

第1章 スペースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置

検出器の偏光角を較正するために、人工的な偏光源としてスペースワイヤーグリッドを用いた較正装置を使用する^{[?][?]}。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、系統誤差の要因とその測定値の現状について述べる。

1.1 金属ワイヤーによる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大きい場合、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1.1に、ワイヤーの向きと揃った偏光方向をもつ入射光をワイヤーが反射する様子を示す。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、無偏光な大気放射と、ワイヤーからの偏光信号の重ね合わせが見える。^{??}項にて述べた、HWPという偏光を変調する装置を用いて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の較正を行う。また、ワイヤー間隔を調整することで入力する偏光信号の強度を調整できる。

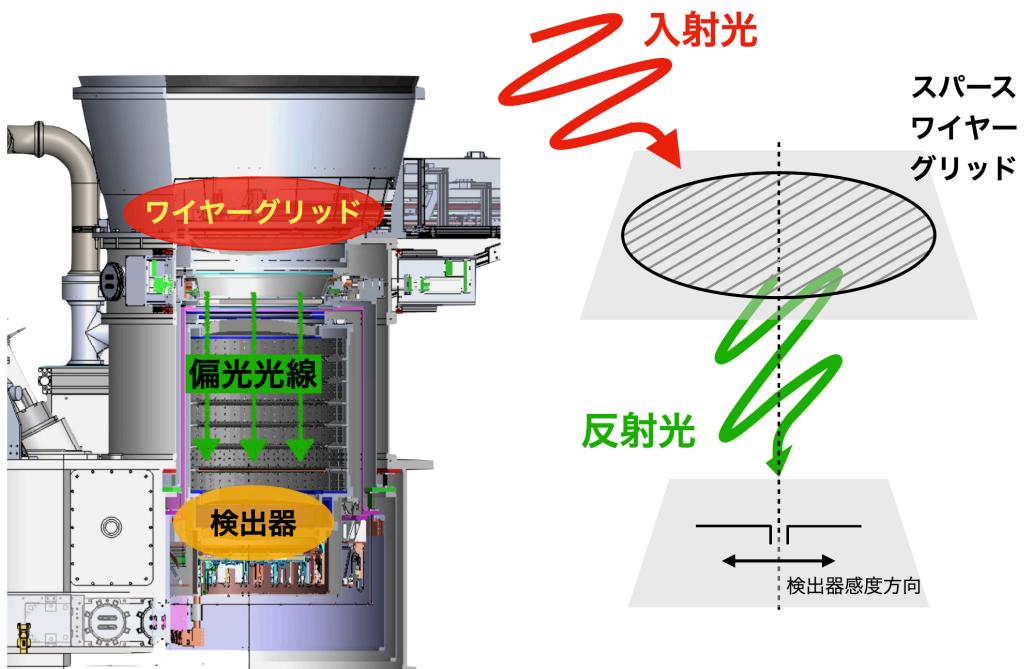


図 1.1: スペースワイヤーグリッド周囲の熱放射を反射し、その反射光が検出器に入射するイメージ。簡略化のため、本来スペースワイヤーグリッドと検出器の間にいる HWP を描いていない。

1.2 偏光角較正の原理

スペースワイヤーグリッドは望遠鏡の窓の前に設置され、前述した原理により直線偏光した光を望遠鏡に送り込む。望遠鏡とその窓の前に置かれたスペースワイヤーグリッドの概念図を図 1.2 に示す。本節では、生成された直線偏光がどのように焦点面上の検出器に到達し、偏光角較正に用いられるかを述べる。式 (??) 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、検出器に入力する信号は

$$d_{\text{m,det}}(t) = I_{\text{in}}(t) + \eta \operatorname{Re} [\exp \{-i(4\omega_{\text{HWP}}t + 4\chi_0 - 2\theta_{\text{det}} - 2\theta_{\text{wire}})\}] \quad (1.1)$$

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 1.3 に示す。縦軸は検出器が受け取った光の強度であり、横軸は時間を表す。 $\chi_0 = 0$, $\theta_{\text{det}} = 30^\circ$ とし、 $\theta_{\text{wire}} = 0^\circ, 15^\circ, 60^\circ$ に対して時系列データのイメージを描いた。これを式 (??) にしたがって復調することで

$$d_{\text{d,det}} = \eta \exp [i2(\theta_{\text{wire}} + \theta_{\text{det}})] \quad (1.2)$$

