

# CMB 望遠鏡 GroundBIRD におけるポインティング較正と大気ノイズを用いた風向推定に関する研究

京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室

武市 宗一郎

2026年1月23日



## 概要

宇宙マイクロ波背景放射（CMB）は人類が観測できる最古の光であり、特に視野角  $1^\circ$  以上の大角度スケールにおける CMB 偏光のパターンは、インフレーション宇宙論を支持する原始重力波の探索や、宇宙の再電離度を表す光学的厚み  $\tau$  の測定など、宇宙論の研究に大きな寄与を与えることが期待されている。

スペイン領テネリフェ島に設置された GroundBIRD 望遠鏡は、大角度スケールに特化した観測装置である。毎分最大 20 回転という高速スキャンにより、大気放射の揺らぎの影響よりも早く視野変調することで、その影響を抑制する観測ストラテジーを実現している。

CMB の精密観測には、望遠鏡の視線が宇宙のどこを向いているかを精密に較正することが必要不可欠である。先行研究によって、焦点面中心付近の検出素子に対する較正手法は開発されたが、全ての検出素子（full-array）に対する較正手法は確立していなかった。

本論文では、この手法を full-array に拡張し、視線方向の較正の検証と較正パラメータを得た。

一方、CMB を測定する際の外来ノイズ源である大気をモデル化し、大気放射の影響を見積もる手法を開発した。GroundBIRD 望遠鏡がその高速回転による広域スキャン観測から、大気の流れによる構造的な時間変化を捉えていることを発見した。

以上の結果から、本研究では GroundBIRD 望遠鏡における視線方向の較正を full-array へと拡張し、大角度スケール CMB 偏光観測に要求される精度での較正が可能であることを示した。さらに、高速回転によるスキャン観測という GroundBIRD 望遠鏡の観測手法の強みを活かし、大気放射の時間変化を捉える新たな解析手法を開発した。

# 目次

<b>第1章 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 ビッグバン宇宙論	1
1.2 インフレーション宇宙論	2
1.3 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)	3
1.3.1 宇宙論パラメータ	4
1.4 CMBの偏光	5
1.4.1 ストークスパラメータ	5
1.4.2 スカラー揺らぎ、テンソル揺らぎと偏光のEモード・Bモード	5
1.5 大角度スケールの偏光観測が解明する物理	5
1.6 GroundBIRD 望遠鏡	7
1.7 超伝導検出器 MKID	10
<b>第2章 月を用いた光学性能の較正</b>	<b>11</b>
2.0 月を用いた較正	11
2.1 moon fit	11
2.2 ポインティング	17
2.2.1 データセレクション	19
2.3 まとめ	21
<b>第3章 ノイズ波形の時間変化を用いた上空の風向きの推定</b>	<b>22</b>
3.1 ポインティングキャリブレーションの適用と大気の厚みを考慮した補正	23
3.2 大気ノイズの時間変化から風向きの推定	27
3.3 風向きの推定	33
3.4 STELLAの風向計との比較	36
3.5 ラジオゾンデによる上空の気象観測データとの比較	40
3.6 風速との比較	47
<b>第4章 まとめと今後の展望</b>	<b>49</b>
<b>第5章 謝辞</b>	<b>50</b>
参考文献	51

# 第1章 Introduction

## 1.1 ビッグバン宇宙論

宇宙が大局的には一様かつ等方であるという仮定（宇宙原理）を課せば、一様等方時空を記述する計量は式 (1.1) に示すロバートソン・ウォーカー計量（FLRW 計量）で表される。

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 \left[ \frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right] \quad (1.1)$$

ここで、 $a(t)$  は空間の広がり具合を表す無次元量で、スケールファクターと呼ばれる。スケールファクターは現在の値が 1 になるよう規格化されている。 $K$  は空間曲率に比例する定数で、 $K$  の符号によって  $K = 0$  が平坦宇宙、 $K > 0$  が閉じた宇宙、 $K < 0$  が開いた宇宙を表す。

一般相対論において、時空の時間発展はアインシュタイン方程式

$$G^\nu_\mu = 8\pi GT^\nu_\mu - \Lambda\delta^\nu_\mu \quad (1.2)$$

で記述される。 $G^\nu_\mu$  はアインシュタインテンソル、 $\Lambda$  は宇宙定数、 $G$  はニュートンの重力定数、 $T^\nu_\mu$  は完全流体のエネルギー・運動量テンソル（式 (1.3)）である。

$$T^\nu_\mu = \begin{pmatrix} -\rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

アインシュタイン方程式（式 (1.2)）に FLRW 計量（式 (1.1)）と、完全流体のエネルギー・運動量テンソル（式 (1.3)）を代入することで、以下のフリードマン方程式 (1.4), (1.5) が得られる。

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (1.4)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3} \quad (1.5)$$

ここで  $H = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)$  はハッブル膨張率と呼ばれ、宇宙の膨張速度を表す。方程式 (1.4)(1.5) より、エネルギー保存則

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0 \quad (1.6)$$

が導かれる。さらに状態方程式

$$p = w\rho \quad (1.7)$$

を仮定して

$$\rho \propto a^{-3(1+w)} \quad (1.8)$$

を得る。

現在までに行われた数多くの観測事実を説明できる標準模型として、 $\Lambda$  CDM モデルが存在する。 $\Lambda$  CDM モデルでは、宇宙のエネルギー成分は放射、物質、ダークエネルギーの3つに分類され、宇宙の進化は各時刻における支配的なエネルギー成分によって以下のように特徴付けられる。各成分における状態方程式 (1.7) は以下のようになり、

各成分に対して状態方程式の係数とエネルギー密度は以下ようになる。

$$\begin{cases} w = \frac{1}{3} & (\text{放射}) \\ w = 0 & (\text{物質}) \\ w = -1 & (\text{ダークエネルギー}) \end{cases} \quad (1.9)$$

$$\begin{cases} \rho_{\text{rad}} \propto a^{-4} & (\text{放射}) \\ \rho_{\text{m}} \propto a^{-3} & (\text{物質}) \\ \rho_{\Lambda} = \text{const.} & (\text{ダークエネルギー}) \end{cases} \quad (1.10)$$

## 1.2 インフレーション宇宙論

地平線問題や平坦性問題などのビッグバン理論の諸問題を解決する有力なモデルとして、宇宙初期に宇宙が指数関数的に引き伸ばされた時期が存在したとするインフレーション理論がある。

ここで宇宙を指数関数的に加速膨張させるようなインフラトン場と呼ばれるスカラー場  $\phi$  を導入し、インフラトン場のエネルギー密度が優勢な宇宙を考える。

スカラー場の運動方程式は

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0 \quad (1.11)$$

で与えられる。式 (1.11) の第2項が摩擦として十分強く作用している。ここで、インフラトン場  $\phi$  のエネルギー密度  $\rho$  と圧力  $P$  は以下の通りである。

$$\rho = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad (1.12)$$

$$P = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi) \quad (1.13)$$

また、インフラトンの変化がゆっくりであるという初期条件で、フリードマン方程式は

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}V(\phi) \quad (1.14)$$

と書ける。ここで、指数の逆数で減少する  $K/a$  の項を無視した。また一定値のように振る舞う  $V(\phi)$  と  $\Lambda$  をまとめて  $V(\phi)$  としている。

この解は

$$a(t) \propto \exp(Ht) \quad (1.15)$$

となり、指数関数的な膨張を表す。

### 1.3 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

ビッグバンシナリオによれば、宇宙は初期の高温・高密度状態から膨張を通じて冷却されていく。そして、その温度が3000K程度にまで冷却されると、電子が電離状態を保てなくなり、陽子に捕獲されて水素原子となる中性化が始まる（水素の再結合）。これ以後の光子は散乱を起こさずに直進し、当時の宇宙の情報をそのままに今の我々の空に映し出している。この光が我々が観測可能な最古の光であり、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) と呼ぶ。なお現在の CMB の温度は 2.725K である。CMB は 1965 年に Arno Penzias と Robert Wilson に発見 [1] されてから、宇宙開闢を支配する物理現象の解明のため現在まで観測が行われている。

CMB のスペクトルは全天でほぼ一様に 2.725K の黒体放射に一致しているが、僅かな異方性が存在する。式 (1.16) のように視線方向  $\hat{n}$  における平均温度  $T_0$  からのずれを  $\frac{\Delta T}{T_0}(\hat{n})$  として球面調和関数展開した時、そのパワースペクトルは式 (1.17) で表される。

$$\frac{\Delta T}{T_0}(\hat{n}) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\hat{n}) \quad (1.16)$$

$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \langle |a_{\ell m}|^2 \rangle \quad (1.17)$$

$Y_{\ell m}(\hat{n})$  は球面調和関数、添字  $\ell$  は多重極モーメントである。 $\theta$  を揺らぎの角度スケールとすると  $\ell \sim 180^\circ/\theta$  であり、 $\ell$  が小さいほど大角度スケールの構造を示す。

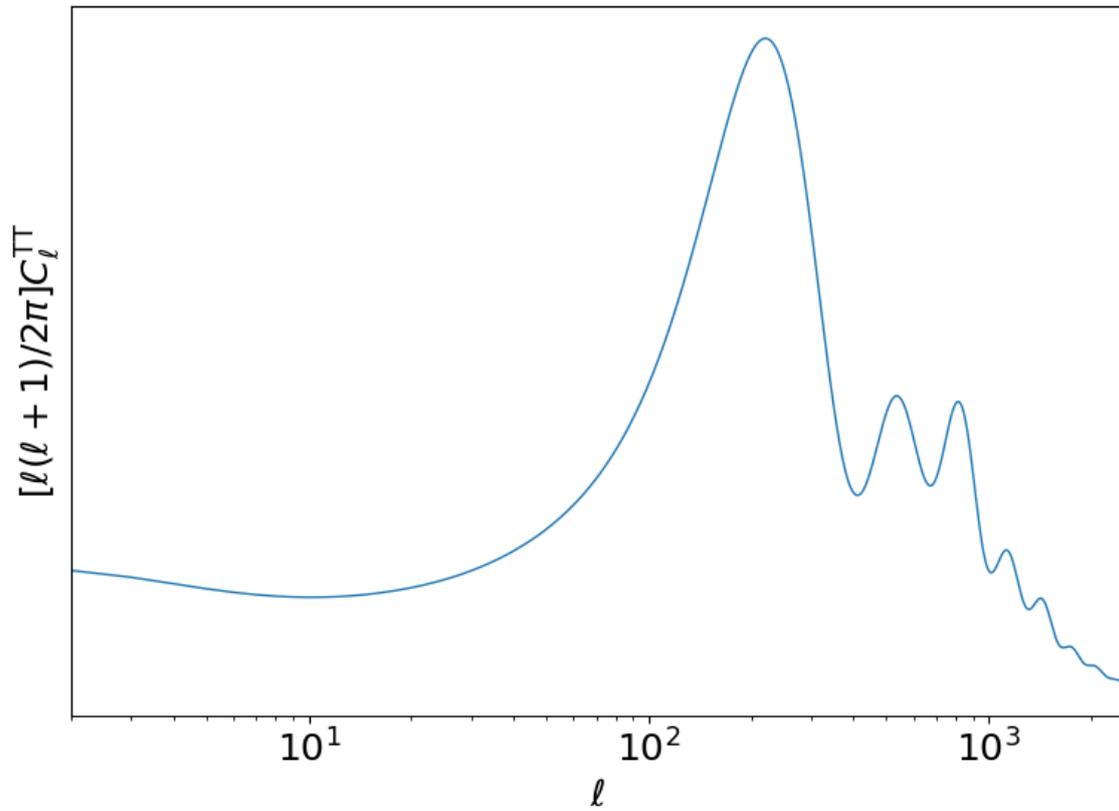


図 1.1: CMB の温度パワースペクトル。CLASS[2] を用いて計算した。

### 1.3.1 宇宙論パラメータ

宇宙を特徴付けるパラメータは CMB 観測によって以下のように見積もられている。

表 1.1: Planck の観測から得られた  $\Lambda$  CDM モデルの宇宙論パラメータ [3]。これらの値の推定には偏光と lensing のパワースペクトルも用いる。

パラメータ	表式	値
バリオン密度	$\Omega_b h^2$	$0.02242 \pm 0.00014$
冷たい暗黒物質密度	$\Omega_c h^2$	$0.11933 \pm 0.00091$
最終散乱面の見込み角度	$100\theta_{MC}$	$1.04101 \pm 0.00029$
再電離期における光学的な厚み	$\tau$	$0.0561 \pm 0.0071$
スカラー型の原始揺らぎの振幅	$\ln(10^{10} A_s)$	$3.047 \pm 0.014$
スカラー型の原始揺らぎのべき係数	$n_s$	$0.9665 \pm 0.0038$

## 1.4 CMBの偏光

### 1.4.1 ストークスパラメータ

$z$  軸方向に伝播する電磁波を観測者の定めた直交2軸に分解した時の電場成分を  $E_x, E_y$  する。完全偏波を考えると  $E_x, E_y$  は

$$E_x = a_1 e^{i(\omega t + \delta_1)} \quad (1.18)$$

$$E_y = a_2 e^{i(\omega t + \delta_2)} \quad (1.19)$$

この時、4つのストークスパラメータは以下のように定義される。

$$I = E_x E_x^* + E_y E_y^* = a_1^2 + a_2^2 \quad (1.20)$$

$$Q = E_x E_x^* - E_y E_y^* = a_1^2 - a_2^2 \quad (1.21)$$

$$U = E_x E_y^* + E_x^* E_y = 2a_1 a_2 \cos(\delta_2 - \delta_1) \quad (1.22)$$

$$V = i(E_x E_y^* - E_x^* E_y) = 2a_1 a_2 \sin(\delta_2 - \delta_1) \quad (1.23)$$

### 1.4.2 スカラー揺らぎ、テンソル揺らぎと偏光の E モード・B モード

非相対論的な運動をする自由電子と光子の古典的な散乱をトムソン散乱という。入射光子、散乱光子の偏光ベクトルをそれぞれ  $\vec{\epsilon}_{in}$ 、 $\vec{\epsilon}_{out}$ 、光子の散乱方向を  $\hat{n}$  とすれば、微分散乱断面積は式 (1.24) で表され、この時散乱光の偏光ベクトルは、入射光の偏光ベクトルを散乱方向に垂直な平面に射影した式 (1.25) となる [4]。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 (\vec{\epsilon}_{in} \cdot \vec{\epsilon}_{out})^2 \quad (1.24)$$

$$\vec{\epsilon}_{out} = \frac{(\vec{\epsilon}_{in} - (\hat{n} \cdot \vec{\epsilon}_{in}) \hat{n})}{|\vec{\epsilon}_{in} - (\hat{n} \cdot \vec{\epsilon}_{in}) \hat{n}|} \quad (1.25)$$

ここで、

$$r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2} \quad (1.26)$$

従って、自由電子の周りの温度が一様であればトムソン散乱の散乱光は無偏光となるが、温度に四重極の揺らぎが生じれば偏光が生まれる。

スカラー揺らぎはパリティ偶の E モード偏光を生じる。一方で、原始重力波と重力レンズ効果によって生成されるテンソル揺らぎは、パリティ奇の B モード偏光を生成する。

## 1.5 大角度スケールの偏光観測が解明する物理

視野角  $1^\circ$  以上の大角度スケールにおける CMB 偏光の観測は、宇宙の再電離期における光学的厚み  $\tau$  の測定 [5] や、インフレーション宇宙論に起因する原始重力波の探索 [6] など、宇宙初期の物理の解明に重要な役割を果たす。

Eモード偏光のパワースペクトルにおける大角度スケールは、図1.2に示すように宇宙の光学的厚み $\tau$ に高い感度を有する。一方で、Bモード偏光のパワースペクトルの観測はインフレーション由来の原始重力波の探索を可能にする。原始重力波はEモード偏光も生成するが、密度揺らぎがより大きな振幅のEモード偏光を生むため、原始重力波を探索することが難しい。また図1.3に示すように、 $\ell$ の大きなところではlensingの効果が支配的となるため、大角度スケールにおけるBモード偏光の観測が原始重力波探索の鍵となる。

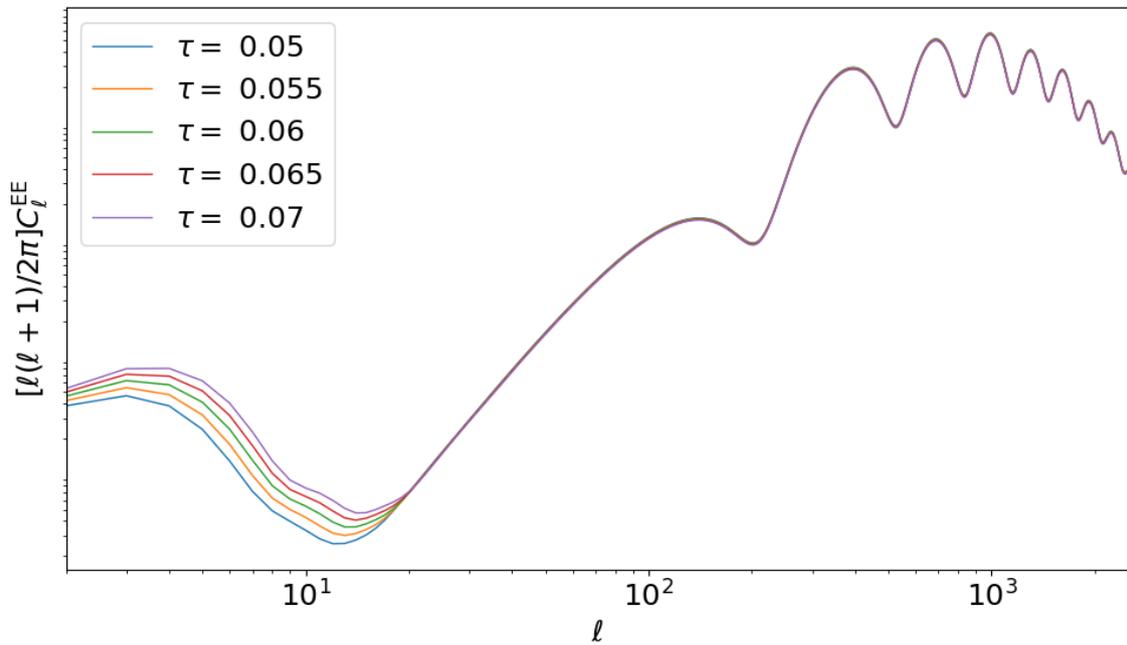


図 1.2: 異なる光学的厚み $\tau$ に対する CMB Eモードパワースペクトル  $C_\ell^{EE}$ 。CLASS[2]を用いて計算した。

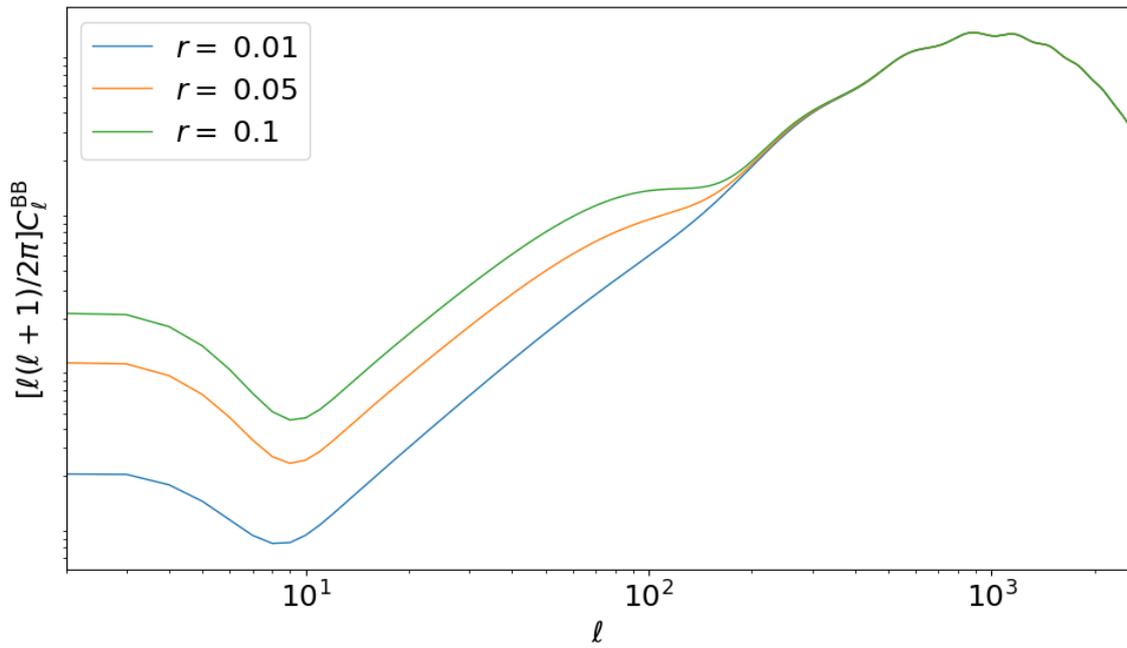


図 1.3: テンソル・スカラー比  $r$  に対する CMB B モードパワースペクトル  $C_\ell^{BB}$ 。CLASS[2] を用いて計算した。

