

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17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	3
2.3.2 光学筒	3
2.3.3 Transition Edge Sensor (TES)	3
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	6
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	9
3.1 偏光信号の生成原理	9
3.2 偏光角較正の原理	10
3.3 較正装置の設計と特徴	11
3.3.1 スペースワイヤーグリッドの設計	11
3.3.2 回転機構	13
3.3.3 切り替え機構	13
3.3.4 重力参照計	14
3.4 系統誤差	17
3.4.1 ワイヤーの設置精度に伴う系統誤差	17
3.4.2 エンコーダの測定精度に伴う系統誤差	17
3.4.3 エンコーダの零点測定に伴う系統誤差	17
3.4.4 重力参照計の精度に伴う系統誤差	17
3.4.5 ワイヤーのたわみに伴う系統誤差	18
3.4.6 系統誤差のまとめと本論文の位置付け	21
第 4 章 重力参照計の評価	23
4.1 要求精度と評価内容	23
4.2 重力参照計の概要	24
4.3 長期間測定における出力の安定性の評価	24
4.3.1 評価手法	24
4.3.2 評価結果とその考察	25
4.4 温度変動による出力の変化の評価	26
4.4.1 評価手法	26

4.4.2 評価結果とその考察	28
4.5 初期不良の検証	29
4.5.1 評価系	29
4.5.2 評価結果とその考察	31
4.6 まとめ	32
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	33
5.1 過去の測定手法における問題点と開発目標	33
5.2 評価系の概要と評価原理	33
5.2.1 評価系の概要	33
5.2.2 評価原理	35
5.2.3 評価系の光学系を考慮した z の測定原理	38
5.2.4 評価系の設計から生まれる z の誤差の見積もり	39
5.3 解析手法	40
5.3.1 解析の流れ	40
5.3.2 スケーラの fitting	40
5.3.3 ストレートエッジとワイヤーの fitting	42
5.3.4 z の算出	46
5.3.5 カテナリーでの fitting	47
5.4 開発した評価系の原理検証	47
5.4.1 評価手法	47
5.4.2 評価結果とその考察	47
5.5 スパースワイヤーグリッドのたわみ量の評価	47
第6章 今後の展望	48
第7章 結論	49
第8章 ストークスパラメータ	51
8.1 ストークスパラメータの定義	51
8.2 座標回転に対するストークスパラメータの変換	52

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 0.5 m の小口径望遠鏡（Small Aperture Telescope, SAT）3 台と、口径 6 m 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]。具体的な数値目標を LAT, SAT セクションで書く。

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、広大な ℓ に渡って CMB パワースペクトルの精密な測定を行い、様々な物理へのアプローチを実現する。

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。SAT 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（光軸）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 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 軸は HWP の光軸、2 軸は 1 軸に垂直な HWP 平面上の軸を表し、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、ストークスパラメータ（定義は 8 を参照）がそれぞれ $I_{\text{in}}(t), Q_{\text{in}}(t), U_{\text{in}}(t)$ であるような直線偏光した入射光を、HWP を通過したあとに片偏波のアンテナで電場強度を測った際の出力信号 $d_m(t)$ 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。この式はその偏光角をほとんど時間変化しない $\Omega \sim 0$ であるような信号 $Q_{\text{in}} + iU_{\text{in}}$ が HWP を通過することで、周波数 $\Omega + 4\omega_{\text{HWP}}$ のところに変調され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。式 (2.7) より、 $Q_{\text{in}} + iU_{\text{in}}$ 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 $d_{d,\text{det}}$ は

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

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

となる。ここで、 χ_0 は HWP に搭載されているエンコーダによって決定されるオフセットである。

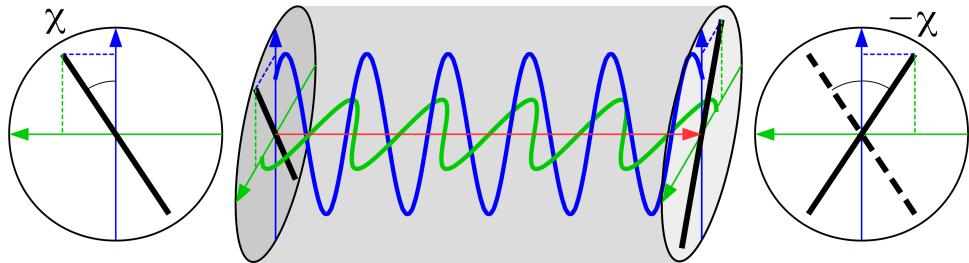


図 2.1: HWP を通過することで、偏光角が変化することを示した概念図^[4]。青い軸が 1 軸、緑の軸が 2 軸に対応する。入射した直線偏光の偏光角が 1 軸に対して χ であり、複屈折によって -2χ だけ変化する。

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、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。^{[5][6]} 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

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

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 2.2 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。^[7] 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検出器の偏光角が対応す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天体表面上の異なる位置での偏光方向の違いが見えるため、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存在する。小さい天体であるために検出器全てを一度に照らすことができず、全ての検出器を較正するためにはスキャンを行う必要がある。さらに、SO の拠点であるチリのアタカマ砂漠は南半球に位置しており、TauA の昇る高度が高くないため 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)

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^[8]。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見える内部構造の影響、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。月の観測は TauA と同様に観測する月の表面上の位置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えてしまい、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 スパースワイヤーグリッド

スパ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3.1節にて後述するが、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。

スパ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。また、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。

2.4.2.7 自己較正

標準宇宙モデルでは $C_\ell^{EB} = 0$ である。これをを利用して、相対角度較正を十分に行なった上で $C_\ell^{EB} = 0$ 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、 $C_\ell^{EB} = 0$ を仮定してしまうため、標準宇宙モデルを超えるような物理に対する感度を捨てる可能性がある。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。

2.4.2.8 偏光角較正手法のまとめとスパースワイヤーグリッドの採用理由

先行研究における偏光角較正の手法と、その精度を表2.1にまとめる。いずれの手法においても、精度 $\delta\theta < 0.1^\circ$ を達成したものはない。SATではスパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正を採用することで、この精度を目指す。スパースワイヤーグリッドは周波数依存性が小さく、広い周波数帯で均一に直線偏光を作り出せるという点と、望遠鏡の視野を全て覆うような装置と

して作成可能なため、全ての検出器を同時に較正可能である点が優れている。また、自己較正のように標準宇宙モデルを超える物理に対する感度を捨てることもない。このような理由から、他の手法よりも系統誤差の削減が期待でき、採用に至った。

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 ^[9]	150	Tau A	0.43°
		自己較正	0.2°
DASI ^[10]	26 ~ 36	月, デンスワイヤーグリッド	0.4°
BICEP ^[11]	100, 150, 220	誘電体シート	0.7°
BICEP2 ^[12]	150	誘電体シート	0.2° (rel.)
		自己較正	1°
SPTpol ^[13]	150	デンスワイヤーグリッド	1°
	95	デンスワイヤーグリッド	1.5°
ABS ^[14]	145	スペースワイヤーグリッド	1.1°
		Tau A	1.9°
		自己較正	1.6°
QUIET ^[15]	43, 94	月	1°
		Tau A, スペースワイヤーグリッド	3°
SPT-3G ^[16]	90		2.0°
		Cen A	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^[17]。本章では、偏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。

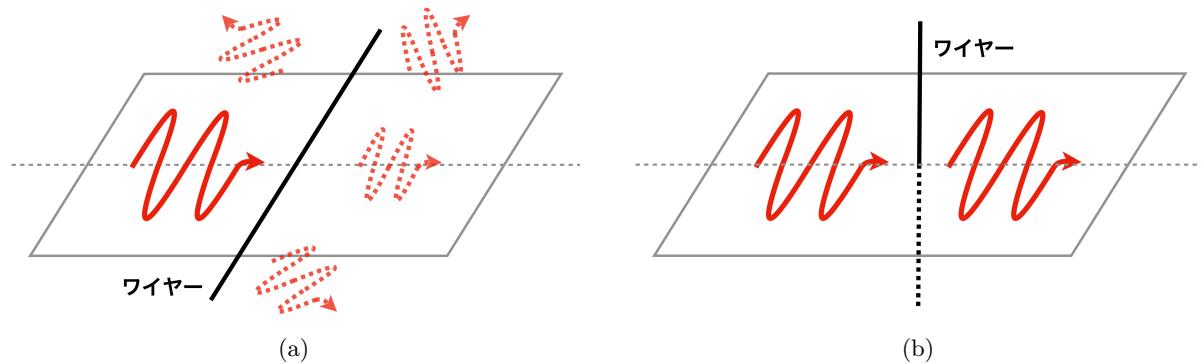


図3.1: ワイヤーが作る偏光信号のイメージ。(a)はワイヤーに沿う方向に偏光した光が入射し、まわりに散乱・透過する様子。(b)はワイヤーに対し垂直な方向に偏光した光が反射されることなく透過する様子。

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3.2に示す。これを復調することで、式(2.9)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、環境熱放射が非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(3.3)。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。



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

3.3 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、入射光の波長(最大 11 mm)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 のタンゲステンワイヤーを 20 mm 間隔で 39 本張り巡らせたものを使用する^[18]。

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ブラスト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。

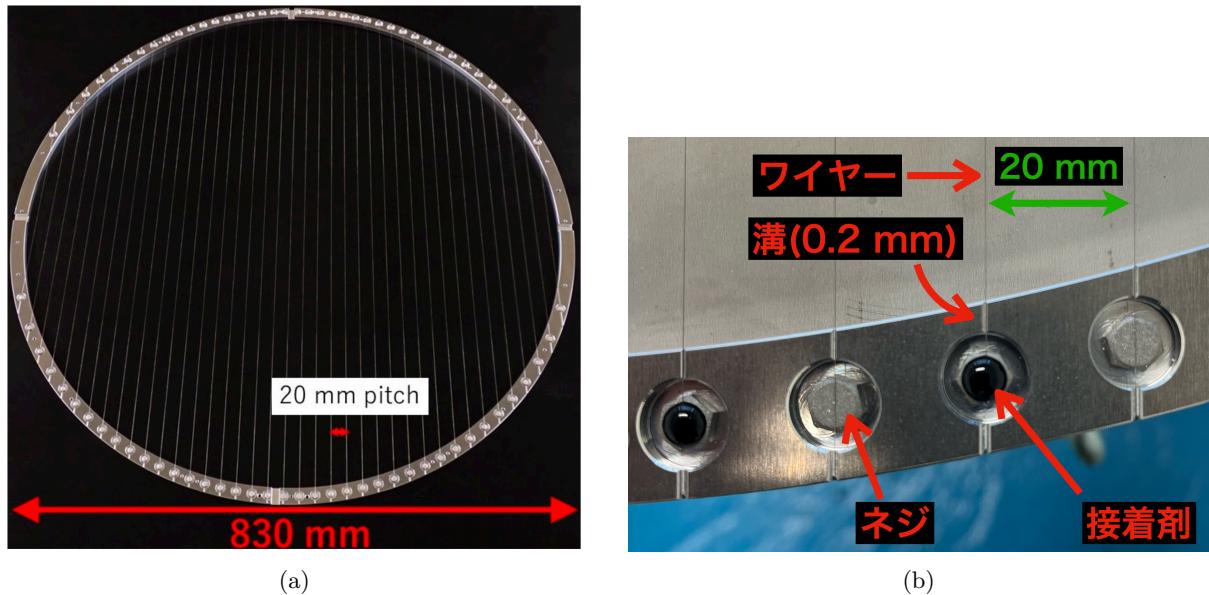


図 3.4: (a) スペースワイヤーグリッドの概観^[17] (b) ワイヤー接着部分の詳細

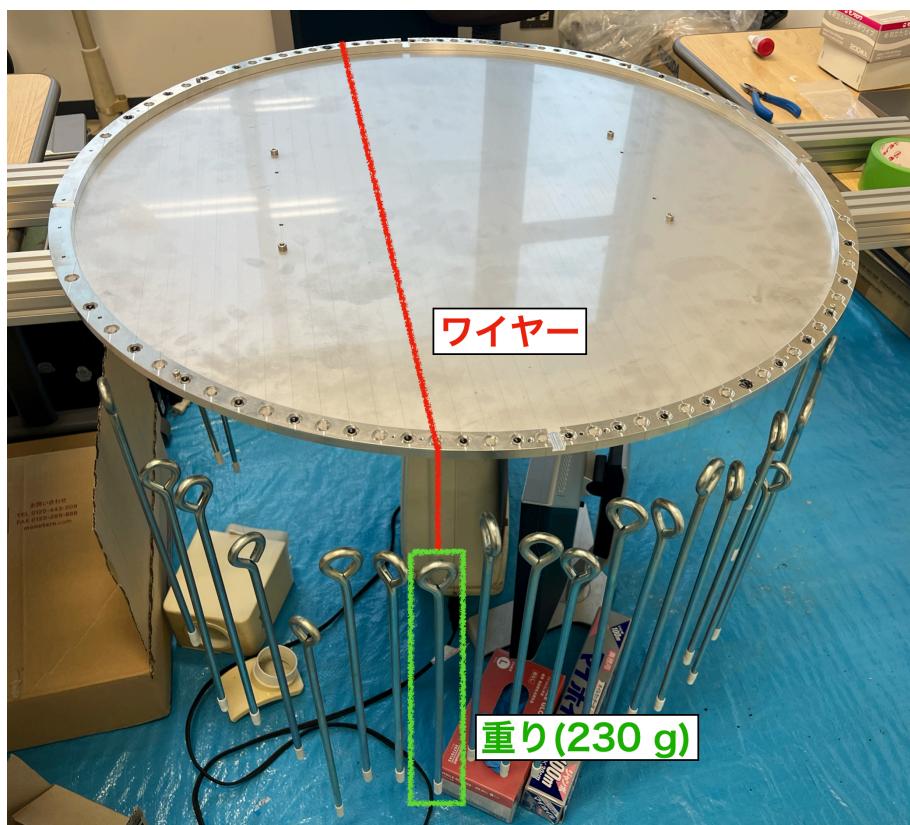


図 3.5: ワイヤーを張るときの様子。ワイヤーの両端に 230 g の重りをつけ、張力をかけていく。

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 [19]。

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 [19]。

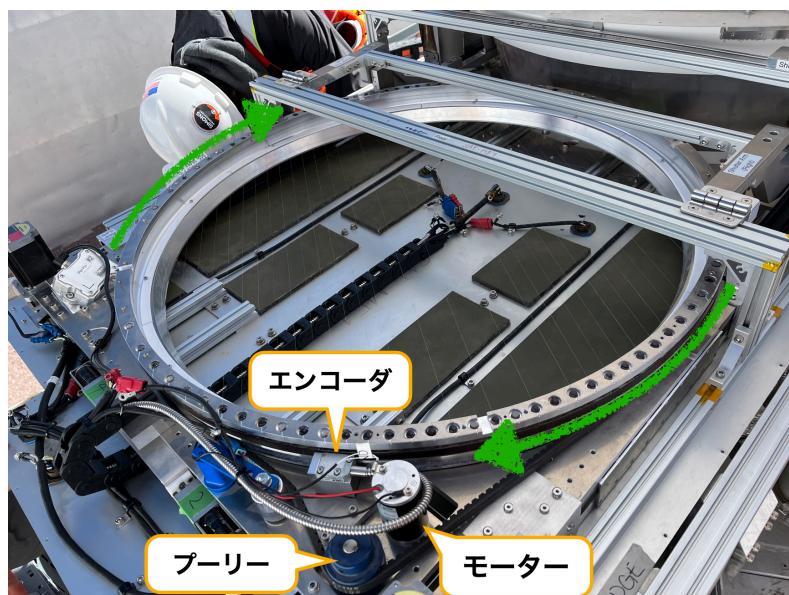


図 3.6: スペースワイヤーグリッドに搭載された回転機構の概観

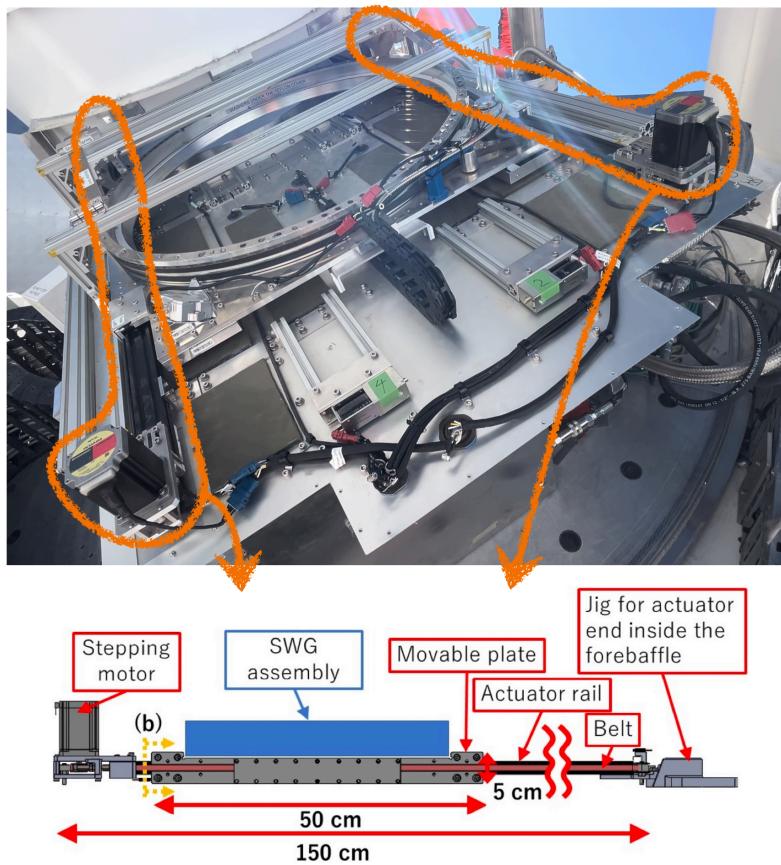


図 3.7: スパースワイヤーグリッドに搭載された切り替え機構の概観。上図が観測サイトにインストールされた較正装置であり、オレンジの線で囲んだ部分の詳細を下図に示している [17]。

