

# 全天サーベイの最適化に向けた 赤外線全天雲モニタの開発

—試験観測結果—

東京大学 津々木里咲

酒向重行, 高橋英則, 近藤荘平, 瀧田怜, 大澤亮, 紅山仁, 宮田隆志, 上塚貴史(東京大学)  
高橋一郎(東北大学)

木曾シュミットシンポジウム 2022.7.5-6

# TOMO-E GOZEN 自動サーベイ観測

- **サーベイ観測による時間軸天文学の展開**

- ほぼ毎晩実施される全天サーベイにより高速移動現象、短時間突発現象を探す
- 重力波イベント、宇宙ニュートリノイベントにおいて迅速な追観測を行う

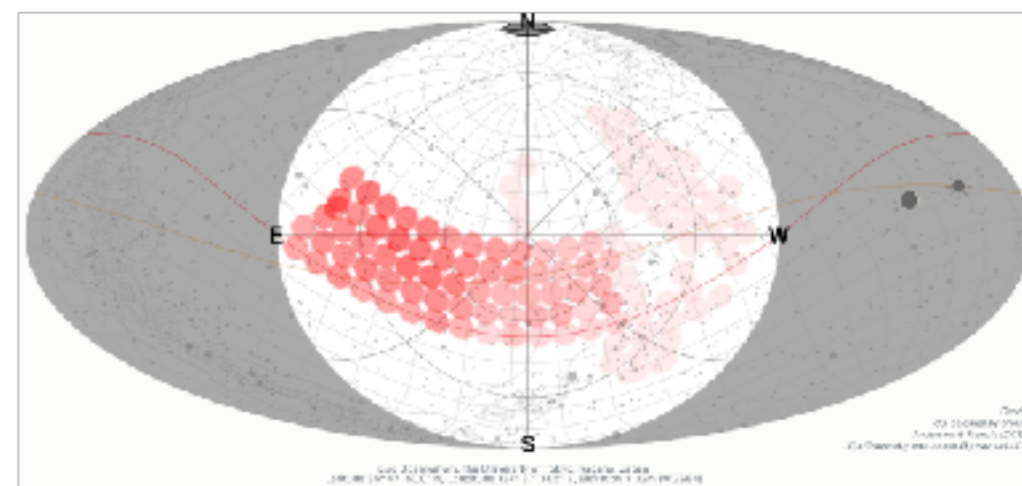
- **自動化に向けた整備**

- 空を直径10度の領域に分割し、順番に望遠鏡を指向する
- 気象条件(雨滴、霧、雲など)の監視

雲：単素子の赤外線放射計で空の一部の雲量を監視し晴天時のみ観測

↓  
更なる効率化を目指して...

全天の雲分布を把握して雲を避けたサーベイ  
経路を自動スケジューリングしたい

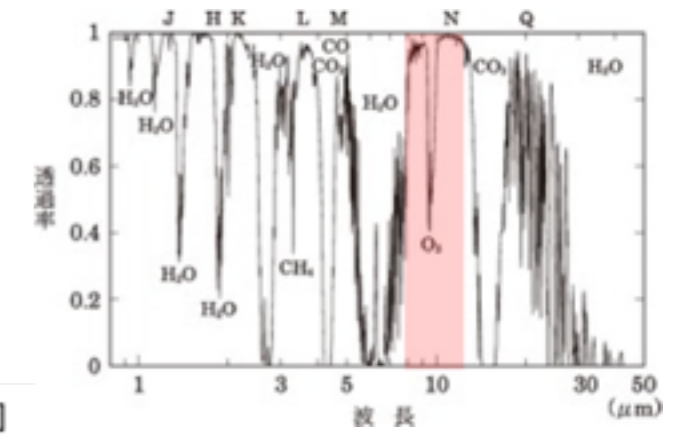
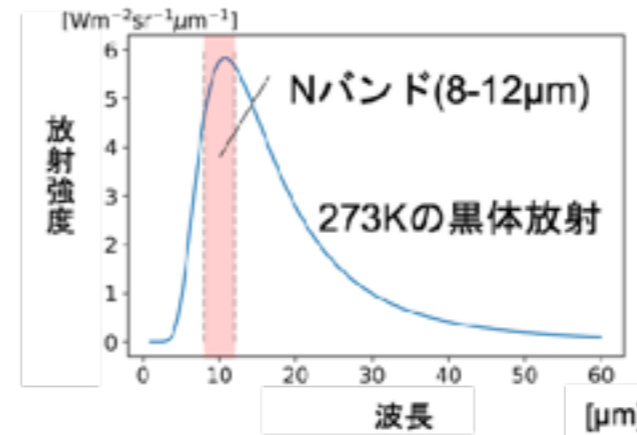


Tomo-e Gozen サーベイ天域

# 全天の雲分布のリアルタイム把握

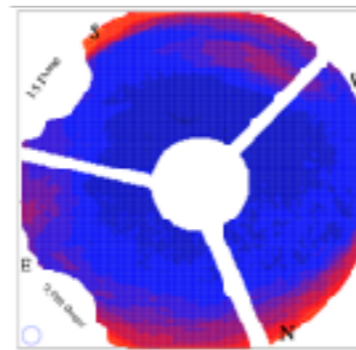
- 雲を見るには中間赤外線(Nバンド)が最適

散乱光よりも雲自身による熱放射が優勢  
大気の透過率が良い



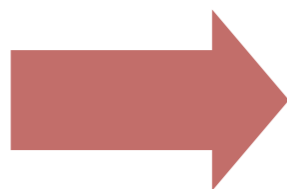
- 先行研究...大型・高コスト・時間安定性の不足・天頂の遮蔽が大きい

- 東京大学MAGNUM望遠鏡用の赤外線雲モニタカメラ(運用停止) [Suganuma et al. 2007, PASP 119, 567]
- RASICAM(DES/CTIOで運用中) [Peter M. Lewis, Howard Rogers, R. H. S., 2010, Proc.SPIE 77353C]



RASICAMで取得した全天画像

Kevin Reil, Peter Lewis, Rafe Schindler, and Zhang Zhang, 2014, Proc. SPIE 91490U



小型、低コスト、時間安定、遮蔽なしの  
中間赤外線全天雲モニタを開発

# 概念設計

- 市販の屋外用小型ボロメータカメラを採用

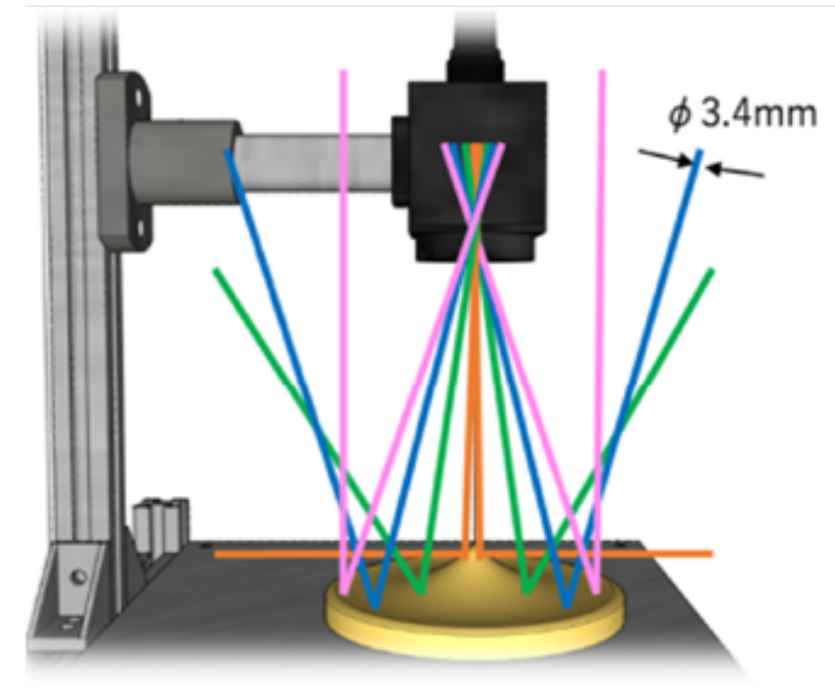
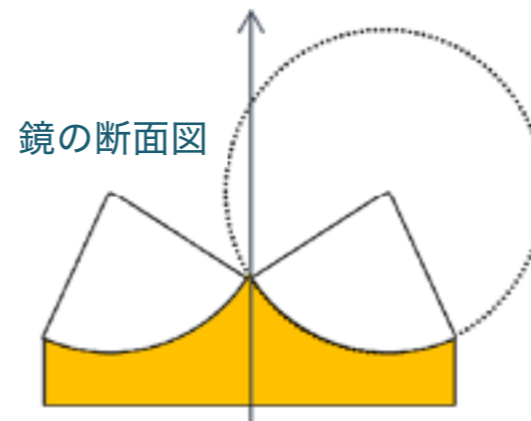
＜仕様＞ 非冷却マイクロボロメータ (Si 型, 8 - 12  $\mu\text{m}$  に感度)  
直径3mmのGeレンズ  
視野 $42^\circ \times 42^\circ$ , 出力 $80 \times 80$  pix



