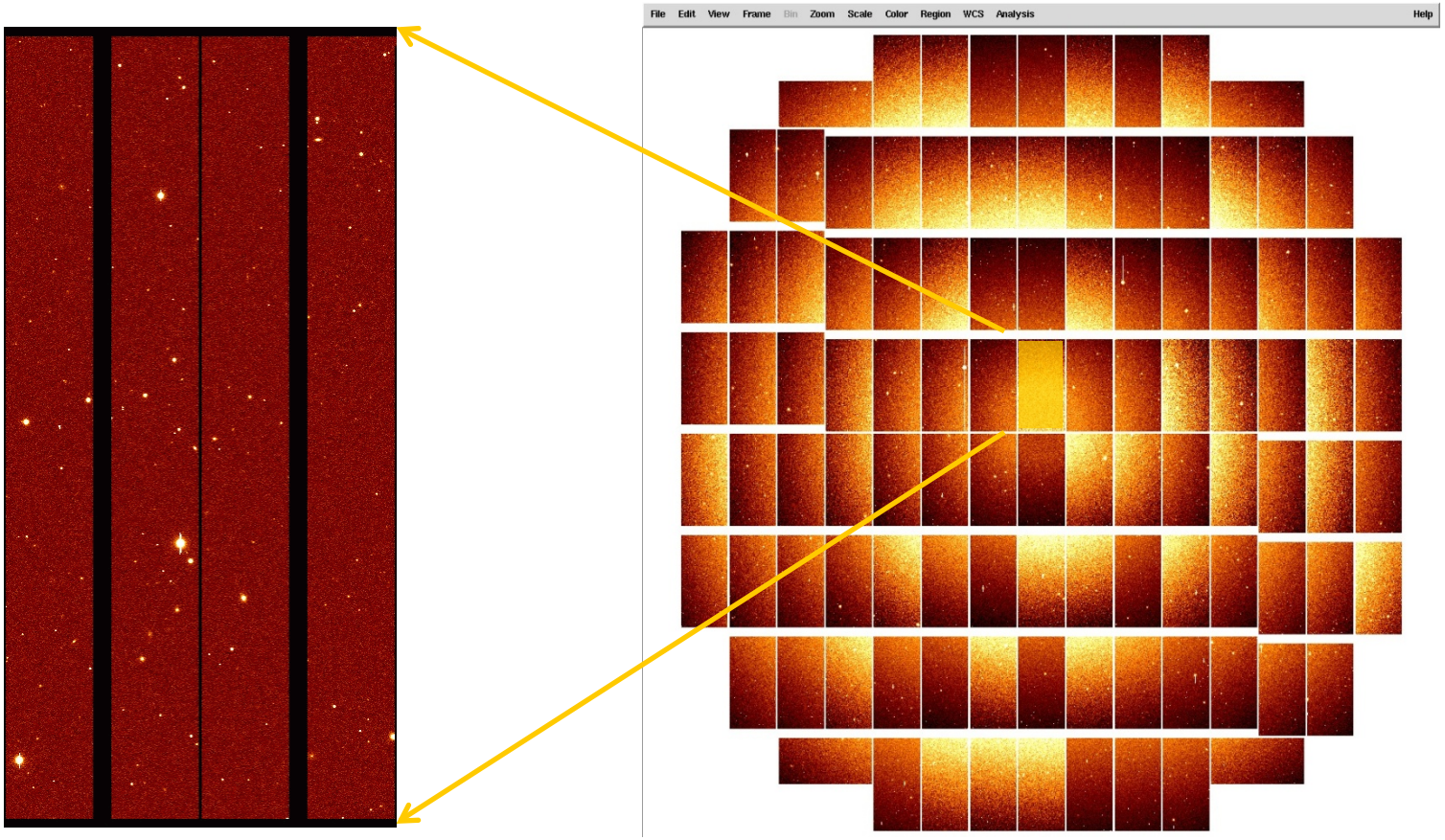
SCamよりも強く、無視しづらい量の効果として現れる

位置較正（アストロメトリ）が重要

- 実際の参照天体を用いた、ショットごとに行う位置較正が非常に重要
- 後に述べるモザイキングのためにも重要
- 開発要素
  - 安定した参照天体と検出天体のカタログマッチング
    - ヘッダのWCSから>~ 500 pixのオフセット
    - CCD内の差分があり
  - 視野全体にわたる正確な座標変換式（WCS; pixel – RA,Dec）の導出
    - 最終画像で各ショットごとに rms = 0.1pix オーダーの位置決定精度を目指す（仮：絶対較正 ~50mas, 相対<20mas）

HSCシミュレーションデータ

- 実際の観測データをシミュレートした104CCDを作成し、SCamの実データとともに、解析エンジンの開発に利用
- Distortion、大気による浮き上がり、けられを含む
- SDSSまたはUSNO-B1.0の参照星＋擬似銀河



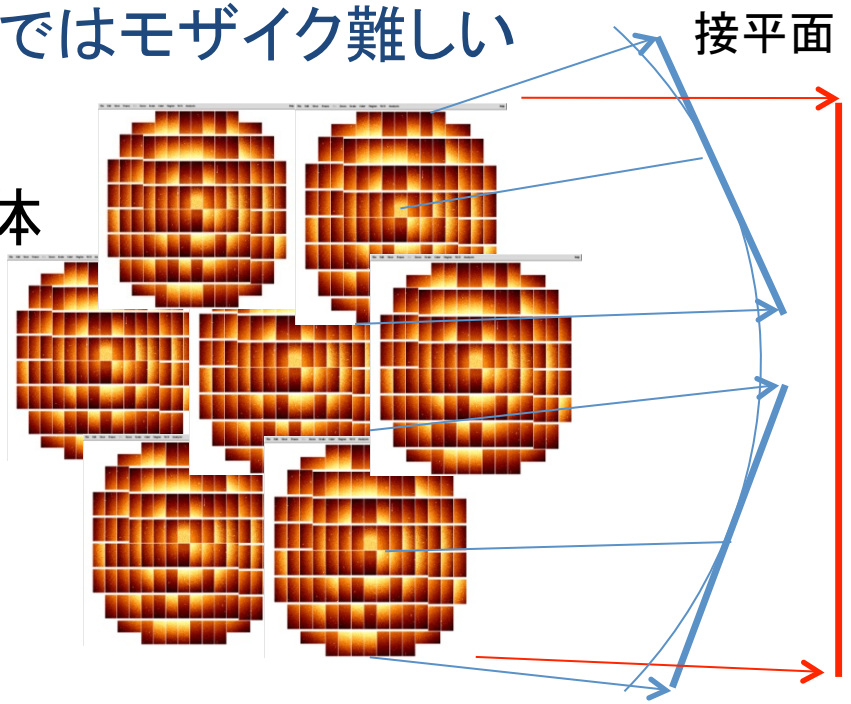
（３）（４）広く円い視野、けられによる困難

広く、かつ円い視野

- 数十～1000平方度＝HSCの10～>500視野でカバー
  - 各視野が重なり合いマップされることを想定
- どうモザイクするのか → 工夫が必要
  - 各視野は別々の天球の接平面
  - 仮にDistortion（接平面座標からのズレ）を除去できたとしても、平行移動と回転だけではモザイク難しい
  - しかも、実際は