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。エンコーダはスパ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パ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} (図 3.8(b)) は

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

と表される [17]。図 3.8(b) にスパ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

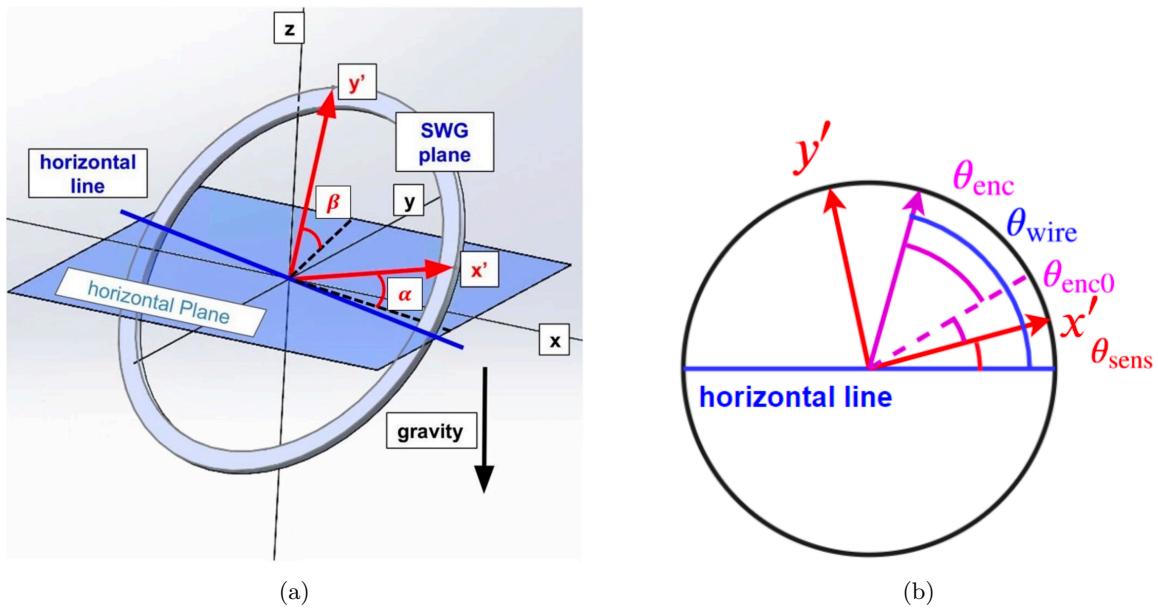


図 3.8: (a) 絶対角度測定のための各種平面と角度の定義 (b) スペースワイアーグリッド平面における回転角と絶対角度

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し、スペースワイア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、スペースワイアーグリッドは 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もに 0° を指すように設置されている。図 3.9 に重力参照計を設置する治具を示す。上記のオフセットを打ち消すため、治具にスロープが切られている。スペースワイアーグリッドに取り付けられた重力参照計の様子を図 3.10、3.11 に示す。図 3.10 中の x' 軸と y' 軸は図 3.8a(b) 中の x' 軸と y' 軸と同一のものであり、 X 軸と Y 軸は重力参照計の軸を表す。

X 軸と Y 軸は x' 軸と y' 軸の間の変換について述べる。初めに、 $x'y'z'$ 座標系が右手系になるように z' 軸を取り、 XYZ 座標系が右手系になるように Z 軸を取る。 x' , y' , z' 軸の基底ベクトルを $\hat{e}_{x'}$, $\hat{e}_{y'}$, $\hat{e}_{z'}$ とし、 X , Y , Z 軸の基底ベクトルを \hat{e}_X , \hat{e}_Y , \hat{e}_Z とする。基底の変換は

$$\begin{pmatrix} \hat{e}_X \\ \hat{e}_Y \\ \hat{e}_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{\text{slope}2} & \sin \theta_{\text{slope}2} \\ 0 & -\sin \theta_{\text{slope}2} & \cos \theta_{\text{slope}2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{\text{slope}1} & \sin \theta_{\text{slope}1} & 0 \\ -\sin \theta_{\text{slope}1} & \cos \theta_{\text{slope}1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}_{x'} \\ \hat{e}_{y'} \\ \hat{e}_{z'} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

となる。これはすなわち、 x' , y' 軸を z' 軸まわりに $\theta_{\text{slope}1}$ だけ回転し、これによって移った x' 軸まわりに $\theta_{\text{slope}2}$ だけ回転することで X , Y 軸を得ることを意味する。これらの変換行列や角度

は治具のデザインによって決まり、角度の設計値は $\theta_{\text{slope}1} = 210^\circ$, $\theta_{\text{slope}2} = 40^\circ$ である。

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、 α , β を θ_X , θ_Y を用いて表すと、式(3.5)から

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

$$\begin{aligned}\sin \beta &= \sin \theta_{\text{slope}1} \sin \theta_X - \sin \theta_{\text{slope}1} \cos \theta_{\text{slope}2} \sin \theta_Y \\ &\quad - \cos \theta_{\text{slope}1} \sin \theta_{\text{slope}2} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y}\end{aligned}\quad (3.7)$$

となることがわかる。

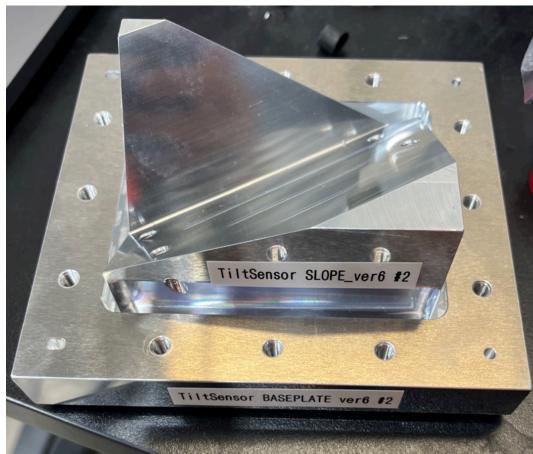


図 3.9: 重力参照計を設置するスロープが切られた治具

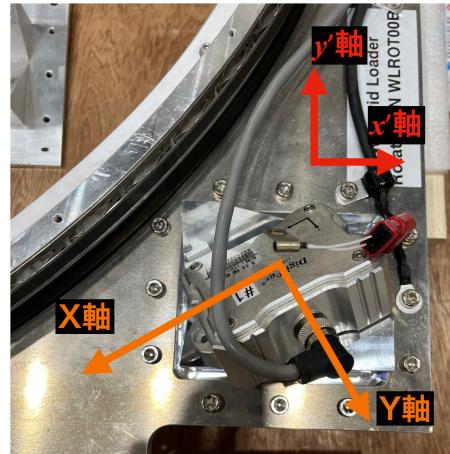


図 3.10: 設置された重力参照計の詳細と各軸のイメージ

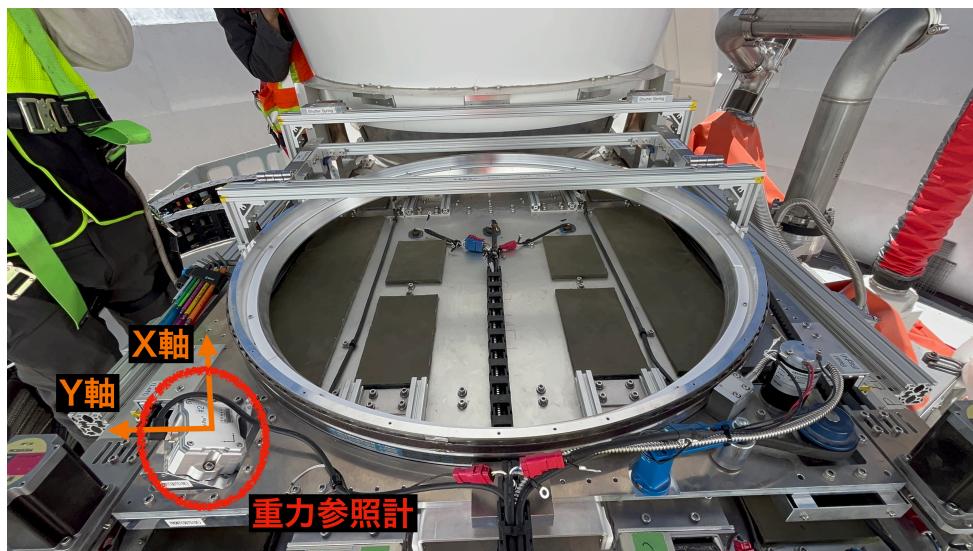


図 3.11: 重力参照計の設置状況

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^[20]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 $\theta_{wire} = 0^\circ$ となつた状態で 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^[20]。

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。重力参照計が満たすべき要求として、

- 長期間の測定において、そのオフセットの変動が小さいこと
- 観測サイトにおける気温変動を考慮し、 $-20^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ での出力変動が小さいこと

が挙げられる。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^[20]にて 2 ヶ月の期間をあけて測定されたオフセットに 0.3° 近くの変動があり、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

較正に使う直線偏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^[18] および^[20] にて行われているワイヤーのたわみ角 θ_{sag} の評価について述べる。

まず、ワイヤーのたわみ量 d_{sag} とたわみ角 θ_{sag} の定義を述べる。図 3.12 に示すように、ワイヤーは両端を固定された状態で重力によってたわんでいる。固定された両端を直線で結び、その直線とワイヤーの最下部との距離をたわみ量 d_{sag} とする。また、固定された両端の距離を L_{frame} としたとき、たわみ角 θ_{sag} を

$$\theta_{\text{sag}} = \arctan \left(\frac{d_{\text{sag}}}{2L_{\text{frame}}} \right) \quad (3.8)$$

と定める。図中のストレートエッジや、 z_{left} , z_{center} , z_{right} については後述する。

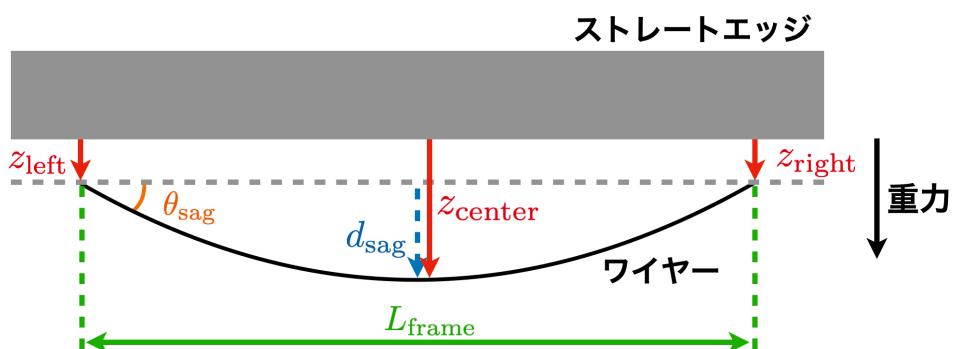


図 3.12: ワイヤーのたわみの定義

実際の評価系の概要を図 3.13 に示す。スパースワイヤ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。セットアップの横から見た概念図を図 3.14 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' とストレートエッジから測った実際のワイヤーのたわみ z の間の関係は

$$z = \frac{z'}{\cos \phi} - \alpha \tan \phi - z_s \quad (3.9)$$

$$\phi = \arctan \left(\frac{L}{\alpha + \beta} \right) \quad (3.10)$$

となる。

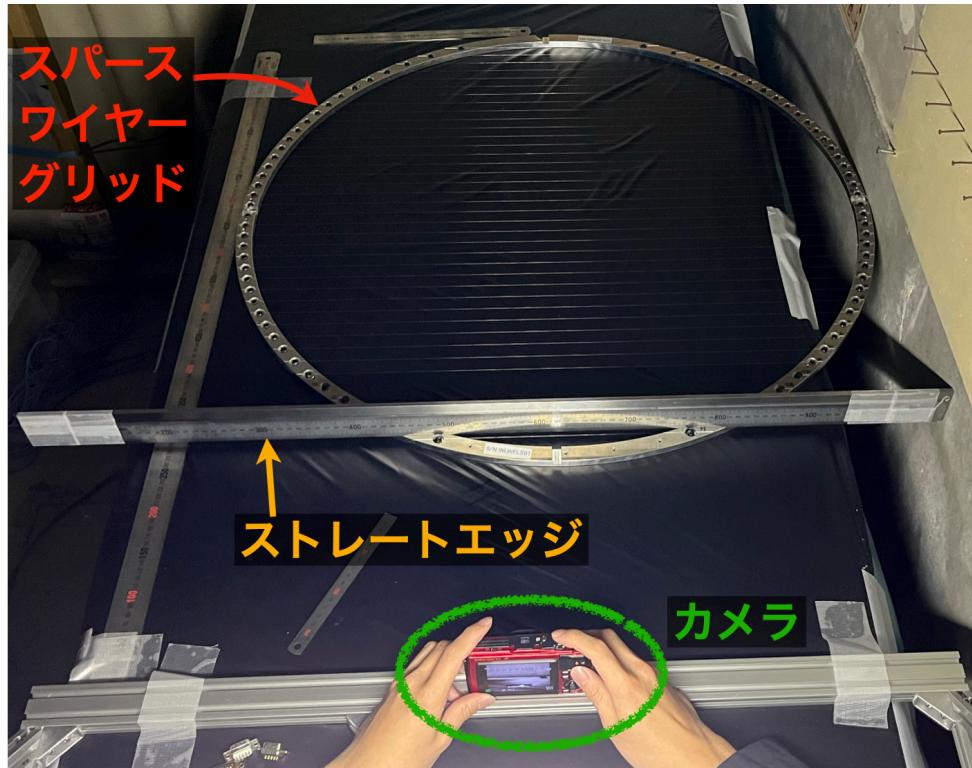


図 3.13: ワイヤーのたわみを評価する系の概要

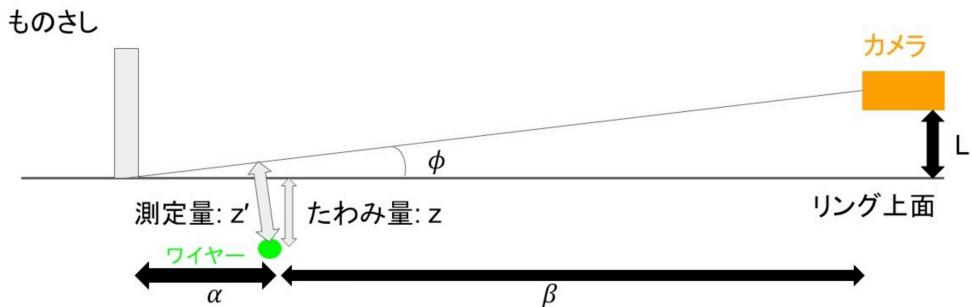


図 3.14: 先行研究におけるワイヤーのたわみを評価する系の概念図 [18]

表 3.1: たわみ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	オフセット付きの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

写真は39本全てのワイヤーに対し、その中央と両端の3箇所で撮影された。これらの撮影においては、ストレートエッジの位置の調整、カメラの位置の調整といった作業が全て人力で行われ、