- 遮蔽を極力減らした光学系を開発

### 新たに拡大光学鏡を考案

シンプルな鏡形状を採用 (円断面回転対称形)  
直径10cm



- 外側が天頂方向、中心が水平方向の空を見る画像を取得

→ 画像を処理し全天の雲分布を把握  
(中心が天頂方向、外側が水平方向の画像に変換する)



光路とそれに対応する  
画像のイメージ

特許出願済, 審査中 [酒向, 津々木, 2022]

# ミラー設計

- カメラに対する出射角  $\theta$  と見込む空の天頂角  $\Theta$  の関係式を導出

$$\Theta = \theta + 4 \operatorname{atan} \left( \frac{R - \sqrt{R^2 - 2Ra \tan(\theta) + 2Rb \tan^2(\theta) - a^2 + 2ab \tan(\theta) - b^2 \tan^2(\theta)}}{2R \tan(\theta) + a - b \tan(\theta)} \right)$$

- 境界条件の設定

鏡径 100mm

全天がセンサ上でドーナツ型に結像する

>  $\theta = 4.2^\circ$  のとき  $\Theta = 90^\circ$ 、 $\theta = 19.425^\circ$  のとき  $\Theta = 0^\circ$

- 関係式に境界条件を代入し形状パラメータを決定

パラメータ：曲率中心の光軸からの距離  $a$ ,

カメラモジュールの高さ  $b$ , 曲率半径  $R$

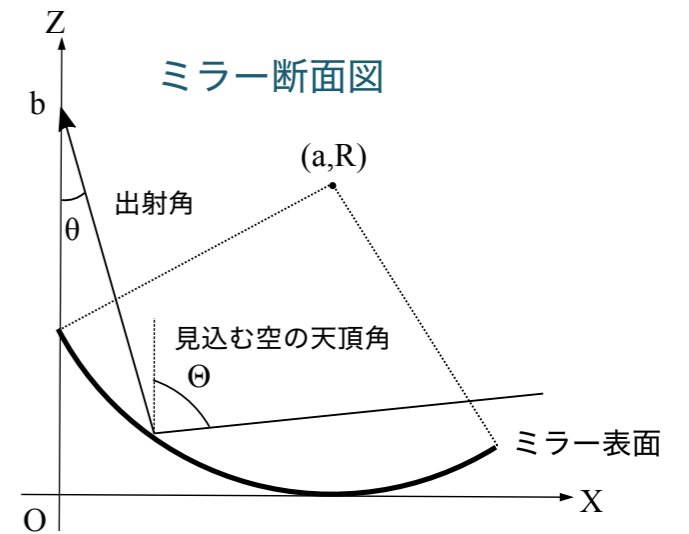
→  $a : 35.2 \text{ mm}$ ,  $b : 119.7 \text{ mm}$ ,  $R : 40.0 \text{ mm}$

- 各画素中心からのビームを追跡し、十分な光学性能を実現することを確認

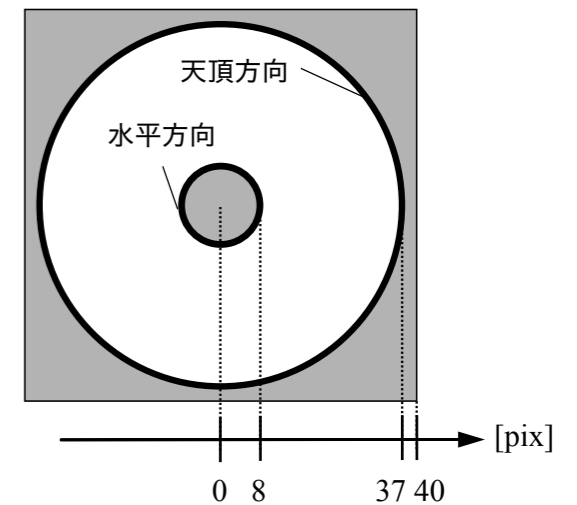
空間分解能は高度方向  $10\text{-}15^\circ$ 、水平方向  $1\text{-}20^\circ$

低空ほど分解能が悪くなる

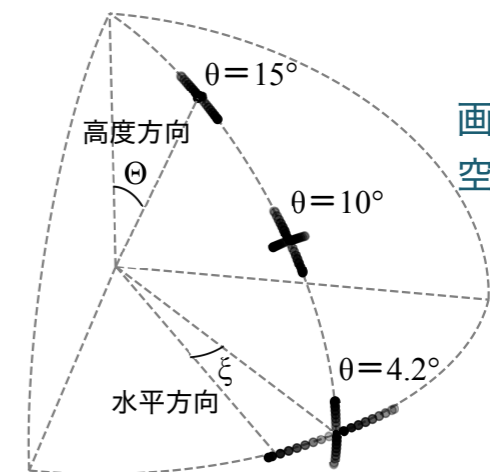
約 3 画素離れた画素同士は異なる空をみる



画像上で全天が映る位置



画素が見込む空の範囲の例



# 製作

- 画像の中心を合わせやすくするための工夫

ミラー中心を円錐型に、外側を平面にする

- アルミニウム高精度切削加工

材質 A6061

面精度 仕様 PV 5 $\mu$ m以下 -> 1 $\mu$ m

面荒さ 仕様 Ra 10nm以下

- 水抜き穴を一つ空ける

- フッ素コートを採用

フッ素コート, 硬質膜, SiO<sub>2</sub>系の保護膜について反射率を測定

どれも目立った吸収はないがフッ素コートが最も汚れや傷に強い

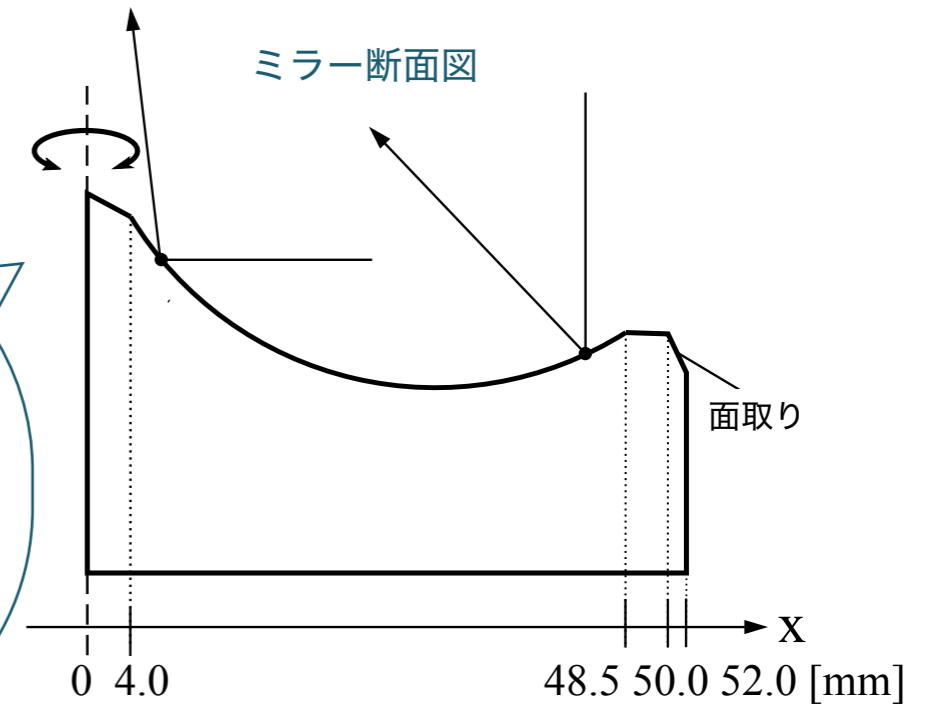
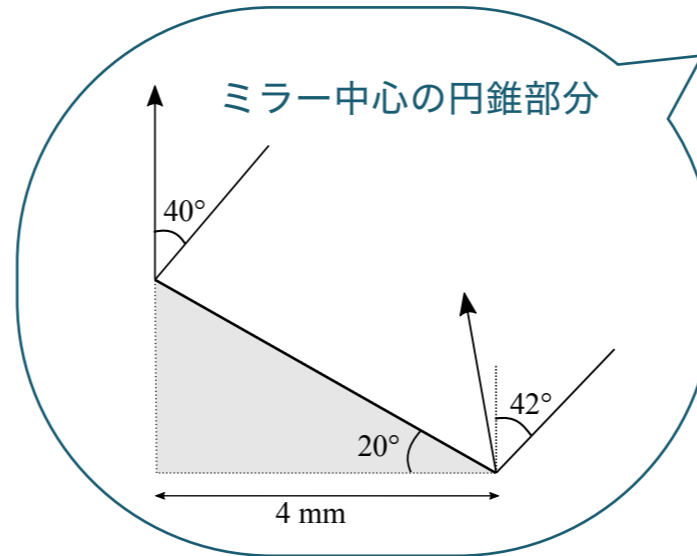
- 三次元CAD上でフレーム設計

