

修士論文

Simons Observatory 実験で用いる偏光角較正装置の
系統誤差に関する研究

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
物理学第二分野 高エネルギー物理学研究室
星野 大輝

2025年1月9日

概要

目 次

第 1 章 CMB	1
第 2 章 Simons Observatory 実験	2
2.1 Simons Observatory 実験	2
2.2 Large Aperture Telescope (LAT)	2
2.3 Small Aperture Telescope (SAT)	2
2.3.1 フォアバッフル	2
2.3.2 光学筒	2
2.3.3 Transition Edge Sensor (TES)	2
2.3.4 極低温連続回転式半波長板 (HWP)	3
2.4 偏光角較正の重要性とその手法	4
2.4.1 偏光角の誤較正に伴う偏光の漏れ込み	4
2.4.2 偏光角較正手法	5
第 3 章 スペースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置	8
3.1 偏光信号の生成原理	8
3.2 偏光角較正の原理	9
3.3 較正装置の設計と特徴	9
3.3.1 スペースワイヤーグリッドの設計	9
3.3.2 回転機構	11
3.3.3 切り替え機構	11
3.3.4 重力参照計	13
3.4 系統誤差	14
3.4.1 ワイヤーの設置精度に伴う系統誤差	15
3.4.2 エンコーダの測定精度に伴う系統誤差	15
3.4.3 エンコーダの零点測定に伴う系統誤差	15
3.4.4 重力参照計の精度に伴う系統誤差	15
3.4.5 ワイヤーのたわみに伴う系統誤差	15
3.4.6 系統誤差のまとめと本論文の位置付け	17
第 4 章 重力参照計の評価	18
4.1 要求精度と評価内容	18
4.2 重力参照計の概要	19
4.3 温度による出力の変化の評価	19
4.3.1 評価手法	19
4.3.2 評価結果	21
4.3.3 評価結果の考察	22
4.3.4 まとめ	22

第 5 章 ワイヤーのたわみ量評価系の開発と、自動化手法の確立	23
5.1 過去の測定手法	23
5.2 測定系の設計	23
5.3 解析手法	23
5.4 作成したシステムのパフォーマンスチェック	23
5.5 UHF 用ワイヤーグリッドのたわみの測定	23
第 6 章 今後の展望	24
第 7 章 結論	25

第1章 CMB

CMBについて述べるよ

第2章 Simons Observatory 実験

2.1 Simons Observatory 実験

Simons Observatory 実験(以後、SOと呼ぶ)は、チリのアタカマ砂漠を拠点とする史上最大規模の地上CMB観測実験である。現在、口径0.5mの小口径望遠鏡(Small Aperture Telescope, SAT)3台と、口径6mの大口径望遠鏡(Large Aperture Telescope, LAT)1台を用いた観測が進められており^[1]、今後さらにイギリス製の2台のSATと、日本製の1台のSAT(JSAT)が追加される予定である。検出器としてはTES(Transition Edge Sensor)を採用しており、SATにはそれぞれ約1万個ずつ、LATには約3万個の検出器が搭載されている。この数多の検出器を通してCMBの変更を高精度で測定し、インフレーションに由来する原始重力波の検出や、ニュートリノの有効世代数、ニュートリノ質量和の測定を目指す^[2]。

立体角 Ω 、開口面積 A 、観測波長 λ について、回折限界の関係式

$$\Omega = \frac{\lambda^2}{A} \quad (2.1)$$

を考えると、より大きな口径 A を持つ望遠鏡ほどより高い角度分解能を有し、小角度の相関を観測するのに適していることがわかる。その一方で、大口径の望遠鏡は一度に観測できる範囲も小さくなるため、大角度の相関を観測するのに時間を要し、大気揺らぎの影響を受けやすくなってしまう。以上の理由から、小口径で大角度相関を調べるSATと、大口径で小角度相関を調べるLATを組み合わせることで、CMBのより精密な測定を実現する。

2.2 Large Aperture Telescope (LAT)

余裕があったら書く。

2.3 Small Aperture Telescope (SAT)

SATの断面図を見せて各種装置がどこに位置しているのか述べる。

2.3.1 フォアバッフル

2.3.2 光学筒

2.3.3 Transition Edge Sensor (TES)

TESは超伝導の転移点付近で急激に電気抵抗が変化する性質を利用した検出器である。あらかじめ転移点付近に保持しておき、光子が入ってくることで急激に変化した電気抵抗に起因する電流の変化を読むことで光子のエネルギーを測定する。

2.3.4 極低温連続回転式半波長板 (HWP)

大気による熱放射は常に揺らいでいる。これは大気による $1/f$ ノイズとして知られ、CMB 偏光観測実験においては、このノイズと CMB 偏光信号を分離することが重要である。Simons Observatory では、この大気による熱放射を取り除くために、極低温連続回転式半波長板 (cryogenic continuously rotating Half-Wave Plate, 以後、単に HWP と呼ぶ) を用いる。^[3]

一般に、HWP は複屈折の特性を持つ素材からなり、素子中のある決まった軸に対して電場成分を反転させる。すなわち、HWP に入射する光の電場 \mathbf{E} は HWP を通過することで

$$E_1 = E_1 \quad (2.2)$$

$$E_2 = -E_2 \quad (2.3)$$

となる。ここで、1, 2 はそれぞれ HWP の光学軸を表し、1 軸に対して電場成分が反転している。入射光として偏光角が HWP の 1 軸から測って χ であるような直線偏光した光を考える。HWP を通過した後の偏光角は $-\chi$ となり、偏光が 1 軸対称に反転、つまり -2χ だけ変化する。(図 2.1) この性質により、入力信号のストークスパラメータがそれぞれ $I_{\text{in}}(t), Q_{\text{in}}(t), U_{\text{in}}(t)$ であるとき、出力信号 $d_m(t)$ は

$$d_m(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [(Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)) \exp(-i4\chi)] \quad (2.4)$$

となる。ここで、 ε は変調効率である。SO では、HWP を 2 Hz で回転させることで、連続的に入射する直線偏光による信号を 8 Hz に変調して出力する。HWP の角振動数を ω_{HWP} とし、初期位相を χ_0 とすると、 $\chi(t) = \omega_{\text{HWP}}t + \chi_0$ と表され、出力信号は

$$d_m(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [(Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)) \exp(-i(4\omega_{\text{HWP}}t + 4\chi_0))] \quad (2.5)$$

となる。検出器はある偏光角方向 θ_{det} にのみ感度を持つため、最終的に検出器が読み出す信号 $d_{m,\text{det}}$ は

$$d_{m,\text{det}}(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [(Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)) \exp \{-i(4\omega_{\text{HWP}}t + 4\chi_0 - 2\theta_{\text{det}})\}] \quad (2.6)$$

となる。この信号のフーリエ変換は

$$\begin{aligned} \tilde{d}_{m,\text{det}}(\Omega) &= \tilde{I}_{\text{in}}(\Omega) \\ &+ \frac{\varepsilon}{2} \left[\left\{ \tilde{Q}_{\text{in}}(\Omega + 4\omega_{\text{HWP}}) + i\tilde{U}_{\text{in}}(\Omega + 4\omega_{\text{HWP}}) \right\} \exp \{-i(4\chi_0 - 2\theta_{\text{det}})\} \right] \\ &+ \frac{\varepsilon}{2} \left[\left\{ \tilde{Q}_{\text{in}}(\Omega - 4\omega_{\text{HWP}}) - i\tilde{U}_{\text{in}}(\Omega - 4\omega_{\text{HWP}}) \right\} \exp \{-i(4\chi_0 - 2\theta_{\text{det}})\} \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

である。この式はほとんど時間変化しない信号 ($\Omega \sim 0$) が HWP を通過することで、周波数 $\pm 4\omega_{\text{HWP}}$ のところに移ることを示している。このようにして、元々 $1/f$ ノイズが大きかった低周波帯の信号を、ノイズの少ない高周波帯に変換できる。 $Q_{\text{in}} + iU_{\text{in}}$ を得るために、 $+4\omega_{\text{HWP}}$ のまわりのみを通すバンドパスフィルタ \mathcal{F}^{BPF} を通した後、2 倍して位相を元に戻せば良い。つまり、復調

後に得られる信号 $d_{\text{d},\text{det}}$ は

$$d_{\text{d},\text{det}}(t) = \mathcal{F}^{\text{BPF}}[d_{\text{m},\text{det}}(t)] \times 2 \exp \{i(4\omega_{\text{HWPT}} t + 4\chi_0)\} \quad (2.8)$$

$$= \varepsilon [Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)] \exp [i2\theta_{\text{det}}] \quad (2.9)$$

となる。ここで、 χ_0 はエンコーダによって決定される。

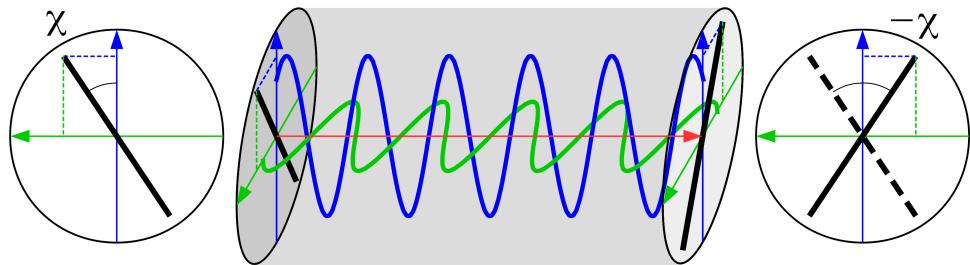


図 2.1: HWP を通過することで、偏光角が変化することを示した概念図。青い軸が 1 軸、緑の軸が 2 軸に対応する。入射した直線偏光の偏光角が 1 軸に対して χ であり、複屈折によって -2χ だけ変化する。

2.4 偏光角較正の重要性とその手法

2.4.1 偏光角の誤較正に伴う偏光の漏れ込み

CMB 偏光観測実験での B モード観測において、検出器の偏光角を精度よく知ることは極めて重要である。その重要性を示すため、本項では偏光角の誤較正が観測された B モード偏光にどのような影響を及ぼすかを考え、SO においての要求偏光角較正精度を定める。

今、すべての検出器における偏光角を $\delta\theta$ だけ誤って較正してしまったとすると、観測されるストークスパラメータ $Q_{\text{obs}}, U_{\text{obs}}$ は真のストークスパラメータ Q, U に対して

$$Q_{\text{obs}} \pm iU_{\text{obs}} = e^{\pm i2\delta\theta}(Q \pm iU) \quad (2.10)$$

$$= e^{\pm i2\delta\theta} \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} {}_{\pm 2}a_{\ell m} {}_{\pm 2}Y_{\ell m}(\theta, \phi) \quad (2.11)$$

と表される。^{[4][5]} E モード、B モード偏光を表現する係数 $a_{\ell m}^E, a_{\ell m}^B$ を用いると、スピン 2 の球面調和関数で展開する際の係数 ${}_{\pm 2}a_{\ell m}$ は

$${}_{\pm 2}a_{\ell m} = -(a_{\ell m}^E \pm ia_{\ell m}^B) \quad (2.12)$$

であるから

$$Q_{\text{obs}} \pm iU_{\text{obs}} = \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} [-(a_{\ell m}^E \pm ia_{\ell m}^B)] e^{\pm i2\delta\theta} {}_{\pm 2}Y_{\ell m}(\theta, \phi) \quad (2.13)$$

$$= \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} [-(a_{\ell m, \text{obs}}^E \pm ia_{\ell m, \text{obs}}^B)] {}_{\pm 2}Y_{\ell m}(\theta, \phi) \quad (2.14)$$

が観測されることとなる。したがって、パワースペクトル

$$C_{\ell}^{XX'} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \left\langle (a_{\ell m}^X)^* a_{\ell m}^{X'} \right\rangle \quad (2.15)$$

