
晴れ間を狙った 広域サーベイシステムの開発

東京大学 津々木 里咲

酒向 重行, 瀧田 怜, 紅山 仁, 高橋 英則, 近藤 荘平, 森 由貴 (東京大学),
大澤 亮, 富永 望 (国立天文台), 田中 雅臣 (東北大学), 諸隈 智貴 (千葉工業大学),
池田 思朗 (統計数理研究所), João Pedro Pedroso (ポルト大学)

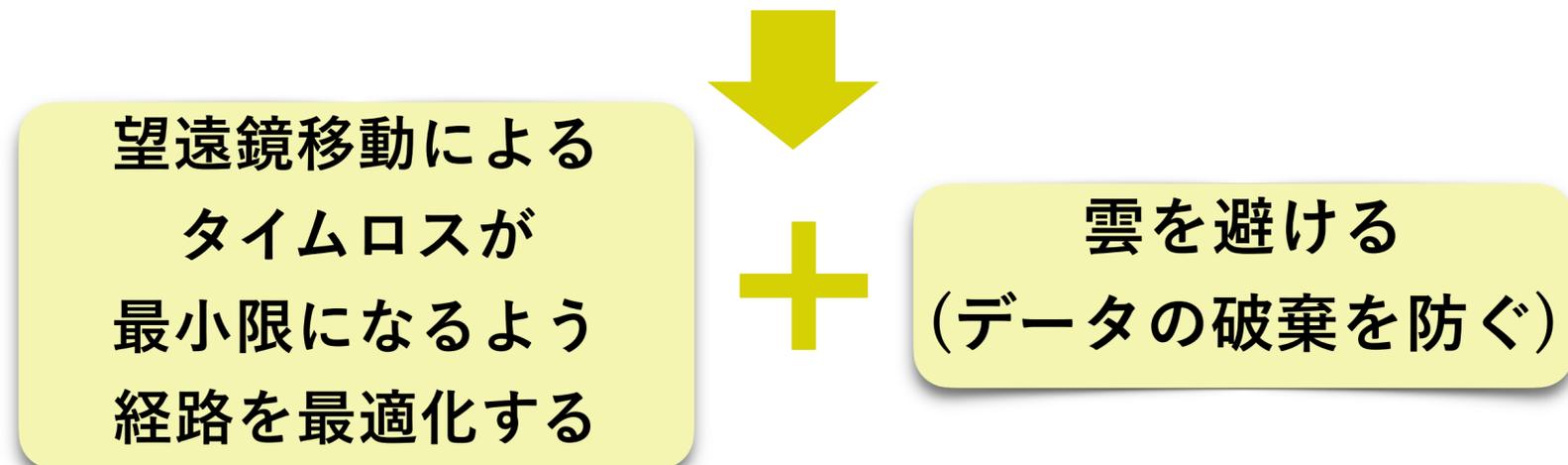
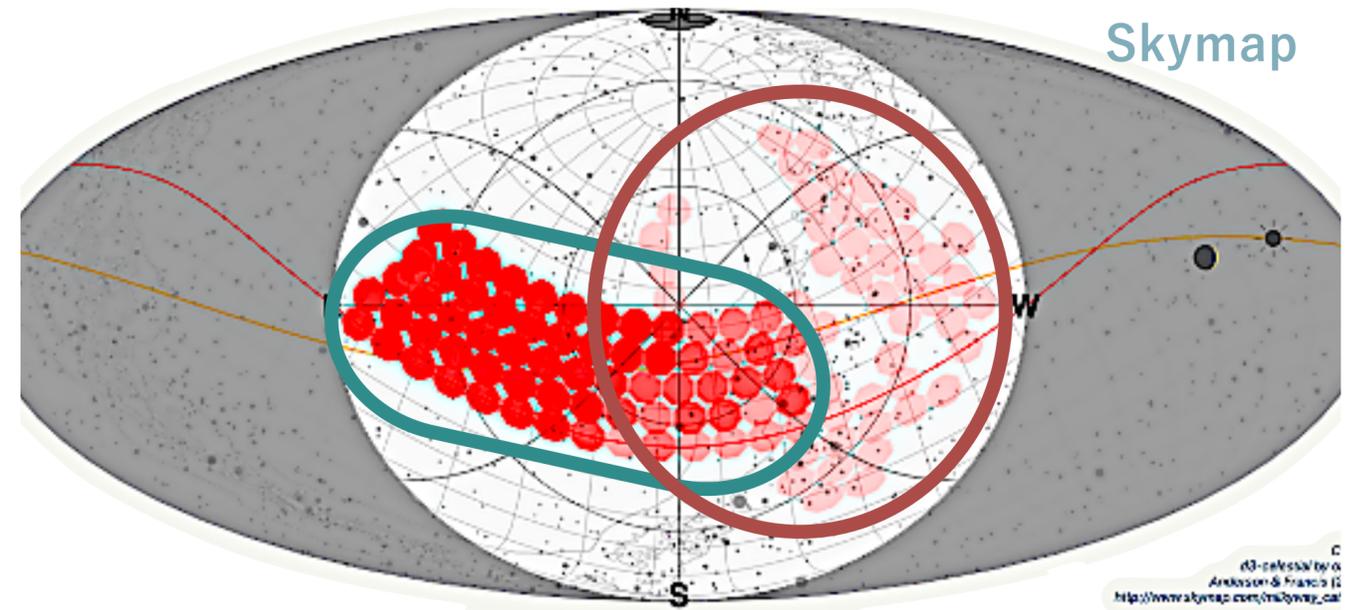
毎晩の広域サーベイ観測



短時間突発現象や高速移動天体など確率的に発生するイベントを捉えたい

- 日没後の3時間で**全天サーベイ**を実施
- 残りの時間で**高頻度突発天体サーベイ**を実施

本研究：広域サーベイ観測の効率の向上
 (観測可能時間に対するデータ取得率の向上)
 を目的とした 既存システムの改良



	全天	高頻度
総観測面積 (一晚)	~ 9000 deg ²	~ 5300 deg ²
各領域の観測回数 (一晚)	1回	3-8回
観測範囲	Dec \geq -25°	-3° \leq Dec \leq 35° RA range : 140°
露光時間	0.5 s \times 18	0.5 s \times 12

前提：観測レシピによる自動観測システム

ポインティング位置(RA,Dec), 露光時間, 優先度を指定した**観測レシピ**を 1 shotあたり 1つ作成
→ 観測レシピが上から実行されていくことで**観測計画に基づく自動観測**を実現

観測レシピの例

```
obs.telscheduler > recipetmp > 0284_2022-11-23T05:00:00.000.recipe
1 Observer: T.Morokuma
2 Project: High-Cadence Survey
3 Priority: 0.8580
4 Time Window: [ '15:00:00.0' , '20:30:00.0' ]
5 Operations:
6 - SetFocus: 28.13
7 - Assert: domeslit_open
8 - Pointing: { ra: 77.8438975, dec: 7.4276782 }
9 - MirrorCover: open
10 - Wait: pointing, mirrorcover_open
11 - SetPipeline: [ wcs, stack, neo ]
12 - SetParameter: { gain: high, tinteg_sec: 0.5, nframe: 12 }
13 - Exposure: J0511+0725_dith1
14 - Dithering: [ 0, 1440 ]
15 - Wait: pointing
16 - Exposure: J0511+0725_dith2
17 - Dithering: [ -1980, 0 ]
18 - Wait: pointing
19 - Exposure: J0511+0725_dith3
20 - Dithering: [ 0, -1440 ]
21 - Wait: pointing
22 - Exposure: J0511+0725_dith4
23 Comment:
24 High-Cadence Survey, 284, 2022-11-23T05:00:00.000
25
```