フレームによる遮蔽を最小限に抑える

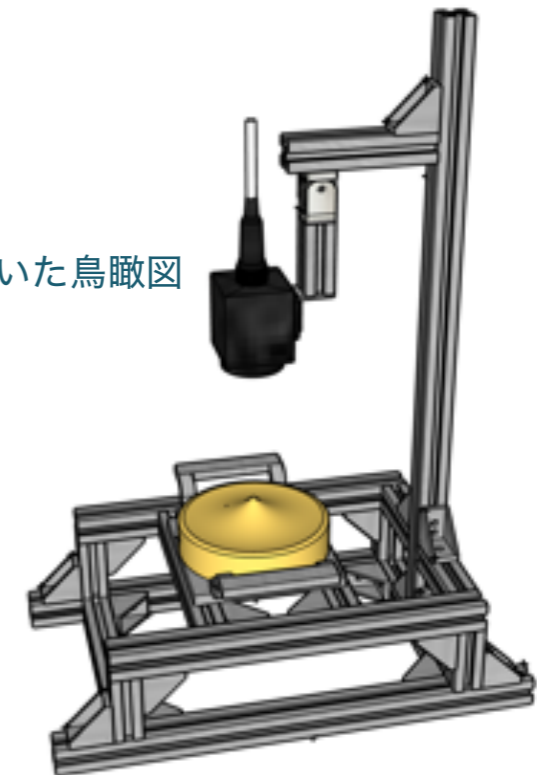
x,y,z方向のシフト、xy,yz平面上のティルトの調節機構

- トレランス解析を実施

~1mm, ~0.5°の精度を要求



CADで描いた鳥瞰図



# 製作

- 画像の中心を合わせやすくするための工夫  
ミラー中心を円錐型に、外側を平面にする

- アルミニウム高精度切削加工

材質 AL2024



- 水

- フッ

- 三次元CAD上でフレーム設計

フレームによる遮蔽を最小限に抑える

x,y,z方向のシフト、xy,yz平面上のティルトの調節機構

- トレランス解析を実施

~1mm, ~0.5°の精度を要求



ミラー断面図

ミラー中心の

20°

mm

高い

chamfering

▶ X  
2.0 [mm]

# カメラモジュールの制御と校正

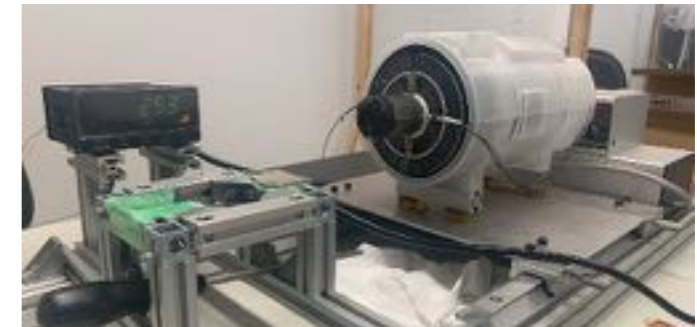
- **LinuxからPythonによりカメラモジュールを制御するソフトウェアを作成**

出力データを三次元FITSに変換し取得時刻とセンサ温度をヘッダに記録

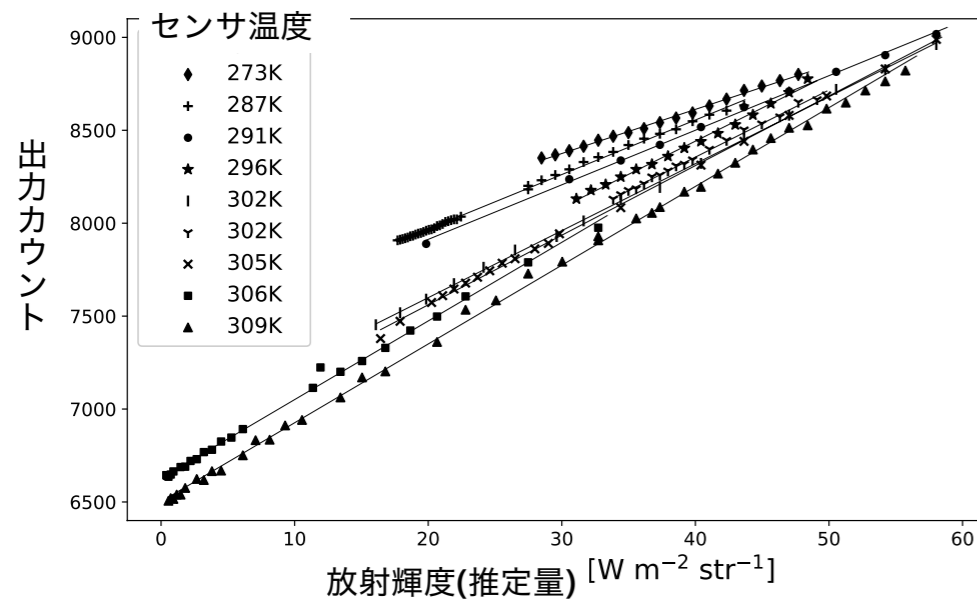
- **線形性とオフセットのセンサ温度依存性を測定しモデル化**

冷凍機, お湯, 氷点下にした食塩水を使って様々な温度の対象物を撮影  
室内, 屋外, 冷凍庫内, 冷蔵庫内と環境温度を変えて同様に実験

↓使用した冷凍機. 白金抵抗を付けて  
スタイキャストで黒塗りした.



カメラモジュールに入射した放射輝度(推定量)に対する出力値



モデル化

$$Count = aF_I + b$$

$$a(T_S) = 0.0073 T_S^2 - 3.7 T_S + 500$$

$$b(T_S) = -0.57 T_S^2 + 300 T_S - 31000.$$

$Count$ : カメラモジュールの出力値

$F_I$ : 入射放射強度の推定量

(対象物を放射率0.93の灰色体と仮定)

$T_S$ : センサ温度

- **モデルを用いて線形性とオフセットを校正**

$$Count' = \frac{10000}{F_I(300K)} F_I = \frac{10000}{F_I(300K)} \cdot \frac{Count - b(T_S)}{a(T_S)}$$

$Count'$ : 校正後のカウント. 300Kの対象物を測定したときに10000カウントになる.