は、偏光角の誤較正によって

$$\begin{pmatrix} C_{\text{obs}, \ell}^{TT} \\ C_{\text{obs}, \ell}^{TE} \\ C_{\text{obs}, \ell}^{TB} \\ C_{\text{obs}, \ell}^{EE} \\ C_{\text{obs}, \ell}^{BB} \\ C_{\text{obs}, \ell}^{EB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\delta\theta) & 0 & -\sin(2\delta\theta) & 0 & 0 \\ 0 & \sin(2\delta\theta) & 0 & \cos(2\delta\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos^2(2\delta\theta) & \sin^2(2\delta\theta) & -\sin(4\delta\theta) \\ 0 & 0 & 0 & \sin^2(2\delta\theta) & \cos^2(2\delta\theta) & \sin(4\delta\theta) \\ 0 & 0 & 0 & \sin(4\delta\theta)/2 & -\sin(4\delta\theta)/2 & \cos(4\delta\theta)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{\ell}^{TT} \\ C_{\ell}^{TE} \\ C_{\ell}^{TB} \\ C_{\ell}^{EE} \\ C_{\ell}^{BB} \\ C_{\ell}^{EB} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

となる。標準宇宙モデルが正しく、原始密度ゆらぎがパリティ不变だった場合では $C_{\ell}^{TB} = C_{\ell}^{EB} = 0$ であるが、それでも偏光角の誤較正は C_{ℓ}^{EE} から C_{ℓ}^{BB} への漏れ込みを引き起こす:

$$C_{\text{obs}, \ell}^{BB} = \sin^2(2\delta\theta)C_{\ell}^{EE} + \cos^2(2\delta\theta)C_{\ell}^{BB} \quad (2.17)$$

式 (2.17) に基づき、偏光角の誤較正が C_{ℓ}^{EE} から $C_{\text{obs}, \ell}^{BB}$ への漏れ込みとして及ぼす影響を図?? に示す。誤較正の目安として、 $\delta\theta = 10, 1, 0.1^\circ$ の場合をプロットした。

偏光角較正の要求精度は望遠鏡の感度や delensing の能率、ノイズなどによって変化する。SOにおいては、delensing の能率を 50% とし、ノイズとして最も悲観的な場合を考えた場合においても、 $\delta\theta \leq 0.1^\circ$ であればこの漏れ込みが生む r への系統誤差は無視できるほどに小さくなる。^[6] 以上の理由から、SO での偏光角較正の要求精度を $\delta\theta \leq 0.1^\circ$ と定める。

図 2.2: LAMBDA を使って作成した EtoB leakage の図と、Lyth bound を示す図を載せる予定。

2.4.2 偏光角較正手法

偏光角較正には、検出器間の相対的な偏光角を較正する相対角度較正と、天球面上においてどの向きに偏光角を持っているかを較正する絶対角度較正が存在する。本項では代表的な較正手法を紹介したのち、先行研究においてどのような手法をとり、その精度がどの程度であったかをまとめる。

2.4.2.1 牡牛座かに星雲 (Tau A)

Tau A は北天に昇る、強い直線偏光を放射する超新星残骸である。その光の偏光角は観測周波数に依存している可能性が指摘されており、さらに高分解能望遠鏡による観測ではその構造が見えるため、偏光角を一意に決定することが難しいという課題がある。また、偏光角は他の実験の観測結果にも依存しており、これらが潜在的な系統誤差として考慮される必要がある。SO の拠点であるチリのアタカマ砂漠は南半球に位置するため、SAT では検出器の一部でしか観測できない。

2.4.2.2 ケンタウルス座 A (Cen A)

(入れるか悩み中) Cen A は南天に昇る、直線偏光を放射する電波銀河である。QUaD 実験にて、 0.5° の絶対角度較正精度が保証された検出器群を用いて 90, 150 GHZ の波長帯で観測され、その偏光角が測定されている [7]。南天に登るため南半球で比較的観測しやすいが、偏光角の観測周波数依存性や高分解能望遠鏡での内部構造の影響、他の実験の観測結果による依存といった Tau A と同様の要因による系統誤差を持ち得る。

2.4.2.3 月

月はその表面で反射された光が月の中心から放射状に広がった偏光信号となる。月の観測も Tau A と同じく構造による偏光角の違いが問題となり、ポインティング精度由来の系統誤差を生じる。また、月は非常に明るいため TES 検出器のダイナミックレンジを超てしまい、SAT では観測が困難である。

2.4.2.4 誘電体シート

誘電体シートとは、膜状に張られたポリマーによって環境熱放射を反射させ、直線偏光を作り出す装置である。その厚みを変えることで明るさの調整が容易であるが、望遠鏡の視野をすべて覆うためには装置が大型化する傾向にある。また、周波数ごとに偏光特性が異なるため、較正に使用するためには高精度な周波数依存性の測定が必要である。

2.4.2.5 デンスワイヤーグリッド

デンスワイヤーグリッドは、金属ワイヤーを入射光に対して十分短い間隔で平行に張り巡らせた光学素子である。近似的にはワイヤーが張られた方向に対しては電流を流すが、それに直行する方向には電流を流さない金属板として振る舞う。そのため、入射光がワイヤーに沿った方向に偏光している場合には反射され、直行する方向に偏光している光は透過する。

デンスワイヤーグリッドは口径に対して平行に設置してしまうと検出器アレイとの間に多重反射が生じ、系統誤差を生じる。これを抑制するため、デンスワイヤーグリッドを口径に対して傾けて設置する使用例が多い。望遠鏡の口径を覆い、全検出器を同時に較正するためにはデンスワイヤーグリッド自体が大型化する必要があり、作成する際にはワイヤー間隔を高精度に制御、長期間保つことが困難である。また、デンスワイヤーグリッドは CMB 観測実験で典型的な広い観測周波数帯で均一に偏光を生成することが難しいといった欠点も有する。

2.4.2.6 スペースワイヤーグリッド

スペースワイヤーグリッドは、金属ワイヤーを入射光に対して十分長い間隔で平行に張り巡らせた光学素子である。原理は??にて後述するが、環境熱放射をワイヤーが反射することによりワイヤーに沿った方向に偏光した光を作り出す。

スペースワイヤーグリッドはワイヤー間隔が広いために多重反射を起こしにくく、望遠鏡の口径に対して平行に設置することができる。そのため、デンスワイヤーグリッドよりも小型化が可能であり、製造難易度が比較的低い。ワイヤー間隔が十分長いとみなせる範囲においては周波数依存性が小さいため、広い周波数帯で均一に偏光を生成することが可能である。これらの特性か

ら、複数の観測波長帯を持つすべての検出器を同時に較正することが可能であり、SO ではスパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置が採用されている。

2.4.2.7 自己較正

標準宇宙モデルでは $C_l^{EB} = 0$ である。これを利用して、相対角度較正を十分に行なった上で $C_l^{EB} = 0$ とおくことで $\delta\theta$ を求め、絶対角度較正を行う手法を自己較正と呼ぶ。自己較正の精度は相対角度較正の精度と検出データ量に依存するため、検出器数が増大によって精度の向上が期待される。しかし、 $C_l^{EB} = 0$ を仮定してしまうため、宇宙がパリティを破るような物理に対する感度を捨てることとなる。そのため、これらの物理を探る上では自己較正以外の手法を用いて絶対角度較正を行うことが重要である。

表 2.1: 先行研究における偏光角較正手法とその精度の比較。相対角度較正の場合には、精度の欄に (rel.) と記載している。

実験	観測周波数帯 [GHz]	較正手法	$\delta\theta$
POLARBEAR ^[8]	150	Tau A	0.43°
		自己較正	0.2°
DASI ^[9]	26 ~ 36	月, デンスワイヤーグリッド	0.4°
BICEP ^[10]	100, 150, 220	誘電体シート	0.7°
BICEP2 ^[11]	150	誘電体シート	0.2° (rel.)
		自己較正	1°
SPTpol ^[12]	150	デンスワイヤーグリッド	1°
	95		1.5°
ABS ^[13]	145	スパースワイヤーグリッド	1.1°
		Tau A	1.9°
		自己較正	1.6°
QUIET ^[14]	43, 94	月	1°
		Tau A, スパースワイヤーグリッド	3°
SPT-3G ^[15]	90 150 220	Cen A	2.0°
			2.2°
			4.5°

第3章 スペースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置

SOでは検出器の偏光角較正のために、人工偏光光源としてスペースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置を使用する^[16]。本章では、光角の較正原理について述べたのちに、装置の設計、考えられている系統誤差の要因とその測定値について述べる。

3.1 偏光信号の生成原理

金属製のワイヤーが、周囲から来た入射光を反射することを考える。入射光の波長がワイヤーの直径よりも十分に長い場合、ワイヤー中の自由電子はワイヤーに沿う方向のみに動くと見なすことができ、ワイヤーは自身の軸に沿った偏光状態を持つ光のみを反射する。図3.1に、異なる偏光方向をもつ入射光に対するワイヤーの振る舞いを示す。このようなワイヤーを望遠鏡の視野に置くと、ワイヤーは周囲の環境から来る熱放射を反射し、ワイヤー軸と同じ方向に偏光した光を望遠鏡に送り込む。実際には望遠鏡は空も視野に含み、無偏光な大気放射、ワイヤーからの偏光信号の重ね合わせが見える。2.3.4項にて述べた、極低温連続回転式半波長板という光学素子を用いることで無偏光な大気放射を取り除き、ワイヤーからの偏光信号のみを抽出して偏光角較正に用いる。また、ワイヤー間隔を調整することで実行的な放射温度を調整し、CMB望遠鏡の検出器に入射する光の強度を調整することができる。

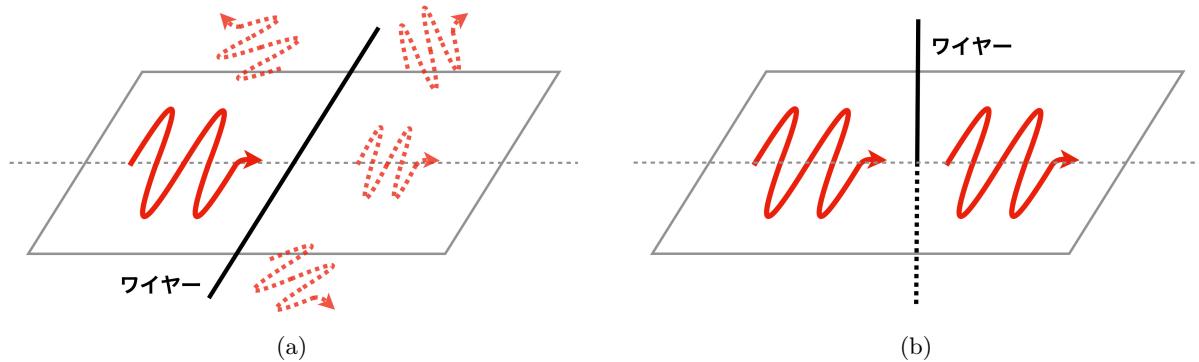


図3.1: ワイヤーが作る偏光信号のイメージ。(a)はワイヤーに沿う方向に偏光した光が入射し、まわりに散乱する様子。(b)はワイヤーに対し垂直な方向に偏光した光が反射されることなく通過する様子。

図 3.2: スペースワイヤーグリッドによって生成される偏光信号の時系列データイメージ

図 3.3: 較正円のイメージ

3.2 偏光角較正の原理

式(2.6)において、入射光としてワイヤー由来の偏光角 θ_{wire} の直線偏光した光を考える。 $Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t) = \exp[2i\theta_{\text{wire}}]$ となるため、

$$d_{\text{m,det}}(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [\exp \{-i(4\omega_{\text{HWP}}t + 4\chi_0 - 2\theta_{\text{det}} - 2\theta_{\text{wire}})\}] \quad (3.1)$$