The screenshot displays the scheduler's interface with several key components:

- Current Schedule (disabled / activated):** A timeline showing observation periods from 15:00 to 09:00. A red triangle indicates the current time at 24:00. Below the timeline, it shows 'Calibration: 23:53 / Start Observation: 23:53 / End Observation: 23:53'.
- Scheduled Observations (total: 439):** A grid of green and grey blocks representing scheduled observation slots. A yellow callout box states: 'elevation $\geq 30^\circ$ になると 緑色になる' (When elevation is $\geq 30^\circ$, it turns green).
- Queue (今から実行):** A list of recipes waiting to be executed. A red callout box says 'Queue(今から実行)'. A yellow callout box notes: '緑の中から優先度の高い順に 5個だけQueueに入る' (From the green ones, the top 5 by priority enter the queue).
- Scheduler (今晚観測予定):** A red callout box labeled 'Scheduler(今晚観測予定)' points to the scheduled observations.
- Executing (現在実行中):** A red callout box labeled 'Executing(現在実行中)' points to a detailed log of an ongoing observation, including steps like 'set focus to 28.13 mm', 'point telescope to (ra, dec) = (04:36:29.85, +29:42:38.57)', and 'obtain "J0436+2942_dith1"'. A yellow callout box says '上から順に実行' (Execute from top to bottom).
- History:** A list of previously completed observations on the right side.

→システムモニタ

太陽高度, 気象データから開始・中断・終了を自動で行う

動的な経路最適化システムの開発

サーベイの経路最適化システムを静的から動的に改良

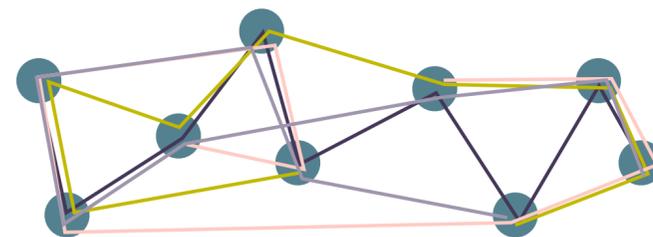
<これまで> 静的な最適化システム

- … 経路決定アルゴリズム(後述)を用いて
日没前に一晩分の観測を計画

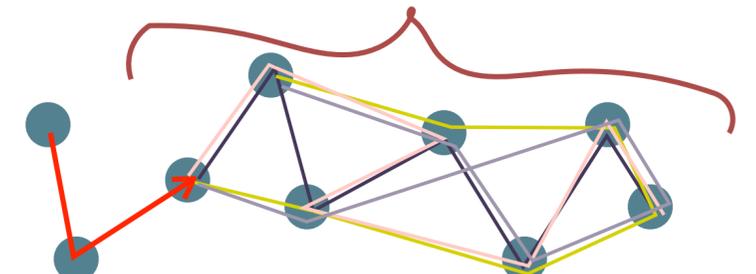
問題点：リアルタイムな情報を組み込むことができない
(サーベイが中断すると計画が破綻, 雲を避けることができない)

⇒ 動的な最適化システムへ (ローリングホライズン法)

… 観測をしながら10分おきに最適化をかけ直す(=レシピを10個ずつ作成)



採用した経路で少し進む



計画 :

19:01

19:02

19:04

19:05

⋮

実行した時刻

19:01

19:02

20:30

20:31

- ・曇ってきて
ドームが閉じた
- ・サーベイ以外の
観測を行った

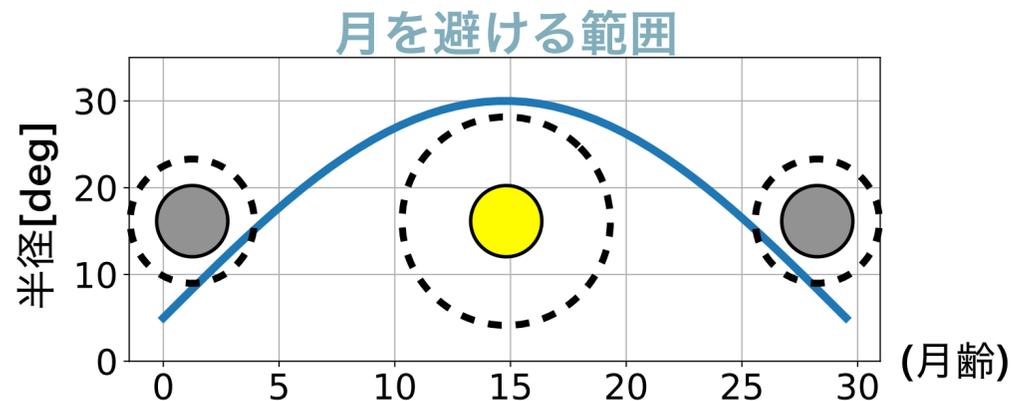
動的最適化システムの運用

2022年12月より改良システムの運用を開始

- ・ 悪天候や他の観測イベント,運用上の不測事態による
サーベイの中断に対応

- ・ **サーベイ範囲**について新たな機能の実装

- 月齢に応じた月の回避
- 初期位置はサーベイ開始時の**南西低空**
($220^\circ \leq \text{azm} \leq 270^\circ$, $30^\circ \leq \text{elv} \leq 40^\circ$)
- 高頻度サーベイは**銀河面**(銀緯 $\pm 10^\circ$)を避ける



(日没前)各ポイントの観測可能時間帯,移動時間を計算しておく

サーベイ開始・終了時刻の設定

- ・ ドームOPEN & 今日初めての観測 & スケジューラACTIVE
→初期位置の選択 →**break**
- ・ ドームOPEN & スケジューラACTIVE →**break**
- ・ 終了時刻を過ぎた →システム終了

ループ

- ・ サーベイ終了時刻を過ぎた →システム終了
- ・ はじめて高頻度サーベイ開始時刻を過ぎた
→高頻度サーベイ用モードに切り替え →**continue**
- ・ 作成したレシピ最新7個のどれかが実行 →**break**
- ・ QUEUEが2件以下 & ドームOPEN & スケジューラACTIVE
→**break**

