

修士論文

Simons Observatory 実験に用いる Sparse Wire Grid
Calibrator の性能向上に関する研究

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
奥本成美

2026年2月27日

概要

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) はビッグバンの熱放射であり、私たちが観測できる宇宙最古の光である。そこには初期宇宙から現在に至るまでの様々な情報が含まれており、これまでに CMB の観測によって様々なことが明らかになってきた。現在はその偏光パターンの精密測定が注目されている。CMB の偏光パターンには E モードと B モードの二種類があり、 B モードは原始重力波の証拠となる。もし原始重力波による B モードが発見されれば、インフレーション理論を裏付ける証拠となる。

Simons Observatory 実験では、海拔 5200m のチリ・アタカマ砂漠に設置した複数の望遠鏡を用いて CMB 偏光の観測を行う。3 台の小口径望遠鏡 (SAT) と 1 台の大口径望遠鏡 (LAT) のうち SAT は大角度スケールの CMB 観測に最適化してある。SAT の焦点面には約 1 万個の TES 検出器が設置され、アンテナによってそれぞれの検出器が特定方向の偏光角に対して感度を持つ。 B モードの観測によって原始重力波を検出するには、この検出器の偏光角の感度方向を 0.1° 以下の精度で構成する必要がある。この要求を達成するため、スパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正システムが SAT に搭載されている。

ワイヤーグリッドはワイヤーが張られた方向と同じ方向の直線偏光を生むため、ワイヤーの方向の測定精度が較正の精度に直結する。そのため張られたワイヤーがたわんでいると系統誤差を生む。そこで、ワイヤーのたわみを自動で測定する装置を開発し、その測定結果を用いてワイヤーを張り直すことでたわみ量の影響 0.05° から 0.02° まで削減することに成功した。本論文では、ワイヤーの素材と張力を変更することで、たわみ量の影響をさらに 0.015° まで削減した。

ワイヤーグリッドの設置平面と水平面との間の角度を把握するために、重力参照角度計を用いる。しかし、先行研究で選定した角度計は、時間経過によって角度のオフセットが 0.3° も変動することが判明した。この問題を解決するため、本研究では新たな候補となる 4 つの角度計に対して、温度依存性・湿度依存性・長期間安定性の 3 つの観点から評価を行い、要求精度である精度を概ね満たす角度計とその運用方針を明らかにした。

今後、変更後のワイヤーグリッドの性能評価や角度計の更なる評価を行えば、スパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正の誤差について目標である $< 0.1^\circ$ を達成することができると期待され、原始重力波の強さの指標であるテンソルスカラー比 r にして、現在与えられている上限値 $r < 0.032$ を一桁向上する探索感度を実現する。

目次

第 1 章	CMB 偏光と Simons Observatory 実験	3
1.1	Λ CDM モデル	3
1.2	インフレーションモデル	4
1.3	CMB の温度異方性と偏光	5
1.4	Simons Observatory 実験	12
1.5	本論文の構成	19
第 2 章	スパースワイヤーグリッドによる偏光角較正	20
2.1	偏光角較正の原理	20
2.2	スパースワイヤーグリッドの概要	23
2.3	スパースワイヤーグリッドによる偏光角較正の設計	23
2.4	角度計	24
2.5	系統誤差	27
第 3 章	ワイヤーのたわみ量の抑制	29
3.1	たわみによる誤差	29
3.2	たわみ自動測定装置の開発	30
3.3	ワイヤーフレームの歪み	36
3.4	BeCu ワイヤーへの変更	38
3.5	BeCu ワイヤーのたわみ量の評価	39
3.6	まとめ	40
第 4 章	重力参照角度計の評価と選定	43
4.1	要求性能と従来 of 角度計の問題点	43
4.2	測定精度の評価	44
4.3	温度依存性の評価	44
4.4	湿度依存性の評価	47
4.5	長期安定性の評価	55
4.6	4 種の角度計の測定結果のまとめと評価	56
4.7	C 角度計の個体差の評価	57
4.8	C-1 角度計の温度依存性の補正	60
4.9	まとめ	62

第5章	まとめ	63
付録A	ストークスパラメータ	65
参考文献		67

第1章

CMB 偏光と Simons Observatory 実験

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) は宇宙から降り注ぐ約 3K の熱放射である。その正体は宇宙誕生から 38 万年後、宇宙の晴れ上がりの時点で物質から脱結合し散乱された光であり、我々が観測できる宇宙最古の光である。この CMB の温度が全天でほとんど一様であることは、ビッグバン宇宙モデルを支持する強力な証拠となった。^[1] 現在では CMB の偏光のパターンを観測することでインフレーション宇宙論の証拠を見つけられるのではないかと期待されている。

1.1 Λ CDM モデル

まず、現在の標準的な宇宙モデルである Λ CDM モデルについて述べる。アインシュタイン方程式は計量テンソル $g_{\mu\nu}$ 、アインシュタインテンソル $G_{\mu\nu}$ 、エネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ を用いて以下のようにかける。

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} \quad (1.1)$$

ただし、 G は重力定数、 Λ は宇宙定数である。また、一様等方宇宙では計量は以下に示す FLRW 計量で表される。

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right] \quad (1.2)$$

ただし、 K は宇宙の曲率であり、 $a(t)$ はスケール因子である。さらに、宇宙の構成要素が完全流体であると仮定すると、エネルギー運動量テンソルは以下のようにかける。

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -\rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

また、エネルギー保存則は以下のようにかける。

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + P) = 0 \quad (1.4)$$

式 (1.1)~(1.4) から一様等方宇宙におけるフリードマン方程式は以下のように書ける。

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho + \frac{\Lambda}{3} - \frac{K}{a^2} \quad (1.5)$$

$H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$ はハッブル定数である。エネルギー密度 ρ は物質による寄与 ρ_m と放射による寄与 ρ_r に大別することができる。これらはそれぞれ a^{-3} 、 a^{-4} に比例するため式は

$$H^2 = H_0^2 \left[\frac{\Omega_m}{a^3} + \frac{\Omega_r}{a^4} + \frac{\Omega_K}{a^2} + \Omega_\Lambda \right] \quad (1.6)$$

とかける。ここで H_0 は現在のハッブル定数であり、それぞれの密度パラメーター Ω は

$$\Omega_m \equiv \frac{8\pi G\rho_m}{3H_0^2}, \Omega_r \equiv \frac{8\pi G\rho_r}{3H_0^2}, \Omega_K \equiv \frac{-K}{H_0^2}, \Omega_\Lambda \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \quad (1.7)$$

と表される。

これらの密度パラメーターは

$$\Omega_m + \Omega_r + \Omega_K + \Omega_\Lambda = 1 \quad (1.8)$$

を満たすが、これまでの観測結果から Ω_K は 0 と一致しており、宇宙は平坦であると考えられている。^[2] その他の現在の値は、 $\Omega_\Lambda \simeq 0.7$ 、 $\Omega_m \simeq 0.3$ 、 $\Omega_r \simeq 8.4 \times 10^{-5}$ である。

Λ CDM モデルには以下の 3 つの問題がある。

1. 地平線問題: なぜ CMB はどの方向を向いても $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ もの精度で温度が一致しているのか。因果関係を持たないはずの 2 点から届く放射が高精度で一致している理由を Λ CDM モデルでは説明できない。
2. 平坦性問題: なぜ現在の宇宙の曲率が限りなくゼロに近いのか。宇宙の曲率の密度パラメータ Ω_K は時間発展とともに成長するため、宇宙初期の曲率は不自然なほど小さかったことになる。
3. モノポール問題: なぜ磁気モノポールが発見されていないのか。標準模型を超える素粒子の理論ではしばしば磁気モノポールの存在が予言されるが、現在の観測では発見されていない。

これらの問題を解決する有力な理論モデルが次節で述べるインフレーションモデルである。

1.2 インフレーションモデル

インフレーションモデルとは、宇宙初期において宇宙が指数関数的に膨張したとするモデルである。小さな空間を急激に大きく引き伸ばすため、因果関係を持つ範囲を広げ、空間を平らにし、モノポールの濃度を薄めることができる。

インフレーションモデルにも多数のバリエーションが存在するが、ここでは宇宙初期におけるインフラトンとして単一のスカラー場 ϕ を導入し、多くのモデルが共通してもつスローロール仮定を用いて近似を行う。

一様等方な宇宙でのインフラトンの運動方程式は

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\delta V}{\delta\phi} = 0 \quad (1.9)$$

とかける。また、 $K = 0$ の時フリードマン方程式は、インフラトンのエネルギー密度の寄与が主要であるとする

$$3H^2 M_{pl}^2 = \frac{1}{2c^2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad (1.10)$$

となる。ただし、 $M_{pl} = \sqrt{1/8\pi G}$ は換算プランク質量である。ここで、インフレーションが十分長い時間続くための条件であるスローロール条件から以下の近似を課す。

$$\left| \frac{\dot{\phi}^2}{V(\phi)} \right| \ll 1, \left| \frac{\ddot{\phi}^2}{H\dot{\phi}} \right| \ll 1 \quad (1.11)$$

式 (1.9)(1.10) から、

$$H^2 = \frac{V(\phi)}{3M_{pl}^2} \quad (1.12)$$

$$\dot{H} = -\frac{\dot{\phi}}{2c^2 M_{pl}^2} \quad (1.13)$$

が得られる。これらより、インフレーション中のスケール因子 a の時間発展は以下のように記述できる。

$$a \propto e^{\mathcal{N}} \quad (1.14)$$

$$\mathcal{N} \equiv - \int_{t_f}^t H dt = - \frac{1}{M_{pl}^2} \int_{t_f}^t \frac{V}{\delta V / \delta \phi} d\tilde{\phi} \quad (1.15)$$

スケール因子が指数関数的に増加していくのがわかる。 \mathcal{N} は e-folding 数と呼ばれ、典型的には $50 < \mathcal{N} < 60$ であるとされている。

インフレーションによるスケール因子の指数関数的膨張に伴い空間は膨張し、時空の量子揺らぎが大きく引き伸ばされる。この揺らぎを加えて FLRW 計量を書き直すと

$$ds^2 = -(1 + 2\Phi)dt^2 + a^2(t)(1 - 2\Psi)(\delta_{ij} + h_{ij})dx_i dx_j \quad (1.16)$$

となる。ここで、 Φ は重力ポテンシャルの揺らぎ、 Ψ は曲率揺らぎ、 h_{ij} はテンソル揺らぎを表す。この h_{ij} は原始重力波を表しており、 z 軸方向に重力波が進むとすれば

$$h_{ij} = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

と書くことができる。 h_+ と h_\times はそれぞれ + モードと \times モードを表し、図 1.1 に示すような空間の歪みを作る。これによって圧縮された部分は空間が縮み光子の周波数が短くなるため温度が上がり、逆に引き伸ばされた部分は温度が下がる。

1.3 CMB の温度異方性と偏光

1.3.1 CMB の温度異方性

宇宙初期の高温高密度な宇宙では自由電子に散乱されるため光子はまっすぐ飛ぶことができなかった。宇宙膨張によって温度が 3000K 程度まで低下すると、エネルギーを失った自由電子が原子核に捕縛され光子が直進できるようになる。これを宇宙の晴れ上がりと呼び、光子と電子が最後に散乱した時期を最終散乱面と呼ぶ。熱平衡状態にあった宇宙の最終散乱面から放出された光子が CMB であり、それゆえ図 1.2 に示すように CMB は黒体輻射スペクトルとよく一致する。

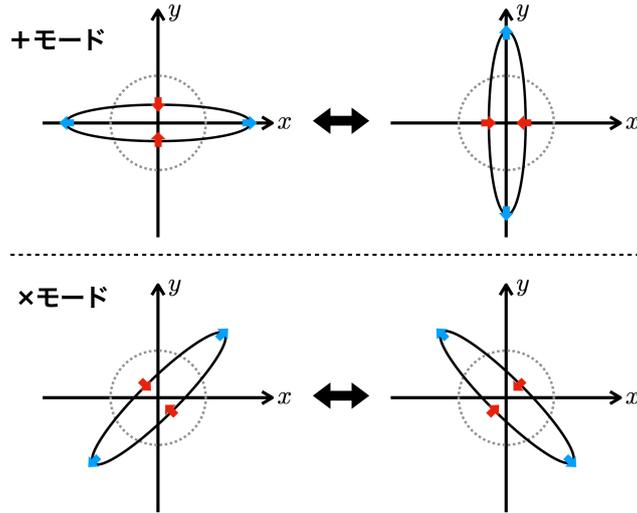


図 1.1: 重力波の +モードと ×モード。時空が歪み、赤矢印のように圧縮された部分は高温に、青矢印のように引き伸ばされた部分は低温になる。

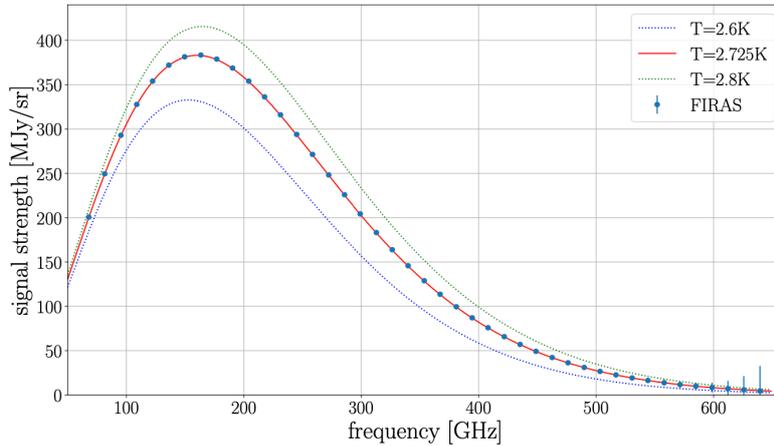


図 1.2: COBE 衛星に搭載された FIRAS 分光計によって観測された CMB のスペクトルを黒体放射のスペクトルで fitting した結果。2.725K の黒体放射スペクトルと非常によく一致している。^[3]

宇宙膨張と共に CMB の波長は引き伸ばされ、今の我々には 2.725K の黒体放射として届いている。引き伸ばされる過程で量子揺らぎ Ψ や Φ を大きく引き伸ばすため、CMB は完全に一様等方ではなく微小な温度異方性を持つ。図 1.3 に Planck 衛星によって観測された CMB の温度異方性のマップを示す。空間曲率の揺らぎ Φ はスケール因子 $a(t)$ に作用し CMB の引き伸ばされ方に局所的な変化を生むため温度異方性を生む。また、光子が重力ポテンシャルの大きい場所を通る際にエネルギーを得るため、重力ポテンシャルの揺らぎ Ψ の空間分布によって CMB に温度異方性が生まれる。

CMB の平均温度を \bar{T} としそこからのズレを $\Delta T = T - \bar{T}$ とする。球面調和関数 $Y_l^m(\theta, \phi)$ を用いて、天球上の座標 $\hat{n} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$ での温度揺らぎ ΔT を球面調和展開する。

$$\Delta T(\hat{n}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm}^T Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1.18)$$

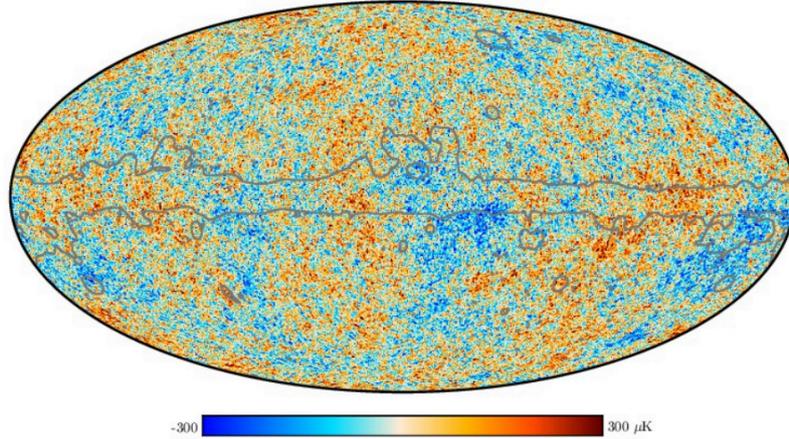


図 1.3: Planck 衛星によって観測された CMB の温度のマップ。ほとんど一様等方であるが、 10^{-5} ほどのわずかな温度揺らぎがある。^[4]

この a_{lm}^T を用いて、CMB のパワースペクトル C_l^{TT} を以下のように書く。

$$C_l^{TT} = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l (a_{lm}^T)^* a_{lm}^T \quad (1.19)$$

l は角度スケール $\delta\theta$ と以下の式で結びつけられる。

$$l \simeq \frac{\pi}{\delta\theta} \quad (1.20)$$

Planck 衛星によって得られた CMB のパワースペクトルを図 1.4 に示す。横軸の l が CMB の温度異方性の角度スケールを表し、 l が小さいほど大角度スケールの揺らぎを、 l が大きいほど小角度スケールの細かい揺らぎを表す。縦軸は $D_l^{TT} = l(l+1)C_l^{TT}/2\pi$ であり、揺らぎの大きさを示す。

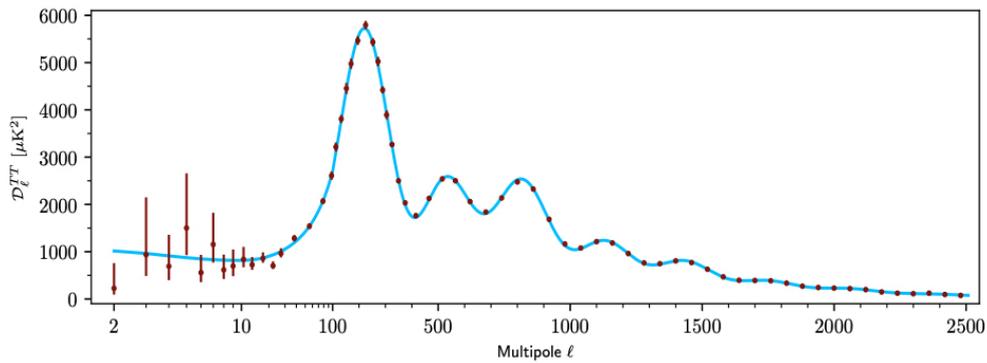


図 1.4: Planck 衛星によって得られた CMB のパワースペクトル。横軸の l が CMB の温度異方性の角度スケールを表し、縦軸の $D_l^{TT} = l(l+1)C_l^{TT}/2\pi$ は揺らぎの大きさを示す。^[4]

1.3.2 CMB の偏光

CMB は温度異方性があるだけでなく偏光もしており、その偏光パターンには E モードと B モードという二つの種類がある。図 1.5 にそれぞれのモードの概要を示す。本節ではそれぞれの生成原理について説明する。

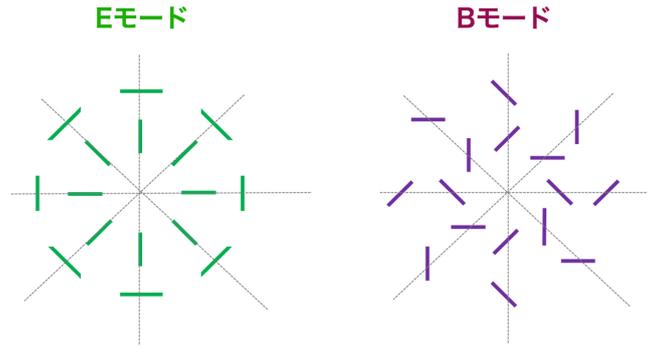


図 1.5: CMB の偏光パターンである E モードと B モードの概要図。

まず、四重極温度異方性が直線偏光を生む原理の模式図を図 1.6 に示す。無偏光が電子に入射してトムソン散乱すると、反射面に対して水平方向に偏光する。温度が一様等方ならさまざまな方向からやってくる光子によって平均化され反射光は無偏光となるが、四重極温度異方性がある時は反射光の偏光成分の強度がそれぞれ異なるため、反射光が直線偏光となる。高温領域からの光は低温領域からの光より強度が高いため、観測者は低温領域をつなげたような直線偏光を観測することになる。

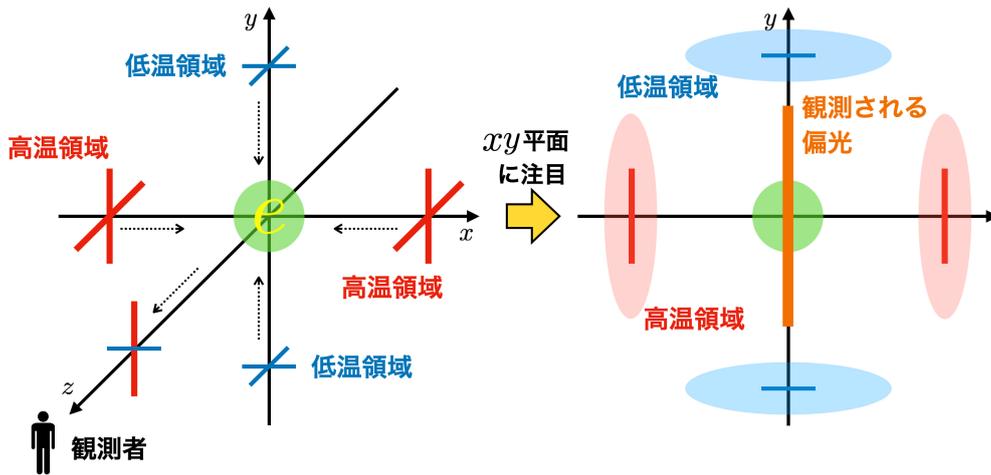


図 1.6: 四重極温度異方性による直線偏光の生成原理。低温領域をつなげた直線偏光が観測される。

インフラトンのスカラー揺らぎは音波のような疎密波として解釈できる。図 1.7 では最終散乱面上の y 軸方向に疎密波が伝わることを想定している。この時、天球面上で観測の角度を変えていくと図 1.8 のように偏光が変化していくことになる。この偏光パターンは空間反転に対して対象である。このような偏光パターンを E モードと呼ぶ。

これに対して、空間反転に対して反対称な偏光パターンを B モードと呼ぶ。 B モード偏光は原始重力波であるテンソル揺らぎおよび重力レンズから生成される。図 1.9 では h_{\times} 重力波が最終散乱面上の y 軸方向に伝播している様子を表している。この時、天球面上で観測の角度を変えていくと図 1.10 のように偏光が変化していくことになる。この偏光パターンは空間反転に対して反対称である。最終散乱面の摂動で生み出された以上の偏光パターンの他に、CMB が私たちの元に届くまでの間に大質量の天体の近くを通ることで弱い重力レンズ効果を受けることで、 E モード偏光が B モード偏光に変わるという効果もある。

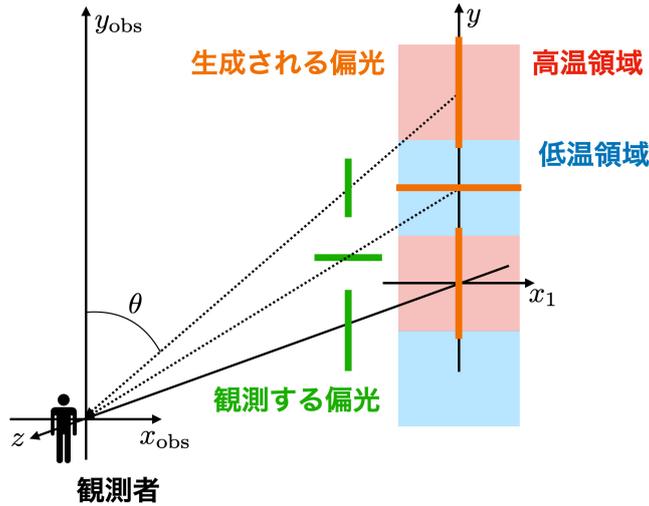


図 1.7: スカラー揺らぎによる E モード偏光の生成。高温領域と低温領域が交互にあることで、縦横の偏光が交互に現れる。

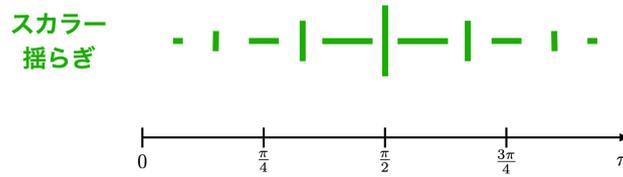


図 1.8: 天球上で視野角を変えていった時の E モード偏光の変化。空間反転に対して対称である。

1.3.3 CMB の偏光のスペクトル

重力波の大きさを表す指標として、テンソルスカラー r を導入する。 Ψ 、 Φ による空間のスカラー揺らぎと h_{ij} によるテンソル揺らぎの振幅をそれぞれ A_s 、 A_t として

$$r \equiv \frac{A_t}{A_s} \quad (1.21)$$

と定義する。図 1.11 に示すように、より小さい r はより小さな強度の (原始重力波由来の) B モードを意味し、 r が小さいほど後述する E モードからの漏れこみや重力レンズ効果による B モードに邪魔され原始重力波由来の B モードの検出が困難になると言える。これまでの CMB 偏光の観測から、 $r < 0.032$ (95% 信頼区間) であると明らかになっている。^[5] より小さな r について観測を行い、もしゼロでない r を検出することができればそれはインフレーション中に生じた原始重力波の確固たる証拠となる。

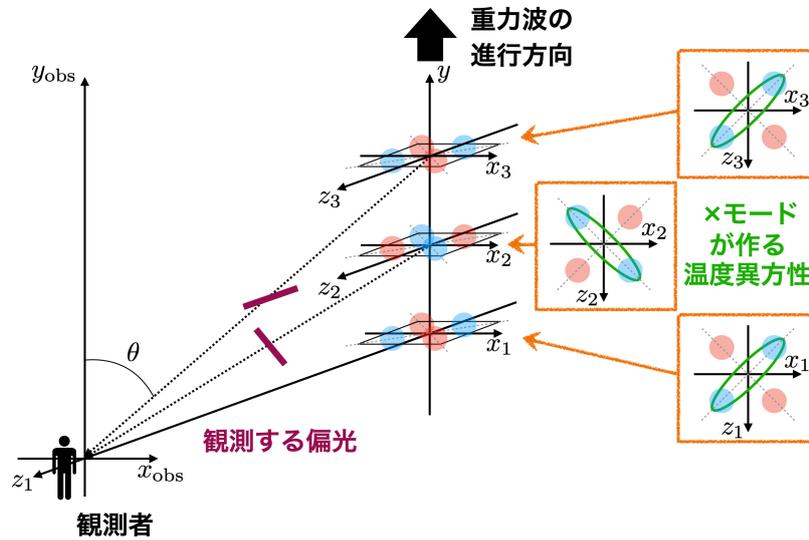


図 1.9: Xモードのテンソル揺らぎによる B モード偏光の生成。重力波によって圧縮された領域が高温に、引き伸ばされた領域が低温になるため、低温領域をつなげた斜めの偏光が交互に現れる。