ここで、テンソル・スカラー比  $r$  はスカラーゆらぎのパワースペクトルとテンソルゆらぎのパワースペクトルの比

$$r \equiv \frac{\mathcal{P}_t}{\mathcal{P}_R} \quad (1.27)$$

であり、現在は  $r < 0.036$  (at 95% confidence) と制限が付けられている [7]。

## 1.6 GroundBIRD 望遠鏡

スペイン領テネリフェ島に設置された GroundBIRD 望遠鏡は、大角度スケールに特化した観測装置である。毎分最大 20 回転で一方向に回転し続ける高速スキャン観測が可能であり、大気放射の揺らぎの影響よりも早く視野変調することで、その影響を抑制する観測ストラテジーを実現している。

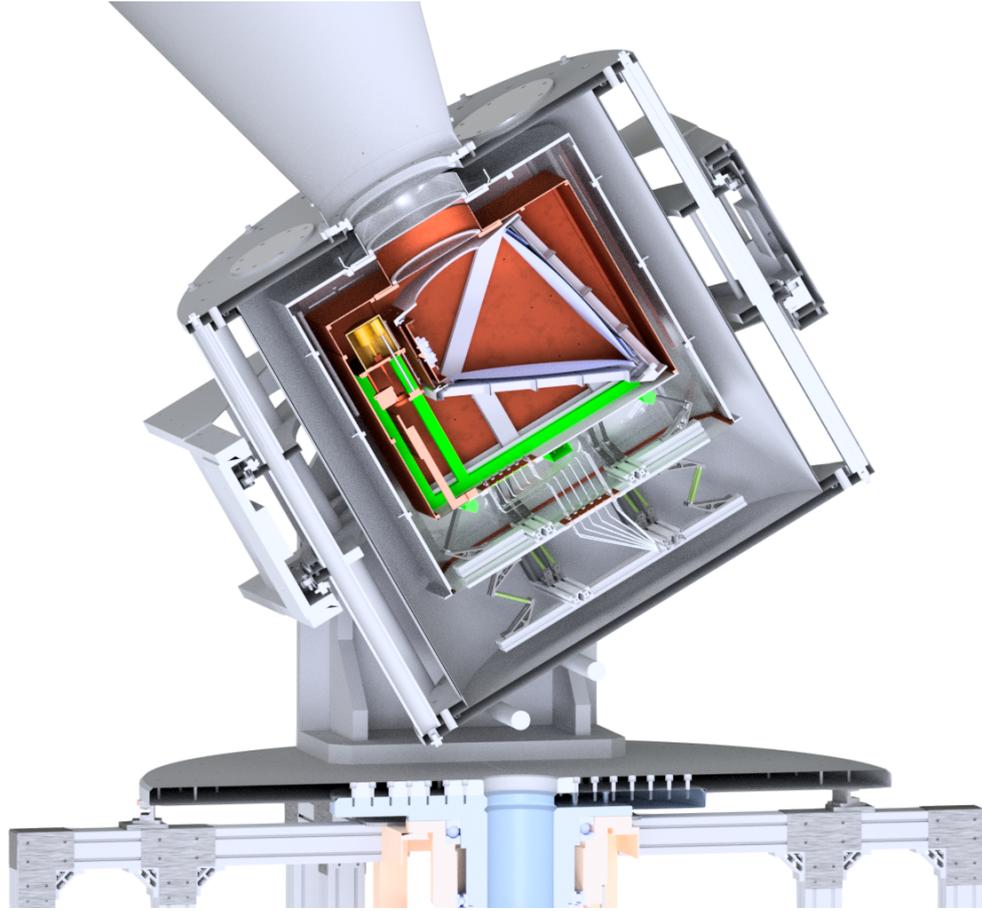


図 1.4: GroundBIRD 望遠鏡

CMB 光子を受ける焦点面には、中心に1つの 220GHz アレイ、その周りに 145GHz アレイが6つ配置されている。1つのアレイに15~25個程度の超伝導検出素子が配置されている。145GHz アレイは大気放射の影響が少なく最も CMB に感度のある帯域を観測し（図 1.5）、220GHz アレイは星間物質からのノイズである銀河放射の影響を監視するために搭載されている。

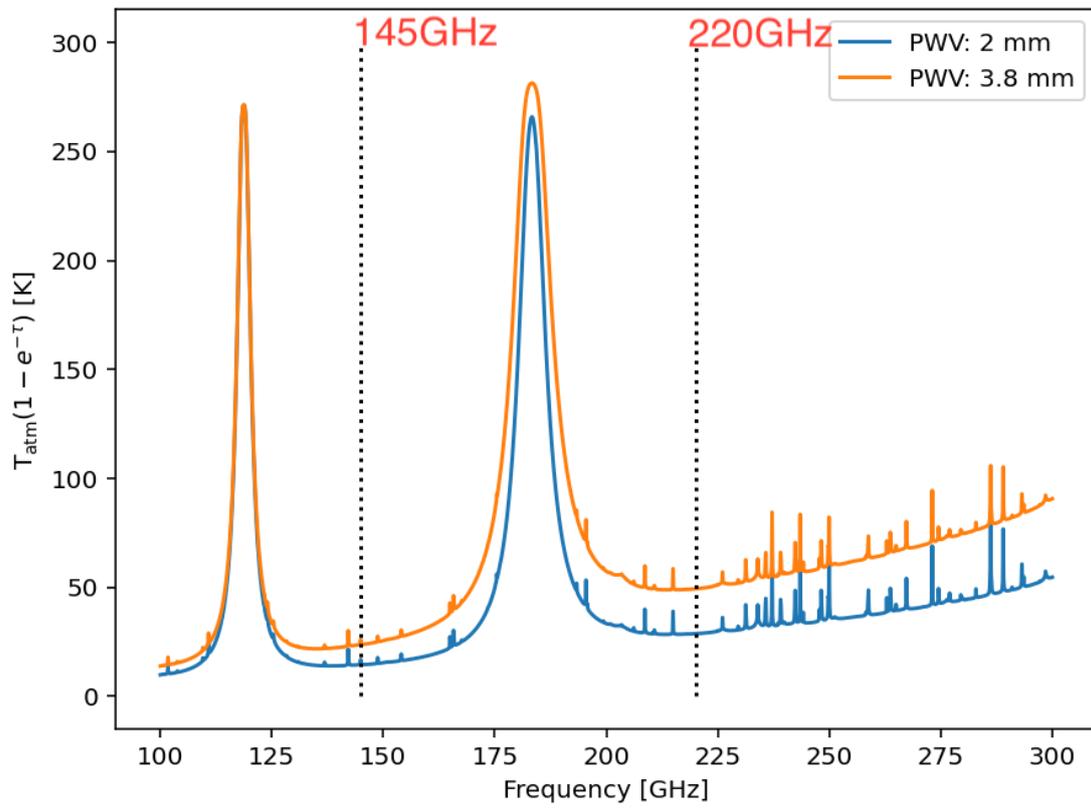


図 1.5: ミリ波帯域における大気放射強度。 $T_{\text{atm}}$  は大気温度、 $e^{-\tau}$  は大気の透過率を表す。

## 1.7 超伝導検出器 MKID

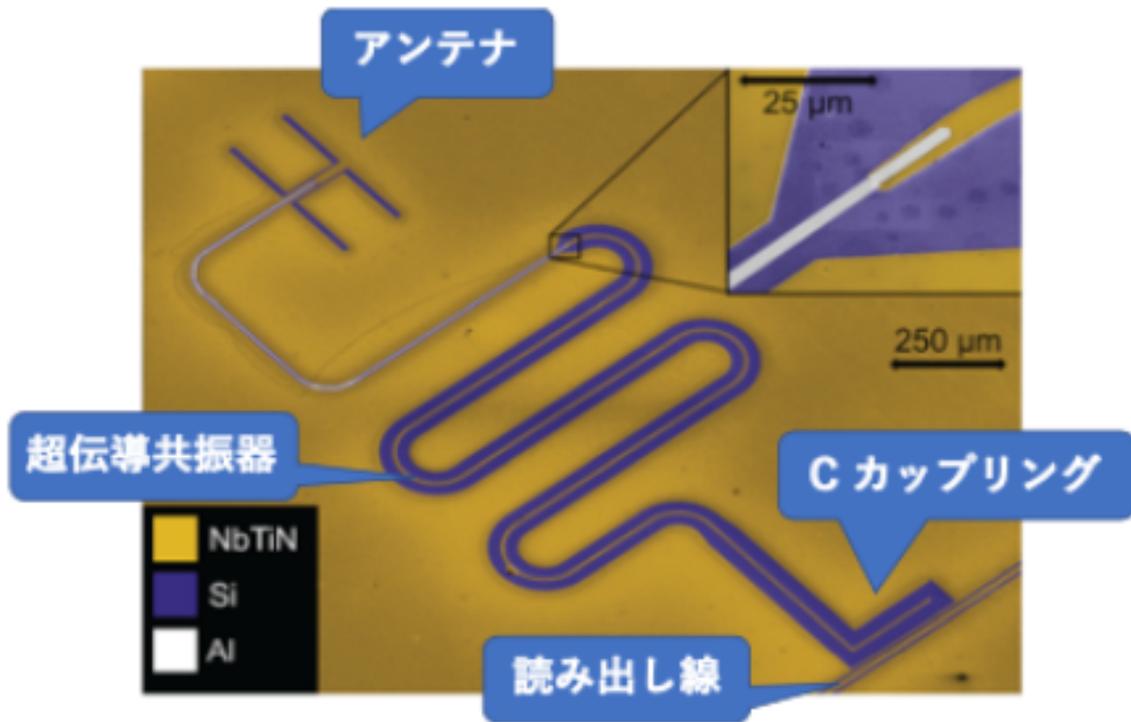


図 1.6: MKID の顕微鏡写真 [8]

GroundBIRD 望遠鏡には検出素子として、超伝導検出器 MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) が搭載されている。MKID は以下の特徴を持つ。

- 極低温環境で CMB のような非常に小さなエネルギーの信号を高感度に受信することが可能である。
- 多重読み出しが可能であり、1本の読み出し線で複数の MKID を同時に読み出すことができる。
- 応答が高速 ( $< \mathcal{O}(1)\text{ms}$ ) であり、GroundBIRD の高速スキャン観測でも十分な角度分解能を有する。

## 第2章 月を用いた光学性能の較正

### 2.0 月を用いた較正

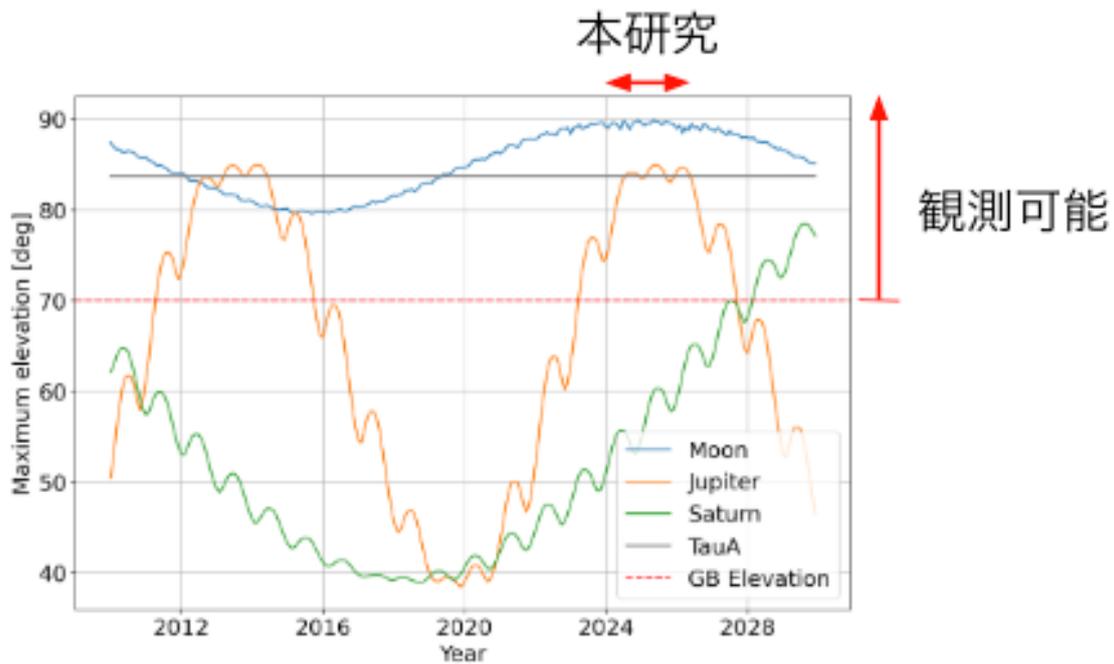


図 2.1: 主要な天体の最大高度。赤い破線は GroundBIRD 望遠鏡のスキャン仰角 ( $70^\circ$ ) を表す。

月は太陽を除けば地上から観測される天体の中で、GroundBIRD の観測帯において最も明るく見える天体の 1 つである。さらに年度によらず GroundBIRD 望遠鏡の仰角を通過するため安定した観測が容易である。そのため、GroundBIRD 実験では月をポインティングのキャリブレーションソースとして用いる。

本章では参考文献 [9] のポインティングの手順に従い、full-array の観測データを用いて導出と検証を行う。

### 2.1 moon fit

GroundBIRD の観測帯においては、月面温度に従う月面からの放射が太陽光反射よりも支配的となる。そして、観測される月の輝度温度の式は次のようなモデルで与えられる。[10]

$$T_{moon}(\nu) = T_0(\nu) + T_1 \cos(\omega t - \xi(\nu)) \quad (2.1)$$

$\lambda$	$\nu$	$T_0$	$T_1$	$\xi$
		(average)	(1 <sup>st</sup> harmonic)	(Phase from New Moon)
(cm)	(GHz)	(K)	(K)	(°)
0.1	300	203	101	5
0.2	150	208	80	14
0.3	100	210	72	17
0.4	75	211	62	24
0.8	37	214	38	32
1.6	19	215	29	35
3.2	9.4	217	14	40
9.6	3.1	221	4	42
20	1.5	224	0.0	–
30	1.0	226	0.0	–

表 2.1: 角周波数における月の輝度温度 (2.1) の各パラメータ [10]。

$T_0, T_1, \xi$  は [10] の Table.2 から、145GHz の時  $T_0 = 208\text{K}, T_1 = 80\text{K}, \xi = 14^\circ$ 、220GHz の時  $T_0 = 206\text{K}, T_1 = 90\text{K}, \xi = 10^\circ$ 。ただし、220GHz における値は 150GHz, 300GHz での値から線形に内挿して求めた。また、 $\omega$  は月の位相の角速度であり、 $12.26^\circ/\text{日}$  である。GroundBIRD が観測する周波数である 145GHz、220GHz における輝度温度と月相の関係をプロットしたものを図 2.2 に示した。各周波数帯における月の輝度温度は、145GHz で 128~288K, 220GHz で 116~296K である。

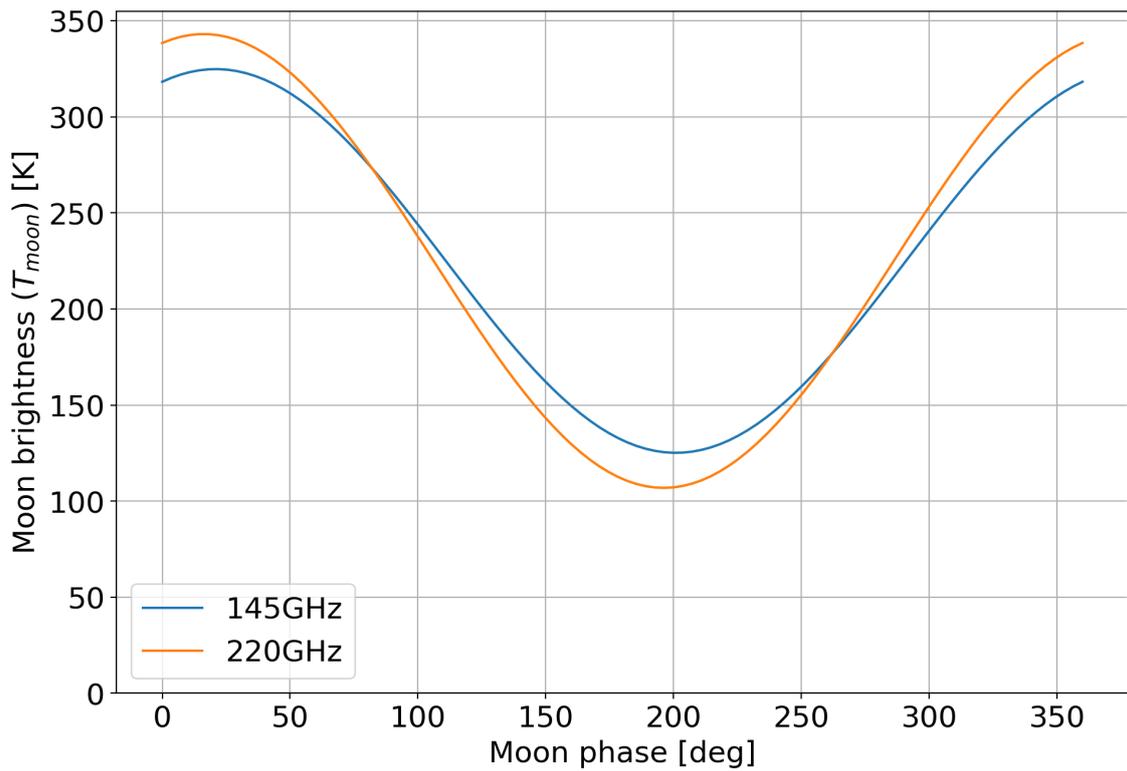


図 2.2: 145GHz、220GHz における月の輝度温度と月相の関係。

これを元にデータにフィットさせる二次元月画像モデルを構成する。astropy[11] モジュールにより月と地球の距離を計算し、月の視野径を算出する。月の外側はCMB温度(2.725K)、視野径内では、黒体表面が誘電体層で覆われたモデル[12]を用いて像の温度分布を決定した(図2.3(a))。これにガウシアンによる畳み込みを行い、二次元月画像モデルとした(図2.3(b))。

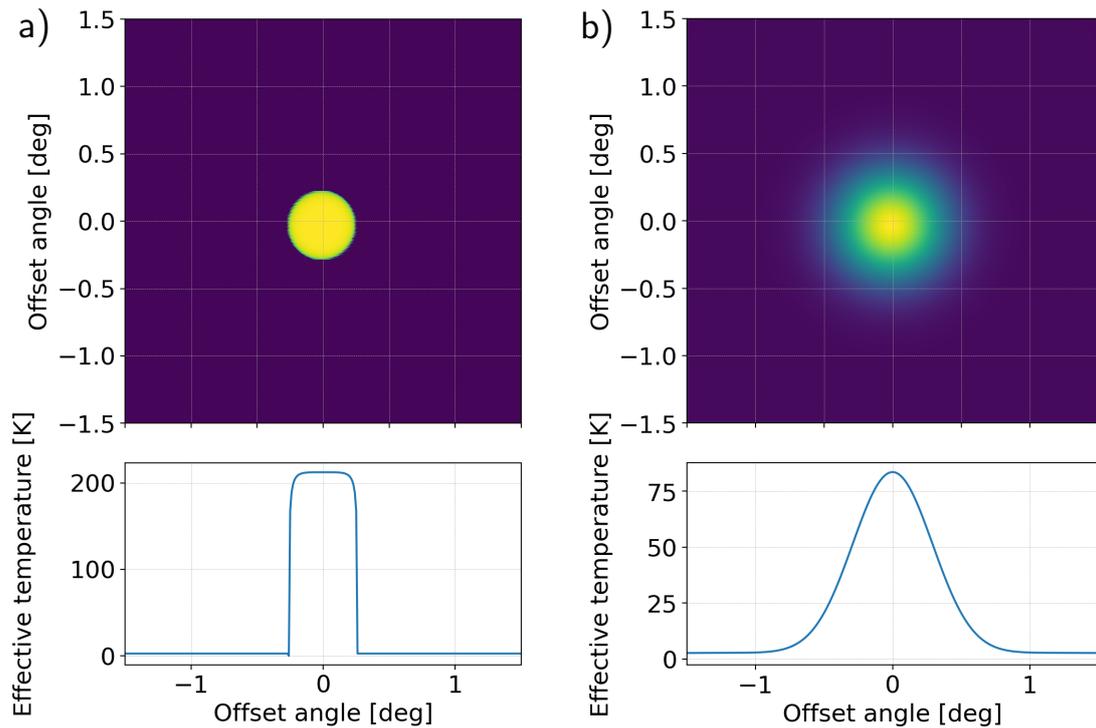


図 2.3: 月の輝度温度の分布 (a) と、それをガウシアンで畳み込んだ分布 (b)。各図 (a),(b) の上図は 2 次元プロット、下図はその縦軸中心で切り出した、オフセット角に対する強度分布を示す。