という偏光成分のみを抽出できる。現実の望遠鏡では光学系の不完全性によって生まれる余剰な（そして微弱な）偏光信号 δ_P が観測されうる。つまり、現実の実験では式 (1.2) は

$$d_{\text{d,det}}^{\text{real}} = \eta \exp [i2(\theta_{\text{wire}} + \theta_{\text{det}})] + \delta_P \quad (1.3)$$

この δ_P 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。図 1.4 に理想的な較正円のイメージを示す。光学系の不完全性によって生じうる余剰な偏光 δ_P は較正円の原点がズレ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。

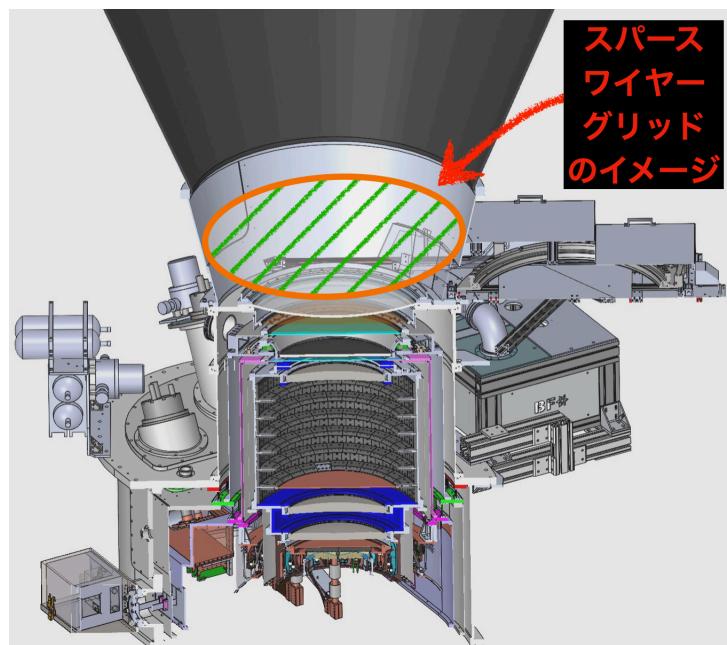


図 1.2: 望遠鏡の窓の前に設置されたスペースワイヤーグリッドの概念図。

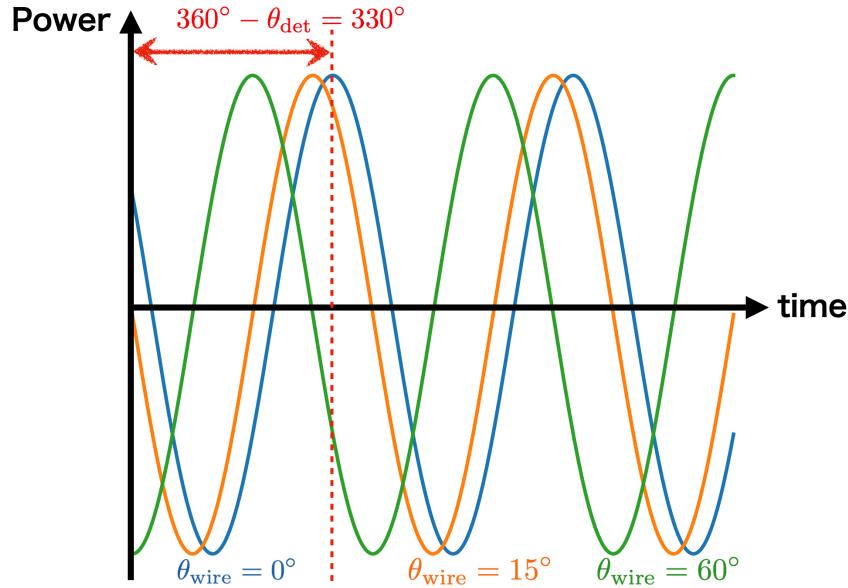
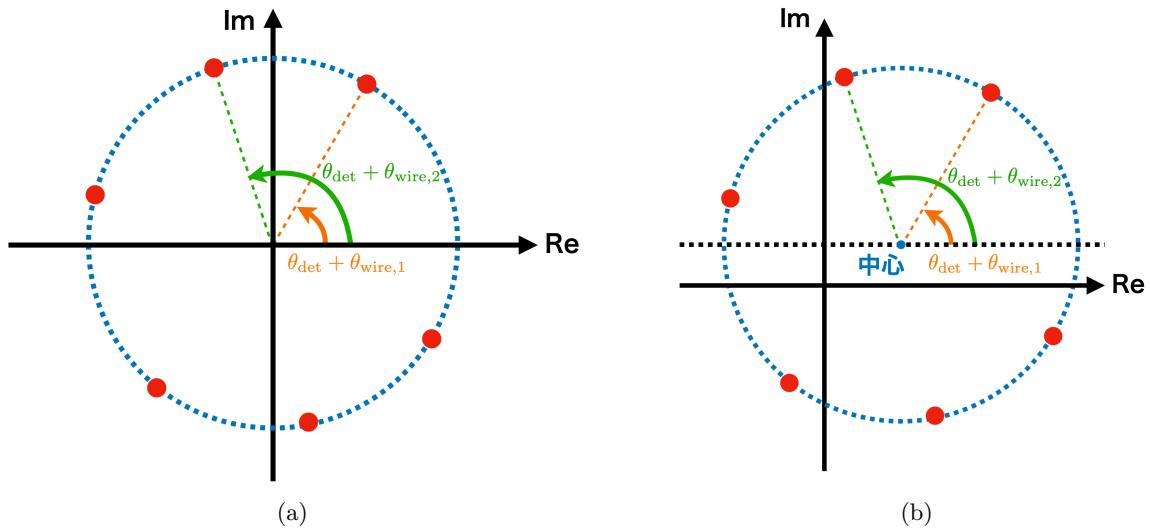