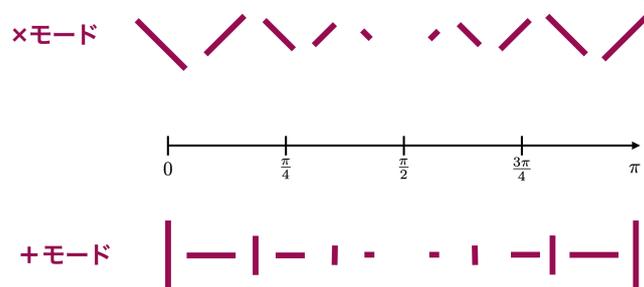


図 1.10: 天球上で視野角を変えていった時の B モード偏光の変化。空間反転に対して反対称である。

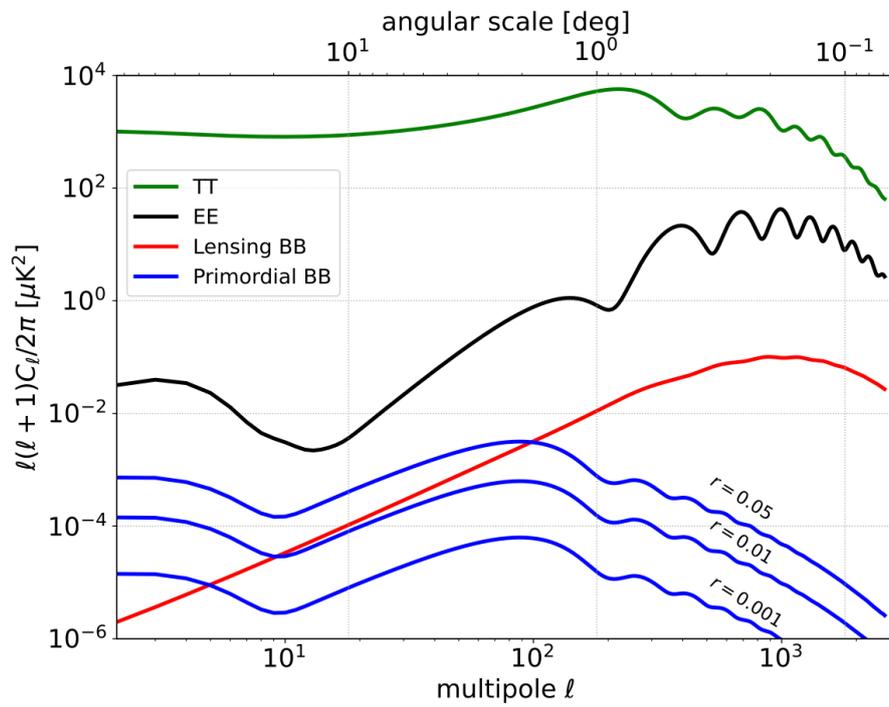


図 1.11: 各偏光の強度。全ての和を緑線、 E モードを黒線、重力レンズによる B モードを赤線、各 r を仮定したときの原始重力波による B モードを青線で示している。

1.4 Simons Observatory 実験

1.4.1 概要

Simons Observatory 実験 (SO 実験) は、チリのアタカマ砂漠で観測されている CMB の地上観測実験である。^[6] 現在、口径 0.5m の小口径望遠鏡 (Small Aperture Telescope: SAT) が 3 台と口径 6.0m の大口径望遠鏡 (Large Aperture Telescope: LAT) が 1 台の計 4 台での観測が進められており、今後さらに日本主導の SAT(JSAT)1 台とイギリス主導の SAT が 2 台追加される予定である。LAT と SAT の外観を図 1.12 に示す。TES(Transition Edge Sensor) ボロメーターという検出器が SAT には各約 1 万個、LAT には約 3 万個の搭載されており、それによって CMB 偏光を高精度で測定することで、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、ニュートリノの質量和の測定を目指している。

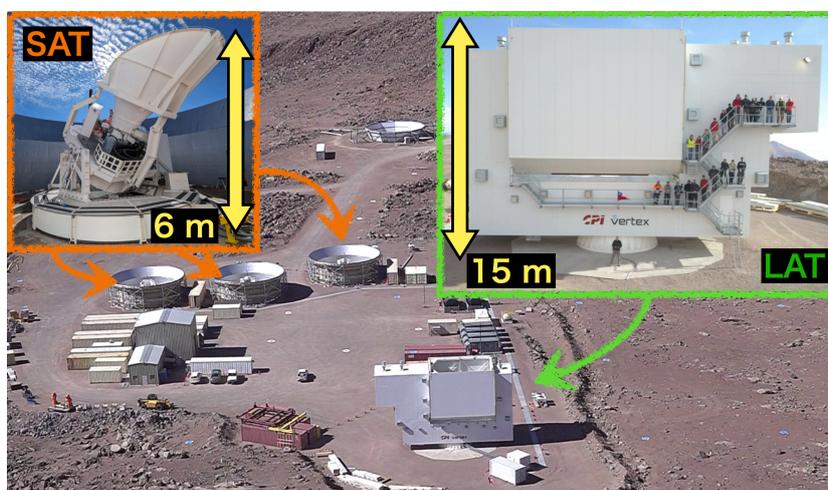


図 1.12: LAT と SAT の概観。

立体角 Ω 、開口面積 A 、観測波長 λ の間には回折限界の関係式^[7]

$$\Omega \approx \frac{\lambda^2}{A} \quad (1.22)$$

が成り立つことから、より大きな口径を持つ望遠鏡ほどより高い角度分解能を持ち、より細かい角度の相関を見られることが分かる。しかし一方で大口径の望遠鏡は視野角が小さくなってしまったため、大角度の相関を見るためには不向きである。そのため、SO 実験では LAT での小角度スケールの観測と SAT での大角度スケールの観測を組み合わせることで、広い l にわたって CMB パワースペクトルを測定しさまざまな物理へアプローチする。

1.4.2 SAT での偏光観測

ここでは特に小口径望遠鏡 SAT について詳細を述べる。SAT は CMB の大角度相関 ($30 < l < 300$) を観測する。高精度観測のためにはノイズとなる前景放射を取り除く必要があり、主な前景放射としてダスト放射とシンクロトロン放射が挙げられる。これらの前景放射と CMB はそれぞれ異なる周波数依存性を持つため、SAT では複数の周波数帯域で観測を行うことで前景放射の除去を可能としている。図 1.13 にダスト放射、シンクロトロン放射、CMB の周波数依存性と SAT の各観測帯

域を示す。3 台の SAT のうち 2 台は 93GHz と 145GHz、1 台は 225GHz と 280GHz での観測を行っており、さらに追加予定の日本主導の JSAT では 27GHz と 39GHz での観測を予定している。

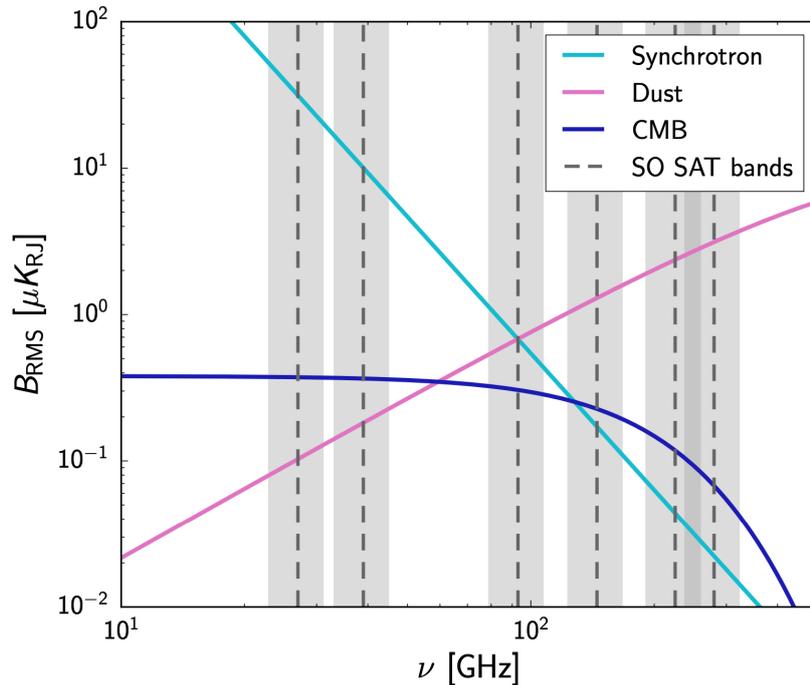


図 1.13: SAT の観測する周波数帯域と主な前景放射および CMB のスペクトル。異なる帯域で観測することで観測することで前景放射を取り除き、CMB を観測する。

図 1.14 に SAT 望遠鏡の断面図を示す。入射した光は極低温連続回転式半波長板 (HWP) を通過し変調された後、光学筒を通して焦点面検出器で検出される。また、これらの前にはスパスワイヤグリッドによる偏光角較正システムが設置されており、偏光角較正モードの際には全ての焦点面検出器を一度に較正することができる。

焦点面検出器

超電導物質は温度が転移点を下回ると電気抵抗が急激に下がりゼロに近づく。この性質を利用し、転移点を少しだけ下回る温度に制御された超電導物質に光吸収体を接続して、光が入射し温度が上がった際の電気抵抗の上昇で入射光の強度を測定できる。このような装置を TES ボロメータと呼ぶ。図 1.15 に焦点面検出器の概観を示す。

SO の焦点面検出器の TES ボロメータには OMT(Ortho-Mode Transducer) とフィードホーンが取り付けられている。入射してきた光はフィードホーンによって OMT に導かれ、OMT によって直交する 2 つの偏光方向に分けられる。分けられた光がそれぞれ別の TES ボロメータで測定される。このようにして、一つ一つの焦点面検出器は特定の偏光方向に対する感度を持つ。

極低温連続回転式半波長板 (HWP)

CMB の偏光観測において問題となるのが大気揺らぎによって大気からの無偏光熱放射が時間変化する、 $1/f$ ノイズである。SAT においてはこの $1/f$ ノイズと CMB 偏光信号を分離するために、極低温連続回転式半波長板 (cryogenic continuously rotating Half-Wave Plate, HWP) を用いる。

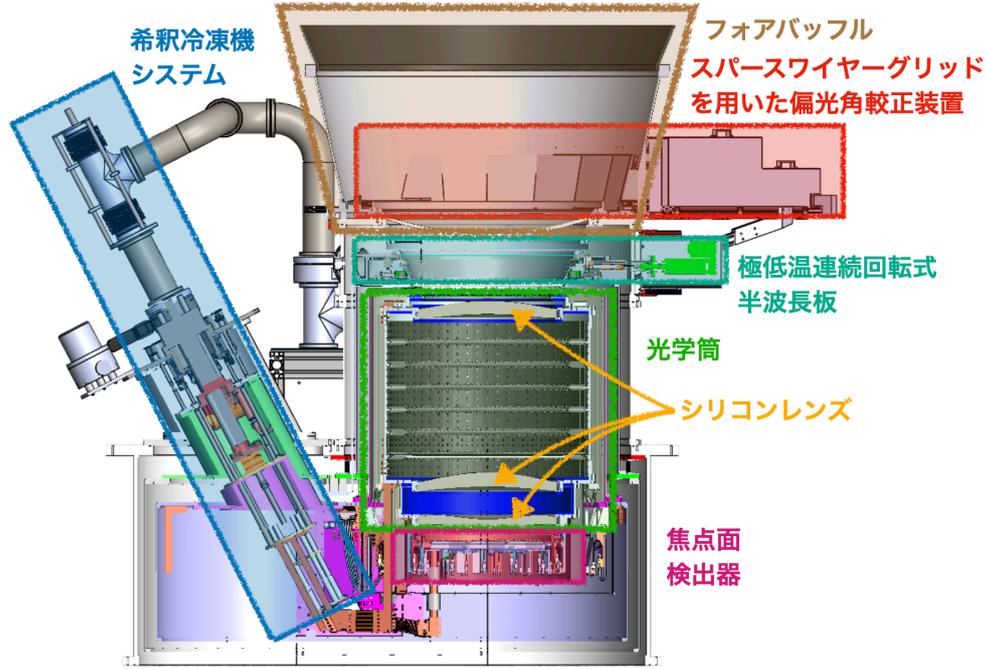


図 1.14: SAT 望遠鏡の断面図。スパースワイヤーグリッドは出し入れができるようになっている。入射光は極低温連続回転式半波長板を通過後、焦点面検出器で検出される。

[8] HWP は複屈折という特性を持つ素材から成り、入射光の偏光方向を変化させる。HWP をある周波数で回転させながら観測を行い、その信号を復調することで、揺らぎと信号の分離が可能となる。

[9]

半波長板は 2 つの異なる光軸を持つ複屈折素材であり、それぞれの光軸の屈折率が異なる。屈折率 n_e の x 軸を通過した偏光成分と n_o の y 軸を通過した偏光成分の間には位相差

$$\Delta\delta = 2\pi|n_e - n_o|\frac{d}{\lambda} \quad (1.23)$$

が生じる。 d は光が通過する厚み、 μ は電磁波の波長である。 x 軸に対する入射光の偏光軸の向きを χ とすると、入射時の電場 $\mathbf{E}(0)$ は

$$\mathbf{E}(0) = E_0(\cos\chi\mathbf{e}_x + \sin\chi\mathbf{e}_y) \quad (1.24)$$

であり、光が複屈折素材の中を厚み d だけ進んだ時の電場 $\mathbf{E}(d)$ は

$$\mathbf{E}(d) = E_0 \cos\chi \exp(-i2\pi n_e d/\lambda)\mathbf{e}_x + E_0 \sin\chi \exp(-i2\pi n_o d/\lambda)\mathbf{e}_y \quad (1.25)$$

となる。HWP ではこの位相差が $\Delta\delta = \pi$ になるように $|n_e - n_o|d_{\text{HWP}} = \lambda/2$ で設計されているため、式 (??) より HWP から出ていく光は $\mathbf{E}(d_{\text{HWP}})$ は

$$\mathbf{E}(d_{\text{HWP}}) = E_0(\cos(-\chi)\mathbf{e}_x + \sin(-\chi)\mathbf{e}_y) \exp(-i\pi n_e/|n_e - n_o|) \quad (1.26)$$

とかける。式 1.23 と式 1.26 を比較すると、偏光方向が x 軸に対して反転し、複屈折の軸である x 軸と入射光の偏光方向のなす角 χ に対して -2χ だけ偏光角が変化していることがわかる。HWP によるこの偏光角の変化の概要図を図 1.16 に示す。

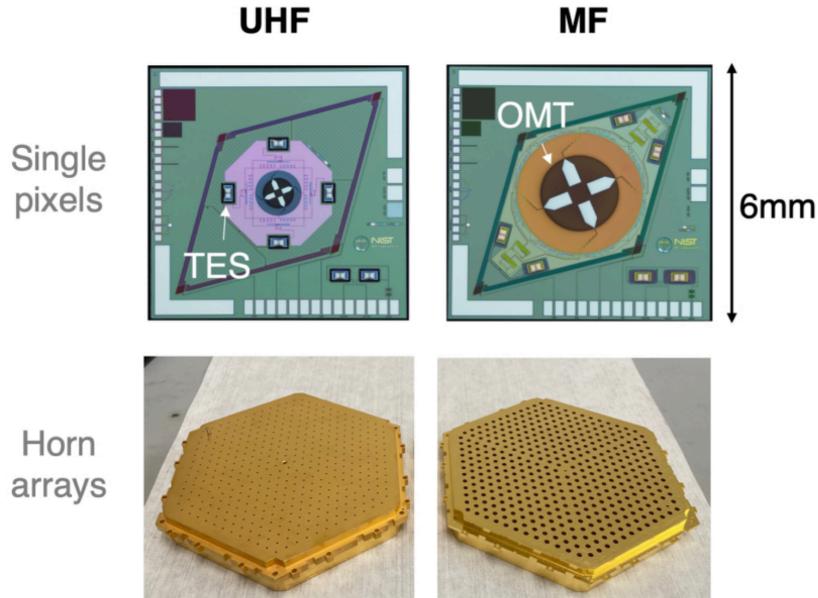


図 1.15: 焦点面検出器の概観。入射光はフィードホーンによって OMT へ導かれ、OMT で直交する二つの偏光に分けられた後、TES ボロメータに入射する。[21]

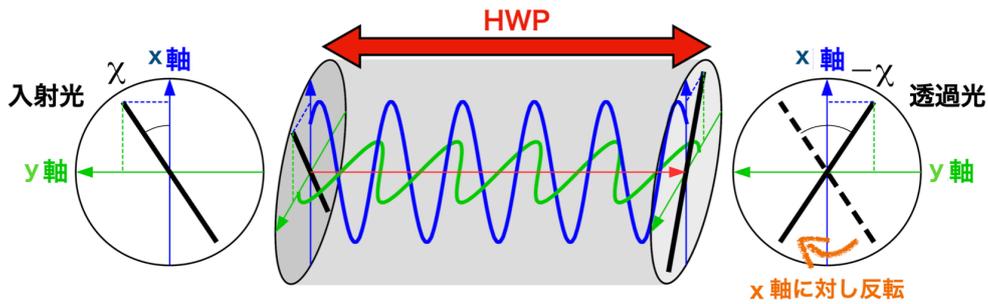


図 1.16: HWP を通過することで偏光角が変化する。HWP の持つ複屈折の軸と入射光の偏光方向のなす角 χ に対して -2χ だけ偏光角が変化する。HWP ではさらに複屈折の軸を回転させることで出力信号を回転させる。

この性質により、ストークスパラメータ (定義は付録 A を参照) がそれぞれ I_{in} 、 Q_{in} 、 U_{in} であるような入射光が、HWP を通過した後に HWP の x 軸方向に感度を持つアンテナで検出された場合の出力信号 $d_m(t)$ は以下ようになる。

$$d_m(t) = I_{in}(t) + \varepsilon_{mod} \text{Re}[(Q_{in}(t) \pm iU_{in}(t)) \exp(\mp 4i\chi)] \quad (1.27)$$

ただし、 ε_{mod} は変調効率である。

HWP を回転させることで複屈折の軸である x 軸を回転させ χ を時間変化させることで出力信号を時間変化させることができ、 $\chi(t) = \omega_{HWP}t + \chi_0$ とすると出力信号は

$$d_m(t) = I_{in}(t) + \varepsilon_{mod} \text{Re}[(Q_{in}(t) \pm iU_{in}(t)) \exp(\mp 4i\omega_{HWP}t \mp 4i\chi_0)] \quad (1.28)$$

となる。検出器の感度方向は θ_{det} であるため、最終的に検出器が読み出す信号は

$$d_{m,det}(t) = I_{in}(t) + \varepsilon_{mod} \text{Re}[(Q_{in}(t) \pm iU_{in}(t)) \exp(\mp 4i\omega_{HWP}t \mp 4i\chi_0 \pm 2i\theta_{det})] \quad (1.29)$$

となる。

1.4.3 偏光角較正

CMB の偏光観測での B モード探索において、検出器の偏光角感度方向 θ_{det} を精度良く把握することは非常に重要である。例えば偏光角を $\delta\theta$ だけ誤って把握していた場合、観測されるストークスパラメーターは以下ようになる。^{[10][11]}

$$\begin{aligned} Q_{\text{obs}} \pm iU_{\text{obs}} &= e^{\pm i2\delta\theta} (Q \pm iU) \\ &= e^{\pm i2\delta\theta} \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^l [-(a_{lm}^E \pm ia_{lm}^B)]_{\pm 2} Y_{lm}(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (1.30)$$

よって、式 (1.19) にあったようにパワースペクトル

$$C_l^{XY} = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l \langle (a_{lm}^X)^* a_{lm}^Y \rangle \quad (1.31)$$

を用いると

$$\begin{pmatrix} C_{\text{obs},l}^{TT} \\ C_{\text{obs},l}^{TE} \\ C_{\text{obs},l}^{TB} \\ C_{\text{obs},l}^{EE} \\ C_{\text{obs},l}^{BB} \\ C_{\text{obs},l}^{EB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\delta\theta) & 0 & -\sin(2\delta\theta) & 0 & 0 \\ 0 & \sin(2\delta\theta) & 0 & \cos(2\delta\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos^2(2\delta\theta) & \sin^2(2\delta\theta) & -\sin(4\delta\theta) \\ 0 & 0 & 0 & \sin^2(2\delta\theta) & \cos^2(2\delta\theta) & \sin(4\delta\theta) \\ 0 & 0 & 0 & \sin(4\delta\theta)/2 & \sin(4\delta\theta)/2 & \cos(4\delta\theta)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_l^{TT} \\ C_l^{TE} \\ C_l^{TB} \\ C_l^{EE} \\ C_l^{BB} \\ C_l^{EB} \end{pmatrix} \quad (1.32)$$

とかける。

仮に標準宇宙モデル ($C_l^{TB} = 0$, $C_l^{EB} = 0$) が正しかったとしても、検出器の偏光角感度方向を見誤ると E モードが B モードとして漏れこみ、誤って観測されてしまう。

$$C_{\text{obs},l}^{BB} = \sin^2(2\delta\theta) C_l^{EE} + \cos^2(2\delta\theta) C_l^{BB} \quad (1.33)$$

この式に基づいた漏れこみを図 1.17 に示す。 r の値としては与えられている上限値である 0.032 から 0.001 までの値を示した。

SAT の観測領域でより小さな r の探索を可能にするには、より高精度な偏光角較正を行い E モードからの漏れ込みの影響を除去する必要がある、 $\delta\theta < 0.1^\circ$ であれば誤較正から生じる漏れこみが統計誤差と比べて無視できる程度に抑えられることが確認されている。^[12] よって、本論文ではスワースワイヤグリッドによる偏光角較正における系統誤差を $\delta\theta < 0.1^\circ$ に収めることを目標とする。

1.4.4 偏光角較正の諸手法

以下に偏光角の較正において主要な手法を紹介する、

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。偏光角が周波数に依存する可能性が指摘されているほか、天体内部で偏光方向に差があるため高い解像度の観測では 0.4° の系統誤差が生まれる。また、観測できる時期・時間帯が限られてしまう。さらに、SO

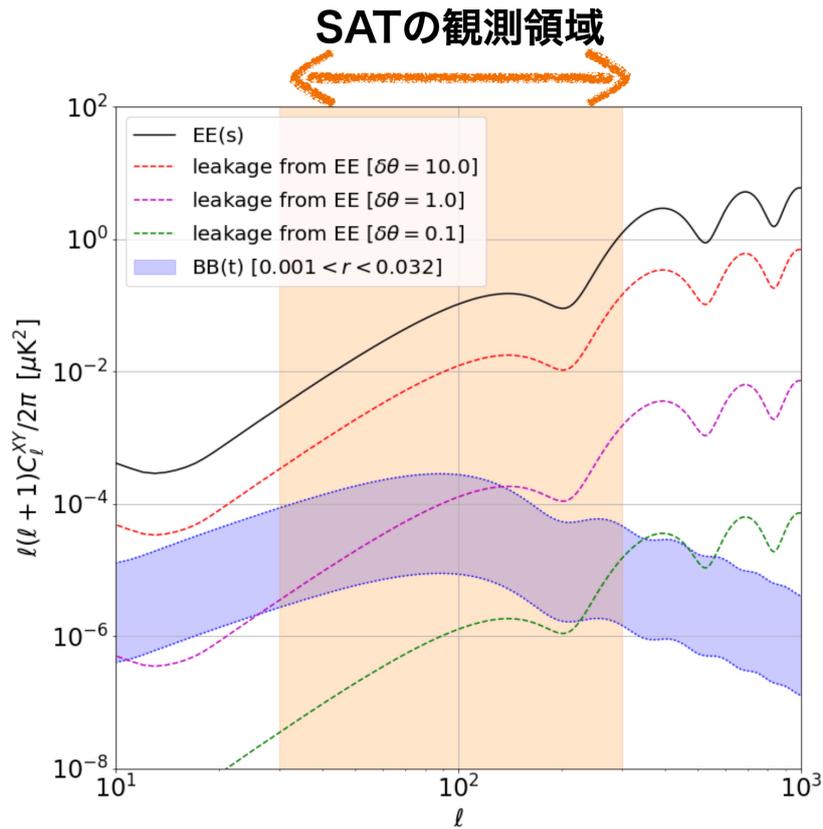


図 1.17: 偏光角の誤較正による漏れこみ。E モードと同じ形のスペクトルが B モードに漏れこむ。青帯で示した B モードを検出するには、漏れこみの強度を $\delta\theta < 0.1^\circ$ に抑えなければならない。

実験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、検出器の一部でしか観測できない。

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。南天に昇るため南半球からでも比較的観測しやすいが、偏光角の周波数依存性や内部構造の影響など Tau A と同じ要因による系統誤差を持ちうる。

3. 月:

月は太陽光を散乱反射することで、月面上の点から中心方向に放射状の偏光パターンを示す。Tau A と同様に月の表面上の位置による偏光角の違いが問題となるほか、非常に明るいため SAT の TES 検出器のダイナミックレンジを超えてしまう。

4. 誘電体シート:

誘電体シートは、薄いポリマー膜を光路に配置し、環境からの熱放射を反射させることで人工的な直線偏光を生成する装置である。厚みを変化させることで強度を容易に制御できるという利点がある。しかし、望遠鏡の視野を全て覆うには大きな装置が必要となり、周波数ごとに偏光生成の特性が変わってしまうため周波数の精密測定が必要となる。

5. デンスワイヤーグリッド:

デンスワイヤーグリッドは、電波の波長より十分短い間隔で金属ワイヤーを張った光学素子である。ワイヤー方向には電流が流れるが直交方向には電流が流れず、ワイヤー方向と並行な偏

光は反射し直行する偏光は透過する。デンスワイヤーグリッドを望遠鏡口径に対して平行に置くとグリッドと検出器の間で反射が繰り返され系統誤差が増大してしまう。そのため、通常はグリッドを傾けて設置する。口径全体を覆うためにはグリッド自体を大面積にする必要があり、ワイヤー間隔の制御や長期間の保全が困難になる。

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、電波の波長より十分長い間隔で金属ワイヤーを張った装置である。原理の詳細は後述するが、環境熱放射をワイヤーが反射することでワイヤー方向と平行な偏光方向の直線偏光を生む。デンスワイヤーグリッドと異なりワイヤー間隔が広いと多重反射を起こしにくく、口径と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になる。さらに、ワイヤー間隔が十分長いとみなせる時には周波数依存性が小さい。

7. 自己較正:

標準宇宙モデルでは $C_l^{EB} = 0$ である。相対角度の較正を十分に行った後でこれを仮定することで $\delta\theta$ を求め、絶対角度の較正を行う。これによって全ての角度スケールでパワースペクトルを較正することができ、検出器数を増やすことでその精度も向上させることができる。しかし、 $C_l^{EB} = 0$ を仮定することで標準宇宙モデルを超える物理に対する感度を捨ててしまう可能性がある。

各較正手法の決定精度を表 1.1 にまとめる。以上を踏まえ、SAT ではスパースワイヤーグリッドを用いた偏光角角度較正を行うことで、 $\delta\theta < 0.1^\circ$ の較正を目指す。周波数依存性が小さく、望遠鏡の視野を全て覆うことが可能であり、全ての検出器を同時に較正できるためである。

