

第1章 スパースワイヤーグリッドを用いた偏光角 較正装置

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

1.1 偏光信号の生成原理

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

1.2 偏光角較正の原理

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、

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

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^{??}に示す。これを復調することで、式^(??)より

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

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

図 1.1: 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。

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、それに伴って短期間での再較正が困難であった。そこで、本装置ではワイヤーの回転と観測・較正の切り替えを自動で行う機構が開発・搭載され、10 分程度での較正が実現されている。本節では、スペースワイヤーグリッド本体の設計に加え、この自動化機構について述べる。

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 1.2a に示す。これは金属製のワイヤーを、入射光よりも十分長い間隔で平行に張ったものであり、ワイヤー軸に沿った偏光を生成する。SO ではアルミニウム製の内径 790 mm、外径 830 mm の円環に、直径 0.1 mm のタンクステンワイヤーを 20 mm 間隔で 39 本張り巡らせたものを使用する^[?]。

アルミニウムリング上には 0.2 mm の幅で刻まれた溝があり、これによりワイヤーの位置を決める。230 g の重りをワイヤーにくくりつけることでピンと張った状態にし、この溝の上にワイヤーが沿うように設置したのち、Henkel 社製の LOCTITE STYUCAST 2850FTJ という接着剤を用いて固定する。接着剤による固定部分はサンドブラストされたネジ頭となっており、このネジを取り替えることで接着後であってもワイヤーを張り直すことができるようになっている。