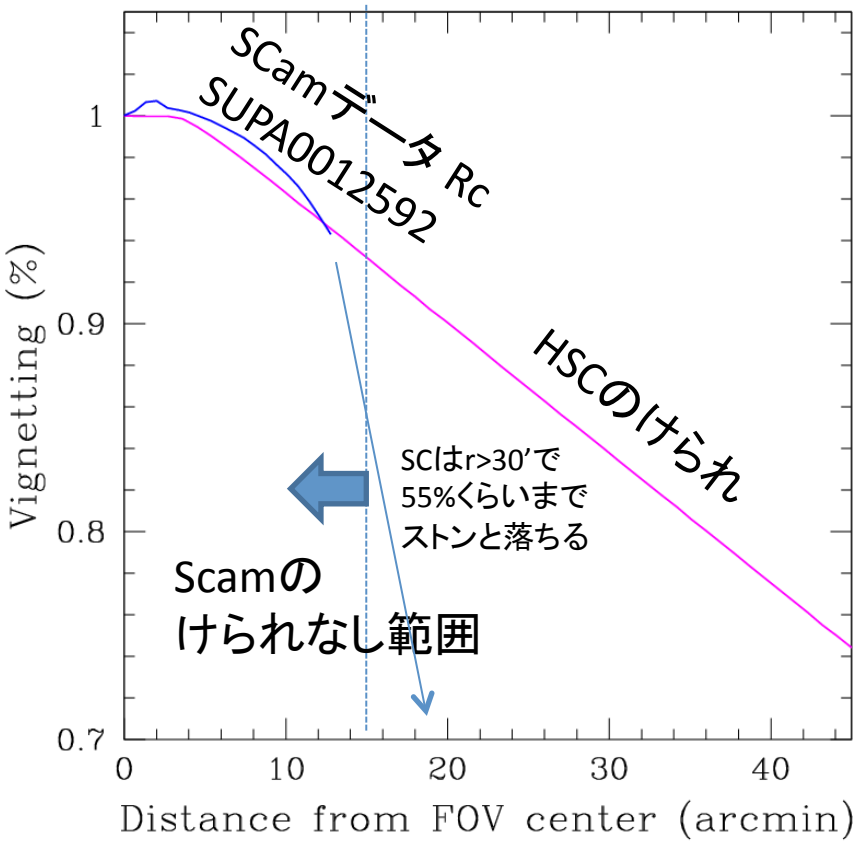
    Distortionの除去（決定）自体

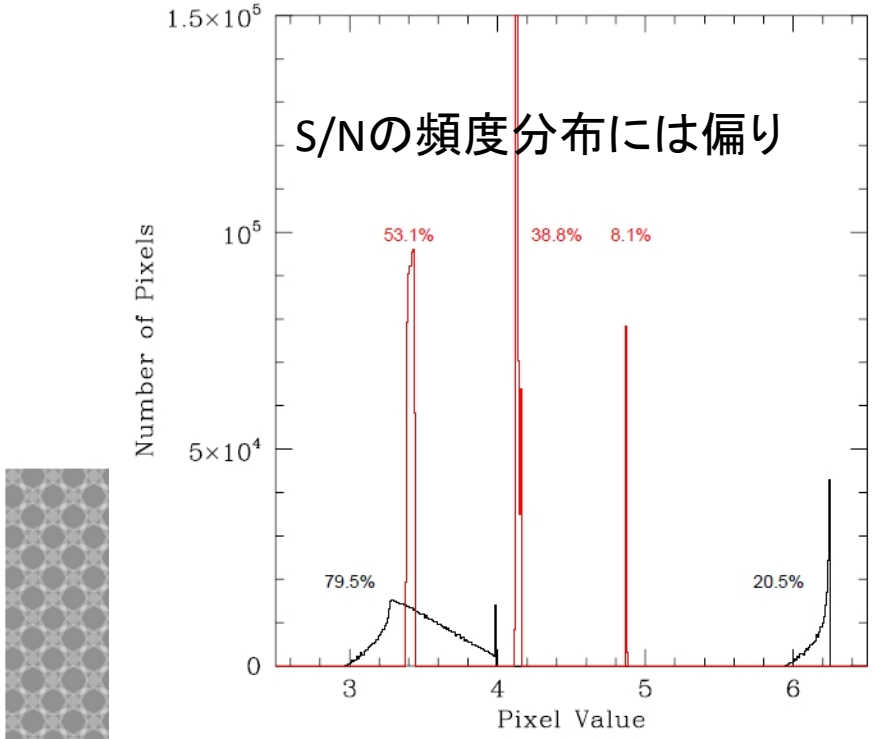
    が大きな課題



視野のけられ

- HSCでは視野中心から線形に落ちていく
- 広視野サーベイ → 複数ショットからのS/Nの異なるCCDの重ね合せ



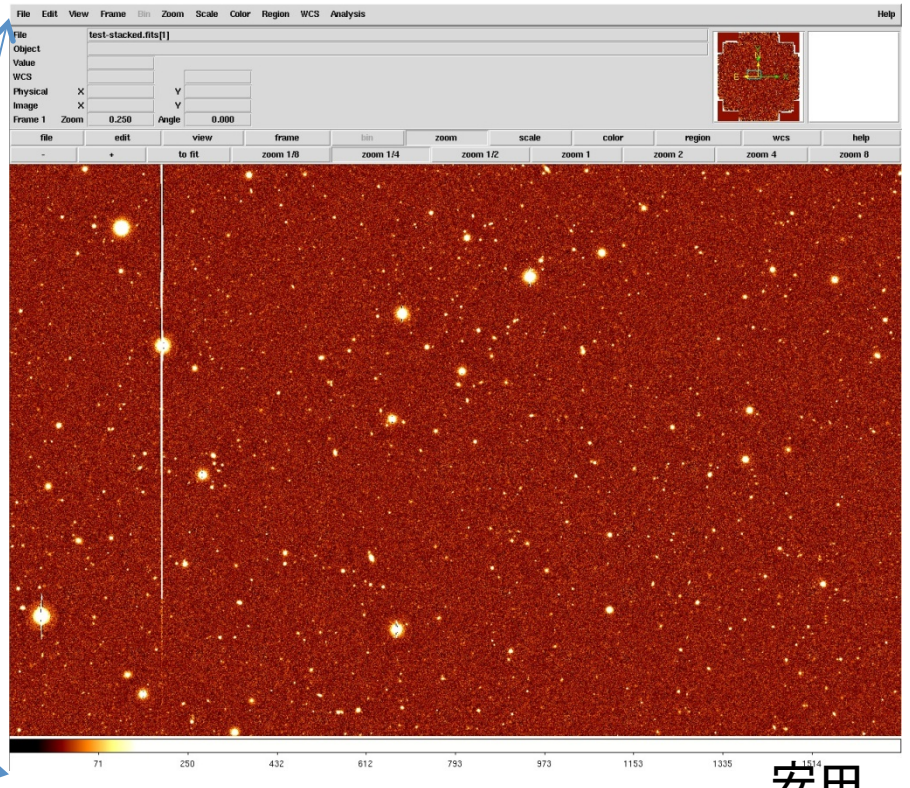


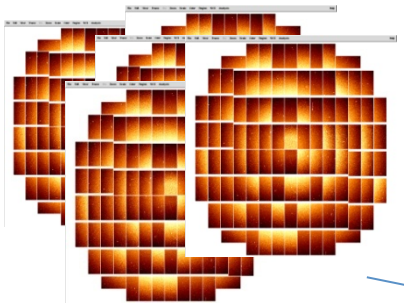
HSCによるマッピングの１案

Thanks to 安田

モザイキングの取り組み

- タイル＝１視野として試験
- 共通天体の座標を使って、最小二乗法で各CCDのTAN-SIP係数を決定 ~ rms < 0.05 - 0.3 pix
- 課題
  - モザイク精度の確保
  - 視野をまたいだタイル
  - 高速化
  - ノイズ、マスク、PSF





データ諸元：
- EL=30
- SDSS stars + 偽銀河
- i’バンド　300s x 5 shot

安田

そのほかの解析手順の課題

- 場所ごとのPSFの測定と、それを用いた天体検出測定
- スタック時のPSFの均一化
- ピクセルごとのノイズ、マスク情報を用いた天体検出測定
- HSCに最適な天体測定アルゴリズムの確立
- HSCに最適な多色カタログ作成方法
- 正しいフラットをどのようにつくるか
  - Geometric effects, 散乱光・迷光etc.　の影響の除去
- フラックス較正（特に参照天体を含まないフィールド）
- 画像の座標変換とスタックをしないで、正確に形状測定する方法　→　宇宙論WLチーム

解析の効率化について

データ解析の効率化における課題

大量（SCamの10倍）のデータを迅速に処理しリリースするために

1. 解析に時間のかかる箇所の高速化

- ✓ ハードディスクへのファイル入出力を最小化
- ✓ ファイル入出力のトータル性能の最大化（と安定化）
- ✓ 分散、並列処理　―　例えば1次解析、モザイク・スタッキング