実験	周波数帯 [GHz]	手法	$\delta\theta [^\circ]$
POLARBEAR ^[13]	150	Tau A	0.43
		自己較正	0.2
DASI ^[14]	26 36	月・デンスワイヤーグリッド	0.4
BICEP ^[15]	100, 150, 220	誘電体シート	0.7
BICEP2 ^[16]	150	自己較正	1
SPTpol ^[17]	150	デンスワイヤーグリッド	1
	95		1.5
ABS ^[18]	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 ^[19]	43, 94	月	1
		Tau A, スパースワイヤーグリッド	3
SPT-3G ^[20]	90	Cen A	2.0
	150		2.2
	220		4.5

表 1.1: 各較正手法の決定精度

1.5 本論文の構成

まず2章でスパースワイヤグリッドの偏光角較正の原理や設計の詳細、および考えられる系統誤差について述べる。その後3章ではスパースワイヤグリッドの系統誤差のうちワイヤーのたわみによる誤差に注目し、先行研究で開発されたたわみの自動測定装置と、ワイヤー素材および張力の変更によるたわみの削減について述べる。4章では系統誤差のうち重力参照角度計による誤差に注目し、新たに使用する角度計の候補4つについて温度依存性・湿度依存性・長期間安定性の3つの観点から評価を行い要求精度を満たす角度計を選定する。最後に5章で本論文のまとめと今後の展望を述べる。

第2章

スパーズワイヤーグリッドによる偏光角較正

前章で述べた通り Simons Observatory 実験では偏光角較正の手法として、入射光よりも十分広い感覚で複数のワイヤーを張った、スパーズワイヤーグリッドという装置による偏光角較正を採用している。^{[22][23]} 本章ではその較正原理と製作手法、設置方法、および系統誤差について記述する。

2.1 偏光角較正の原理

まず、一本のワイヤーが直線偏光を生む原理について説明する。図 2.1 に示すように、周囲からの環境光が金属ワイヤーに入射するとワイヤーに平行な直線偏光となる。入射光の波長がワイヤーの太さの直径よりも十分に長い場合、金属ワイヤー中の自由電子はワイヤーに沿った方向にのみ動くのみなせ、ワイヤーと同じ方向の直線偏光のみを反射するからである。物理的なワイヤーの角度と反射光の偏光角が等しくなるため、ワイヤーの向きを測定することで偏光角を把握することができ、人工的な偏光光源として偏光角の較正に用いることができる。また、ワイヤー間隔と本数を調整することで実質的な放射温度、つまり信号強度を調整できる。

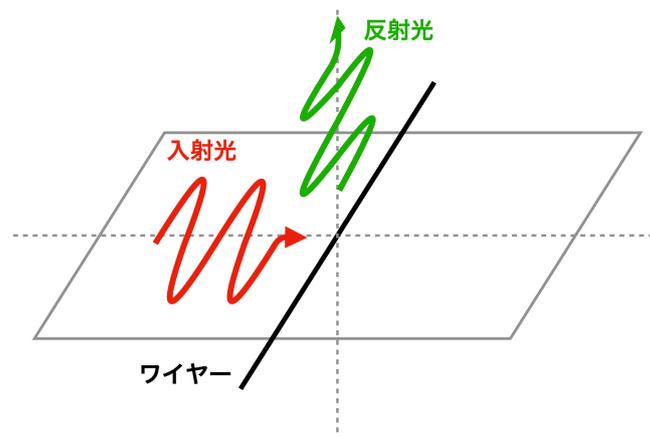


図 2.1: 金属ワイヤーが直線偏光を生む

ワイヤーの角度を θ_{wire} とすると、ワイヤーによって生み出される反射光のストークスパラメー

ターをそれぞれ Q_{in} 、 U_{in} 、反射光の強度を A とした時、

$$Q_{in} + iU_{in} = A \exp[+m2i\theta_{wire}] \quad (2.1)$$

である。HWP によって変調され検出器で読み出される信号 $d_{m,det}(t)$ は式 (1.29) にあるように

$$d_{m,det}(t) = I_{in} + \varepsilon_{mod} \text{Re}[(Q_{in} + iU_{in}) \exp(-4i\omega_{HWP}t - 4i\chi_0 + 2i\theta_{det})] \quad (2.2)$$

である。ただし、 ε_{mod} は HWP の変調における変調の変調効率であり、 I_{in} はワイヤーグリッド以外から来る無偏光な光の強度である。

I_{in} は HWP によって変調されない成分であるため、この時系列データをフーリエ変換し、周波数空間で HWP の変調に同期した成分のみを抽出 (バンドパスフィルター) した後、時系列データに逆変換することで、偏光情報のみを抜き出すことができる。抜き出した後の、各ワイヤー角度での時系列データは以下のようなになる。

$$d_{m,det} = \frac{\varepsilon_{mod}A}{2} \exp[\pm 2i\theta_{det} \pm 2i\theta_{wire}] \quad (2.3)$$

この変調後の信号は HWP による角振動数 $4\omega_{HWP}$ の正弦波に、HWP の変調のオフセット $4\chi_0$ と検出器の応答角 $2\theta_{det}$ とワイヤーの角度 $2\theta_{wire}$ を位相オフセットが加わったものになる。理想的な時系列データのイメージを図 2.2 に示す。

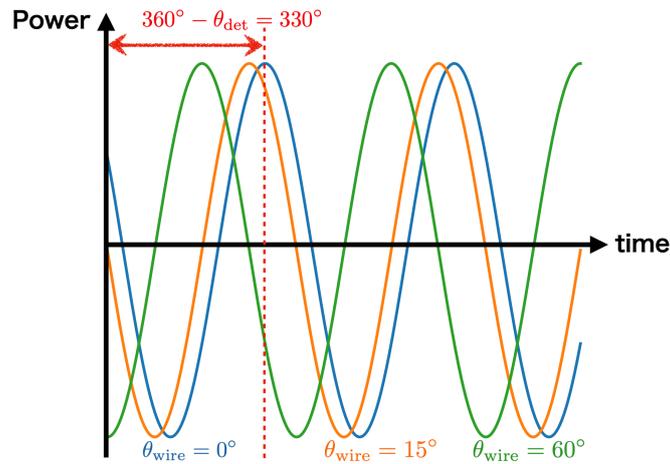


図 2.2: 出力の時間変化の例

図 2.3 に示すように、ワイヤーを望遠鏡の視野に置くと周囲からの入射光が反射され直線偏光となり望遠鏡に送られ、変調器による変調を受けたのち検出器に届く。スパースワイヤーグリッドを用いた偏光角の角度較正では、ワイヤーグリッドを段階的に回転させながら観測を行う。これによって図 2.4 に示すように検出器の偏光角の感度方向とワイヤーの向きが一致している時を最大、直交している時をゼロとして、検出器の出力が変化していく。この変化を見ることで検出器の偏光角の感度方向を較正する。HWP による変調があればワイヤーの角度を変えなくとも HWP によって図 2.2 のように偏差が変化していくため較正は可能であるが、ワイヤーを回すことで図 2.2 の複数の曲線での複数回の較正が可能になり、より系統誤差を抑制することができる。

ワイヤーの各角度に応じて振幅と位相が決まり、複素平面上に円を描くことができる。この円を較正円と呼ぶ。理想的な較正円は図 2.5 のように原点を中心とした真円となる。 θ_{wire} に光学系由来の

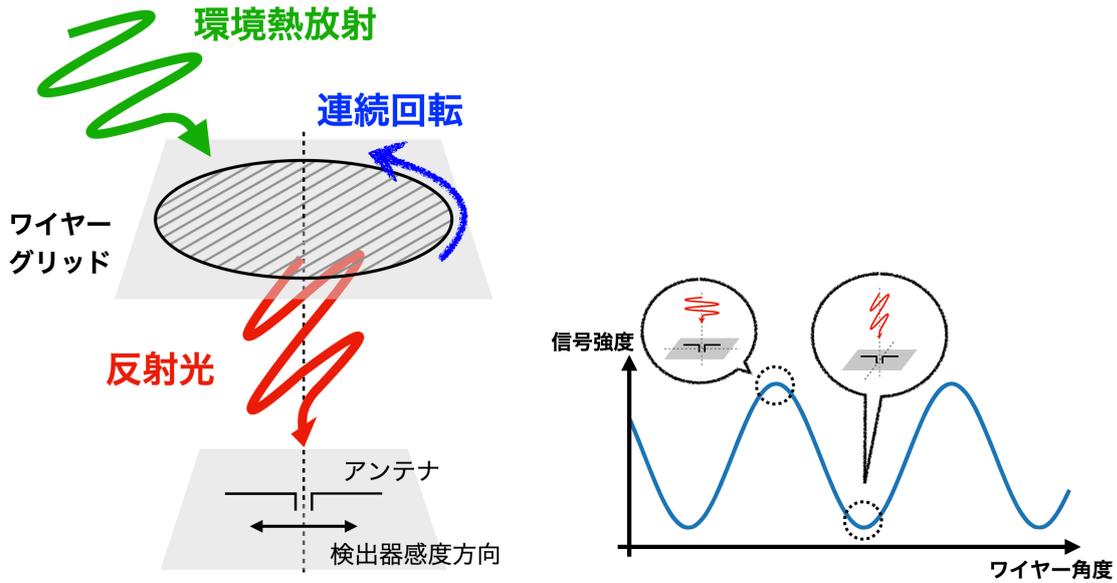


図 2.3: ワイヤグリッドが回転していくと検出器に入射する直線偏光の偏光方向が変化する。

図 2.4: 検出器の出力の時間変化。ワイヤーの向きと検出器の感度方向が並行な時出力が最大になる。

偽偏光があった場合には中心がずれ、ワイヤーが反射する環境熱放射に非等方性があれば半径が一定でない歪んだ円となる。

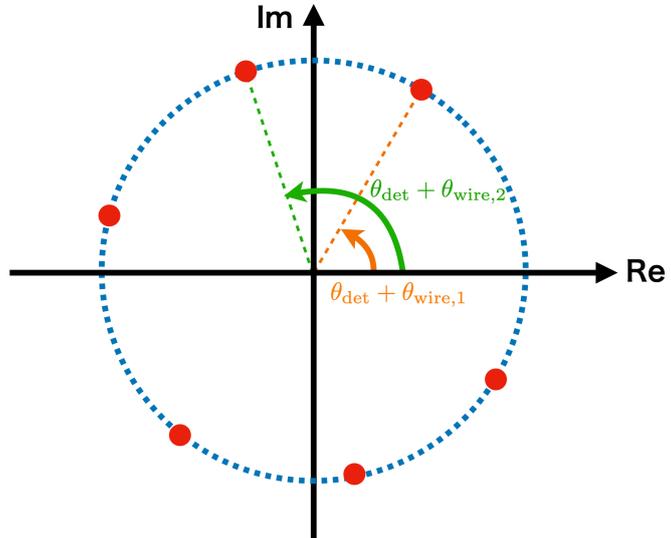


図 2.5: 出力から QU 平面上に較正円を描く

様々なワイヤー角度で測定を行うことで複素平面上にデータ点を置き円の形を定め θ_{det} を測定する。

2.2 スパースワイヤーグリッドの概要

SAT で用いているスパースワイヤーグリッドの概観を図 2.6 に示す。アルミニウム製の内径 790 mm、外径 830 mm の円形のフレームに、直径 0.1 mm の金属ワイヤーを 20 mm の間隔で 39 本平行に張ったものである。^[24] 従来の手法ではタングステンのワイヤーを用いていたが、後述する新手法ではベリリウム銅 (BeCu) のワイヤーを用いた。ワイヤーの太さと間隔は使用する電磁波の波長や信号ノイズ比によって定められ、ワイヤー本数は必要な信号強度によって定められる。

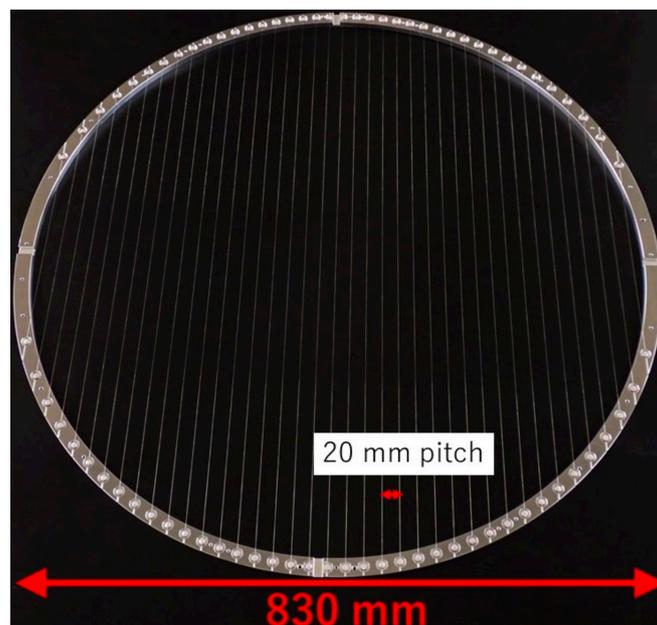


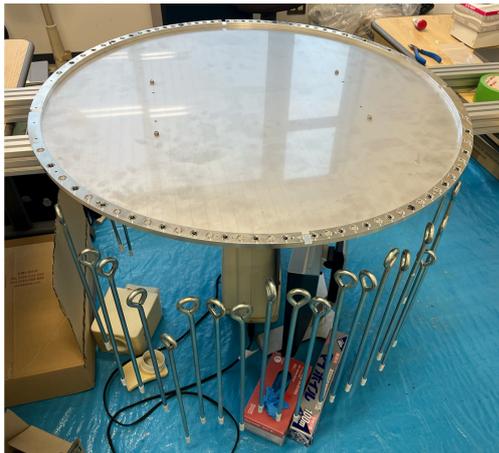
図 2.6: スパースワイヤーグリッドの概観。円形のアルミフレームに 20mm の間隔でワイヤーが張られている。内径は 790mm、外径は 830mm である。

フレームには 0.2mm の幅の溝があり、これによってワイヤーの間隔精度は $\pm 0.1\text{mm}$ で保証される。図 2.7 のように、重りをくくりつけたワイヤーを溝に沿って設置し、2 液混合型エポキシ接着剤 (Stycast 2850FTJ + Catalyst 23LV) を用いて固定する。従来の手法では 230g の重りを用いていたが、新手法では 120g の重りを用いてフレームにかかるストレスを約半分に軽減した。また、従来の手法では重り同士の干渉を避けるために偶数番号のワイヤーと奇数番号のワイヤーを 2 回に分けて設置を行っていたが、新手法では全てのワイヤーを同時に設置した。これらの変更の理由と効果については 3 章で詳しく述べる。

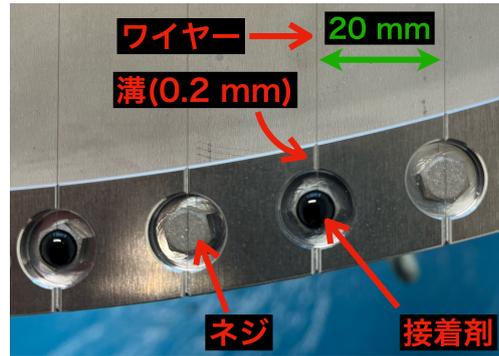
2.3 スパースワイヤーグリッドによる偏光角較正の設計

CMB 観測時はスパースワイヤーグリッドを取り除く必要があるため、2 本の電動リニアアクチュエーターによってスパースワイヤーグリッドを出し入れし較正モードと CMB 観測モードを切り替える。^[25] 出し入れは片道 90 秒ほどである。

較正モード時には、DC モータ (Crouxet 89810007) によってスパースワイヤーグリッドを回転させる。回転角度はエンコーダ (Renishaw LM15) によって 0.03° の精度でモニターされる。 22.5° ずつ回転させ、停止した状態で 10 秒間ずつ測定を行う。



(a) 作成の様子



(b) 固定方法

図 2.7: スパースワイヤーグリッドの作成方法

エンコーダがスパースワイヤーグリッドの設置平面内での相対的な回転角を出力するのに対して、設置平面の重力に対する傾きは重力参照角度計によって測定する。

2.4 角度計

前述した重力参照角度計について詳細を述べる。

式における θ_{wire} は天球面上に射影したワイヤーの絶対的な角度であり、エンコーダで出力される設置平面内のワイヤーの相対角度と設置平面の重力に対する角度を組み合わせることで求められる。

設置平面内での角度はエンコーダーで把握される。2軸式角度計が測定するワイヤーグリッドが設置された平面の2軸を x' 軸 y' 軸とした時の、図 2.8 に $x'y'$ 平面とワイヤー角度の関係を示す。 x' 軸上にあったワイヤーが回転していき、回転後の角度はエンコーダーの測定値 θ_{enc} とエンコーダーのオフセット θ_{enc0} で決定される。

測定時のワイヤーグリッドは重力に対して水平に設置されておらず、SAT の場合 elevation が 50° の観測が主であり、さらにスパ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。そのため、 $x'y'$ 平面と水平面との関係を把握する必要がある。これを測定するのが重力参照角度計である。図 2.9 に elevation と boresight の定義を示す。

図 2.10 に示すように、ワイヤーグリッドと水平面の交わる線と x' 軸の、 $x'y'$ 平面におけるなす角を θ_{sens} と定義する。図 2.11 は $x'y'$ 平面における θ_{enc} 、 θ_{enc0} と θ_{sens} を表した図であり、これらすべてを足し合わせたものが式における θ_{wire} と一致する。

$$\theta_{\text{wire}} = \theta_{\text{enc}} + \theta_{\text{enc0}} + \theta_{\text{sens}} \quad (2.4)$$

θ_{sens} を求めるために設置するのが重力参照角度計である。しかし θ_{sens} を直接求められるわけではなく、角度計が測定するのは x' 軸、 y' 軸それぞれの水平面とのなす角である α 、 β である。重力方向を $-z$ とし、 z 軸方向の単位ベクトルを e_z 、ワイヤーグリッドと水平面の交線方向の単位ベクトル

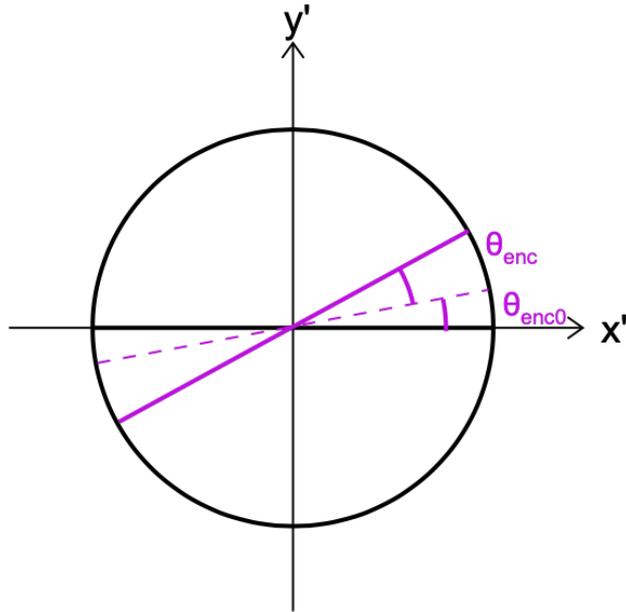


図 2.8: ワイヤの回転の測定方法。 $x'y'$ 平面がワイヤグリッド平面であり、エンコーダーの測定値とオフセットからワイヤの回転を把握する。

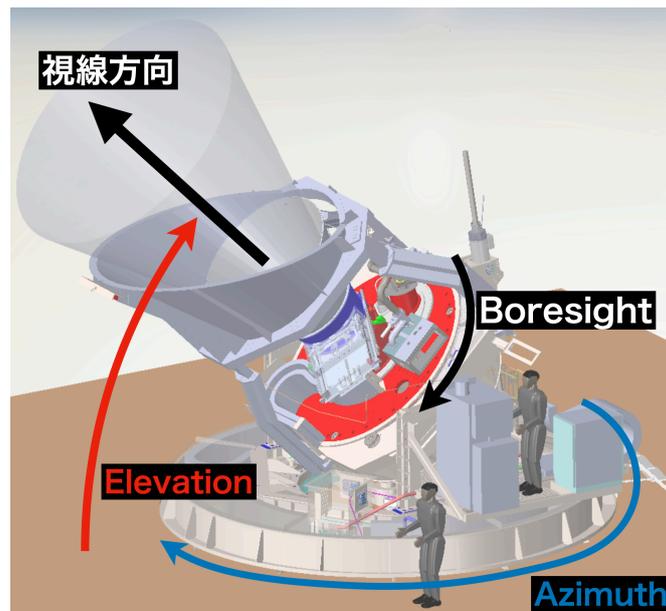


図 2.9: SAT の観測時・校正時の角度。elevation が 50° の観測が主であり、またワイヤグリッドは boresight に 60° のオフセットをもって設置されており、そこからさらに 22.5° ずつ回転していくことになる。

を e_h とした場合、この二つは垂直であることから、

$$\begin{aligned}
 e_z \cdot e_h &= e_z \cdot (\cos \theta_{\text{sens}} e_{x'} - \sin \theta_{\text{sens}} e_{y'}) \\
 &= \cos \theta_{\text{sens}} \sin \alpha - \sin \theta_{\text{sens}} \sin \beta \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

が成り立ち、

$$\theta_{\text{sens}} = \arctan \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \right) \tag{2.6}$$

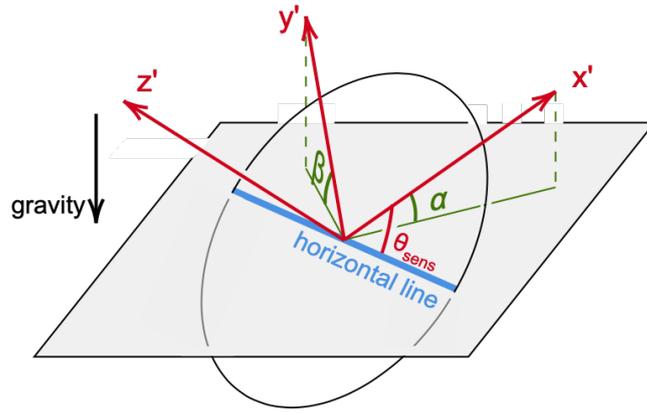


図 2.10: 絶対角度測定のための平面と角度の定義。

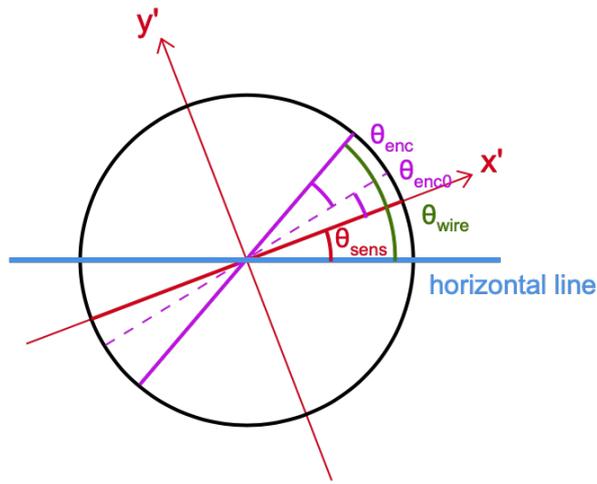


図 2.11: 角度計から得られる θ_{sens} と θ_{wire} の関係

となる。この式を用いることで角度計の測定した α 、 β から θ_{sens} を求めることができる。

さらに、重力参照角度計は通常の測定時に水平になるように図 2.12 のような治具を用いて、図 2.13 傾けて設置されている。elevation が 50° 、boresight が 60° が主な観測であるため、治具は $\theta_{\text{slope1}} = 210^\circ$ 、 $\theta_{\text{slope2}} = 40^\circ$ で設計されている。そのため、重力参照計の出力角度 θ_X 、 θ_Y は α 、 β と異なる。

角度計の持つ軸を XYZ とすると、ワイヤグリッド平面の軸 $x'y'z'$ との関係は以下の式で表される。

$$\begin{pmatrix} e_X \\ e_Y \\ e_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{\text{slope2}} & \sin \theta_{\text{slope2}} \\ 0 & -\sin \theta_{\text{slope2}} & \cos \theta_{\text{slope2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{\text{slope1}} & \sin \theta_{\text{slope1}} & 0 \\ 0 & -\sin \theta_{\text{slope1}} & \cos \theta_{\text{slope1}} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{x'} \\ e_{y'} \\ e_{z'} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

この式を用いて、 $\sin \alpha = e_{x'} \cdot e_z$ 、 $\sin \beta = e_{y'} \cdot e_z$ を $\sin \theta_X = e_X \cdot e_z$ 、 $\sin \theta_Y = e_Y \cdot e_z$ で表すと

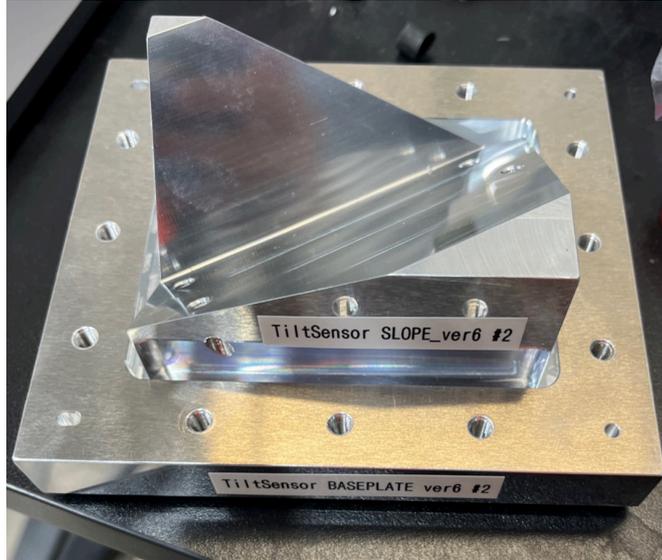


図 2.12: 角度計を設置する治具。測定時に角度計が水平になるように傾きがつけられている。

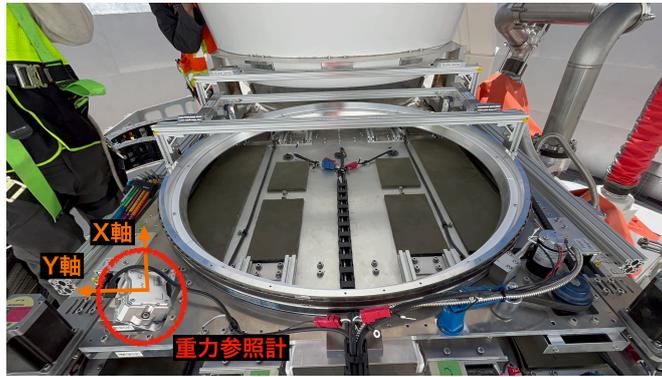


図 2.13: サイトでの角度計の設置方法。ワイヤグリッドの向きと角度計の向きが一致していないことがわかる。測定時には角度計の X 軸 Y 軸が水平面と一致する。