# 座標変換コードの開発

- 各画素(中心)が見込むビームパターンをあらかじめ計算しておき、観測される画素カウントに比例して重みをつけてマッピング

$$Y_k = \frac{\sum_{i=1}^{6400} X_i P_{i,k}^i}{\sum_{i=1}^{6400} P_{i,k}^i}$$

$Y_k$ : 変換後のk番目のピクセルのカウント値

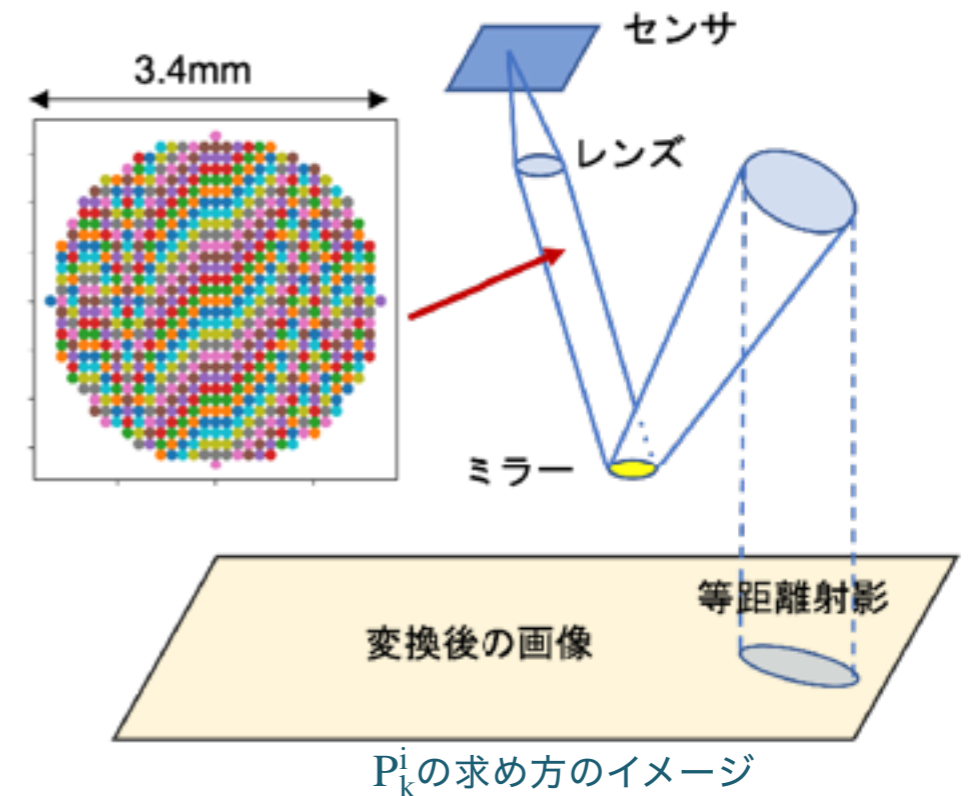
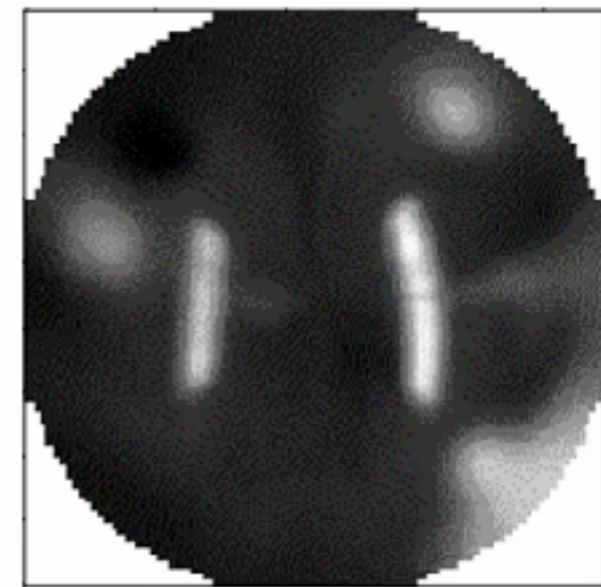
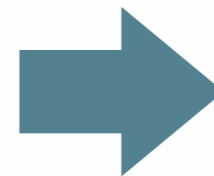
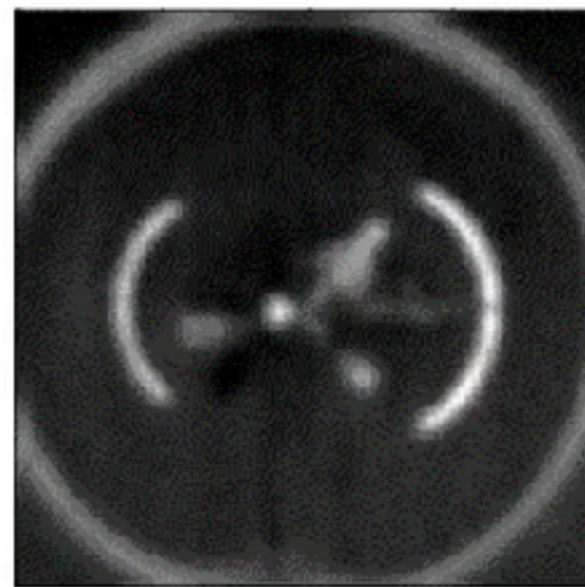
$X_i$ : 変換前のi番目のピクセルのカウント値

$P_{i,k}^i$ : 変換後のk番目のピクセルに対する  
変換前のi番目のピクセルの寄与

- 変換に成功

実験室内で全天を見た例

カメラに向かって手を振り上げている人と天井の蛍光灯に着目すると、半径方向に内外が反転されている



# 試験観測の結果

2022/1/30 - 2022/4/13

木曽観測所本館の屋上に設置

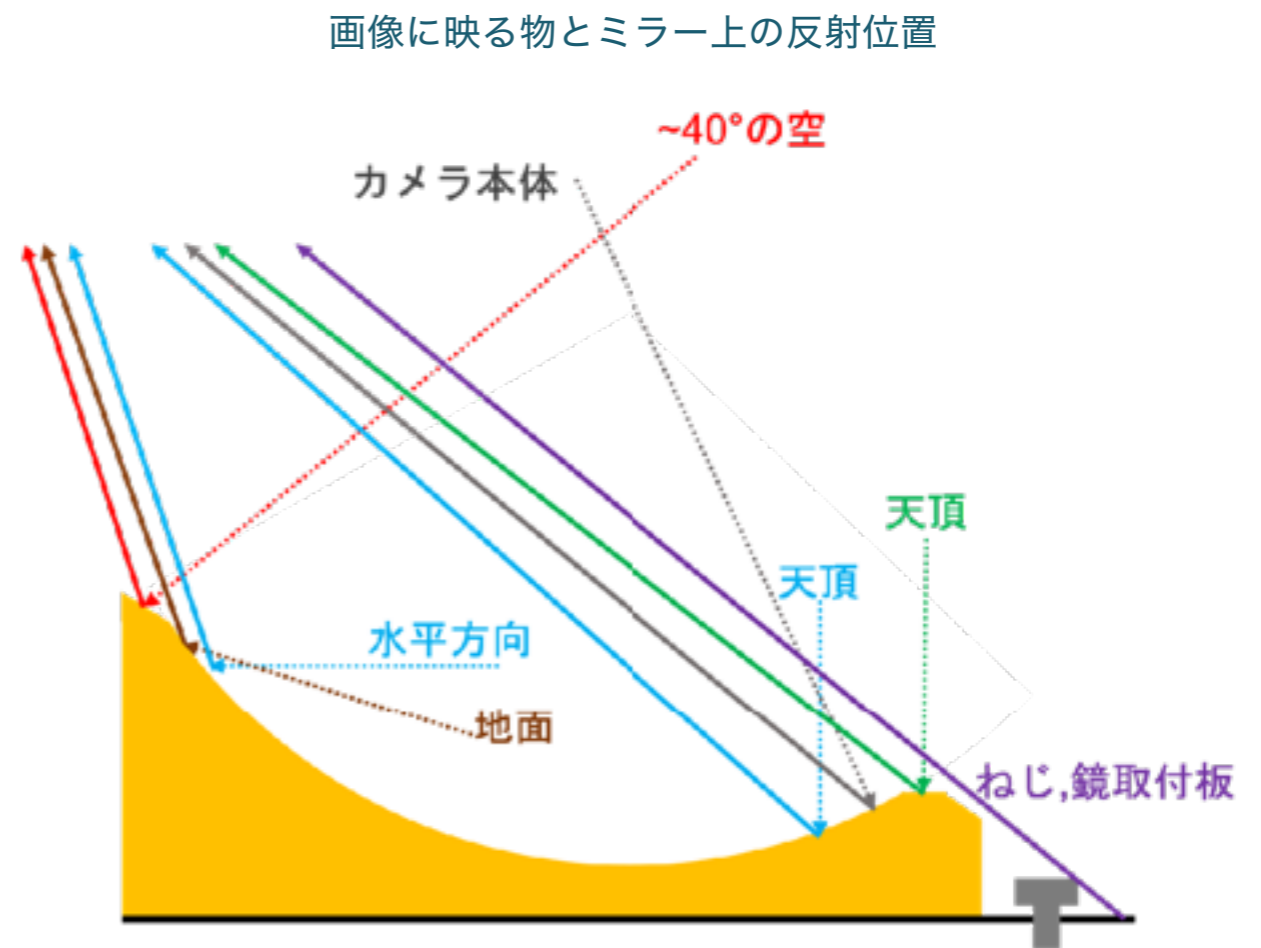
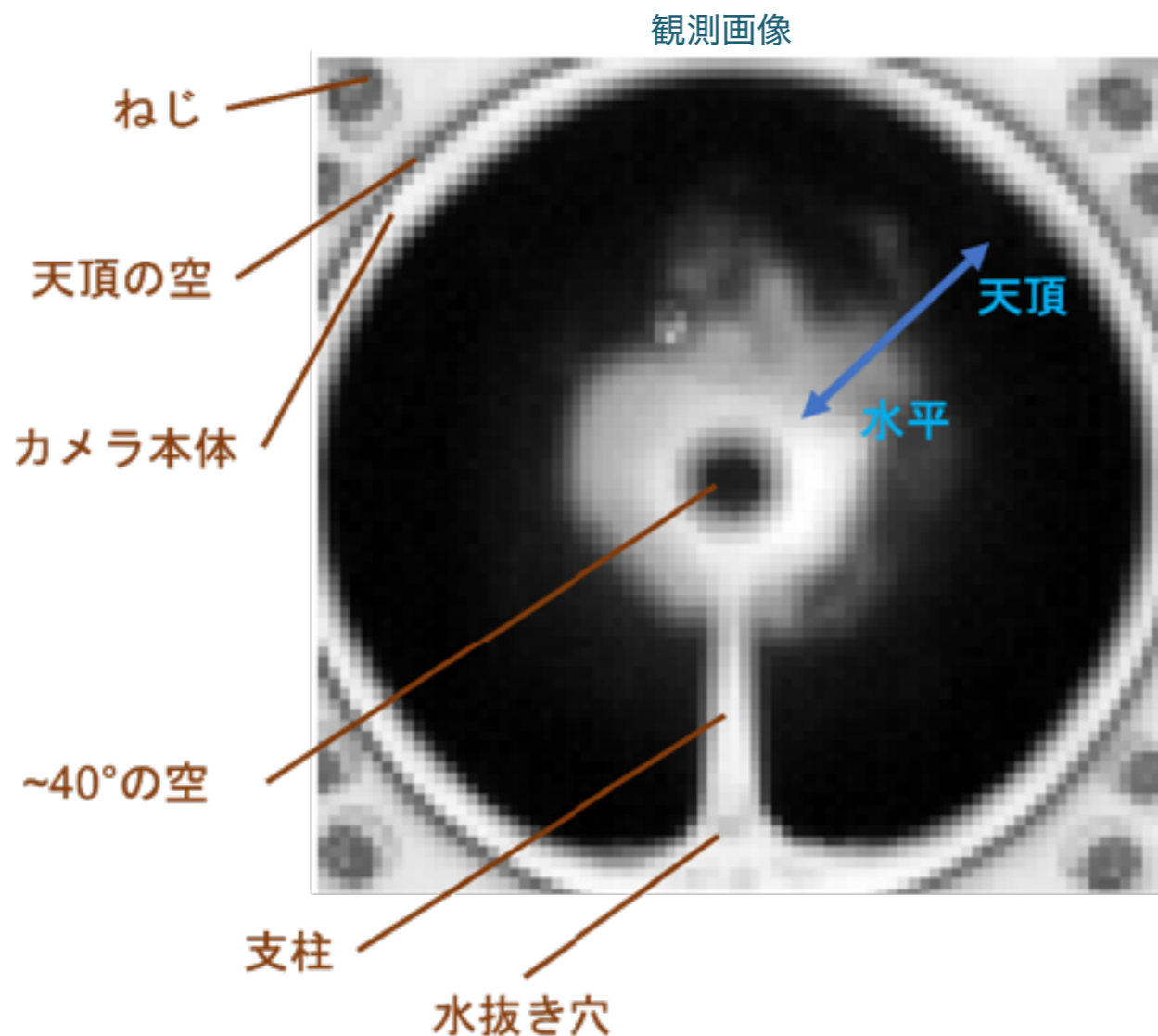
- 既存の気象観測装置(全天可視カメラ,雨滴センサ,霧センサ,赤外線放射温度計など)と同架
- 支柱が北になるように設置