一つのスパースワイヤーグリッドに対して累計4時間程度の作業時間を要した。両端ではたわみがないと考えられるため、中央で測定された z_{center} から両端で測定された z_{left}, z_{right} の平均を差し引くことで正味のたわみ量を測定できる。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的pixel数についていくつかを測ることで1pixel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3.15に示す。撮影された写真に対して、先行研究^[18]では画像寸法測定ツール「Click Measure」を用いて手動で、^[20]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、ワイヤーのたわみ角を $\theta_{sag} < 0.05^\circ$ と評価している。全てのワイヤーに対する、評価されたたわみ角 θ_{sag} の例を図3.16に示す。横軸のwire numberは測定されたワイヤーの番号を示し、縦軸はそのワイヤーのたわみ角を示す。また、青色の点は各ワイヤーに対して張られた際の張力から期待されるたわみ角を示している。いずれのワイヤーに対しても測定誤差が大きく、期待されるたわみ角から大きく外れたワイヤーが存在しているのかどうかの判別ができる。

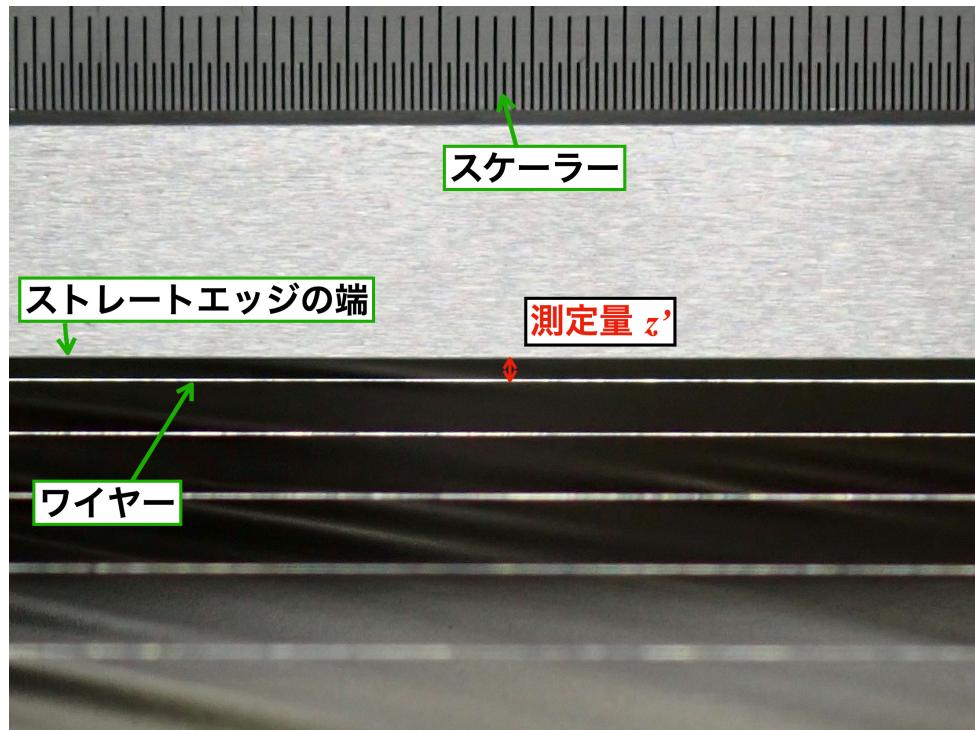


図3.15: ワイヤーのたわみ評価にて撮影された写真の例

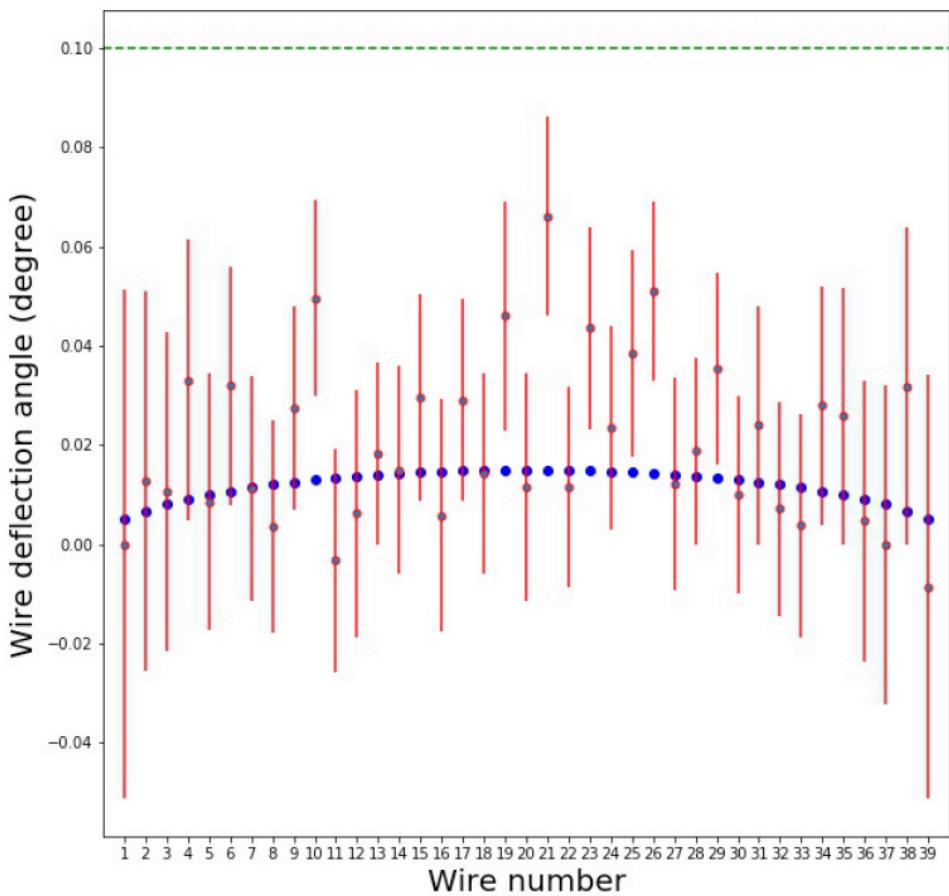


図 3.16: ワイヤーのたわみ評価の結果の例 [18]

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り、特に長期間の出力安定性という点で要求精度を満たしていない。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。また、測定精度が低く測定にかかる時間が長いことから、測定されたたわみから品質の低いワイヤーを選別し、そのワイヤーを張り直したのちに再びたわみの評価を行う、といった品質を保証するためのフィードバックをかけることが困難である。さらに、観測サイトにおける品質管理の面を考えると、定期的かつ容易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°
エンコーダ精度	< 0.03°
エンコーダ零点	< 0.04°
重力参照計	> 0.1°
ワイヤーのたわみ	< 0.05°
合計	> 0.1°

第4章 重力参照計の評価

3章にて述べたように、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。これまでに使用が想定されていた Digi-Pas 社製の DWL5000-XY は長期間の測定における出力の変化が約 0.3° となり、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、長期間における出力の安定性と出力の温度依存性という観点から評価し、その精度を決定した。本章では、はじめに要求精度と評価すべき項目について確認したのち、本重力参照計の概要を共有、各評価項目の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(3.6)(3.7)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。

SO は数年以上の長期間の実験期間が見込まれるため、それに応じて重力参照計も長期使用に耐え得る性能であることが求められる。また、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り、この温度変動に対してもその精度を欠くことがない性能が必要である。これらの状況を踏まえ、以下の2点について評価を行う。

1. 長期間測定における出力の安定性
2. 温度変動による出力の変化

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。

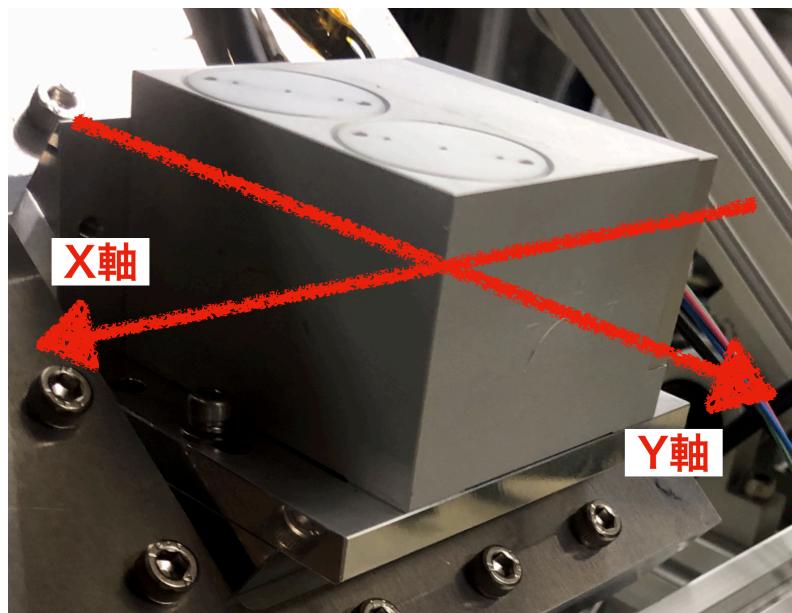


図4.1: 重力参照計 Sherborne Sensors 社 DSIC-2051-60 の外観

4.3 長期間測定における出力の安定性の評価

4.3.1 評価手法

図4.2に評価系を示す。重力参照計を鉄製の厚み10mm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、これを回すことにより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。この系を長期間保持したまま、重力参照計の出力する温度と角度を測定した。測定期間は2024年3月8日から4月9日までの32日間である。また、測定系はカメラによって1時間ごとに撮影され、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。その結果、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。

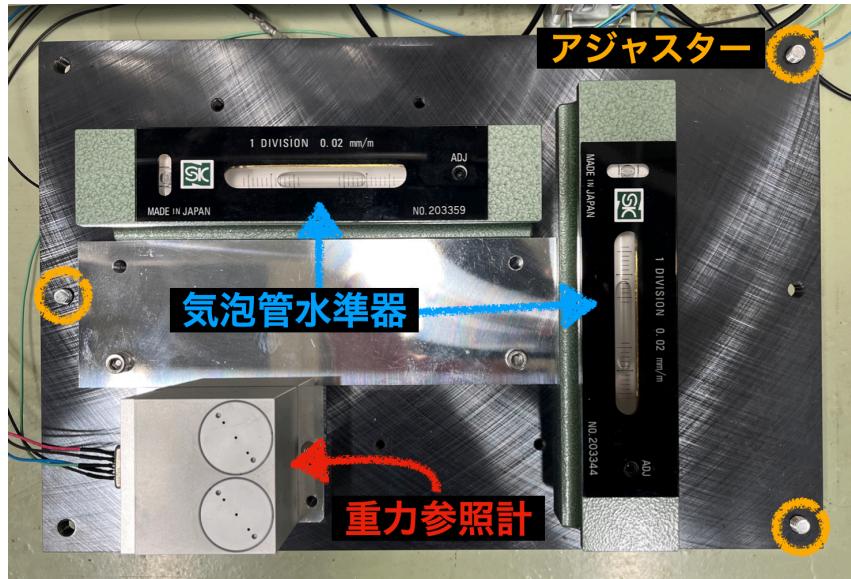
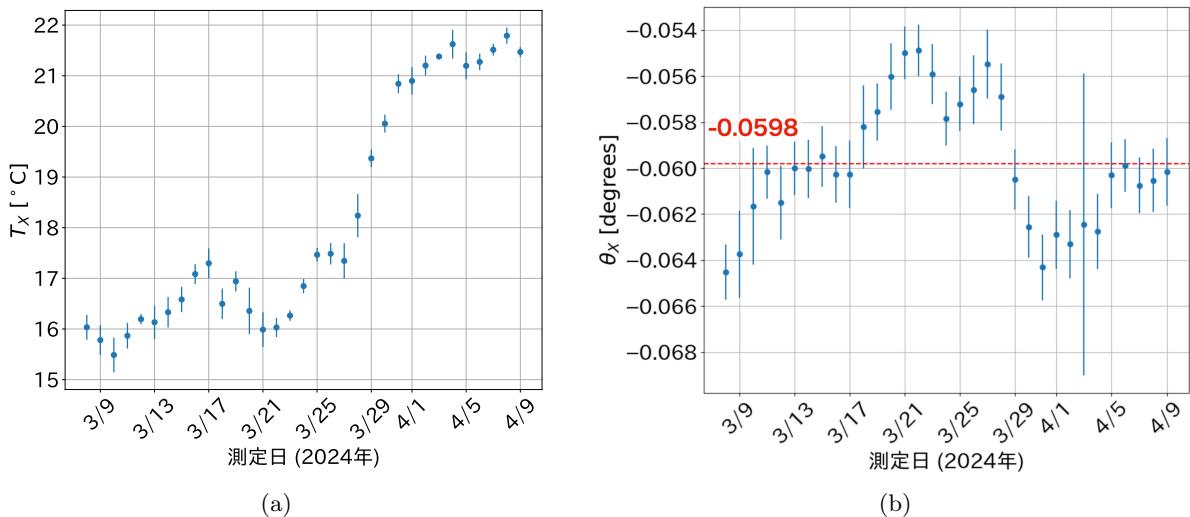


図 4.2: 長期間測定における重力参考計の評価系

4.3.2 評価結果とその考察

図 4.3 および 4.4 に測定された温度と角度を日毎に平均をとった結果を示す。誤差として、各日のデータ群の標準偏差を示している。X 軸については、日毎に平均された出力角度の平均が -0.0598° となり、その標準偏差は 0.0028° であった。この結果から、時間変化による出力角度の変化の精度を $\delta\theta_{X,\text{time}} = 0.003^\circ$ であると結論づける。Y 軸については、日毎に平均された出力角度の平均が -0.012° となり、その標準偏差は 0.034° であった。この結果から、時間変化による出力角度の変化の精度を $\delta\theta_{Y,\text{time}} = 0.034^\circ$ であると結論づける。表 4.1 にこれらの結果をまとめると、Y 軸の結果は X 軸の結果に比べ非常に大きな値となっている。図 4.4(a) と図 4.4(b) を見比べると温度の変動に伴って出力角度が大きく変化しており、この精度の違いは温度変動による出力角度の変化が X 軸と Y 軸で異なることが原因であると考えられる。次節の温度変動による出力の変化の評価にてこれを検証する。

図 4.3: 日毎に平均化された 1 ヶ月間の X 軸の温度と角度の変化。(a) X 軸の出力温度 T_x の変化。(b) X 軸の出力角度 θ_x の変化。

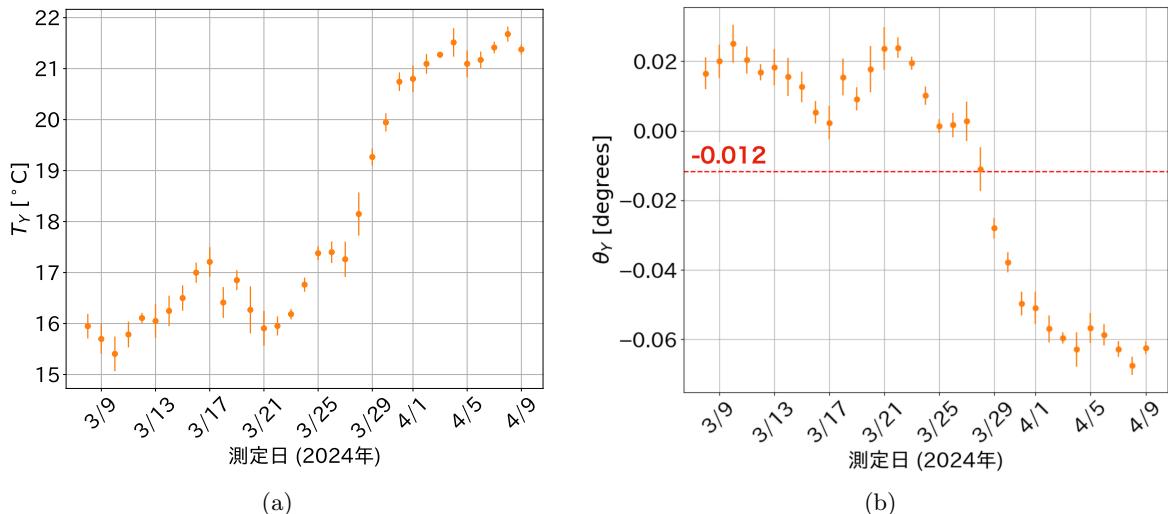


図 4.4: 日毎に平均化された 1 ヶ月間の Y 軸の温度と角度の変化。(a) Y 軸の出力温度 T_Y の変化。(b) Y 軸の出力角度 θ_Y の変化。

表 4.1: 長期間測定における重力参照計の出力の安定性の評価結果

	平均	標準偏差	精度
X 軸	-0.0598°	0.0028°	0.003°
Y 軸	-0.012°	0.034°	0.034°

4.4 温度変動による出力の変化の評価

4.4.1 評価手法

図 4.5 に評価系を示す。重力参照計をアルミニウム製の厚み 30 mm のプレートの上に設置した。長期間測定における出力の変化の評価の際と同様に、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、これを参照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 4.6 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 4.7(a) に $T_{USB} \sim 12^\circ\text{C}$ で撮影された写真を、図 4.7(b) に $T_{USB} \sim -18^\circ\text{C}$ 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貸借した。