以下のようなになる。

$$\begin{aligned}
 \sin \alpha &= \cos \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_X - \sin \theta_{\text{slope1}} \cos \theta_{\text{slope2}} \sin \theta_Y \\
 &\quad + \sin \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_{\text{slope2}} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y} \\
 \sin \beta &= \sin \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_X - \sin \theta_{\text{slope1}} \cos \theta_{\text{slope2}} \sin \theta_Y \\
 &\quad - \cos \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_{\text{slope2}} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

2.5 系統誤差

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、先行研究での評価を以下にまとめる。

1. ワイヤーの設置精度：

図 2.7 に示すように、ワイヤーは 0.2 mm の溝に沿うように設置される。ワイヤーフレームは内径 790 mm であるから、ワイヤーの設置精度はワイヤーの中心において $\arctan \frac{0.2}{790} \simeq 0.02^\circ$

系統誤差要因	先行研究
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	$< 0.3^\circ$ 本研究で改善
ワイヤーのたわみ	$< 0.02^\circ$ 本研究で改善
合計	$< 0.3^\circ$

表 2.1: 先行研究で得られているワイヤーグリッドの系統誤差

と見なせる。

2. エンコーダの測定精度：

θ_{enc} の回転は磁気エンコーダによって測定され、磁気エンコーダの角度分解能は 0.004° である。しかし、回転機構に巻きつけられた磁気テープの影響などで 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、その測定精度として $< 0.03^\circ$ を得ている。

3. エンコーダの零点：

式 (2.4) における θ_{enc0} は実験室にて測られるエンコーダの零点である。測定時に使用した気泡管水準器の精度およびエンコーダの精度から、零点の精度は $< 0.04^\circ$ と測定されている。^[26]

4. 重力参照角度計：

重力参照角度計の出力角度の精度は θ_{sens} の誤差として現れる。重力参照角度計が満たすべき項目として、長期間の測定において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の変動を考慮し $-20^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ での出力角度の変動が小さいこと、観測サイトにおける湿度の変動を考慮し $0\% \sim 90\%$ での出力角度の変動が小さいこと、の 3 つが挙げられる。これまで Digi-Pas 社製の DWL5000-XY という製品を使用していたが、先行研究にて 2 ヶ月の期間をあけて水平面を測定したところ 0.3° 近くの長期間変動があり、要求精度を満たさないことが示された。詳細は後述する。

5. ワイヤーのたわみ：

較正に用いる直線偏光の方向はワイヤーの方向 θ_{wire} と一致するため、ワイヤーが撓んでいる部分の直線偏光はその偏光角に系統誤差が生じてしまう。先行研究では、このたわみを測定する自動測定装置を開発した。その結果、たわみによる θ_{wire} の誤差は $< 0.02^\circ$ と評価された。

これらの系統誤差を踏まえ、本論文では重力参照計による系統誤差とワイヤーのたわみによる系統誤差の削減を試みた。

第3章

ワイヤーのたわみ量の抑制

スパースワイヤーグリッドではワイヤーと全く方向に直線偏光した反射光を用いて検出器の偏光角を較正する。そのため、ワイヤーの向きの把握精度がそのまま偏光角較正精度となる。図 2.6 で示したようにスパースワイヤーグリッドは円形のアルミフレームに金属ワイヤーをピンと張った装置であるため、ワイヤーがたわむことが考えられる。このたわみによるワイヤー角度の変化が系統誤差を生む。そこで、本章ではまず先行研究^[27]で開発したたわみ自動測定装置の概要とその成果について述べる。その後、更にたわみを抑制するためにワイヤーの素材と張力を変更し、その結果について述べる。

3.1 たわみによる誤差

ワイヤーがたわむとワイヤー向きが変わってしまい、その結果偏光角が変わってしまう。たわみ角 θ_{sag} は図 3.1 に示すように定義され、

$$\theta_{\text{sag}} = \arctan\left(\frac{d_{\text{sag}}}{L_{\text{wire}}/2}\right) \quad (3.1)$$

で表される。ワイヤーの傾きがそのまま反射光の偏光角になるため、 θ_{sag} は偏光角の誤差と一致する。たわみ角 θ_{sag} を測定するためには d_{sag} を測定すれば良い。

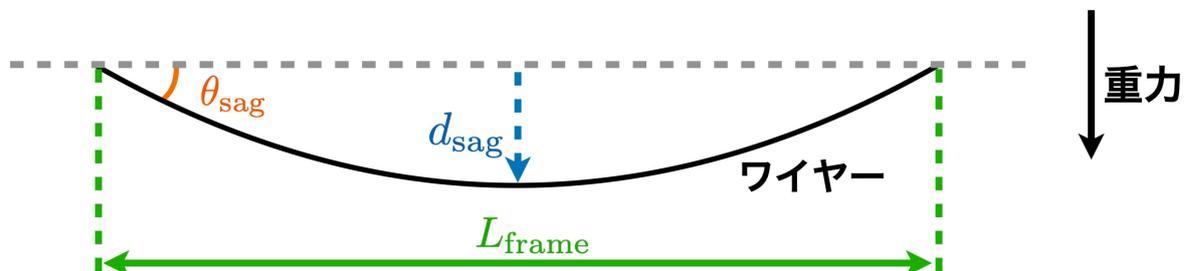


図 3.1: たわみ角 θ_{sag} とたわみ量 d_{sag} の定義。 d_{sag} を測定することで θ_{wire} の誤差である θ_{sag} を測定できる。

3.2 たわみ自動測定装置の開発

先行研究で d_{sag} を測定するたわみ自動測定装置を開発した。

まず、たわみの測定手法の概要を図 3.2 に示す。ストレートエッジとは十分な真直度が保証された金属板である。このストレートエッジとワイヤーが共に映るようにカメラで撮影し、ストレートエッジの下端とワイヤーの間のピクセル数を求める。ストレートエッジに取り付けられたスケーラーの目盛間隔から 1 mm が何ピクセルに対応するかを求めることで、ストレートエッジの下端とワイヤーの間の距離 z_i を計算する。この z_i をワイヤーに対して異なる位置で撮影した複数の写真で求め、それらをたわみの式でフィッティングすることでワイヤーのたわみ量を推定する。

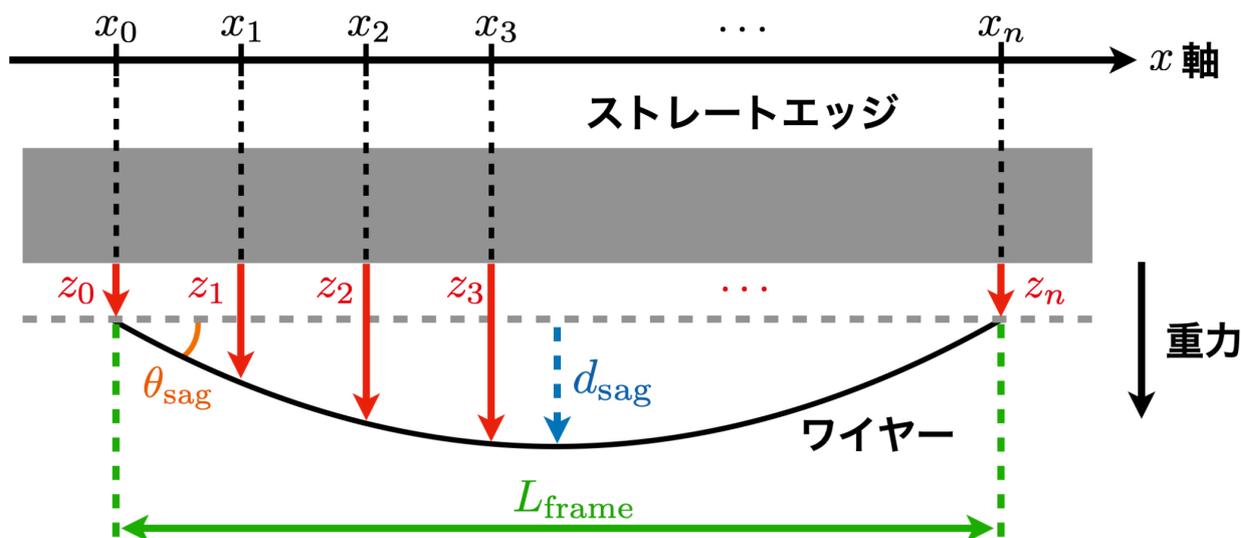


図 3.2: たわみ測定の概要図。ストレートエッジの下端とワイヤーの間の距離 z_i を複数測定し、それらをたわみの式でフィッティングすることで d_{sag} を決定する。

高精度のたわみ量測定を可能にするために開発したのが図 3.3 に示すたわみ量自動測定装置である。自動測定装置ではワイヤーグリッドを地面と垂直に設置し、ワイヤーとストレートエッジの正面から、各ワイヤーに対して 30~70 mm おきに自動で撮影する。

たわみ自動測定装置はストレートエッジとスケーラーと自動撮影が可能な web カメラ、2つのアクチュエーターで構成される。ストレートエッジは大西測定株式会社製 140-1000B であり、真直度として $30 \mu\text{m}$ が保証されている。水平方向のアクチュエーターは web カメラを動かすことで撮影位置を変え、鉛直方向のアクチュエーターはワイヤーグリッドを動かすことで撮影するワイヤーを変更する。どちらのアクチュエーターもベルト駆動式であり (Openbuilds 製 V-Slot NEMA 23(17) Linear Actuator) ステッピングモーター (Openbuilds 製 NEMA 23 Stepper Motor) とアクチュエーターコントローラー (Galil 製 DMC-4020) を用いて位置制御を行っている。web カメラおよび水平方向アクチュエーターは、できる限り大きく z_i を撮影するためにワイヤーから最大限近く、かつワイヤーを正面から撮影できる位置に設置した。また、ストレートエッジとワイヤーのどちらにもピントが合うように、ストレートエッジはワイヤーからできる限り近い 5 mm の距離で設置した。写真からのワイヤーの検出が容易になるように背景には暗幕を張り、ワイヤーはストレートエッジの裏に貼られた LED テープによって全体が均一に照らされるようにした。

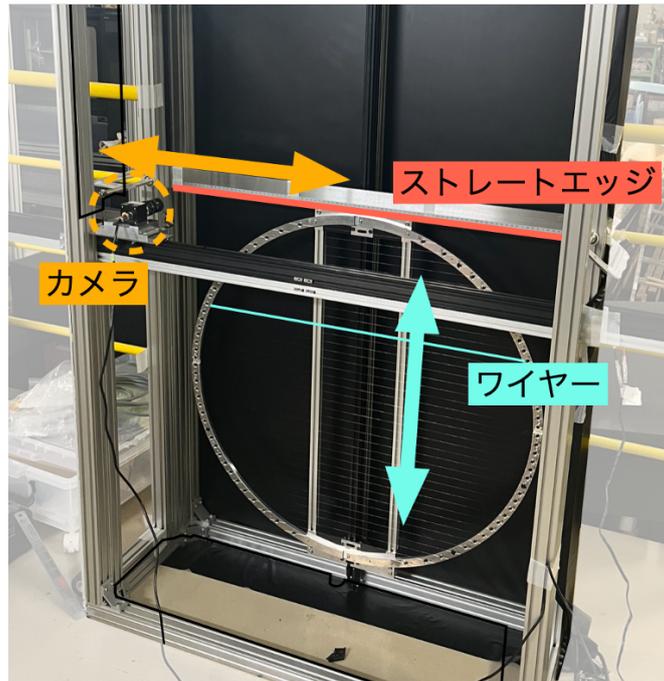


図 3.3: たわみ自動測定装置の概観。二つのアクチュエーターでワイヤーグリッドが上下に、カメラが左右にそれぞれ動く。それぞれのワイヤーについて異なる位置で写真を撮影することで z_i を測定する。

3.2.1 解析手法

たわみ自動測定装置が撮影した写真からたわみ量を推定する原理を説明する。

ストレートエッジとワイヤーは図 3.4 のように撮影画像を縦方向に切った際の輝度のグラフをフィッティングして検出する。ストレートエッジはシグモイド関数を、ワイヤーはガウス関数を用いてそれぞれフィッティングする。その後、検出されたストレートエッジの下端を直線でフィッティングすることで写真全体の傾きを検知し、その傾きを用いてストレートエッジとワイヤーを回転させる。

回転後のストレートエッジの下端とワイヤーの位置の差が解析を行った列数 (今回の解析では 1100~2100 pix の 1000 個) だけ得られる。これの平均を距離 z_i pix とし、これの標準偏差を誤差 $\sigma(z)$ pix とする。

スケーラーの目盛の間隔 d_i pix は図 3.5 のように画像を横方向に切った際の輝度のグラフをフィッティングして検出する。フィッティングには階段関数が複数重なった関数を用いる。使用したスケーラーは目盛間隔 1.00 ± 0.15 mm であるため、画像の 1pixel が対応する長さが $1/d_i$ mm/pix で求められる。なお、 d_i pix もまた写真全体の傾きを用いて補正する。

z_i pix に $1/d_i$ mm/pix をかけることで z_i mm を求められる。こうして一枚の写真から一つの z_i mm が得られる。

最後に、図 3.6 のように一本のワイヤーについて撮影した複数の写真から得られた複数の z_i mm を撮影位置 x_i mm を横軸として並べ、カタナリー曲線でフィッティングすることでたわみ量 d_{sag} を決定する。ただし、ワイヤーグリッド自体の傾きが存在するため、傾き付きのカタナリー曲線を用い

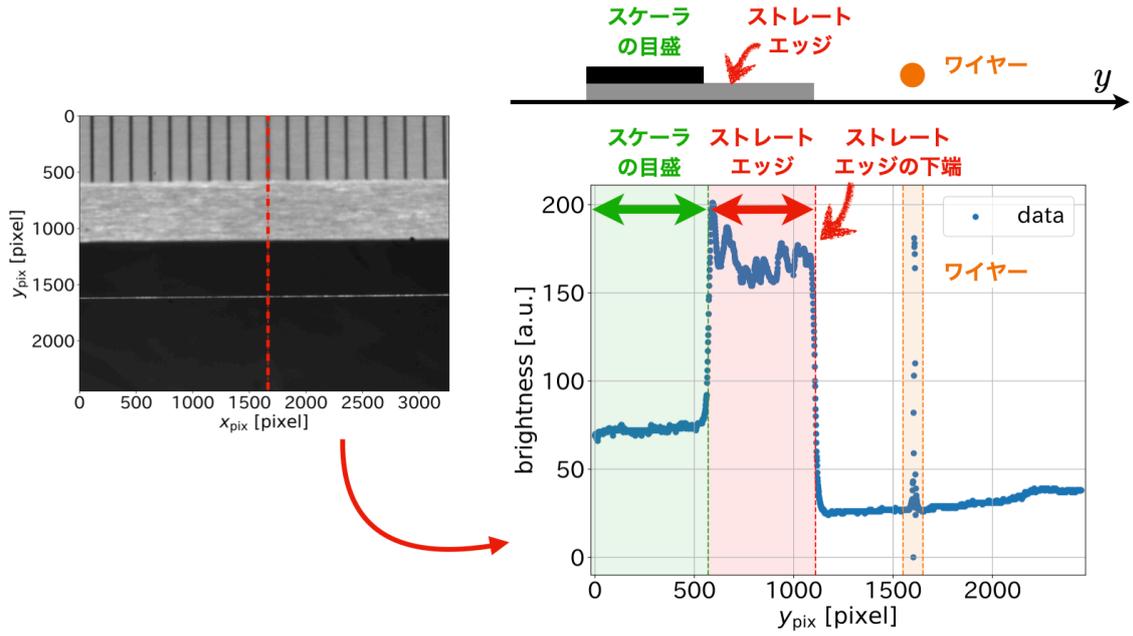


図 3.4: ストレートエッジとワイヤーの検出方法。写真を縦に切り、ストレートエッジはシグモイド関数で、ワイヤーはガウス関数でフィッティングを行う。詳しくはを参照。

る。フィッティングに用いた関数は以下の通りである。

$$f_{\text{tilt}}(x; a, X, Y, x_{\text{offset}}, y_{\text{offset}}) = a \cosh\left(\frac{x + x_{\text{offset}} + c_1}{a}\right) + c_2 - y_{\text{offset}}$$

$$c_1 = a \sinh^{-1}\left[\frac{Y}{2a \sinh\left(\frac{X}{2a}\right)}\right] \quad (3.2)$$

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

ここで (X, Y) はワイヤーの左端を $(0, 0)$ とした時の右端の位置であり、

$$L_{\text{wire}} = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.3)$$

を満たす。

a はカタナリー曲線のパラメータであり、理論的には張力 T 、ワイヤーの質量密度 ρ 、ワイヤーの半径 R を用いて

$$a = \frac{T}{\rho\pi R^2} \quad (3.4)$$

で求められる。ワイヤーが傾いていない時のたわみ量 d_{sag} はこの a から

$$d_{\text{sag}} = a \left[1 - \cosh\left(\frac{L_{\text{wire}}}{2a}\right) \right] \quad (3.5)$$

で計算することができる。

カタナリー曲線のフィッティングで得られた a から d_{sag} を求め、式 3.1 に代入することでたわみによるワイヤーの傾き θ_{sag} を一本一本のワイヤーごとに求めることができる。

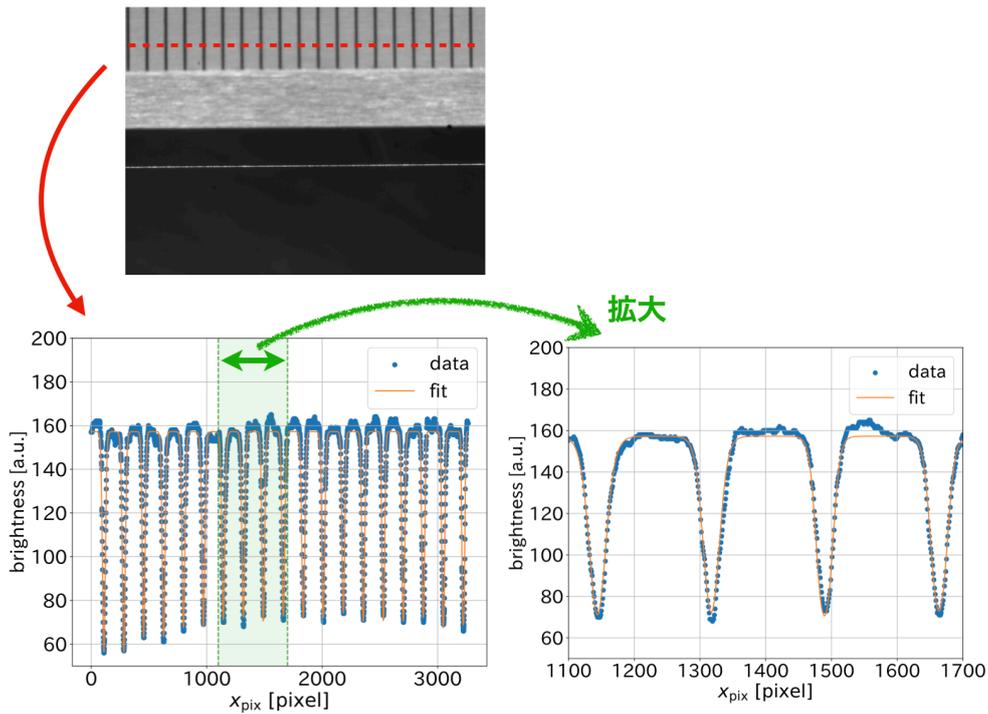


図 3.5: スケラーの目盛の検出方法

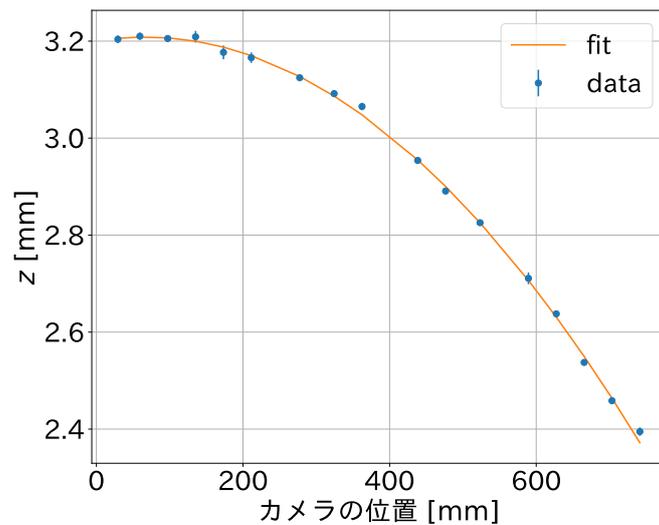


図 3.6: カテナリー曲線でのフィッティングの例。異なる位置で撮られた 17 枚の写真に対し、それぞれの z_i と誤差 σ_z がプロットされている。17 個のデータ点を傾き付きカテナリー曲線でフィッティングしたものが曲線である。

3.2.2 たわみ自動測定装置によるたわみ量抑制の成果

たわみ自動測定装置を用いて実際にワイヤーグリッドのたわみ量を測定する。まず従来通りタングステンワイヤーに対して両端に 230 g の重りを取り付け、奇数番号と偶数番号のワイヤーを分けて張ったワイヤーグリッドを評価する。このワイヤーグリッドでは奇数番号のワイヤーを張り固定したのちに偶数番号のワイヤーを張った。識別のため、このワイヤーグリッドを S03 と名付ける。

S03 のたわみ量の一度目の測定結果を図 3.8 に示す。奇数番号のワイヤーを四角点、偶数番号のワ

ワイヤーを丸点で示しており、先に張った奇数番号のワイヤーが後に張った偶数番号と比較して明らかに大きなたわみを持っていることがわかる。なお、ワイヤー番号は図 3.7 のように定義される。

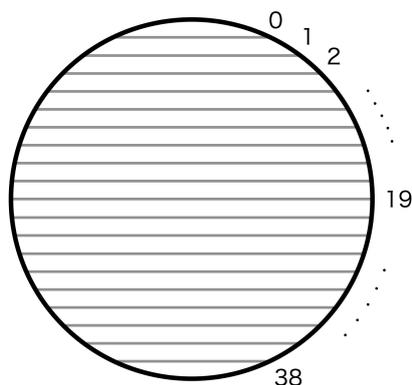


図 3.7: ワイヤー番号の定義

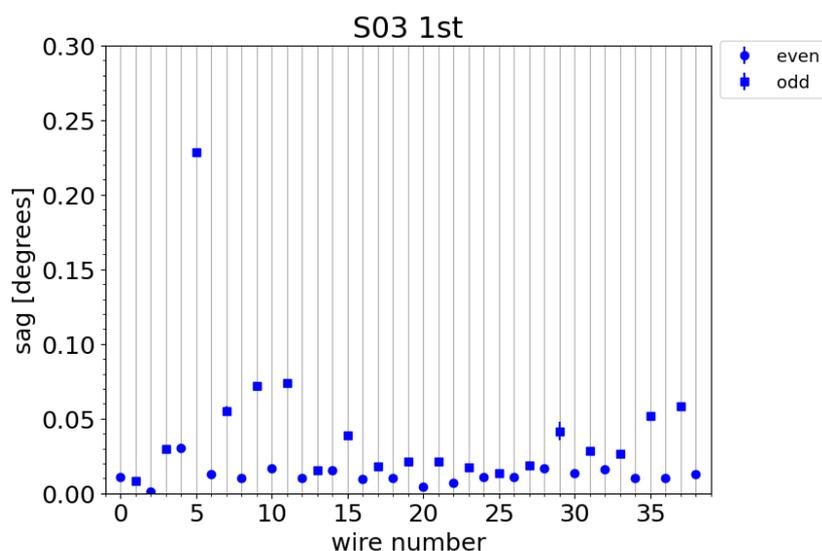
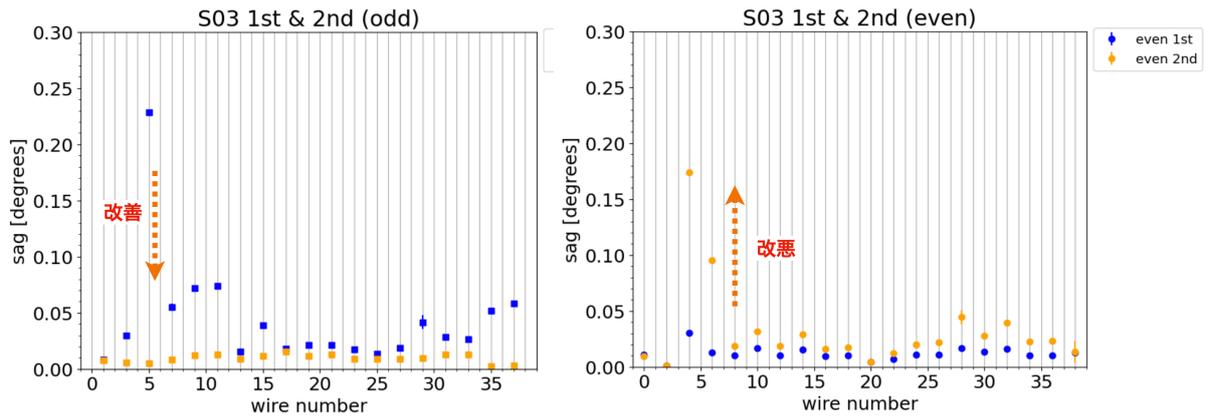


図 3.8: たわみ自動測定装置を用いた S03 のたわみ測定の結果。円形の点で偶数番号のワイヤーを、四角の点で奇数番号のワイヤーを示している。二回に分けて張ったワイヤーのうち、先に張った奇数番号のワイヤーが後に張った偶数番号と比較してたわみが大きい。

これを受け、奇数番号のワイヤーのみを切断し張り直す修繕を行なった。S03 の修繕前の測定結果と 1 回目の修繕後の測定結果をと奇数番号と偶数番号を分けてプロットしたものが図 3.9 である。図を見ると張り直した奇数番号のワイヤーのたわみは改善している一方で、偶数番目のワイヤーは修繕前よりもたわみが増加し、悪化していることが分かる。



(a) 奇数番号のワイヤー

(b) 偶数番号のワイヤー

図 3.9: S03 の最初と 1 回目の修繕後の結果の比較。張り直した奇数番号ワイヤーは改善しているのに対し、張り直さなかった偶数番号ワイヤーは修繕前よりたわみが増加している。

そこで、たわみ角が 0.05° を超える 2 本のワイヤーのみを再度張り直す二度目の修繕を行なった。その結果を図 3.10 に示す。二度の修繕の結果、張り直しを行なった 2 本のワイヤーのたわみが改善し、全てのワイヤーのたわみが $< 0.05^\circ$ 以下になり、平均たわみ角は 0.01° 程度まで抑えることができた。