図 2.4(a) に実際に月を観測した際の時系列データを示す。下図に見える 1 つの山なりのパターンが、月が空を昇る（沈む）際に、望遠鏡の視線の elevation（ $70^\circ$ ）を通過する動きに対応している。山の頂点がおおよそ月の中心高度が望遠鏡の視線高度と一致する時刻にあたる。上の拡大図に見られるスパイク状のパターンが、望遠鏡の azimuth 回転で視線が月を横切るタイミングの輝度変化に対応する。図 2.4(b) に再構成した月画像を示す。astropy[11] モジュールとデータの時間ログから対応する月の位置を算出し、図 2.4(a) の最大値を月の中心と見做して月中心画像にしてある。スキャン観測の 1 回転ごとに、月中心座標系において月の視野径から  $2.0^\circ$  までの平均をオフセットとして差し引いた。

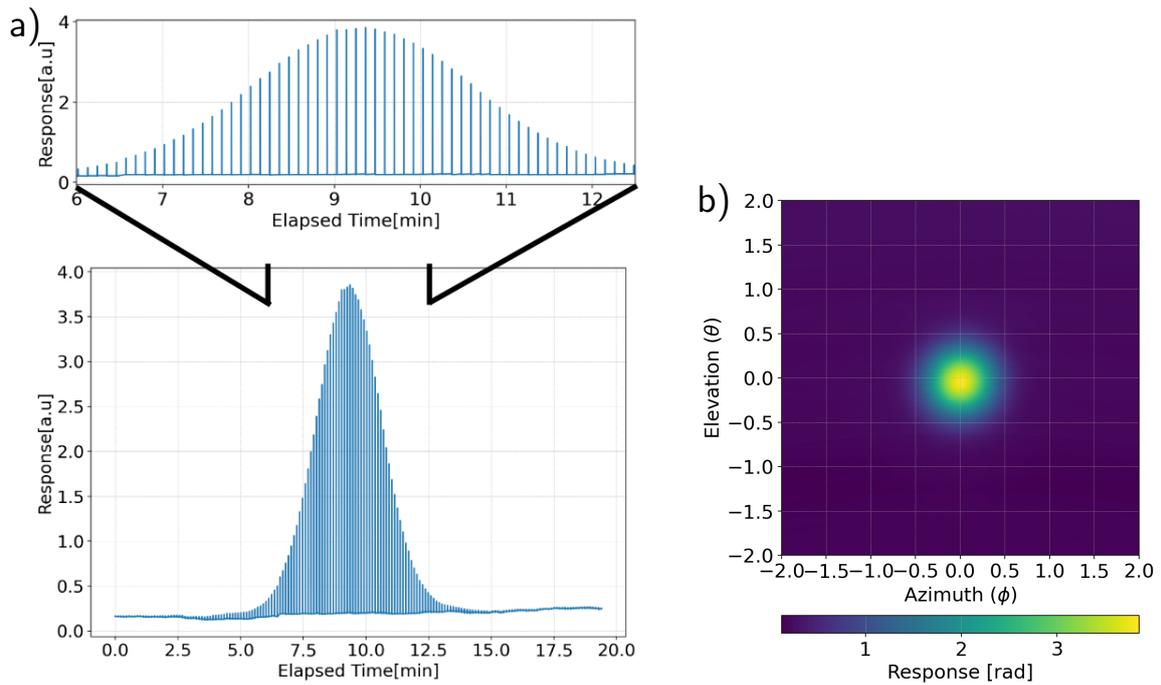


図 2.4: MKID で観測した月の応答 (a)、月位置を中心に再構成した月の画像 (b)。

焦点面に配列された検出素子は、その焦点面上の位置によって固有の視差をもつ。図 2.5 に、例として1アレイにおける同じ月を観測した際の月画像を示す。画像二段二列目「kid06」と名付けられたピクセルの月が中心になるよう座標系をとっており、それぞれの検出器が観測した月の相対位置の差は、検出器ごとの視差によって生まれている。これらの月のデータを、月表面の輝度温度分布のモデルでフィッティングし、それぞれの検出器が見やる月の中心位置を得た。図 2.6 に検出器の応答とフィット結果の1例を示した。offset angle が 0 付近での Fit 関数とデータのずれは、月の中心に近いところでは放射が高強度であり、それによって素子がわずかに非線形な応答を示していることが考えられる。

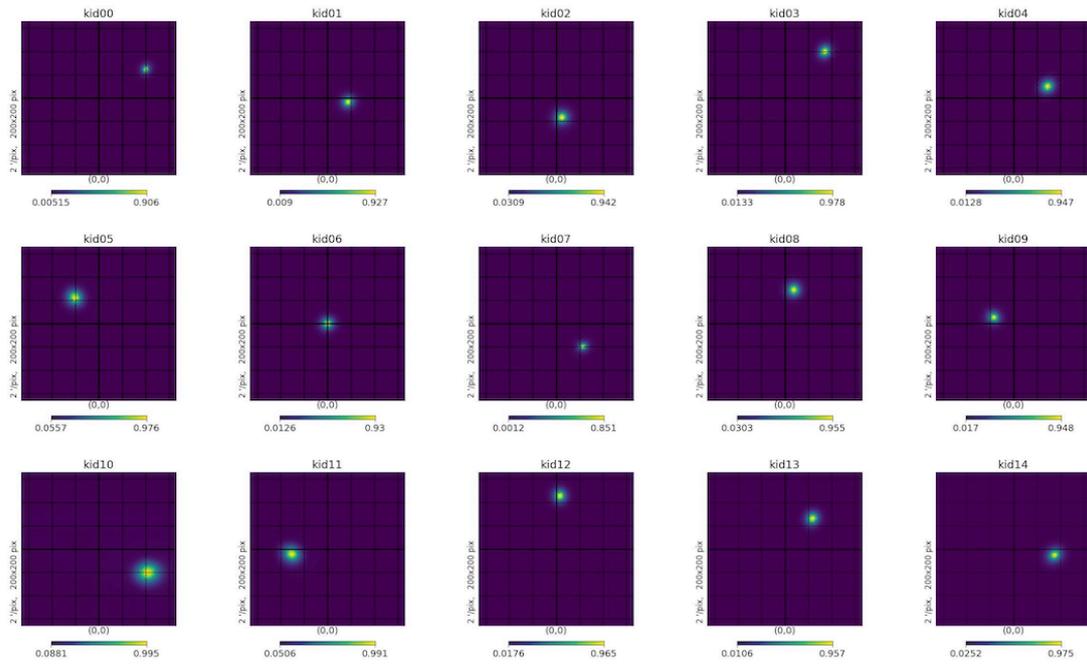


図 2.5: hitmap の 1 例。

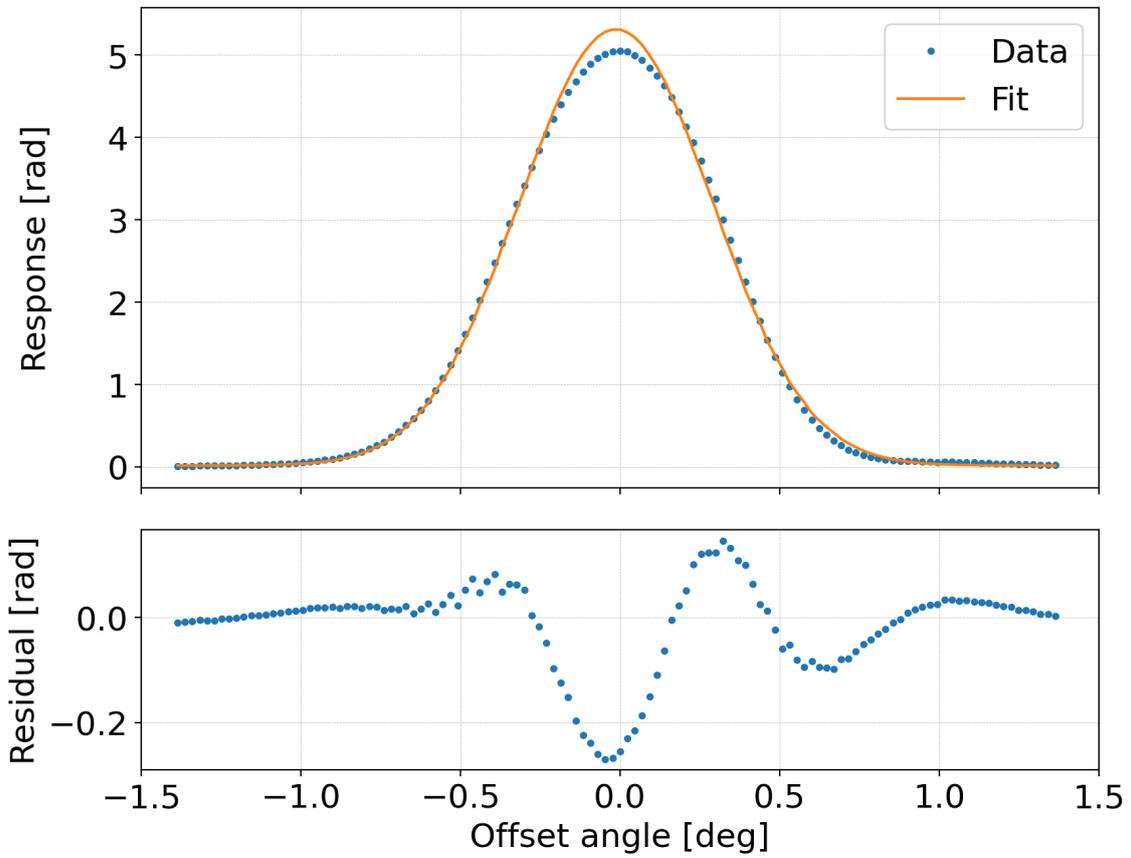


図 2.6: 月データのフィット結果と residual。

## 2.2 ポインティング

望遠鏡の回転軸の傾きは望遠鏡の視線方向に影響を与える。回転軸の鉛直からの南北方向への傾きを  $\delta_{NS}$ 、東西方向への傾きを  $\delta_{EW}$  とした時、これらの傾きが視線方向に与える Azimuth のずれ ( $\delta_\theta$ )、Elevation のずれ ( $\delta_\phi$ ) は以下のように表せられる。望遠鏡の Elevation、Azimuth を固定した時のポインティングシフトは図 2.7 のように表せる。

$$\begin{cases} \delta_\theta(\phi) = \delta_{NS} \cos \phi + \delta_{EW} \sin \phi \\ \cos \theta \delta_\phi(\theta, \phi) = \delta_{NS} \sin \theta \sin \phi - \delta_{EW} \sin \theta \cos \phi \end{cases} \quad (2.2)$$

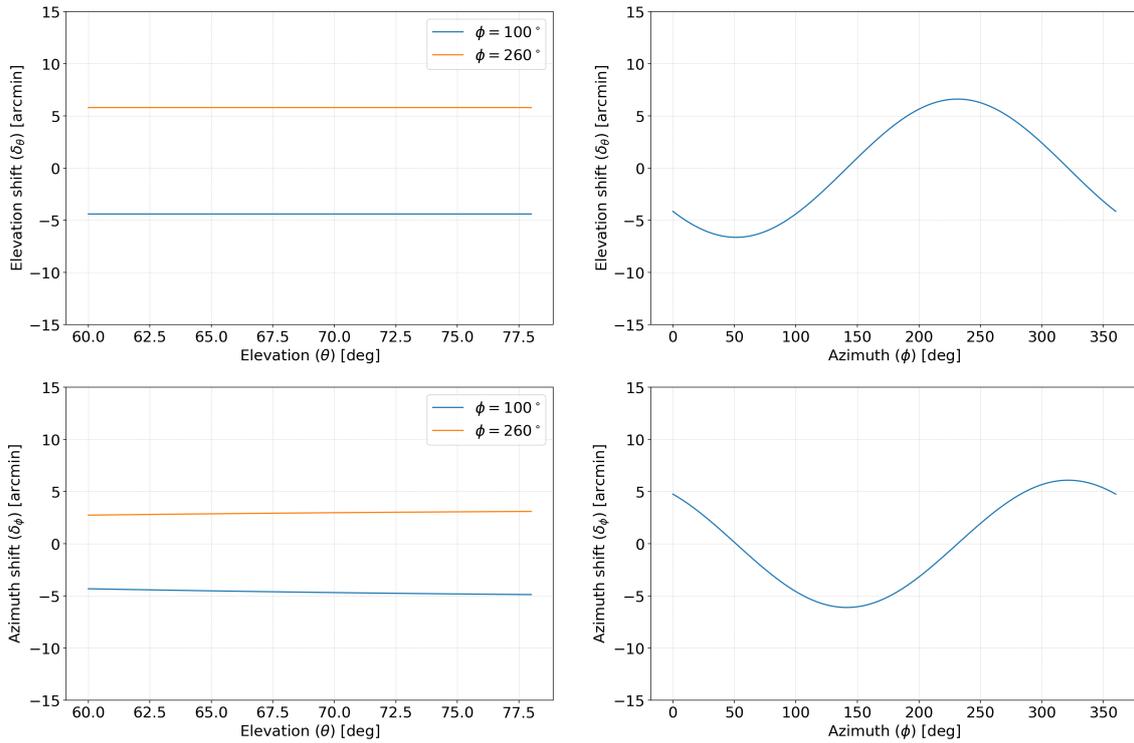


図 2.7: 回転軸の傾きによる EL,AZ 方向へのポインティングシフト。

検出器の視線方向のオフセットには、この回転軸のずれによるオフセットに加えて、望遠鏡の角度エンコーダーのオフセット、そして図 2.5 で見たように、検出器ごとに固有の視差が乗る。Elevation 方向のエンコーダーオフセットを  $\theta_e$ 、Azimuth 方向のエンコーダーオフセットを  $\phi_e$ 、検出器固有の視差オフセットも Elevation 方向を  $\theta_i$ 、Azimuth 方向を  $\phi_i$  とすると、ポインティングのモデルは以下の式で表される。これを月のフィッティングで得た視線方向データと照らし合わせ、 $dl^2 = (\theta^{\text{model}} - \theta^{\text{true}})^2 + [\cos \theta^{\text{true}} (\phi^{\text{model}} - \phi^{\text{true}})]^2$  が最小となるようにフィットして各ポインティングパラメータを求めた。

$$\begin{cases} \theta^{\text{model}} = \theta^{\text{data}} - \theta_e - \theta_i - \delta_\theta(\phi^{\text{true}}) \\ \phi^{\text{model}} = \phi^{\text{data}} - \phi_e - \phi_i - \delta_\phi(\theta^{\text{true}}, \phi^{\text{true}}) \end{cases} \quad (2.3)$$

回転軸のずれによるポインティングシフトは以下ようになる。

$$\begin{cases} \delta_\theta(\phi^{\text{true}}) = (\theta^{\text{data}} - \theta_e - \theta_i) - \theta^{\text{true}} \\ \cos \theta^{\text{true}} \delta_\phi(\theta^{\text{true}}, \phi^{\text{true}}) = \cos \theta^{\text{true}} [(\phi^{\text{data}} - \phi_e - \phi_i) - \phi^{\text{true}}] \end{cases} \quad (2.4)$$

式(2.4)で得たポインティングシフトと図2.7の比較を図2.8に示す。式(2.4)はそれ自身が $\theta^{\text{true}}, \phi^{\text{true}}$ を含むが、実際の観測においては $\theta^{\text{true}}, \phi^{\text{true}}$ は未知である。そこで、次のように段階的な操作で推定を行う。まず式(2.5)で $\theta^0, \phi^0$ を定義する。次に式(2.6)に代入して同様な計算を繰り返すことで $\theta^n, \phi^n$ を $\theta^{\text{true}}, \phi^{\text{true}}$ に近づける。本論文ではこれを $n=3$ まで繰り返した。

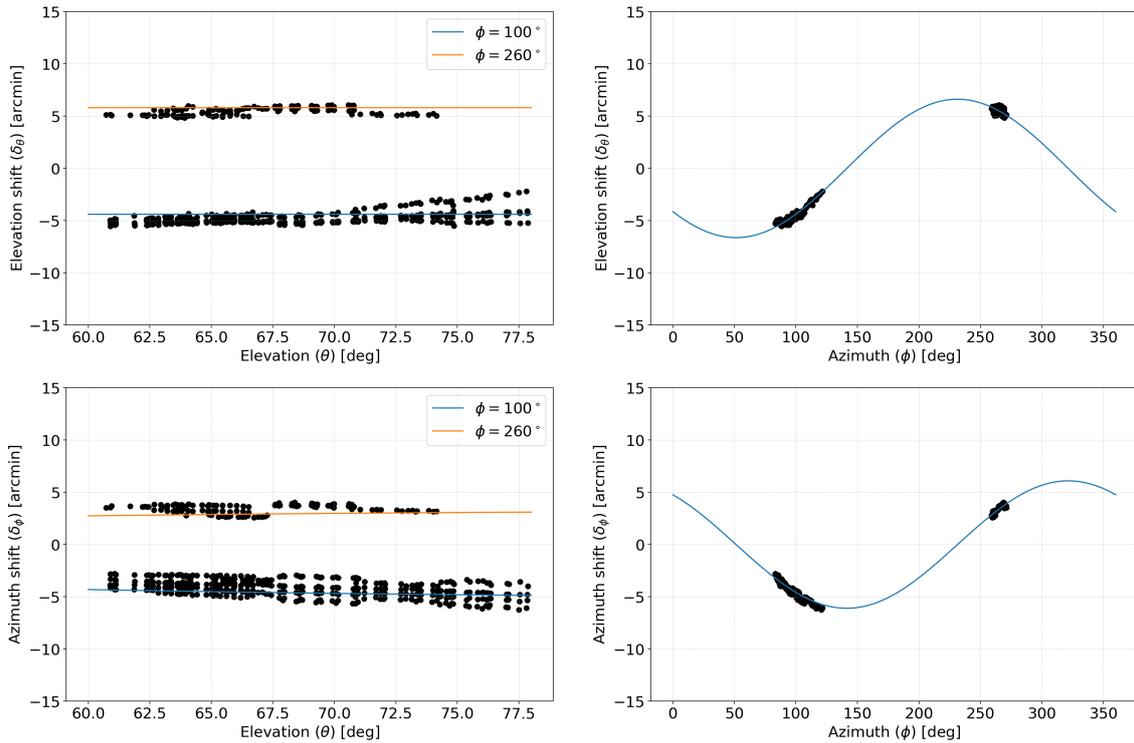


図 2.8: 実際の観測データにおけるポインティングシフト。

$$\begin{cases} \theta_i^{(0)} = \theta^{\text{data}} - \theta_e - \theta_i \\ \phi_i^{(0)} = \phi^{\text{data}} - \phi_e - \phi_i \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} \theta_i^{(n)} = \theta^{\text{data}} - \theta_e - \theta_i - \delta_\theta(\phi_i^{(n-1)}) \\ \phi_i^{(n)} = \phi^{\text{data}} - \phi_e - \phi_i - \delta_\phi(\theta_i^{(n-1)}, \phi_i^{(n-1)}) \\ n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2.6)$$