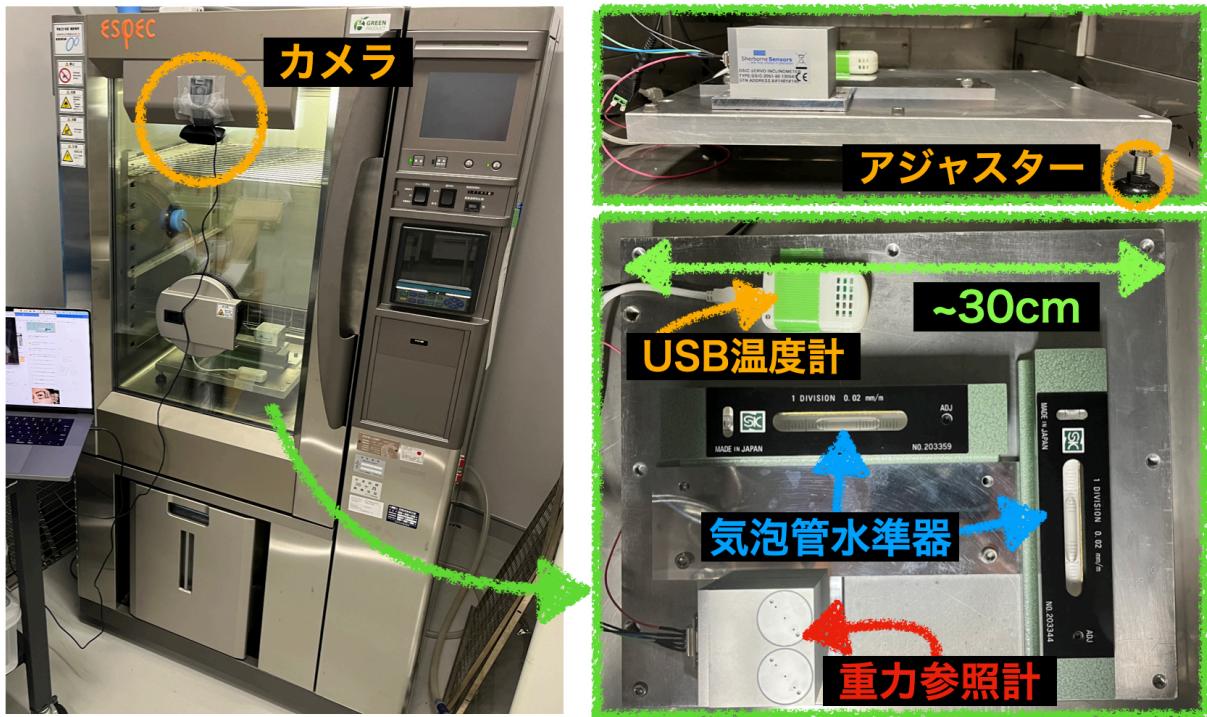


図 4.5: 恒温槽を用いた重力参照計の温度変化評価系

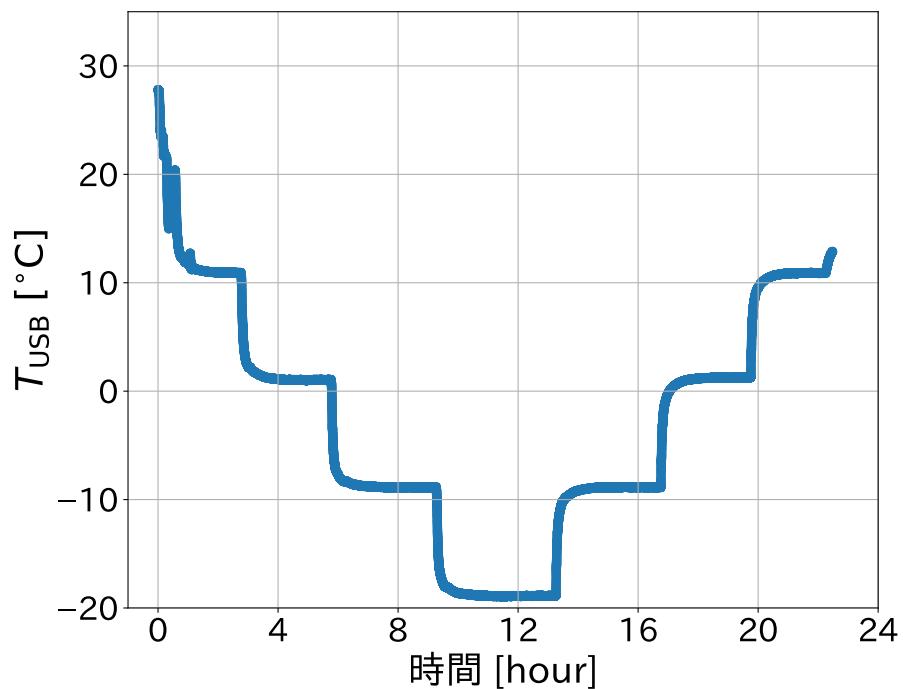


図 4.6: 恒温槽の温度変化

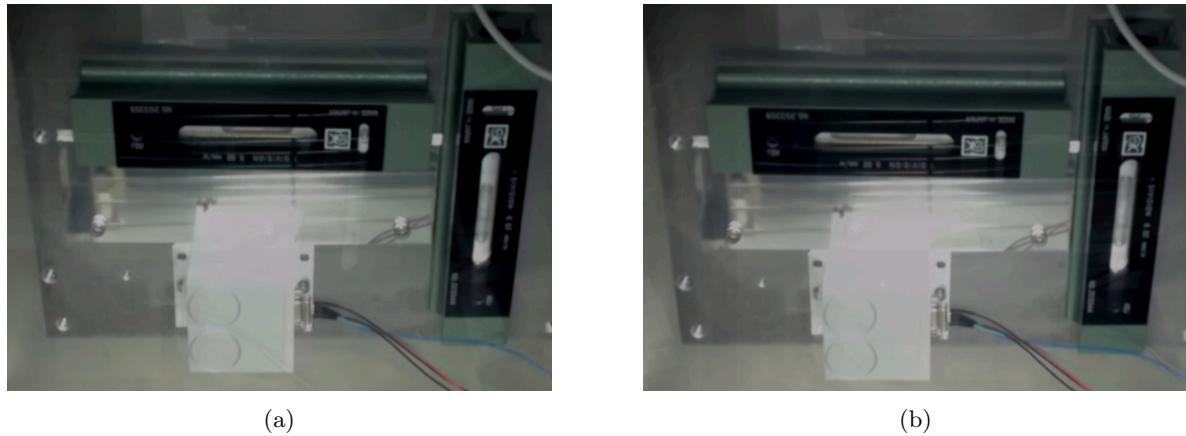


図 4.7: Web カメラを用いて撮影された恒温槽内の様子。(a) $T_{\text{USB}} \approx 12^{\circ}\text{C}$ で撮影された写真。(b) $T_{\text{USB}} \approx -18^{\circ}\text{C}$ で撮影された写真。

4.4.2 評価結果とその考察

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 4.8 に重力参照計の X 軸が出力する温度 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 4.9 に Y 軸について同様の結果を示す。温度安定区間は、図 4.8(a)、図 4.9(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。

X 軸については、温度変化に対する出力角度の平均が -0.023° となり、その誤差の平均は 0.011° であった。この結果から、それぞれの絶対値の和を取ることで θ_X の精度を $\delta\theta_{X,\text{temp}} = 0.033^{\circ}$ であると結論づける。 Y 軸については、温度変化に対する出力角度の平均が 1.18° となり、その誤差の平均は 0.014° であった。図 4.9(b) に示すように温度変化に対する出力角度の変化が 2.0° 以上と非常に大きく、絶対角度較正には使用できない精度であることがわかる。これにより、前節の長期間の出力の安定性の評価において Y 軸の精度が X 軸に比べて悪かったことが、温度変動による出力角度の変化によるものであると説明できる。要求精度を満たさない結果が得られたが、この結果は公称精度 0.08° を大きく上回っており、初期不良の可能性が疑われる。次節にて、この初期不良の可能性を検証する。また、表 4.2 にこれらの結果をまとめる。

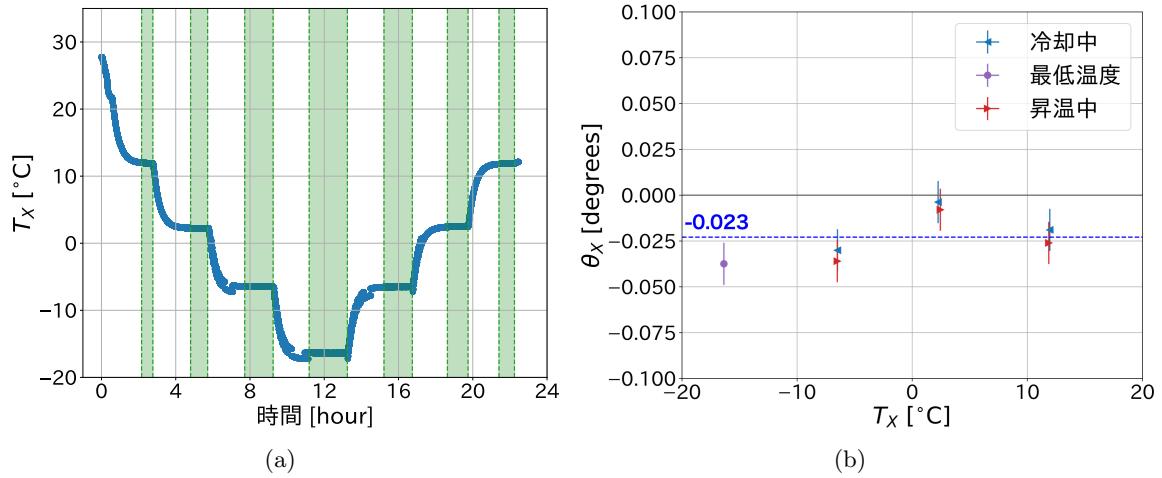


図 4.8: 重力参照計の X 軸の温度変化と出力角度の変化。(a) X 軸の温度 T_X の変化と切り取った温度安定区間。(b) X 軸の出力角度 θ_X の温度依存性。

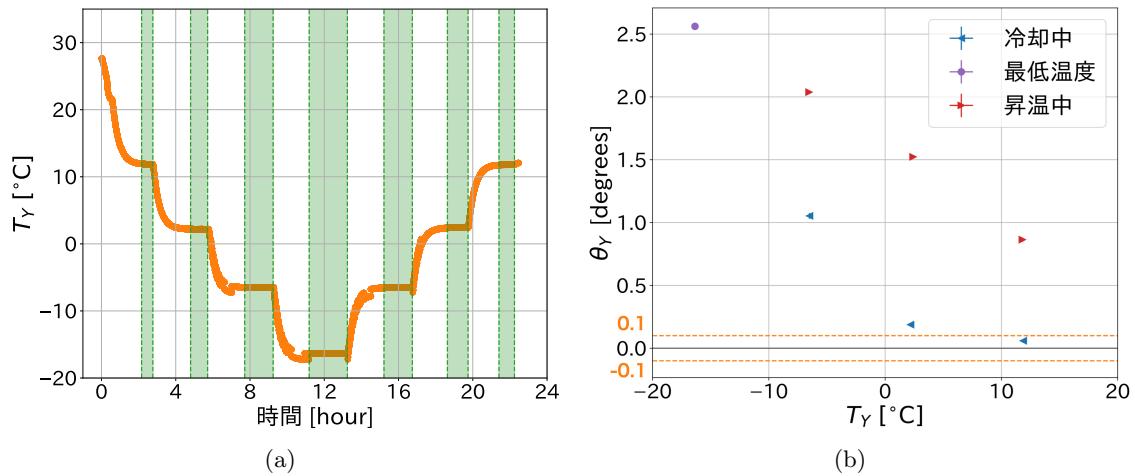


図 4.9: 重力参照計の Y 軸の温度変化と出力角度の変化。(a) Y 軸の温度 T_Y の変化と切り取った温度安定区間。(b) Y 軸の出力角度 θ_Y の温度依存性。

表 4.2: 温度変動による重力参照計の出力の変化の評価結果

	平均	誤差の平均	精度
X 軸	-0.023°	0.011°	0.033°
Y 軸	1.18°	0.014°	> 1°

4.5 初期不良の検証

4.5.1 評価系

前節にて行った温度変化に対する出力角度の評価にて判明した Y 軸の出力角度の精度不良が初期不良によるものなのか、それとも評価系の問題によるものなのかを検証するため、京都大学に

でいくつかの条件のもと評価を行った。評価系を図 4.10 および図 4.11 に示す。

条件 1. 前節と同じ評価系を再現し、恒温槽に入れて温度変化に対する出力角度の変化を測定する。
(図 4.11(a))

条件 2. 条件 1. の評価系において、アルミプレートごと系全体を 90° 回転させ、温度変化に対する出力角度の変化を測定する。これにより、恒温槽の床が温度変化により傾き、Y 軸の出力角度に影響を与えたのかを検証する。(図 4.11(b))

条件 3. 条件 2. の評価系において、重力参照計を 90° 回転させ、再び温度変化に対する出力角度の変化を測定する。これにより、アルミプレート自体が温度変化により傾き、それが Y 軸の出力角度に影響を与えたのかを検証する。(図 4.11(c))

恒温槽は ETAC 社の HIFLEX FL211C を使用した。温度変化は 30°C から -20°C まで 90 分かけて冷却し、恒温槽の温度と重力参照計の温度が安定するまで待った。その後再び 90 分ほどかけて 30°C まで昇温した。