2. 解析履歴の管理

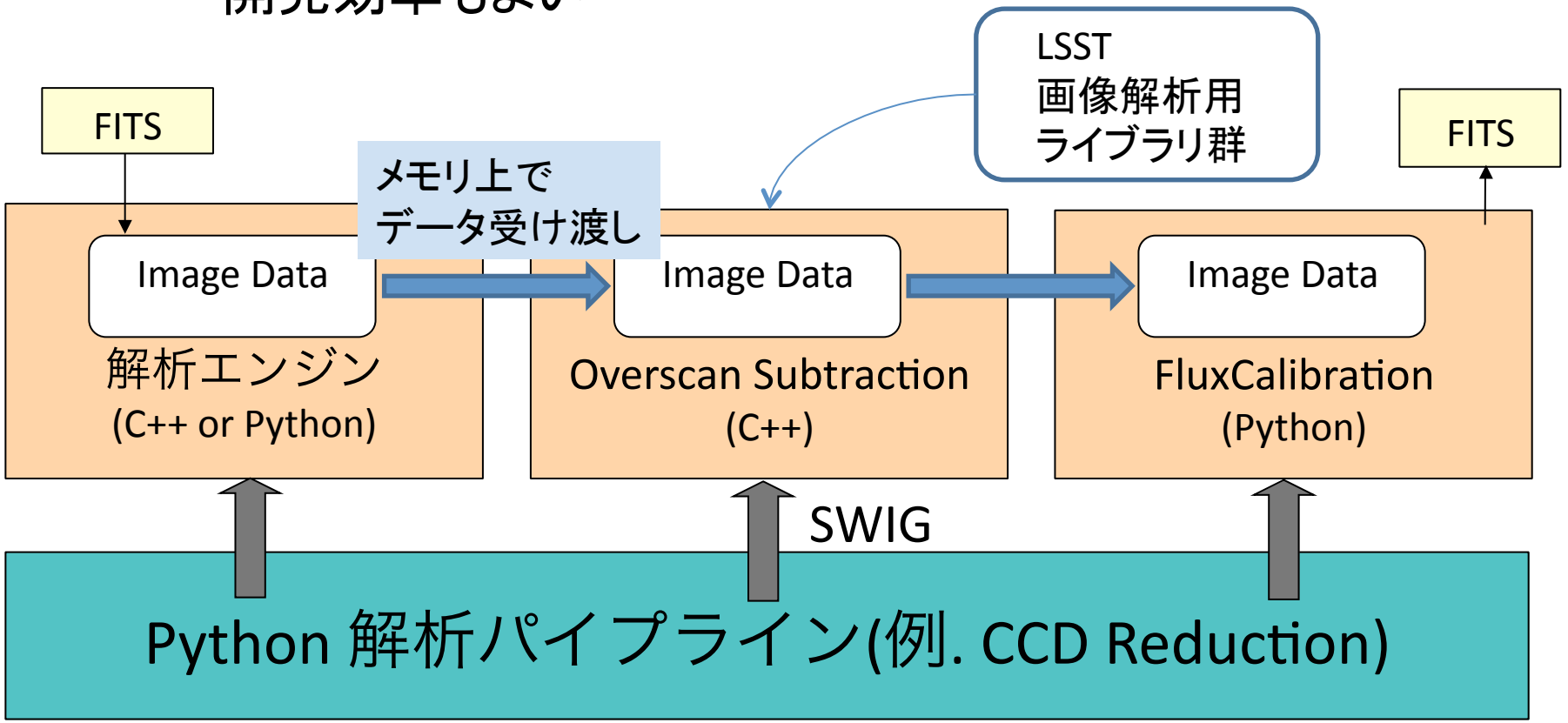
- ✓ 膨大な解析履歴と生成データを管理し、トラック・再現できるようにしたい

3. 観測時にデータクオリティを調べてタグ付けする機構

- ✓ オンサイト解析

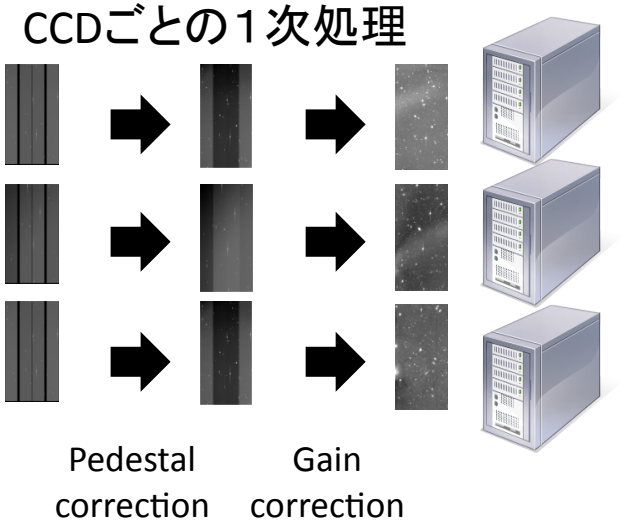
解析高速化： ディスクI/Oの最小化

- ハードディスクI/Oの最小化
  - 解析ステージ間はメモリ上でデータを受け渡す
- Python & C++（速度が重要なところ） ＋ SWIG
  - 開発効率もよい



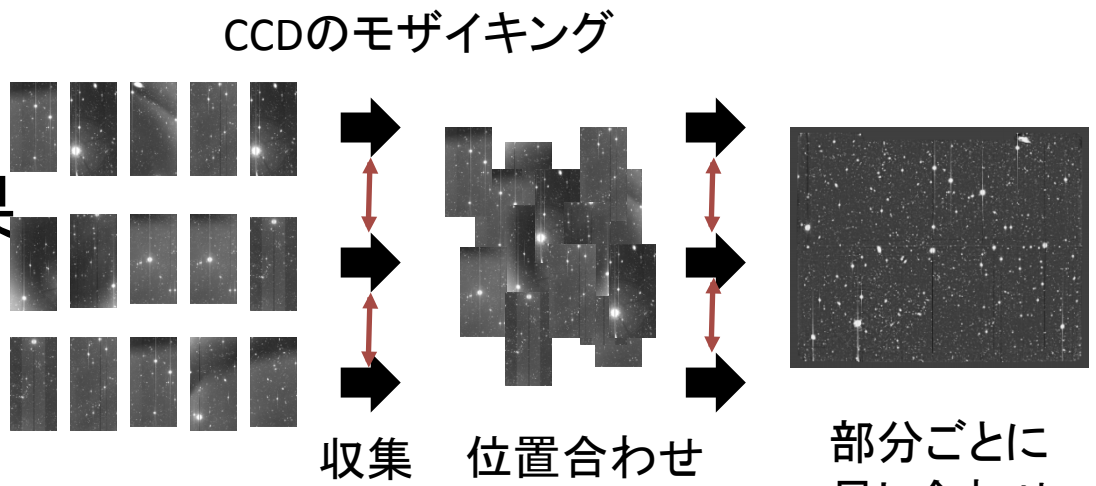
解析の高速化：並列処理の導入

- データパラレル
  - 単純な並列化



複数台のコンピュータで
たくさんプログラムを
走らせるだけで
並列化できる

- プログラムパラレル
  - 別の解析からの結果を集め、処理し、再分配 （流れ作業）



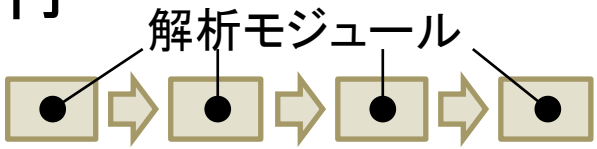
(3つとも独立に動作)

Thanks to 峯尾

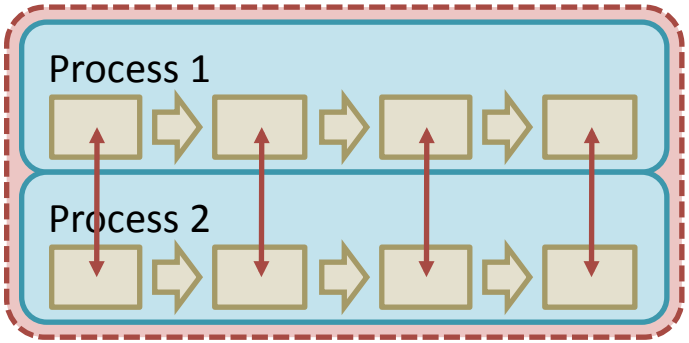
並列解析フレームワーク(pBASF)