図 1.3: スペースワイヤーグリッドによって生成される偏光信号の時系列データイメージ。

図 1.4: ワイヤーの角度を $\theta_{\text{wire},1}, \theta_{\text{wire},2}, \dots$ と変化させた時の較正円のイメージ。(a) 理想的な較正円のイメージ。(b) スペースワイヤーグリッド以外からの余剰な偏光 δ_P によって較正円の原点がズレた場合の較正円のイメージ。

1.3 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、それに伴って高い頻度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モード・較正モードの切り替え(図 1.5)を自動で行うロボット機構が開発・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。

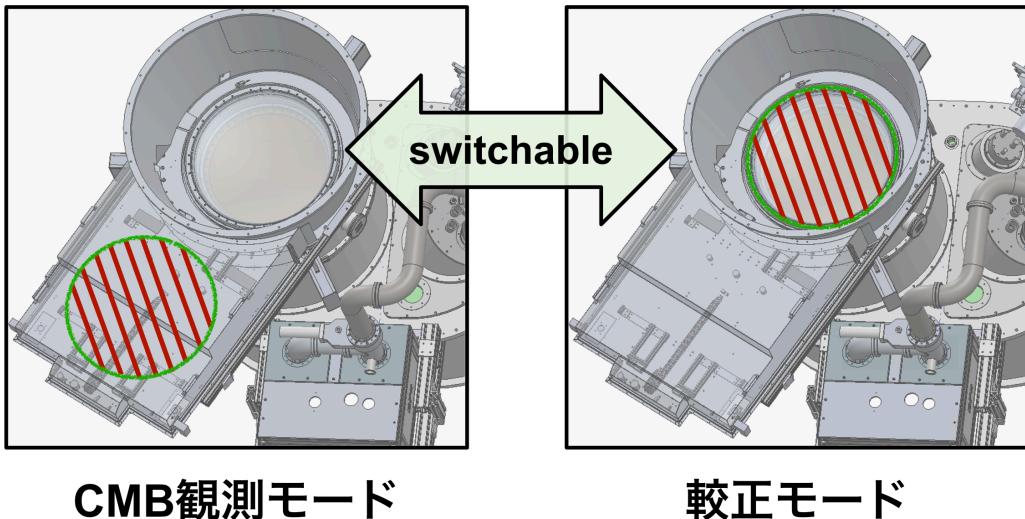


図 1.5: (左)CMB 観測モード時のスペースワイヤーグリッドの様子。望遠鏡の視野の外に出ている。(右) 較正モード時のスペースワイヤーグリッドの様子。望遠鏡の窓の上に位置し、偏光信号を望遠鏡に送り込む。

1.3.1 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 1.6(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 のタングステンワイヤーを 20 mm 間隔で 39 本張り巡らせたものを使用する^[?]。

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。図 1.7 のように、230 g の重りをワイヤーにくくりつけてこの溝の上にワイヤーが沿うように設置することでピンと張った状態にし、Henkel 社製の LOCTITE STYCAST 2850FTJ という接着剤を用いて固定する。なお、隣り合うワイヤーでは重りが干渉してしまうため、2 回に分けてワイヤーを張る。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 1.6(b) にワイヤー接着部分の詳細を示す。