となる。ワイヤー由来の光の強度はほとんど時間変化しないため、 $I_{\text{in}}(t) \simeq \text{const.}$ とみなせる。したがって、この変調信号は時系列データとして位相オフセット $4\chi_0 + 2(\theta_{\text{det}} + \theta_{\text{wire}})$ を持った角振動数 $4\omega_{\text{HWP}}$ の正弦波としてみえる。理想的な時系列データのイメージを図??に示す。これを復調することで、式(??)より

$$d_{\text{d,det}} = \varepsilon \exp[i2(\theta_{\text{wire}} + \theta_{\text{det}})] \quad (3.2)$$

という偏光情報のみを得る。望遠鏡では光学系により生まれる偽偏光や、環境熱放射が比等方だった場合にはワイヤー角度に対して非等方な強度のワイヤー由来の偏光が観測され得る。これを取り除くため、さまざまなワイヤーの角度 θ_{wire} でこの $d_{\text{d,det}}$ を測定し、複素平面上で円(較正円と呼ぶ)を描く(??)。光学系による偽偏光は較正円の原点がズレる効果として現れ、環境熱放射の非等方性は較正円を歪ませる効果として現れる。この較正円を用いて補正を加え、最終的に検出器の偏光角 θ_{det} を較正する。

3.3 較正装置の設計と特徴

較正円を描くためにはスペースワイヤーグリッドを回転させ、ワイヤーの角度を変化させる必要がある。また、本装置は望遠鏡の窓の前に設置されるという特性上、CMB 観測時にはそれを取り外さなければならない。先行研究ではこのような回転・切り替え作業を手動にて行ってきたが、それに伴って短期間での再較正が困難であった。そこで、本装置ではワイヤーの回転と観測・較正の切り替えを自動で行う機構が開発・搭載され、10 分程度での較正が実現されている。また、重力参照計を搭載しワイヤー絶対角度の高精度な測定を実現する。本節ではスペースワイヤーグリッド本体の設計、自動化機構と重力参照計を用いた絶対角度の測定方法について述べる。

3.3.1 スペースワイヤーグリッドの設計

スペースワイヤーグリッドの概観を図 3.4(a) に示す。これは金属製のワイヤーを、入射光よりも十分長い間隔で平行に張ったものであり、ワイヤー軸に沿った偏光を生成する。SO ではアルミニウム製の内径 790 mm、外径 830 mm の円環に、直径 0.1 mm のタンクステンワイヤーを 20 mm 間隔で 39 本張り巡らせたものを使用する^[17]。

アルミニウムリング上には 0.2 mm の幅で刻まれた溝があり、これによりワイヤーの位置を決める。230 g の重りをワイヤーにくくりつけることでピンと張った状態にし、この溝の上にワイヤーが沿うように設置したのち、Henkel 社製の LOCTITE STYCAST 2850FTJ という接着剤

を用いて固定する。接着剤による固定部分はサンドblastされたネジ頭となっており、このネジを取り替えることで接着後であってもワイヤーを張り直すことができるようになっている。図3.4(b)にワイヤー接着部分の詳細を示す。

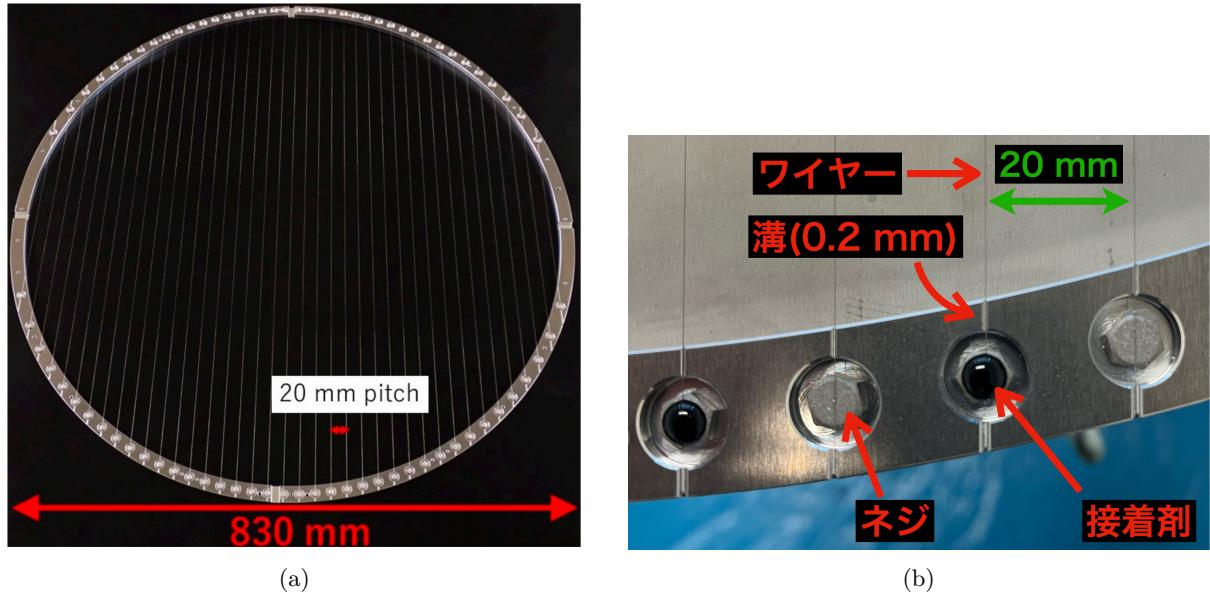


図3.4: (a) スペースワイヤーグリッドの概観^[16] (b) ワイヤー接着部分の詳細

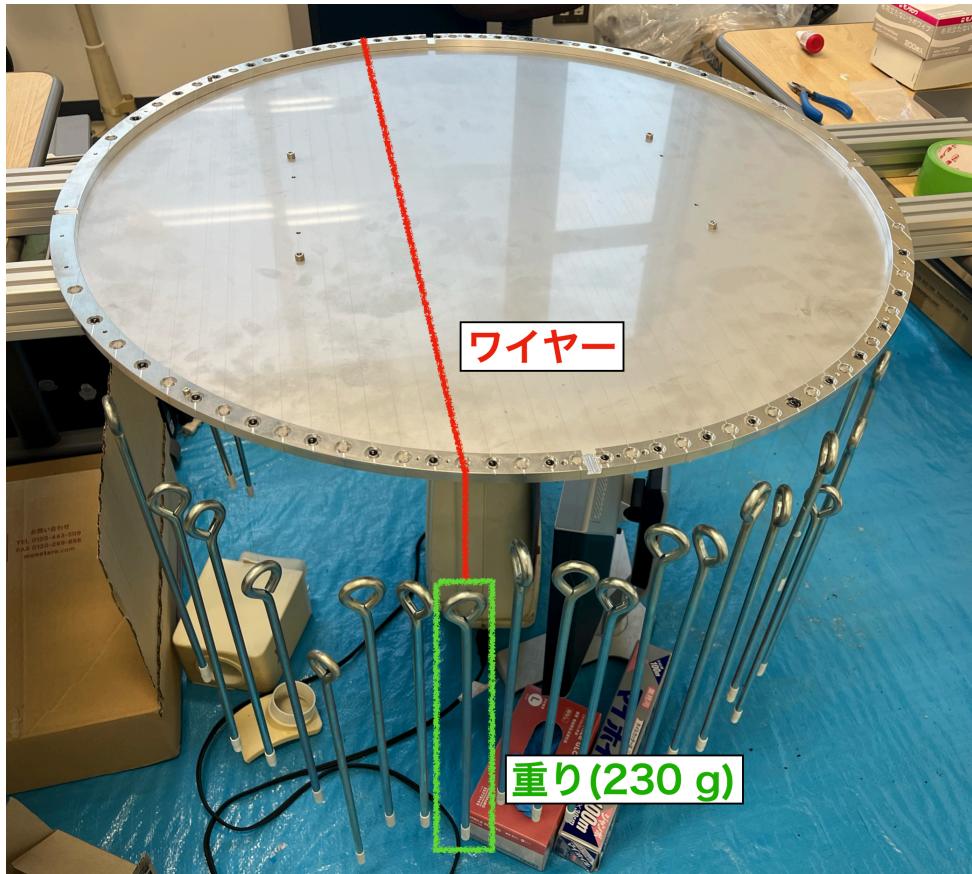


図 3.5: ワイヤーを張るときの様子。ワイヤーの両端に 230 g の重りをつけ、張力をかけている。

3.3.2 回転機構

Crouzet USA 社製の STANDARD MOTOR 2900 RPM 12V という DC モーターを使用し、スペースワイヤーグリッドを回転させる。図 3.6 に回転機構の概観を示す。回転角度は RENISHAW 社製の LM15IC という角度にして 0.004° の分解能を持つ磁気エンコーダを用いて測定されており、0.03° の精度で常にモニターされる。モニターされた角度を用いて DC モーターへの電流を制御するシステムが開発されており、これによりスペースワイヤーグリッドを $\mathcal{O}(1^\circ)$ の精度で 22.5° ずつ回転させ、較正円を描く [18]。

3.3.3 切り替え機構

本較正装置では CMB 観測モードと較正モードの切り替えを 2 本のアクチュエータによってスペースワイヤーグリッドを出し入れすることで実現している。図 3.7 に切り替え機構の概観を示す。アクチュエータのモーターには Oriental motor 社製の PK269JDA という 2 相式ステッピングモーターを使用しており、アクチュエータの両端にあるリミットスイッチによりスペースワイヤーグリッドが端まで移動したことを認識、動作を止める。本機構によるスペースワイヤーグリッドの出し入れは片道で 90 秒程度となっており、CMB 観測の時間を無駄にすることなく較正を行うことに貢献している [18]。

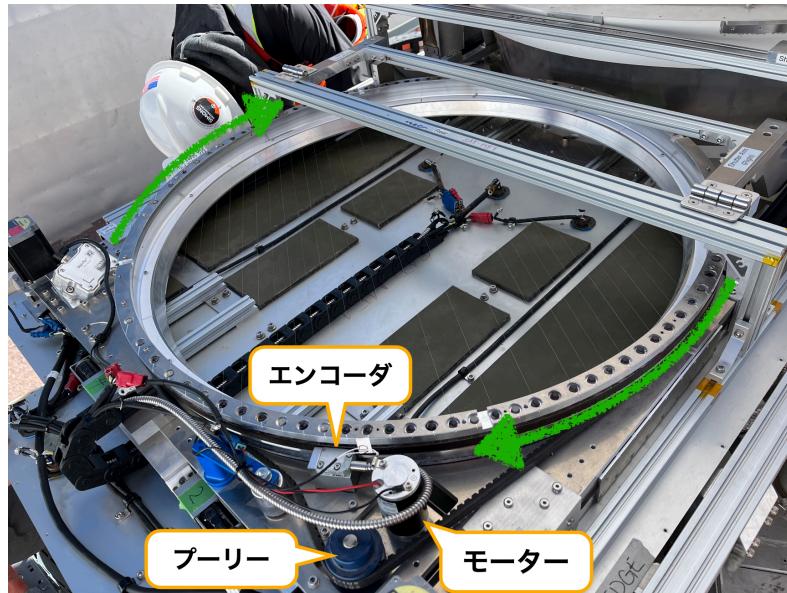


図 3.6: スパースワイヤーグリッドに搭載された回転機構の概観

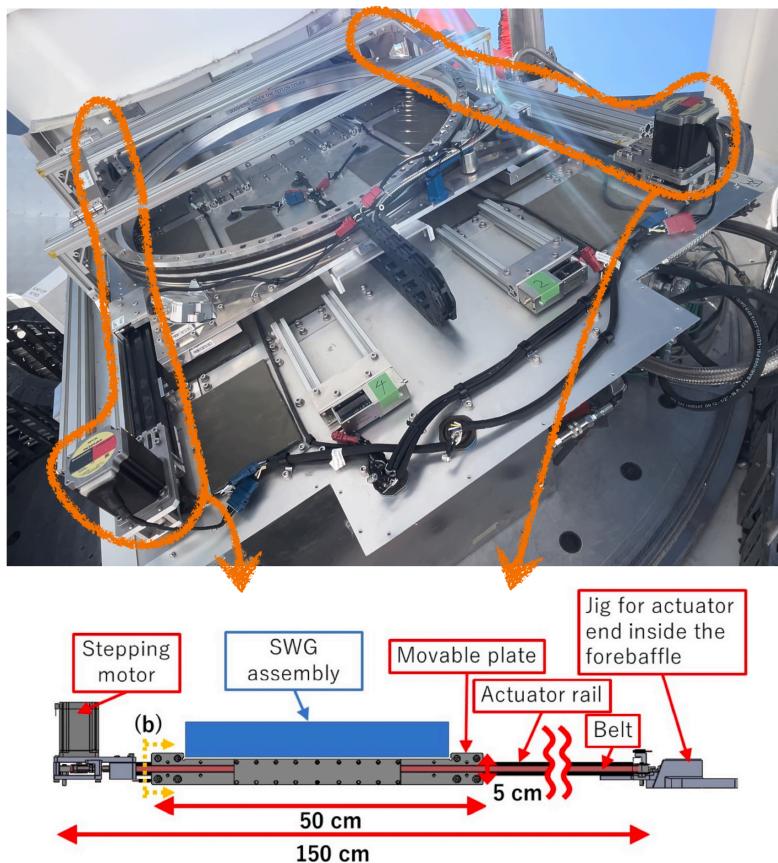


図 3.7: スパースワイヤーグリッドに搭載された切り替え機構の概観。上図が観測サイトにインストールされた較正装置であり、オレンジの線で囲んだ部分の詳細を下図に示している。初見で分かりにくい？もう少しまとまな図を作りたい。