Belle AnalysiS Framework

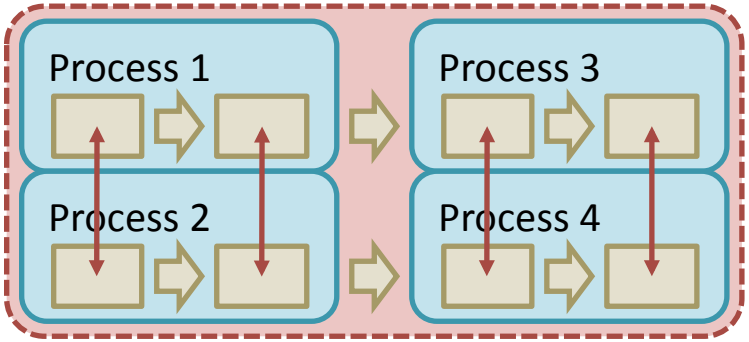
- 解析パイプラインの逐次実行
  - メモリを介したI/O



- MPIベース分散処理
  - データパラレル
  - プログラムパラレル
    - ともにプロセス間通信

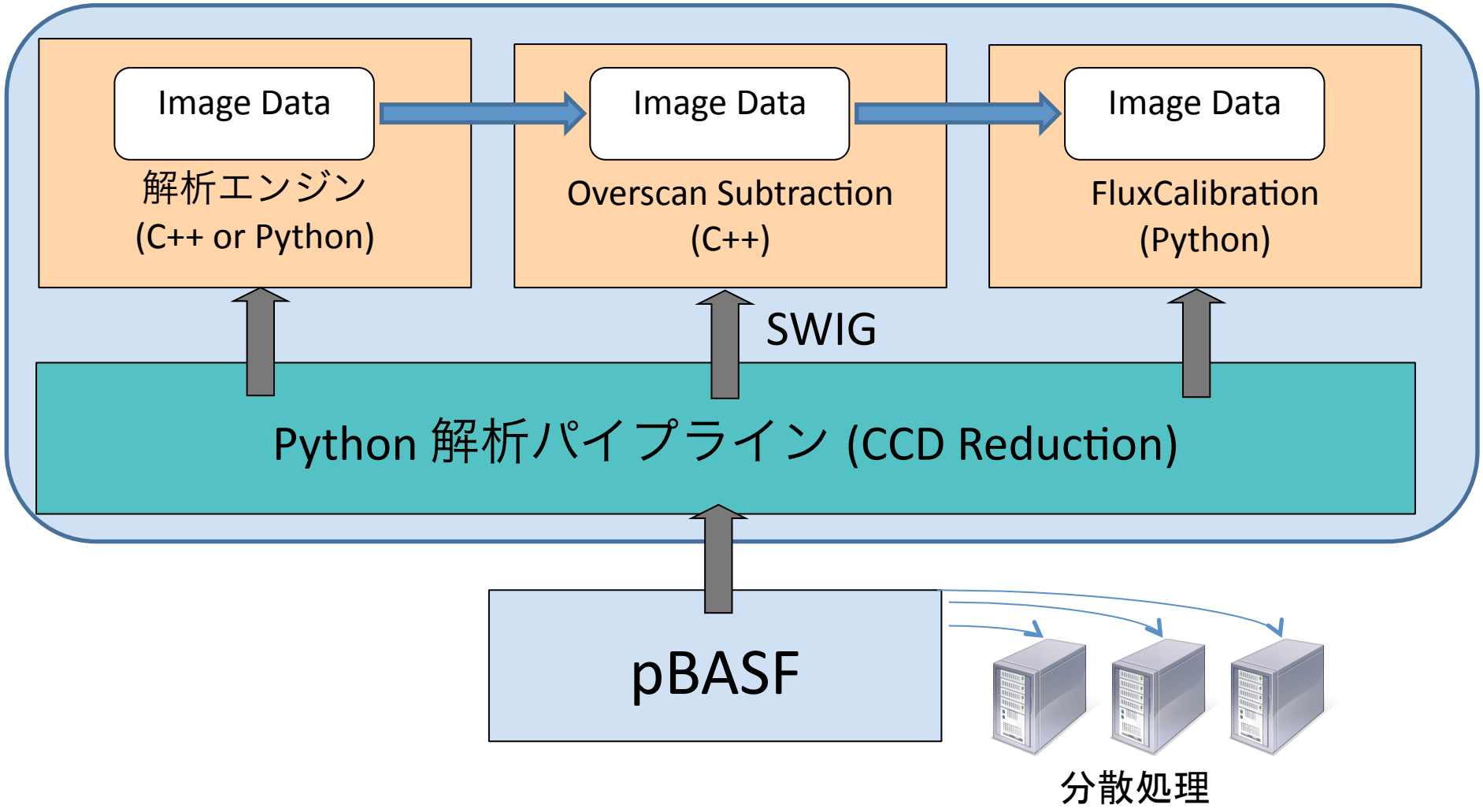


- Pythonインターフェース
  - Python、C++どちらで書かれた解析モジュールも呼べる



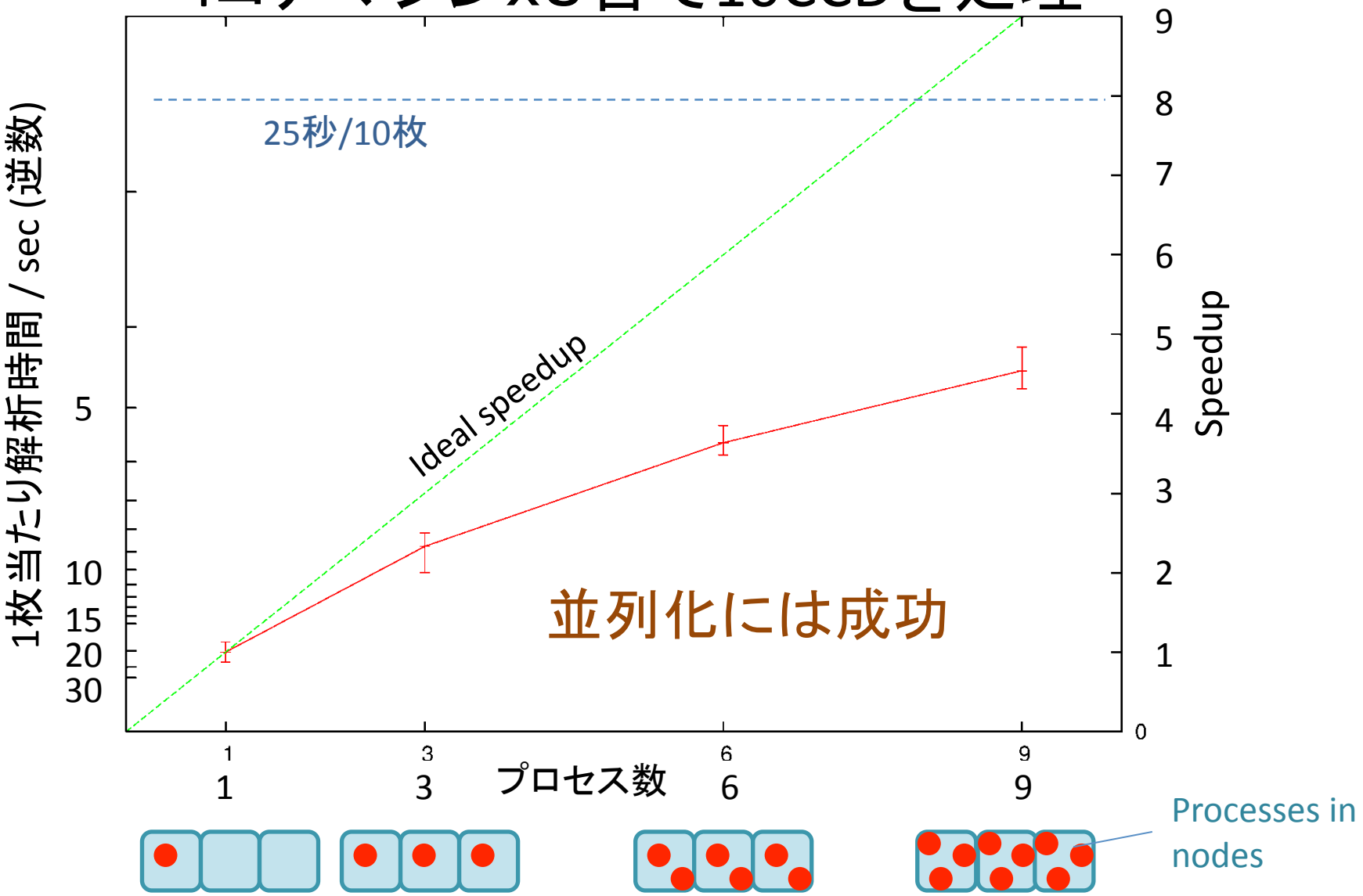
Thanks to 峯尾

解析パイプライン＋pBASF



Speedup

4コアマシンx3台で10CCDを処理



解析履歴の管理＆オンサイト解析

解析履歴の管理とオンサイト観測

1. 解析履歴の管理
   - 長期の観測ランのサーベイデータの解析履歴とその生成データを管理し、トラック・再現できるようにしたい
     - » データアップデート時に的確な再解析・追加解析
2. オンサイト観測＝観測時にデータクオリティを調べてタグ付けする機構
   - ✓ 解析支援：
     - ✓ 使えるデータかどうか、どのような素性のデータなのか、どのサーベイ領域のどのデータか（データセット）を記録。
       - → フル解析で利用
   - ✓ 観測支援： サーベイ観測の柔軟な計画・遂行にフィードバック