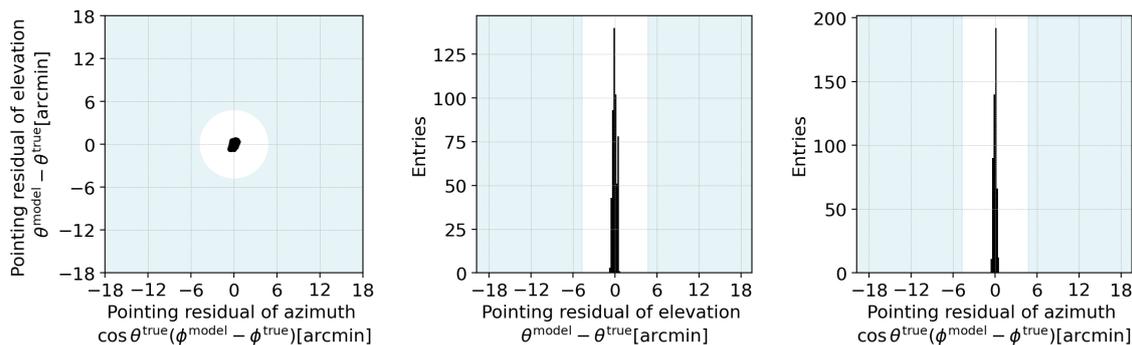


図 2.9: ポインティングフィットの結果と実際の月位置とのずれ。水色の影は GroundBIRD 望遠鏡の要求値 4.7' を示す。

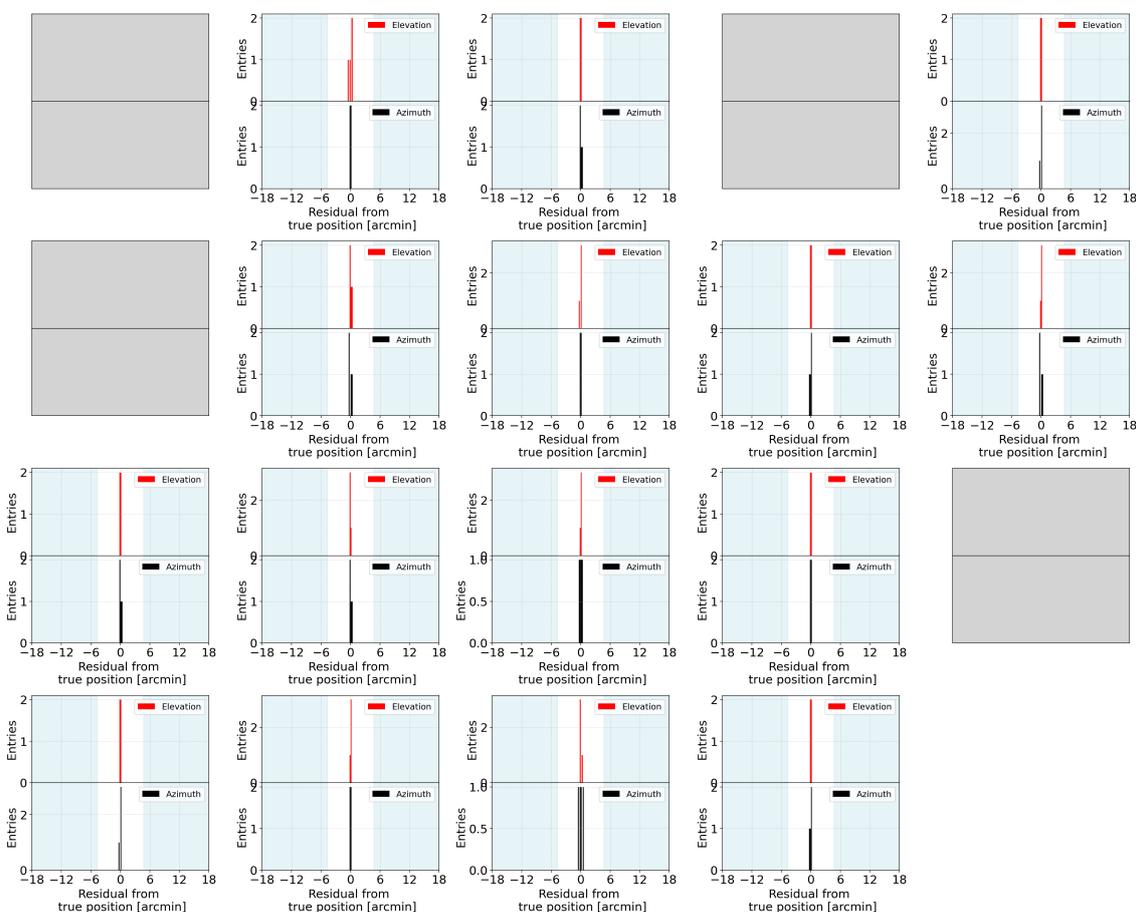


図 2.10: 1 アレイにおける各検出素子の、ポインティングフィットの結果と実際の月位置とのずれ。水色の影は GroundBIRD 望遠鏡の要求値 4.7' を示す。

### 2.2.1 データセレクション

解析に用いたデータの収集と選別について記す。astropy による月位置の計算とデータに記録されたタイムスタンプを参照することで月が映っているであろうデータを選別した。

その後図 2.4(b) と同様に月画像を再構成し、図 2.11 のように共振が近い kid とのクロストークで月の像が二重になっているものなど、明らかに質の悪いと思われるものを目で見て除去した。

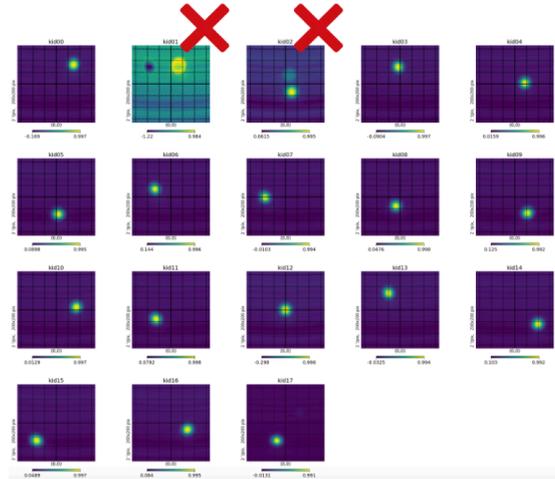


図 2.11: 除去した月のデータの例。

除去後に一度ポインティングパラメータを計算し、オフセットの最適値と各月画像における検出器オフセットが  $0.5\text{deg}$  以上離れているものを、外れ値として除去した。

最終的に検出器のポインティングを較正するために用いたデータは表 2.2 の通りである。

表 2.2: 解析に用いた月の観測日

Observation date (UTC)	Duration [min]	Ascent or descent	Azimuth [deg]	Elevation [deg]	Array
29/7/2024 05:27-06:27	59	ascent	94-105	57-70	03
29/7/2024 05:45-06:44	59	ascent	97-111	61-73	04
29/7/2024 05:45-06:45	59	ascent	97-111	61-73	06
29/7/2024 05:57-06:56	59	ascent	99-116	63-76	07
29/7/2024 06:18-07:18	59	ascent	103-130	68-79	05
29/7/2024 06:40-07:40	59	ascent	109-159	72-82	02
29/7/2024 09:19-10:19	59	descent	256-267	56-69	06
29/7/2024 09:21-10:21	59	descent	256-267	56-69	04
30/7/2024 06:14-07:14	59	ascent	86-93	56-69	03
30/7/2024 06:31-07:30	59	ascent	88-95	60-73	06
30/7/2024 06:32-07:32	59	ascent	88-96	60-73	04
30/7/2024 06:44-07:44	59	ascent	89-98	63-76	07
30/7/2024 06:59-07:59	59	ascent	91-102	66-79	05
30/7/2024 07:18-08:18	59	ascent	93-112	70-83	02
30/7/2024 09:46-10:34	47	descent	262-269	66-76	07
31/7/2024 07:13-08:13	59	ascent	82-86	57-70	03
31/7/2024 07:28-08:28	59	ascent	83-87	60-73	04
31/7/2024 07:29-08:29	59	ascent	83-87	60-73	06
31/7/2024 07:43-08:43	59	ascent	84-88	64-76	07
31/7/2024 07:58-08:58	59	ascent	85-90	67-80	05
31/7/2024 08:15-09:15	59	ascent	86-92	70-83	02
26/8/2024 04:13-05:13	59	ascent	88-96	57-70	03
26/8/2024 04:28-05:28	59	ascent	90-99	60-73	06
26/8/2024 04:42-05:42	59	ascent	91-102	63-76	07
26/8/2024 04:58-05:58	59	ascent	93-108	67-79	05
26/8/2024 05:13-06:13	59	ascent	96-118	70-82	02
26/8/2024 07:28-08:28	59	descent	253-267	66-79	05
26/8/2024 07:50-08:49	59	descent	260-270	62-74	07
26/8/2024 08:05-09:04	58	descent	264-272	58-71	06
26/8/2024 08:13-09:13	59	descent	265-272	56-69	03

## 2.3 まとめ

月を用いたポインティング較正の手法 [9] を、現在の full-array に適用し、ポインティング較正に必要なパラメータを計算した上で、さらに GroundBIRD 望遠鏡の観測の要求値 4.7' に収まる精度で較正できることを実証した。

## 第3章 ノイズ波形の時間変化を用いた上空の風向きの推定

大気放射は地上からの CMB 観測において感度を低下させる主な要因の一つである。その揺らぎの影響を抑制することが、CMB の研究をする上で重要となる。より精度の高い偏光の測定のためには大気ノイズの振る舞いを解析、理解することが課題となっており、大気モデル化に関する研究も行われている [13]。

GroundBIRD 望遠鏡で観測される信号は、観測対象である CMB のほか、銀河放射、大気放射、検出器ノイズ、迷光などが挙げられる。

これらの成分のうち、GroundBIRD 望遠鏡では大気放射の信号が最も大きく、特に図 1.5 に見られる通り 220GHz アレイでは大気水蒸気の影響が大きい。この 220GHz アレイで観測された信号を大気放射の信号と見なした上で、その時間変動を解析することで大気放射の振る舞いを理解でき、将来的に大気放射の影響を評価し削減することに役立つと期待できる。大気は上空の風に乗って流れているので、大気放射のムラもその時間変化を追えば風向きと同じ方向に流れていると予想される。本章では、この仮説を検証する。

### 3.1 ポインティングキャリブレーションの適用と大気の厚みを考慮した補正

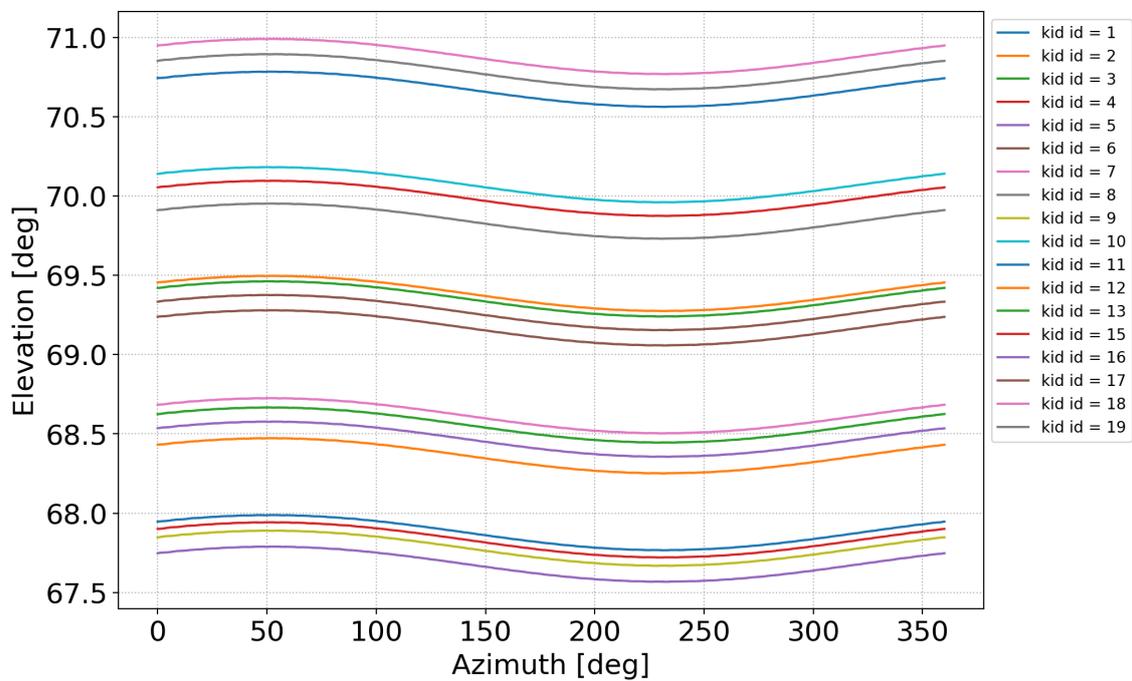


図 3.1: ポインティングキャリブレーションによって較正された視線方向

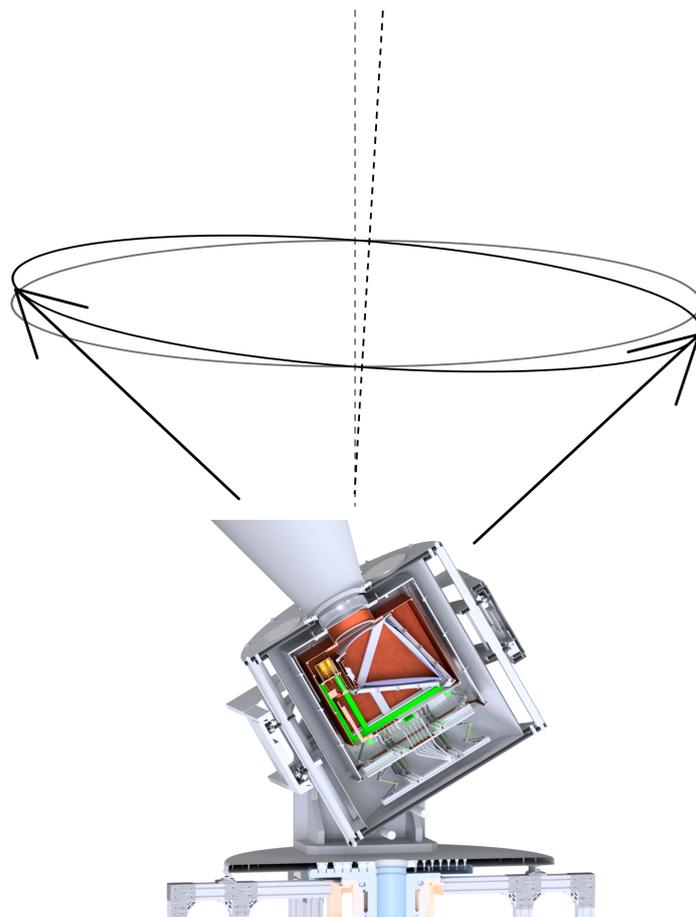


図 3.2: GroundBIRD 望遠鏡の回転軸のずれと視線方向

図 3.1 は、220GHz アレイの 1 回分の観測データにポインティングキャリブレーションを適用したものである。色分けされた線はそれぞれ 220GHz アレイの 18 個の検出素子に対応する。検出器の視線の Elevation は常に一定でなく、図 3.2 に示すような望遠鏡の回転軸の鉛直からのずれに起因して一回転のうちに振動している。この Elevation の変動によって望遠鏡の視線方向の大気の厚みも変動する。大気放射の強度は大気の厚みに比例すると考えられるので、この影響を校正したい。大気の厚みは式 (3.1) で表せられる [14]。よって望遠鏡が一回転する間の大気の厚みの変動は図 3.3 のようになり、大気放射の信号は 1 周あたりおよそ 0.1% 変動することになる。

$$m(\theta) \sim \frac{1}{\cos \theta + 0.50572(96.07995 - \theta[\text{deg}])^{-1.6364}} \quad (3.1)$$

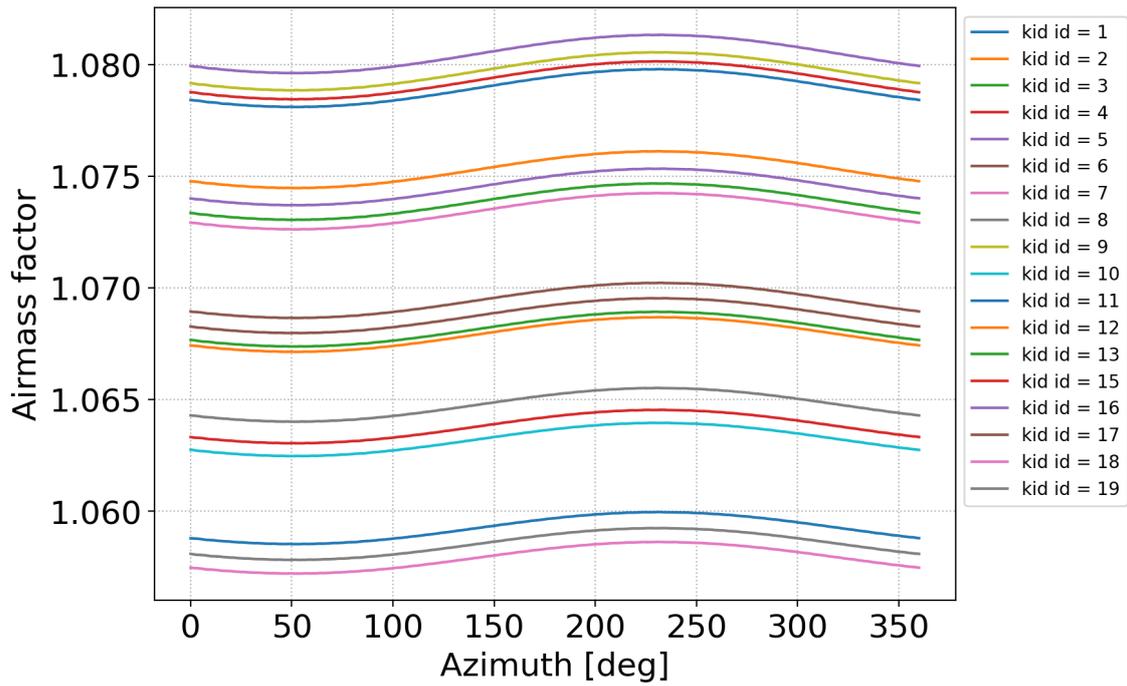


図 3.3: 大気厚みの変動

大気厚みの影響を較正するために、データを望遠鏡の1回転 (Azimuth  $0 \rightarrow 360^\circ$ ) ごとに分離し、線形補完でグリッド間隔  $0.06^\circ$  の格子点上に配置した。その MKID の応答の平均を各回転のベースラインとして差し引いた後、式 (3.1) から得た大気の厚みで割ることで補正とした。図 3.4 に、2024 年 8 月 17 日に観測されたデータから抜き出した、望遠鏡 1 回転分のデータ (青線) とその大気厚み補正 (橙線) を示す。

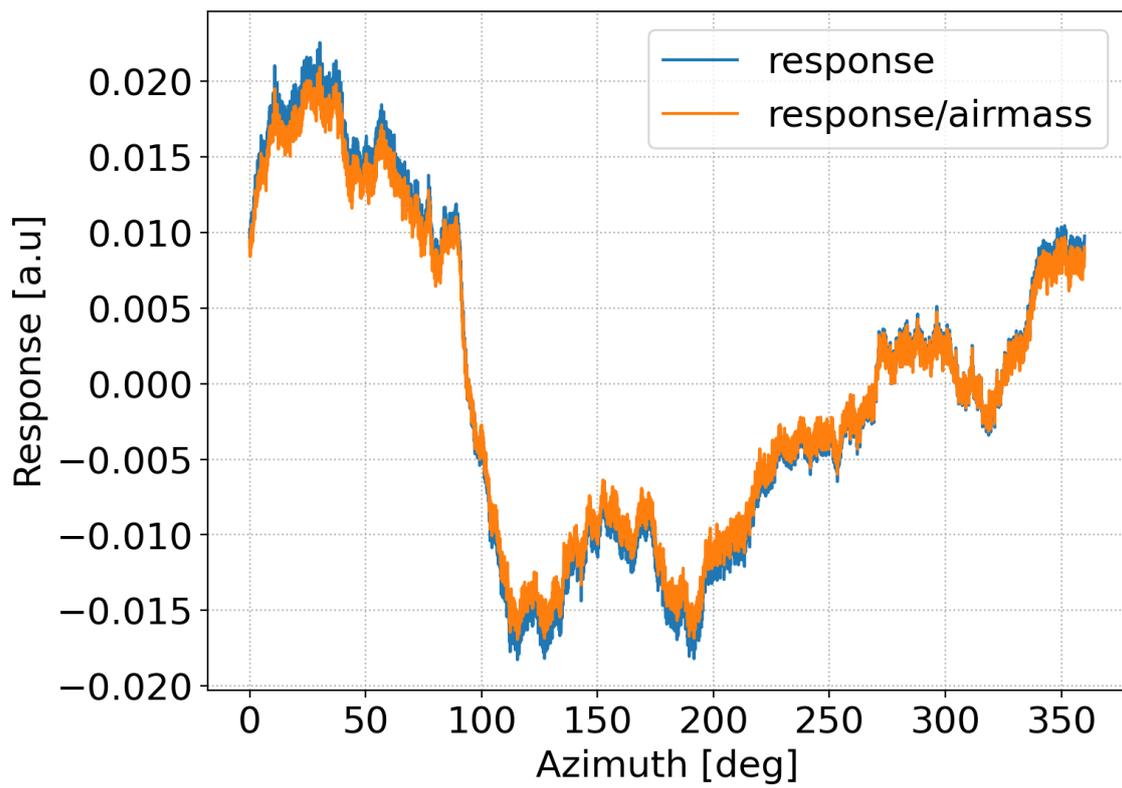


図 3.4: Airmass 較正前後のデータ

### 3.2 大気ノイズの時間変化から風向きの推定

大気ノイズの振る舞いを理解するため、GroundBIRDの観測データの時間変化から大気ノイズの流れを解析し、実際の風向きと比較する。

GroundBIRD望遠鏡は、毎分9回転の一定速度で回転し続けながら観測を行っている。この観測データを回転ごとに切り分け、連続する回転ごとの放射強度の方向分布の変化を比較する。連続する回転の間の大気放射の応答の差は大気動きによる変化によって生じるため、これを解析し理解することは将来的な大気モデル作成の手助けとなる。