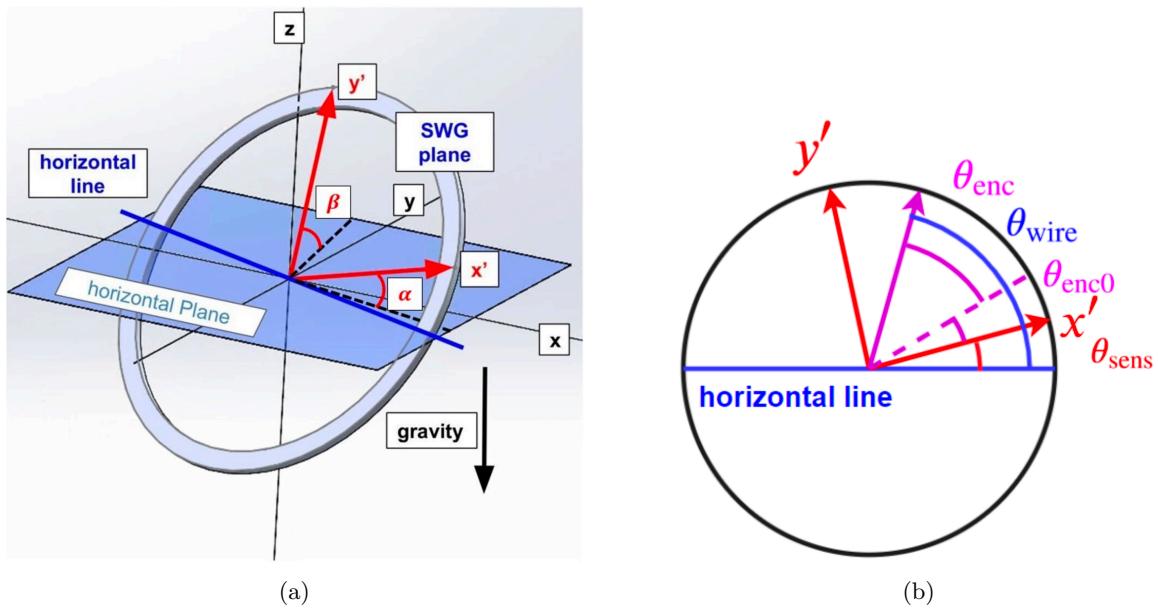


図 3.8: (a) 絶対角度測定のための各種平面と角度の定義 (b) スペースワイヤーグリッド平面における回転角と絶対角度

3.3.4 重力参照計

3.3.4.1 重力参照計を用いた θ_{wire} の測定

式(3.2)において、 θ_{wire} は天球面上におけるワイヤーが作り出す偏光角(絶対角度)である。エンコーダはスペースワイヤーグリッドがその平面内において回転したワイヤーの角度(相対角度)を出力するので、別の手段を用いてこの平面が天球面上のどこに位置しているかを知る必要がある。これをるために、重力を参照してその平面がどう傾いているのかを出力する2軸の重力参照計を導入する。ここでは、絶対角度がどのように測られるかについて述べる。

図3.8(a)のように各種平面、角度を定義する。 xy 平面として重力に対して垂直な平面を取り、 z 軸負の方向が重力方向となるように座標系を取る。図中に円環として描かれているのがスペースワイヤーグリッドであり、重力参照計が持つ2軸を x' , y' 軸とする。 α , β は重力参照計が測定する角度であり、 x' , y' 軸が xy 平面となす角度である。図中にある horizontal line とは、 xy 平面と x' , y' 平面が交わる直線である。以上の定義から、 x' 軸と horizontal line がなす角 θ_{sens} は

$$\theta_{\text{sens}} = \arctan \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \right) \quad (3.3)$$

と表される^[16]。図3.8(b)にスペースワイヤーグリッド平面における各種測定角度と、ワイヤーの絶対角度 θ_{wire} の関係を示す。 θ_{enc} はエンコーダによって測定された値であり、 $\theta_{\text{enc}0}$ はエンコーダの零点と x' 軸のなす角である。以上を用いることで、絶対角度は

$$\theta_{\text{wire}} = \theta_{\text{enc}} + \theta_{\text{enc}0} + \theta_{\text{sens}} \quad (3.4)$$

と測定される。

3.3.4.2 重力参照計の設置

重力参照計はスペースワイヤーグリッドの回転機構のベースプレートに取り付けられている。SAT は elevation 50° での観測を主要としており、スペースワイヤーグリッドは boresight 60° のオフセットを持って設置されているため、これらのオフセットを打ち消し、重力参照計が両軸とともに 0° を指すように設置されている。また、重力参照計は自身の X 軸、Y 軸が重力に対して垂直な水平面に対する角度を出力する。図 3.9 に重力参照計の設置状況を示す。

望遠鏡の姿勢からくる角度のオフセットを消すことにより、重力参照計が出力する角度は式 (3.3) における α, β と一致しなくなる。このオフセットを考慮して、重力参照計の出力角度 θ_X, θ_Y を用いて α, β は

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \cos \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_X - \sin \theta_{\text{slope1}} \cos \theta_{\text{slope2}} \sin \theta_Y \\ &\quad + \sin \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_{\text{slope2}} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \sin \beta &= \sin \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_X - \sin \theta_{\text{slope1}} \cos \theta_{\text{slope2}} \sin \theta_Y \\ &\quad - \cos \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_{\text{slope2}} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y} \end{aligned} \quad (3.6)$$

と表される。ここで、 $\theta_{\text{slope1}}, \theta_{\text{slope2}}$ は図 3.8(b) 中の x' 軸と y' 軸から測った重力参照計の設置角度であり、それぞれの設計値は $\theta_{\text{slope1}} = 210^\circ, \theta_{\text{slope2}} = 40^\circ$ である。

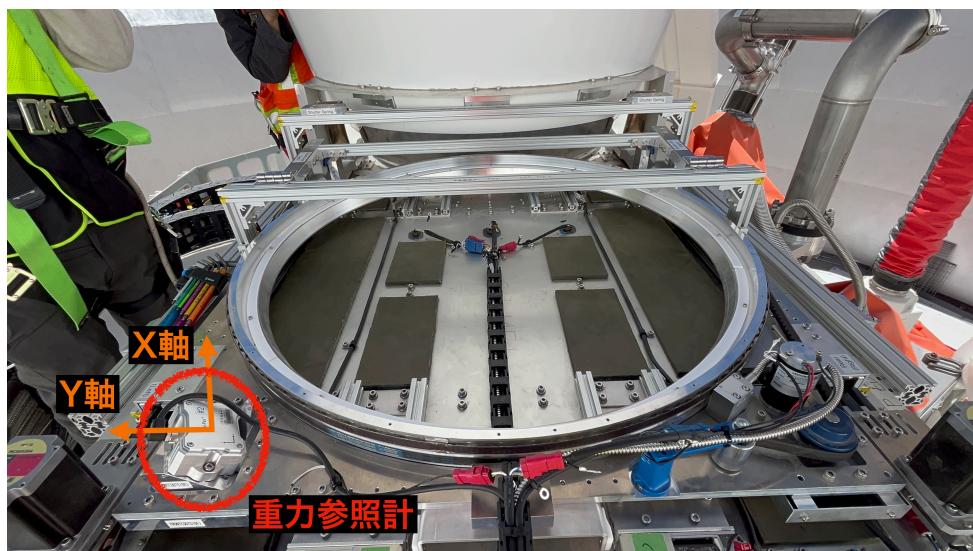


図 3.9: 重力参考計の設置状況

3.4 系統誤差

本節では、ワイヤーの絶対角度を測定するにあたって考えられる系統誤差の要因と、先行研究によって評価されたその値について述べる。その後、評価を見直すべき点をまとめ、本論文の位置付けについて述べる。

3.4.1 ワイヤーの設置精度に伴う系統誤差

ワイヤーは 0.2 mm の溝に沿うような形で設置される。この範囲でのみワイヤーは動くと考えると、アルミニウムリングの中心部では 0.02° の精度でワイヤーを張ることが可能である。この系統誤差は機械工作精度によって決まっている。

3.4.2 エンコーダの測定精度に伴う系統誤差

磁気エンコーダが行う回転角度 θ_{enc} の測定において、磁気エンコーダ自体の角度分解能は 0.004° に相当する。しかし、回転機構のペアリングのステーターと巻きつけられた磁気テープの中心が完全に一致しない偏心の影響や、磁気テープが巻き付けられる回転部分の金属部品が工作精度の下で梢円に歪むことの影響を受け、 θ_{enc} の精度は必ずしも 0.004° になるとは限らない。先行研究^[19] では Faro 社製の 3 次元測定器 Faro Edge を用いてこの精度を確認し、その精度として $< 0.03^\circ$ を得ている。

3.4.3 エンコーダの零点測定に伴う系統誤差

θ_{enc0} は実験室にて測られるエンコーダの零点である。ワイヤーの絶対角度が $\theta_{wire} = 0^\circ$ となった状態で θ_{enc} と θ_{sens} を測定することで決定され、その精度は $< 0.04^\circ$ と測定されている^[19]。
もう少し測定方法について述べるべきだろうか？

3.4.4 重力参照計の精度に伴う系統誤差

重力参照計が出力する角度の精度は、 θ_{sens} の誤差として現れる。これまで、Digi-Pas 社製の DWL5000-XY という製品の使用を予定されていたが、先行研究^[19] にてその精度を欠き、SO における要求絶対角度較正精度 $\delta\theta \leq 0.1^\circ$ を満たさないことが示された。

3.4.5 ワイヤーのたわみに伴う系統誤差

較正に使う光はワイヤーに沿う形で生成されるため、ワイヤーがたわんでいる部分から生成される光はその偏光角がワイヤーの絶対角度 θ_{wire} からずれてしまい、系統誤差になる。本項では、先行研究^[17] および^[19] にて行われているワイヤーのたわみ量の評価について述べる。