必ず生データに付随させる

解析履歴データベース共有

データベースを用いた解析管理
オンサイト解析と本解析の連携

- ハワイ観測所にオンサイト解析システムのプロトタイプを構築し、SCamの観測支援と、解析の効率化のためのデータベース＋ミドルウェアを試験。共同利用観測で運用試験している。

観測の
遂行・計画

オンサイトでの解析 (during run)

自動でデータのタグ付け
クオリティチェックと評価
バイアス、ノイズ、スカイシーイング、透過率
使えるデータかどうか？
装置の状態把握

解析履歴
（入力データ、
解析パラメータ）
Data tag

観測

連携

解析
Database

サーベイ達成度の管理
サーベイ計画

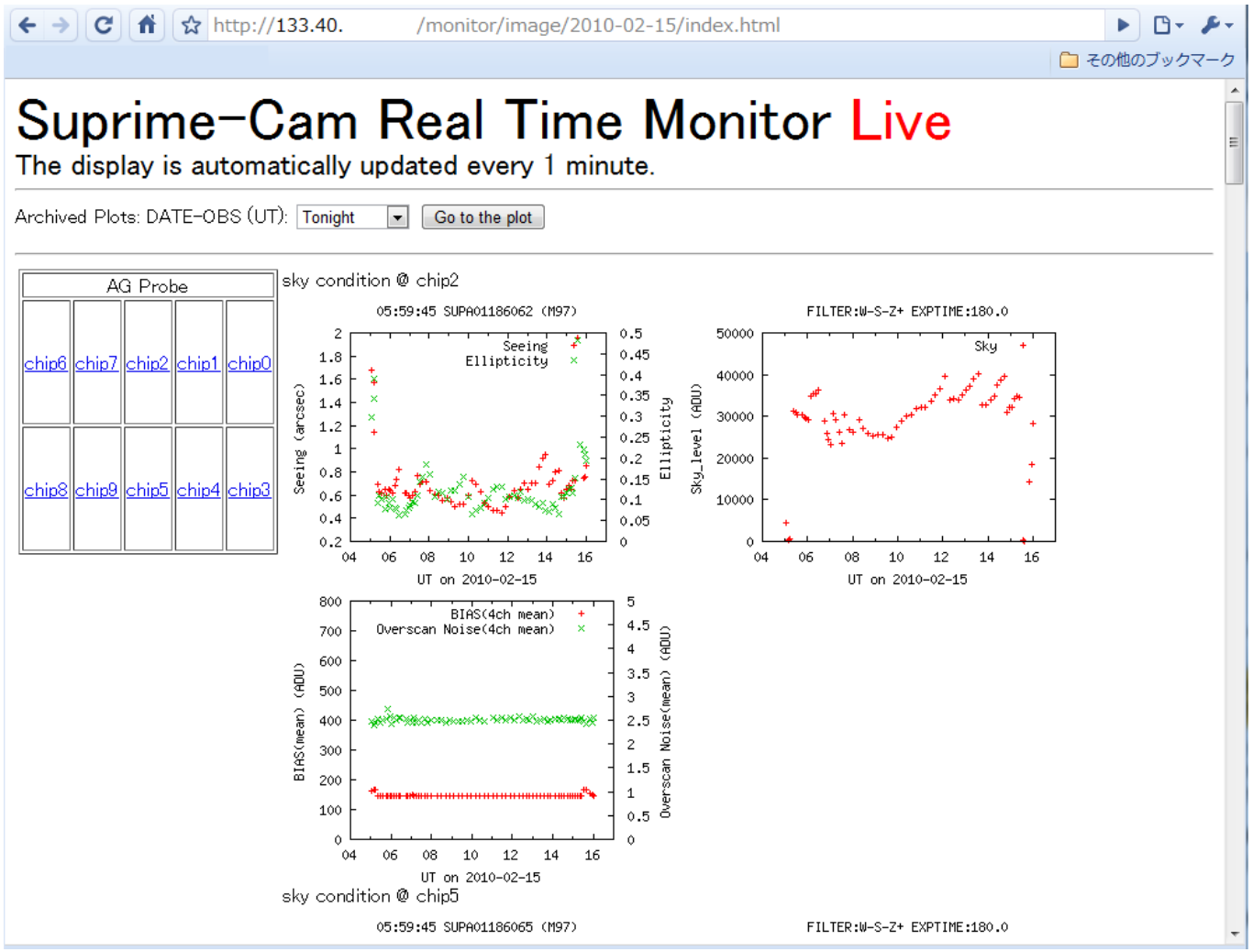
解析履歴
データ管理

Data tag

オフサイトでの本解析 (post-run)

観測者用・時系列モニタ画面

- CFHT・Skyprobe、UKIRT・seeing monitorに類する機能の提供
- サーベイ管理ソフトウェアの開発も念頭に



データベースの設計

（まだこれから、、）

HSCサイエンスデータベースの役割

- 各研究者へHSCサーベイの最新の画像とカタログデータを提供
  - 主要なサイエンスに必要な基本情報を含むように設計
  - サーベイの進行に合わせ、一定期間ごとにアップデート＆データリリースを想定
- フォローアップ観測準備のために必要な情報(位置、明るさなど)を提供
  - 既存のサーベイデータの情報ともリンク
  - 将来的な分光フォローアップなどに必須
- 複雑なQueryが可能(SQL文を直接入力)

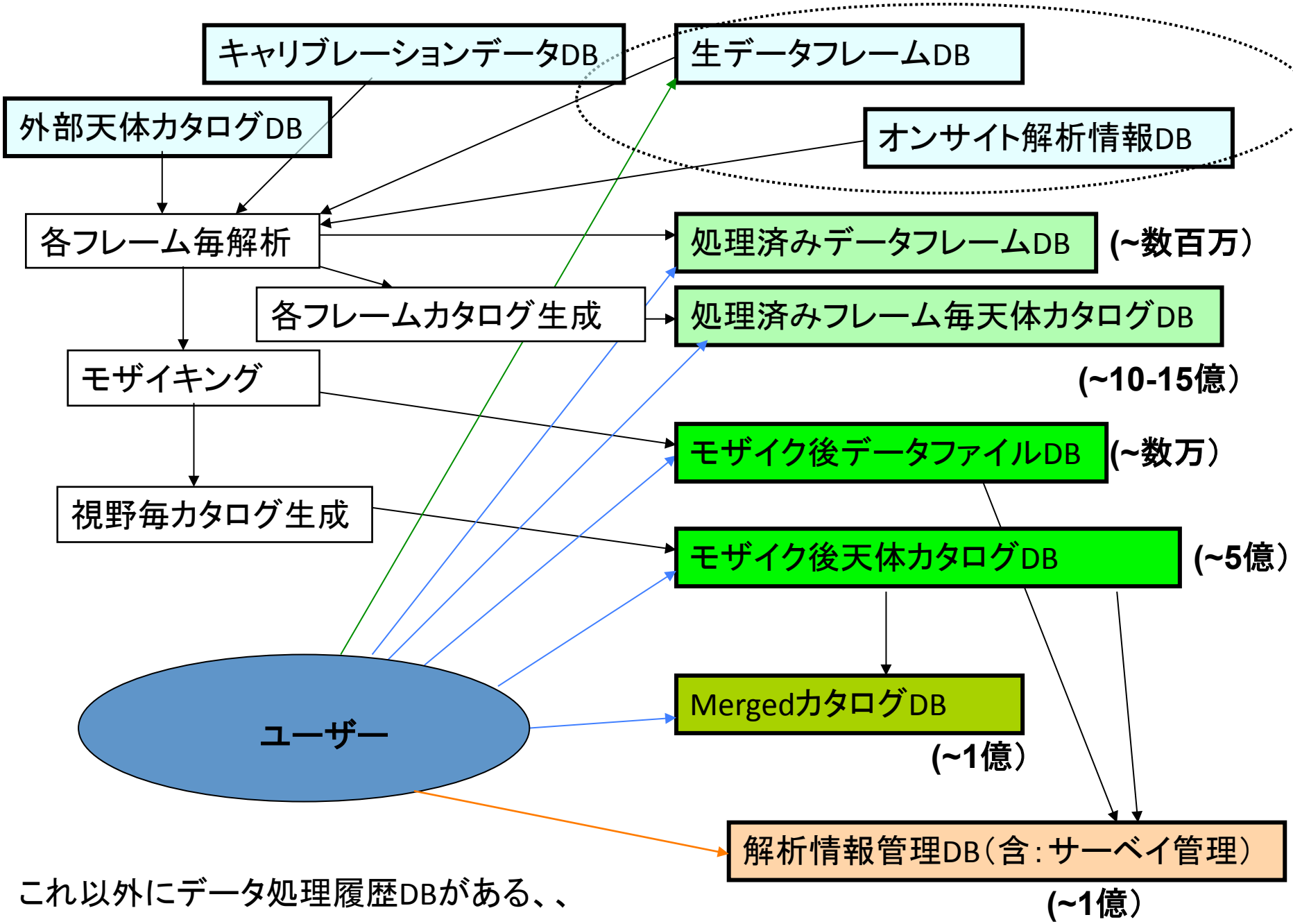
データベース要件

RDBMSを使用予定（PostgreSQL)