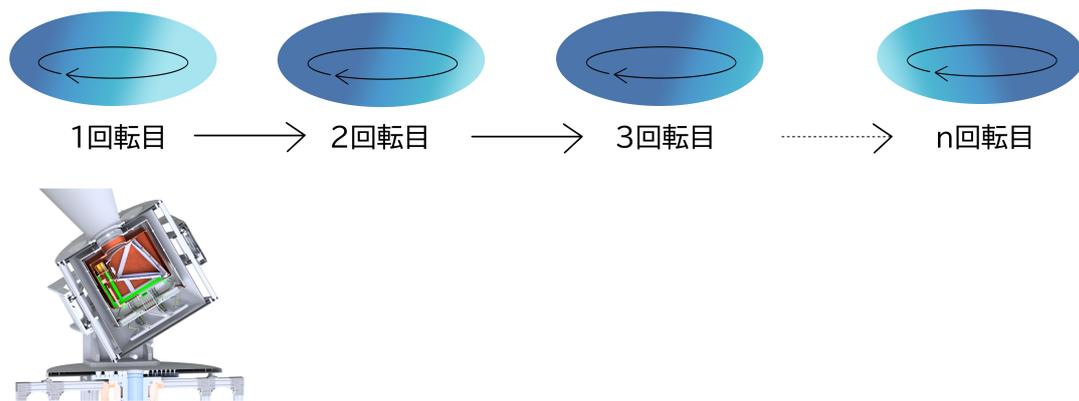


図 3.5: 大気ノイズの時間変化

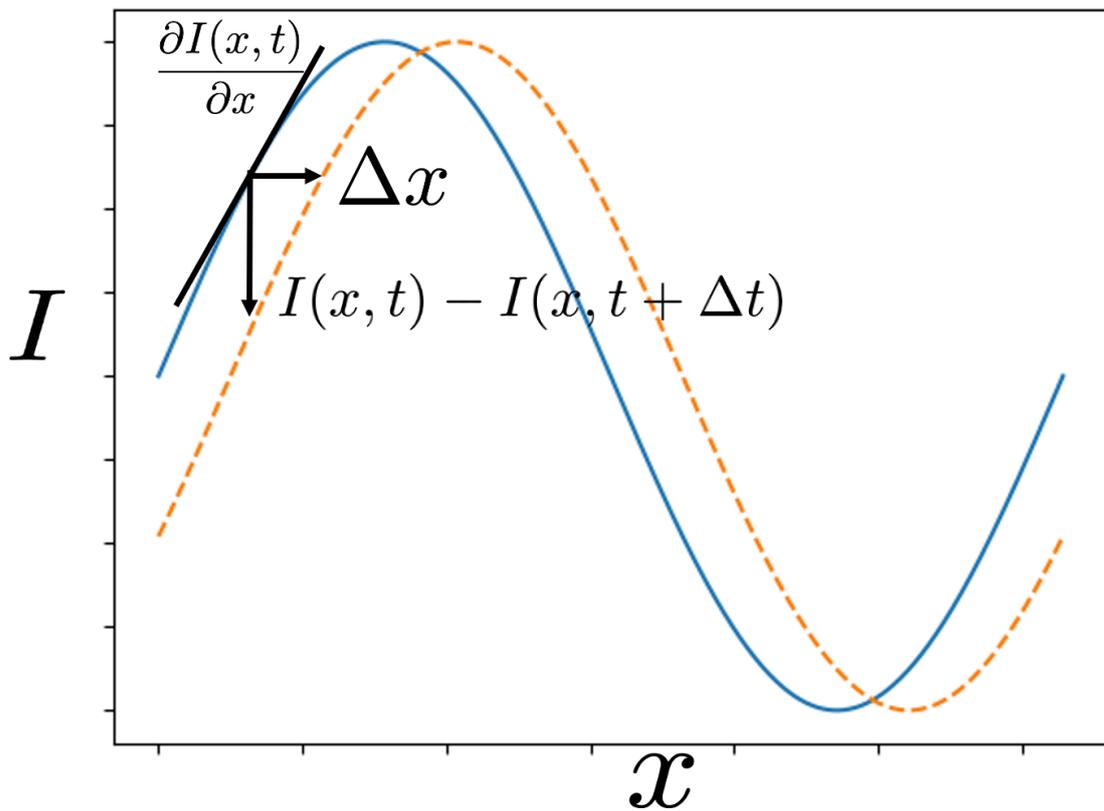


図 3.6: 大気ノイズ波形の移動距離と方向推定の方法

まず、観測データから風向きを推定するための基本原理を記す。図 3.6 において、青色の実線で描かれた波形が紙面右向きに移動してオレンジ色の波線に変化したとする。この時、波形の移動距離は式 (3.2) で近似できる。これを用いて、データの波形がどちら向きに流れたかを推定する。

$$\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} \Delta x \approx I(x, t) - I(x, t + \Delta t) \tag{3.2}$$

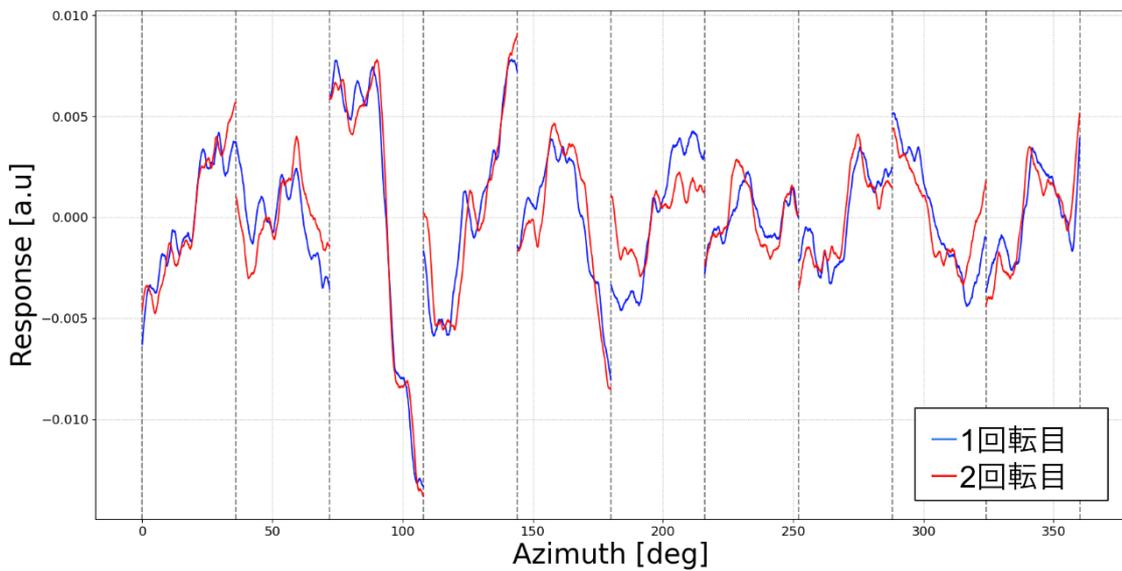


図 3.7: 1 回転分のデータと次の 1 回転

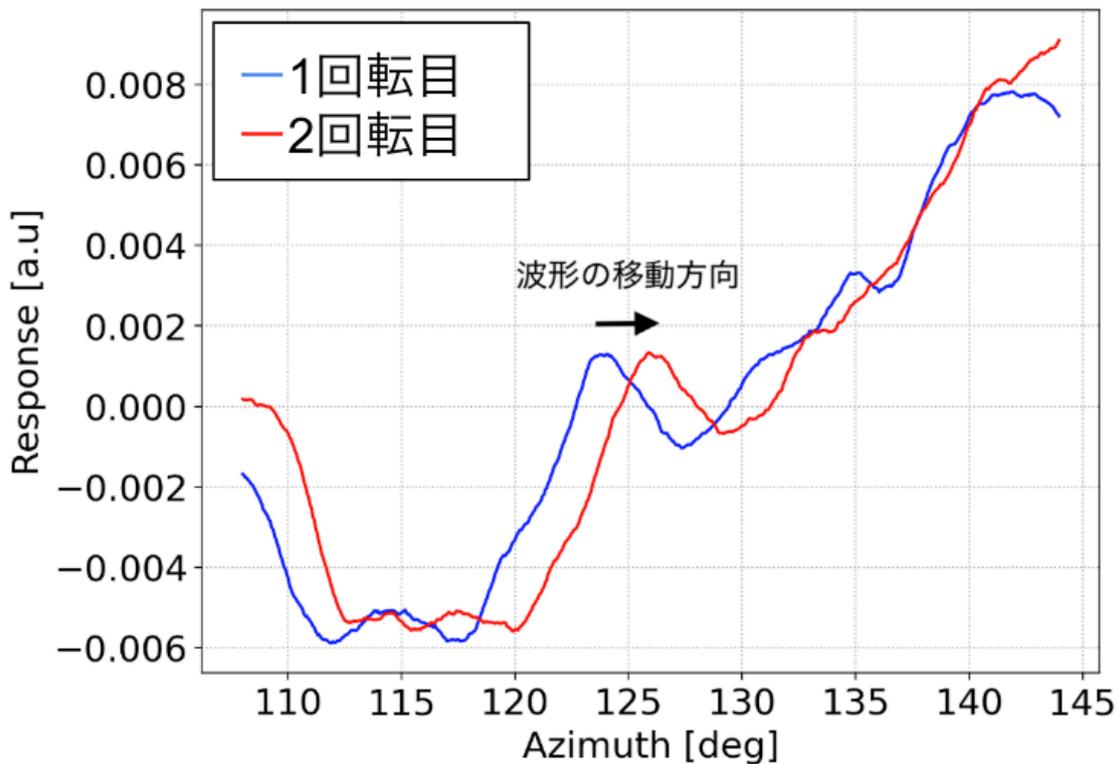


図 3.8: 1 回転分のデータと次の 1 回転 (1 セグメントを拡大)

データは前節で示した Airmass 校正の後、データは Savitzky - Golay フィルタを用いて平滑化し [15]、窓幅=51、2 次式近似 (`window_length=51`, `polyorder=2`) とした。実装には SciPy [16] の `signal` ライブラリを用いた。その後一回転ごとにさらに Azimuth $36^\circ$  ずつで分割した 10 個のセグメントに分けられる。図 3.7 に一回転目のデータ (青線) と次の回転で

のデータ（赤線）の波形の例を示す。各回転、各セグメントごとにその平均値をベースラインとみなし差し引いた。また、図 3.8 は図 3.7 の左から 4 番目、Azimuth = 108° ~ 144° 間のセグメントの拡大である。これは紙面右方向、つまり Azimuth が増加する方向に波形が流されていると解釈できる。連続した 2 回転のスキンの前後で、大気ノイズが空間的な構造を保ったまま Azimuth 方向に移動している様子が確認できることは、大気が気流に従って移動している描像が見えていることを示唆している。以降はこの波形の移動速度を風速と見做して解析を行う。

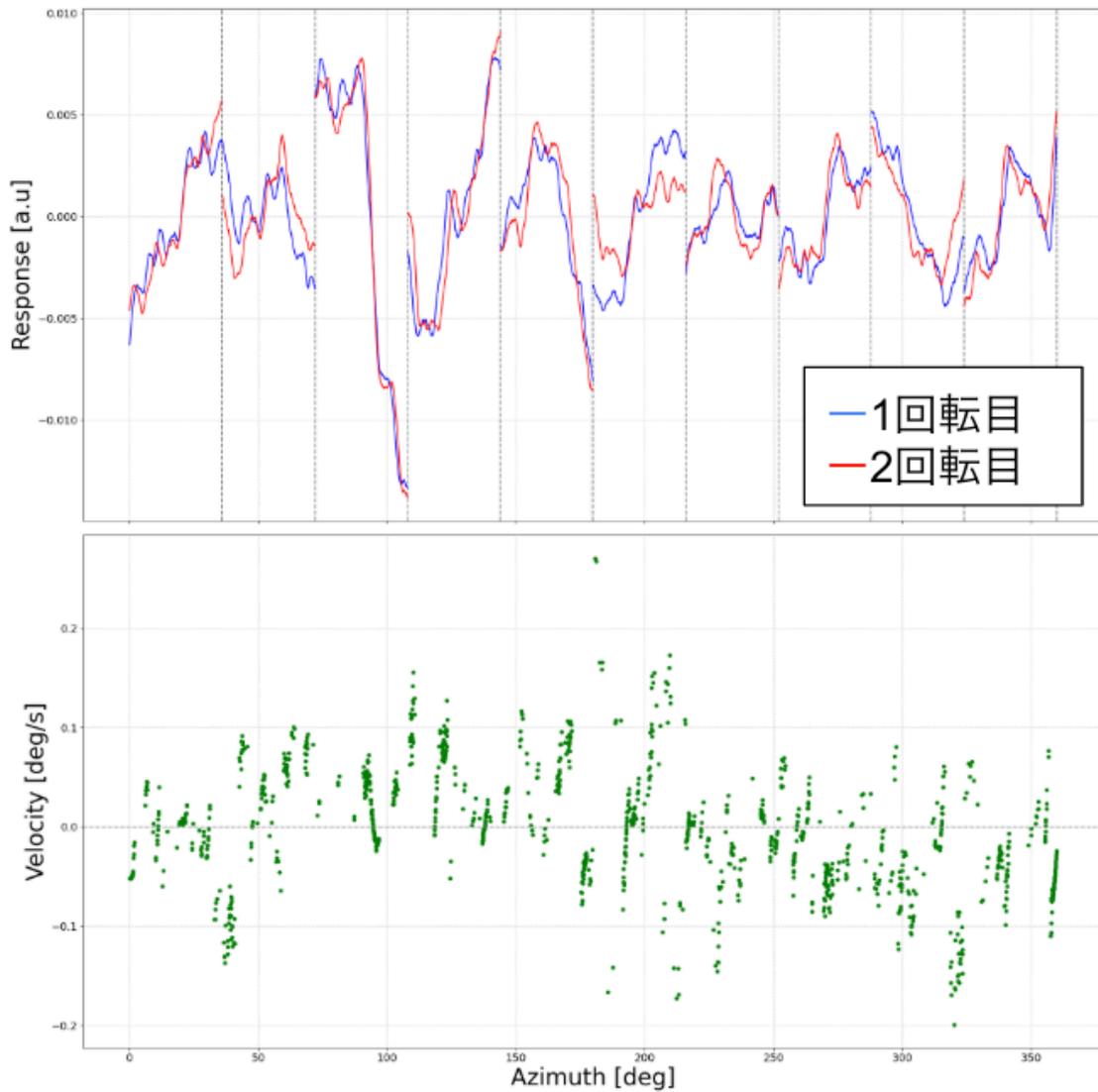


図 3.9: 推定された風速。風速は Azimuth が増大する方向（時計回り）を正とした。

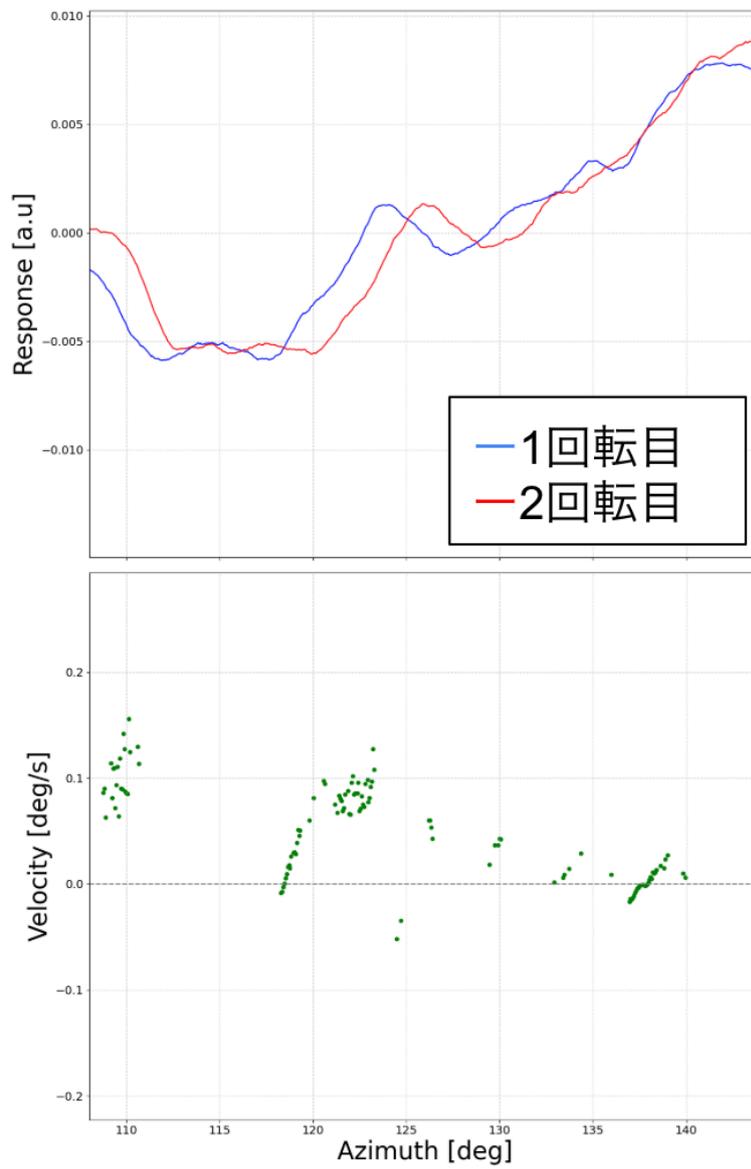


図 3.10: 推定された風速 (1セグメントを拡大)

(3.2) を用いて連続する2回転の間のデータの差分から図 3.7 を作成した。0~360deg で定義された1回転分のデータを  $I_n$ , 次の1回転分のデータを  $I_{n+1}$  とすると、この間の風速を (3.3) のように定義した。 $x_i$  はグリッド化したデータの Azimuth である (グリッド間隔  $x_{i+1} - x_i = 0.06[\text{deg}]$ )。また、 $\omega$  は GroundBIRD 望遠鏡の角速度である。本論文で用いたデータは9 RPM で観測されたものであるため、 $\omega = 54[\text{deg/s}]$  である。

$$\begin{cases} \Delta x[\text{deg}] = \frac{I_n(x_i) - I_{n+1}(x_i)}{I_n(x_{i+1}) - I_n(x_i)} \times 0.06 \\ v[\text{deg/s}] = \frac{\omega}{360} \times \Delta x \cos \text{EL} \end{cases} \quad (3.3)$$

各 Azimuth 方向で推測された風速を図 3.9 に示す。青と赤の実線は図 3.7 と同じものであり、それに対応する速度を緑の点で表した。速度が0より大きいものは Azimuth が増大する方向に、0より小さいものは Azimuth が減少する方向に移動していると推定される。同様に1セグメントを拡大したものを図 3.10 に示した。

以上を 220GHz アレイに搭載された全素子で行った (ただし Pointing calibration 時に質が悪い月の像が多かった素子2つは除いた)。全ての速度の推定値を重ねて表示したものが図 3.11 となる。

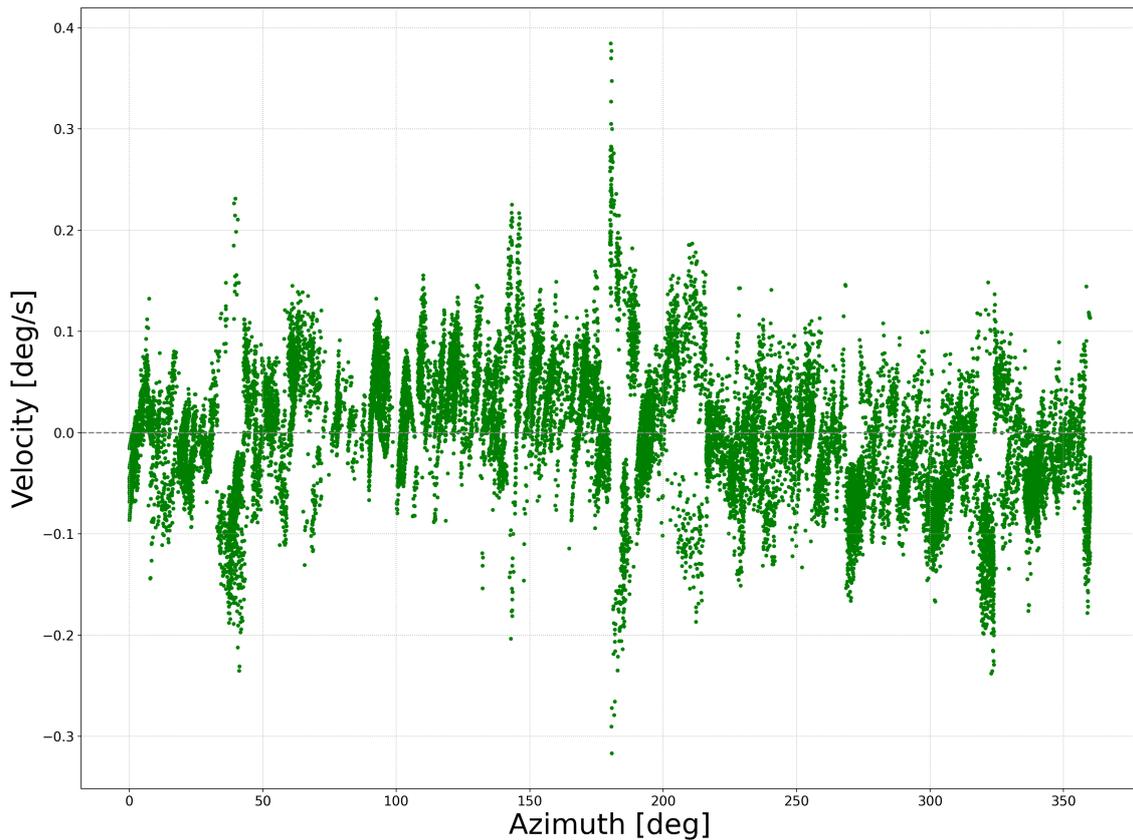


図 3.11: 推定された風速 (全 kid)