ループ

ループ

観測レシピ10個作成

- ・ 観測可能なポイントがない →インターバル値減らす →**continue**

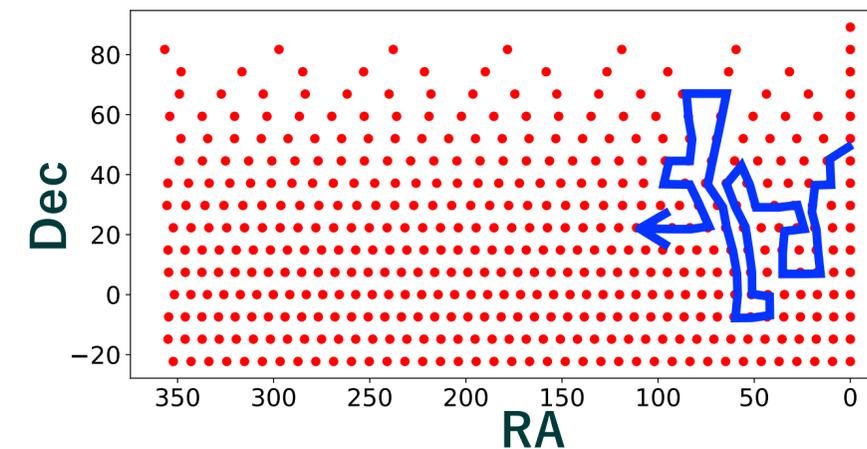
作成したレシピをSCHEDULERに投入

インターバル値リセット

→システムフロー

経路決定アルゴリズムの改修

- ・ 移動によるタイムロスをもっと少なくする経路を求めたいが、
日周運動や一定時間を空けた複数回観測によって問題設定が複雑



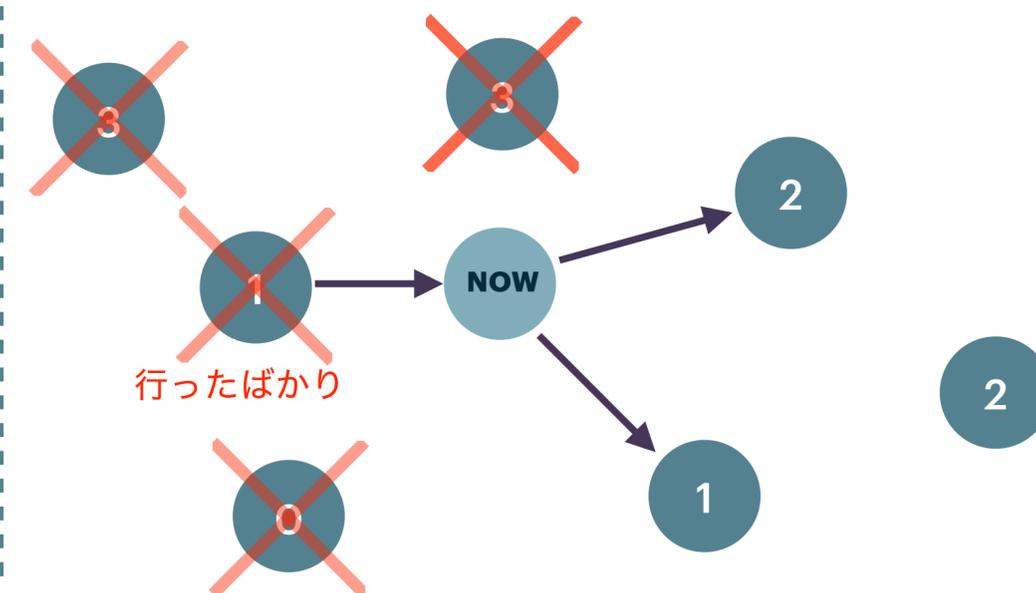
- ・ 巡回セールスマン問題の最近傍法をもとに、近似解を求める独自のアルゴリズムを開発(2019)(Pedro, 池田, 諸隈)

「満遍なく3回ずつ観測する」アルゴリズム

以下の条件に従って次に進む観測点の候補を絞り、その中で最も近い所に進む

- ・ 前回の観測から一定時間あける
- ・ 観測回数が2以下の所がある場合、3回以上観測済みの所には行かない
- ・ 観測回数が1または2の所がある場合、0の所には行かない