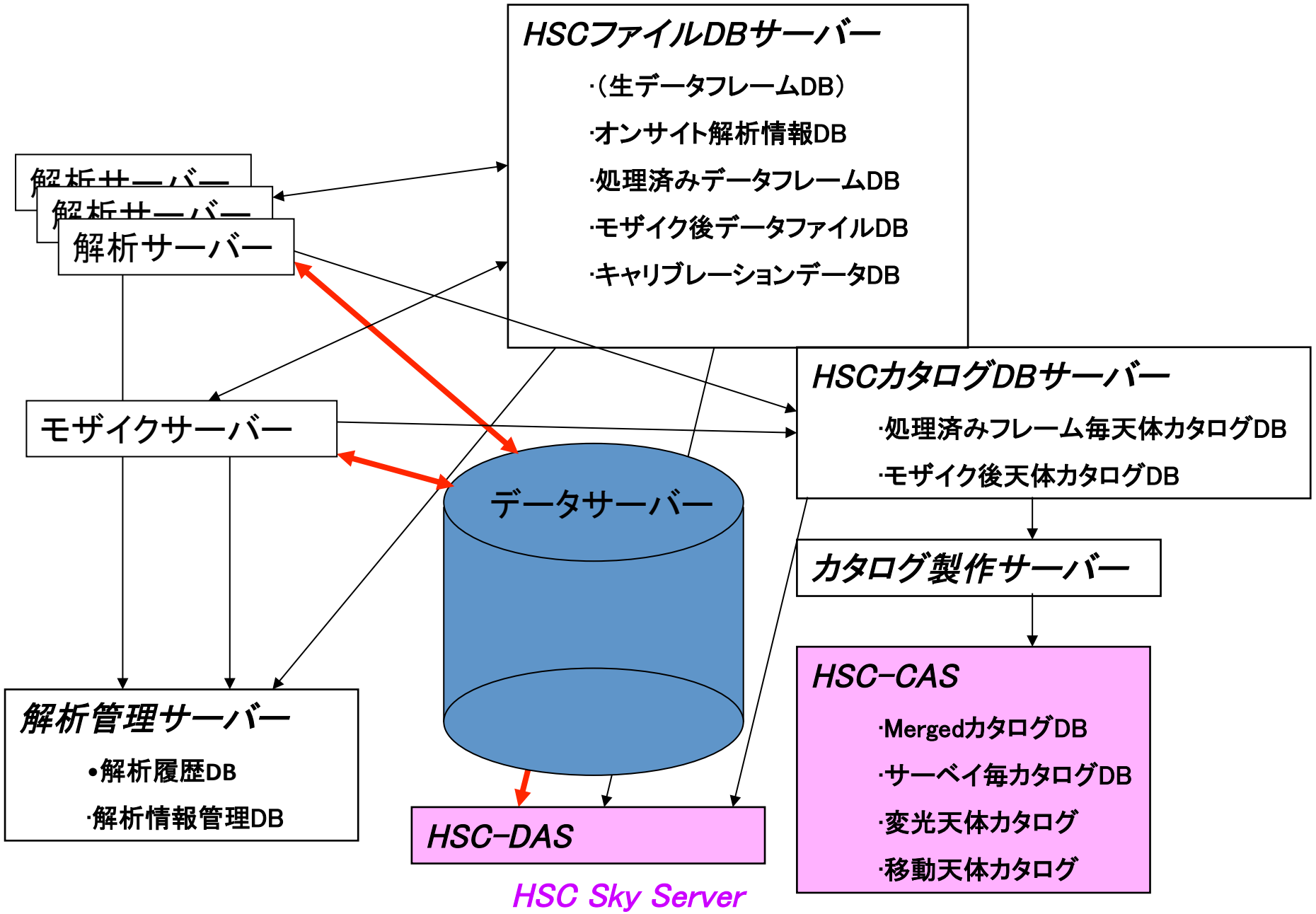
- 観測フレーム(FITSファイル）毎のレコード
- 最終画像での検出天体毎のレコード(最終天体カタログ）
- 各ショット毎（各フレーム毎）の検出天体カタログ
- ある程度の大きさの空間でサーベイの達成度を知る

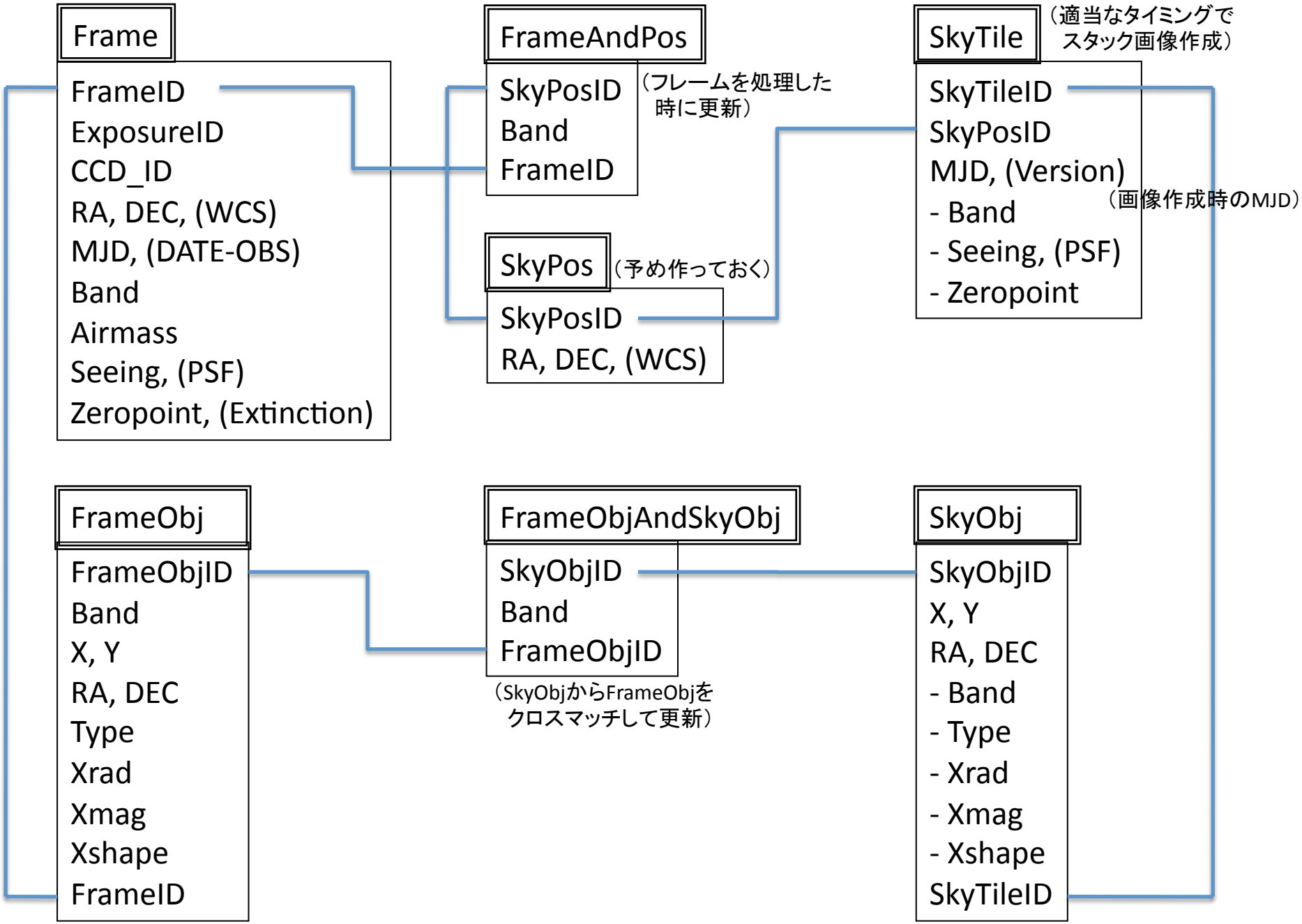
5年間で1000平方度を5フィルターで探査すると、、、

- ✓1露出104ファイル(合計で数百万レコード以上）
- ✓1000平方度で~26等までで~1億天体
- ✓1000平方度で26等まで、5フィルターで最低3回ずつ
  （合計で~15億レコード(天体）程度）
- ✓HealPixインデックス（1-2平方分程度）毎の達成度
  （1ショット6000インデックス×数万ショット＝1億レコード）