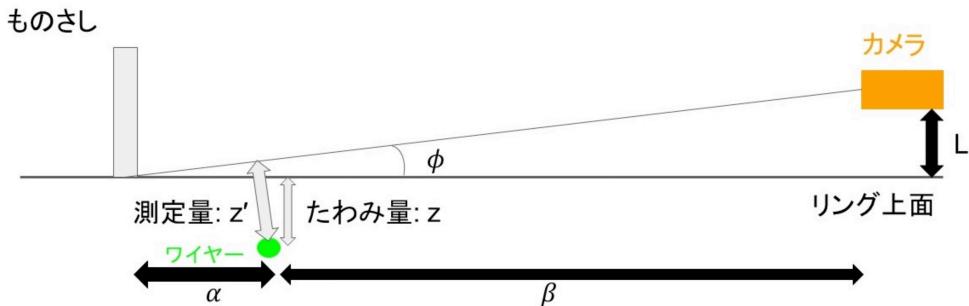


図 3.10: 先行研究におけるワイヤーのたわみ量評価系のセットアップ^[17]

表 3.1: たわみ量評価における各種パラメータの定義

パラメータ	定義
L	アルミニウムリング上面からカメラまでの鉛直距離
ϕ	ストレートエッジの下端を見るカメラの視線がリング上面となす角
α	ストレートエッジからワイヤーまでの水平距離
β	カメラからワイヤーまでの水平距離
z_s	ストレートエッジの真直度
z	ワイヤーのたわみ量
z'	カメラで撮影した画像から測定されるストレートエッジとワイヤーの距離

スペースワイアーグリッドを重力に対して垂直な水平面上に置き、その上に十分な真直度が保証されたストレートエッジを置く。ストレートエッジの位置をワイヤーの近くに調節し、横からカメラで撮影すると、撮影された画像におけるストレートエッジとワイヤーの間の距離 z' を測定できる。セットアップの概念図を図 3.10 に示す。使用されたストレートエッジは大西測定株式会社製の 140-1000B であり、このストレートエッジは真直度 A 級 $30 \mu\text{m}$ が保証されている。各種パラメータを表 3.1 のように定義すると、 z' と実際のワイヤーのたわみ z の間の関係は

$$z = \frac{z'}{\cos \phi} - \alpha \tan \phi - z_s \quad (3.7)$$

$$\phi = \arctan \left(\frac{L}{\alpha + \beta} \right) \quad (3.8)$$

となる。

写真はワイヤーの中央と両端の 3箇所で撮影された。両端で測定される z はたわみのオフセットであり、中央で測定された z からこのオフセットを差し引いたものが正味のたわみ量として測定された。また、ストレートエッジにはスケーラを貼り付けており、スケーラの目盛が写真の pixel 数にしていくつなのかを測ることで 1 pixel が何 mm に対応するのか較正している。

実際に撮影された写真を図 3.11 に示す。撮影された写真に対して、先行研究^[17]では画像寸法測定ツール「Click Measure」を用いて手動で、^[19]では OpenCV ライブラリを用いて二値化して、検出したストレートエッジの端とワイヤーの中心位置の距離を算出し、ワイヤーのたわみ量を $\theta_{\text{sag}} < 0.05^\circ$ と評価している。

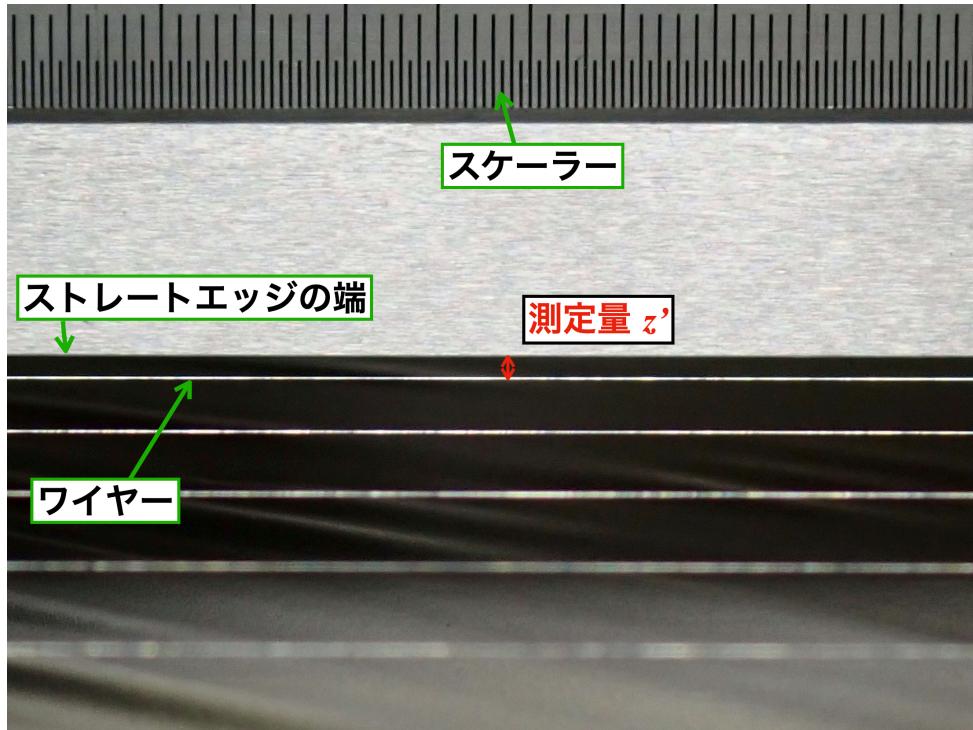


図 3.11: ワイヤーのたわみ量評価の撮影された写真の例。

3.4.6 系統誤差のまとめと本論文の位置付け

表 3.2 に、先行研究において調べられた系統誤差の結果をまとめる。SO において要求される絶対角度較正精度は $\delta\theta < 0.1^\circ$ であるが、表 3.2 中の評価値はこれを満たしていない。

特に問題となるのが重力参照計の精度である。要求精度を満たすため、新たに Sherborne Sensors 社製の DSIC-2051-60 という重力参照計の導入を予定している。この新しい重力参照計の精度の検証を、4 章にて行う。

次点で系統誤差を生んでいるワイヤーのたわみに関しては、写真の撮影箇所が両端と中心のみと少ないことや、撮影箇所を人が決めていることに起因するバイアスが含まれている可能性がある。さらに、観測サイトにおける品質管理の面を考えると、定期的に測定できるようなシステムの開発が望まれる。こういった状況を受け、より正確にワイヤーのたわみ量を評価する手法と、その自動化手法を確立した。5 章にてこの詳細を論ずる。

表 3.2: 先行研究によって評価された系統誤差

系統誤差要因	評価値
ワイヤー設置精度	$< 0.02^\circ$
エンコーダ精度	$< 0.03^\circ$
エンコーダ零点	$< 0.04^\circ$
重力参照計	$> 0.1^\circ$
ワイヤーのたわみ	$< 0.05^\circ$
合計	$> 0.1^\circ$

第4章 重力参照計の評価

3.3.4にて述べたように、本較正装置では重力参照計を用いて絶対角度を測定するが、これまでに使用が想定されていた Digi-Pas 社製の DWL5000-XY は要求性能を満たさなかった。今回、新たに候補となった Sherborne Sensors 社製の DSIC-2051-60 を評価した。本章では、はじめに要求精度と評価すべき事項について確認したのち、本重力参照計の概要を共有、評価手法と結果について述べる。

4.1 要求精度と評価内容

要求される精度は、表 3.2 中にある値から合計誤差が $\delta\theta < 0.1^\circ$ となることであり、式(3.3)で表される θ_{sens} にして $\delta\theta_{\text{sens}} < 0.06^\circ$ である。これを重力参照計の要求精度に換算する。式(??)より、重力参照計の各 X 軸、Y 軸の誤差を $\delta\theta_X, \delta\theta_Y$ とすると、 θ_{sens} の誤差 $\delta\theta_{\text{sens}}$ は

$$\delta\theta_{\text{sens}} = \sqrt{\left(\frac{\sin\beta}{\sin^2\alpha + \sin^2\beta}\delta(\sin\alpha)\right)^2 + \left(\frac{\sin\alpha}{\sin^2\alpha + \sin^2\beta}\delta(\sin\beta)\right)^2} \quad (4.1)$$

$$\delta(\sin\alpha) = \sqrt{\left(\frac{d\sin\alpha}{d\theta_X}\delta\theta_X\right)^2 + \left(\frac{d\sin\alpha}{d\theta_Y}\delta\theta_Y\right)^2} \quad (4.2)$$

$$\delta(\sin\beta) = \sqrt{\left(\frac{d\sin\beta}{d\theta_X}\delta\theta_X\right)^2 + \left(\frac{d\sin\beta}{d\theta_Y}\delta\theta_Y\right)^2} \quad (4.3)$$

$$\frac{d\sin\alpha}{d\theta_X} = \cos\theta_{\text{slope1}}\cos\theta_X - \sin\theta_{\text{slope1}}\sin\theta_{\text{slope2}}\frac{\sin\theta_X\cos\theta_X}{\sqrt{1-\sin^2\theta_X-\sin^2\theta_Y}} \quad (4.4)$$

$$\frac{d\sin\alpha}{d\theta_Y} = -\sin\theta_{\text{slope1}}\cos\theta_{\text{slope2}}\cos\theta_Y - \sin\theta_{\text{slope1}}\sin\theta_{\text{slope2}}\frac{\sin\theta_Y\cos\theta_Y}{\sqrt{1-\sin^2\theta_X-\sin^2\theta_Y}} \quad (4.5)$$

$$\frac{d\sin\beta}{d\theta_X} = \sin\theta_{\text{slope1}}\cos\theta_X + \cos\theta_{\text{slope1}}\sin\theta_{\text{slope2}}\frac{\sin\theta_X\cos\theta_X}{\sqrt{1-\sin^2\theta_X-\sin^2\theta_Y}} \quad (4.6)$$

$$\frac{d\sin\beta}{d\theta_Y} = \cos\theta_{\text{slope1}}\cos\theta_{\text{slope2}}\cos\theta_Y + \cos\theta_{\text{slope1}}\sin\theta_{\text{slope2}}\frac{\sin\theta_Y\cos\theta_Y}{\sqrt{1-\sin^2\theta_X-\sin^2\theta_Y}} \quad (4.7)$$

のように表される。 $\theta_{\text{slope1}} = 210^\circ, \theta_{\text{slope2}} = 40^\circ$ は 3.3.4.2 にて導入したスロープの角度である。重力参照計の両軸ともに同程度の誤差を持つと仮定し、スロープの角度から生じる誤差を無視すると、およそ $\delta\theta_X \sim \delta\theta_Y \leq 0.04^\circ$ が要求精度となる。

観測サイトはその気温が $-20^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ と変動する過酷な環境である。そのため、恒温槽を用いてこの温度の下で出力結果を測定し、温度変動による出力の変動を評価を行う。

4.2 重力参照計の概要

図4.1に本重力参照計の外観を示す。図中のX軸、Y軸と重力に対して垂直に交わる水平面のなす角が θ_X , θ_Y であり、これを出力する。また、各軸は対応するセンサの温度も出力することができる。公称の精度は0.08°であるため、その精度を再評価し、要求精度を満たすかを確認する必要がある。

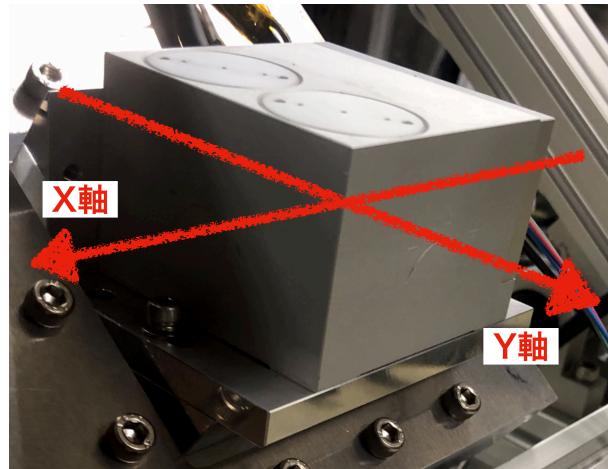


図4.1: 重力参照計 Sherborne Sensors 社 DSIC-2051-60 の外観

4.3 溫度による出力の変化の評価

4.3.1 評価手法

図4.2に評価系を示す。重力参照計をアルミニウム製の厚み30mmのプレートの上に設置した。このプレートには3つのアジャスターが取り付けられており、これを回すことでプレートの傾きを調整できる。プレートには新潟精機製の気泡管水準器FLW-200002を2つ、互いに垂直になるように設置し、これを参考してプレート全体が水平になるようにアジャスターで調整した。この時の水平度の精度は気泡管水準器の精度によって決まり、 $< 0.01^\circ$ である。また、プレート上にはUSB温度計を設置し、周囲の空気の温度を測定した。以上の測定系を恒温槽^{*1}に入れ、温度を変化させたときの出力を測定した。