許容計算時間内に複数通り経路を考え、3回以上観測した領域数が最多の経路を採用



==> 2023年3月～ より現在のサーベイ(全天,高頻度)に適応させるために

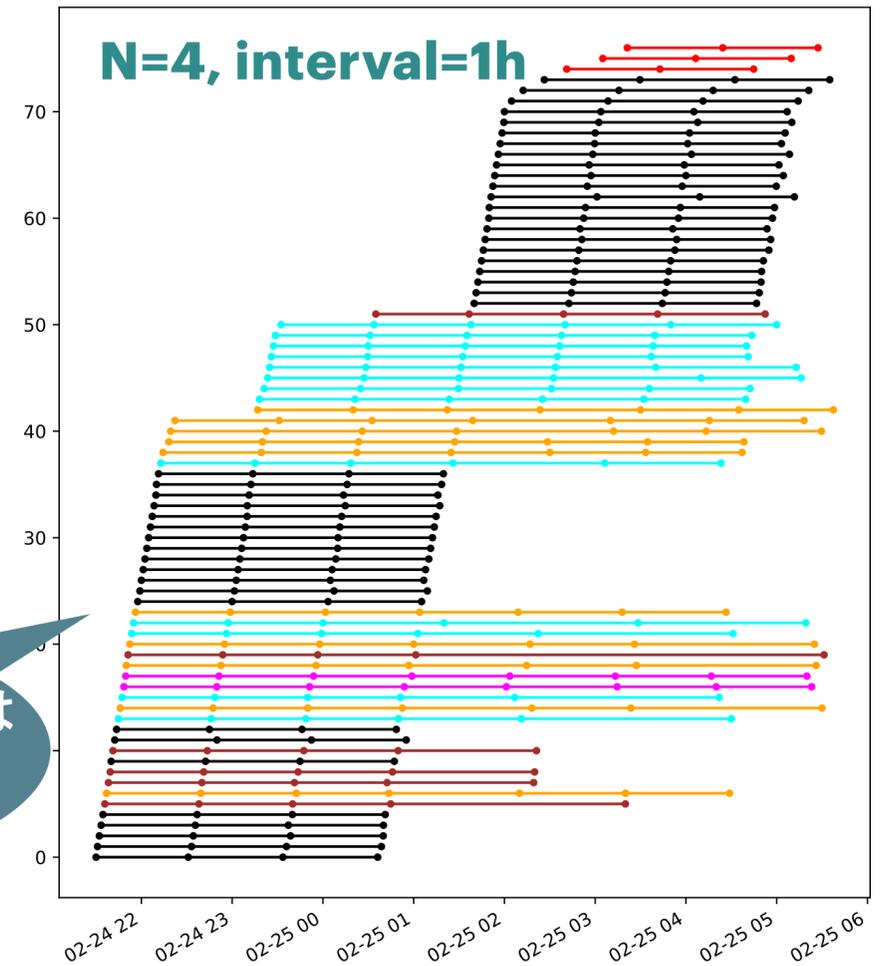
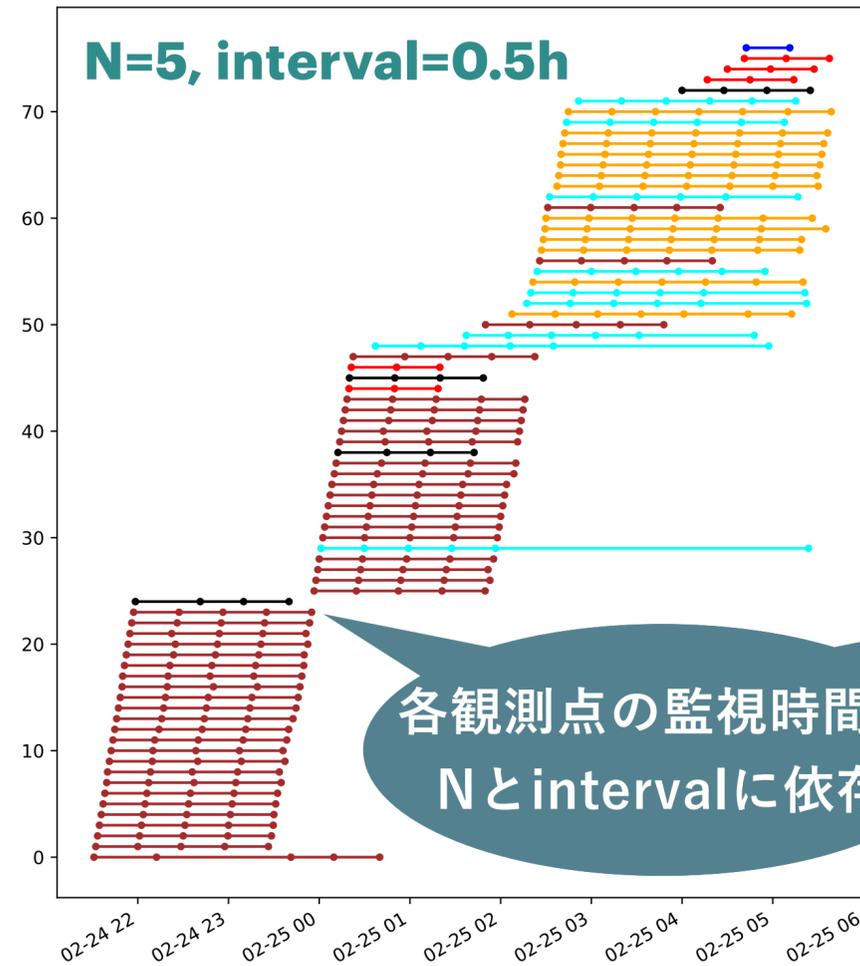
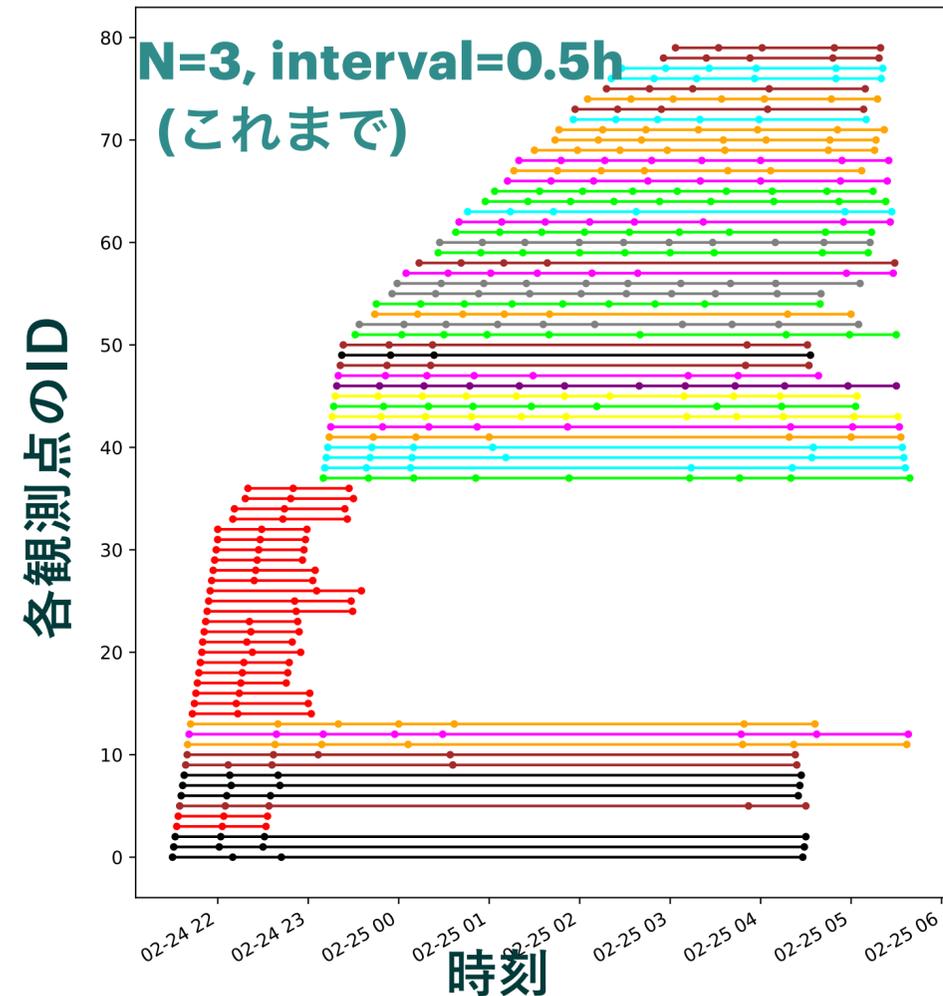
3回観測を最大化するアルゴリズムからN回観測を最大化するアルゴリズムに改修

経路決定アルゴリズムのパラメータ選定(検討中)

- ・ 全天サーベイ … $N=1$ (一度観測した所はもう観測しない)
- ・ 高頻度サーベイ … 適切なパラメータを検討中(富永, 田中, 諸隈)