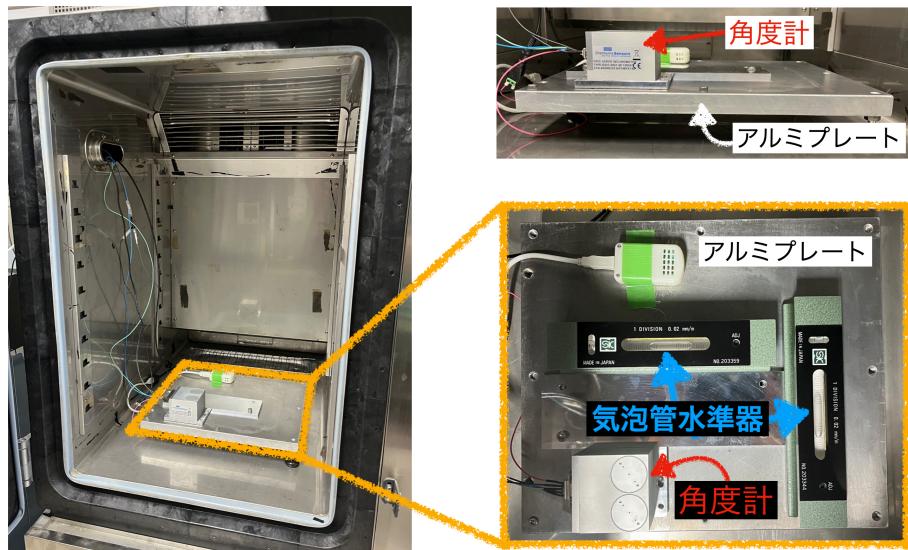


図 4.10: 京都大学における重力参照計の初期不良検証系と恒温槽

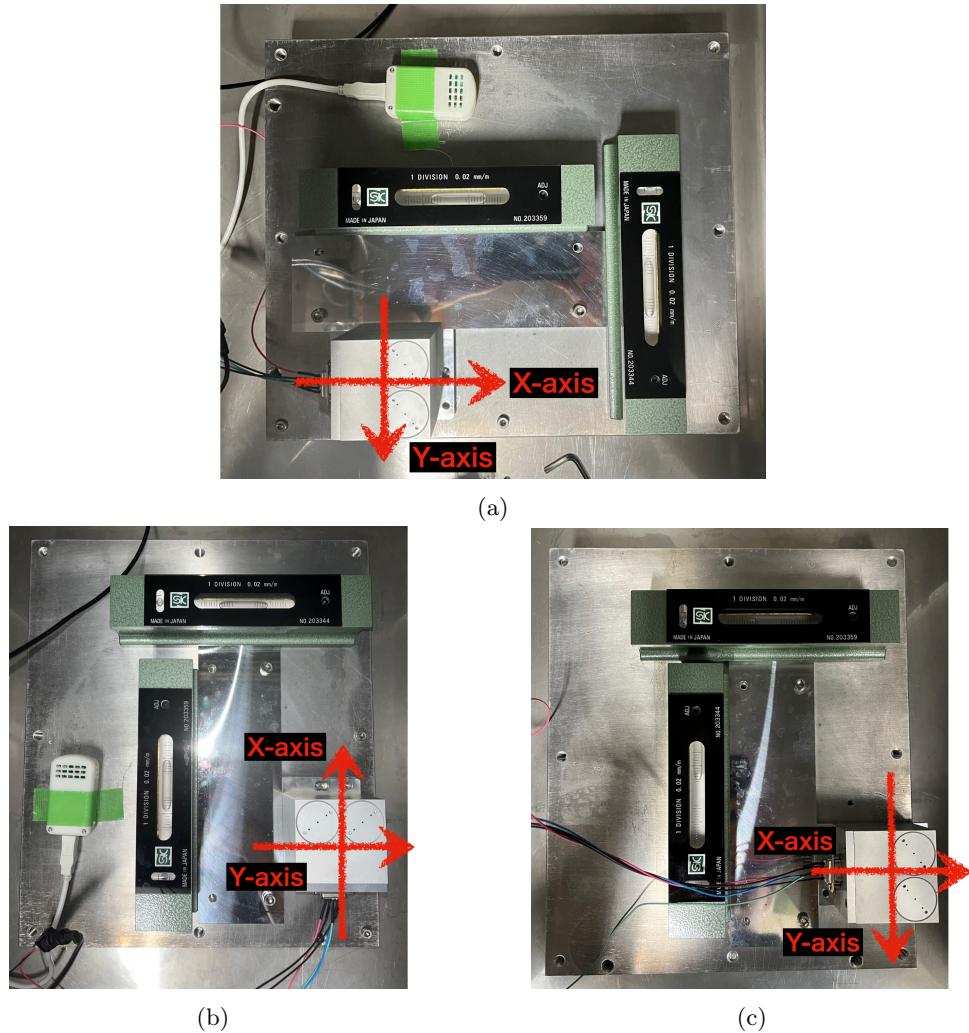


図 4.11: 各条件による重力参考計の初期不良検証系の違い。(a) 条件 1. の評価系。(b) 条件 2. の評価系。(c) 条件 3. の評価系。

4.5.2 評価結果とその考察

図 4.12 に、各条件 1 ~ 3 での温度変化に対する Y 軸の出力角度の変化を示す。いずれの条件においても、公称精度である 0.08° を大きく上回る出力角度の変化が見られた。また、その傾向はいずれの条件においても一致しており、恒温槽の床の変形やアルミプレートの変形が原因ではないと結論づけられる。以上の検証をもとに本重力参考計は初期不良があると判断し、メーカーによる修理を依頼した。修理が終了し次第、Y 軸の精度を再評価する必要がある。

なお、氷点下の温度において測定値のばらつきが生じているが、本測定では 90 分で 50°C 近くの温度変化を行っており、重力参考計の温度が安定しているときにはこのようなばらつきは見られなかっただため、このばらつきは温度の急激な変化によるものだとみなすことができる。観測サイトではこのような急激な温度変化は生じないため、偏光角較正装置に搭載する際には問題ないと考えられる。

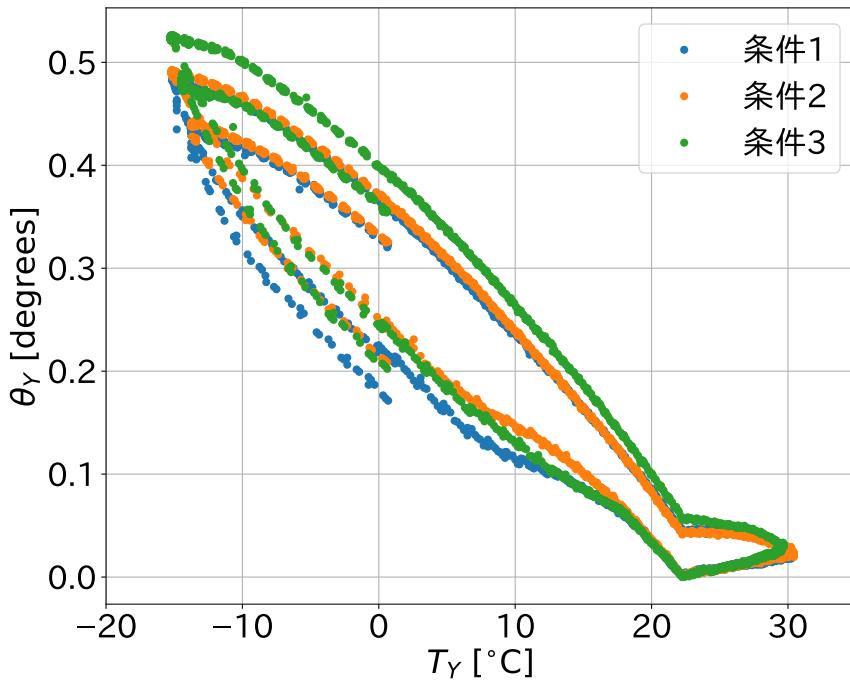


図 4.12: 各条件における Y 軸の出力角度の温度変化

4.6 まとめ

本章では、重力参照計 Sherborne Sensors 社 DSIC-2051-60 の評価を行った。長期間の実験期間にて絶対角度の精度を保証するため、長期間の出力の安定性を評価した。また、観測サイトの気温の変化に耐えうるかを確認するため、恒温槽を用いて温度変化に対する出力角度の変化を測定した。長期安定性に関しては、X 軸の精度が $\delta\theta_{X,\text{time}} = 0.003^\circ$ であり、Y 軸の精度が $\delta\theta_{Y,\text{time}} = 0.034^\circ$ と評価された。温度変化に対する出力角度の変化に関しては、X 軸の精度が $\delta\theta_{X,\text{temp}} = 0.033^\circ$ であり、Y 軸の精度が $\delta\theta_{Y,\text{temp}} > 1^\circ$ と評価された。この結果から、 θ_X の精度を

$$\delta\theta_X = \sqrt{(\delta\theta_{X,\text{time}})^2 + (\delta\theta_{X,\text{temp}})^2} \simeq 0.033^\circ < 0.04^\circ \quad (4.8)$$

であると結論づけた。これは要求精度を満たすものである。Y 軸に関しては、公称精度を大きく上回る 2.0° 以上の出力角度の変化が見られ、初期不良の可能性が疑われた。その後の検証を経て、初期不良であることが確認され、メーカーによる修理を依頼した。

Y 軸は初期不良により要求を満たさなかったが、修理により X 軸と同程度の精度を達成できると期待される。すなわち、本重力参照計の各軸の精度は $\delta\theta_X \sim \delta\theta_Y < 0.04^\circ$ となり、要求精度を満たすことができると見込まれる。

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

較正に使う直線偏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に沿う方向からずれて生成される。そのため、ワイヤーのたわみは較正の精度に影響を及ぼし、系統誤差を生む。3.4.5項では過去に行われた評価手法について述べたが、この手法にはいくつかの問題があった。本章では、初めにこの問題について今一度触れたあと、それを解決するために開発したワイヤーのたわみを評価する系について述べる。その後、評価系の原理検証を行い、最後に実際にスペースワイヤーグリッドに対して行った評価結果について述べる。

5.1 過去の測定手法における問題点と開発目標

過去の測定手法についてもう一度 review するべきか、それとも 3.4.5項をもっと簡素にし、詳細な内容をこちらに持ってくるべきか、現在のように ref するだけにするべきか悩んでいる。

過去の測定手法については 3.4.5項にて述べたとおりであり、その手法にはいくつかの問題点があった。一つ目の問題点は、その測定精度が低いことである。これにより、たわみ量の系統誤差への寄与を必要以上に大きくしている疑いがある。また、図 3.16 にて示されているように、全てのワイヤーに対してそのたわみ量は期待される量からどの程度外れているかを判別できておらず、品質の低いワイヤーを選別できていない。もう一つの問題点は、その測定手法が人力にて行われており、測定のために労力と時間がかかる点である。これによりスペースワイヤーグリッドの量産、品質の保証・管理のために繰り返し測定することが困難である。また、人力での測定はその測定結果に人依存のバイアスを産む可能性がある。

以上の問題点を解決するため、

1. ワイヤーのたわみ量を $\mathcal{O}(10 \mu\text{m})$ の精度で評価可能であること
2. 全てのワイヤーのたわみ量を自動的に評価可能であること

という 2 点の開発目標をもって新たなワイヤーのたわみ量の評価系を開発した。

5.2 評価系の概要と評価原理

5.2.1 評価系の概要

初めに、作成した評価系の概観を図 5.1 に示す。基本的な評価原理は 3.4.5項にて述べた過去の手法と同様である。ストレートエッジとワイヤーを同一写真内に映るように撮影することでストレートエッジとワイヤー間の距離 z を測定し、ワイヤーのたわみを評価する。今後の説明のため、撮影された写真の例を図 5.2 に示す。より高精度な評価と自動化を実現するため、過去の評価系をもとに以下のような変更を加えた評価系を作成した。

1. スペースワイヤーグリッドを鉛直方向に立てて撮影を行う
2. スペースワイヤーグリッドとカメラをアクチュエータを用いて自動的に動かす
3. 一つのワイヤーに対して両端と中央だけでなく、複数の点で撮影を行う

アクチュエータによる自動化を容易にするため、スペースワイヤーグリッドを鉛直方向に立てる。また、詳細は次節にて述べるが、この配置によりたわみの評価精度が向上する。たわみの測定の基準となるストレートエッジはスペースワイヤーグリッドの目の前 5 mm のところに固定されている。使用したストレートエッジは過去のものと同じく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。また、ストレートエッジにはカメラの 1 pixel が対応する長さを較正するためのスケーラが取り付けられている。自動化の要であるアクチュエータは、スペースワイヤーグリッドを鉛直方向に動かすために OpenBuilds 社の V-Slot NEMA 23 Linear Actuator (Belt Driven) を、カメラを水平方向に動かすために OpenBuilds 社の V-Slot NEMA 17 Linear Actuator (Belt Driven) を用いた。どちらもベルト駆動式であり、ステッピングモーターを用いて位置制御を行うことができる。スペースワイヤーグリッドに取り付けられたアクチュエータは、ストレートエッジとワイヤーの距離をカメラの画角に収まるように近づけるために使用され、カメラに取り付けられたアクチュエータは、撮影位置を変え、ストレートエッジとワイヤーの距離を複数の点で測定するために使用される。アクチュエータの制御には、Galil 社の DMC-4020 というモーションコントローラを用いた。

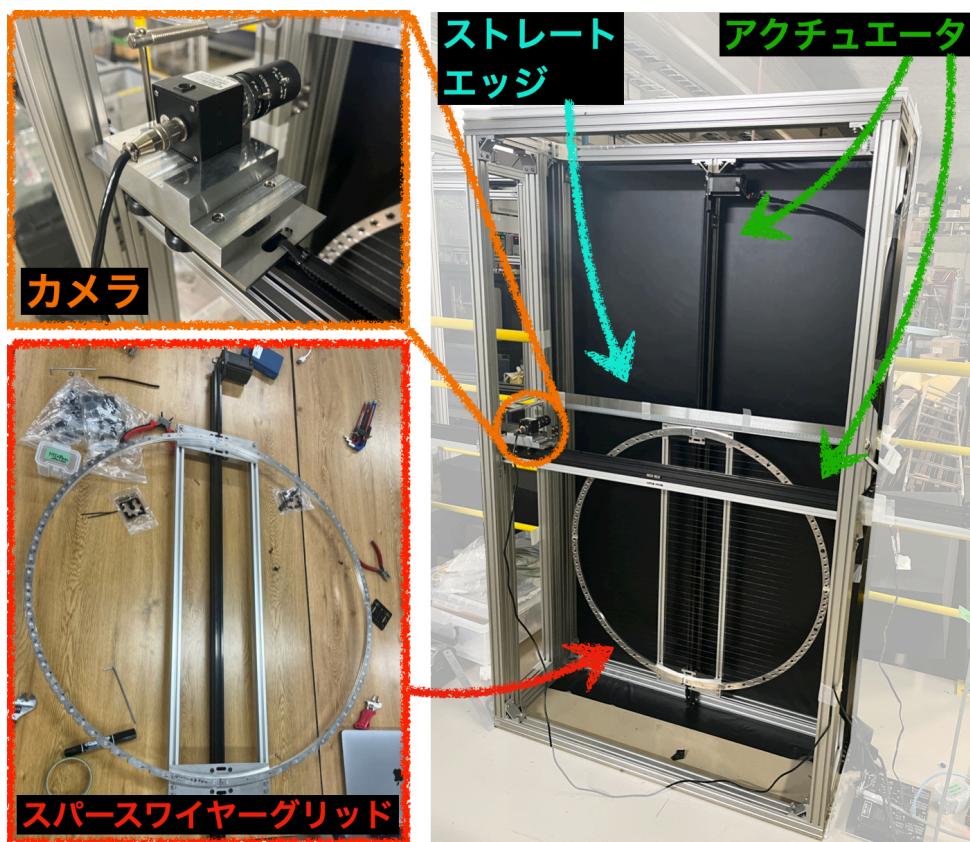


図 5.1: ワイヤーのたわみ量評価系の概観

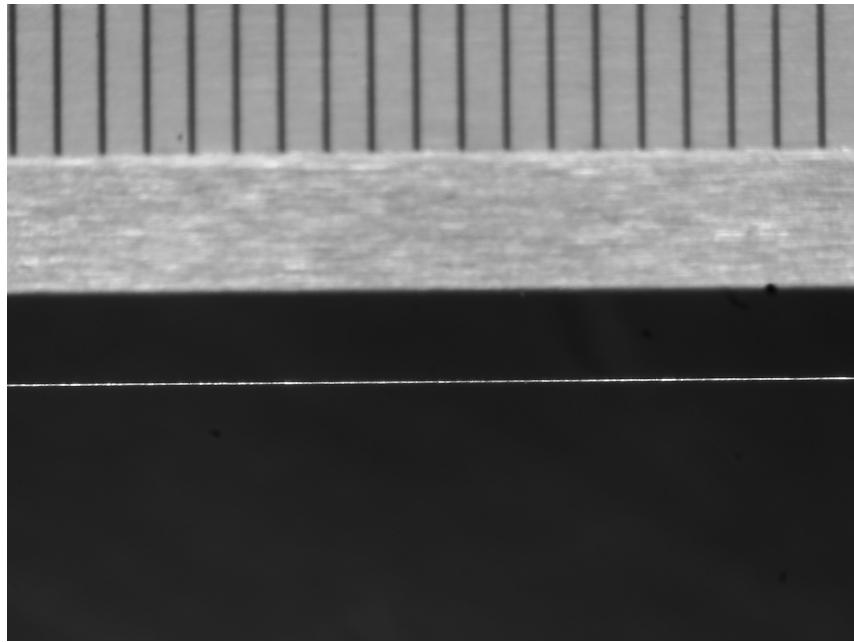


図 5.2: 撮影されたストレートエッジとワイヤーの写真の例

5.2.2 評価原理

まず、理想的な評価系について考える。図 5.3 に評価原理の概念図を示す。 x_0, x_1, \dots, x_n は撮影箇所の位置を表し、 z_0, z_1, \dots, z_n は各写真から測定されるストレートエッジとワイヤーの距離である。得られた x_i, z_i を横軸 x 、縦軸 z でプロットすると、ワイヤーの概形を表す曲線が得られる。ワイヤーの理論曲線はワイヤーの素材、かかっている張力により決まるカテナリー曲線であるため、得られた曲線をカテナリー曲線で fitting することでワイヤーのたわみ量を評価することができる。

ワイヤーの概形を表すカテナリー曲線は、 T をワイヤーにかかる張力、 ρ_W をワイヤーの密度、 R_W をワイヤーの半径、 L_{frame} をワイヤーを固定している両端間の距離として

$$f(x; a) = a \cosh \left(\frac{x + L_{\text{frame}}/2}{a} \right) - a \cosh \left(\frac{L_{\text{frame}}}{2a} \right) \quad (5.1)$$

$$a = \frac{T}{\rho_W \cdot \pi R_W^2} \quad (5.2)$$

と表される。なお、この式は原点 $(0, 0)$ と $(L_{\text{frame}}, 0)$ を通る拘束条件を課したカテナリー曲線を表している。スペースワイヤーグリッドにはタングステン製のワイヤーを使うため、その密度はタングステンの密度 $\rho_W = 19.3 \text{ g/cm}^3$ であり、ワイヤーの半径は $R_W = 0.1 \text{ mm}$ である。 L_{frame} はどのワイヤーを評価するかによって異なる。図 5.4 のようにスペースワイヤーグリッドに張られたワイヤーに通し番号をつけたとき、スペースワイヤーグリッドの内径が 790 mm であり、ワイヤー間のピッチが 20 mm であることから、 n 番目のワイヤーにおける $L_{\text{frame}, n}$ は

$$L_{\text{frame}, n} = 2\sqrt{395^2 - (20 \cdot (19 - n))^2} [\text{mm}] \quad (n = 1, 2, \dots, 19) \quad (5.3)$$