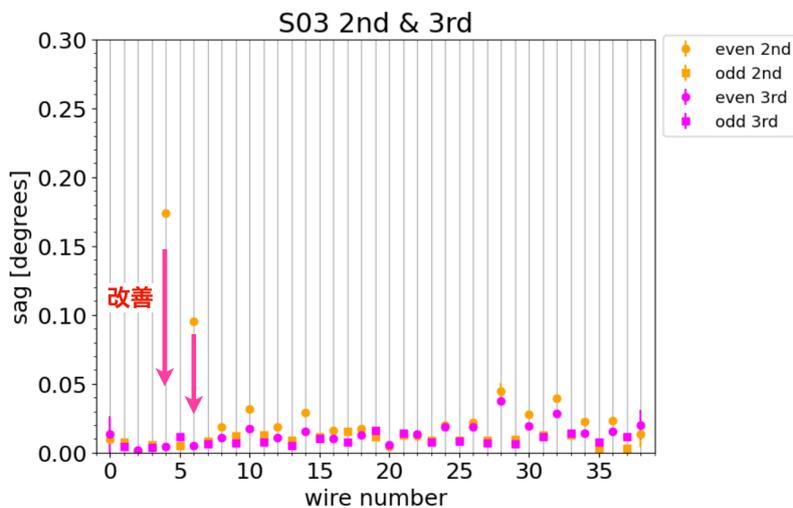


図 3.10: S03 の 1 回目の修繕の結果と 2 回目の修繕後の結果の比較。張り直しを行なった 2 本のワイヤーのたわみが改善し、全てのワイヤーのたわみが $< 0.05^\circ$ 以下になった。

これまでの結果を表 3.1 にまとめる。

過去のたわみ測定の手法では測定精度が悪く一本一本のワイヤーのたわみ量も測定できなかったが、たわみ自動測定装置によって高精度でワイヤーごとのたわみ量の測定ができるようになったことで、悪いワイヤーのみを張り直してより良い性能のワイヤーグリッドを製作することが可能になった。

ワイヤー番号	最初		1回の修繕後		2回の修繕後	
	奇数	偶数	奇数	偶数	奇数	偶数
たわみの最大値 [°]	0.23	0.030	0.016	0.17	0.016	0.037
たわみの平均 [°]	0.044	0.012	0.0094	0.032	0.0088	0.015

表 3.1: S03 の奇数・偶数番目のワイヤーのたわみ量。

3.3 ワイヤーフレームの歪み

3.3.1 張力によるワイヤーフレームの歪み

上記の奇数番号と偶数番号のたわみ量の差について、図 3.11 のように後に張ったワイヤーによる張力でワイヤグリッドのフレームが歪んでしまい先に張ったワイヤーがたわんでしまったのではないかと推測される。

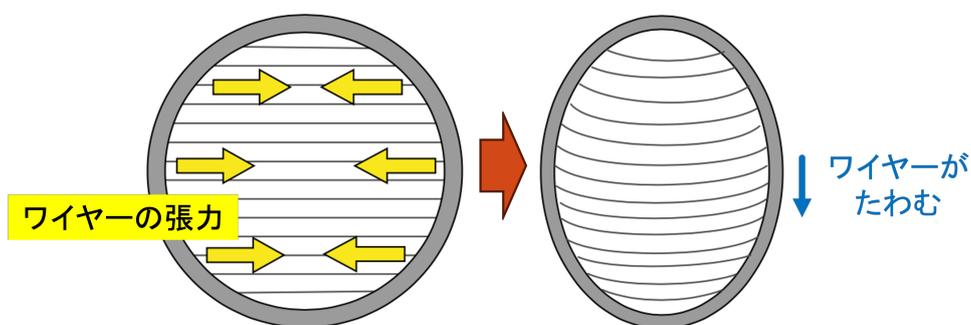


図 3.11: 張力によるフレームの歪み。後から張られたワイヤーの張力によってフレームがゆがみ、既存のワイヤーがたわむ可能性がある。

実際のワイヤグリッドはアルミ製の内径 790 mm、外径 930 mm、幅 20 mm、厚み 10 mm の円環のフレームに 20 mm 間隔でワイヤーが張られている。半径 R の円形のフレームに一樣な分布荷重 ω が水平方向両側からかかったとき、水平方向の変位 δ_H は

$$\delta_H = 0.1667 \frac{\omega R^4}{EI} \quad (3.6)$$

で求められる。^[28]

実際のワイヤグリッドはアルミ製の内径 790 mm、外径 930 mm、幅 20 mm、厚み 10 mm の円環のフレームに 20 mm 間隔でワイヤーが 39 本張られている。フレームの半径 R は内径と外径の平均である 860 mm とする。アルミの性質より $E_{Al} = 68.3 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 。フレームの断面は幅 20 mm 厚さ 10 mm の長方形なので $I = 20^3 \times 10/12 = 6.67 \times 10^3 \text{ mm}^4$ である。また、従来の手法では、タングステンのワイヤーに 230 g の張力をかけていた。39 本のワイヤーからかかる $T = 230 \times 9.8 \text{ N}$ の張力を一樣な分布荷重として近似すると、 $\omega = 39T/2R$ とかける。これらを用いてフレームの歪み δ_H を計算すると、

$$\delta_H \approx 0.99 \text{ mm} \quad (3.7)$$

となる。すべてのワイヤーを同時に 230 g の張力で張った場合、理想的にはこれだけの歪みが生じた状態でフレームの応力とワイヤーの張力が釣り合って固定されていることになる。

前節で問題となったのはすでに半分のワイヤーが張られ固定された状態のフレームにさらにもう半分のワイヤーを張ると、先に張られていたワイヤーのたわみが増加する減少だった。この時のたわみの増加量を見積もるために、先に i が奇数のワイヤーを張力 230 g で張りその後 i が偶数のワイヤーを張力 230 g で張ることを考える。

張力 $T_{\text{odd},0}$ で張られていたワイヤーが新しくワイヤーを張力 $T_{\text{even},0}$ で張る過程でフレームが歪み張力 $T_{\text{odd},1}$ に変化した場合、負の張力 $T_{\text{odd},1} - T_{\text{odd},0}$ が新たに加えられるとみなせる。この時、新しくワイヤーを張ったことによるフレームの歪み δ_H を

$$\delta_H = 0.1667 \frac{20T_{\text{even},0} + 19(T_{\text{odd},1} - T_{\text{odd},0}) R^4}{2R EI} \quad (3.8)$$

と近似する。

張力 $T_{\text{odd},0}$ がかかっている時の奇数番号のタングステンワイヤーの伸び $l_W(T_{\text{odd},0})$ はタングステンのヤング率 $E_W = 3.45 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とワイヤーの断面積 $\pi R_{\text{wire}}^2 \text{ mm}^2$ を用いて、

$$l_W(T_{\text{odd},0}) = \frac{L_{\text{wire}}}{\pi R_{\text{wire}}^2 E_W} T_{\text{odd},0} \quad (3.9)$$

と表される。同様に、偶数ワイヤーの張力によってフレームが歪み張力が下がった後の奇数番号ワイヤーの張力を $T_{\text{odd},1}$ とすると、この時の奇数番号のタングステンワイヤーの伸び $l_W(T_{\text{odd},1})$ は

$$l_W(T_{\text{odd},1}) = \frac{L_{\text{wire}}}{\pi R_{\text{wire}}^2 E_W} T_{\text{odd},1} \quad (3.10)$$

である。一方で、偶数ワイヤーの張力によってフレームが δ_y だけ歪んだとすると伸びていたワイヤーが縮み、ワイヤーの伸びは

$$l_W(T_{\text{odd},1}) = l_W(T_{\text{odd},0}) - \delta_y \quad (3.11)$$

に減少している。式 (3.9)(3.10)(3.11) より、

$$T_{\text{odd},1} = T_{\text{odd},0} \left(1 - \frac{\delta_y}{l_W(T_{\text{odd},0})}\right) \quad (3.12)$$

とかける。

式 (3.8) と式 (3.12) から $T_{\text{odd},1}$ 、 δ_H を求めることができ、

$$\begin{aligned} T_{\text{odd},1} &\approx 0.112 \times 9.8 \text{ N} \\ \delta_H &\approx 0.34 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.13)$$

となる。この時奇数番目のワイヤーのたわみ量はワイヤー長 790mm とすると

$$d_{\text{sag,odd},1} \approx 0.11 \text{ mm} \quad (3.14)$$

と推定される。ワイヤー長 790mm より、この場合のたわみ角は

$$\theta_{\text{sag}} \approx 0.0076^\circ \quad (3.15)$$

この張り直しによる既存ワイヤーのたわみは表 3.1 の 1 回目の修繕後の偶数ワイヤーのたわみに相当し、その値は平均値にして 0.032° であった。見積もられたたわみ量よりもさらに大きいのが、ワイヤー張力によるフレームの歪みが原因の一つであると考えられる。

全てのワイヤーを一度に張ることでこのたわみは削減できる。また、長期的に張力がかかり続けることで上記と同様にしてフレームが歪んでいき、その結果たわみが増加する可能性も考えられる。このリスクを避けるためには、できるだけ小さい張力でワイヤーを張ることが有効である。

3.3.2 温度変化によるワイヤーフレームの歪み

観測地であるアタカマ砂漠は $-20^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$ の激しい温度変化があり、サイトでの運用を考えると温度変化によるワイヤーフレームの変形がさらなるたわみを生むことも考えられる。

アルミニウムの熱膨張係数は 23.7×10^{-6} [1/K] であるため、 40°C の温度変化があるとすると内径 (790 mm) が約 0.75 mm、外径 (830 mm) が約 0.79 mm の変化をすることになる。一方で W は熱膨張係数が 4.5×10^{-6} [1/K] と小さく、 40°C の温度変化で 790 mm のワイヤーが 0.14 mm だけ変化する。この時フレームとタングステンワイヤーの変化の差は 0.61 mm である。張力が 0 にならない限りでは、式 (3.12) の関係を用いれば 790 mm の W ワイヤーに 230 g の張力をかけた状態から 0.61 mm だけワイヤーが縮んだ時の張力とたわみ量、たわみ角を求めることができ、それぞれ $T_W \approx 0.018 \times 9.8 \text{ N}$ 、 $d_{\text{sag}, W} \approx 0.67 \text{ mm}$ 、 $\theta_{\text{sag}, W} \approx 0.049^\circ$ となる。

このように、温度変化によって張力が下がるとたわみが生じることが考えられ、特にワイヤーを張った際の室温よりも低い温度で使用した場合に大きなたわみが生じる恐れがある。

このたわみを避けるには熱膨張係数がアルミフレームに近い素材をワイヤーに用いる、あるいはより弾性の強い素材をワイヤーに用いることが有効であると思われる。

3.4 BeCu ワイヤーへの変更

前節の問題を受けワイヤー素材をタングステンからベリリウム銅 (BeCu) へと変更し、さらに張力を 120g に低減させる変更を試みた。また、ワイヤーの張り方についても偶数番号と奇数番号を 2 回に分けて張る方法から全てのワイヤーを一度に張る方法に変更した。この変更によって期待されるメリットは以下の通りである。

1. 一度に全てのワイヤーを張ることで、後に張ったワイヤーによる既存ワイヤーのたわみを防ぐ。
2. BeCu は質量密度が小さいため、同じ張力で張った場合にもたわみが小さくなる。
3. BeCu の熱膨張係数はアルミニウムに近いため、アルミニウム製ワイヤーフレームの温度変化による変形を打ち消すことが可能になる。
4. BeCu はヤング率が小さく弾性が強いので、ワイヤーの張力や温度変化によるフレームの歪みが生じて、それに合わせて伸び縮みすることでたわみを削減できる。
5. かける張力を 230 g から 120 g に下げることでフレームの歪みを軽減する。

なお、BeCu ワイヤーは以前と同様の半径 0.05 mm のものを用いた。

従来はワイヤーを張る際につけている重り同士が干渉することを懸念して、奇数番号と偶数番号を

分けて張っていた。使用する重りをより小型のものに変更し、全てのワイヤーを一度に張ることで先に張ったワイヤーのたわみの増加を防いだ。

また、BeCu はタングステンと比較して質量密度が小さいため、そもそものたわみが小さくなることが期待できる。タングステンの質量密度は $\rho_W = 1.93 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}^3$ であるのに対し、BeCu の質量密度は $\rho_{\text{BeCu}} = 8.36 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ である。この差はたわみ量 d_{sag} を求める際の式 (3.4) に影響する。タングステンワイヤーを 230g の張力で張った場合のたわみ量は 0.0037° であったが、BeCu ワイヤーを 230g の張力で張った場合のたわみ量は 0.0016° であり、120g の張力で張った場合でも 0.0031° とタングステンワイヤーを 230g で張った場合よりも小さく抑えられる。そのため、BeCu ワイヤーに変更することで張力を下げることが可能になる。

温度変化によるフレーム歪みの効果も BeCu への変更によって低減できる。BeCu の熱膨張係数は $17.8 \times 10^{-6} [1/K]$ であり、アルミニウムの熱膨張係数 $23.7 \times 10^{-6} [1/K]$ に近い。40°C の温度変化によってフレームの内径が約 0.75 mm 変化した時、790 mm の BeCu ワイヤーは 0.56 mm 変化する。この差は 0.19 mm であり、タングステンワイヤーの場合の変化量 0.61 mm と比べて 1/3 程度である。

さらに、BeCu は弾性が強いため、フレームの歪みが生じた場合にも張力の低下が小さく抑えられる。タングステンワイヤーに 230 g の張力をかけている時、タングステンワイヤーの伸び l_W は 0.66 mm である。前節で述べたように式 (3.12) を使えば、温度変化によって 0.61 mm の変位があった場合の張力とたわみ量を求めることができ、 $T_W \approx 0.018 \times 9.8 \text{ N}$ 、 $\theta_{\text{sag},W} \approx 0.049^\circ$ であった。一方で、BeCu に 120 g の張力をかけている時の BeCu ワイヤーの伸び l_{BeCu} は 0.93 mm である。0.61 mm の変位があった仮定しても張力は $T_{\text{BeCu}} \approx 0.041 \times 9.8 \text{ N}$ と T_W よりも大きく、実際に BeCu ワイヤーに変更した場合の温度変化による変位は 0.19 mm であるため、張力とたわみ量はそれぞれ $T_{\text{BeCu}} \approx 0.096 \times 9.8 \text{ N}$ 、 $\theta_{\text{sag},\text{BeCu}} \approx 0.0039^\circ$ となる。つまり、温度変化によるたわみ量がたわみ角にして 1/12 に抑えられると期待される。

これらの効果から、BeCu ワイヤーであれば張力を 120 g まで下げてもたわみは十分小さく抑えられることがわかる。これまで 230 g の張力でワイヤーグリッドを製作していたが、そもそも 230 g の張力が 39 本のワイヤーからかかっていた場合、フレームの中心 (790 mm) にしておよそ 0.99 mm の歪みが生じていると見積られる。ワイヤーを張った時点で歪みが生じていればこの歪みはたわみにはつながらないが、長期間の使用中に徐々に歪みが増加する場合にはたわみが生じる可能性がある。張力を 230 g から 120 g に変更すると、フレームの歪みはおよそ 0.52 mm となり約半分抑えられる。また、張力を低減することでワイヤーが切れてしまうリスクを抑えることもできる。

これらの理由からワイヤー素材を BeCu に変更するとともに、ワイヤーにかける張力を 120 g に変更した。

3.5 BeCu ワイヤーのたわみ量の評価

BeCu ワイヤーに 120 g の張力をかけてワイヤーグリッドを 3 つ製作した。それぞれ B01、B02、B03 とする。このうち B01 は 2025 年 2 月に製作し、製作直後と 2 ヶ月後の二度たわみ測定を行なった。B02 と B03 は 2025 年 10 月に製作し、製作直後に一度だけ測定を行なった。

それぞれの測定結果を図 3.12、図 3.13、図 3.14、図 3.15 に示す。全ての測定で、全てのワイヤーのたわみが 0.05° を下回っており、従来の製作方法と比べて明らかに良い結果であることがわかる。

素材	タングステンワイヤー	BeCu ワイヤー
張力	230g	120g
ワイヤーのたわみ [°]	0.0037	0.0031
フレームの歪み [mm]	0.99	0.52
40°C の温度変化によるワイヤー伸びの変位 [mm]	0.61	0.19
40°C の温度変化によるワイヤーのたわみ [°]	0.049	0.0039

表 3.2: 各ワイヤー、各張力で見積られる張った直後のたわみ量と温度変化によるワイヤーの伸びの変位、温度変化によるたわみ量。

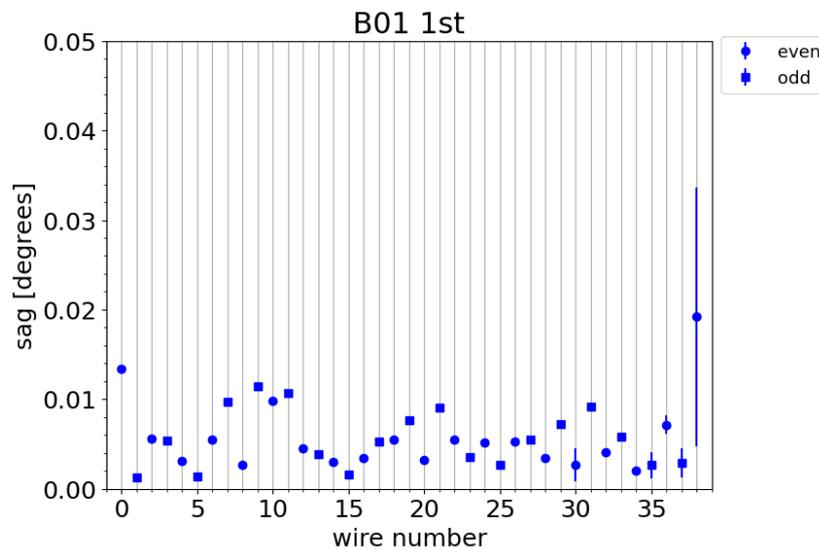


図 3.12: B01 の 1 回目のたわみ測定の結果。

前章で記述した S03(タングステンワイヤー・張力 230g) の修繕前・修繕後の測定と、B01 の二度の測定、B02、B03 の各一度の測定の結果について、たわみ量の平均、標準偏差をまとめたものが表 3.3 である。変更後の 3 つのワイヤーグリッドが従来のワイヤーグリッドと比較してたわみ量が小さく抑えられ、 $< 0.02^\circ$ だった平均たわみが $< 0.015^\circ$ まで削減された。

	S03(最初)	S03(2 回の修繕後)	B01(1 回目)	B01(2 回目)	B02	B03
たわみの最大値 [°]	0.23	0.085	0.019	0.016	0.022	0.027
たわみの平均 [°]	0.026	0.018	0.0057	0.0057	0.011	0.012

表 3.3: S03 の最初および最終の測定と、B01 の 2 回の測定、B02、B03 の測定結果をそれぞれまとめた表。

3.6 まとめ

ワイヤーのたわみによる系統誤差削減のためにワイヤーのたわみの自動測定装置を開発した。これによって一本一本のワイヤーのたわみを高精度で測定することが可能になり、たわみ角を 39 本の平

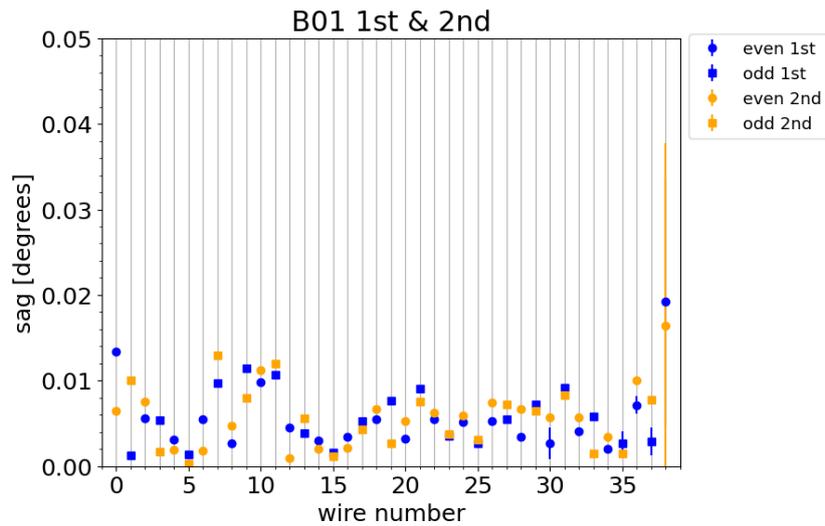


図 3.13: B01 の 1 回目と 2 回目の測定結果の比較。2 ヶ月の間においてもたわみ量に変化がないことがわかる。

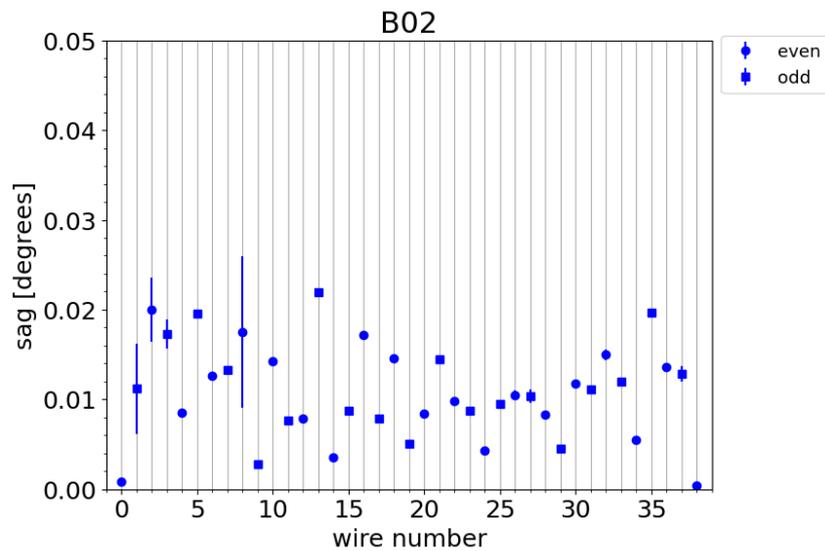


図 3.14: B02 のたわみ測定の結果。

均で $< 0.02^\circ$ まで削減することができた。

さらに、ワイヤースタンプの歪みによるたわみを削減するために、ワイヤの素材をタングステンワイヤーから BeCu ワイヤーへと変更し、張る際にかかる張力を 230 g から 120 g に低下させた。変更後のワイヤーのたわみを自動測定装置で測定したところ、たわみはさらに軽減し $< 0.015^\circ$ となった。

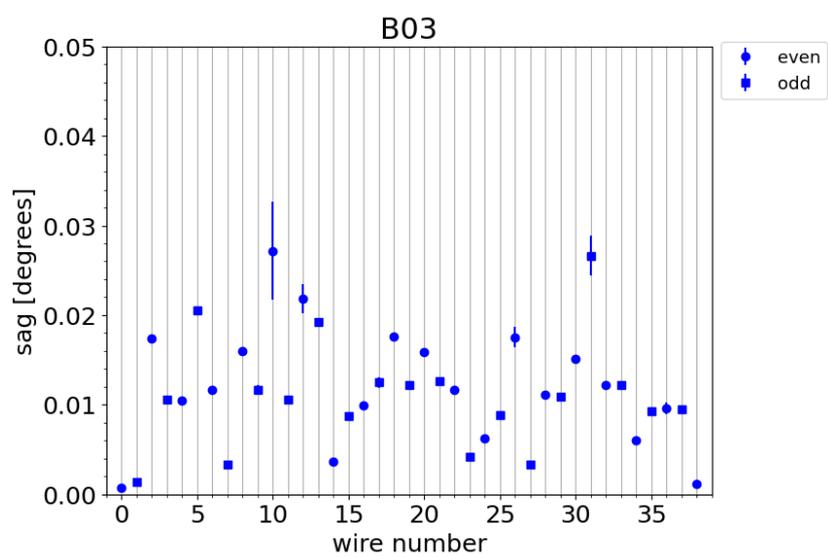


図 3.15: B03 のたわみ測定の結果。

第4章

重力参照角度計の評価と選定

重力参照角度計を設置して、スパーズワイヤーグリッドの設置平面の角度を把握する。表 2.1 より、ワイヤーのたわみによる誤差を 0.015° とした場合、角度計には x 軸 y 軸を合わせて $\delta\theta < 0.08^\circ$ の精度が要求される。本章では、先行研究で選定され現在望遠鏡にインストールされている角度計 (Digi-Pas 社製 DWL5000-XY) の問題点を確認し、新たに購入した 4 つの角度計について温度依存性・湿度依存性・長期間安定性という三つの観点から性能評価を行い、要求される性能を満たす角度計を選定する。

4.1 要求性能と従来の角度計の問題点

偏光角較正の目標精度を達成するために角度計に要求される精度は $\delta\theta_{\text{sens}} < 0.08^\circ$ である。角度計の出力 θ_X, θ_Y に対して θ_{sens} は式 (2.6)(2.8)、で決定されるため、角度計の出力の誤差を $\delta\theta_X, \delta\theta_Y$ とすると $\delta\theta_{\text{sens}}$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \delta\theta_{\text{sens}} &= \sqrt{\left(\frac{\sin \beta}{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta} \delta(\sin \alpha)\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta} \delta(\sin \beta)\right)^2} \\ \delta(\sin \alpha) &= \sqrt{\left(\frac{d \sin \alpha}{d\theta_X} \delta\theta_X\right)^2 + \left(\frac{d \sin \alpha}{d\theta_Y} \delta\theta_Y\right)^2} \\ \delta(\sin \beta) &= \sqrt{\left(\frac{d \sin \beta}{d\theta_X} \delta\theta_X\right)^2 + \left(\frac{d \sin \beta}{d\theta_Y} \delta\theta_Y\right)^2} \\ \frac{d \sin \alpha}{d\theta_X} &= \cos \theta_{\text{slope1}} \cos \theta_X - \sin \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_{\text{slope2}} \frac{\sin \theta_X \cos \theta_X}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y}} \\ \frac{d \sin \alpha}{d\theta_Y} &= -\sin \theta_{\text{slope1}} \cos \theta_{\text{slope2}} \cos \theta_Y - \sin \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_{\text{slope2}} \frac{\sin \theta_Y \cos \theta_Y}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y}} \\ \frac{d \sin \beta}{d\theta_X} &= \sin \theta_{\text{slope1}} \cos \theta_X + \cos \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_{\text{slope2}} \frac{\sin \theta_X \cos \theta_X}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y}} \\ \frac{d \sin \beta}{d\theta_Y} &= \cos \theta_{\text{slope1}} \cos \theta_{\text{slope2}} \cos \theta_Y + \cos \theta_{\text{slope1}} \sin \theta_{\text{slope2}} \frac{\sin \theta_Y \cos \theta_Y}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

X 軸 Y 軸の誤差が同程度だった場合、各軸に対して $\delta\theta_{X,Y} < 0.05^\circ$ が要求精度となる。

SO 実験では長期間の観測を行うため、角度計も時間に依存せず安定した出力を返すことが求めら

れる。しかし、現在インストールされている Digi-Pas 社製 DWL5000-XY(以下、現角度計)について、2ヶ月の期間を空けて測定を行なったところ角度出力のオフセットに 0.3° の変動があり、長期間安定性に欠けていることが明らかになっている。