本館屋上に設置した様子

# 観測画像

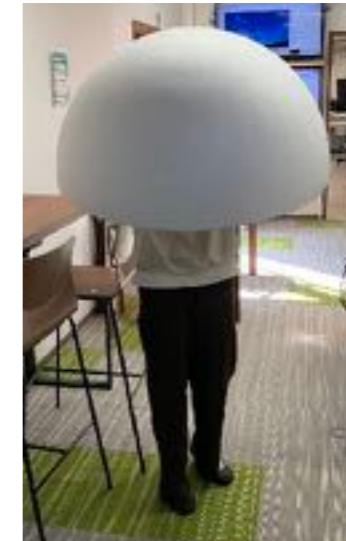
- 設計通りに結像していることを確認
- 画像のずれや歪みを見ることで光軸が合っているかの確認が可能



# 画像処理の流れ

- フラット補正

発泡スチロールの半球(直径90cm)を被せてフラット画像を取得

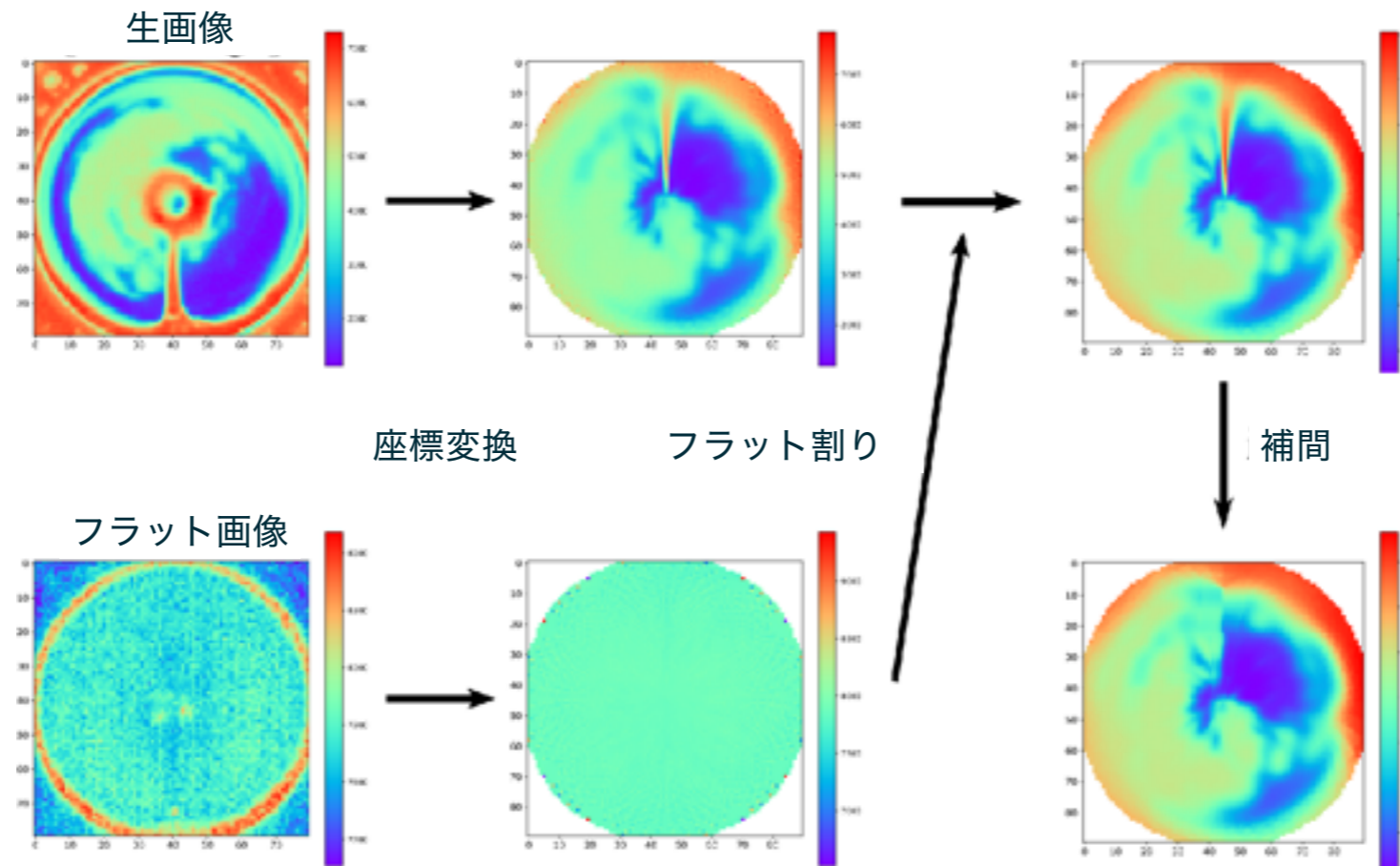
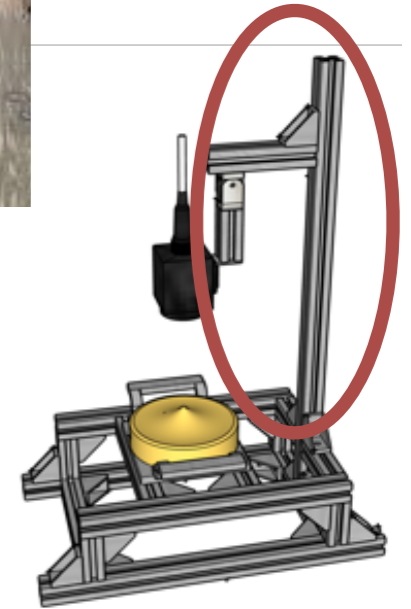