$N=4$ or 5 , interval(複数回観測する際に最低限設ける時間間隔) = 0.5 or $1h$

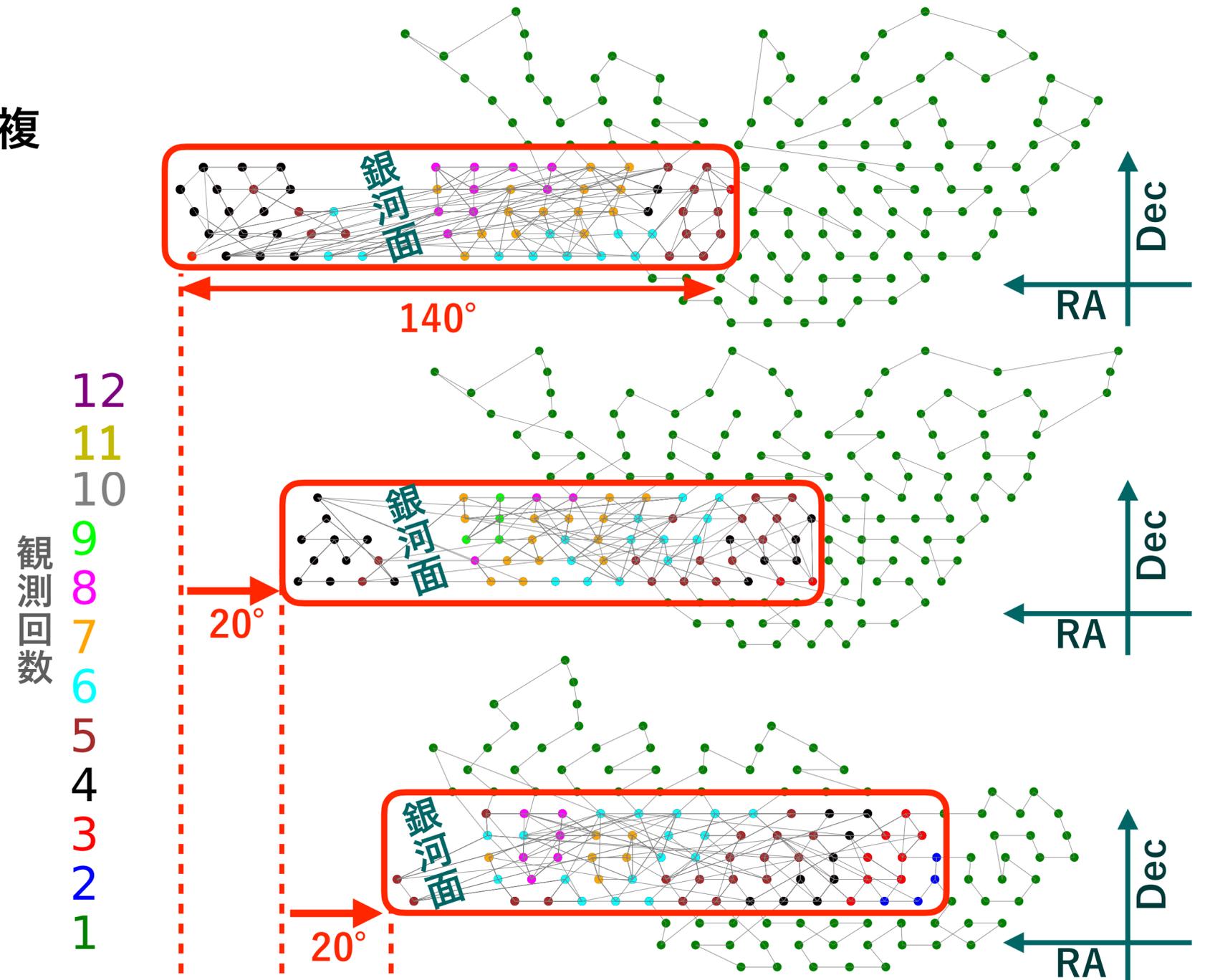
各観測点で得られる時系列データの
シミュレーション結果



高頻度サーベイの観測領域の選定(検討中)

高頻度サーベイと全天サーベイの観測領域を重複させ、高頻度サーベイの観測回数を稼ぐ

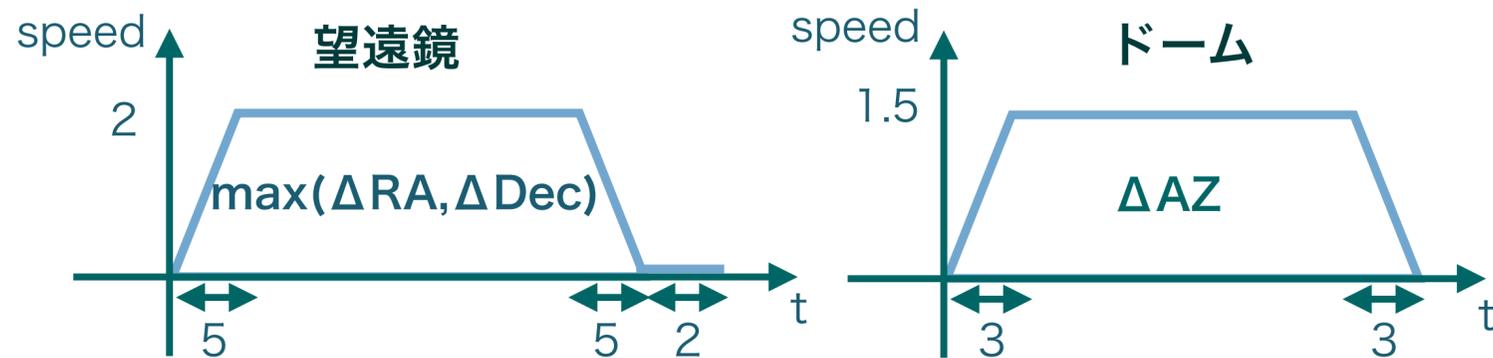
- ・ 高頻度サーベイの観測領域をどれくらい全天サーベイと重複させるか検討中(右図)
- ・ 現在全天サーベイと高頻度サーベイは独立に最適化
→ 全天サーベイでの観測を含めてN回観測を最大化するように改修予定
- ・ 全天サーベイとの重複が多い経路を優先するようアルゴリズムを改修予定



移動時間の計算方法の修正

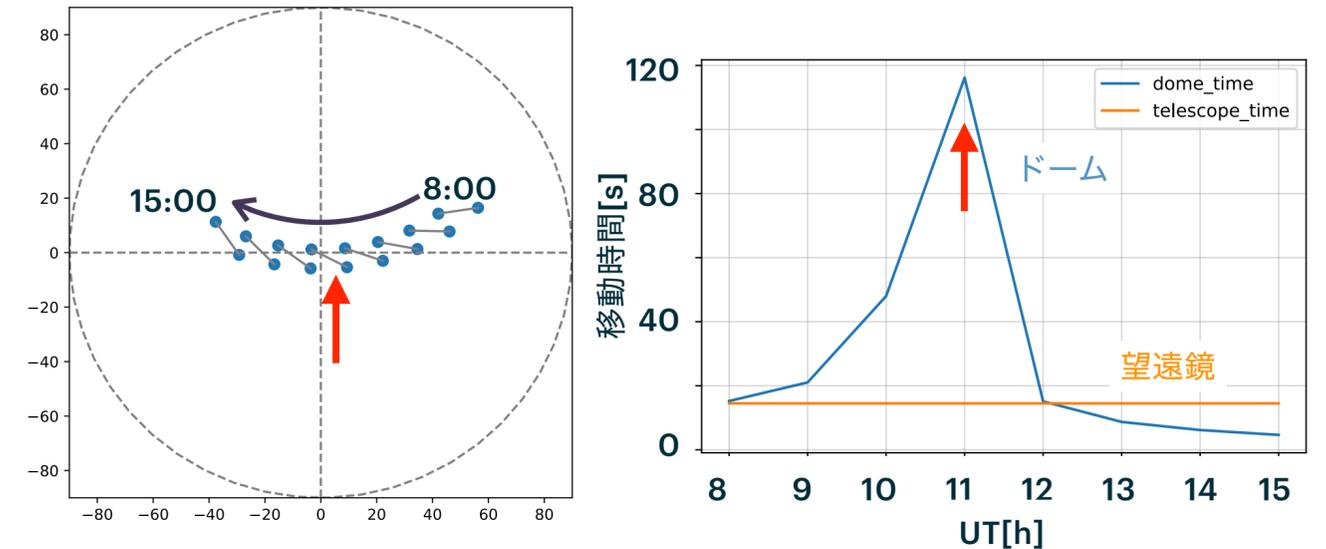
経路最適化は基本的に”近い所”に移動するアルゴリズムのため
各観測ポイント間の移動時間を正しく推定することが重要