### 3.3 風向きへの推定

図 3.11 からこの時の風向きを推定したい。図 3.12 のように、簡単のため一様一方向からの風を仮定する。その風向きを  $\phi_{wind}$  とすると、風速の Azimuth 成分は式 (3.4) で表される。図 3.11 を式 (3.4) でフィットすることで風向きを求めた (図 3.13)。以上が 1 回転分の風向きへの推定方法である。これを同様に繰り返し、1 時間程度の観測データの風向きを推定したものが図 3.14 である。青い点が推定された風向きである。また比較として GroundBIRD 望遠鏡のすぐ近くにある STELLA 観測所 [17] の風向きデータを取得した。STELLA 観測所はポツダム天体物理学研究所 (AIP) とカナリア天文学研究所 (IAC) が共同で運用している観測所で、環境モニタリングとして風向計が設置されている。この風向計のログは web で取得可能である。オレンジの線が同時刻に STELLA で観測された風向きを表す。

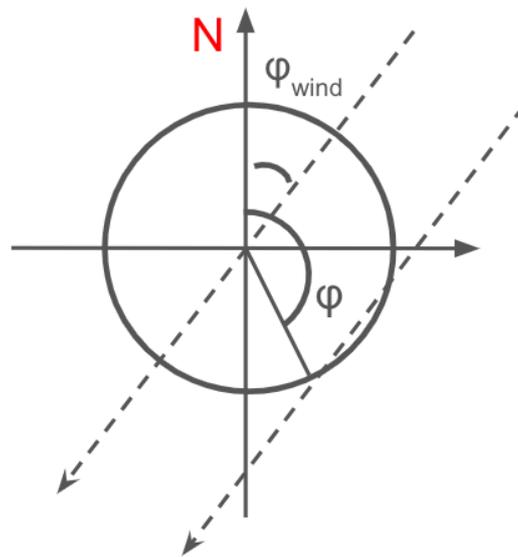


図 3.12: 一様一方向と仮定した場合の風速の Azimuth 方向成分

$$v = v_0 \sin(\phi - \phi_{wind}) \quad (3.4)$$

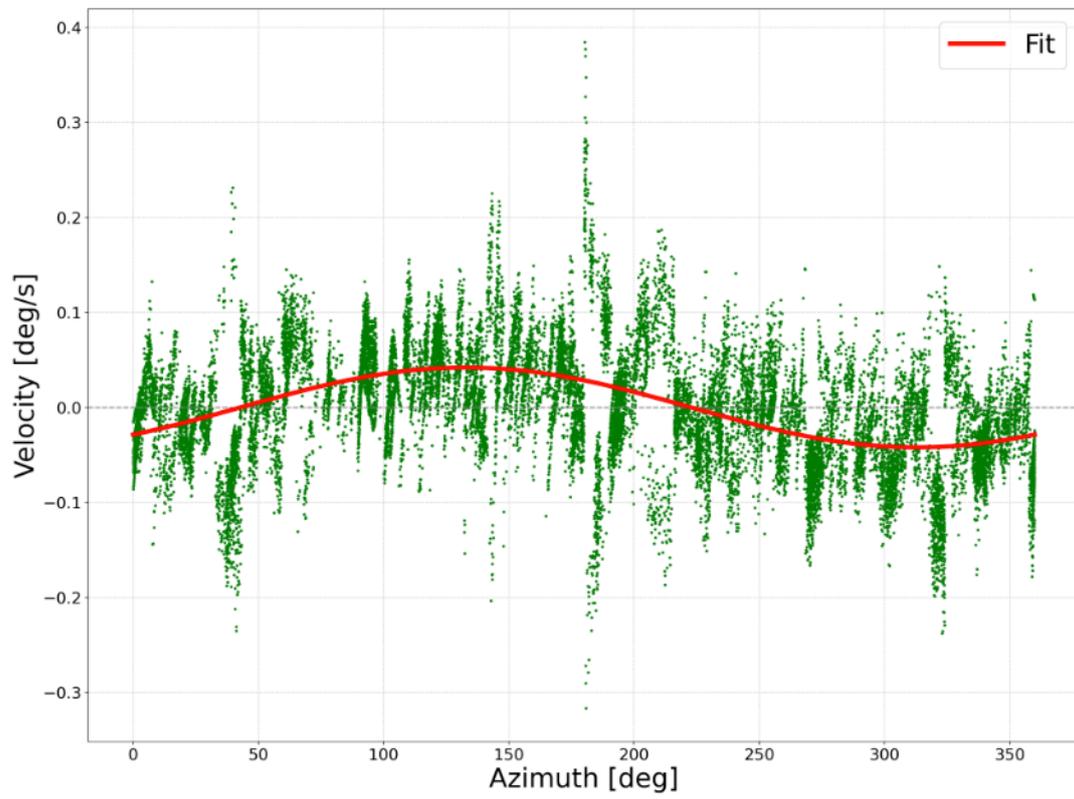


図 3.13: sin カーブフィットによる風向きの変動。振幅が風速、位相が風向きに対応する。

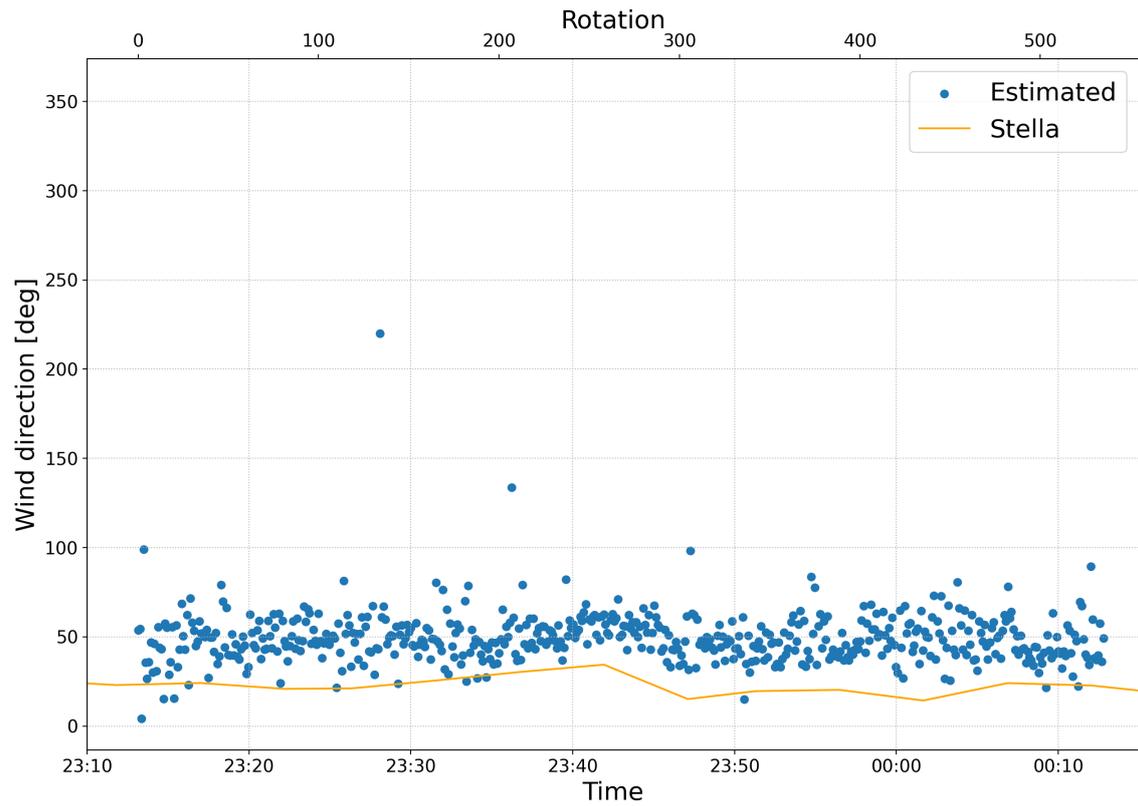


図 3.14: 2024 年 8/16 17 に観測された約 1 時間分のデータにおける風向きの変動値と STELLA で観測された風向き。下側の x 軸は UTC 時刻を示し、上側の x 軸は望遠鏡が何回転したかを示す。

### 3.4 STELLA の風向計との比較

本論文では風向き の推定を 2024 年 の 7 月 から 8 月 まで のデータ に対して 行った (図 3.15)。上部 の図 の赤点 がデータ から推定 された風向き である。青い線 が STELLA で観測 された風向き である。また、下部 の図 はその間 に計測 された PWV の推移 を表す。

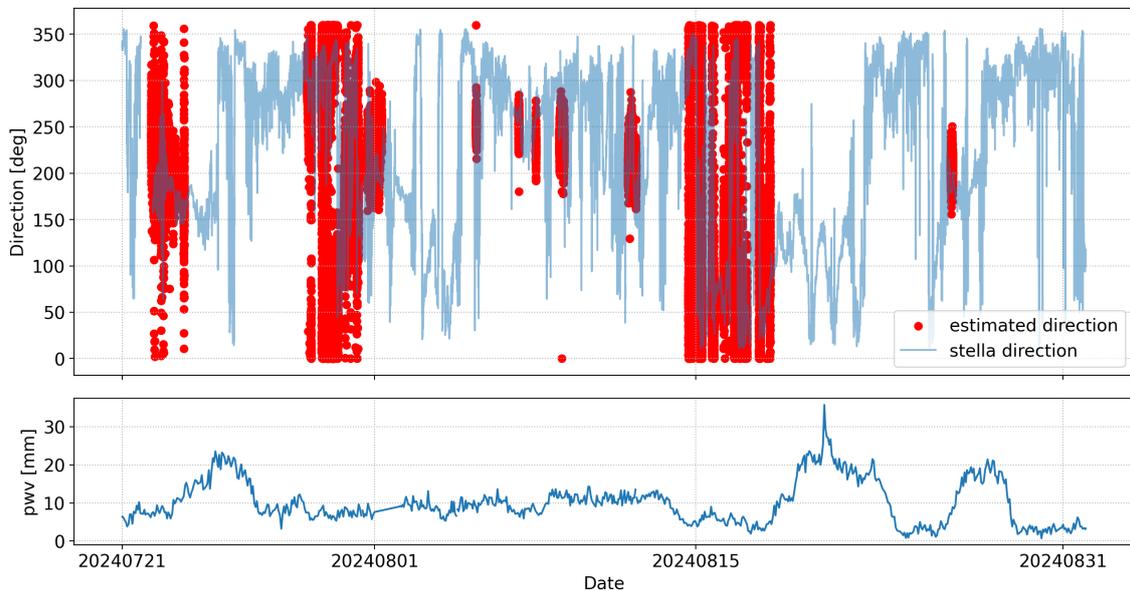


図 3.15: 上部は解析に使用した期間の風向きプロット。青線が STELLA で記録された風向き、赤点がデータから推定した風向きを表す。下部は期間中の PWV の推移。

図 3.16 にデータから推定した風向きと STELLA で観測された風向き の差 の分布 を示す。図に見られる通り、分布のピークは  $0^\circ$  ではなく、 $15\sim 20^\circ$  程度横軸の正方向にずれている。この関係をより明示的に見るため、図 3.17 に STELLA で観測された風向きと推定された風向き の 2 次元ヒストグラムを示した。PWV が 7mm 以上のデータは雲が形成されている可能性が比較的高く、推定に影響を及ぼす可能性を考慮して、念の為解析から除外した。カウント数によって色分けをしてあるが、100 カウント以上は同じ色になるよう調整してある。推定された風向きと STELLA で観測された風向きが等しい場合を赤い実線で示した。図 3.17 より、推定された風向きは STELLA で観測された風向きよりも Azimuth が増大する方向にずれる傾向にあることが分かる。この傾向については、地上の風向きと上空の風向き の差 が影響 している と考えられる。SSTELLA の風向計 が測定 している のは地上 の風 であり、一方で GroundBIR 望遠鏡は仰角およそ  $70^\circ$  で上空を見上げている。図 3.18 に示すように、上空の風と比べて地上の風は地面との摩擦によりコリオリ力の影響が減少し、風向きは Azimuth が減少する方向に転向する傾向があると考えられる。データから推定した風向きと STELLA で観測した風向きとの差はこの影響により転向する向きと一致しており、GroundBIRD 望遠鏡はまさに上空の大気の流れを捉えている。

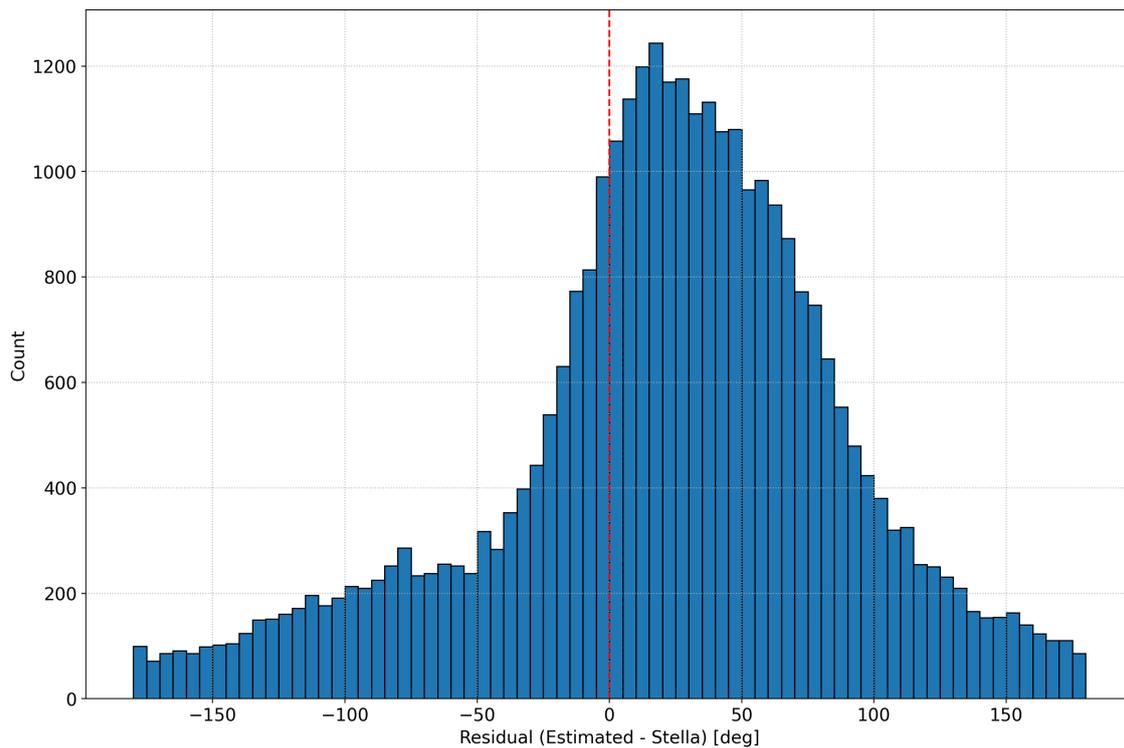


図 3.16: データから推定した風向きと STELLA で観測された風向きの差の分布

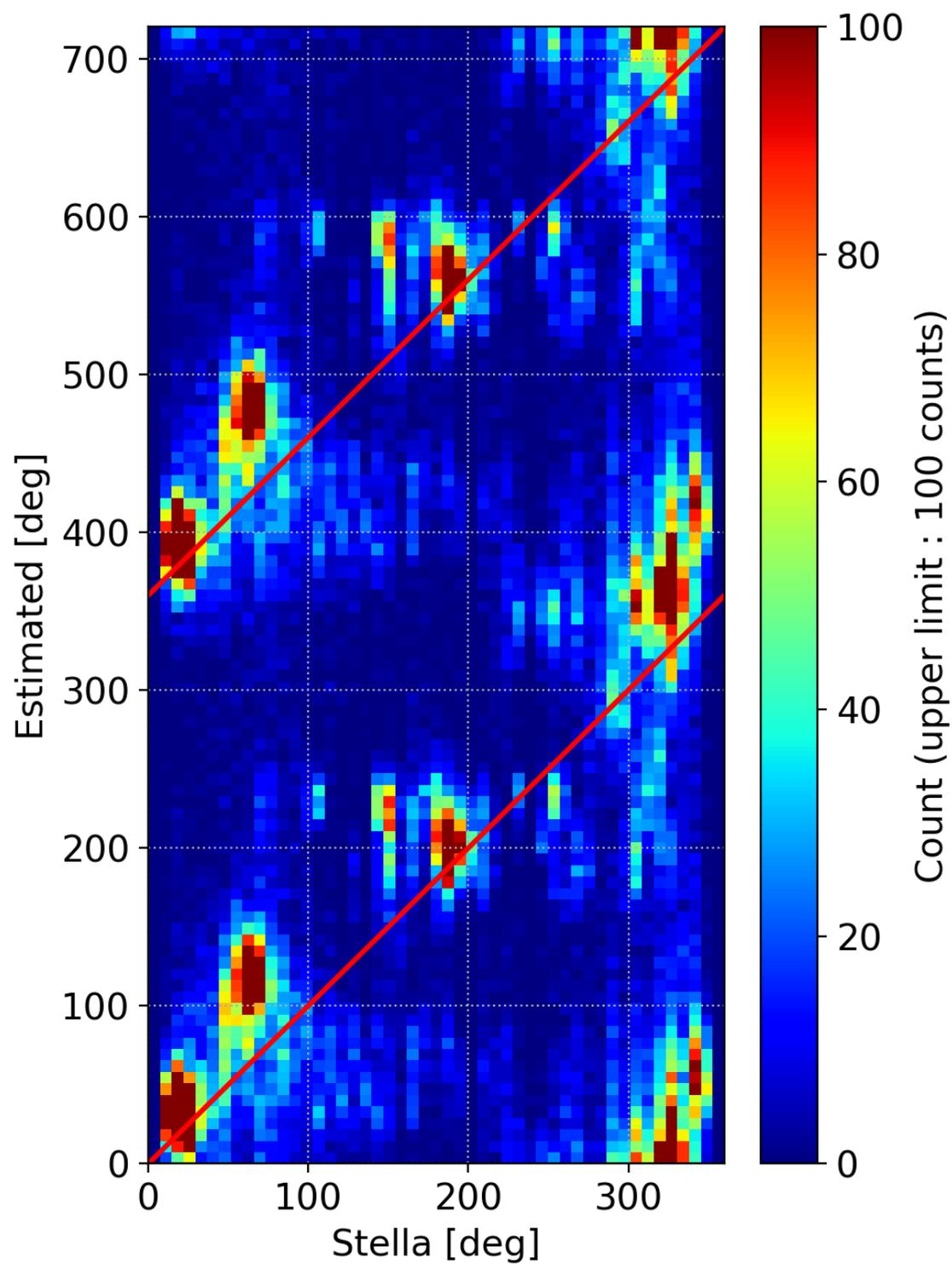


図 3.17: 推定された風向きと STELLA で観測された風向きの 2次元ヒストグラム。STELLA の風向計データと推定された風向きが一致する場合は図中に示した赤色の直線上に分布する。

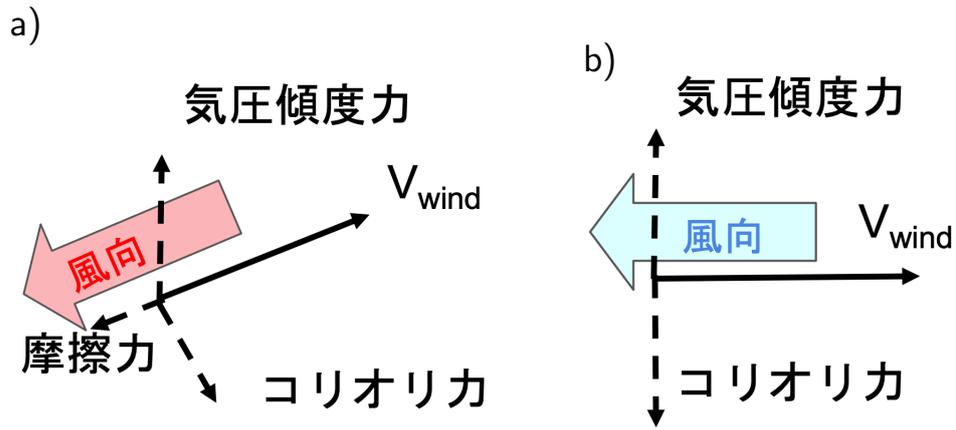


図 3.18: 地上での風向き (a) と上空の風向き (b)。

### 3.5 ラジオゾンデによる上空の気象観測データとの比較

GoundBIRD 望遠鏡で推定した風向きの結果を上空の風向データと照らし合わせる。NOAA NCEIが提供する Integrated Global Radiosonde Archive(IGRA v2) のラジオゾンデ観測データ (Tenerife – Guímar, WMO 60018) と比較する [18][19]。