キャリブレーションデータDB
生データフレームDB
外部天体カタログDB
オンサイト解析情報DB
各フレーム毎解析
処理済みデータフレームDB
(~数百万)
各フレームカタログ生成
処理済みフレーム毎天体カタログDB
(~10-15億)
モザイキング
モザイク後データファイルDB
(~数万)
視野毎カタログ生成
モザイク後天体カタログDB
(~5億)
ユーザー
MergedカタログDB
(~1億)
解析情報管理DB(含:サーベイ管理)
(~1億)
これ以外にデータ処理履歴DBがある、、

HSCデータ解析＋データベースシステム構成模式図




Frame
FrameID
ExposureID
CCD_ID
RA, DEC, (WCS)
MJD, (DATE-OBS)
Band
Airmass
Seeing, (PSF)
Zeropoint, (Extinction)
FrameAndPos
SkyPosID
Band
FrameID
(フレームを処理した時に更新)
SkyPos
(予め作っておく)
SkyPosID
RA, DEC, (WCS)
SkyTile
(適当なタイミングでスタック画像作成)
SkyTileID
SkyPosID
MJD, (Version)
- Band
- Seeing, (PSF)
- Zeropoint
(画像作成時のMJD)
FrameObj
FrameObjID
Band
X, Y
RA, DEC
Type
Xrad
Xmag
Xshape
FrameID
FrameObjAndSkyObj
SkyObjID
Band
FrameObjID
(SkyObjからFrameObjをクロスマッチして更新)
SkyObj
SkyObjID
X, Y
RA, DEC
- Band
- Type
- Xrad
- Xmag
- Xshape
SkyTileID