と表される。以下ではワイヤー番号を省略し、単純に L_{frame} と表す。 a は張力に関わるパラメー

タであり、ワイヤーが緩んでいることを示す指標となる。そのため、得られた測定値 (x_i, z_i) に対して、カテナリー曲線のパラメータ a を fitting parameter として fitting を行い、best fit により得られた a を用いてワイヤーのたわみ量を算出する。式(5.1)より、張られたワイヤーの中心部で生じるたわみ量は

$$d_{\text{sag}} = f(L_{\text{frame}}/2; a) \quad (5.4)$$

$$= a \left[1 - \cosh \left(\frac{L_{\text{frame}}}{2a} \right) \right] \quad (5.5)$$

であり、たわみ角 θ_{sag} は

$$\theta_{\text{sag}} = \arctan \left(\frac{d_{\text{sag}}}{L_{\text{frame}}} \right) \quad (5.6)$$

となる。

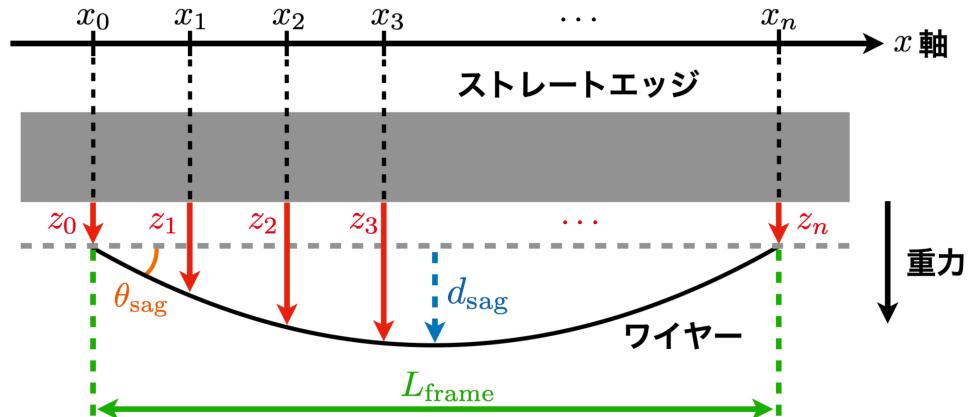


図 5.3: ワイヤーのたわみ量の評価原理

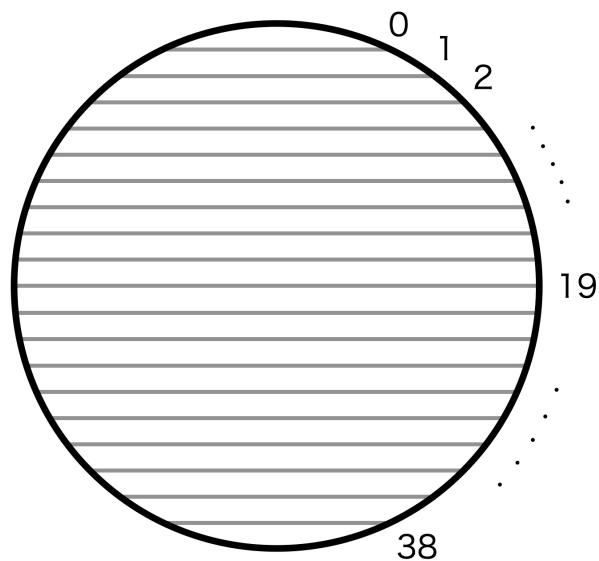


図 5.4: スペースワイヤーグリッドにおけるワイヤー番号

評価系が理想的でない場合について考える。実際の評価系においてはカメラの回転、水平面からのストレートエッジの傾き、スペースワイヤーグリッドの回転により、重力方向を見誤る効果が生じる。これは測定した z が重力に沿う方向で測っていないことを意味し、その効果を消去するためには補正が必要である。そこで、

1. カメラの回転とストレートエッジの傾きによる効果
2. スペースワイヤーグリッドの回転による効果

と分け、それぞれの効果がどのように z に影響を与えるか、もしくはどのように補正をするべきかについて考える。

カメラの回転とストレートエッジの傾きによる効果

カメラの回転による効果を消すためには、ストレートエッジが水平になるように画像を回転させればよい。図 5.5 に、回転前後のストレートエッジとワイヤーの概念図を示す。 θ_{camera} はカメラの回転角を表し、 θ_{SE} はストレートエッジの傾きを表す。回転後の系においてストレートエッジに垂直な方向にワイヤーまでの距離を測り、 z として算出する。ただし、この回転はストレートエッジが傾いている効果を消去しない。測定された z と本来測るべき z_{true} との間にストレートエッジの傾きにより生じる誤差について考える。図 5.5 より、 z と z_{true} の関係は

$$z = z_{true} \cos \theta_{SE} \quad (5.7)$$

$$\approx z_{true} \left(1 - \frac{\theta_{SE}^2}{2} \right) \quad (5.8)$$

と表される。ストレートエッジの傾き θ_{SE} は、ストレートエッジが長さ 1000 mm であるのに対して両端の高さのずれは多くても 10 mm 程度であることから、 $\theta_{SE} \sim 0.01 \text{ rad}$ と見積もられる。したがって、 z と z_{true} の間に生じる誤差は多くとも 0.01 % 程度であり、無視できる。

以上をまとめると、カメラの回転とストレートエッジの傾きによる効果を補正するには、ストレートエッジが水平になるように画像を回転させればよいということがわかる。

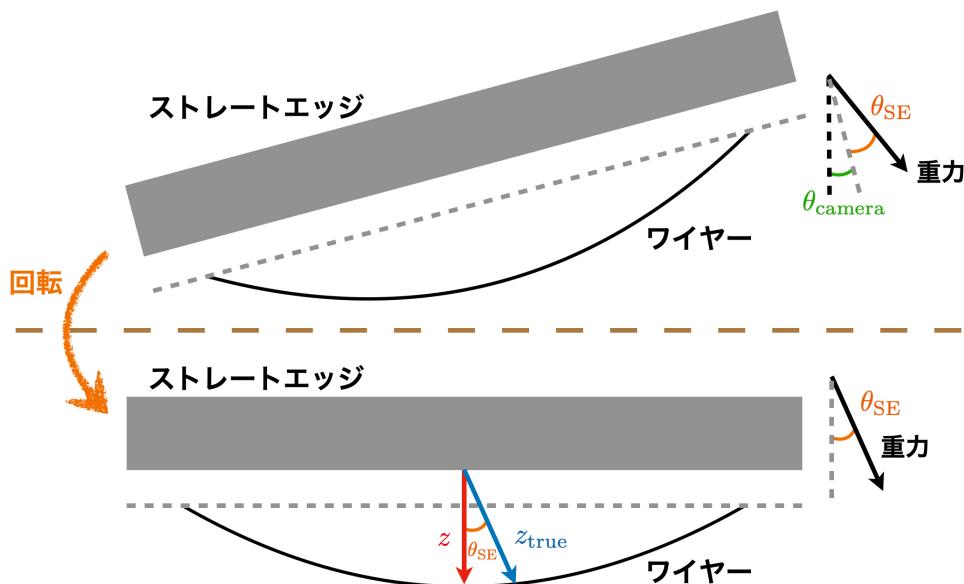


図 5.5: ストレートエッジとワイヤーの回転前後の概念図

スパースワイヤーグリッドの回転による効果

図5.6のように、ワイヤーの左端が $(0, 0)$ に位置し、ワイヤーの右端が (X, Y) に位置する場合を考える。ワイヤーの両端を結んだ直線と x 軸のなす角度が θ_{SWG} であり、これはスパースワイヤーグリッドが回転している角度である。このとき、ワイヤーの描くカテナリー曲線は

$$f_{\text{tilt}}(x; a, X, Y) = a \cosh\left(\frac{x + c_1}{a}\right) + c_2 \quad (5.9)$$

$$c_1 = a \sinh^{-1} \left[\frac{Y}{2a \sinh\left(\frac{X}{2a}\right)} \right] \quad (5.10)$$

$$c_2 = -a \cosh\left(\frac{c_1}{a}\right) \quad (5.11)$$

となる。ただし、 X, Y は

$$L_{\text{frame}} = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (5.12)$$

を満たす。測定される z はストレートエッジとワイヤー間の距離であるため、その概形はカテナリー曲線を -1 倍したものであり

$$z_i = -f_{\text{tilt}}(x_i; a) \quad (5.13)$$

として測定値 (x_i, z_i) に対して fitting を行う。こうして得られた a を式(5.5)に代入することで、ワイヤーのたわみ量 d_{sag} を得る。

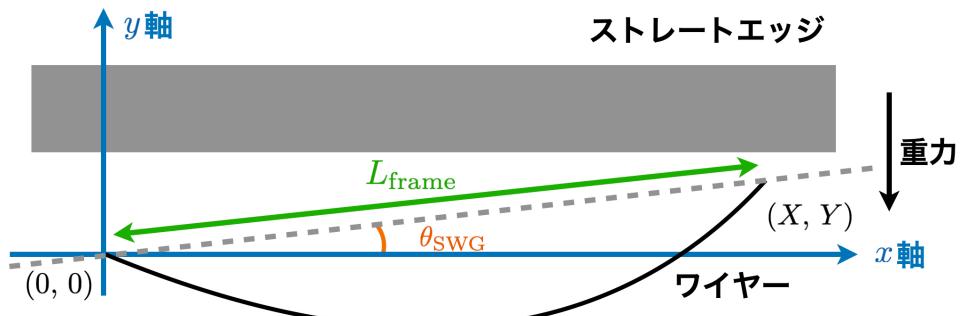


図 5.6: ワイヤーの両端が重力に対して傾いている場合のワイヤーの描くカテナリーの概念図

5.2.3 評価系の光学系を考慮した z の測定原理

図5.7にワイヤーのたわみ量の評価原理の横から見た概念図を示す。これは過去の手法における概念図3.14を新しい系に合わせて変更したものであり、カメラから見るとストレートエッジが手前に位置し、ワイヤーがその奥に位置するような配置になっている。各パラメータの意味とその値、誤差を表5.1に示す。この系において、測定される量 z' を用いてストレートエッジとワ

ヤー間の距離 z を表すと、

$$z = \frac{z'}{\cos \phi} + \alpha \tan \phi \quad (5.14)$$

$$\phi = \arctan \left(\frac{L_{\text{camera}}}{\beta} \right) \quad (5.15)$$

となるが、今、 L_{camera} は 0 mm であるため、

$$z = z' \quad (5.16)$$

として問題ない。

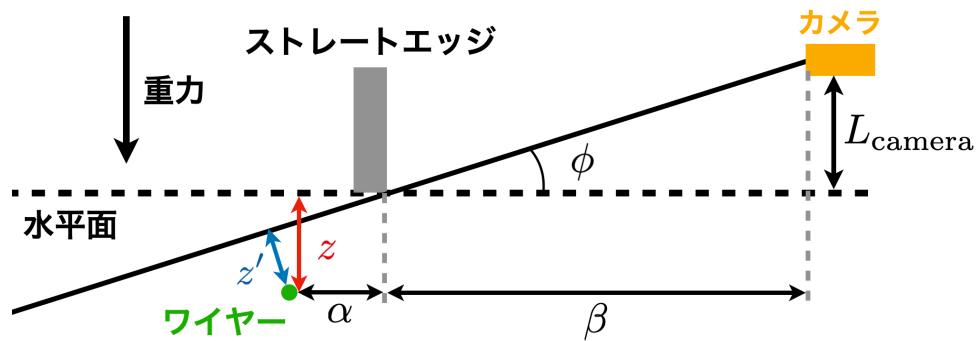


図 5.7: ワイヤーのたわみ量の評価原理の横から見た概念図

表 5.1: 図 5.7 における各パラメータの意味と値

パラメータ	意味	値	誤差
α	ストレートエッジとワイヤーまでの水平距離	15 mm	± 2 mm
β	ストレートエッジからカメラまでの水平距離	205 mm	± 5 mm
L_{camera}	ストレートエッジ下端の面からカメラまでの鉛直距離	0 mm	± 0.5 mm

5.2.4 評価系の設計から生まれる z の誤差の見積もり

過去の手法においては、 ϕ が典型的に 5° 程度と小さくない値であったために、 L_{camera} や α から z へ大きな誤差が生じていた^[18]。この誤差を抑えるためには、 ϕ を小さくすることが重要であるが、過去の評価系ではスペースワイヤーグリッドを水平面上に設置して撮影しており、他のワイヤーが撮影対象のワイヤーに重なってしまうため $\phi \sim 0^\circ$ 、すなわち $L_{\text{camera}} \sim 0$ mm で撮影することができなかった（図 3.15）。これを解決するため、スペースワイヤーグリッドを鉛直方向に立てて撮影を行うことで、 $L_{\text{camera}} = 0 \pm 0.5$ mm で撮影を行い、誤差の低減を図った。新しい評価系において、 z の誤差は

$$\delta z = \sqrt{\left(\frac{1}{\cos \phi} \right)^2 \delta z'^2 + \left(\frac{\tan \phi}{\cos \phi} + \frac{\beta}{\cos^2 \phi} \right)^2 \delta \phi^2 + \tan^2 \phi \delta \beta^2} \quad (5.17)$$

と表され、表5.1に示したパラメータの誤差を代入すると、

$$\delta z \sim 39 \mu\text{m} \quad (5.18)$$

となる。 z' の誤差についてはカメラの1pixelが対応する長さであり、次節の解析にて明らかになるがこれは典型的に $5 \sim 6 \mu\text{m}$ 程度である。また、 z にはストレートエッジの真直度由来の誤差 $30 \mu\text{m}$ が含まれるため、これも考慮に入れると z の誤差は

$$\delta z = \sqrt{39^2 + 30^2} \mu\text{m} = 49 \mu\text{m} \quad (5.19)$$

程度だと見積もられる。

5.3 解析手法

5.3.1 解析の流れ

撮影された画像は既に図5.2にて示した。画像の解像度は $3264 \text{ pixel} \times 2448 \text{ pixel}$ である。画像の横軸を x_{pix} 、縦軸を y_{pix} と定め、画像の左上を原点 $(0, 0)$ とする。また、画像の出力フォーマットは $yuyv$ であり、これは各pixelの輝度に関する情報を失うことなく保存される。一枚の画像に対して代表的なストレートエッジとワイヤー間の距離 z を算出し、たわみ量を評価するため、輝度の情報を用いて以下の手順で解析を行う。

1. スケーラの目盛の輝度を fitting し、その間隔の pixel 数を求めて画像の1pixelが対応する長さを決める
2. ストレートエッジの下端の輝度を fitting し、その位置を決める
3. ストレートエッジの下端が水平になるように画像を回転させる
4. ワイヤーの輝度を fitting し、ワイヤーの位置を決める
5. 回転したストレートエッジの位置とワイヤーの位置から z を算出する
6. 複数の写真から得られた z をカテナリー曲線で fitting し、ワイヤーのたわみ量を算出する

5.3.2 スケーラの fitting

図5.8、図5.9に $y_{\text{pix}} = 200 \text{ pixel}$ における輝度を示す。図5.9では、横軸を $1100 \text{ pixel} \leq x_{\text{pix}} \leq 1700 \text{ pixel}$ に拡大したものを合わせて示している。スケーラの目盛は黒く塗られており、その間は金属により光を反射しているため、その輝度は目盛上で低く、目盛間で高くなる。理想的には、この輝度の変化は階段関数的である。一つの目盛とその周りに対して、その輝度は目盛上で低く $B_{\text{scaler}}^{\text{single}}(x)$ は

$$B_{\text{scaler, ideal}}^{\text{single}}(x) = a[\theta(x - x_{\text{left}}) + \theta(x_{\text{right}} - x)] + \text{offset} \quad (5.20)$$

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x \leq 0) \end{cases} \quad (5.21)$$