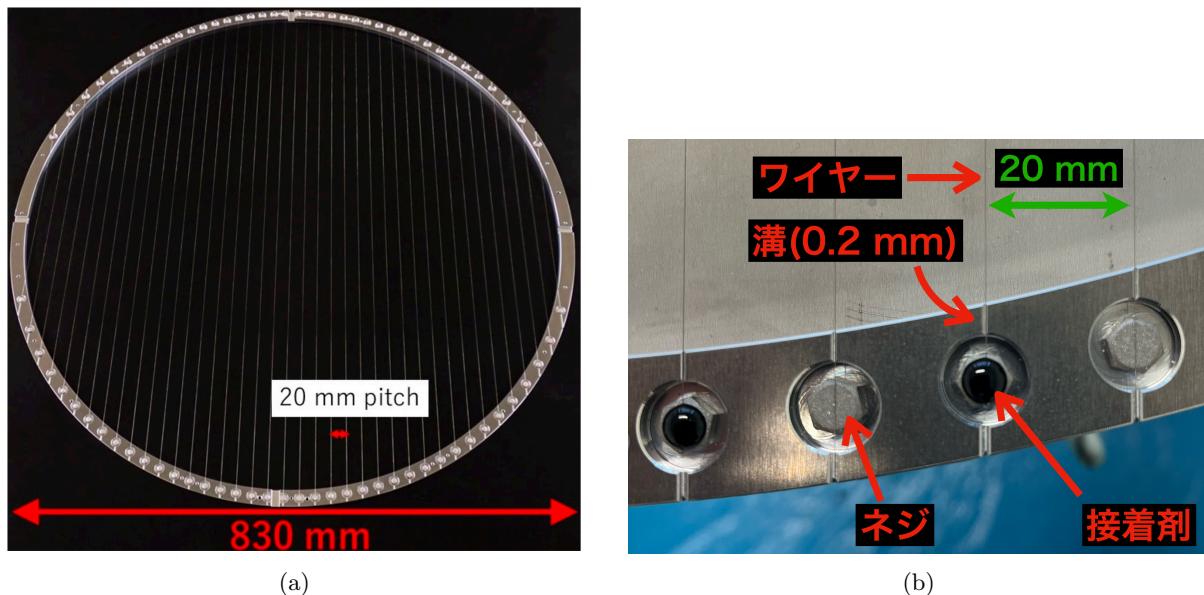


図 1.6: (a) スペースワイヤーグリッドの概観^[?] (b) ワイヤー接着部分の詳細

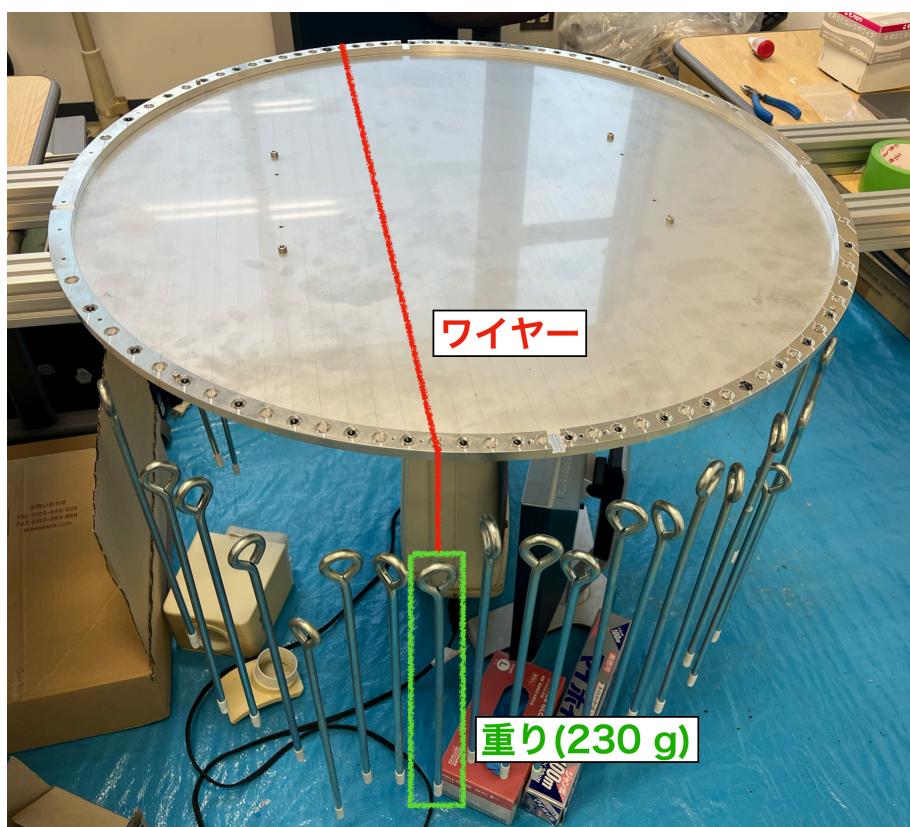


図 1.7: ワイヤーを張るときの様子。ワイヤーの両端に 230 g の重りをつけ、張力をかけている。

1.3.2 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 1.8 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° ずつ回転することで、図 1.4 のような較正円を描く [?]