図4.3にUSB温度計を用いて測定した恒温槽内の温度 T_{USB} の変化の様子を示す。 20°C から -20°C まで冷却したのち、再び 20°C まで昇温し、出力の変化を測定した。各温度10°刻みで3時間ほどかけて変化させ、温度が安定している状態が生まれるようにした。測定中にはWebカメラを用いて10分ごとに撮影し、気泡管水準器の気泡の位置が変化していないかを確認した。例として、図4.4(a)に $T_{\text{USB}} \sim 12^\circ\text{C}$ で撮影された写真を、図4.4(b)に $T_{\text{USB}} \sim -18^\circ\text{C}$ で撮影された写真を示す。全ての写真を確認したところ、気泡の位置に変動はあったものの水平度が $< 0.01^\circ$ に収まっていることが確認できた。

^{*1} 恒温槽は京都市産業技術研究所より拝借した。

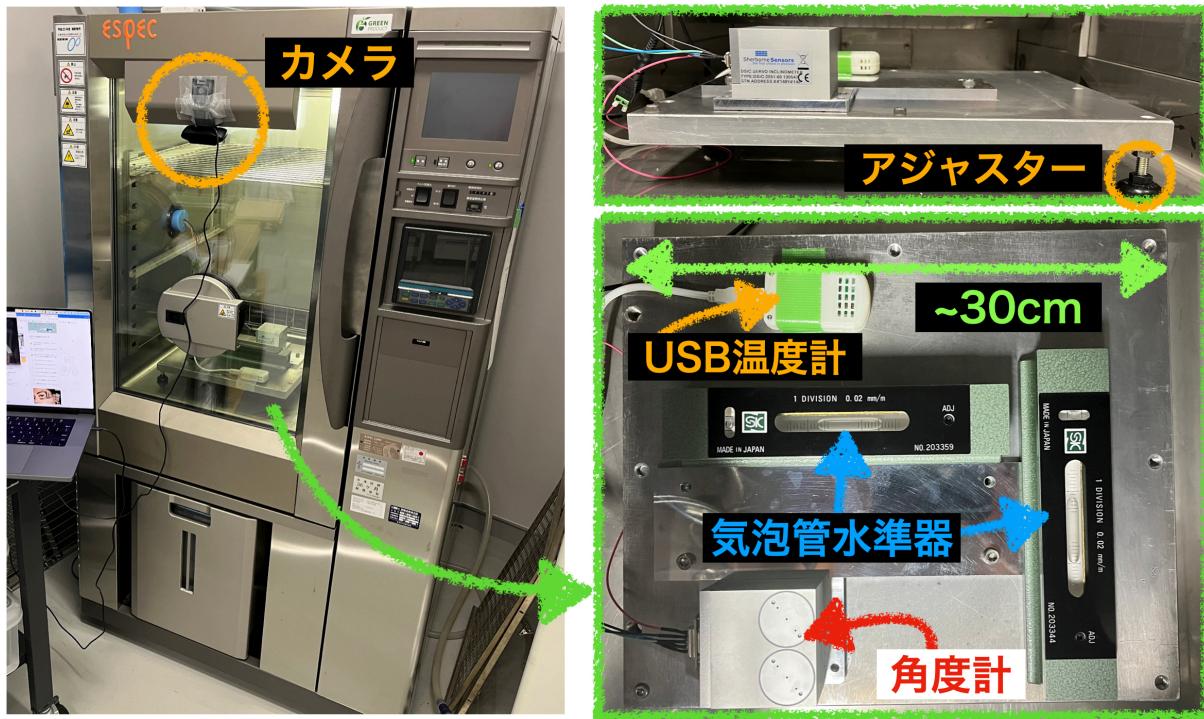


図 4.2: 恒温槽を用いた重力参照計の温度変化評価系

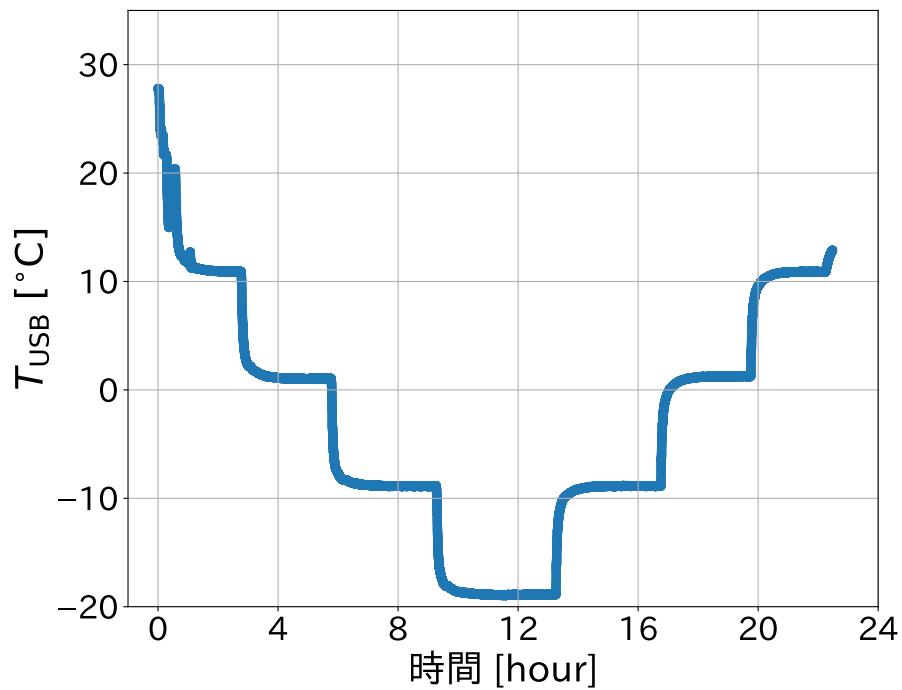


図 4.3: 恒温槽の温度変化

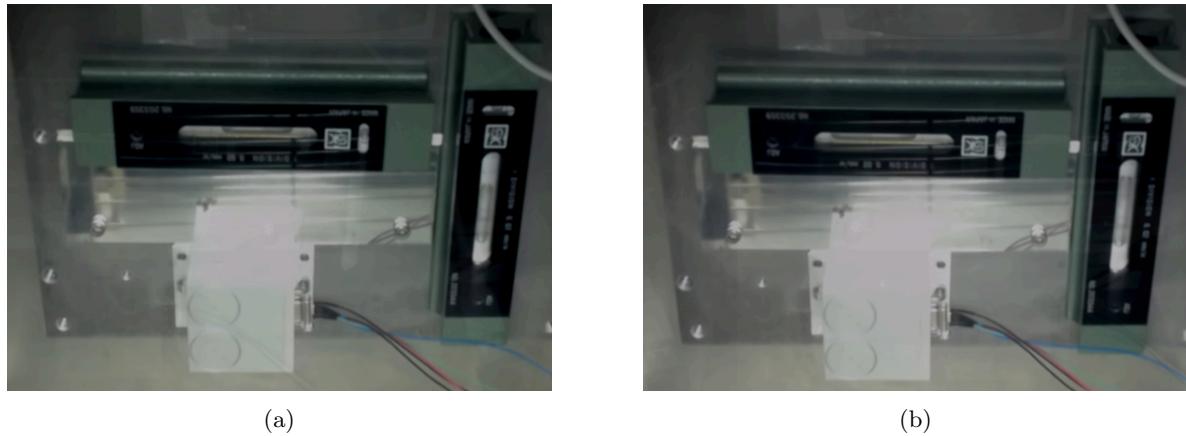


図 4.4: Web カメラを用いて撮影された恒温槽内の様子。(a) $T_{\text{USB}} \approx 12^{\circ}\text{C}$ で撮影された写真。(b) $T_{\text{USB}} \approx -18^{\circ}\text{C}$ で撮影された写真。

4.3.2 評価結果

観測サイトでの気温変動は十分ゆっくりであるか、較正の時間帯を選ぶことで急激な温度変化を避けることができるため、恒温槽の温度が安定し、評価計全体と熱平衡であるような状態のデータを用いて評価を行う。図 4.5 に重力参照計の X 軸が output する温度 T_X と、その温度が安定的になったときの出力角度 θ_X の変化を、図 4.6 に Y 軸について同様の結果を示す。温度安定区間は、図 4.5(a)、図 4.6(a)において、緑色でマスクした部分である。各温度安定時の出力角度は、それぞれ平均を取り、その標準偏差と気泡管水準器が保証する 0.01° を誤差として示している。どちらの軸に関しても、ヒステリシスを見るために冷却時と昇温時のデータを分けて示している。

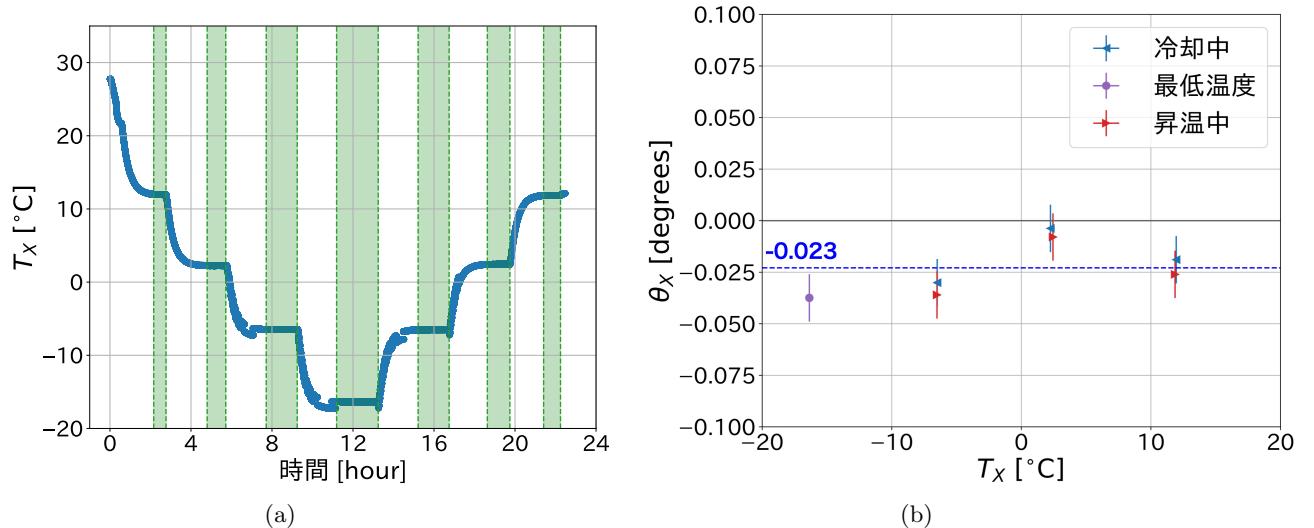


図 4.5: 重力参照計の X 軸の温度変化と出力角度の変化。(a) X 軸の温度 T_X の変化と切り取った温度安定区間。(b) X 軸の出力角度 θ_X の温度依存性。