以下、図 3.19~3.28 に、日ごとの風向データの比較を示す。赤点がデータから推定した風向き、水色の折れ線が STELLA で観測された風向き、そして色分けされた水平線が、その日の0時に放球されたラジオゾンデで記録された高度ごとの風向きである。図には高度 2000m~6000m までを表示した。また、風向データと高度データが同時刻に取得されていない場合には、前後の高度データを基にその間に記録されたデータ点数で線形に補完することで対応させてある。



図 3.19: 2024 年 7/22 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ (色付き直線)、STELLA で観測された風向データ (水色線)、データから推測された風向き (赤点)



図 3.20: 2024 年 7/23 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ（色付き直線）、STELLA で観測された風向データ（水色線）、データから推測された風向き（赤点）

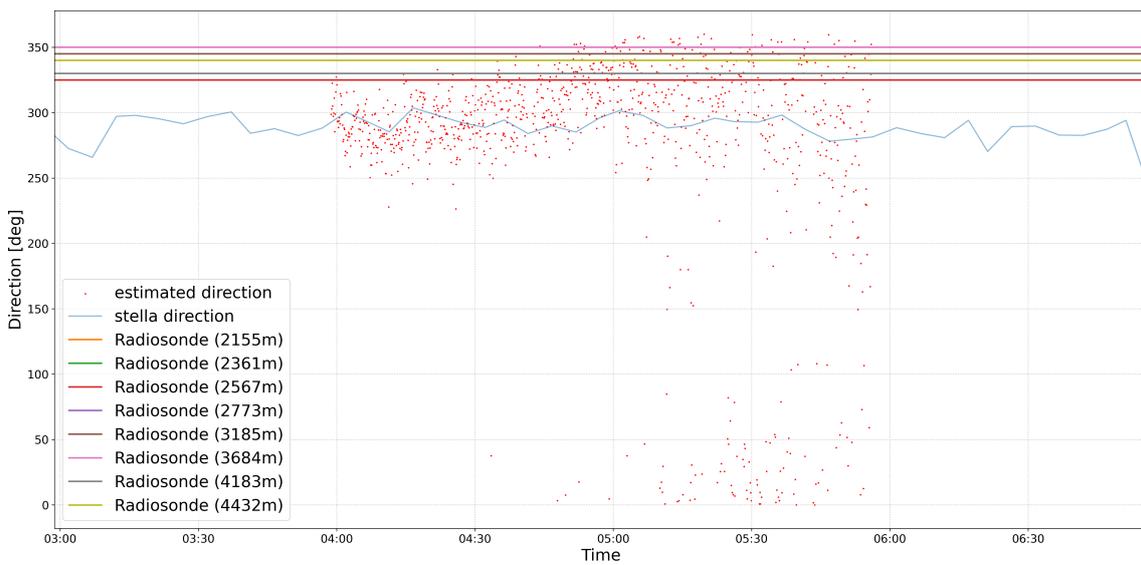


図 3.21: 2024 年 7/29 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ（色付き直線）、STELLA で観測された風向データ（水色線）、データから推測された風向き（赤点）

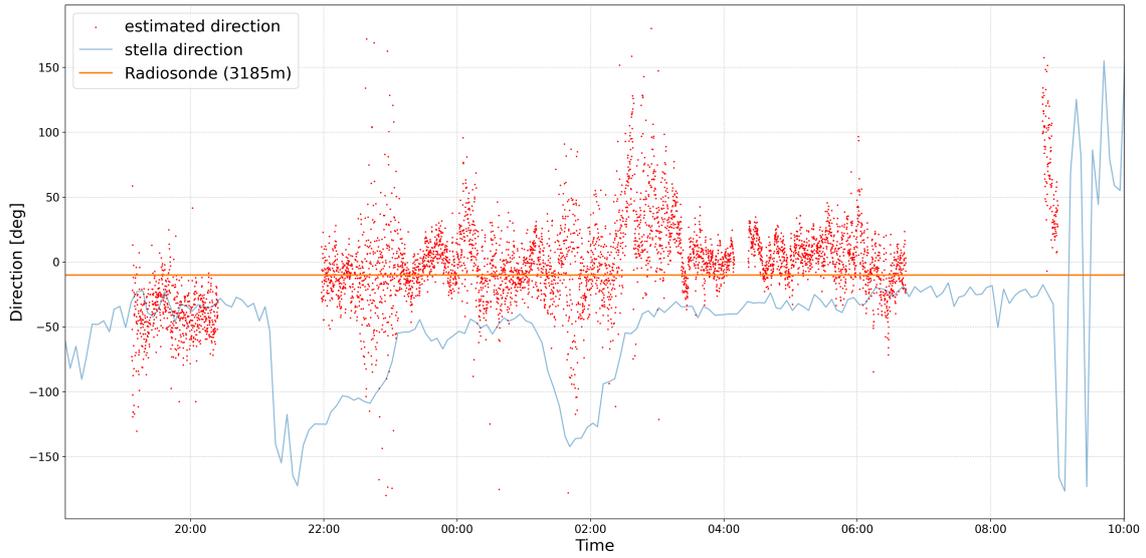


図 3.22: 2024 年 7/30 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ（色付き直線）、STELLA で観測された風向データ（水色線）、データから推測された風向き（赤点）

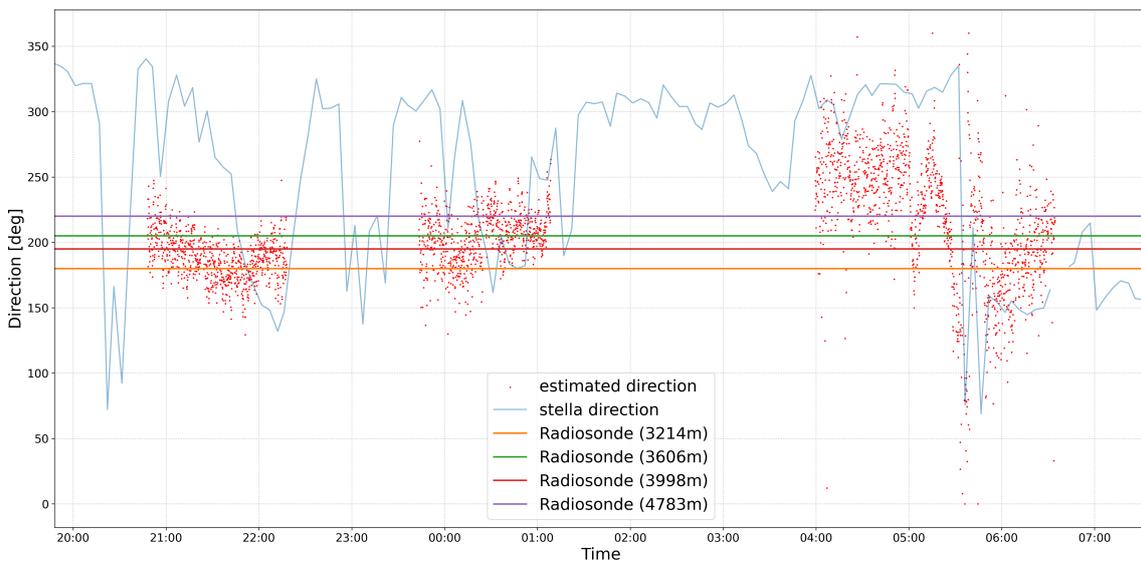


図 3.23: 2024 年 7/31 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ（色付き直線）、STELLA で観測された風向データ（水色線）、データから推測された風向き（赤点）

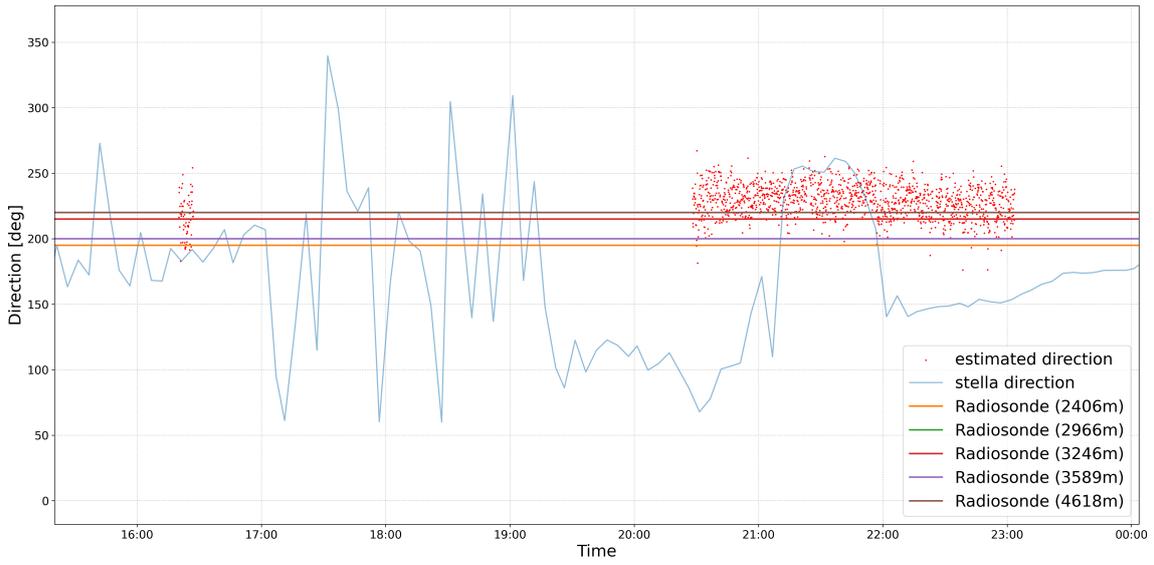


図 3.24: 2024 年 8/1 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ（色付き直線）、STELLA で観測された風向データ（水色線）、データから推測された風向き（赤点）

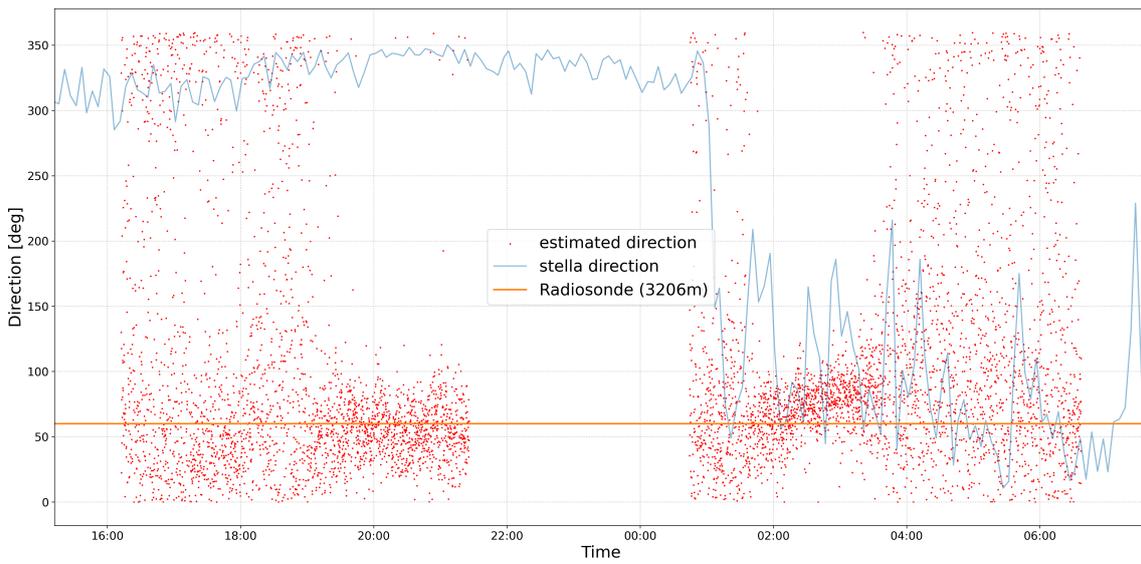


図 3.25: 2024 年 8/15 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ（色付き直線）、STELLA で観測された風向データ（水色線）、データから推測された風向き（赤点）

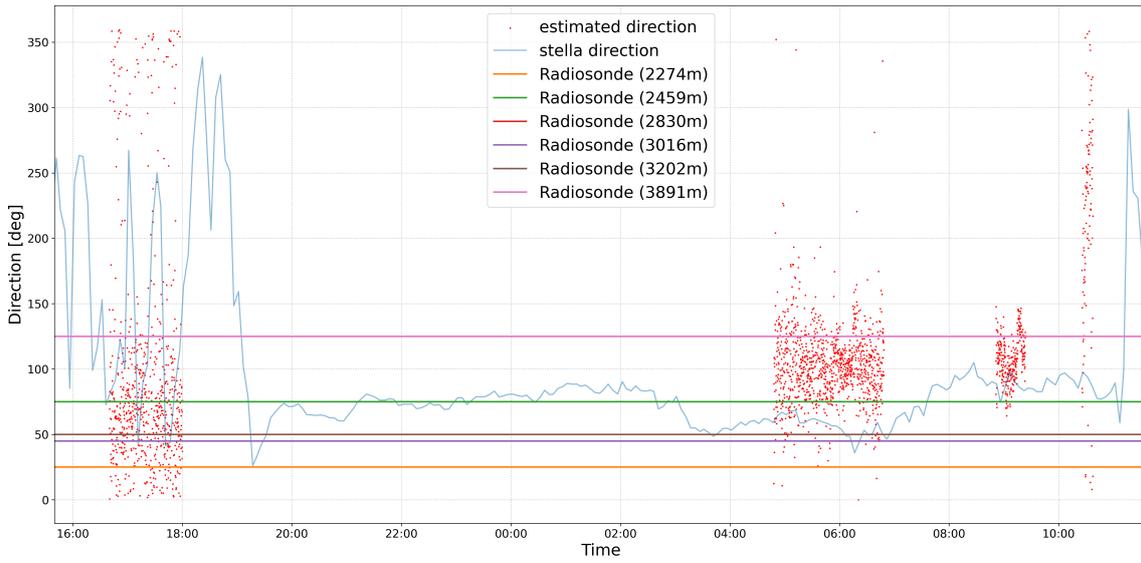


図 3.26: 2024 年 8/16 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ（色付き直線）、STELLA で観測された風向データ（水色線）、データから推測された風向き（赤点）

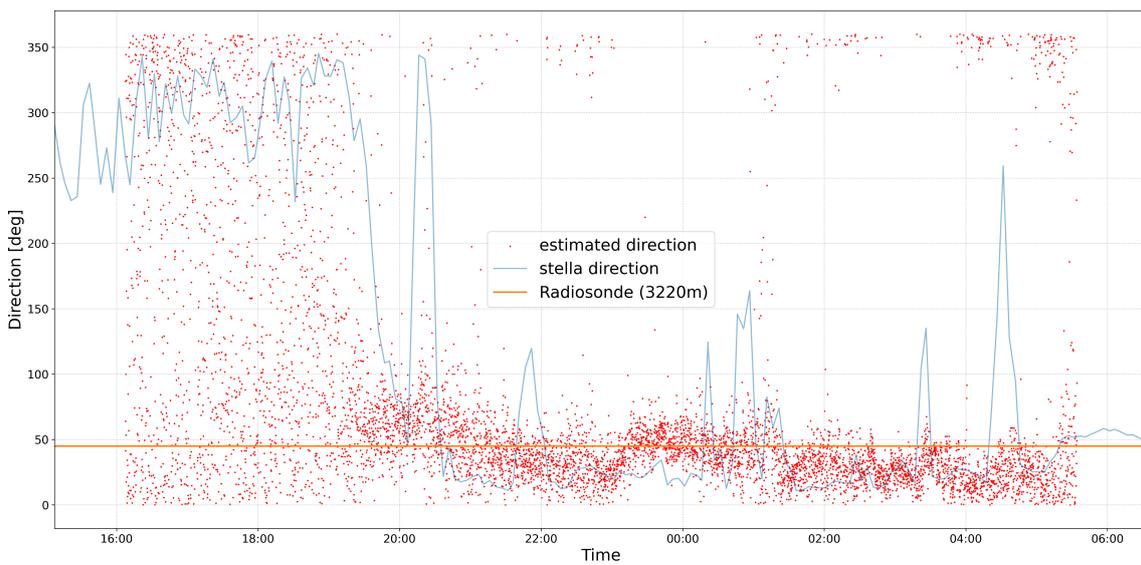


図 3.27: 2024 年 8/17 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ（色付き直線）、STELLA で観測された風向データ（水色線）、データから推測された風向き（赤点）

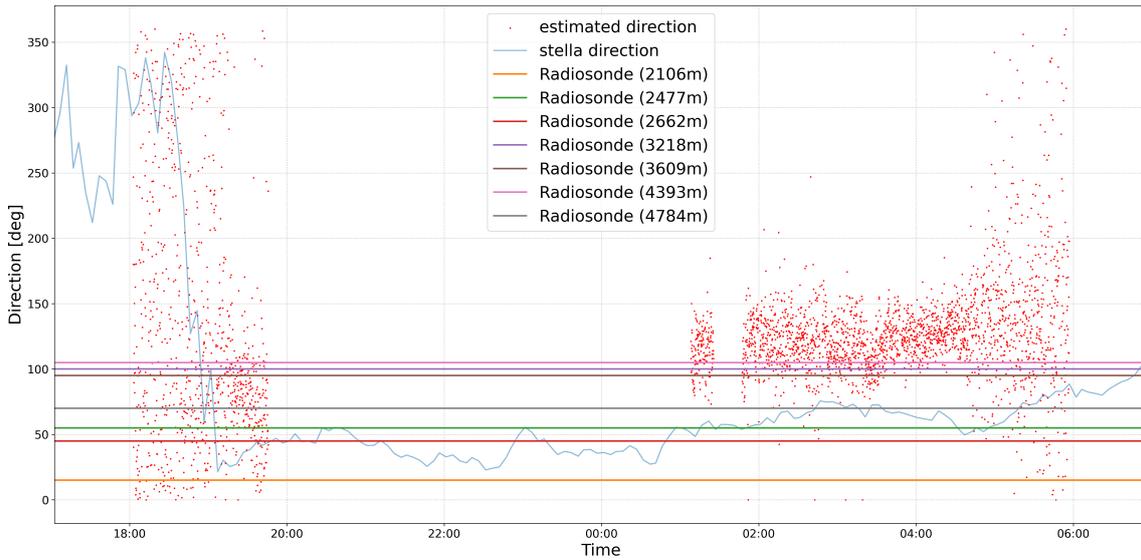


図 3.28: 2024 年 8/18 のラジオゾンデによる上空の風向きデータ（色付き直線）、STELLA で観測された風向データ（水色線）、データから推測された風向き（赤点）