フラット用の  
発泡スチロールの半球

- 支柱による遮蔽領域の処理

支柱が映り込んだ領域をマスクし、近隣の画素から補間

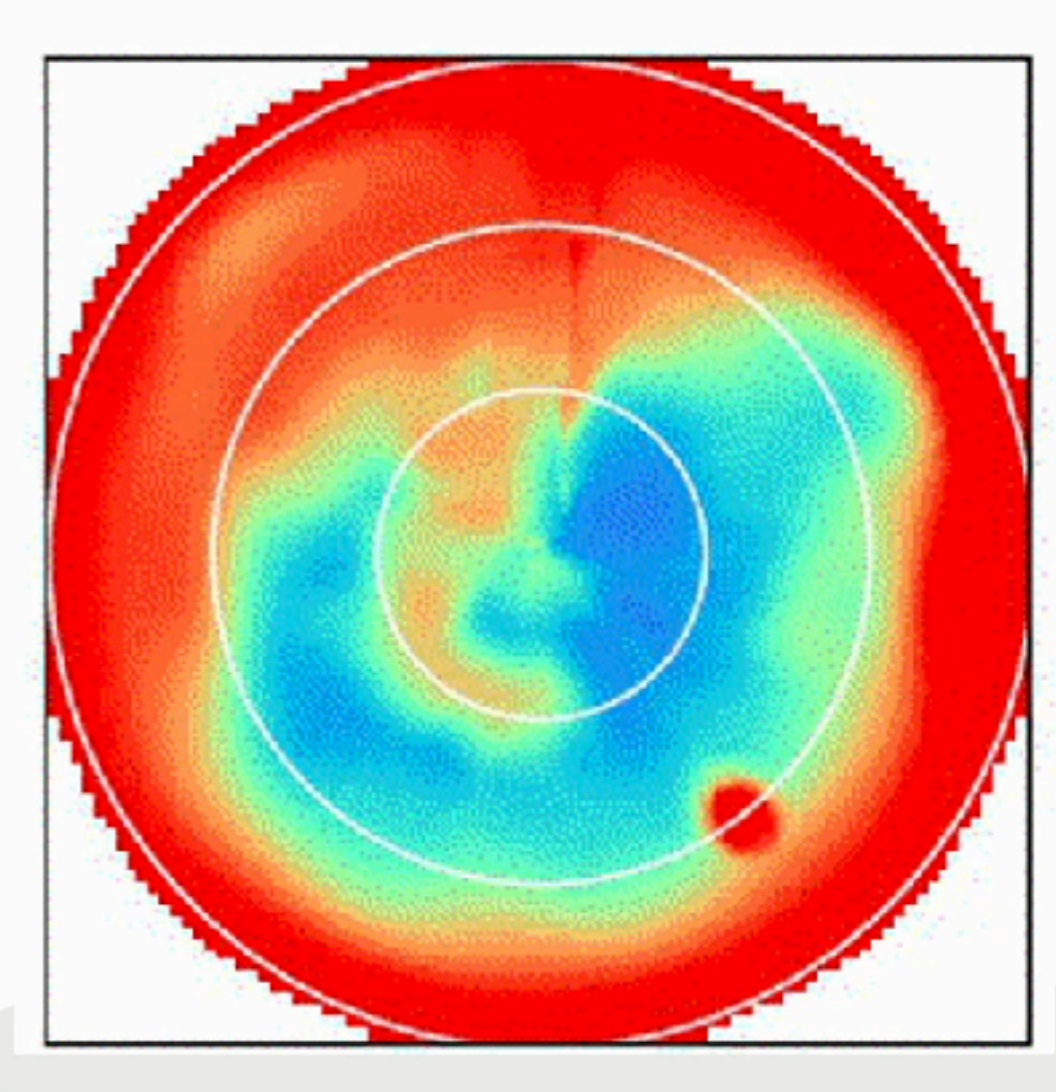
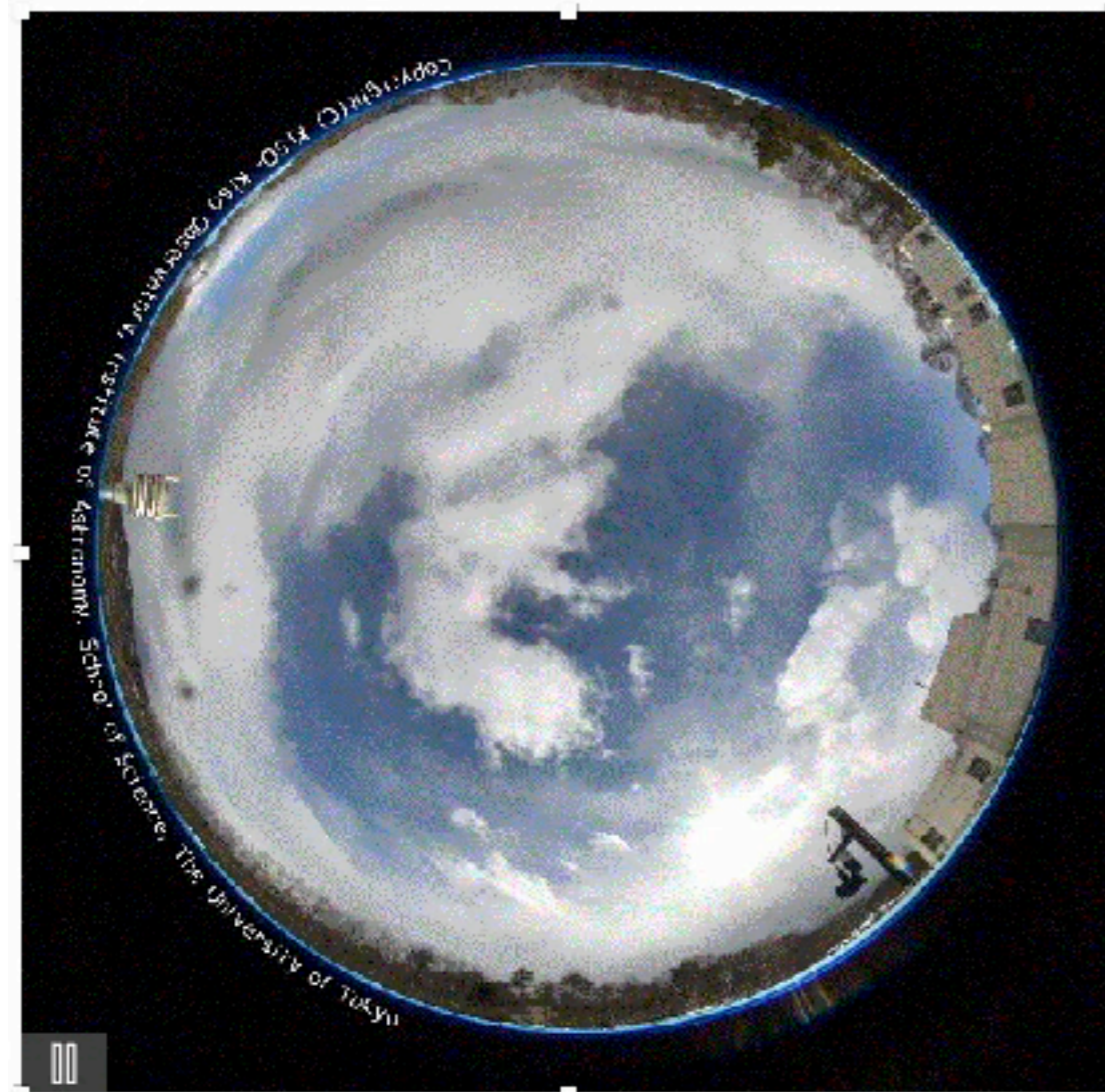
空を遮蔽する支柱