- ・ 望遠鏡移動時間だけでなく、ドームの移動時間を新たに計算
- ・ 立ち上がりや静定の時間も考慮

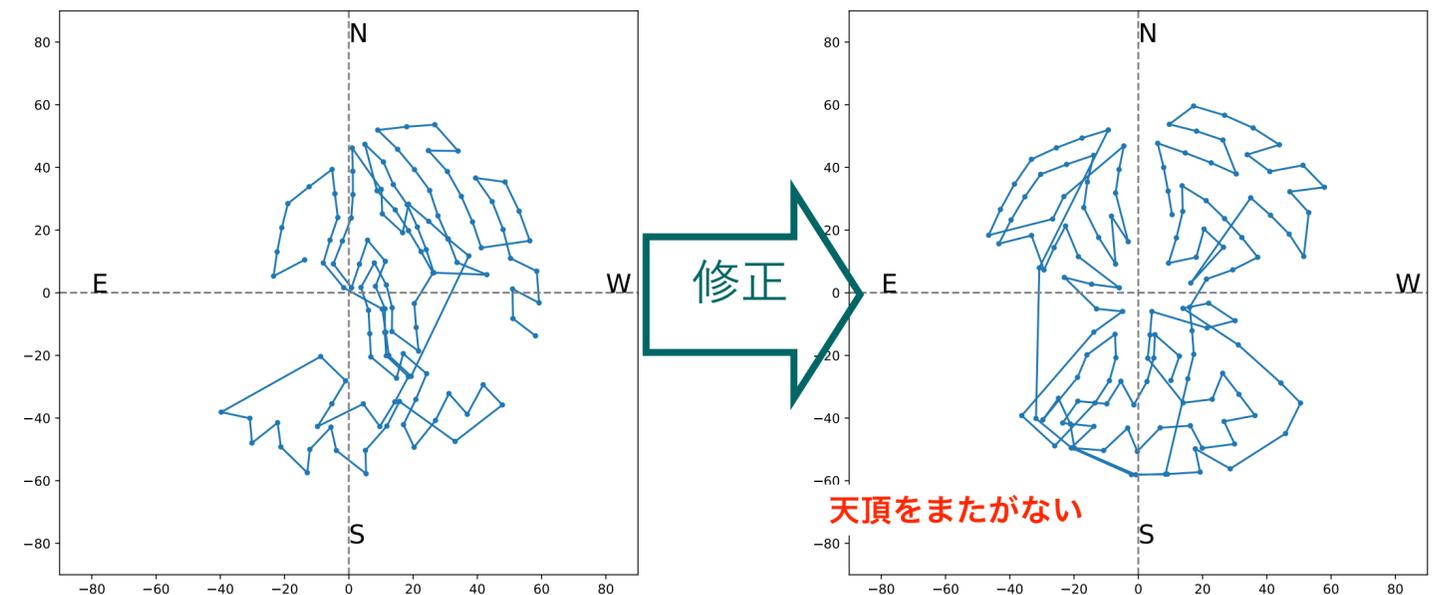


$$\begin{aligned} \text{移動時間} &= \max(t_{\text{telescope}}, t_{\text{dome}}) \\ t_{\text{telescope}} &= \max(12, \max(\Delta RA, \Delta Dec)/2[\text{deg/s}] + 5[\text{s}] + 2[\text{s}]) \\ t_{\text{dome}} &= \Delta AZ/1.5[\text{deg/s}] + 3[\text{s}] \end{aligned}$$

天頂付近を通る2点間の移動時間の例



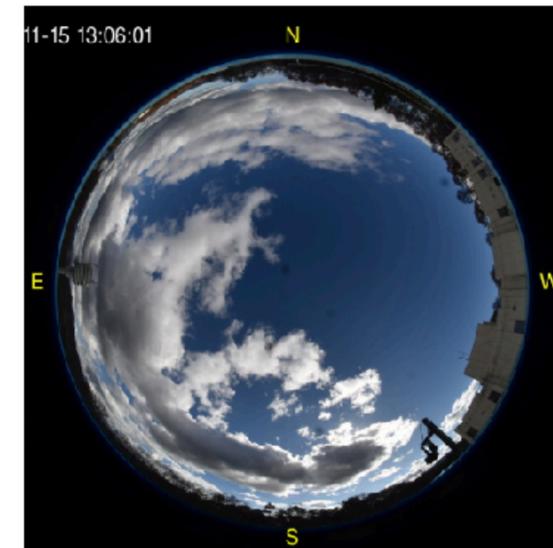
全天サーベイでの望遠鏡の軌跡(シミュレーション)



(昨年の発表)全天赤外線雲モニタの開発

Tsutsuki R. et al., 2022, SPIE 12184, 121848F / 光学系 特許出願中

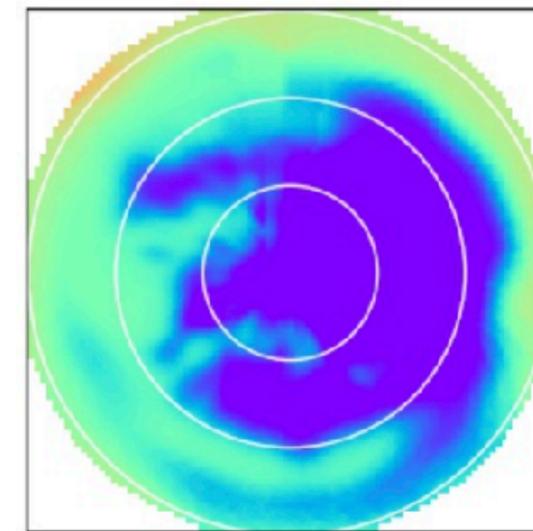
- 既存の雲モニタの課題
 - … 赤外線放射温度計：空の一部の雲量しか分からない
 - 可視光全天カメラ：太陽,月,街明かりなど光源の状態に強く依存
 - 赤外線全天カメラ：[魚眼レンズ] レンズ材の制限により製作が困難
[凸型のミラー] 天頂周辺が遮蔽される