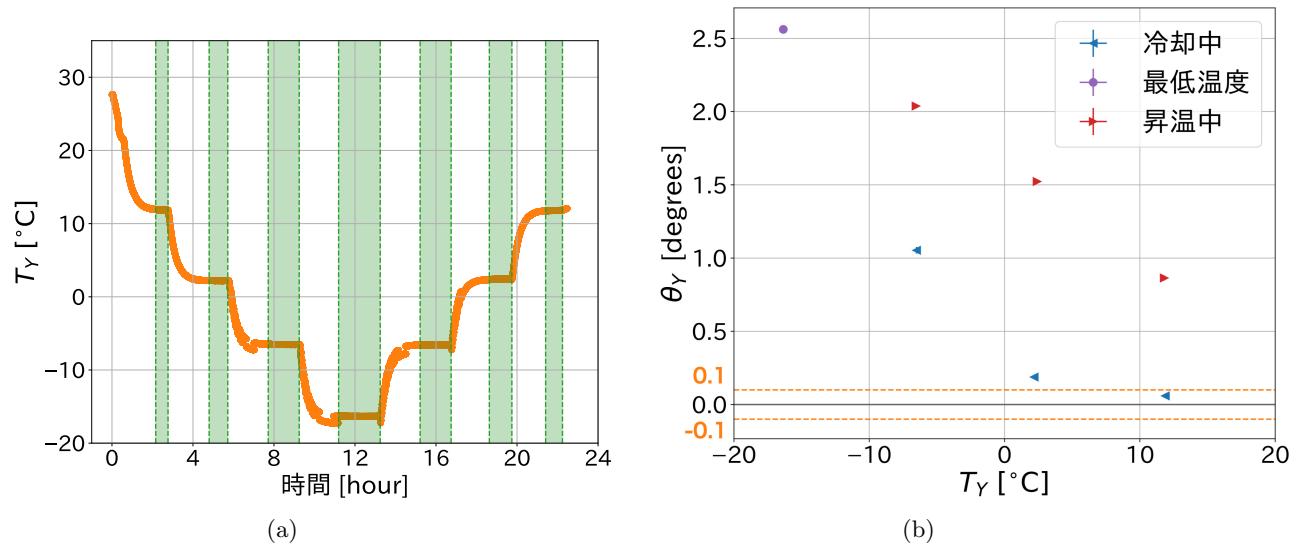


図 4.6: 重力参照計の Y 軸の温度変化と出力角度の変化。(a) Y 軸の温度 T_Y の変化と切り取った温度安定区間。(b) Y 軸の出力角度 θ_Y の温度依存性。

4.3.3 評価結果の考察

4.3.4 まとめ

第5章 ワイヤーのたわみ量評価系の開発と、自動化手法の確立

これまでに述べたように、ワイヤーのたわみは

- 5.1 過去の測定手法
- 5.2 測定系の設計
- 5.3 解析手法
- 5.4 作成したシステムのパフォーマンスチェック
- 5.5 UHF用ワイヤーグリッドのたわみの測定

第6章 今後の展望

希望ある将来について書こうね。

第7章 結論

謝辭

Thank you!

参考文献

- [1] Aashrita Mangu, Lance Corbett, Sanah Bhimani, Fred Carl, Samuel Day-Weiss, Brooke DiGia, Josquin Errard, Nicholas Galitzki, Masashi Hazumi, Shawn W. Henderson, Amber Miller, Jenna Moore, Xue Song, Tran Tsan, Yuhan Wang, and Andrea Zonca. The Simons Observatory: Design, Integration, and Current Status of Small Aperture Telescopes. In Proceedings of XVIII International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics — PoS(TAUP2023), TAUP2023, page 003. Sissa Medialab, 1 2024.
- [2] Peter Ade, James Aguirre, Zeeshan Ahmed, Simone Aiola, Aamir Ali, David Alonso, Marcelo A. Alvarez, Kam Arnold, Peter Ashton, Jason Austermann, Humna Awan, Carlo Baccigalupi, Taylor Baillie, Darcy Barron, Nick Battaglia, Richard Battye, Eric Baxter, Andrew Bazarko, James A. Beall, Rachel Bean, Dominic Beck, Shawn Beckman, Benjamin Beringue, Federico Bianchini, Steven Boada, David Boettger, J. Richard Bond, Julian Borrill, Michael L. Brown, Sarah Marie Bruno, Sean Bryan, Erminia Calabrese, Victoria Calafut, Paolo Calisse, Julien Carron, Anthony Challinor, Grace Chesmore, Yuji Chinone, Jens Chluba, Hsiao-Mei Sherry Cho, Steve Choi, Gabriele Coppi, Nicholas F. Cothard, Kevin Coughlin, Devin Crichton, Kevin D. Crowley, Kevin T. Crowley, Ari Cukierman, John M. D' Ewart, Rolando Dünner, Tijmen de Haan, Mark Devlin, Simon Dicker, Joy Didier, Matt Dobbs, Bradley Dober, Cody J. Duell, Shannon Duff, Adri Duivenvoorden, Jo Dunkley, John Dusatko, Josquin Errard, Giulio Fabbian, Stephen Feeney, Simone Ferraro, Pedro Fluxà, Katherine Freese, Josef C. Frisch, Andrei Frolov, George Fuller, Brittany Fuzia, Nicholas Galitzki, Patricio A. Gallardo, Jose Tomas Galvez Ghersi, Jiansong Gao, Eric Gaumer, Martina Gerbino, Vera Gluscevic, Neil Goeckner-Wald, Joseph Golec, Sam Gordon, Megan Gralla, Daniel Green, Arpi Grigorian, John Groh, Chris Groppi, Yilun Guan, Jon E. Gudmundsson, Dongwon Han, Peter Hargrave, Masaya Hasegawa, Matthew Hasselfield, Makoto Hattori, Victor Haynes, Masashi Hazumi, Yizhou He, Erin Healy, Shawn W. Henderson, Carlos Hervias-Caimapo, Charles A. Hill, J. Colin Hill, Gene Hilton, Matt Hilton, Adam D. Hincks, Gary Hinshaw, Renée Hložek, Shirley Ho, Shuay-Pwu Patty Ho, Logan Howe, Zhiqi Huang, Johannes Hubmayr, Kevin Huffenberger, John P. Hughes, Anna Ijjas, Margaret Ikape, Kent Irwin, Andrew H. Jaffe, Bhuvnesh Jain, Oliver Jeong, Daisuke Kaneko, Ethan D. Karpel, Nobuhiko Katayama, Brian Keating, Sarah S. Kernasovskiy, Reijo Keskitalo, Theodore Kisner, Kenji Kiuchi, Jeff Klein, Kenda Knowles, Brian Koopman, Arthur Kosowsky, Nicoletta Krachmalnicoff, Stephen E. Kuenstner, Chao-Lin Kuo, Akito Kusaka, Jacob Lashner, Adrian Lee, Eunseong Lee, David Leon, Jason S.-Y. Leung, Antony Lewis, Yaqiong Li, Zack Li, Michele Limon, Eric Linder, Carlos Lopez-Caraballo, Thibaut Louis, Lindsay Lowry, Marius Lungu, Mathew Madhavacheril, Daisy Mak, Felipe Maldonado, Hamdi Mani, Ben Mates, Frederick Matsuda, Loïc Maurin, Phil Mauskopf, Andrew May, Niall McCallum, Chris McKenney, Jeff McMahon, P. Daniel Meerburg,

- Joel Meyers, Amber Miller, Mark Mirmelstein, Kavilan Moodley, Moritz Munchmeyer, Charles Munson, Sigurd Naess, Federico Nati, Martin Navaroli, Laura Newburgh, Ho Nam Nguyen, Michael Niemack, Haruki Nishino, John Orlowski-Scherer, Lyman Page, Bruce Partridge, Julien Peloton, Francesca Perrotta, Lucio Piccirillo, Giampaolo Pisano, Davide Poletti, Roberto Puddu, Giuseppe Puglisi, Chris Raum, Christian L. Reichardt, Mathieu Remazeilles, Yoel Rephaeli, Dominik Riechers, Felipe Rojas, Anirban Roy, Sharon Sadeh, Yuki Sakurai, Maria Salatino, Mayuri Sathyaranayana Rao, Emmanuel Schaan, Marcel Schmittfull, Neelima Sehgal, Joseph Seibert, Uros Seljak, Blake Sherwin, Meir Shimon, Carlos Sierra, Jonathan Sievers, Precious Sikhosana, Maximiliano Silva-Feaver, Sara M. Simon, Adrian Sinclair, Praween Siritanasak, Kendrick Smith, Stephen R. Smith, David Spergel, Suzanne T. Staggs, George Stein, Jason R. Stevens, Radek Stompor, Aritoki Suzuki, Osamu Tajima, Satoru Takakura, Grant Teply, Daniel B. Thomas, Ben Thorne, Robert Thornton, Hy Trac, Calvin Tsai, Carole Tucker, Joel Ullom, Sunny Vagnozzi, Alexander van Engelen, Jeff Van Lanen, Daniel D. Van Winkle, Eve M. Vavagiakis, Clara Vergès, Michael Vissers, Kasey Wagoner, Samantha Walker, Jon Ward, Ben Westbrook, Nathan Whitehorn, Jason Williams, Joel Williams, Edward J. Wollack, Zhilei Xu, Byeonghee Yu, Cyndia Yu, Fernando Zago, Hezi Zhang, and Ningfeng Zhu. The Simons Observatory: science goals and forecasts. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2019(02):056–056, February 2019.
- [3] K. Yamada, B. Bixler, Y. Sakurai, P. C. Ashton, J. Sugiyama, K. Arnold, J. Begin, L. Corbett, S. Day-Weiss, N. Galitzki, C. A. Hill, B. R. Johnson, B. Jost, A. Kusaka, B. J. Koopman, J. Lashner, A. T. Lee, A. Mangu, H. Nishino, L. A. Page, M. J. Randall, D. Sasaki, X. Song, J. Spisak, T. Tsan, Y. Wang, and P. A. Williams. The Simons Observatory: Cryogenic half wave plate rotation mechanism for the small aperture telescopes. *Review of Scientific Instruments*, 95(2), 2 2024.
- [4] Brian G. Keating, Meir Shimon, and Amit P. S. Yadav. SELF-CALIBRATION OF COSMIC MICROWAVE BACKGROUND POLARIZATION EXPERIMENTS. *The Astrophysical Journal Letters*, 762(2):L23, dec 2012.
- [5] J. P. Kaufman, N. J. Miller, M. Shimon, D. Barkats, C. Bischoff, I. Buder, B. G. Keating, J. M. Kovac, P. A. R. Ade, R. Aikin, J. O. Battle, E. M. Bierman, J. J. Bock, H. C. Chiang, C. D. Dowell, L. Duband, J. Filippini, E. F. Hivon, W. L. Holzapfel, V. V. Hristov, W. C. Jones, S. S. Kernasovskiy, C. L. Kuo, E. M. Leitch, P. V. Mason, T. Matsumura, H. T. Nguyen, N. Ponthieu, C. Pryke, S. Richter, G. Rocha, C. Sheehy, M. Su, Y. D. Takahashi, J. E. Tolan, and K. W. Yoon. Self-calibration of BICEP1 three-year data and constraints on astrophysical polarization rotation. *Phys. Rev. D*, 89:062006, 3 2014.
- [6] Sean A. Bryan, Grant P. Teply, Sara M. Simon, Martina Gerbino, Amir Ali, Yuji Chinone, Kevin Crowley, Giulio Fabbian, Patricio Gallardo, Neil Goeckner-Wald, Brian Keating, Brian Koopman, Akito Kusaka, Frederick Matsuda, Philip Mauskopf, Jeff McMahon, Federico Nati, Giuseppe Puglisi, Christian Reichardt, Maria Salatino, Zhilei Xu, and Ningfeng Zhu. Development of calibration strategies for the Simons Observatory. In Jonas Zmuidzinas and Jian-Rong Gao, editors, *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX*, page 135. SPIE, 7 2018.