# 可視光画像との比較

- 全天の雲分布を正確に捉えていることを確認

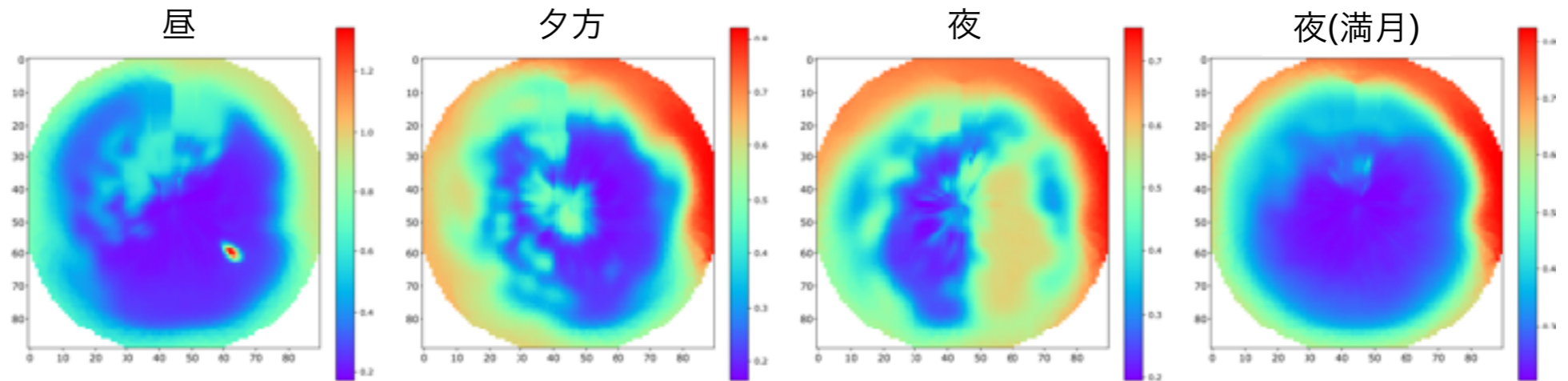
150倍速の全天動画 (左) 既存のカメラ(可視光センサ+魚眼レンズ)で取得した可視光全天画像, 2分に1枚取得  
(右) 本装置で取得した赤外線全天画像, 1分に1枚取得



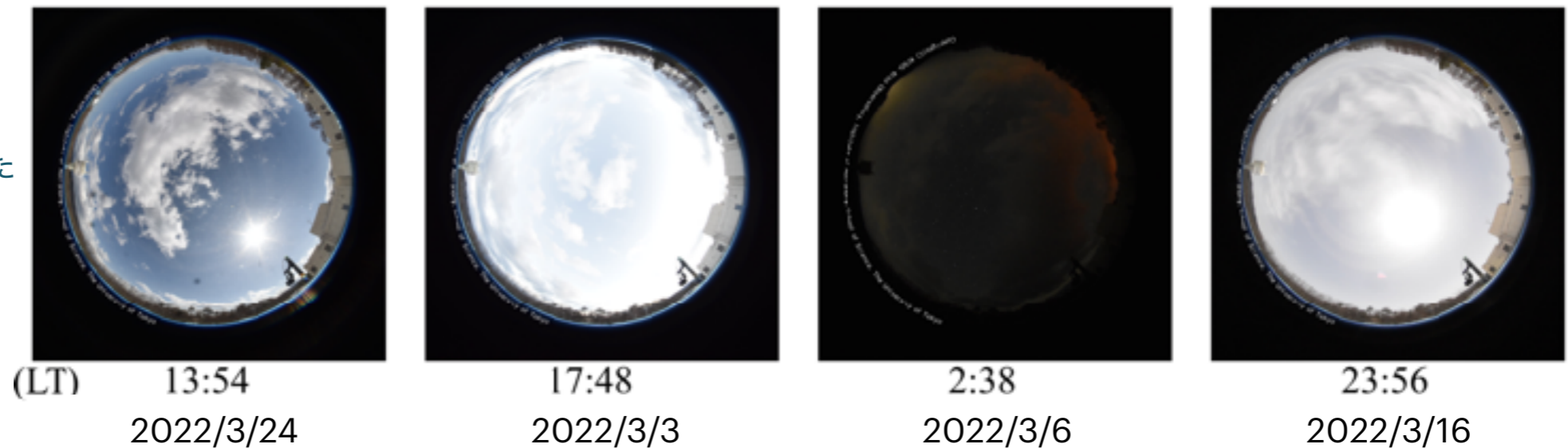
# 可視画像との比較

- 特に日没後は可視に比べて赤外画像が有用
- 太陽は映り込むが月明かりの影響をほとんど受けない  
太陽は高度が高くなると飽和することがあるためその場合はマスクする