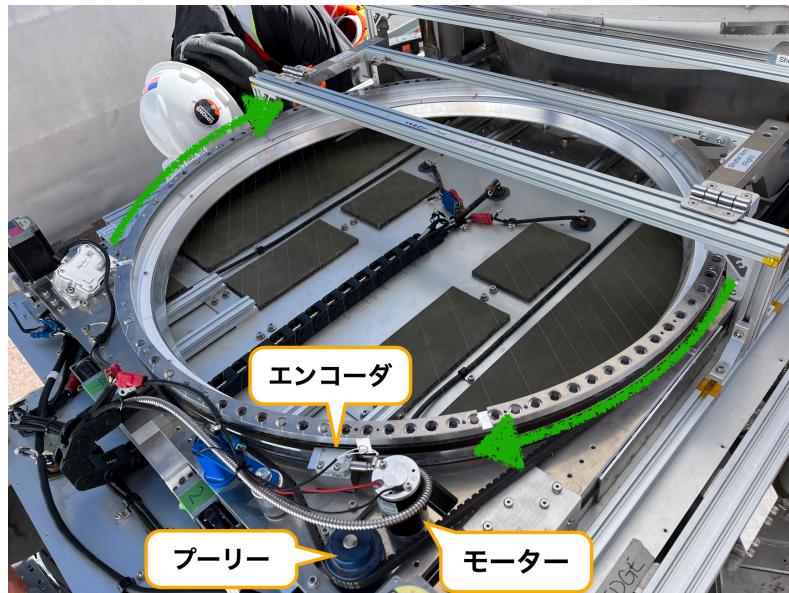


図 1.8: スペースワイヤーグリッドに搭載された回転機構の概観

1.3.3 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 1.9 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 [?]

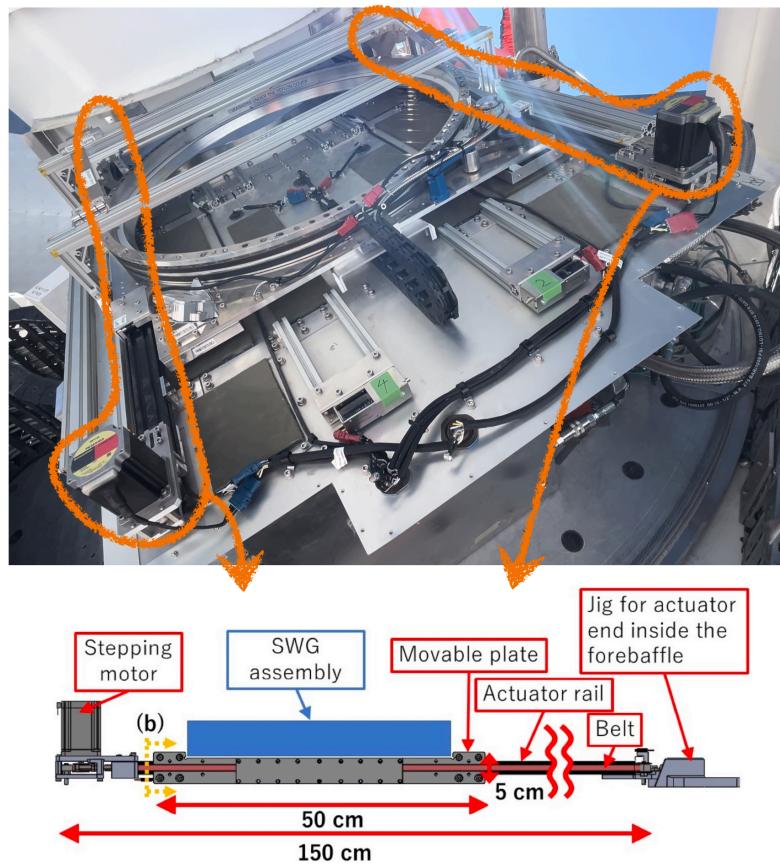


図 1.9: スペースワイヤーグリッドに搭載された切り替え機構の概観。上図が観測サイトにインストールされた較正装置であり、オレンジの線で囲んだ部分の詳細を下図に示している^[?]。