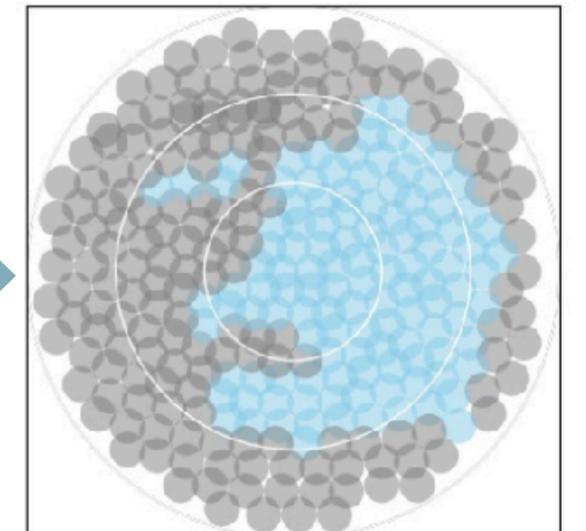
← 同時刻に可視光カメラ (魚眼レンズ) で取得した可視全天画像

➡ 遮蔽のない光学系を考案し赤外線全天カメラを開発

- 毎分取得した赤外線全天画像から直径10度の領域内の平均赤外線放射量を測定し経験的な閾値をもとに晴れ/曇りを判定
- 2021年12月~木曾観測所に設置し運用



本装置で取得した赤外線全天画像



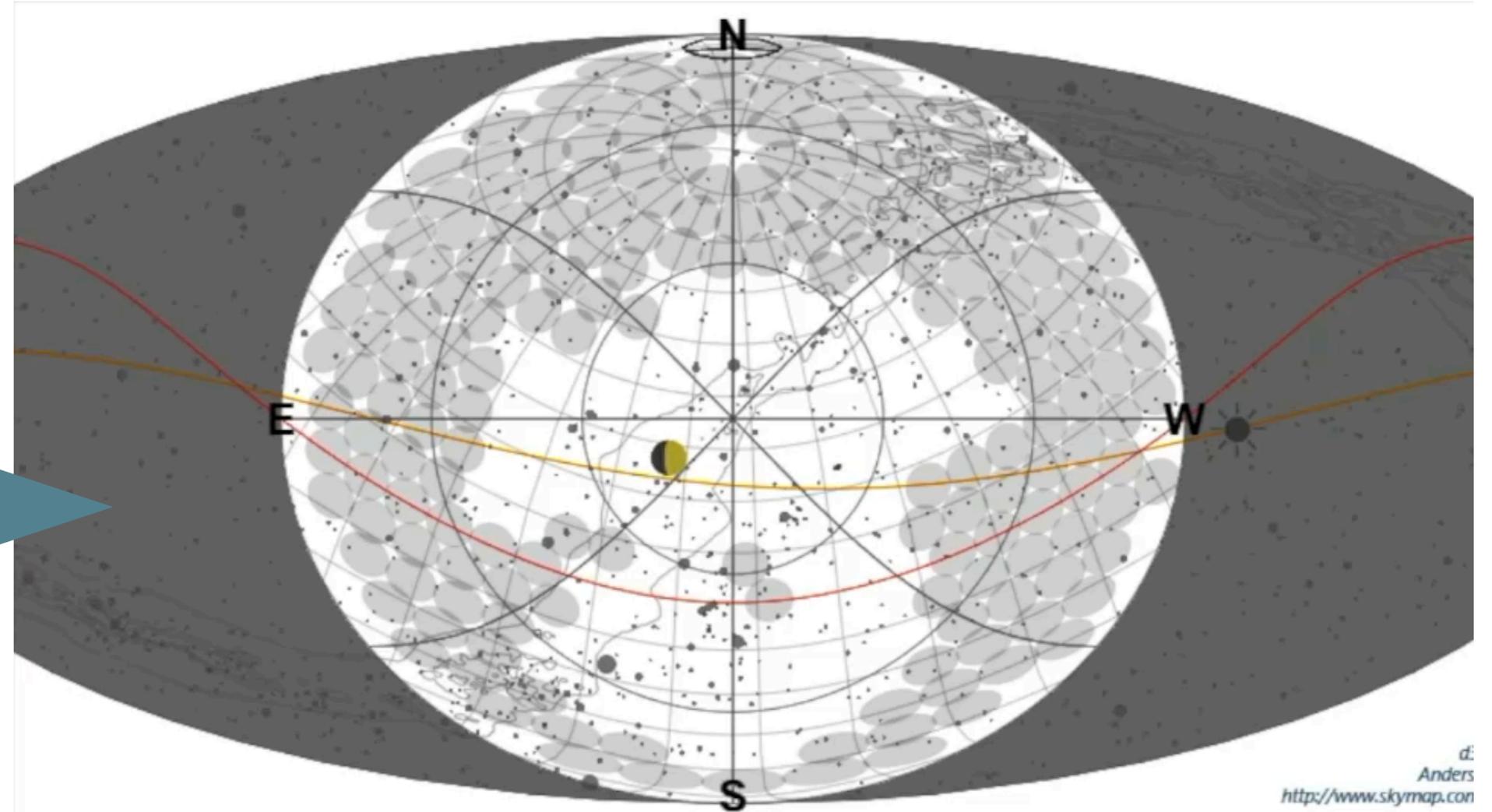
晴れ/曇り判定マップ

雲モニタとの連携を開始(2022/12/16)

- ・ 経路再計算時に雲モニタの雲分布情報を読み込み, 晴れ間領域内で経路を最適化

Skymapの画面録画 200倍速 →
(現在の雲分布と望遠鏡の観測位置
をブラウザでモニタリング)

- ✓ 月 ☾ と雲 ● を避けている
- ✓ なるべく東から観測していくことで
一晩の観測領域を最大化している



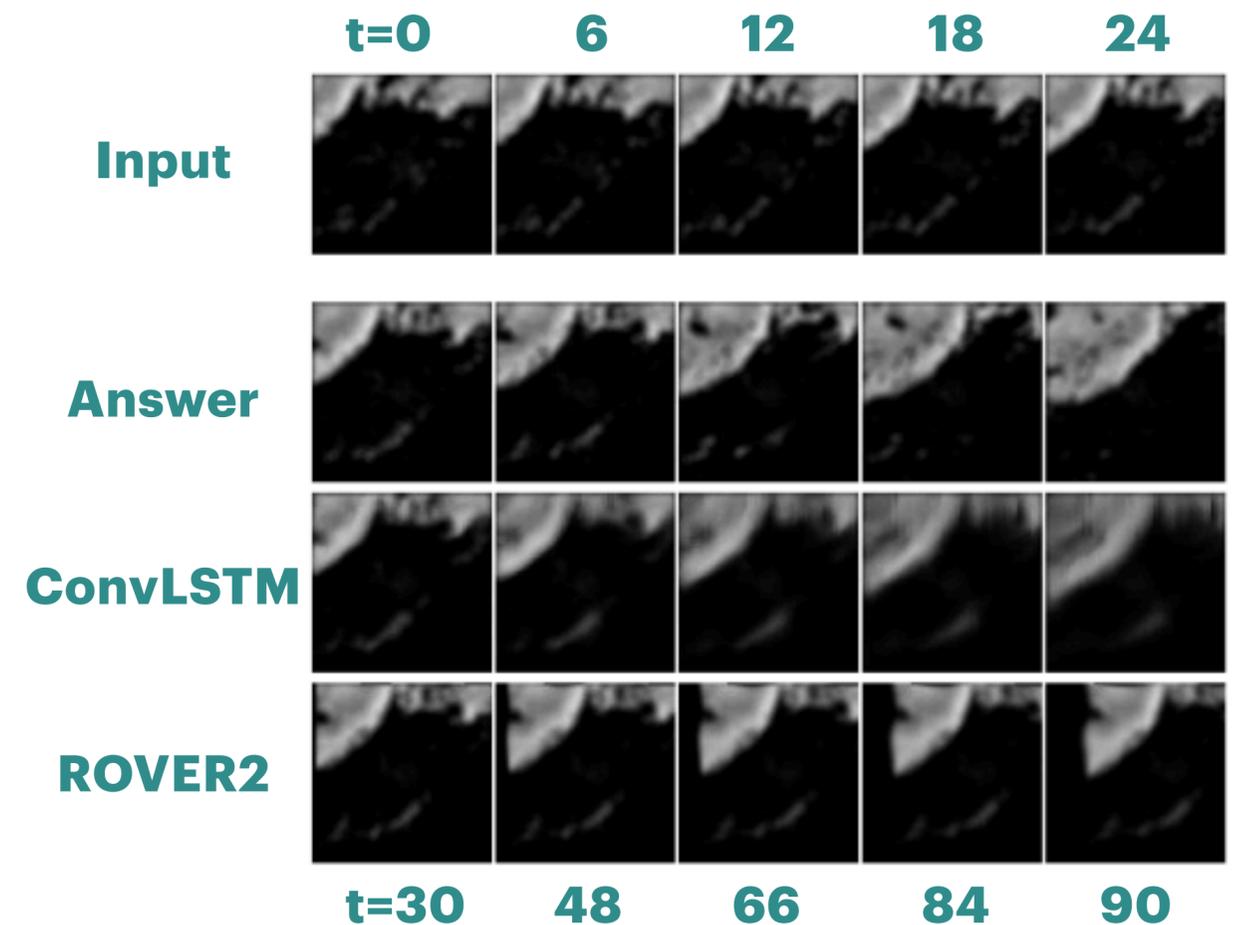
- ・ 経路決定時と実際に観測を実施した時とで10-20分の時間差が生じてしまい, 雲を避けきれないことがある
→ 今後, 動画予測を用いて「今から10分間晴れ続けるであろう領域」を求めその中で経路を決定する