本装置で取得した  
赤外の全天画像



既存のカメラで取得した  
可視の全天画像

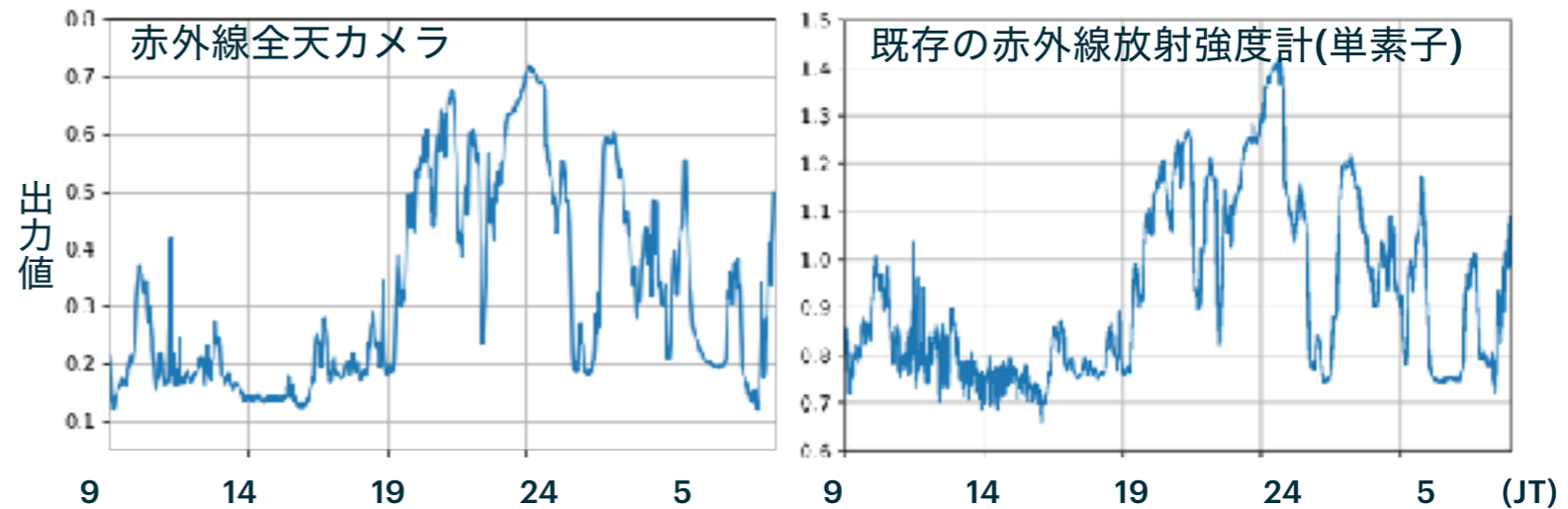


# 背景光の日変動の補正

- 地上気温に連動した放射強度の日変動オフセットが存在

大気中に残存する水蒸気からの熱放射の日変動が原因と考えられ、大気温度が地上気温とある程度連動していると考えた

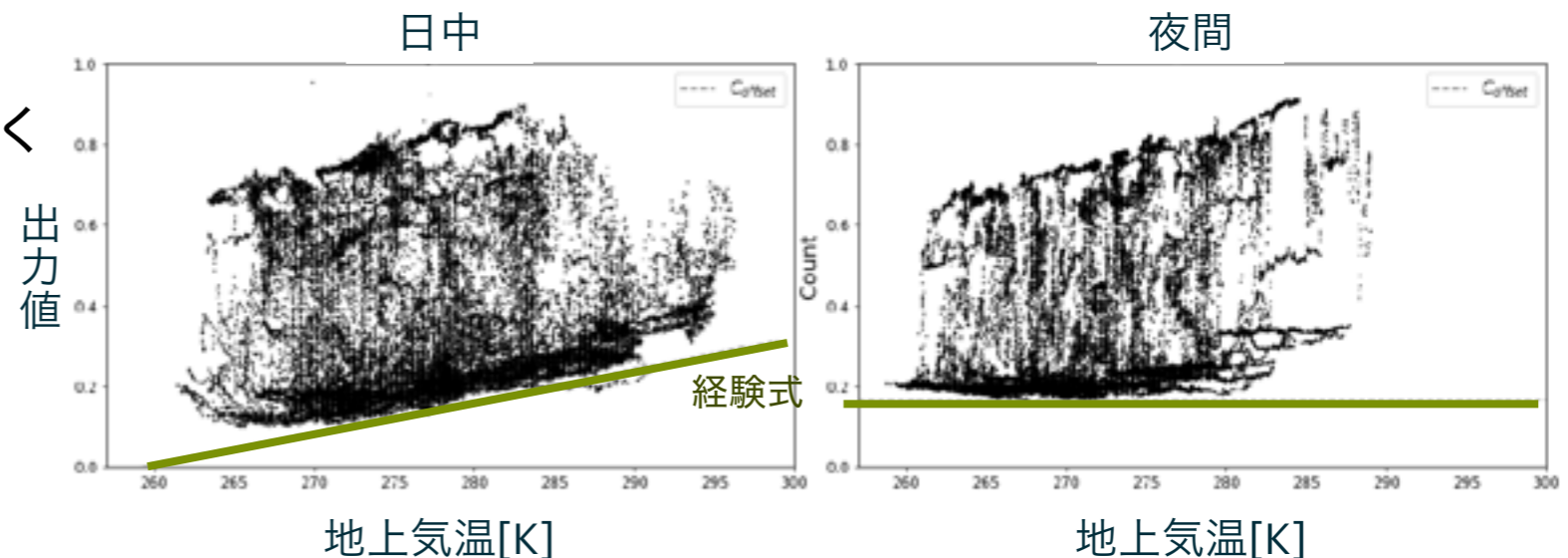
出力値(南の空の平均値)の時系列データ



- 地上気温とオフセットとの相関を評価し、経験式を導出

赤外線全天カメラの出力値から、推定される放射強度オフセットを引く

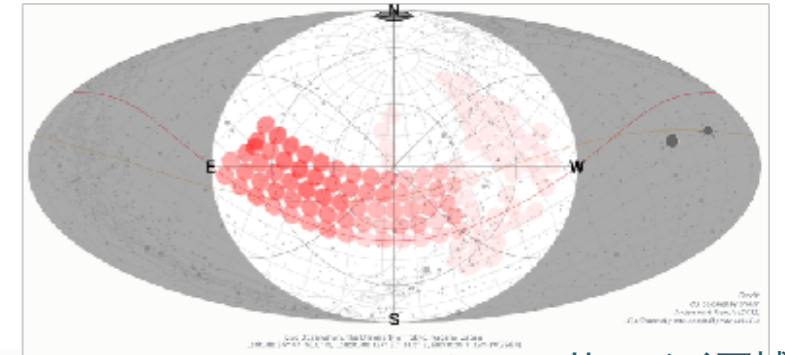
データが不足してるため  
今後も修正を重ねていく



# 雲の有無分布のリアルタイム判定

- 放射強度の閾値(0.18)を経験的に設定し雲の有無を判定

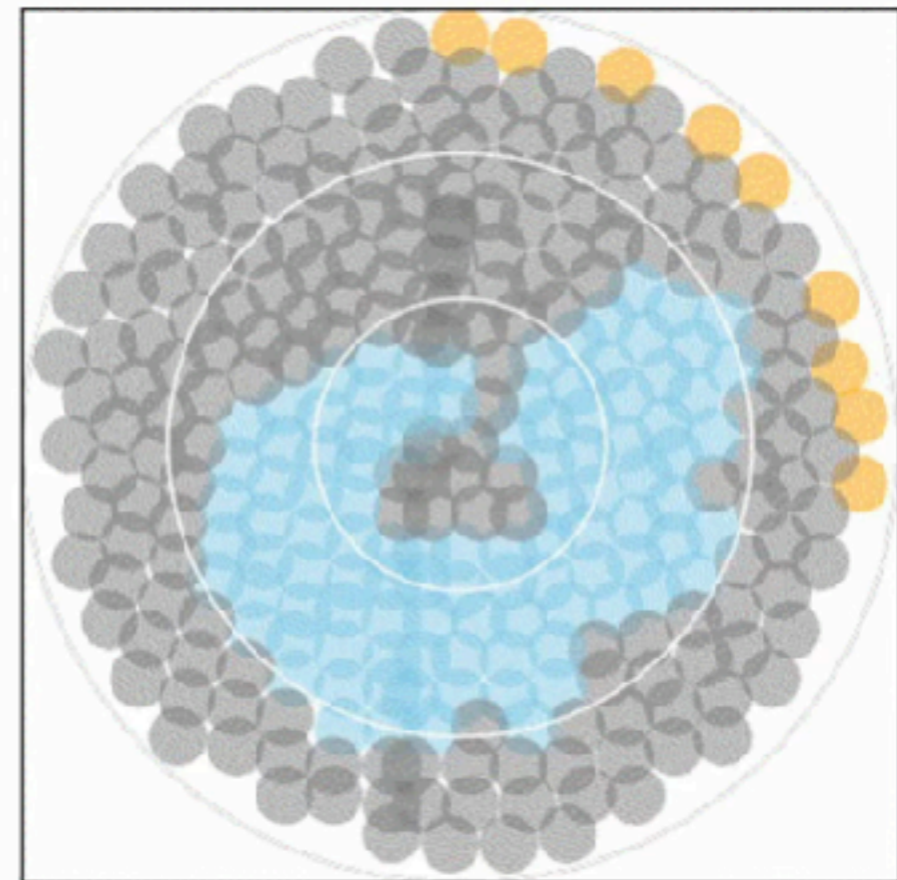
Tomo-e Gozenがサーベイの際に指向する  
直径10°の領域ごとに判定



Tomo-e Gozen サーベイ天域



可視光全天画像  
2分に1枚取得



雲モニタによる判定マップ(灰:雲有り, 水:雲無し, 黄:建物など)  
1分に1枚取得



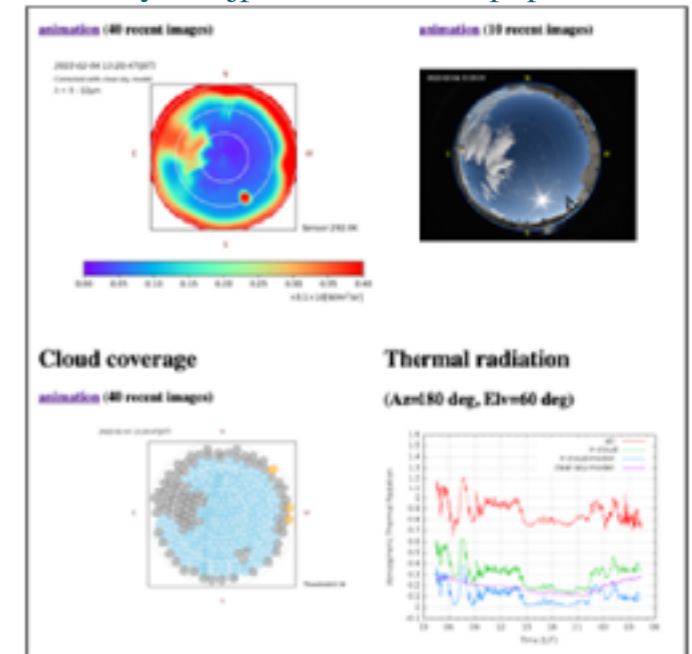
# まとめと今後

- 雲分布の把握によるTomo-e Gozen自動全天サーベイの効率化
  - 低コスト,小型,時間安定,遮蔽なしの全天赤外線雲モニタの開発
  - 遮蔽を極力減らした円断面回転対象形ミラーの光学系(特許審査中)
  - 全天がドーナツ型に結像するミラーの製作(分解能10-15°)
  - カメラモジュールを制御しセンサ温度による変動を補正するソフトウェアを開発
  - 各画素のビームパターンをもとに座標変換のアルゴリズムを開発
  - 日変動を補正しTomo-e Gozenサーベイ領域の雲判定を実現
- オフセットの日変動について夏のデータも取得し経験式を補正する
  - Tomo-e Gozen観測システムのソフトウェア開発、2022年度中に雲モニタを組み込む
  - 機械学習(Convolutional LSTM)を用いた雲の動きの予測



Web上でリアルタイムの雲分布を表示

<https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/weather/cmon.php>



**SPIE2022で発表予定**