1.3.4 重力参照計

1.3.4.1 重力参照計を用いた θ_{wire} の測定

式(1.2)において、 θ_{wire} はワイヤーが作り出す天球面上における偏光信号の角度(絶対角度)である。エンコーダはスペースワイヤーグリッドがその平面内において回転したワイヤーの方向角度(相対角度)を出力するので、その平面座標を天球面座標に変換するための参照情報が必要である。具体的には、2軸の重力参照計を導入して重力を参照し、平面座標を天球面座標に変換する。つまり、重力参照計の精度が、絶対角度の較正精度をダイレクトに左右する。

図 1.10(a)のように各種平面、角度を定義する。 xy 平面として重力に対して垂直な平面を取り、 z 軸負の方向が重力方向となるように座標系を取る。図中に円環として描かれているのがスペースワイヤーグリッドであり、重力参照計が持つ2軸を x' , y' 軸とする。 α , β は重力参照計が測定する角度であり、 x' , y' 軸が xy 平面となす角度である。図中にある horizontal line とは、 xy 平面と x' , y' 平面が交わる直線である。以上の定義から、 x' 軸と horizontal line がなす角 θ_{gravity} (図 1.10(b)) は

$$\theta_{\text{gravity}} = \arctan \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \right) \quad (1.4)$$

と表される^[?]。図 1.10(b) にスペースワイヤーグリッド平面における各種測定角度と、ワイヤーの絶対角度 θ_{wire} の関係を示す。 θ_{enc} はエンコーダによって測定された値であり、 $\theta_{\text{enc}0}$ はエンコー

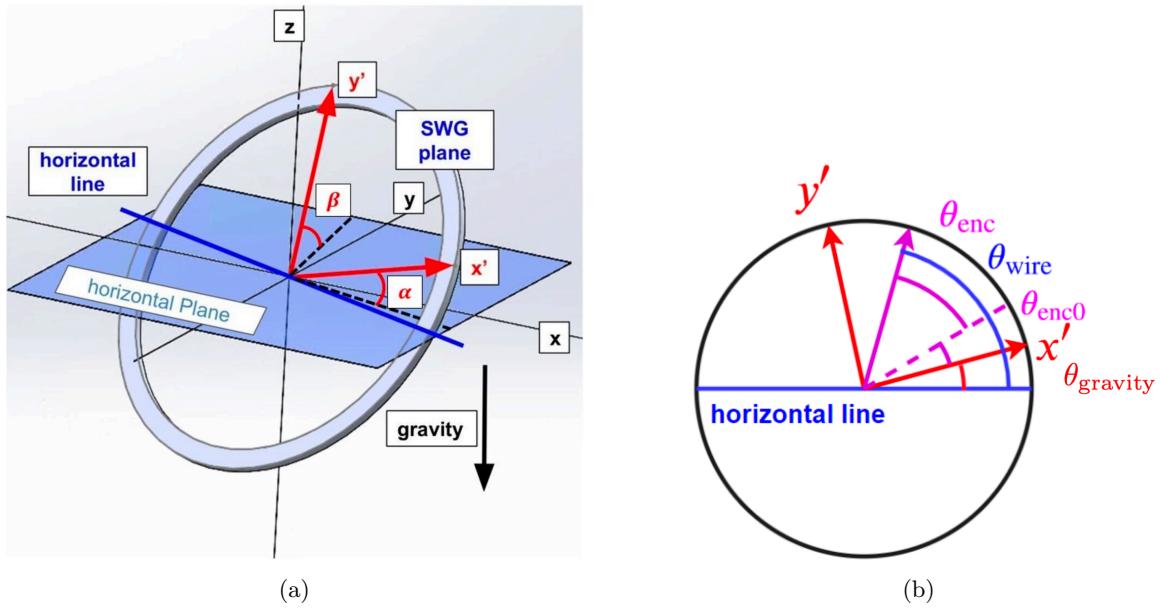


図 1.10: (a) 絶対角度測定のための各種平面と角度の定義 (b) スペースワイヤーグリッド平面における回転角と絶対角度

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

$$\theta_{\text{wire}} = \theta_{\text{enc}} + \theta_{\text{enc0}} + \theta_{\text{gravity}} \quad (1.5)$$