これらを踏まえ、新しい候補として ifm 社製 JN2101(A 角度計)、WITMOTION 社製 HWT9053(B 角度計)、Pacico 貿易社 SLP2-15(C 角度計)、Sherborne Sensors 社製 DSIC-2051-60(D 角度計) という 4 種類の角度計を購入した。これらの角度計について、温度依存性・湿度依存性・長期間安定性の性能評価を行なった。それぞれのメーカー提示の性能は表 4.1 である。

	A	B	C	D
価格 [万円]	9	6	8	89
測定形式	MEMS 式	MEMS 式	MEMS 式	サーボ式
インターフェース	CANopen	CAN	RS232	RS485
解像度 [$^\circ$]	<0.01	0.001	0.001	0.001
精度 [$^\circ$]	<0.01	0.001	0.02	0.08
温度ドリフト [$^\circ$]	<0.032	0.05	0.0015	記載無し

表 4.1: 4つの角度計のメーカー提示の性能表。温度ドリフトの項には $-20^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$ の場合の変動を記載している。

さらに、それらの性能評価の結果 C 角度計が最も良い性能を示すことが分かったため、C 角度計を追加で 2つ購入し、合計 3つの C 角度計について温度依存性を測定することで C 角度計の個体差も評価した。

4.2 測定精度の評価

まず、4つの角度計をすべて安定した平面に置き、出力の安定性を評価した。温度や湿度が安定しているとみなせる 5000 秒間の測定データを、10 秒ごとに平均しその標準偏差を出力の安定性として決定した。これは、実際の較正においてワイヤグリッドが各角度に回転後 10 秒間停止してその間に測定を行うからである。結果を以下の表 4.2 にまとめる。A 角度計のみメーカー提示の性能よりやや悪い精度であったが、他 3つの角度計は記載値よりも小さい誤差に抑えられていた。

	A		B		C		D	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
測定精度 [$^\circ$]	0.012	0.012	0.00024	0.00027	0.00025	0.00030	0.0018	0.0022

表 4.2: 4つの角度計それぞれの x 軸 y 軸の出力の精度。

4.3 温度依存性の評価

4.3.1 評価手法

先行研究に倣って、以下のような手法で温度依存性を測定した。

厚み 30 mm のアルミプレートの上に、図 4.16 に示すように 4 つの角度計と USB 温度・湿度計、二つの気泡管水準器 (新潟精機製 FLW-200002) を設置した。アルミプレートは 3 つのアジャスターを脚としており、アジャスターを回すことでプレート全体を水平にすることができる。水平の精度は気泡管水準器により $< 0.01^\circ$ で保証され、測定開始時と測定終了時に気泡管水準器の気泡の位置を確認することで、測定中に水平が保たれていたことを確かめられる。また、アルミプレートには長方形のアルミ板が付けられており、各角度計の x 軸 y 軸を揃えられるようになっている。

これらの測定系を恒温恒湿槽に入れ、温度・湿度をコントロールしながら測定を行う。恒温恒湿槽は京都市産業技術研究所のものを利用した。

ただし、図 4.16 から分かるように、系の x 軸 y 軸と各角度計の x 軸 y 軸が一致しているとは限らない。セットアップ全体が傾いている効果は見られなかったため、今回は全ての角度計について角度計自身の x 軸 y 軸を使ってプロットしている。

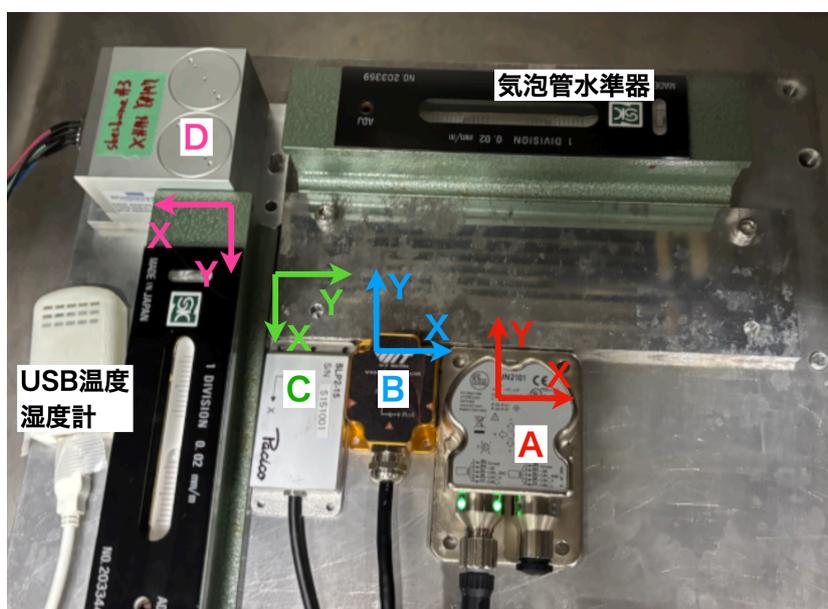


図 4.1: 温度依存性評価のセットアップ

今回の温度依存性の評価では、湿度を 0% に設定し、温度を 10°C 刻みで各ステップ 1 時間ほど欠けて -20°C 20°C の昇温・降温を 2 往復、計 22 時間かけて行なった。

4.3.2 結果

USB 温度計による温度出力と 4 つの角度計それぞれの x 軸 y 軸の角度出力の時間変化をまとめたものが図 4.2 である。灰色で示した領域は温度が安定しているとみなせる期間である。

そして、そのデータを用いて 4 つの角度計の角度出力の温度依存性を図示したものが図 4.3 である。各角度計に対して、図 4.2 で灰色で示した温度が安定している期間を抜き出し、温度ごとに平均と標準偏差を取っている。ただし、4 つの角度計のうち B,C,D は角度計内蔵の温度計の出力値を温度として使用したが、A のみは USB 温度計の出力値を温度として使用した。

各温度での角度出力の平均値の最大値と最小値の差を温度依存性による誤差として決定する。表 4.3 に各角度計の結果をまとめた。B 角度計と D 角度計が明らかに大きな温度依存性を持っている一方で、A 角度計と C 角度計は比較的小さな温度依存性を持っており、性能が良かった。しかし、メー

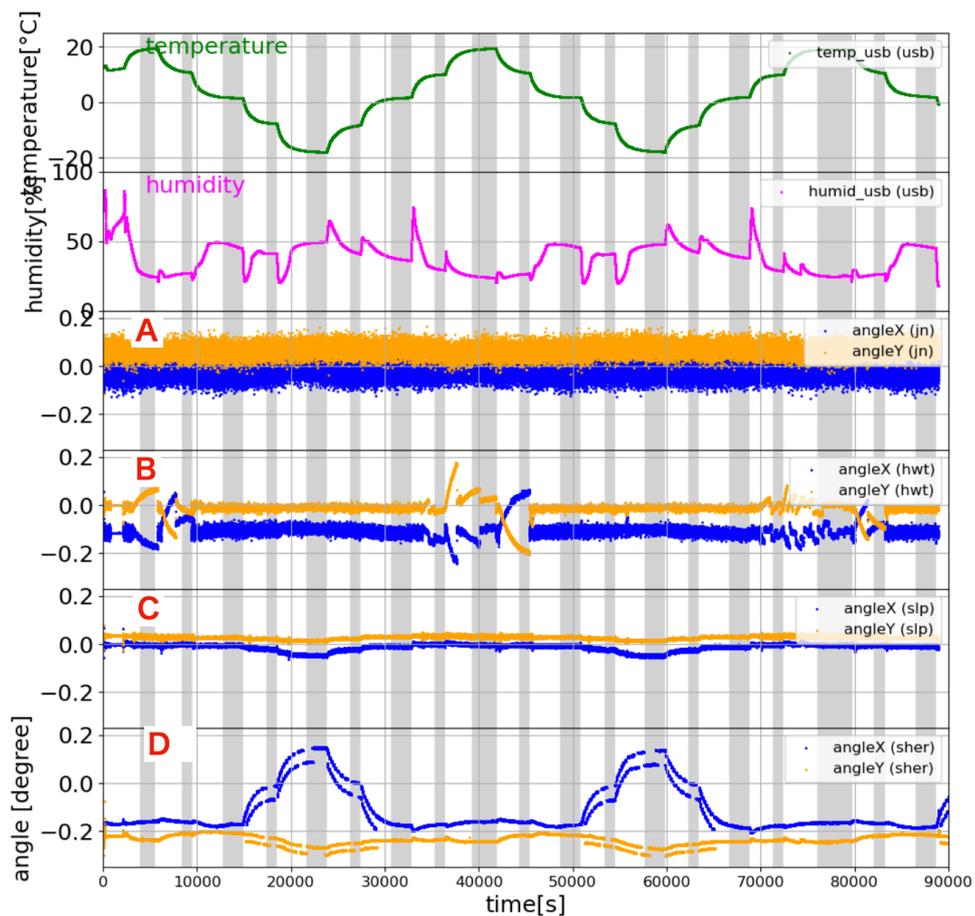


図 4.2: 温度依存性の測定。湿度を 0% に設定して、 -20°C 20°C で温度を段階的に変化させた。温度を灰色で示された領域を温度が安定している期間として温度依存性の解析に使用した。

カー提示の性能と比較すると、A 角度計が記載値よりも小さな誤差に収まっているのに対し、B 角度計は記載値の 4~5 倍、C 角度計は記載値の 1~3 倍の温度ドリフトがあると言える。

	A		B		C		D	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
温度依存性 [°]	0.049	0.047	0.23	0.26	0.051	0.021	0.34	0.086

表 4.3: -20°C ~ 20°C まで温度変化させた際の温度依存性。角度出力の最大値と最小値の差と平均値の標準偏差の平均を温度依存性による誤差としてとっている。

20250822 pickup averaged

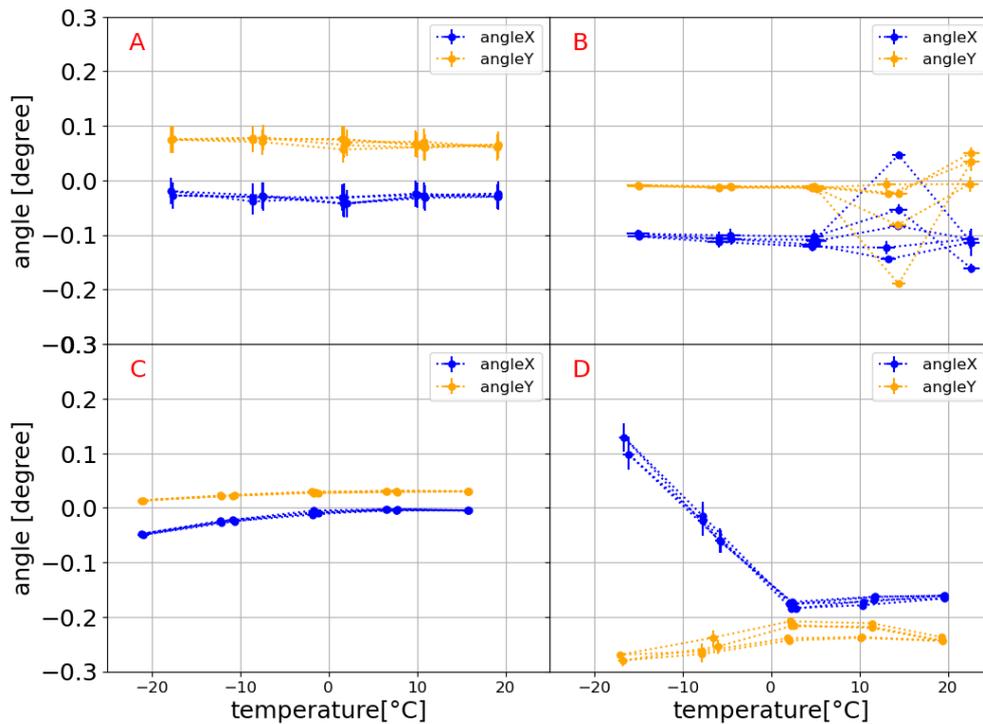


図 4.3: 各角度計の温度依存性。B 角度計と D 角度計が明らかに大きな温度依存性を持っていることがわかる。

4.4 湿度依存性の評価

D 角度計がサーボ式であるのに対して、A,B,C は MEMS 式であり、一般に、MEMS 式の角度計は湿度依存性を持つ。メーカーがあらかじめ湿度依存性を較正しているはずだが、カタログにその精度の記載はなかった。観測サイトであるアタカマ砂漠は湿度変化も激しく、角度計に湿度依存性があった場合大きな誤差を生みかねない。そこで、本研究では湿度依存性の評価も行った。

観測サイトの湿度は 0%~100% まで変化する。ただし、雨が降っている場合 (< 10 mm) の場合にはその期間のデータを使用しないため、実際に使用されるデータの湿度の上限は約 90% となる。

今回湿度依存性の測定として二種類の測定を行なった。一つ目は、3 通りの湿度について湿度一定で温度を徐々に変化させ、各湿度での温度依存性の差を確認する測定である。そして二つ目は、2 通りの温度について温度一定で湿度を徐々に変化させ、湿度と角度出力の相関を直接確認する測定である。

4.4.1 湿度一定での温度依存性の測定

評価手法

図 4.4 に示すように、前章と同様のセットアップで測定を行う。ただし、温度依存性の測定時 (図 4.16) に対して、C 角度計の軸が 90° 回転している。

今回の測定では 0%・50%・90% の 3 通りの湿度に対して、前章と同様の温度依存性測定を行う。各湿度について湿度一定のまま、温度を 10°C 刻みで各ステップ 1 時間ほど欠けて -20°C~20°C の

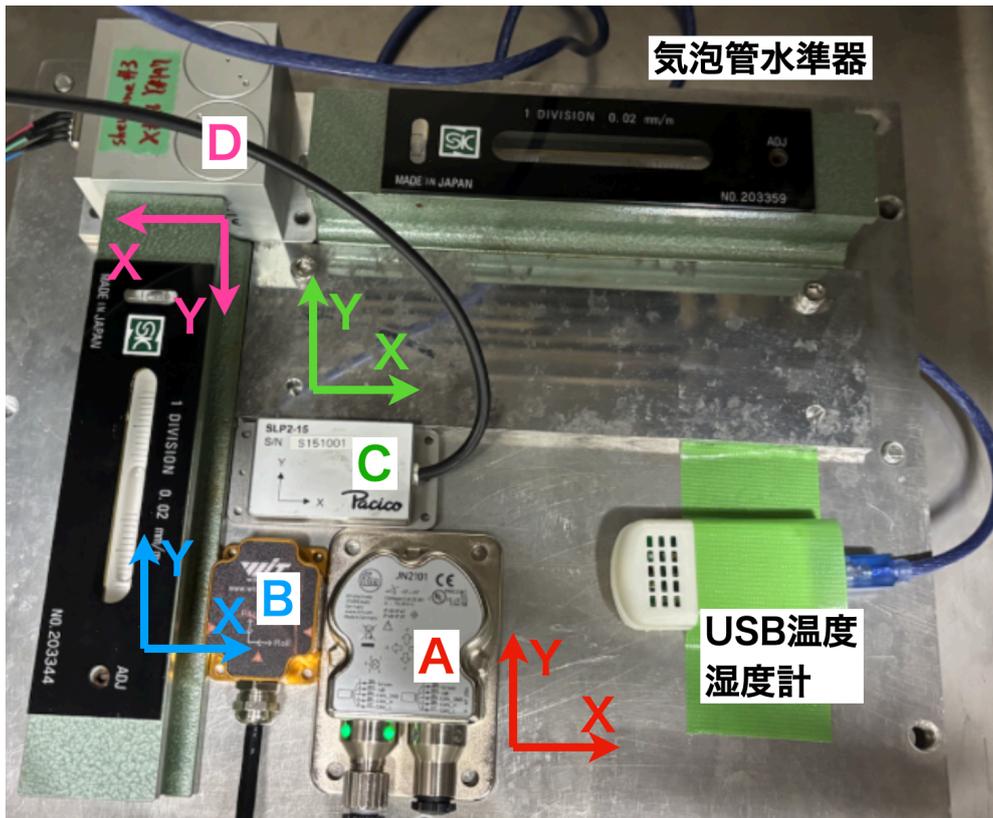


図 4.4: 湿度一定での温度依存性の測定のセットアップ

昇温・降温を 2 往復、計 22 時間かけて行なった。

結果

USB 温度・湿度計による温度・湿度出力と 4 つの角度計それぞれの x 軸 y 軸の角度出力の時間変化をまとめたものが図 4.5 である。赤線で分けられているように、0%・50%・90% と湿度を変化させた。ただし USB 温度・湿度計に不具合があったため、0% と 50% の間でセットアップを修正している。特に C 角度計について大きな角度変化があるのは修正の過程で角度計を置き直したためである。図 4.2 と異なり温度の値は USB 温度・湿度計ではなく D 角度計の温度の値を採用している。また、湿度については不具合によって最初の 2 往復は測定できていないが、図 4.2 と湿度を同様 0% に設定して測定を行っている。

そのデータを用いて、0%・50%・90% それぞれについて温度依存性を図示したものが図 4.6、4.7、4.8 である。B,C,D は角度計内蔵の温度計の値を、A のみ sherborne の温度の値を使用し、図 4.5 で灰色で示した温度が安定している期間を抜き出し、平均値と標準偏差をプロットしている。

これらの図から分かるように、A、C、D は湿度によらず同じような温度依存性を示した。一方で B 角度計は湿度によって結果が変化しており、特に湿度 0% で出力が不安定になっていることが見てとれる。各湿度での結果を表 4.4 にまとめる。湿度 0% での測定は、1.3 節で行った温度依存性の測定と同じセットアップで行ったにもかかわらず、A、B、C 角度計において温度依存性の誤差が約 2 倍に増加している。結果が変化した理由は定かではなく、今後更なる評価が必要である。今回は湿度の異なる測定含めて 4 つの測定のうち、最も悪い値を温度依存性として採用した。

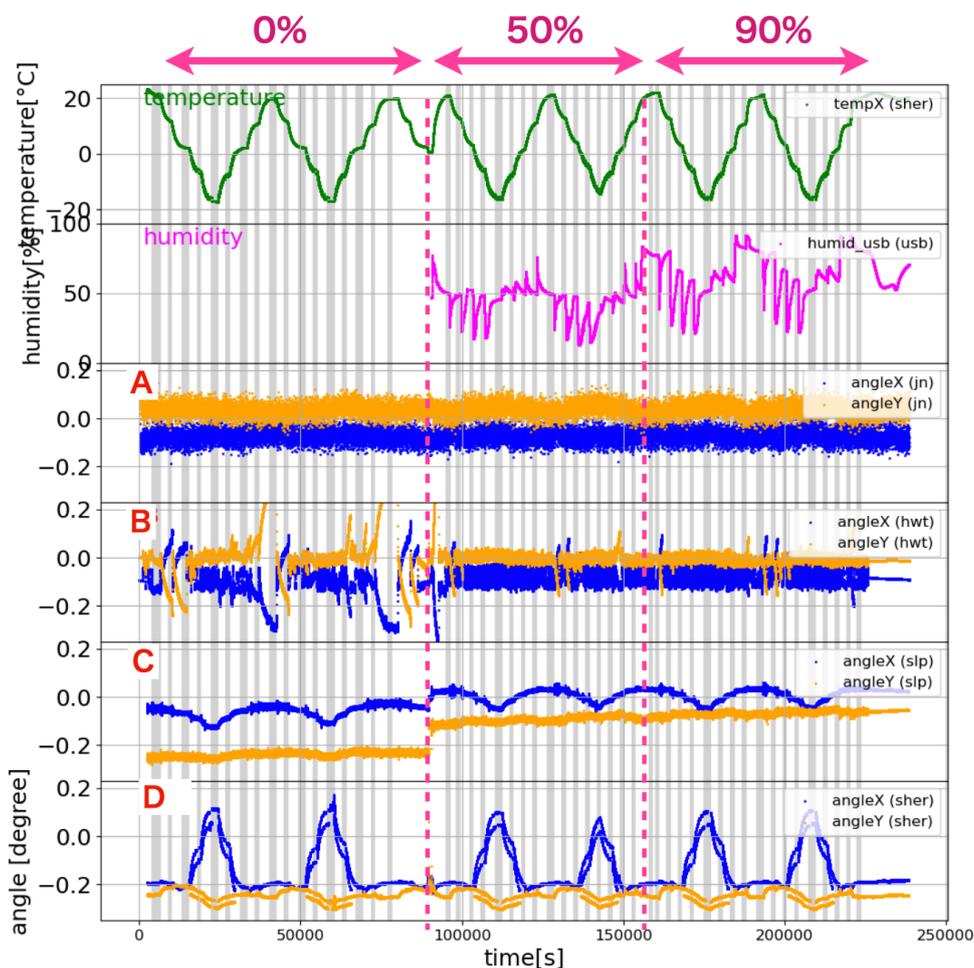


図 4.5: 湿度一定での温度依存性の測定の時間変化。湿度を 0%・50%・90% と湿度を変化させながら、各湿度で温度を -20°C 20°C で変化させた。ただし、0% と 50% の間でセットアップを修正している。灰色で示した領域は温度が安定しているとみなせる期間である。

	A		B		C		D	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
温度依存性 (湿度 0%) $[\circ]$	0.054	0.055	0.36	0.47	0.10	0.035	0.33	0.076
温度依存性 (湿度 50%) $[\circ]$	0.040	0.058	0.06	0.042	0.083	0.047	0.30	0.082
温度依存性 (湿度 90%) $[\circ]$	0.051	0.062	0.072	0.028	0.081	0.037	0.30	0.087

表 4.4: 各湿度での温度依存性。

20251020 humidity 0%

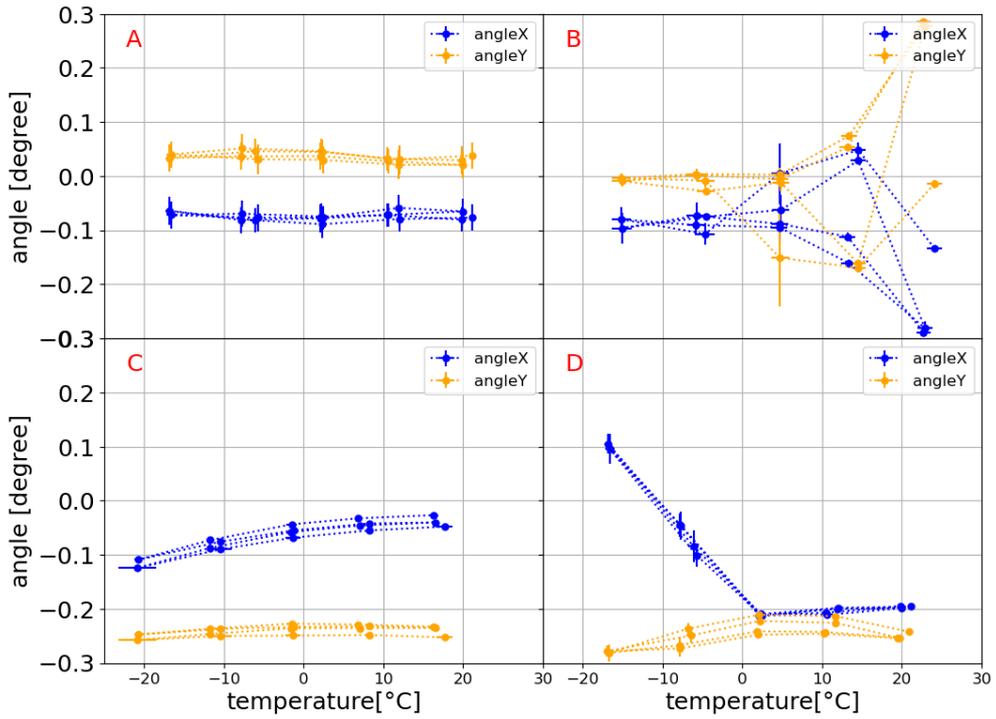


図 4.6: 湿度 0% での温度依存性。B 角度計の温度依存性が明らかに悪い。

20251020 humidity 50%

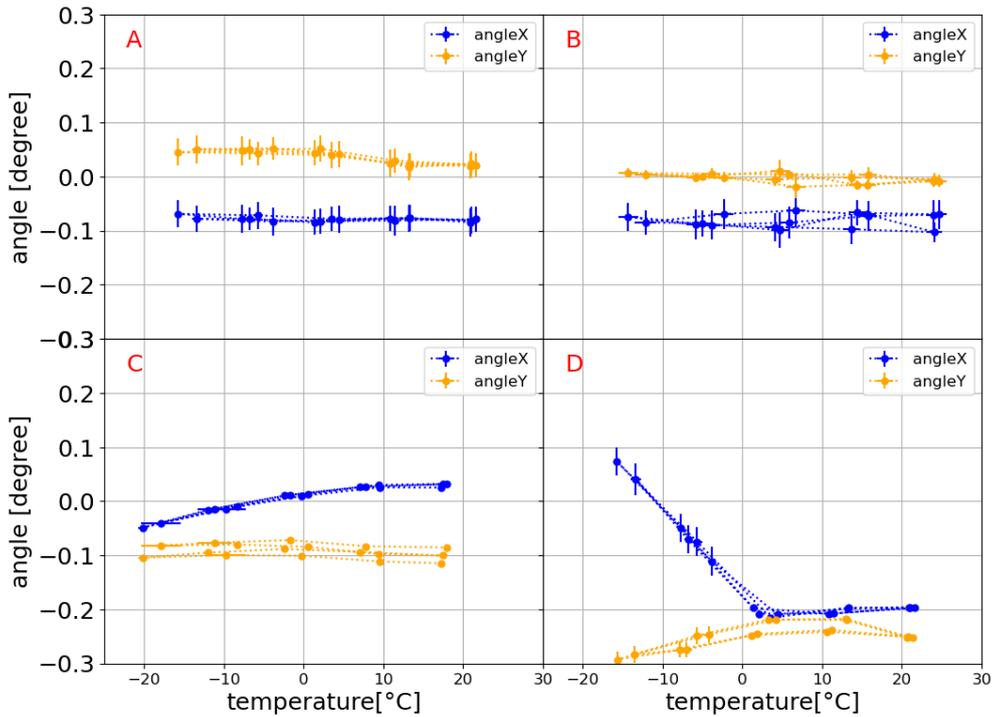


図 4.7: 湿度 50% での温度依存性

20251020 humidity 90%

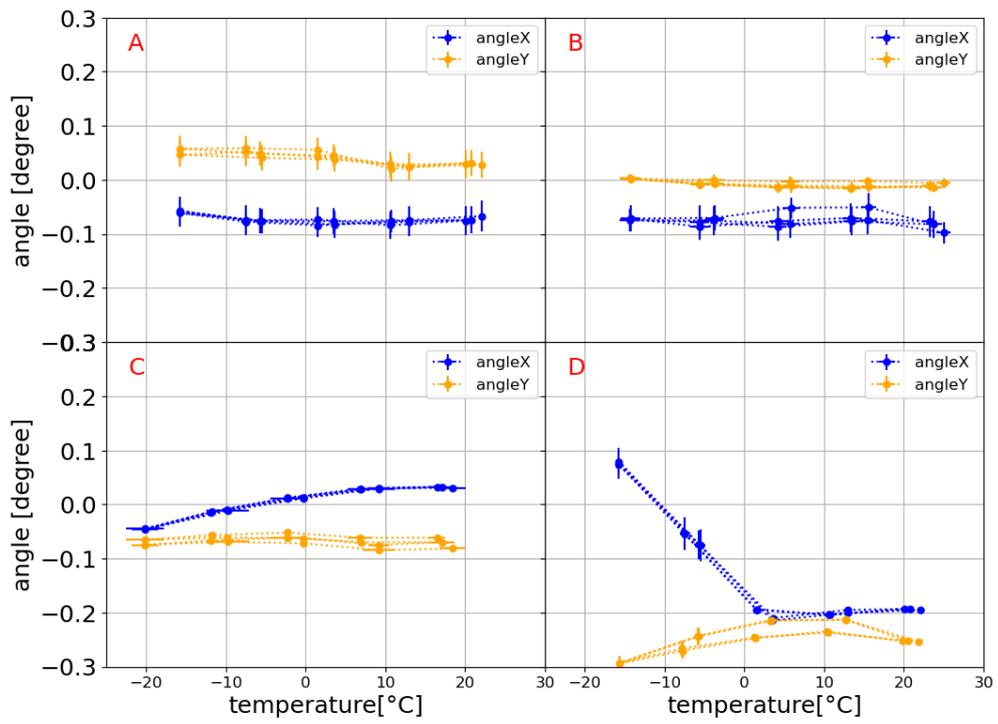


図 4.8: 湿度 90% での温度依存性

4.4.2 温度一定での湿度依存性の測定

評価手法

今回も同様に、図 4.9 のようなセットアップを用いて測定を行なった。各角度計の軸の向きは図 4.4 と同じである。ただし、B 角度計と C 角度計に対してステンレス製の厚み 30mm の治具を新たに取り付けた。B 角度計と C 角度計は他二つと比べ重さが軽いため、恒温槽の動作中の振動によって角度出力に変化が生じることを懸念したからである。