のように表せる。 a は輝度の最大値と最小値の差からくるパラメータであり、 $x_{\text{left}}, x_{\text{right}}$ は目盛の左端と右端の位置、 offset は輝度のオフセットである。しかし、実際には写真のピントにより輝度がぼやけてしまい、図 5.9 のように滑らかに輝度が変化する。そこで、この階段関数をシグモイド間数に置き換えることでこの輝度の変化をモデル化する。

$$B_{\text{scaler}}^{\text{single}}(x; a, b, c, d, \text{offset}) = a \left[\frac{1}{1 + \exp(-b(x - c - d))} + \frac{1}{1 + \exp(-b(-x - c + d))} \right] + \text{offset} \quad (5.22)$$

$a, b, c, d, \text{offset}$ は fitting parameter であり、 d は目盛の中心を表す。さらに、写真中には複数のスケーラが写っているため、最終的にスケーラの輝度の fitting 関数 B_{scaler} は

$$B_{\text{scaler}}(x; a_i, b_i, c_i, d_i, \text{offset}) = \sum_{i=1}^{n_{\text{scaler}}} a_i \left[\frac{1}{1 + \exp(-b_i(x - c_i - d_i))} + \frac{1}{1 + \exp(-b_i(-x - c_i + d_i))} \right] + \text{offset} \quad (5.23)$$

と表される。 n_{scaler} は写真中に写っているスケーラの数であり、 offset はすべての目盛に対して共通のパラメータである。

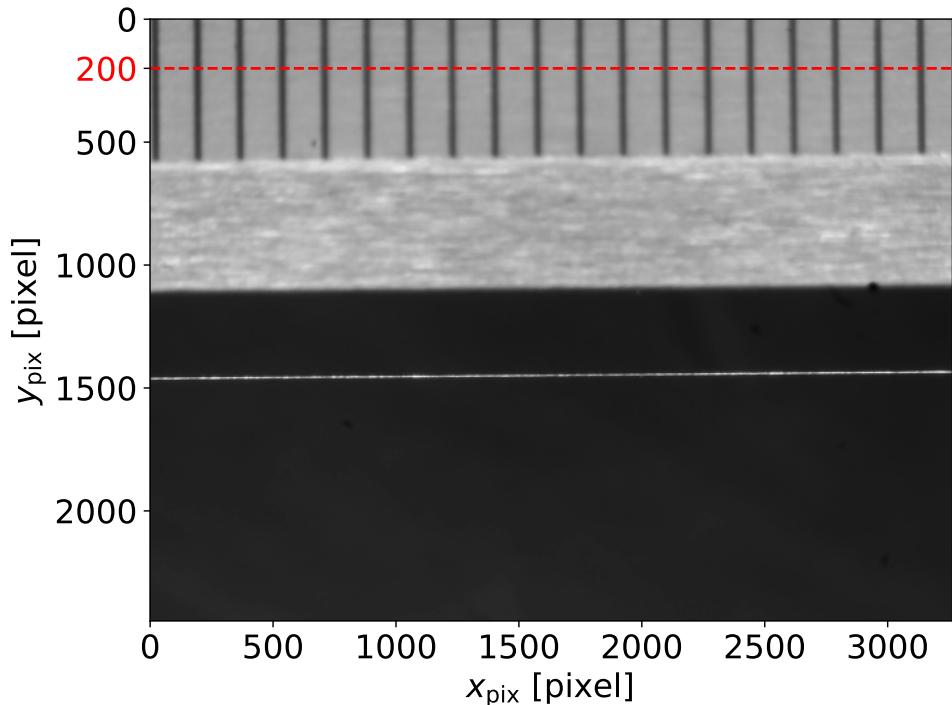


図 5.8: 写真中における $y_{\text{pix}} = 200$ pixel の目安

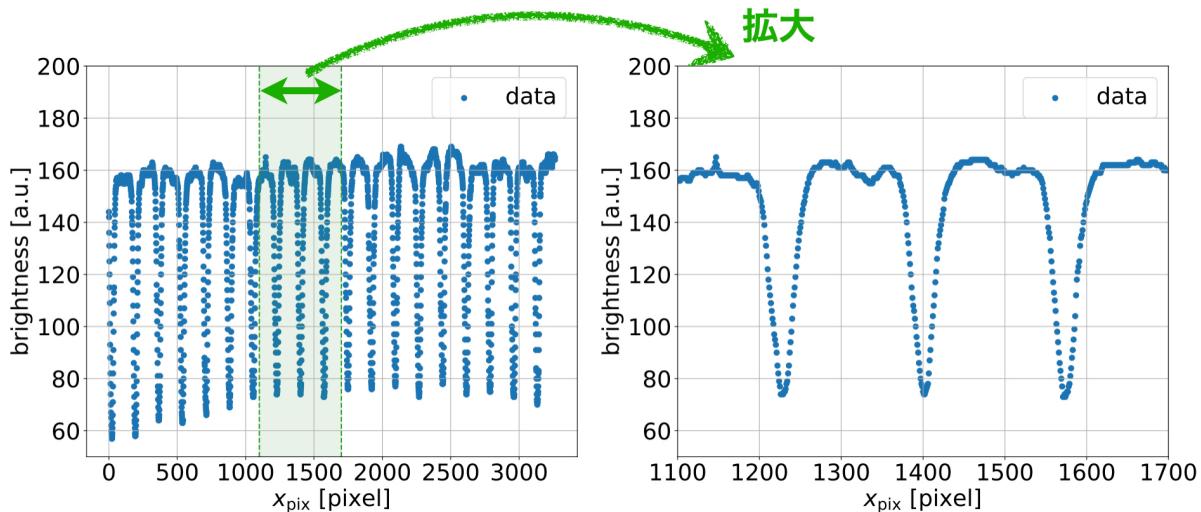
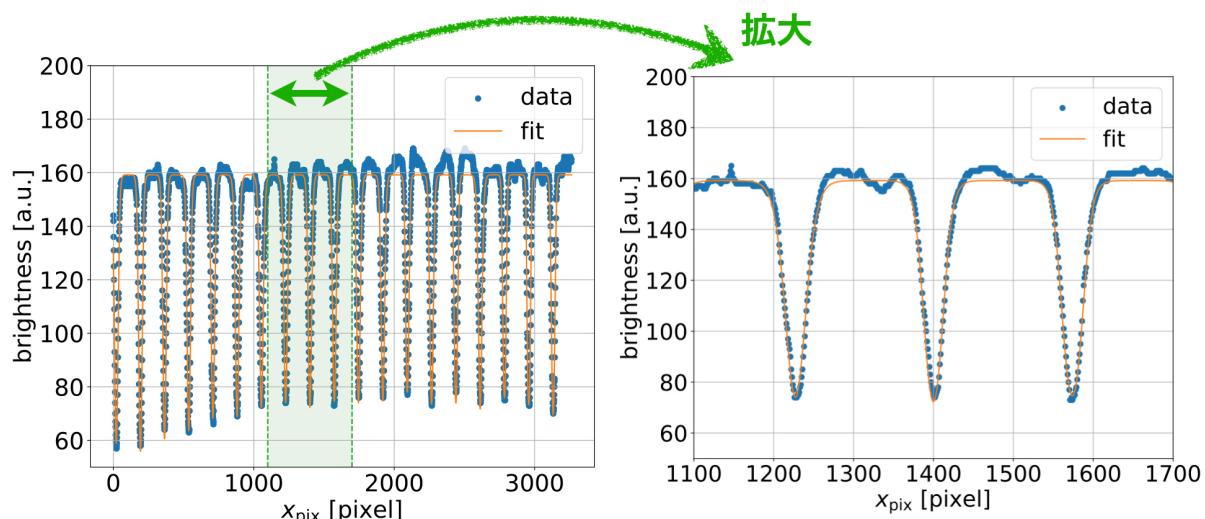
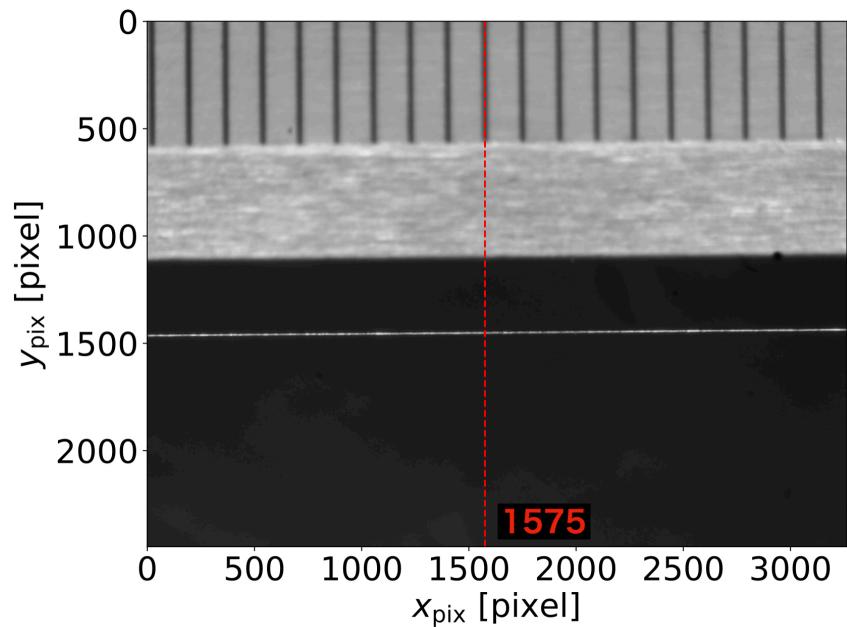
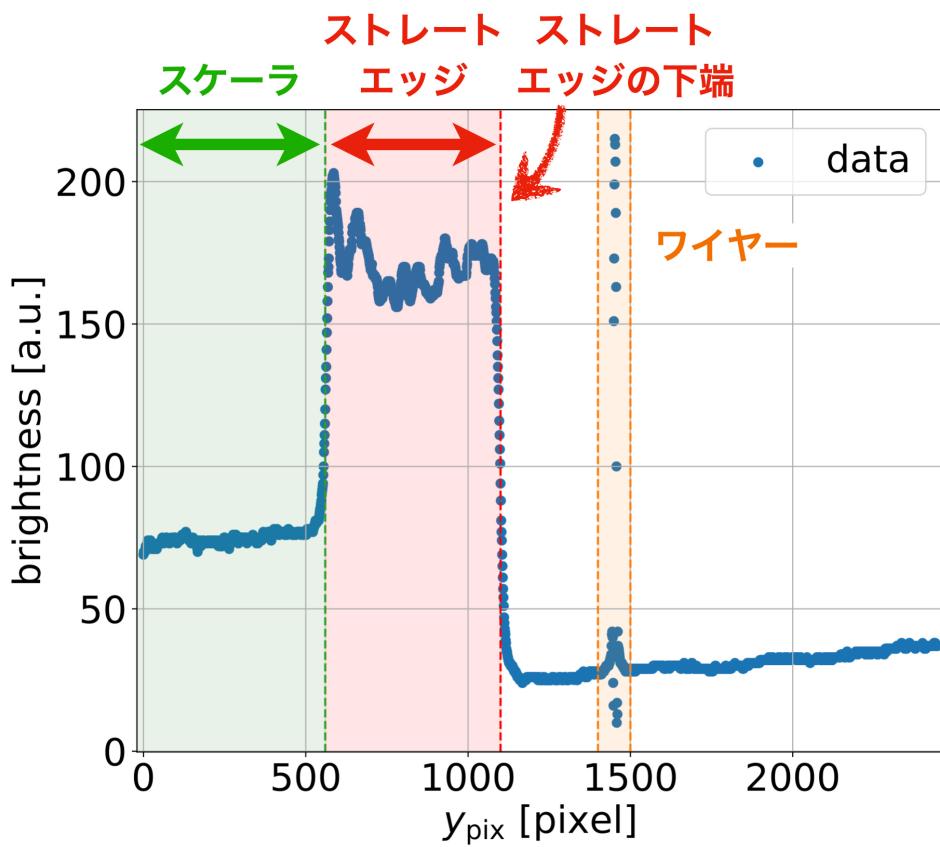
図 5.9: $y_{pix} = 200$ pixel における輝度

図 5.10 に実際に fitting した結果を示す。 d_i の fitting error は典型的に 0.02 pixel 程度であった。fitting に求められた d_i から、目盛間の pixel 数を求めるとき、その平均は 173 pixel、誤差は 0.007 pixel であった。目盛間は 1 mm であるため、1 pixel が対応する長さは $5.78 \mu\text{m} \pm 2 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ となつた。

図 5.10: $y_{pix} = 200$ pixel スケーラの輝度の fitting の結果

5.3.3 ストレートエッジとワイヤーの fitting

図 5.11、図 5.12 に、 $x_{pix} = 1575$ pixel における輝度を示す。図 5.12において、 $x_{pix} < 600$ あたりの輝度が低いところはスケーラの目盛の部分を表しており、 $600 < x_{pix} < 1100$ あたりの輝度が高くなっている部分がストレートエッジの表面を、その後再び急激に低くなるところがストレートエッジの下端を表している。また、 $1400 < x_{pix} < 1600$ あたりの急激に輝度が上がり、再び急激に下がっている部分がワイヤーを表している。

図 5.11: 写真中における $x_{pix} = 1575$ pixel の目安図 5.12: $x_{pix} = 1575$ pixel における輝度

5.3.3.1 ストレートエッジの fitting

ストレートエッジの下端の輝度は、理想的な場合は階段関数的である。実際にはカメラのピントによりぼやけてしまうため、シグモイド関数を用いて fitting を行う。つまり、ストレートエッジの下端の輝度 $B_{SE}(x)$ を

$$B_{SE}(x; a, b, c, \text{offset}) = \frac{a}{1 + \exp(-b(-x - c))} + \text{offset} \quad (5.24)$$

として fitting を行う。 a, b, c, offset は fitting parameter であり、 c はストレートエッジの下端の位置を表す。図 5.13 に実際に fitting した結果を示す。

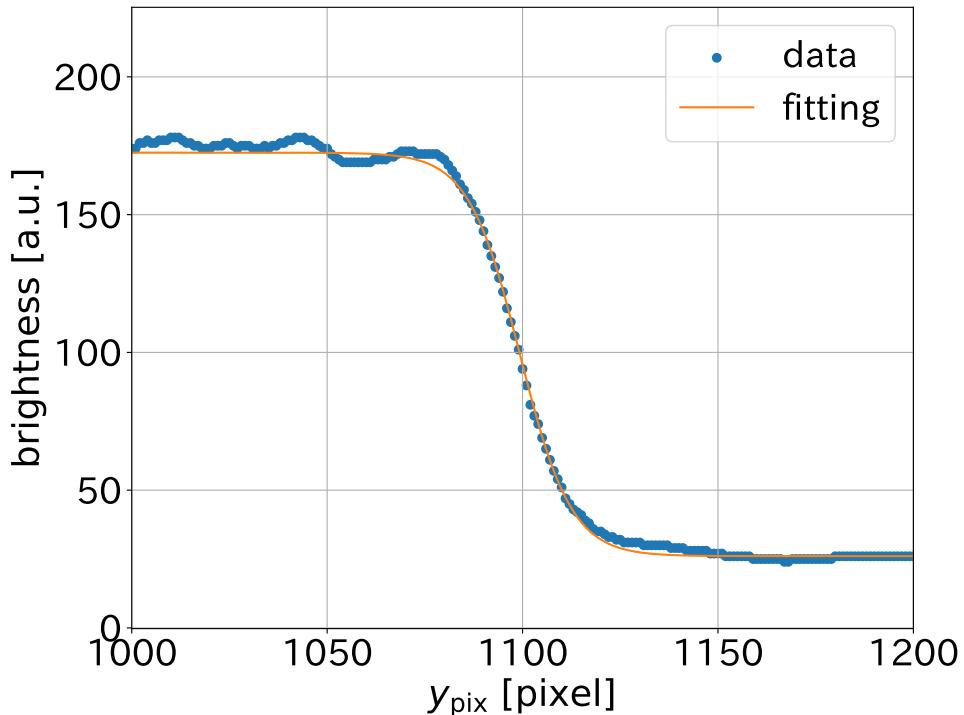


図 5.13: $x_{\text{pix}} = 1575 \text{ pixel}$ におけるストレートエッジの輝度の fitting の結果

5.2.2 にて述べた画像の回転を行うため、ストレートエッジの下端の fitting を $1132 < x_{\text{pix}} < 2132$ 、すなわち、中心から左右 500 pixel の範囲に対して行い、ストレートエッジの位置を直線で fitting する。図 5.14(a) に、求めたストレートエッジの位置と、それを直線で fitting した結果を示す。また、図 5.14(b) に、ストレートエッジの下端が水平になるように画像を回転させた結果を示す。回転により、ストレートエッジが水平になっていることが確認できる。回転後のストレートエッジの位置の標準偏差は、典型的に 1 pixel 程度であった。