計算機システム

計算機システムの基本理念

◆なるべく安く、でも、安定した運用の確保

◆分散ファイルシステムを用いて高速データI/O確保

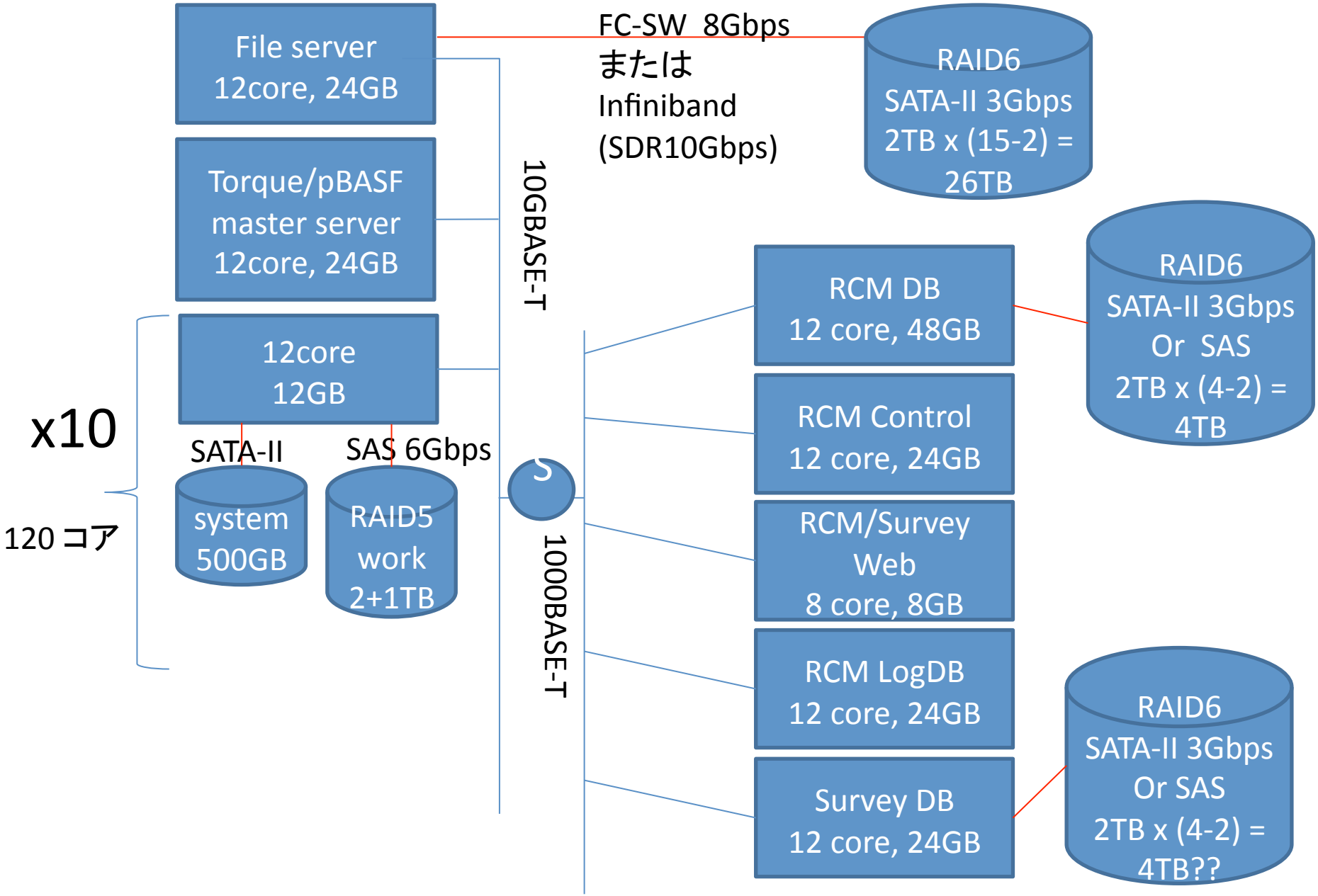
（具体的には、NFSではなくLustreなどの導入を検討）

◆データ解析と観測運用とは一体だが、お互いの干渉はなるべく起こらないようにする。

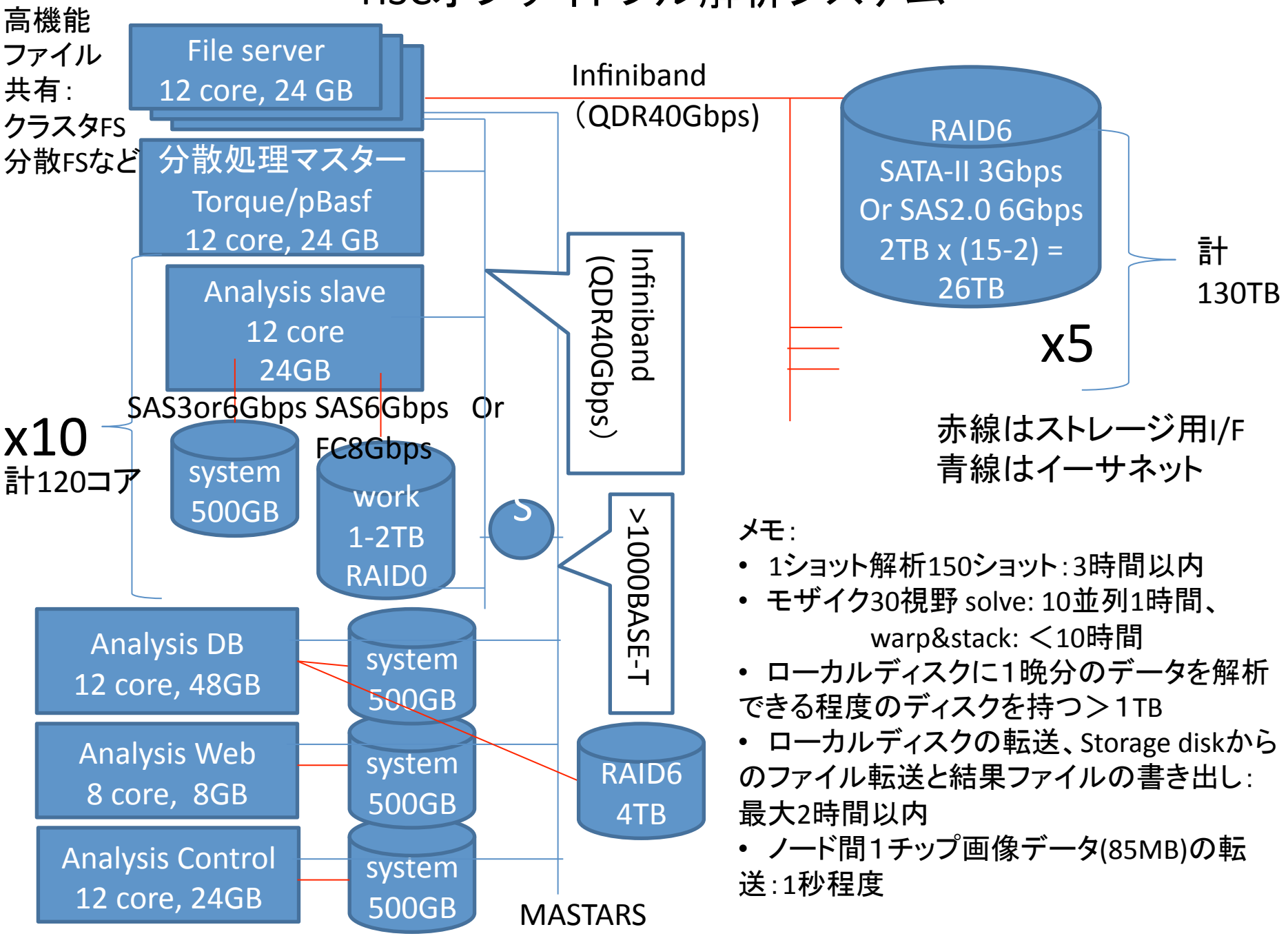
◆解析システムは多人数のログインを想定せず

◆データベースには多人数同時アクセス

オンサイト解析


File server
12core, 24GB
Torque/pBASF
master server
12core, 24GB
12core
12GB
x10
SATA-II
SAS 6Gbps
system
500GB
RAID5
work
2+1TB
120 コア
10GBASE-T
1000BASE-T
FC-SW 8Gbps
または
Infiniband
(SDR10Gbps)
RAID6
SATA-II 3Gbps
2TB x (15-2) =
26TB
RCM DB
12 core, 48GB
RAID6
SATA-II 3Gbps
Or SAS
2TB x (4-2) =
4TB
RCM Control
12 core, 24GB
RCM/Survey
Web
8 core, 8GB
RCM LogDB
12 core, 24GB
Survey DB
12 core, 24GB
RAID6
SATA-II 3Gbps
Or SAS
2TB x (4-2) =
4TB??

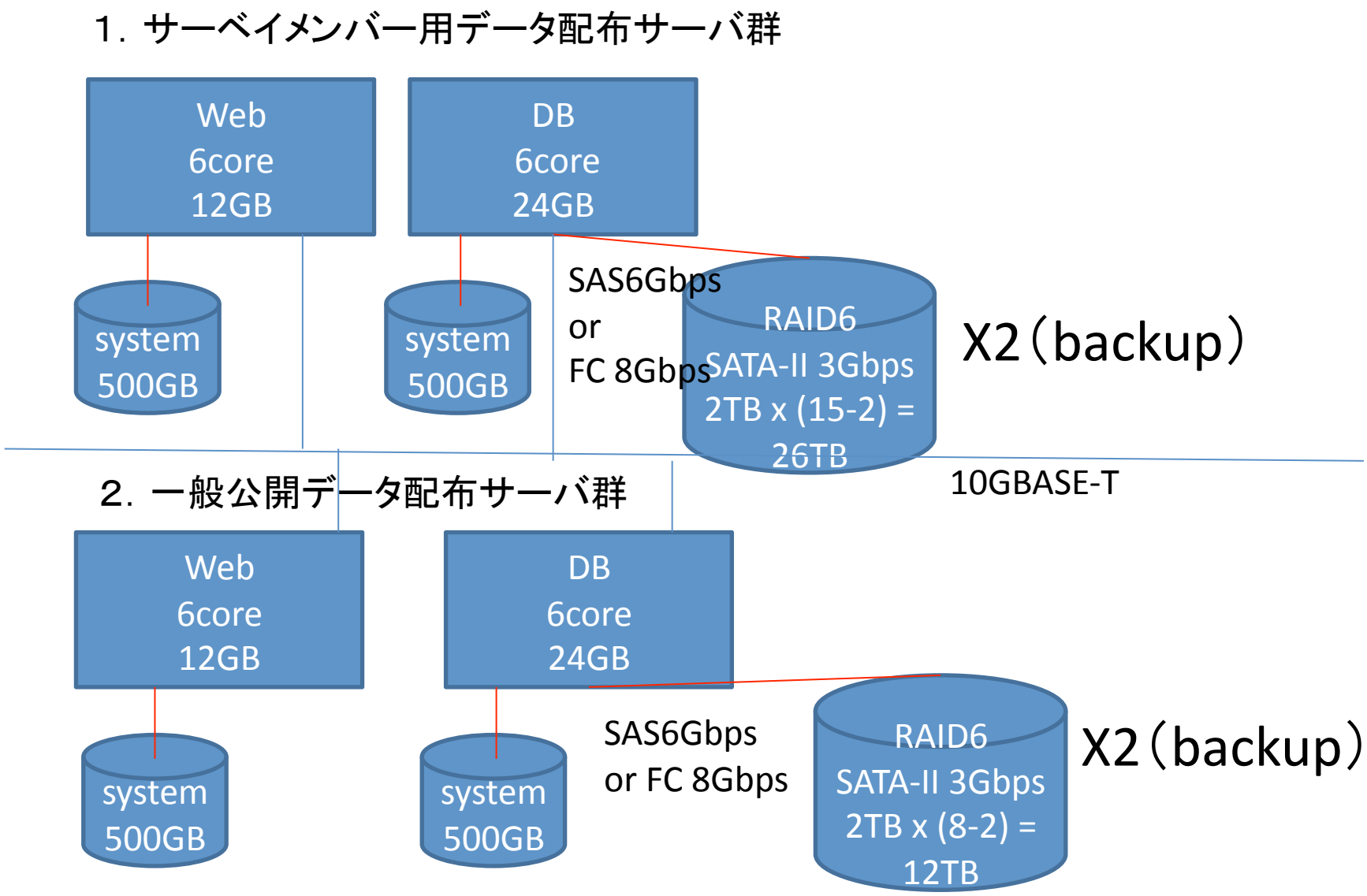
HSCオフサイトフル解析システム



メモ:

- 1ショット解析150ショット:3時間以内
- モザイク30視野 solve: 10並列1時間、warp&stack: ＜10時間
- ローカルディスクに1晩分のデータを解析できる程度のディスクを持つ＞1TB
- ローカルディスクの転送、Storage diskからのファイル転送と結果ファイルの書き出し:最大2時間以内
- ノード間1チップ画像データ(85MB)の転送:1秒程度

データベースサーバ


1．サーベイメンバー用データ配布サーバ群
Web
6core
12GB
DB
6core
24GB
system
500GB
system
500GB
SAS6Gbps
or
FC 8Gbps
RAID6
SATA-II 3Gbps
2TB x (15-2) =
26TB
X2（backup）
10GBASE-T
2．一般公開データ配布サーバ群
Web
6core
12GB
DB
6core
24GB
system
500GB
system
500GB
SAS6Gbps
or FC 8Gbps
RAID6
SATA-II 3Gbps
2TB x (8-2) =
12TB
X2（backup）

まとめ

- HSCはデータが量的には今まで(SCam)の10倍(1晩300GB)
- 画像データの扱いは今までと比べると随分複雑
- データフローを考慮して効率的な観測運用を目指す
- 画像処理とデータベースを統合した総合システム
- 分散ファイルシステム・並列化などによる効率化は必須
- サーベイデータを将来の基本データに、、
- 検索などの速度を確保するための検討はこれから本格化

課題山積！！