雲分布の動画予測

Convolutional LSTMという深層学習モデルを用いて、
過去10分の全天画像(1 min/frame)からその後5分間の全天画像を予測するモデルを構築中

《参考文献》“Convolutional LSTM Network:A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting”
Xingjian Shi et al., (2015)

- ・ ローカルかつ短いタイムスケール(0-6hours)で降水量を予測したい
既存の予測方法：NWP(数値シミュレーション)
or ROVER(オプティカルフローによる外挿)
- ・ LSTM Future Predictor Model (エンコーダデコーダ)に
畳み込みを取り入れた**Encoding-forecasting ConvLSTM**
- ・ 降水量マップ(6min/frame)で過去30分からその後90分を予測し
ROVER, 全結合LSTMよりも高いスコアが得られた

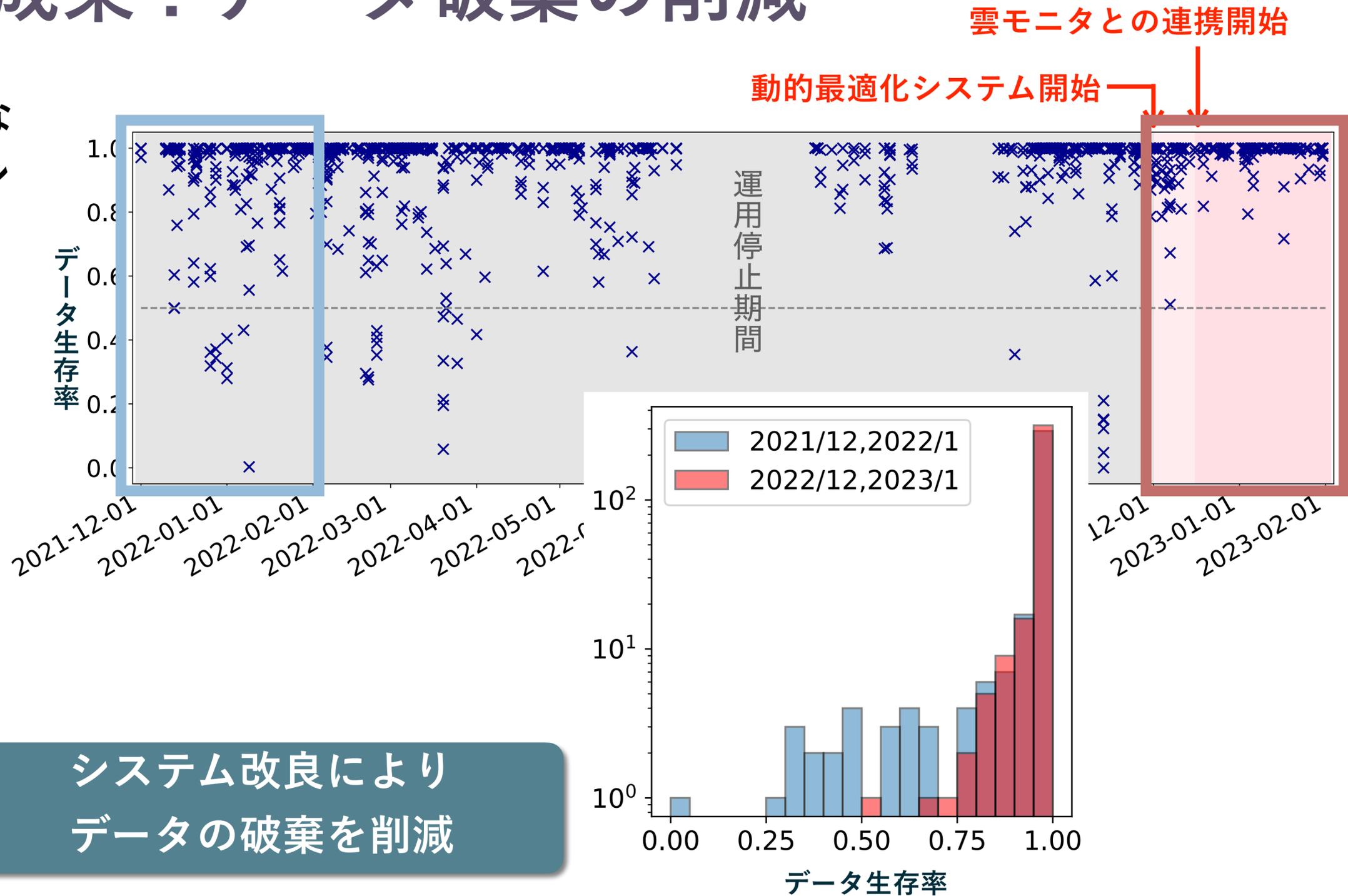


本システムによる成果：データ破棄の削減

背景が明るい又は星が検出されないデータは自動解析パイプラインにおいて破棄される

- ・ 2021/12 - 2023/1において露光したデータが自動解析を経て破棄されなかった割合 = “生存率”を算出

- 時刻で区切り1時間ごとの値を計算
- 露光数 > 50 (1時間のうち15分以上観測できた場合) に限定



システム改良により
データの破棄を削減

まとめ

- ・木曾観測所Tomo-e Gozenでは**短時間突発現象**や**高速移動天体**の観測を目的として最初に**全天サーベイ**,その後特定領域内で**高頻度突発天体サーベイ**を毎晩実施
- ・最適化計算により**移動時間によるタイムロス**を最小限に抑えた**経路**を求め,さらに**雲を避ける**ことで,**サーベイ観測の効率**を向上させることができる
- ・静的であった既存の経路最適化システムを**動的な最適化システム**に改良した
- ・経路決定における**アルゴリズムと移動時間の計算方法**を改修し,高頻度サーベイにおける最適なパラメータを検討中
- ・**赤外線全天カメラ**の開発により**全天の雲分布情報**を取得し,それを用いて**雲を避けた経路の最適化**を実装した
- ・2022年12月より改良システムの**運用を開始**したところ**露光データの破棄**を削減することができた
- ・今後は**動画予測**により数分先の雲分布の予測を用いて経路を最適化する