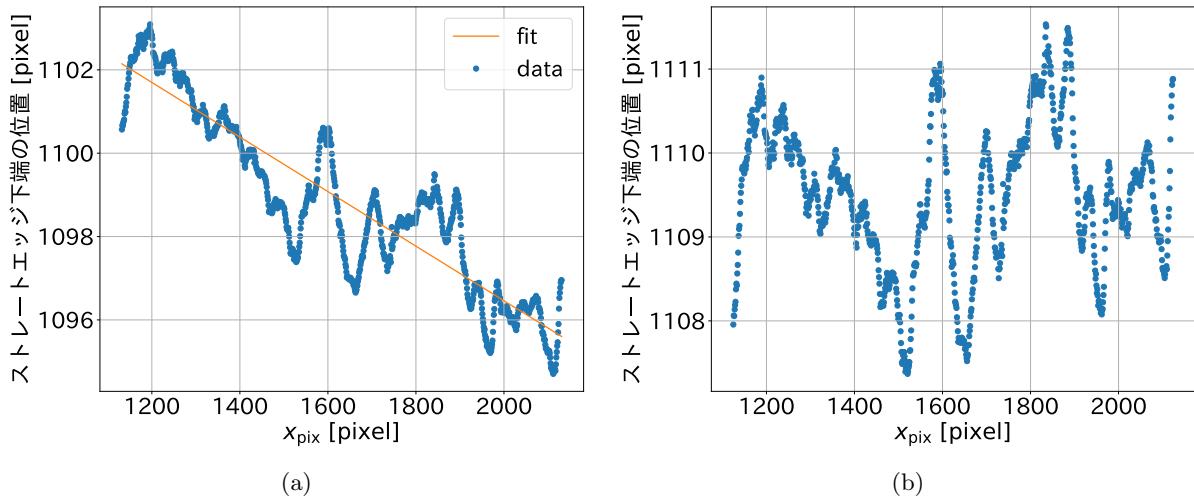


図 5.14: (a) 回転前のストレートエッジの位置と直線による fitting の結果 (b) 回転後のストレートエッジの位置

5.3.3.2 ワイヤーの fitting

ワイヤーの輝度は理想的には階段関数的であり、急激に輝度を上げた後に急激に下げる。しかし、ワイヤーの直径は 0.1 mm と短く、カメラのピントによりぼやけてしまうため、ガウス関数を用いて fitting を行う。すなわち、ワイヤーの輝度 $B_{\text{wire}}(x)$ を

$$B_{\text{wire}}(x; A, \mu, \sigma, \text{offset}) = A \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) + \text{offset} \quad (5.25)$$

として fitting を行う。 $A, \mu, \sigma, \text{offset}$ は fitting parameter であり、 μ はワイヤーの中心の位置を表す。図 5.11 におけるワイヤーの部分を実際に fitting した結果を図 5.15 に示す。

一枚の画像に対して、 z は代表点として一つのみ算出するため、複数の x_{pix} に対してワイヤーの位置を求める必要がある。たわみが大きいようなワイヤーに対しては、画像の中でもその位置を大きく変えてしまう。これを考慮して、 $1132 < x_{\text{pix}} < 2132$ の範囲に対してワイヤーの位置を求める。また、前項にて行ったストレートエッジを水平にするための回転をここでも行う必要がある。回転前後のワイヤー位置を図 5.16 に示す。回転後のワイヤーの位置の標準偏差は、ワイヤーのたわみ方によって大きく異なるが、典型的には $\mathcal{O}(1 \text{ pixel})$ 程度であった。

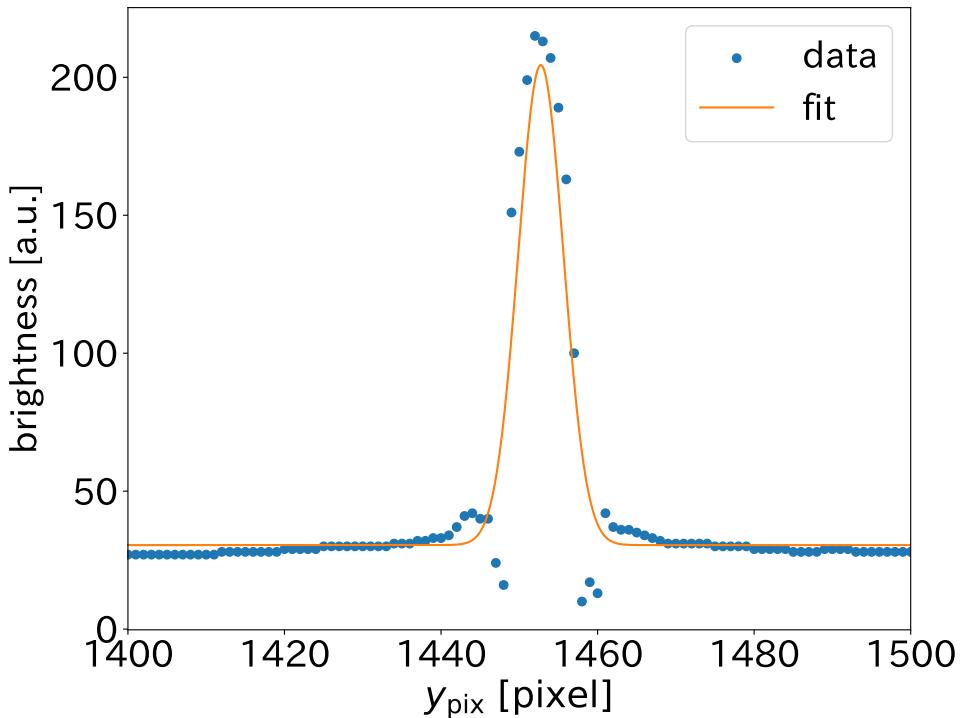
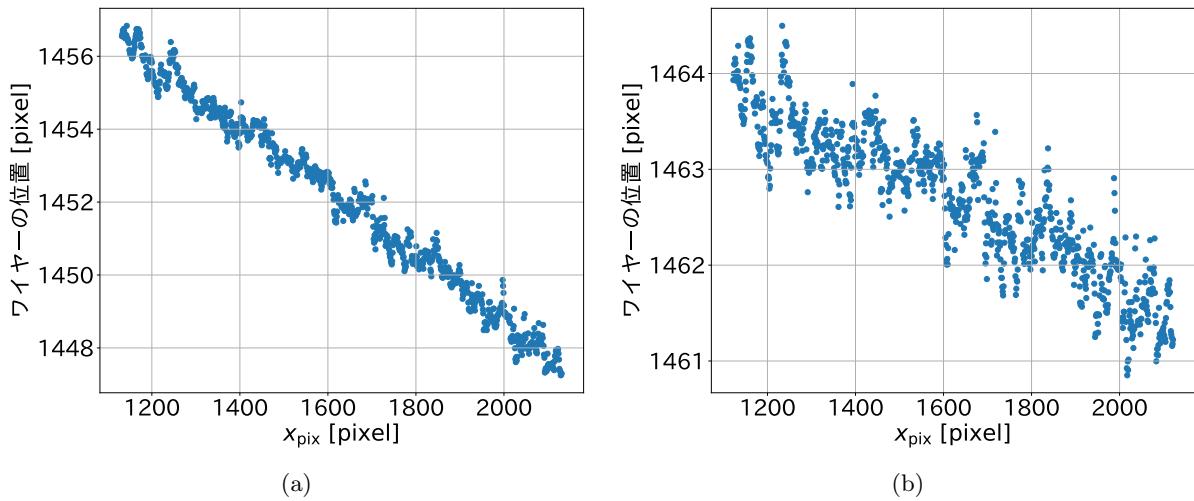
図 5.15: $x_{\text{pix}} = 1575 \text{ pixel}$ におけるワイヤーの輝度の fitting の結果

図 5.16: (a) 回転前のワイヤーの位置 (b) 回転後のワイヤーの位置

5.3.4 z の算出

前々項にて求めた回転後のストレートエッジの位置と、前項にて求めたワイヤーの位置から z を算出する。図??に、回転後のワイヤーの位置からストレートエッジの位置を引いた値 $y_{\text{wire}} - y_{\text{SE}}$ を示す。この平均を取ることで、代表的な z と誤差(標準偏差) δz を得る。今回の例の場合、

$$z = 353 \text{ pixel} \quad (5.26)$$

$$\delta z = 1 \text{ pixel} \quad (5.27)$$

であった。スケーラの fitting によれば、1 pixel が対応する長さおよそ $5.78 \mu\text{m}$ であった。これを用いて z と δz を実際の長さに変換すると

$$z = 2040 \mu\text{m} \quad (5.28)$$

$$\delta z = 6 \times 10^{-3} \mu\text{m} \quad (5.29)$$

となる。評価系の設計から生まれる誤差は $49 \mu\text{m}$ であったため、この誤差は無視できる程度である。このようにして、撮影された画像から代表点として z を一つ算出することができる。

5.3.5 カテナリーでの fitting

5.4 開発した評価系の原理検証

5.4.1 評価手法

5.4.2 評価結果とその考察

5.5 スペースワイヤーグリッドのたわみ量の評価

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!

第8章 ストークスパラメータ

8.1 ストークスパラメータの定義

xyz 直交座標系において、*z* 軸正の方向に進行する光を考える。この光の電場ベクトルを $\mathbf{E}(t)$ とすると、これは一般に

$$\mathbf{E}(t) = E_x \hat{\mathbf{e}}_x + E_y \hat{\mathbf{e}}_y \quad (8.1)$$

$$= a_x \cos(\omega t - kz + \delta_x) \hat{\mathbf{e}}_x + a_y \cos(\omega t - kz + \delta_y) \hat{\mathbf{e}}_y \quad (8.2)$$

と表される。ここで、 E_x, E_y は *x* 軸、*y* 軸方向成分であり、 a_x, a_y は振幅、 ω は角振動数、 k は波数、 δ_x, δ_y は位相オフセットである。また、 $\hat{\mathbf{e}}_x, \hat{\mathbf{e}}_y$ はそれぞれ *x* 軸、*y* 軸正の方向の単位ベクトルである。 $\delta = \delta_y - \delta_x$ とすると、ストークスパラメータ I, Q, U, V は

$$I = a_x^2 + a_y^2 \quad (8.3)$$

$$Q = a_x^2 - a_y^2 \quad (8.4)$$

$$U = 2a_x a_y \cos \delta \quad (8.5)$$

$$V = 2a_x a_y \sin \delta \quad (8.6)$$

と定義される。複素電場ベクトル \mathcal{E} を用いてストークスパラメータを表すことを考える。 \mathcal{E} は一般に

$$\mathcal{E} = a_x e^{i(\omega t - kz + \delta_x)} \hat{\mathbf{e}}_x + a_y e^{i(\omega t - kz + \delta_y)} \hat{\mathbf{e}}_y \quad (8.7)$$

$$= \mathcal{E}_x \hat{\mathbf{e}}_x + \mathcal{E}_y \hat{\mathbf{e}}_y \quad (8.8)$$

と表される。ここで、 $\mathcal{E}_x, \mathcal{E}_y$ は *x* 軸、*y* 軸方向成分である。ストークスパラメータは

$$I = |\mathcal{E}_x|^2 + |\mathcal{E}_y|^2 \quad (8.9)$$

$$Q = |\mathcal{E}_x|^2 - |\mathcal{E}_y|^2 \quad (8.10)$$

$$U = 2 \operatorname{Re} [\mathcal{E}_x \mathcal{E}_y^*] = \mathcal{E}_x \mathcal{E}_y^* + \mathcal{E}_x^* \mathcal{E}_y \quad (8.11)$$

$$V = 2 \operatorname{Im} [\mathcal{E}_x \mathcal{E}_y^*] = \frac{1}{i} (\mathcal{E}_x \mathcal{E}_y^* - \mathcal{E}_x^* \mathcal{E}_y) \quad (8.12)$$

と表される。

8.2 座標回転に対するストークスパラメータの変換

xyz 直交座標系を z 軸周りに θ だけ回転させた $x'y'z$ 直交座標系を考える。このとき、 x', y', z 軸の単位ベクトル $\hat{e}_{x'}, \hat{e}_{y'}, \hat{e}_z$ はそれぞれ

$$(\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z) = (\hat{e}_{x'}, \hat{e}_{y'}, \hat{e}_z) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.13)$$

と表される。複素電場ベクトル (8.8) を $x'y'z$ 直交座標系で表すと

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_x(\cos \theta \hat{e}_{x'} + \sin \theta \hat{e}_{y'}) + \mathcal{E}_y(-\sin \theta \hat{e}_{x'} + \cos \theta \hat{e}_{y'}) \quad (8.14)$$

$$= (\mathcal{E}_x \cos \theta - \mathcal{E}_y \sin \theta) \hat{e}_{x'} + (\mathcal{E}_x \sin \theta + \mathcal{E}_y \cos \theta) \hat{e}_{y'} \quad (8.15)$$

$$= \mathcal{E}_{x'} \hat{e}_{x'} + \mathcal{E}_{y'} \hat{e}_{y'} \quad (8.16)$$

となる。ここで、 $\mathcal{E}_{x'} = \mathcal{E}_x \cos \theta - \mathcal{E}_y \sin \theta$, $\mathcal{E}_{y'} = \mathcal{E}_x \sin \theta + \mathcal{E}_y \cos \theta$ である。このとき、 $x'y'z$ 直交座標系でのストークスパラメータは

$$\begin{aligned} I' &= |\mathcal{E}_{x'}|^2 + |\mathcal{E}_{y'}|^2 \\ &= |\mathcal{E}_x \cos \theta - \mathcal{E}_y \sin \theta|^2 + |\mathcal{E}_x \sin \theta + \mathcal{E}_y \cos \theta|^2 \\ &= |\mathcal{E}_x|^2 + |\mathcal{E}_y|^2 \\ &= I \end{aligned} \quad (8.17)$$

$$\begin{aligned} Q' &= |\mathcal{E}_{x'}|^2 - |\mathcal{E}_{y'}|^2 \\ &= |\mathcal{E}_x \cos \theta - \mathcal{E}_y \sin \theta|^2 - |\mathcal{E}_x \sin \theta + \mathcal{E}_y \cos \theta|^2 \\ &= (|\mathcal{E}_x|^2 - |\mathcal{E}_y|^2) \cos 2\theta - (\mathcal{E}_x \mathcal{E}_y^* + \mathcal{E}_x^* \mathcal{E}_y) \sin 2\theta \\ &= Q \cos 2\theta - U \sin 2\theta \end{aligned} \quad (8.18)$$

$$\begin{aligned} U' &= \mathcal{E}_{x'} \mathcal{E}_{y'}^* - \mathcal{E}_{x'}^* \mathcal{E}_{y'} \\ &= (\mathcal{E}_x \cos \theta - \mathcal{E}_y \sin \theta)(\mathcal{E}_x \sin \theta + \mathcal{E}_y \cos \theta)^* \\ &\quad - (\mathcal{E}_x \cos \theta - \mathcal{E}_y \sin \theta)^*(\mathcal{E}_x \sin \theta + \mathcal{E}_y \cos \theta) \\ &= (|\mathcal{E}_x|^2 - |\mathcal{E}_y|^2) \sin 2\theta + (\mathcal{E}_x \mathcal{E}_y^* + \mathcal{E}_x^* \mathcal{E}_y) \cos 2\theta \\ &= Q \sin 2\theta + U \cos 2\theta \end{aligned} \quad (8.19)$$

$$\begin{aligned} V' &= \frac{1}{i} (\mathcal{E}_{x'} \mathcal{E}_{y'}^* - \mathcal{E}_{x'}^* \mathcal{E}_{y'}) \\ &= \frac{1}{i} [(\mathcal{E}_x \cos \theta - \mathcal{E}_y \sin \theta)(\mathcal{E}_x \sin \theta + \mathcal{E}_y \cos \theta)^* \\ &\quad - (\mathcal{E}_x \cos \theta - \mathcal{E}_y \sin \theta)^*(\mathcal{E}_x \sin \theta + \mathcal{E}_y \cos \theta)] \\ &= \frac{1}{i} (\mathcal{E}_x \mathcal{E}_y^* - \mathcal{E}_x^* \mathcal{E}_y) \\ &= V \end{aligned} \quad (8.20)$$

となる。すなわち

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (8.21)$$

と座標の回転に対して 2 倍の角度で回転することがわかる。

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] 高倉理. Characterization of a continuous polarization modulator using a half-wave plate for measurements of degree-scale cosmic microwave background with the POLARBEAR experiment. PhD thesis, 2017.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] The Polarbear Collaboration: P. A. R. Ade, Y. Akiba, A. E. Anthony, K. Arnold, M. Atillas, 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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 SYSTEMMATICS. *The Astrophysical Journal*, 814(2):110, November 2015.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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. Umiltà, 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.