と測定される。

1.3.4.2 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し、スペースワイヤーグリッドの回転機構のベースプレートに取り付けられている。SAT は elevation(地表から天頂に向かう仰角)50° の観測を主要としており、スペースワイヤーグリッドは boresight(視線軸を中心とした回転角)60° のオフセットを持って設置されている。そのため、これら elevation と boresight のオフセットを打ち消すように(つまり、重力参照計が両軸ともに 0° を指すように)、重力参照計が設置されている。図 1.11 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。スペースワイヤーグリッドに取り付けられた重力参照計の様子を図 1.12、1.13 に示す。図 1.12 中の x' 軸と y' 軸は図 1.10(a)(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

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}}_X \\ \hat{\mathbf{e}}_Y \\ \hat{\mathbf{e}}_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{\text{slope}2} & \sin \theta_{\text{slope}2} \\ 0 & -\sin \theta_{\text{slope}2} & \cos \theta_{\text{slope}2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{\text{slope}1} & \sin \theta_{\text{slope}1} & 0 \\ -\sin \theta_{\text{slope}1} & \cos \theta_{\text{slope}1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}}_{x'} \\ \hat{\mathbf{e}}_{y'} \\ \hat{\mathbf{e}}_{z'} \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

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、elevation と boresight のオフセットを打ち消すための角度の設計値は $(\theta_{\text{slope}1}, \theta_{\text{slope}2}) = (210^\circ, 40^\circ)$ 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を考慮して、式(1.4)の $\sin \alpha, \sin \beta$ を θ_X, θ_Y を用いて表すと、式(1.6)から

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= \cos \theta_{\text{slope}1} \sin \theta_X - \sin \theta_{\text{slope}1} \cos \theta_{\text{slope}2} \sin \theta_Y \\ &\quad + \sin \theta_{\text{slope}1} \sin \theta_{\text{slope}2} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y}\end{aligned}\quad (1.7)$$

$$\begin{aligned}\sin \beta &= \sin \theta_{\text{slope}1} \sin \theta_X - \sin \theta_{\text{slope}1} \cos \theta_{\text{slope}2} \sin \theta_Y \\ &\quad - \cos \theta_{\text{slope}1} \sin \theta_{\text{slope}2} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_X - \sin^2 \theta_Y}\end{aligned}\quad (1.8)$$