- [7] M. Zemcov, P. Ade, J. Bock, M. Bowden, M. L. Brown, G. Cahill, P. G. Castro, S. Church, T. Culverhouse, R. B. Friedman, K. Ganga, W. K. Gear, S. Gupta, J. Hinderks, J. Kovac, A. E. Lange, E. Leitch, S. J. Melhuish, Y. Memari, J. A. Murphy, A. Orlando, C. O’ Sullivan, L. Piccirillo, C. Pryke, N. Rajguru, B. Rusholme, R. Schwarz, A. N. Taylor, K. L. Thompson, A. H. Turner, E. Y. S. Wu, and (QUaD collaboration). Characterization of the millimeter-wave polarization of centaurus a with quad. *The Astrophysical Journal*, 710(2):1541, feb 2010.
- [8] The Polarbear Collaboration: P. A. R. Ade, Y. Akiba, A. E. Anthony, K. Arnold, M. Atlas, D. Barron, D. Boettger, J. Borrill, S. Chapman, Y. Chinone, M. Dobbs, T. Ellefot, J. Errard, G. Fabbian, C. Feng, D. Flanigan, A. Gilbert, W. Grainger, N. W. Halverson, M. Hasegawa, K. Hattori, M. Hazumi, W. L. Holzapfel, Y. Hori, J. Howard, P. Hyland, Y. Inoue, G. C. Jaehnig, A. H. Jaffe, B. Keating, Z. Kermish, R. Keskitalo, T. Kisner, M. Le Jeune, A. T. Lee, E. M. Leitch, E. Linder, M. Lungu, F. Matsuda, T. Matsumura, X. Meng, N. J. Miller, H. Morii, S. Moyerman, M. J. Myers, M. Navaroli, H. Nishino, A. Orlando, H. Paar, J. Peloton, D. Poletti, E. Quealy, G. Rebeiz, C. L. Reichardt, P. L. Richards, C. Ross, I. Schanning, D. E. Schenck, B. D. Sherwin, A. Shimizu, C. Shimmin, M. Shimon, P. Siritanasak, G. Smecher, H. Spieler, N. Stebor, B. Steinbach, R. Stompor, A. Suzuki, S. Takakura, T. Tomaru, B. Wilson, A. Yadav, and O. Zahn. A MEASUREMENT OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND B-MODE POLARIZATION POWER SPECTRUM AT SUB-DEGREE SCALES WITH POLARBEAR. *The Astrophysical Journal*, 794(2):171, oct 2014.
- [9] E. M. Leitch, J. M. Kovac, C. Pryke, J. E. Carlstrom, N. W. Halverson, W. L. Holzapfel, M. Dragovan, B. Reddall, and E. S. Sandberg. Measurement of polarization with the Degree Angular Scale Interferometer. *Nature*, 420(6917):763–771, 12 2002.
- [10] Yuki D. Takahashi, Denis Barkats, John O. Battle, Evan M. Bierman, James J. Bock, H. Cynthia Chiang, C. Darren Dowell, Eric F. Hivon, William L. Holzapfel, Viktor V. Hristov, William C. Jones, J. P. Kaufman, Brian G. Keating, John M. Kovac, Chao-Lin Kuo, Andrew E. Lange, Erik M. Leitch, Peter V. Mason, Tomotake Matsumura, Hien T. Nguyen, Nicolas Ponthieu, Graca M. Rocha, Ki Won Yoon, P. Ade, and L. Duband. CMB polarimetry with BICEP: instrument characterization, calibration, and performance. In William D. Duncan, Wayne S. Holland, Stafford Withington, and Jonas Zmuidzinas, editors, *Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy IV*, volume 7020, page 70201D. SPIE, 8 2008.
- [11] P. A. R. Ade, R. W. Aikin, D. Barkats, S. J. Benton, C. A. Bischoff, J. J. Bock, J. A. Brevik, I. Buder, E. Bullock, C. D. Dowell, L. Duband, J. P. Filippini, S. Fliescher, S. R. Golwala, M. Halpern, M. Hasselfield, S. R. Hildebrandt, G. C. Hilton, K. D. Irwin, K. S. Karkare, J. P. Kaufman, B. G. Keating, S. A. Kernasovskiy, J. M. Kovac, C. L. Kuo, E. M. Leitch, M. Lueker, C. B. Netterfield, H. T. Nguyen, R. O’ Brient, R. W. Ogburn IV, A. Orlando, C. Pryke, S. Richter, R. Schwarz, C. D. Sheehy, Z. K. Staniszewski, R. V. Sudiwala, G. P. Teply, J. E. Tolan, A. D. Turner, A. G. Vieregg, C. L. Wong, and K. W. Yoon. Bicep2. III. INSTRUMENTAL SYSTEMATICS. *The Astrophysical Journal*, 814(2):110, November 2015.

- [12] D. Hanson, S. Hoover, A. Crites, P. A. R. Ade, K. A. Aird, J. E. Austermann, J. A. Beall, A. N. Bender, B. A. Benson, L. E. Bleem, J. J. Bock, J. E. Carlstrom, C. L. Chang, H. C. Chiang, H-M. Cho, A. Conley, T. M. Crawford, T. de Haan, M. A. Dobbs, W. Everett, J. Gallicchio, J. Gao, E. M. George, N. W. Halverson, N. Harrington, J. W. Henning, G. C. Hilton, G. P. Holder, W. L. Holzapfel, J. D. Hrubes, N. Huang, J. Hubmayr, K. D. Irwin, R. Keisler, L. Knox, A. T. Lee, E. Leitch, D. Li, C. Liang, D. Luong-Van, G. Marsden, J. J. McMahon, J. Mehl, S. S. Meyer, L. Mocanu, T. E. Montroy, T. Natoli, J. P. Nibarger, V. Novosad, S. Padin, C. Pryke, C. L. Reichardt, J. E. Ruhl, B. R. Saliwanchik, J. T. Sayre, K. K. Schaffer, B. Schulz, G. Smecher, A. A. Stark, K. T. Story, C. Tucker, K. Vanderlinde, J. D. Vieira, M. P. Viero, G. Wang, V. Yefremenko, O. Zahn, and M. Zemcov. Detection of B-Mode Polarization in the Cosmic Microwave Background with Data from the South Pole Telescope. *Physical Review Letters*, 111(14), September 2013.
- [13] Akito Kusaka, John Appel, Thomas Essinger-Hileman, James A. Beall, Luis E. Campusano, Hsiao-Mei Cho, Steve K. Choi, Kevin Crowley, Joseph W. Fowler, Patricio Gallardo, Matthew Hasselfield, Gene Hilton, Shuay-Pwu P. Ho, Kent Irwin, Norman Jarosik, Michael D. Niemack, Glen W. Nixon, Michael Nolta, Lyman A. Page Jr., Gonzalo A. Palma, Lucas Parker, Srinivasan Raghunathan, Carl D. Reintsema, Jonathan Sievers, Sara M. Simon, Suzanne T. Staggs, Katerina Visnjic, and Ki-Won Yoon. Results from the Atacama B-mode Search (ABS) experiment. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2018(09):005–005, September 2018.
- [14] QUIET Collaboration, C. Bischoff, A. Brizius, I. Buder, Y. Chinone, K. Cleary, R. N. Dumoulin, A. Kusaka, R. Monsalve, S. K. Næss, L. B. Newburgh, R. Reeves, K. M. Smith, I. K. Wehus, J. A. Zuntz, J. T. L. Zwart, L. Bronfman, R. Bustos, S. E. Church, C. Dickinson, H. K. Eriksen, P. G. Ferreira, T. Gaier, J. O. Gundersen, M. Hasegawa, M. Hazumi, K. M. Huffenberger, M. E. Jones, P. Kangaslahti, D. J. Kapner, C. R. Lawrence, M. Limon, J. May, J. J. McMahon, A. D. Miller, H. Nguyen, G. W. Nixon, T. J. Pearson, L. Piccirillo, S. J. E. Radford, A. C. S. Readhead, J. L. Richards, D. Samtleben, M. Seiffert, M. C. Shepherd, S. T. Staggs, O. Tajima, K. L. Thompson, K. Vanderlinde, R. Williamson, and B. Winstein. FIRST SEASON QUIET OBSERVATIONS: MEASUREMENTS OF COSMIC MICROWAVE BACKGROUND POLARIZATION POWER SPECTRA AT 43 GHz IN THE MULTIPOLE RANGE $25 \leq \ell \leq 475$. *The Astrophysical Journal*, 741(2):111, oct 2011.
- [15] J. A. Sobrin, A. J. Anderson, A. N. Bender, B. A. Benson, D. Dutcher, A. Foster, N. Goeckner-Wald, J. Montgomery, A. Nadolski, A. Rahlin, P. A. R. Ade, Z. Ahmed, E. Anderes, M. Archipley, J. E. Austermann, J. S. Avva, K. Aylor, L. Balkenhol, P. S. Barry, R. Basu Thakur, K. Benabed, F. Bianchini, L. E. Bleem, F. R. Bouchet, L. Bryant, K. Byrum, J. E. Carlstrom, F. W. Carter, T. W. Cecil, C. L. Chang, P. Chaubal, G. Chen, H.-M. Cho, T.-L. Chou, J.-F. Cliche, T. M. Crawford, A. Cukierman, C. Daley, T. de Haan, E. V. Denison, K. Dibert, J. Ding, M. A. Dobbs, W. Everett, C. Feng, K. R. Ferguson, J. Fu, S. Galli, A. E. Gambrel, R. W. Gardner, R. Gualtieri, S. Guns, N. Gupta, R. Guyser, N. W. Halverson, A. H. Harke-Hosemann, N. L. Harrington, J. W. Henning, G. C. Hilton, E. Hivon, G. P. Holder, W. L. Holzapfel, J. C. Hood, D. Howe, N. Huang, K. D. Irwin, O. B. Jeong, M. Jonas, A. Jones, T. S. Khaire, L. Knox, A. M. Kofman, M. Korman,

- D. L. Kubik, S. Kuhlmann, C.-L. Kuo, A. T. Lee, E. M. Leitch, A. E. Lowitz, C. Lu, S. S. Meyer, D. Michalik, M. Millea, T. Natoli, H. Nguyen, G. I. Noble, V. Novosad, Y. Omori, S. Padin, Z. Pan, P. Paschos, J. Pearson, C. M. Posada, K. Prabhu, W. Quan, C. L. Reichardt, D. Riebel, B. Riedel, M. Rouble, J. E. Ruhl, B. Saliwanchik, J. T. Sayre, E. Schiappucci, E. Shirokoff, G. Smecher, A. A. Stark, J. Stephen, K. T. Story, A. Suzuki, C. Tandoi, K. L. Thompson, B. Thorne, C. Tucker, C. Umita, L. R. Vale, K. Vanderlinde, J. D. Vieira, G. Wang, N. Whitehorn, W. L. K. Wu, V. Yefremenko, K. W. Yoon, and M. R. Young. The Design and Integrated Performance of SPT-3G. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 258(2):42, feb 2022.
- [16] Masaaki Murata, Hironobu Nakata, Kengo Iijima, Shunsuke Adachi, Yudai Seino, Kenji Kiuchi, Frederick Matsuda, Michael J. Randall, Kam Arnold, Nicholas Galitzki, Bradley R. Johnson, Brian Keating, Akito Kusaka, John B. Lloyd, Joseph Seibert, Maximiliano Silva-Feaver, Osamu Tajima, Tomoki Terasaki, and Kyohei Yamada. The simons observatory: A fully remote controlled calibration system with a sparse wire grid for cosmic microwave background telescopes. *Review of Scientific Instruments*, 94(12), December 2023.
- [17] 村田雅彬. Simons Observatory 実験のためのスペースワイヤーグリッドを用いた偏光較正装置の開発 (Development of the sparse wire grid polarization calibrator for Simons Observatory experiment). 修士論文, 2021.
- [18] 中田嘉信. CMB 偏光の精密観測にむけた遠隔較正システム Sparse Wire Grid Calibrator の開発研究. 修士論文, 2022.
- [19] 飯島健五. Simons Observatory 実験に用いる偏光角度較正手法の開発と性能評価 (Development and characterization of a method for polarization-angle calibration for Simons Observatory experiment). 修士論文, 2023.