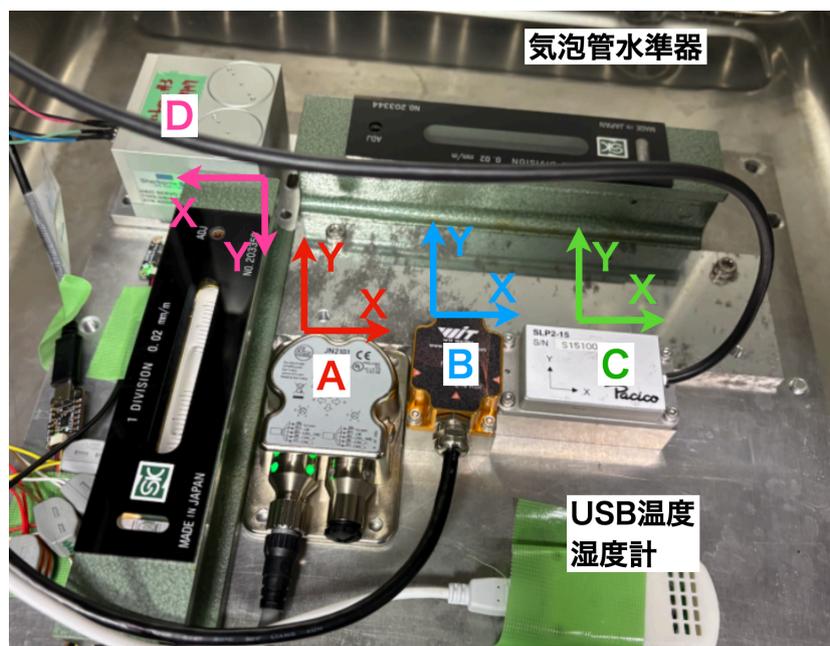


図 4.9: 温度一定での湿度依存性の測定のセットアップ。

前節では湿度一定で温度を変化させたのに対して、この測定では 5°C ・ 20°C の 2 通りの温度について温度一定で湿度を変化させることで角度出力の湿度依存性を評価する。各温度について、湿度を 0% ・ 50% ・ 90% の 3 段階で各ステップ 2 時間ほどかけて変化させ、各温度について 2 往復、計 22 時間かけて行なった。

結果

USB 温度・湿度計による温度・湿度出力と 4 つの角度計それぞれの x 軸 y 軸の角度出力の時間変化をまとめたものが図 4.10 である。赤線の分けられているように、 5°C ・ 20°C の温度で測定した。

そのデータを用いて、各温度について、横軸を湿度 (USB 湿度計の出力値)、縦軸を角度出力値として湿度依存性を示したのが図 4.11、4.12 である。これまでの測定同様、図 4.10 で灰色で示した湿度が安定した期間を抜き出し、各期間の平均値と標準偏差をとっている。

A、C、D の湿度変化による変化は温度変化による変化と比べて十分小さいことが分かる。しかし、B 角度計には明らかに湿度依存の出力変化があり、X 軸では約 0.3° 、Y 軸では約 0.4° である。

4 つの角度計の湿度依存性による誤差を表 4.5 にまとめる。

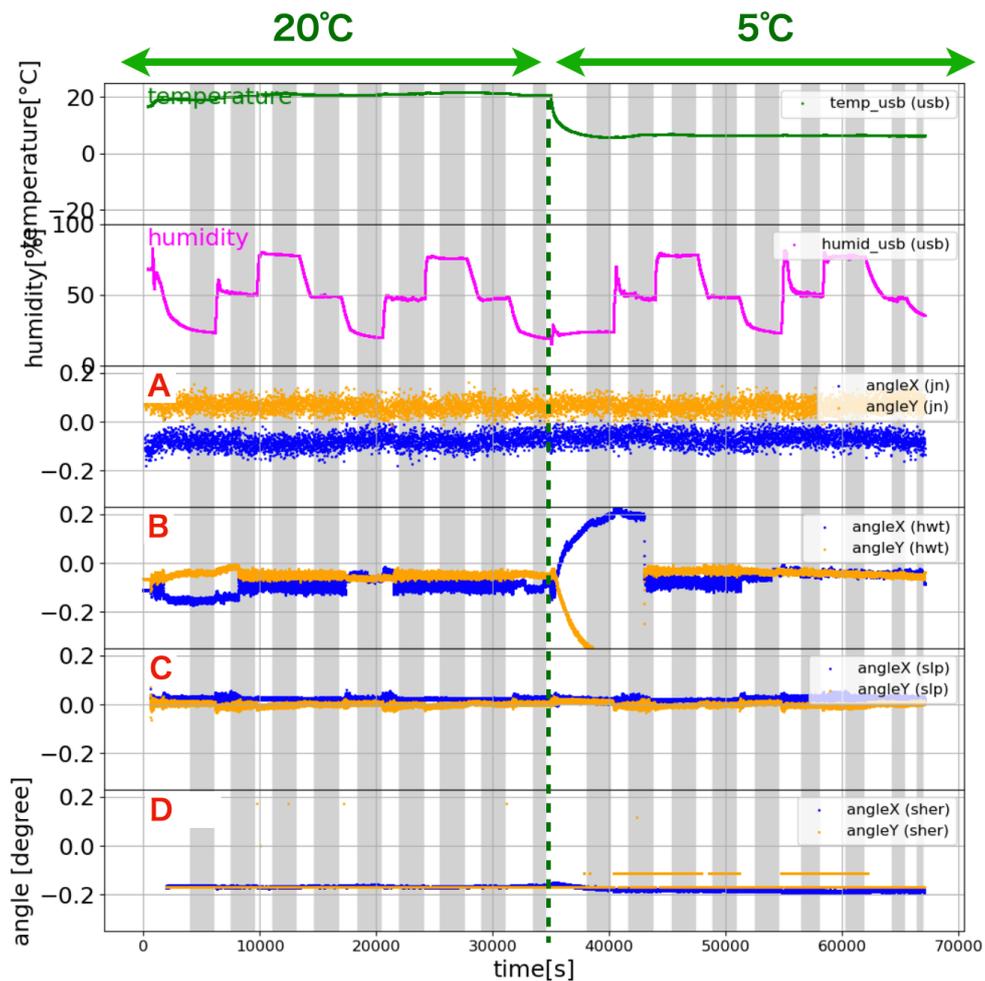


図 4.10: 湿度依存性の測定の時間変化。温度を 20°C と 5°C の 2 通りに設定し、湿度を 0%・50%・90% の 3 段階で変化させた。灰色で示した領域は温度が安定しているとみなせる期間である。

	A		B		C		D	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
湿度依存性 (温度 20°C)[°]	0.056	0.040	0.11	0.030	0.0070	0.012	0.0071	0.00069
湿度依存性 (温度 5°C)[°]	0.059	0.042	0.28	0.37	0.012	0.020	0.016	0.056

表 4.5: 0%~90% まで湿度変化させた際の出力の変化。

20251120 pickup averaged 20°C

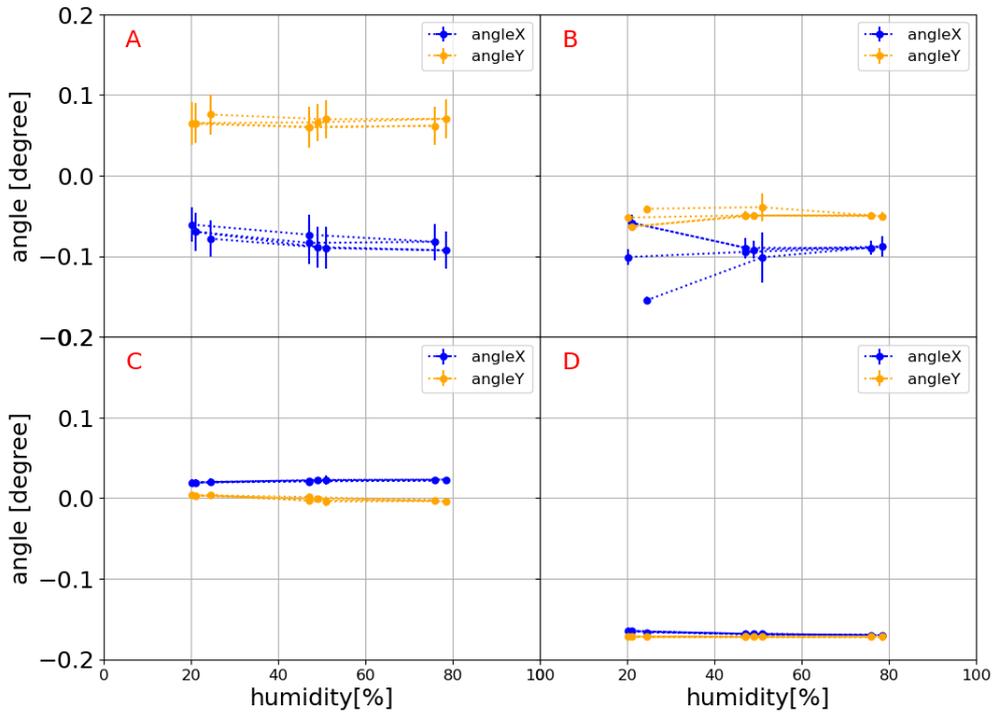


図 4.11: 温度 20°C での湿度依存性

20251120 pickup averaged 5°C

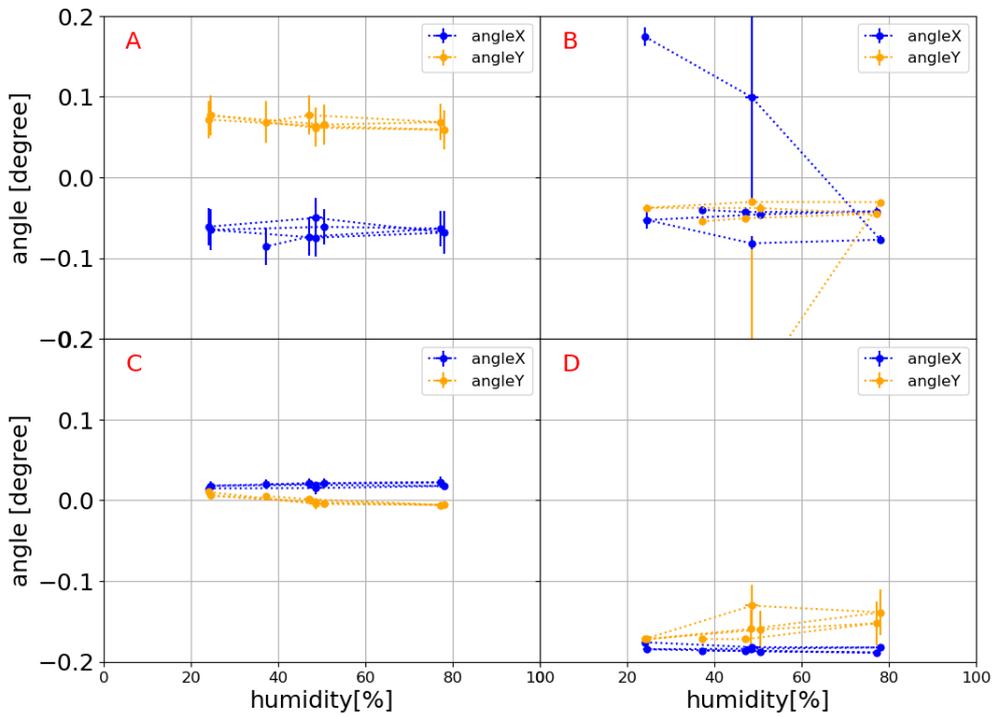


図 4.12: 温度 5°C での湿度依存性

4.5 長期安定性の評価

4.5.1 評価手法

測定のセットアップを図 4.13 に示す。前章と同じアルミプレートと気泡管水準器を用いた測定系を固い台の上に設置し、30 日間放置して継続的な測定を行なった。水平が保たれているかの確認のため、定期的に気泡管水準器の気泡位置を目視で確認した。また、周囲の振動による影響を見分けるため、同室に立ち入った場合は日時を記録した。結果として、今回の測定では気泡位置は角度にして $< 0.01^\circ$ の変化に収まっており、同室に立ち入ったことによる出力への影響はほとんど一切見られなかった。

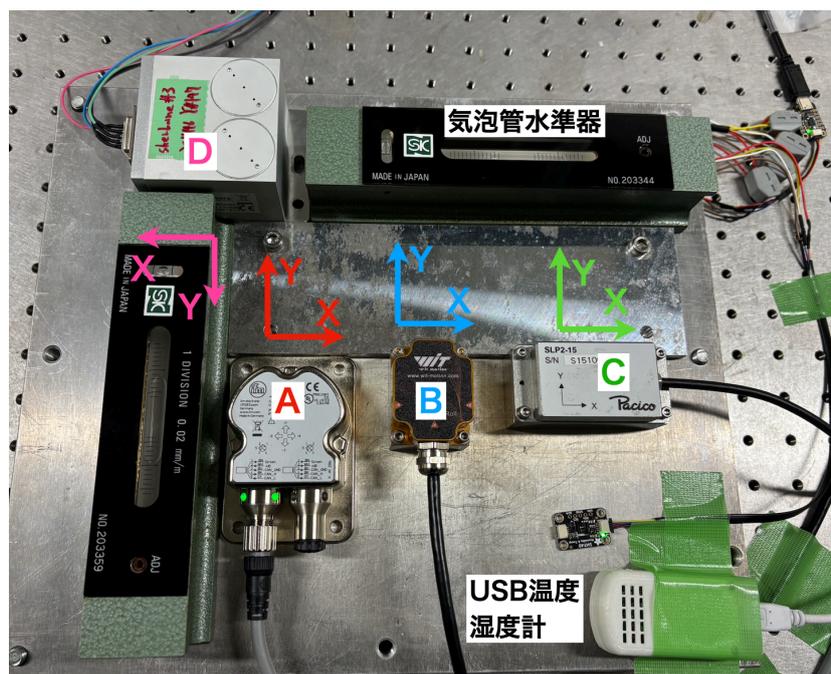


図 4.13: 長期間安定性の測定のセットアップ。

4.5.2 結果

温度・湿度計と各角度計の出力の 30 日間の時間変化をまとめたものが図 4.14 である。A 角度計と USB 温度・湿度計に不具合があり、途中合計 3 日間だけ測定ができていなかったため、A 角度計のみ 30 日間でなく 27 日間での結果を出している。この間角度計には触れておらず、気泡管水準器に変動もなかった。また、他 3 つの角度計についても途中で一度測定を停止し数時間後に再度測定開始したが、こちらについてもこの間角度計には触れておらず、気泡管水準器に変動もなかった。なお、角度計の再起動や測定停止・再開などの操作によって出力に変化が生じないことは確認済みである。

そして、その温度と角度を角度を 24 時間ごとに平均をとった結果が図 4.15 である。誤差として各日の標準偏差を示している。A 角度計と D 角度計に若干の時間変化が見られる。A 角度計では温度依存性や湿度依存性と同等程度の変動であるが、他の 3 つの角度計では温度依存性と比べて十分小さい変動と言える。

24 時間で平均された角度出力の平均の最大値と最小値の差を長期間安定性の誤差として以下の表

stability measurement

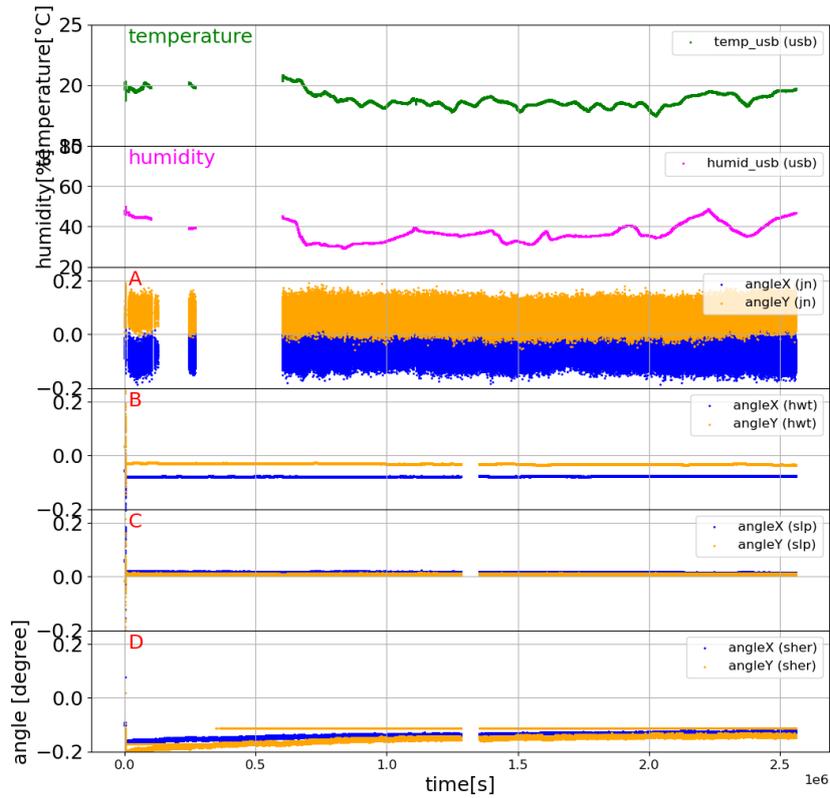


図 4.14: 長期間安定性の測定の時間変化

4.6 にまとめる。

	A		B		C		D	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
長期間安定性 [°]	0.039	0.027	0.0037	0.0062	0.0056	0.0015	0.032	0.054

表 4.6: 各角度計の長期間安定性。24 時間ごとに平均を取り、30 日間での平均の最大値と最小値の差をとっている。

4.6 4 種の角度計の測定結果のまとめと評価

これまでに分析した誤差を整理して、各角度計の精度を決定したものが表 4.7 である。温度依存性・湿度依存性・長期間安定性そして測定精度の二乗和の平方根をトータルの誤差とした。

性能や出力形式などを考慮すると、価格などを考慮すると、C 角度計が現時点では最も有力な候補であると言える。一方で、設定した要求精度を満たしきれていないことも課題として残る。ただし、現在観測サイトでは、気温が 0° 以上の時のみスパーズワイヤーグリッドを用いた較正を実施している。この実情を踏まえ、0°C~20°C の範囲での温度依存性を見た場合、C 角度計の X 軸の温度依存性も 0.045° に抑えられ 2 軸の合計誤差として 0.069° となり要求精度 < 0.08° を満たす。なお、A 角度計も C 角度計に近い性能を示しているが、出力形式が従来の角度計と異なり、インストール時

stability measurement

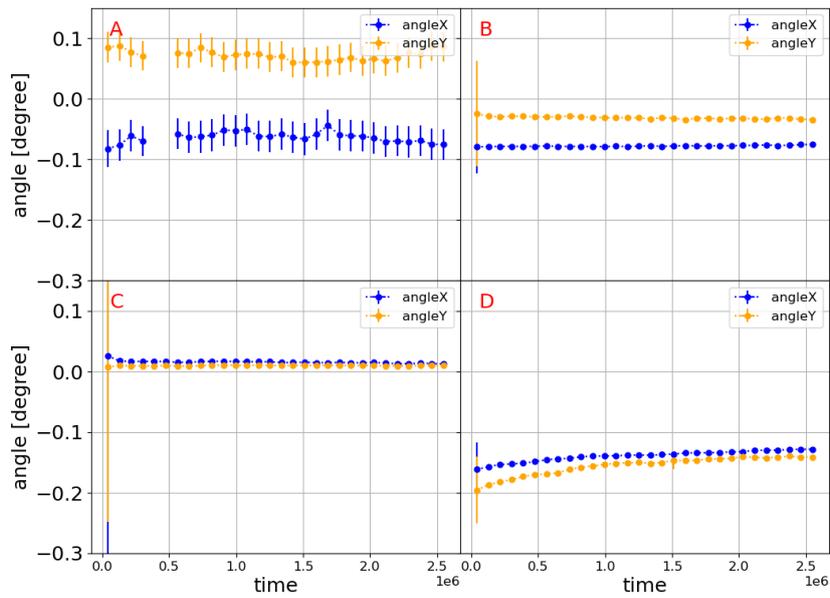


図 4.15: 各角度計の長期間安定性。24 時間ごとに平均と標準偏差をとり、それらの 30 日間での変化を示した。A 角度計と D 角度計に若干の時間変化が見られる。

	A		B		C		D	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
測定精度 [°]	0.012	0.012	0.00024	0.00027	0.00025	0.00030	0.0018	0.0022
温度依存性 (最大)[°]	0.054	0.062	0.36	0.47	0.10	0.047	0.34	0.087
湿度依存性 (最大)[°]	0.059	0.042	0.28	0.37	0.012	0.020	0.016	0.056
長期間安定性 [°]	0.039	0.027	0.0037	0.0062	0.0056	0.0015	0.032	0.054
合計誤差 [°]	0.12		0.75		0.11		0.38	

表 4.7: これまでの測定で求めた誤差のまとめ。

に困難が生じる可能性がある。

C 角度計に関しては、現在使用されている角度計と比較してサイズが小さく価格も安いことから、90° 傾けて 2 つ設置することで精度を向上できる可能性もある。さらに、一定の温度依存性を示すのであればそれをあらかじめ測定し補正することで、 $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ での測定であっても要求精度を満たせる可能性もある。

4.7 C 角度計の個体差の評価

前節で述べたように、温度の補正や複数の角度計を設置する工夫によって、要求性能を満たせるかもしれない。また、個体によって温度依存性に差がある可能性も存在する。これらをさらに検討するために、C 角度計を追加で 2 つ購入した。本説では計 3 つの C 角度計について温度依存性の評価を行うことで個体差の有無を確認する。その後、複数設置による性能の見込みを評価する。

4.7.1 評価手法

これまでの測定と同様に角度計と温度・湿度計を恒温槽の内部に入れて測定を行う。既存の C 角度計を C-1 とし、新しく購入した 2 つの C 角度計をそれぞれ C-2、C-3 としている。ただし、固定方法はこれまでと異なり、ネジを用いてアルミプレートに角度計を固定している。

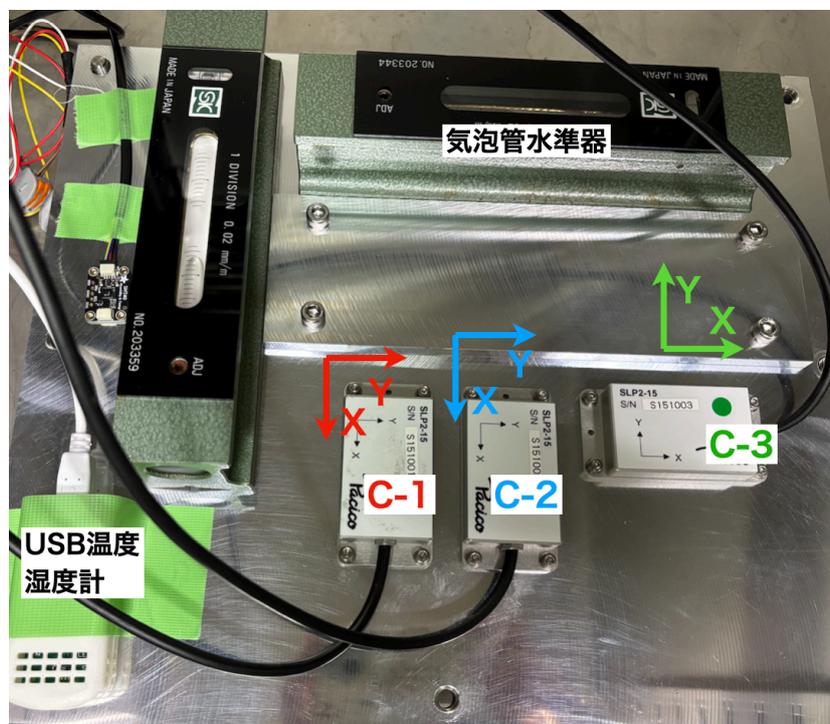


図 4.16: 個体差評価のセットアップ

今回の評価では 4.3 節同様、湿度を 0% に設定し、温度を 10°C 刻みで各ステップ 1 時間ほど欠けて -20°C 20°C の昇温・降温を 2 往復した。

4.7.2 結果

USB 温度計による温度出力と 3 つの C 角度計それぞれの x 軸 y 軸の角度出力の時間変化をまとめたものが図 4.17 である。灰色で示した領域は温度が安定しているとみなせる期間である。

そして、そのデータを用いて 3 つの C 角度計の角度出力の温度依存性を図示したものが図 4.18 である。各角度計に対して、図 4.17 で灰色で示した温度が安定している期間を抜き出し、温度ごとに平均と標準偏差を取っている。C-2 の x 軸が約 0.07° とやや大きな温度依存性を示したが、これまでの測定結果でも測定によっては C-1 の x 軸も同程度の温度依存性を示しており、固定によって明らかな性能差はないとみなせる。