となる。

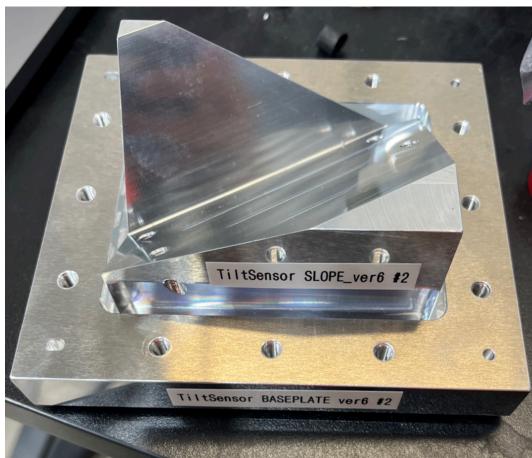


図 1.11: 重力参照計を設置するスロープが切られた治具

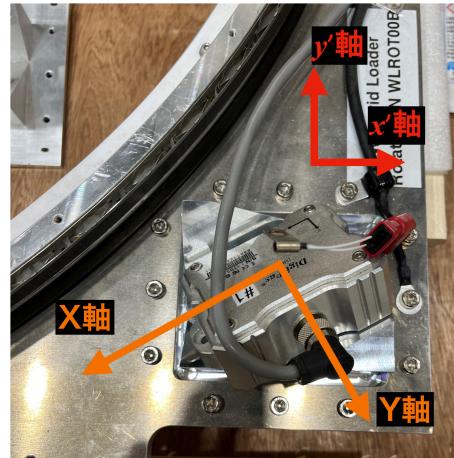


図 1.12: 設置された重力参照計の詳細と各軸のイメージ

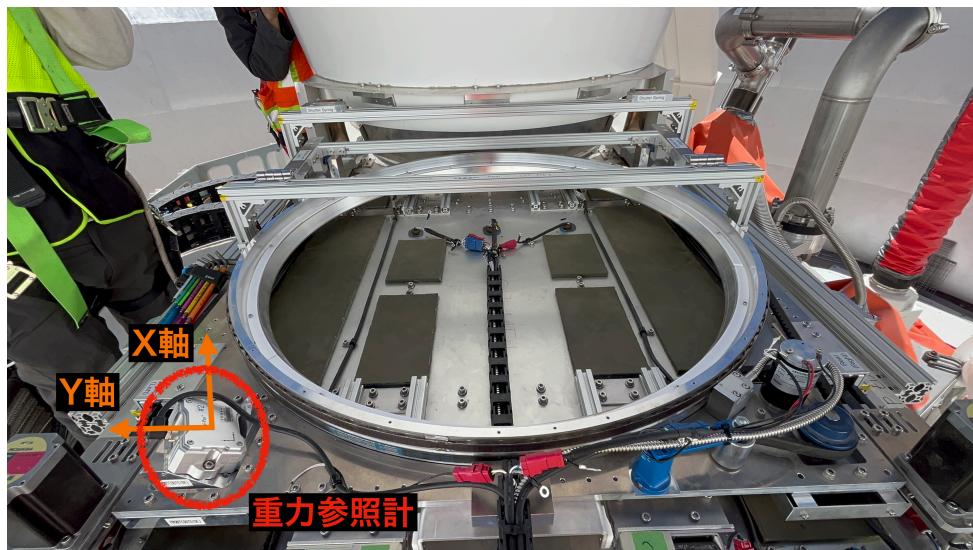


図 1.13: 重力参照計の設置状況

1.4 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、先行研究による評価について述べる。それぞれの系統誤差要因の評価方法について述べた評価を見直すべき点を整理し、さらに本論文の位置付けについて述べる。表 1.1 に先行研究^{[?][?]}によって評価された系統誤差の要因と、その値を示す。また、本研究での改善があったものには、その詳細を述べる章番号を記す。

表 1.1: 先行研究によって評価された系統誤差

系統誤差要因	先行研究	本研究での改善の有無
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°	本研究で 0.06° に改善 (??章)
ワイヤーのたわみ	< 0.05°	本研究で 0.02° に改善 (??章・??章)
合計	> 0.1°	

1.4.1 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揃えて張ることが可能である。

1.4.2 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^[?]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° を得ている。

1.4.3 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 $\theta_{wire} = 0°$ となった状態で θ_{enc} と $\theta_{gravity}$ を測定することで決定され、その精度は < 0.04° と測定されている^[?]。

1.4.4 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、 $\theta_{gravity}$ の精度に直結する。そのため、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要求する較正精度よりも十分に小さいこと

- 観測サイトにおける気温変動を考慮し、 $-20^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ での出力変動が要求する較正精度よりも十分に小さいこと

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^[?]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° 程度の変動があり、これでは 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。本研究でこれを改善する。

1.4.5 ワイヤーのたわみに伴う系統誤差

較正に使う直線偏光の方向はワイヤーに沿う方向であるため、ワイヤーがたわんでいると、その部分がつくる直線偏光の向きはワイヤーの絶対角度 θ_{wire} からずれる。詳細な手法は??章にて述べるが、先行研究^{[?][?]}では、スペースワイヤーグリッドに張られたワイヤーの写真を、ワイヤーの両端と中心で撮影することで評価を行った。その結果、ワイヤーのたわみに起因する偏光角の較正誤差 θ_{sag} は $\theta_{\text{sag}} < 0.05^{\circ}$ と評価した。この評価手法では、全ての写真を人間が撮影していたため、その評価値には人依存のバイアスやふらつきを含む可能性がある。さらに、撮影自体にも時間がかかるため、何度も繰り返し測定を行うことが難しいという問題があった。本研究でこれを改善する。

1.4.6 系統誤差のまとめと本論文の位置付け

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、上述のように表 1.1 に示した先行研究では、まだ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、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、新たな重力参照計の導入をする。??章にてこの新しい重力参照計の精度の検証を行う。

次に大きな系統誤差の要因であるワイヤーのたわみに関しては、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、測定にかかる時間が長いことも問題である。もし、たわみの測定を短時間で行うことができれば、その測定結果をもとにたわみの大きなワイヤーを選別して改善を行うなどのフィードバックをかけることが可能になる。さらに、観測サイトにおける品質管理の面を考えると、現地で定期的にたわみを測定できる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。本論文では、ワイヤーのたわみを正確に自動測定する評価装置を開発し(??章)、実際に使用されるスペースワイヤーグリッドの評価を行った(??章)。