図 3.29: 2024/07/22 における Radiosonde の風向きデータ（上図）と推測した風向きからの差の絶対値の平均（下図）。

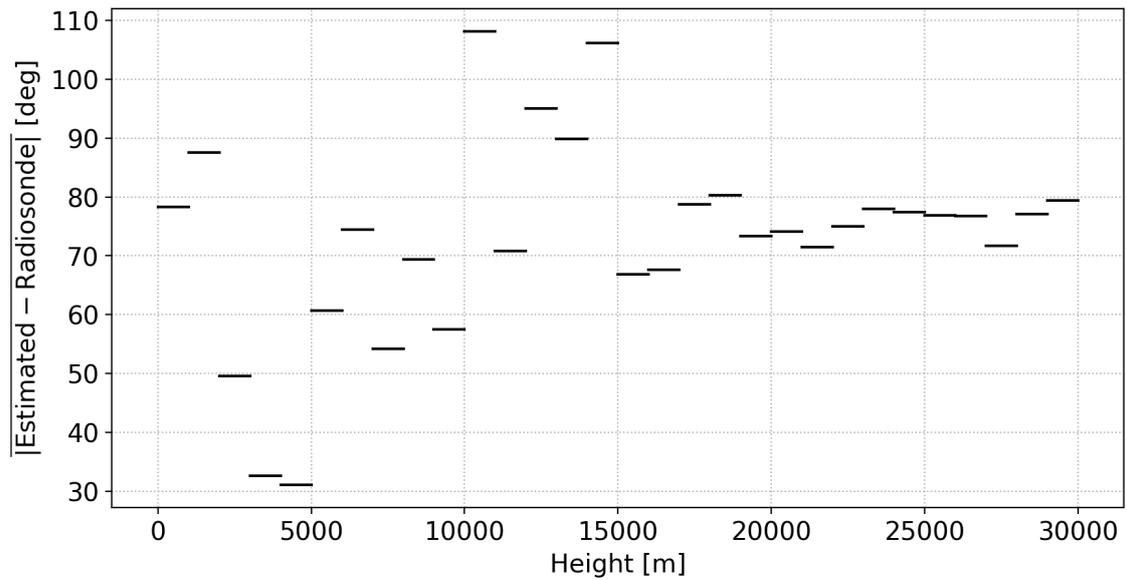


図 3.30: 全ての観測日における Radiosonde の風向きと推測した風向きの差の絶対値の平均。

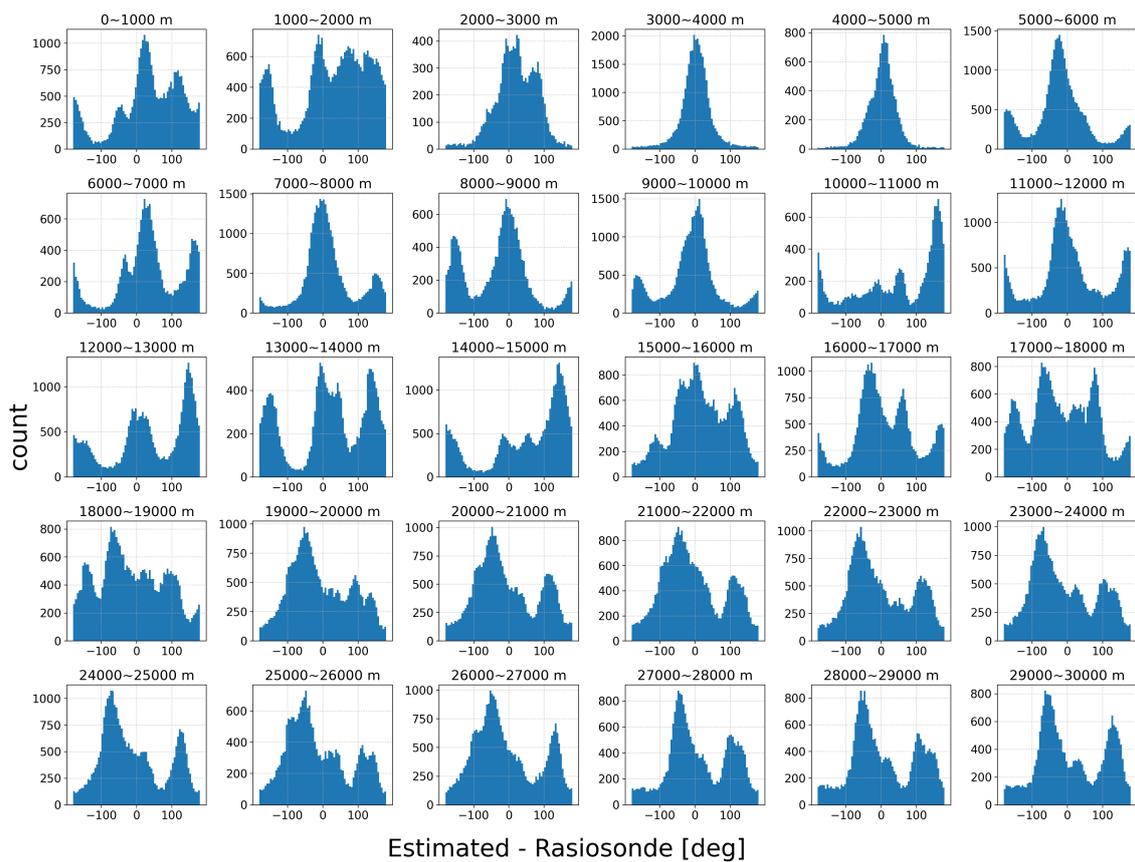


図 3.31: Radiosonde の風向きと推測した風向きの差のヒストグラム。

データから推定された風向きが、どの高度の風向きと最も近しいかを評価する。まずラジオゾンデの風向きデータを高度 1000m ごとに区分し、その間の風向きの平均値を計算する。次に、この各区間内における平均と、データから推定した風向きとの角度差の絶対値の平均

を算出した。図 3.29 に、1 日分の例を示した。これを全ての観測日について行ったものが図 3.30、角度差をヒストグラムで表したものが図 3.31 である。

図 3.30、3.31 より、4000~5000m の風向きとよく近い結果となった。GroundBIRD が標高約 2400m に位置することから、GroundBIRD は自身から 1600~2600m 上空における大気ノイズの影響を最も強く受けていると考えられる。

### 3.6 風速との比較

本章では風速の比較を行う。図 3.13 で見たサインカーブ fit の位相が風向を、振幅が風速を表す。

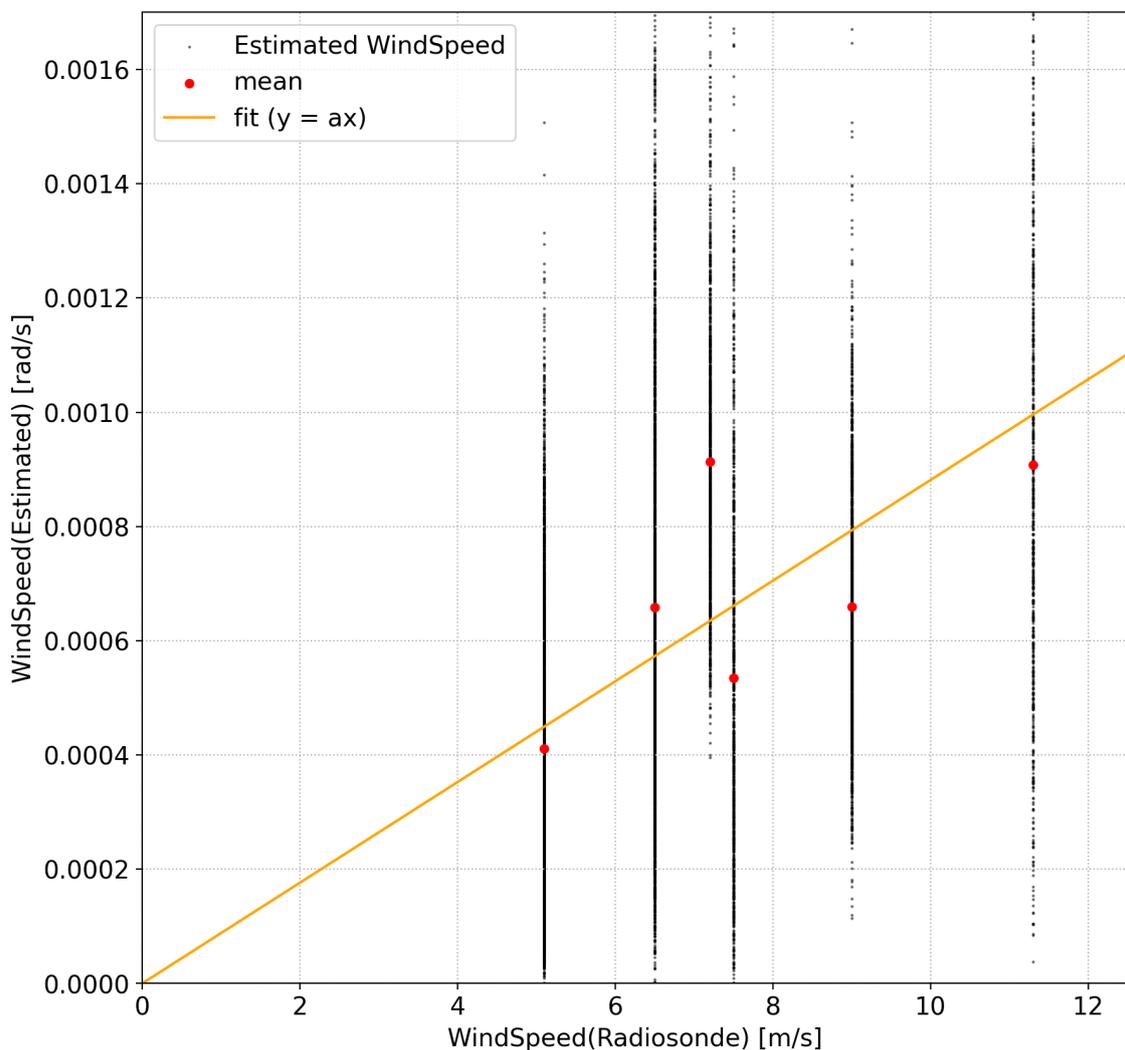


図 3.32: 推定された風速と、高度 4000~5000m におけるラジオゾンデで観測された風速

GroundBIRD 望遠鏡が高度 4000m~5000m の大気放射の影響を強く受けていると考え、各観測日における高度 4000m~5000m のラジオゾンデの風速データの平均値と、風速の推定値を比較した (図 3.32)。これを  $y = ax$  で線形フィットを行ったところ、 $a = 8.81 \times 10^{-5} [\text{rad}/\text{m}]$

となった。GroundBIRD 望遠鏡の Elevation は約  $70^\circ$  であり、望遠鏡が自身から高度  $h$ [m] の大気放射を観測しているとする、 $h$ [m]  $\sim \frac{\sin 70^\circ}{a}$  となるはずであり、これが 1600~2600m になることが期待されるが、これを計算すると  $h \sim 10660$ [m] となり大きく異なる。

本手法は、波形形状と信号強度が回転前後で変化しないことを前提としている。しかしながら今回はベースライン変動を除去するために回転ごとに独立に平均を差し引いている。この手法では波形の水平移動と垂直方向の平行移動が区別できないため、実際よりも波形の移動距離が小さく推定されるバイアスが生じていると考えられる。

この影響は初めから懸念材料の一つであった。分割する領域内に波形の構造が含まれていれば影響は小さくなるを考え、波形の形を考慮して分割範囲を Azimuth  $36^\circ$  で設定した。しかしながらその影響を完全には除去できていない可能性がある。その結果、風速が実際よりも小さく推定された可能性が考えられる。

## 第4章 まとめと今後の展望

原始重力波の探索や宇宙の光学的厚み  $\tau$  の精密測定を目指し、視野角  $1^\circ$  以上の大角度スケールにおける CMB 偏光の精密観測が世界的に待ち望まれている。CMB 観測望遠鏡 GroundBIRD はまさにこのスケールにおける偏光観測に特化した望遠鏡であり、リモート制御システムを用いた長期観測によって、現在データの蓄積段階にある。そして、CMB 偏光の観測精度の向上には望遠鏡の視線が宇宙のどこを向いているかを精密に較正（ポインティング）すること、最大の外来ノイズ源である大気放射を推定することが必要不可欠である。

本論文では月を用いた光学性能の検証を、現在のセットアップ (full-array) について適用し、検証と角度較正のためのパラメータを得た。

本論文では 2024 年 7~8 月のデータに角度較正を適用した上で、望遠鏡の回転ごとのデータの差分を解析し、流動する大気ノイズの描像を得た。これは空の広い範囲をスキャンしつつ、大気の攪乱により元の構造が失われる前に再び同じ方向に視線を向けることができる GroundBIRD 望遠鏡の高速スキャンを活かしたものと言える。まず大気ノイズと Stella 研究所の風向計データを照らし合わせた。その結果、GroundBIRD 望遠鏡のデータから推定された風向きが、Stella 研究所で計測された風向きよりも Azimuth が増大する方向へのずれが生じる傾向が確認された。これは地面との摩擦を考慮した際の上空と地上の風の差の方向と整合する。

さらに、ラジオゾンデによる上空の気象観測データと照らし合わせることで、GroundBIRD のデータから推定された風向きと各高度における風向きを比較した。データから推定した風向きと最も合致する風向を調べることで、GroundBIRD 望遠鏡は自身から 1600~2600m の高さの大気の流れの影響をノイズとして最も強く受けていることが推測された。

以上の結果から、本研究では GroundBIRD 望遠鏡における視線方向の較正を full-array へと拡張し、大角度スケール CMB 偏光観測に要求される精度での較正が可能であることを示した。さらに、高速回転によるスキャン観測という GroundBIRD 望遠鏡の観測手法の強みを活かし、大気放射の時間変化を捉える新たな解析手法を開発した。本研究で大気ノイズの時間変動と気流の関係を明らかにしたことで、将来的に流動する大気を考慮したモデルに基づく大気ノイズの抑制手法の構築に寄与することが期待される。

## 第5章 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々から多大なるご支援とご指導を賜りました。この場をお借りして心より感謝いたします。

田島治教授には、常に温かくご指導いただき、貴重なご助言を賜りました。田島さんは研究室においても折に触れて「何か困っていることはないか」とお声をかけてくださり、いつも気にかけていただきました。手厚くサポートいただきましたことに、心より御礼申し上げます。

鈴木惇也助教には、日々の研究に関する相談を丁寧にご対応いただきました。研究に行き詰まった際にはいつも快くお時間を割いてくださり、的確なアドバイスをしていただきました。また、不慣れな出張の際にも温かくお気遣いいただきましたこと、厚く感謝申し上げます。

高エネルギー物理学研究室 CMB グループの皆様にも深く御礼申し上げます。末野慶徳さんには、python の解析環境の構築から MKID および GroundBIRD 望遠鏡のデータ解析に至るまで丁寧にご指導いただき、多くのことを学ばせていただきました。片岡敬涼君にも解析に関する数多くの有益なご助言をいただき、本研究を進めるうえで大きな支えとなりました。

また、研究生活をともにした皆様にも感謝申し上げます。同期の藤中峻君、河本地弘君、有元隼太君、浅野有香さんには、研究生活の同じ時期をともに過ごし、支えていただきました。それぞれの道へ進まれた後も、皆様とともに過ごした時間は私にとって励みとなっております。本年度修士論文を提出される溝添泰隆君、奥本成美さん、林洸樹君、鴛原泰輝君、佐々木駿斗君にも日頃より温かく接していただき、励ましをいただきましたこと、心より御礼申し上げます。

最後に、これまでの私の人生を支えてくださった両親と祖父母に心より感謝いたします。

## 参考文献

- [1] A. A. Penzias, R. Wilson, R. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. . 142 pp. 419-421 (1965,7)
- [2] Blas, D., Lesgourgues, J. & Tram, T. The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS). Part II: Approximation schemes. *Journal Of Cosmology And Astroparticle Physics*. **2011**, 034-034 (2011,7), <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2011/07/034>
- [3] Planck Collaboration, Planck 2018 results - I. Overview and the cosmological legacy of Planck. *A&A*. **641** pp. A1 (2020), <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833880>
- [4] [https://www.astr.tohoku.ac.jp/~hattori/hattori\\_radipro.pdf](https://www.astr.tohoku.ac.jp/~hattori/hattori_radipro.pdf)
- [5] K. Lee et al 2021 ApJ 915 88 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac024b>
- [6] M. Kamionkowski, A. Kosowsky, A. Stebbins, A Probe of primordial gravity waves and vorticity, *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 2058 – 206 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2058>
- [7] Ade, P., Ahmed, Z., Amiri, M., Barkats, D., Thakur, R., Bischoff, C., Beck, D., Bock, J., Boenish, H., Bullock, E., Buza, V., Cheshire, J., Connors, J., Cornelison, J., Crumrine, M., Cukierman, A., Denison, E., Dierickx, M., Duband, L., Eiben, M., Fatigoni, S., Filippini, J., Fliescher, S., Goeckner-Wald, N., Goldfinger, D., Grayson, J., Grimes, P., Hall, G., Halal, G., Halpern, M., Hand, E., Harrison, S., Henderson, S., Hildebrandt, S., Hilton, G., Hubmayr, J., Hui, H., Irwin, K., Kang, J., Karkare, K., Karpel, E., Kefeli, S., Kernasovskiy, S., Kovac, J., Kuo, C., Lau, K., Leitch, E., Lennox, A., Megerian, K., Minutolo, L., Moncelsi, L., Nakato, Y., Namikawa, T., Nguyen, H., O'Brient, R., Ogburn, R., Palladino, S., Prouve, T., Pryke, C., Racine, B., Reintsema, C., Richter, S., Schillaci, A., Schwarz, R., Schmitt, B., Sheehy, C., Soliman, A., Germaine, T., Steinbach, B., Sudiwala, R., Teply, G., Thompson, K., Tolan, J., Tucker, C., Turner, A., Umiltà, C., Vergès, C., Vieregg, A., Wandui, A., Weber, A., Wiebe, D., Willmert, J., Wong, C., Wu, W., Yang, H., Yoon, K., Young, E., Yu, C., Zeng, L., Zhang, C. & Zhang, S. Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves using Planck, WMAP, and BICEP/Keck Observations through the 2018 Observing Season. *Phys. Rev. Lett.* **127**, 151301 (2021,10), <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.127.151301>

- [8] R. M. J. Janssen, J. J. A. Baselmans, A. Endo, L. Ferrari, S. J. C. Yates, A. M. Baryshev, T. M. Klapwijk; High optical efficiency and photon noise limited sensitivity of microwave kinetic inductance detectors using phase readout. *Appl. Phys. Lett.* 11 November 2013; 103 (20): 203503. <https://doi-org.kyoto-u.idm.oclc.org/10.1063/1.4829657>
- [9] Y.Sueno, Development of calibration and noise characterization methods for a CMB telescope, GroundBIRD, using its commissioning observation data. 京都大学理学研究科 博士論文 2024.
- [10] Yaser A. Hafez, Lorenzo Trojan, Fahad H. Albaqami, Abdulmajeed Z. Almutairi, Rodney D. Davies, Clive Dickinson, Lucio Piccirillo, A radio determination of the time of the New Moon, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 439, Issue 3, 11 April 2014, Pages 2271 – 2280
- [11] Astropy Collaboration, Price-Whelan, A., Lim, P., Earl, N., Starkman, N., Bradley, L., Shupe, D., Patil, A., Corrales, L., Brasseur, C., Nöthe, M., Donath, A., Tollerud, E., Morris, B., Ginsburg, A., Vaher, E., Weaver, B., Tocknell, J., Jamieson, W., Van Kerkwijk, M., Robitaille, T., Merry, B., Bachetti, M., Günther, H., Aldcroft, T., Alvarado-Montes, J., Archibald, A., Bódi, A., Bapat, S., Barentsen, G., Bazán, J., Biswas, M., Boquien, M., Burke, D., Cara, D., Cara, M., Conroy, K., Conseil, S., Craig, M., Cross, R., Cruz, K., D'Eugenio, F., Dencheva, N., Devillepoix, H., Dietrich, J., Eigenbrot, A., Erben, T., Ferreira, L., Foreman-Mackey, D., Fox, R., Freij, N., Garg, S., Geda, R., Glattly, L., Gondhalekar, Y., Gordon, K., Grant, D., Greenfield, P., Groener, A., Guest, S., Gurovich, S., Handberg, R., Hart, A., Hatfield-Dodds, Z., Homeier, D., Hosseinzadeh, G., Jenness, T., Jones, C., Joseph, P., Kalmbach, J., Karamahmetoglu, E., Kałuszyński, M., Kelley, M., Kern, N., Kerzendorf, W., Koch, E., Kulumani, S., Lee, A., Ly, C., Ma, Z., MacBride, C., Maljaars, J., Muna, D., Murphy, N., Norman, H., O'Steen, R., Oman, K., Pacifici, C., Pascual, S., Pascual-Granado, J., Patil, R., Perren, G., Pickering, T., Rastogi, T., Roulston, B., Ryan, D., Rykoff, E., Sabater, J., Sakurikar, P., Salgado, J., Sanghi, A., Saunders, N., Savchenko, V., Schwardt, L., Seifert-Eckert, M., Shih, A., Jain, A., Shukla, G., Sick, J., Simpson, C., Singanamalla, S., Singer, L., Singhal, J., Sinha, M., Sipócz, B., Spitler, L., Stansby, D., Streicher, O., Šumak, J., Swinbank, J., Taranu, D., Tewary, N., Tremblay, G., Val-Borro, M., Van Kooten, S., Vasović, Z., Verma, S., De Miranda Cardoso, J., Williams, P., Wilson, T., Winkel, B., Wood-Vasey, W., Xue, R., Yoachim, P., Zhang, C., Zonca, A. & Astropy Project Contributors The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package. *ApJ*. **935**, 167 (2022,8)
- [12] Bischoff, C. Observing the Cosmic Microwave Background polarization anisotropy at 40 GHz with QUIET. (University of Chicago,2010,8)

- [13] 西ノ宮ゆめ. 宇宙マイクロ波背景放射の将来実験に向けた大気揺らぎとその相関の測定とモデル化. 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士論文 2023.
- [14] Fritz Kasten and Andrew T. Young, "Revised optical air mass tables and approximation formula," *Appl. Opt.* 28, 4735-4738 (1989)
- [15] Savitzky, A. & Golay, M. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*. **36** pp. 1627-1639 (1964,1)
- [16] Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E. Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, Stéfan J. van der Walt, Matthew Brett, Joshua Wilson, K. Jarrod Millman, Nikolay Mayorov, Andrew R. J. Nelson, Eric Jones, Robert Kern, Eric Larson, CJ Carey, İlhan Polat, Yu Feng, Eric W. Moore, Jake VanderPlas, Denis Laxalde, Josef Perktold, Robert Cimrman, Ian Henriksen, E.A. Quintero, Charles R Harris, Anne M. Archibald, Antônio H. Ribeiro, Fabian Pedregosa, Paul van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors. Quintero, Charles R Harris, Anne M. Archibald, Antônio H. Ribeiro, Fabian Pedregosa, Paul van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors. *Nature Methods*, 17(3), 261-272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [17] <http://stella-archive.aip.de/stella/status/status.php>
- [18] Durre, Imke; Xungang, Yin; Vose, Russell S.; Applequist, Scott; Arnfield, Jeff. (2016) Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA), Version 2. NOAA National Centers for Environmental Information. DOI:10.7289/V5X63K0Q [accessed 2025-10-28].
- [19] Durre, I., R. S. Vose, and D. B. Wuertz, 2006: Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. *Journal of Climate*, 19, 53-68. DOI:10.1175/JCLI3594.1