表 4.8 に各 C 角度計の温度依存性の結果をまとめた。

4.7.3 複数設置による性能向上の可能性

C 角度計は現在インストールされている角度計と比較して小型かつ安価であることから、一つの望遠鏡に対して複数の C 角度計を設置することで性能を向上できる可能性がある。今回の個体差測定

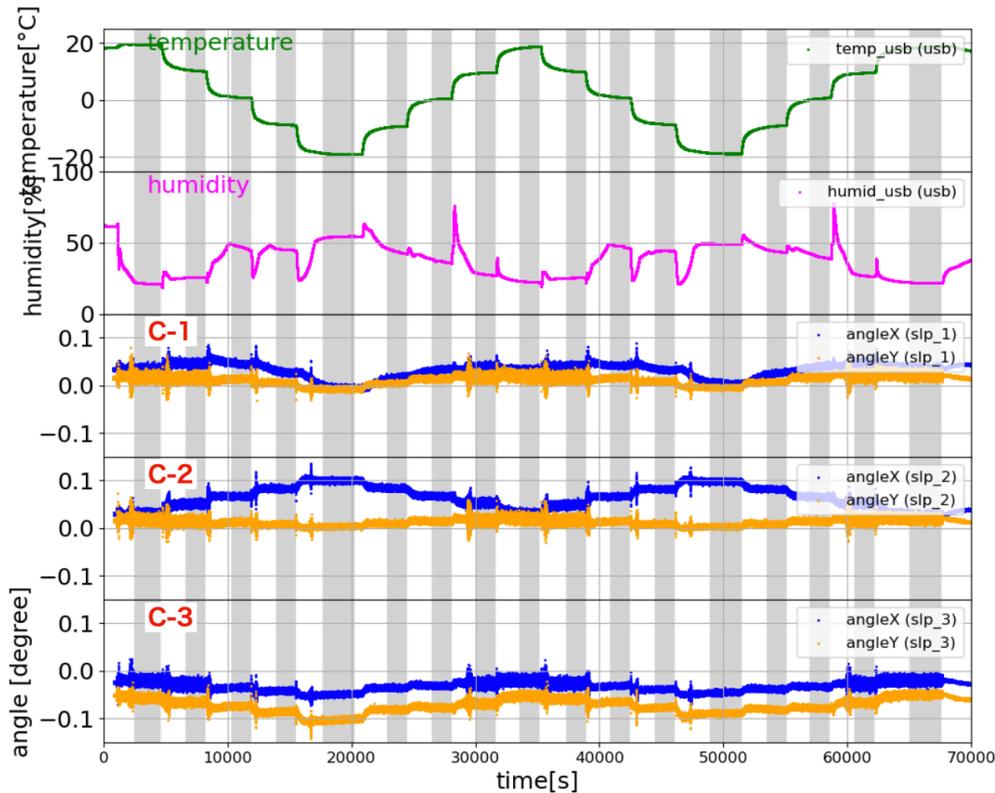


図 4.17: 個体差の測定。湿度を 0% に設定して、 -20°C 20°C で温度を段階的に変化させた。温度を灰色で示された領域を温度が安定している期間として温度依存性の解析に使用した。

	C-1		C-2		C-3	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
温度依存性 [$^{\circ}$]	0.050	0.029	0.73	0.17	0.030	0.052

表 4.8: -20°C \sim 20°C まで温度変化させた際の各 C 角度計の温度依存性。角度出力の最大値と最小値の差を温度依存性による誤差としてとっている。

の結果をもとに、各 C 角度計について性能の良い方の軸だけを使用し、2つの C 角度計を組み合わせることで温度依存性を小さく抑えられるかどうかを検討する。

C-1 については各軸について最も悪い測定結果を採用する場合、C-1 は y 軸が 0.047° 、C-2 は y 軸が 0.017° 、C-3 は x 軸が 0.030° と、それぞれより小さな温度依存性を示している。よって、C-1 と C-2 を 90° 傾けて設置すれば x 軸の温度依存性の誤差が 0.047° かつ y 軸の誤差が 0.017° の性能で測定できる。この時、湿度依存性なども含めた角度計全体での誤差は 0.055° となり、要求精度 $< 0.08^{\circ}$ を満たす。同様にして C-1 と C-3 を組み合わせせた場合、x 軸の誤差 0.047° と y 軸の誤差 0.030° を合計すると 0.061° となり、こちらも要求精度を満たす。

これらの結果から、C 角度計を 2つ組み合わせることは設定した目標精度を達成するために有効である。今後の課題としては、追加購入した C 角度計の湿度依存性も評価や、実際に複数個のインストールが可否の検討が挙げられる。

20250220 pickup averaged

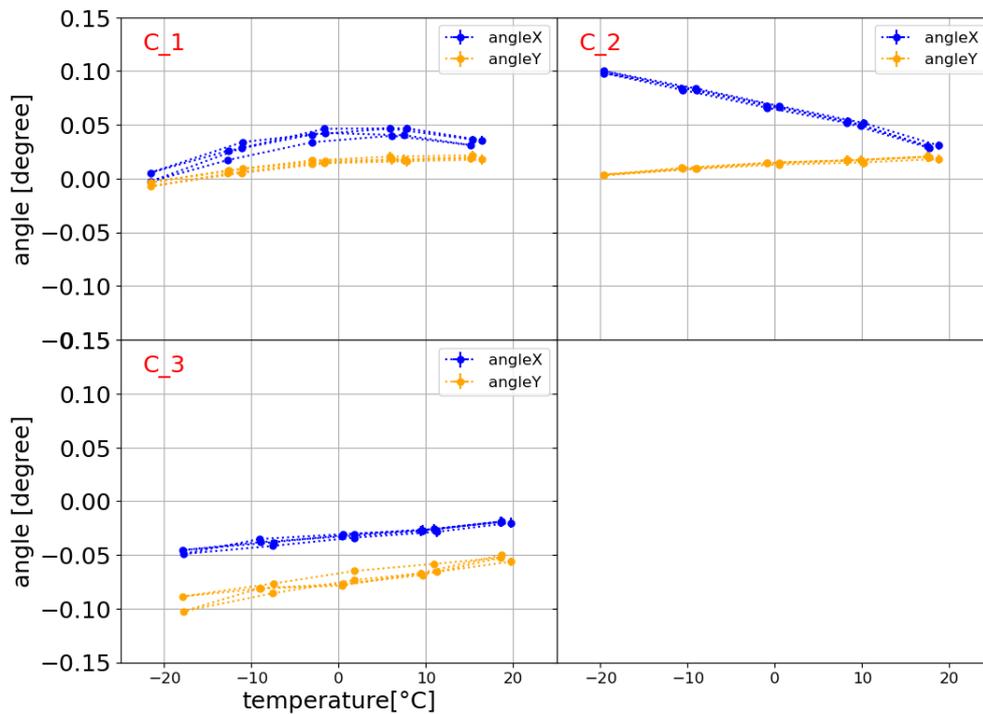


図 4.18: 3つのC角度計の温度依存性。これまでのC-1の結果と比較して、明らかな個体差はないと言える。

4.8 C-1 角度計の温度依存性の補正

複数の設置による精度向上の検討に続き、温度補正による精度向上についても検討した。

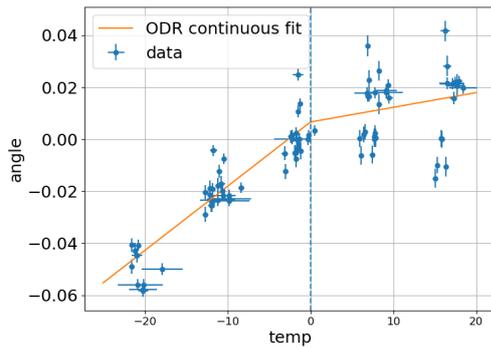
4.8.1 補正方法

これまでのC-1角度計の温度依存性の測定結果を使用する。具体的には図4.3、図4.6、図4.7、図4.8、図4.18で示した5つの測定結果を用いた。これらは全て-20°C 20°Cを10°C刻みで2往復させた測定の結果である。

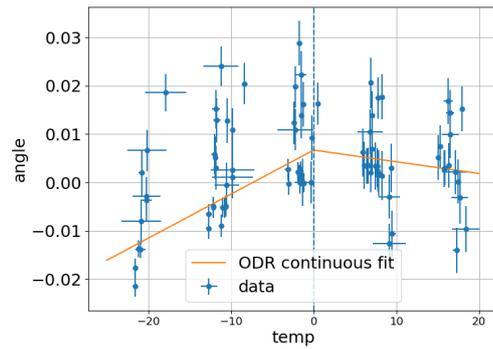
まず、各測定によってオフセットが異なるため、2往復のうち最初の0°Cの値が0°になるように各測定結果を縦軸方向に並行移動させる。並行移動させた5つの結果を一枚のプロットにまとめたものが図4.19の点である。これを見ると、特にx軸について温度が0°C以上と0°C以下で温度依存性の傾きが異なっているように見える。このことから、温度0°C以上での振る舞いと0°C以下での振る舞いが異なる線形性であると仮定して、それぞれ直線でフィットを行った。フィットの結果が図4.19と表4.9にまとめる。

4.8.2 補正結果

表4.9の傾きを用いて各結果に対して補正を行う。補正を行った結果の例を図4.20、図4.21に示す。図4.7の結果に対して行った補正では、元々の温度依存性が大きいx軸については補正によって温度依存性が小さく抑えられていることがわかる。一方で、元々の温度依存性が小さいy軸について



(a) x 軸



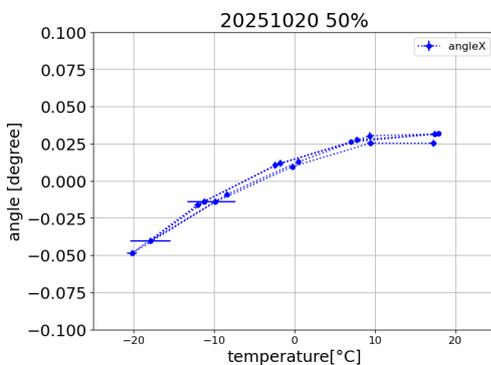
(b) y 軸

図 4.19: C 角度計の温度依存性を、温度 0°C 以上と 0°C 以下の 2 本の直線を用いてフィッティングを行った結果。ただしデータ点は最初の 0°C の値が 0° になるようにオフセットを調整している。

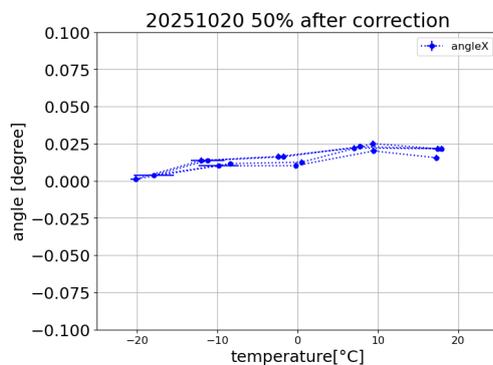
	X 軸		Y 軸	
	温度 $> 0^{\circ}\text{C}$	温度 $< 0^{\circ}\text{C}$	温度 $> 0^{\circ}\text{C}$	温度 $< 0^{\circ}\text{C}$
傾き [$^{\circ}/^{\circ}\text{C}$]	0.050	0.029	0.73	0.17

表 4.9: -20°C ~ 20°C まで温度変化させた際の温度依存性。角度出力の最大値と最小値の差を温度依存性による誤差としてとっている。

は補正後は逆に補正前よりも少し大きい温度依存性となってしまった。



(a) 補正前



(b) 補正後

図 4.20: 図 4.7 の x 軸の結果に対して表 4.9 の傾きを用いて補正を行った結果。

表 4.10 に各測定結果について補正前の温度依存性と補正後の温度依存性をまとめた。補正前の温度依存性の最大値は x 軸が 0.098° 、y 軸が 0.043° であったのに対して、補正後の温度依存性の最大値は x 軸 0.039° が、y 軸が 0.045° となり、特に x 軸について補正によって温度依存性を小さく抑えることができている。補正後の温度依存性を用いた場合、角度計全体での温度依存性は 0.064° となる。これは要求精度 $< 0.08^{\circ}$ を満たす。

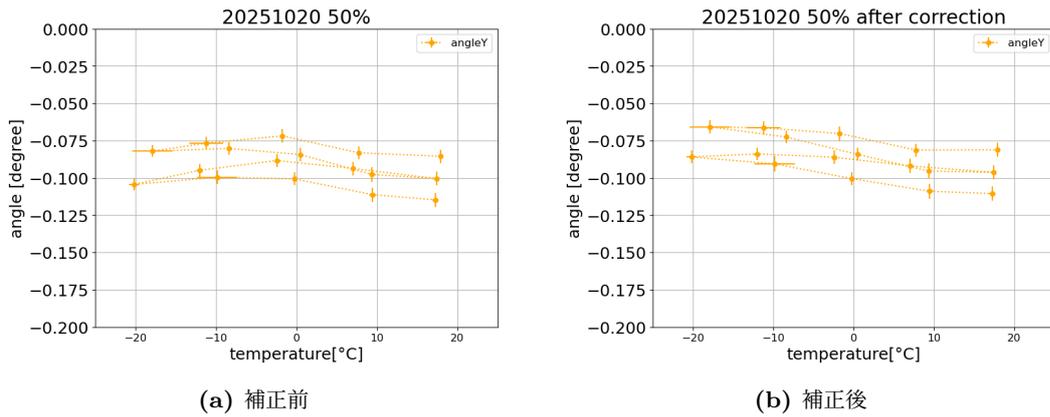


図 4.21: 図 4.7 の y 軸の結果に対して表 4.9 の傾きを用いて補正を行った結果。

	図 4.3		図 4.6		図 4.7		図 4.8		図 4.18	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
補正前の温度依存性 [°]	0.047	0.017	0.098	0.030	0.080	0.043	0.079	0.032	0.049	0.029
補正後の温度依存性 [°]	0.020	0.006	0.037	0.022	0.024	0.045	0.022	0.036	0.039	0.013

表 4.10: 補正前と補正後の温度依存性の変化。特に x 軸について、補正によって温度依存性を小さく抑えられている。

4.9 まとめ

各角度計に対して温度依存性・湿度依存性・長期間安定性の試験を行った結果、表 4.7 に示すように、単体かつ温度較正なしに要求精度 $< 0.08^\circ$ を満たすことが困難であると評価した。しかし、C 角度計は工夫によって温度依存性をさらに小さく抑えることができる。まず、C 角度計を 2 つ組み合わせた場合、温度依存性は悪くても 0.56° まで抑えられ、角度計全体での誤差は 0.11° から 0.061° となり要求精度を満たす。さらに、C 角度計の温度依存性を補正した場合、温度依存性は 0.060° まで抑えられ、角度計全体での誤差は 0.064° となり要求精度を満たす。

また、 $-20^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ の温度範囲でなく、現在のサイトでの運用条件である $0^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ の温度範囲で考えた場合、温度依存性は 0.045° まで抑えられ、角度計全体での誤差は 0.069° となり要求精度を満たす。

これらの結果から C 角度計は要求精度を満たしうると判断でき、今後具体的なインストール手法について検討していく必要があると言える。

第5章

まとめ

Simons Observatory 実験はチリ・アタカマ砂漠で行われている観測実験である。CMB には宇宙の成り立ちについて様々な情報が含まれており、Simons Observatory 実験では CMB の B モード偏光を観測することで原始重力波を検出し、インフレーション理論を検証するを目標としている。具体的には、原始重力波の強度指標 r に対して誤差 0.003 を切る精度を目指している。この精度を達成するためには焦点面に設置した検出器の偏光角を $< 0.1^\circ$ の精度で較正する必要がある。そのためにスパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正を小口径望遠鏡 (SAT) では採用した。スパースワイヤーグリッドは波長より十分に長い間隔で金属ワイヤーを張った装置であり、金属ワイヤーが周囲の熱放射を反射することでワイヤーと同じ向きの直線偏光を生成する。人工的に作られたこの直線偏光を用いて検出器の偏光角感度方向を較正する。その精度を担保するためにはワイヤーの角度に関する系統誤差を抑える必要がある。本論文では、ワイヤーのたわみの抑制と重力参照角度計の評価と選定を行った。

ワイヤーがたわんでいるとワイヤーの角度が変化し、生み出される直線偏光の偏光方向に系統誤差が生じる。そのため、ワイヤーのたわみを測定し、かつたわみを抑制する必要がある。そこで、たわみを自動で測定する装置を開発し各ワイヤーのたわみ量を測定し、張り直しを行うことでたわみ量を 0.05° から 0.02° まで抑えられた。さらに、従来用いられていたタングステンワイヤーからより密度が低く弾性の高いベリリウム銅 (BeCu) ワイヤーに変更し、かける張力も 230g から 120g へ低減することで、ワイヤー張力や温度変化によるワイヤーフレームの変形に起因したたわみを削減し、 $< 0.015^\circ$ を達成した。今後の課題として、BeCu ワイヤーについてタングステンワイヤーと同様の性能が得られるかを確認する必要がある。BeCu ワイヤーの反射の特性や長期間測定した場合の反射特性の変化のほか、長期間の測定でたわみ量が増加していくことがないか、サイトの温度変化下でも実際にたわみの増加が防げているのかなどを確かめるべきである。現在、タングステンワイヤーで張られた WLWFLS03 と BeCu ワイヤーで張られた WLWFLB01 はサイトへの輸送が完了しており、サイトでの実地試験を行うことでそれぞれの性能を確かめることができると思われる。また、たわみ自動測定装置をサイトへ送ることも検討されており、これが実現した場合にはサイトの環境でのたわみ量や長期間でのたわみ量の変化などを確認することができるようになる。

SAT ではワイヤーグリッドと共に 2 軸式の重力参照角度計を設置しワイヤーグリッドの水平面に対する絶対角度を測定する。しかしながら、現在インストールされている角度計には長期間の測定で角度のオフセットが 0.3° ズレるという問題点があった。本論文では新たに 4 つの角度計を購入し、温度依存性・湿度依存性・長期間安定性という 3 つの観点から評価を行った。結果、 $-20^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$

の範囲では角度計に対する要求性能である $< 0.08^\circ$ を満たしきれないが、現 5.1 に全ての結果をまとめた。

系統誤差要因	先行研究	本研究	2 台設置	温度依存性補正	$0^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$
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	$< 0.3^\circ$	$< 0.11^\circ$	$< 0.056^\circ$	$< 0.064^\circ$	$< 0.07^\circ$
ワイヤーのたわみ	$< 0.02^\circ$	< 0.015	< 0.015	$< 0.015^\circ$	$< 0.015^\circ$
合計	$< 0.3^\circ$	$< 0.12^\circ$	$< 0.079^\circ$	$< 0.085^\circ$	$< 0.089^\circ$

表 5.1: 先行研究で得られているワイヤーグリッドの系統誤差

なお、C 角度計については温度依存性の補正や複数角度計の設置によって要求精度を満たすことができる。軽量・小型・安価であることから、より良い方の軸が直行するようにして 2 つの C 角度計を設置できるので、温度依存性は悪くても 0.56° まで抑えられる。これによって角度計全体での誤差は 0.061° となり要求精度を満たす。また、測定された C 角度計の温度依存性をもとに補正を行うことで温度依存性を 0.60° まで抑えられる。その結果、角度計全体での誤差は 0.64° となり要求精度を満たす。今後の課題としては m 実際のインストールに向け具体的なインストール方法を検討する必要がある、また最終的には現在稼働中の 3 台の SAT と現在準備中の JSAT を合わせた 4 台にそれぞれ角度計を設置する必要があるため、さらに角度計を追加で購入し評価を行う必要がある。

以上、本研究で偏光角の較正精度 $\delta\theta < 0.1^\circ$ を達成する展望を確認した。これによって、原始重力波の検出感度に対して、現在与えられている上限値である $r < 0.032$ 以下が達成できると見込む。

付録 A

ストークスパラメータ

z 軸正方向に進む光の電場は

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \text{Re} \left[(E_x e^{i\delta_x} \mathbf{e}_x + E_y e^{i\delta_y} \mathbf{e}_y) e^{i(\omega t - kz)} \right] \\ &= a_x \cos(\omega t - kz + \delta_x) \mathbf{e}_x + a_y \cos(\omega t - kz + \delta_y) \mathbf{e}_y \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

と表される。 E_x 、 E_y はそれぞれ x 軸、 y 軸成分であり、 ω は角振動数、 k は波数、 δ_x 、 δ_y は位相のオフセットである。

この時、図 A.1 に示すストークスパラメータは以下のように定義される。

$$I = a_x^2 + a_y^2 \quad (\text{A.2})$$

$$Q = a_x^2 - a_y^2 \quad (\text{A.3})$$

$$U = 2a_x a_y \cos \delta \quad (\text{A.4})$$

$$V = 2a_x a_y \sin \delta \quad (\text{A.5})$$

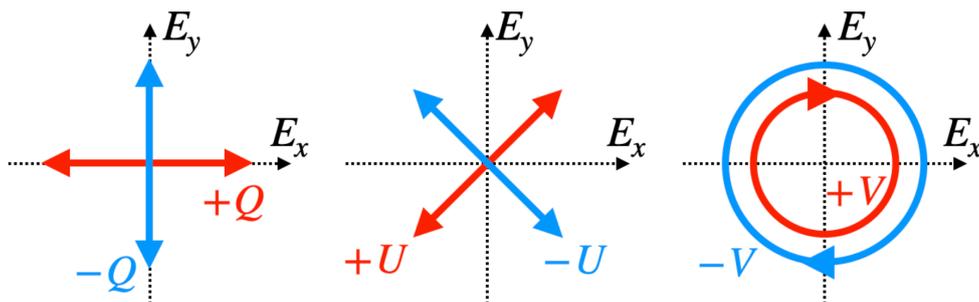


図 A.1: ストークスパラメータ I 、 Q 、 U 及び V 。 I は強度の絶対値を与え、 Q と U が直線偏光を、 V が円偏光を記述するのに用いられる。

図 A.1: ストークスパラメータの定義。 I は信号の強度を表し、 Q と U が直線偏光を、 V が円偏光を記述する。
[25]

ここで複素電場ベクトル \mathcal{E}_x 、 \mathcal{E}_y を導入する。 \mathcal{E}_x 、 \mathcal{E}_y は一般に以下のようにかける。

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_x &= a_x e^{i(\omega t - kz + \delta_x)} \\ \mathcal{E}_y &= a_y e^{i(\omega t - kz + \delta_y)} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

これを用いると、ストークスパラメータは以下のように書き直せる。

$$I = |\mathcal{E}_x|^2 + |\mathcal{E}_y|^2 \quad (\text{A.7})$$

$$Q = |\mathcal{E}_x|^2 - |\mathcal{E}_y|^2 \quad (\text{A.8})$$

$$U = \mathcal{E}_x \mathcal{E}_y^* + \mathcal{E}_x^* \mathcal{E}_y \quad (\text{A.9})$$

$$V = \frac{1}{i}(\mathcal{E}_x \mathcal{E}_y^* - \mathcal{E}_x^* \mathcal{E}_y) \quad (\text{A.10})$$

座標が回転した場合のストークスパラメータの変換は以下のようにかける。

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

参考文献

- [1] A. A. Penzias and R. W. Wilson. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *Astrophysical Journal*, 142:419-421, July 1965.
- [2] C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 148(1):1–27, September 2003.
- [3] D. J. Fixsen, E. S. Cheng, J. M. Gales, J. C. Mather, R. A. Shafer, and E. L. Wright. The cosmic microwave background spectrum from the FullCOBEFIRAS data set. *The Astrophysical Journal*, 473(2):576–587, dec 1996.
- [4] N. Aghanim, Y. Akrami, F. Arroja, et al. Planck2018 results: I. Overview and the cosmological legacy of Planck. *Astronomy & Astrophysics*, 641:A1, September 2020.
- [5] P. A. R. Ade, Z. Ahmed, M. Amiri, et al. Improved constraints on primordial gravitational waves using planck, wmap, and bicep/keck observations through the 2018 observing season. *Phys. Rev. Lett.*, 127:151301, Oct 2021.
- [6] Peter Ade et al. The simons observatory: science goals and forecasts. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2019(02):056–056, feb 2019.
- [7] 中井直正, 坪井昌人, and 福井康雄. 宇宙の観測 II-電波天文学. 日本評論社, 第 2 版 edition, 2017
- [8] 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.
- [9] 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. 2017
- [10] 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.
- [11] J. P. Kaufman, N. J. Miller, M. Shimon, et al. Self-calibration of BICEP1 three-year data and constraints on astrophysical polarization rotation. *Phys. Rev. D*, 89:062006, 3 2014.
- [12] Sean A. Bryan, Grant P. Teply, Sara M. Simon, et al. 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.
- [13] The Polarbear Collaboration: P. A. R. Ade, Y. Akiba, A. E. Anthony, et al. 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.
- [14] 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.
- [15] Yuki D. Takahashi, Denis Barkats, John O. Battle, et al. 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.
- [16] P. A. R. Ade, R. W. Aikin, D. Barkats, et al. Bicep2. III. INSTRUMENTAL SYSTEMATICS. *The Astrophysical Journal*, 814(2):110, November 2015.
- [17] D. Hanson, S. Hoover, A. Crites, et al. Detection of B-Mode Polarization in the Cosmic Microwave Background with Data from the South Pole Telescope. *Physical Review Letters*, 111(14), September 2013.
- [18] Akito Kusaka, John Appel, Thomas Essinger-Hileman, et al. Results from the Atacama B-mode Search (ABS) experiment. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2018(09):005–005, September 2018.
- [19] QUIET Collaboration, C. Bischoff, A. Brizius, I. Buder, et al. FIRST SEASON QUIET OBSERVATIONS: MEASUREMENTS OF COSMIC MICROWAVE BACKGROUND POLARIZATION POWER SPECTRA AT 43 GHz IN THE MULTIPOLE RANGE $25 < l < 475$. *The Astrophysical Journal*, 741(2):111, oct 2011.
- [20] J. A. Sobrin, A. J. Anderson, A. N. Bender, et al. The Design and Integrated Performance of SPT-3G. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 258(2):42, feb 2022.
- [21] Erin Healy, Daniel Dutcher, Zachary Atkins, Jason Austerlmann, et al. The simons observatory 220 and 280 ghz focal-plane module: Design and initial characterization. *Journal of Low Temperature Physics*, Vol. 209, No. 5, pp. 815–823, Dec 2022.
- [22] O. Tajima, H. Nguyen, C. Bischoff, et al. Novel calibration system with sparse wires for cmb polarization receivers. *Journal of Low Temperature Physics*, 167:936–942, 2012.
- [23] Masaaki Murata, Hironobu Nakata, Kengo Iijima, et al. 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.
- [24] 村田雅彬. Simons Observatory 実験のためのスパースワイヤ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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 星野 大輝. 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. 修士論文, 2025
- [28] Warren C. Young, Richard G. Budynas. Formulas for Stress and Strain.(seventh Edition),McGraw-Hill, 2001.