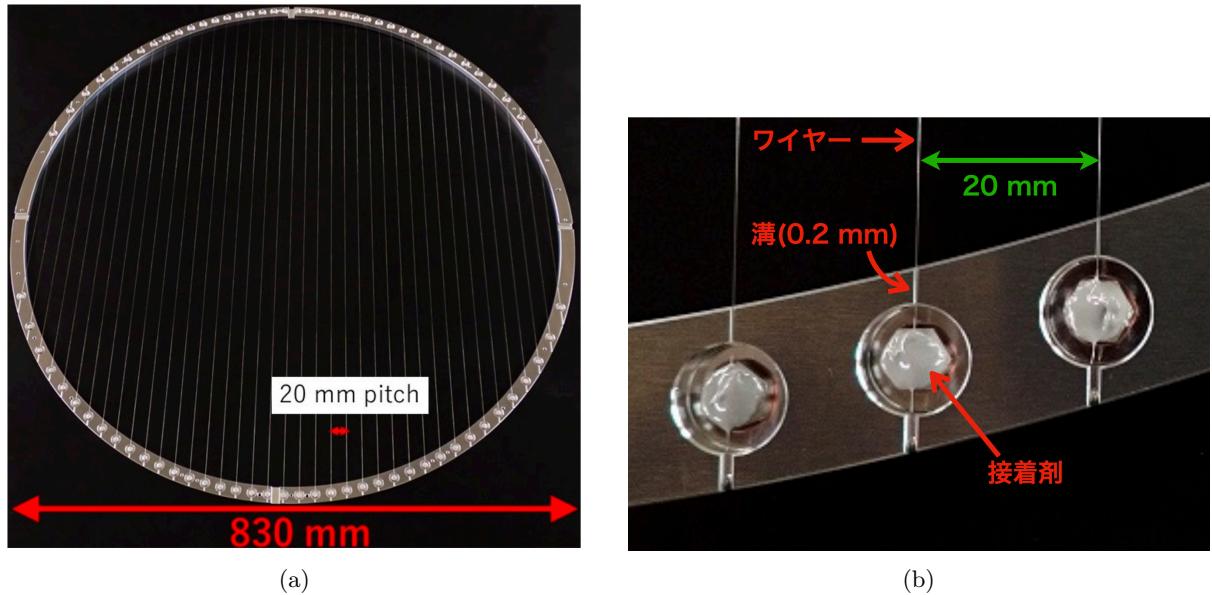


図 1.2: (a) スペースワイヤーグリッドの概観 (b) ワイヤー接着部分の詳細

図 1.4: 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

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

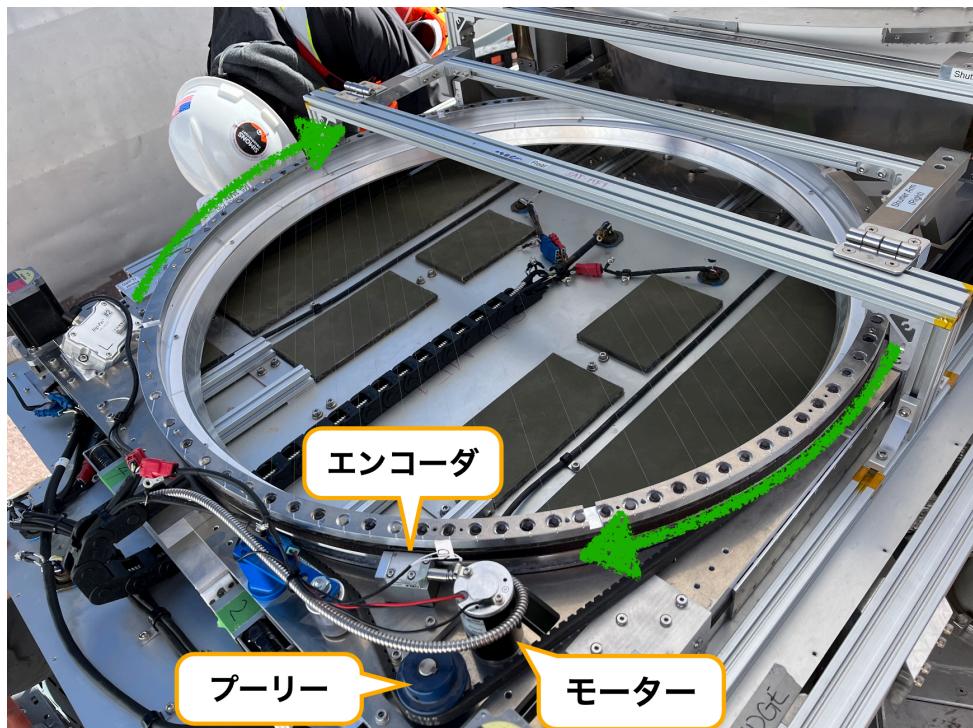


図 1.3: スペースワイヤーグリッドに搭載された回転機構の概観

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 ?? 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 [?]

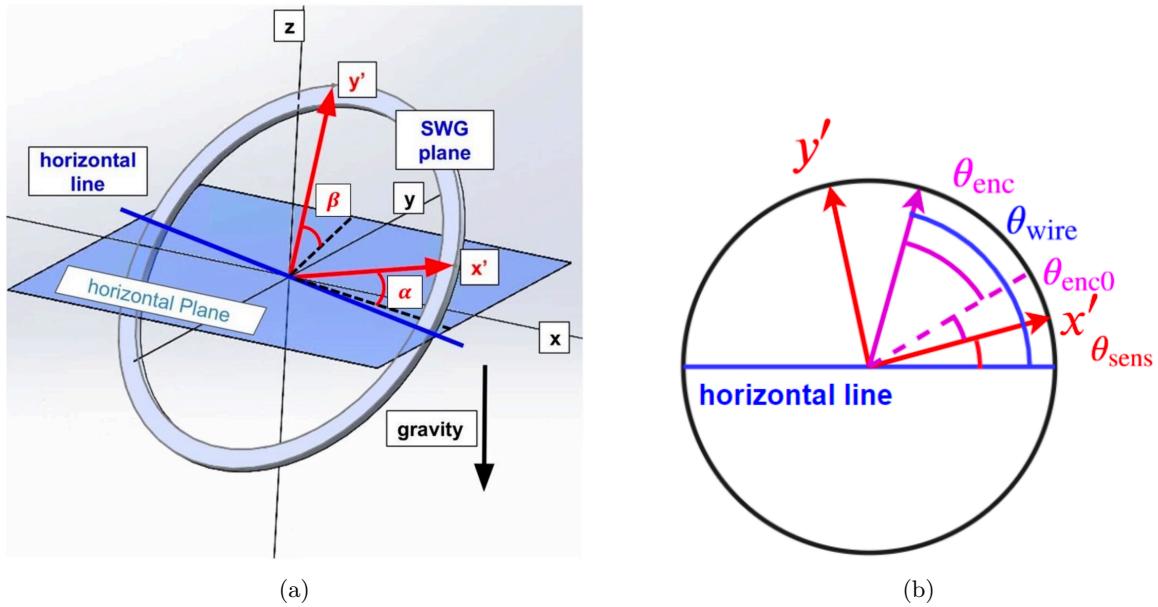


図 1.5: (a) 絶対角度測定のための各種平面と角度の定義 (b) スペースワイヤーグリッド平面における回転角と絶対角度

1.3.4 重力参照計を用いた θ_{wire} の測定

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

図 1.5(1.5a)のように各種平面、角度を定義する。 xy 平面として重力に対して垂直な平面を取り、 z 軸負の方向が重力方向となるように座標系を取る。図中に円環として描かれているのがスペースワイヤーグリッドであり、重力参照計が持つ 2 軸を x' , y' 軸とする。 α , β は重力参照計が測定する角度であり、 x' , y' 軸が xy 平面となす角度である。図中にある horizontal line とは、 xy 平面と x' , y' 平面が交わる直線である。以上の定義から、 x' 軸と horizontal line がなす角 θ_{sens} は

$$\theta_{\text{sens}} = \arctan \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \right) \quad (1.3)$$

と表される¹⁰。図 1.5(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、 θ_{enc0} はエンコーダの零点と x' 軸のなす角である。以上を用いることで、絶対角度は

$$\theta_{\text{wire}} = \theta_{\text{enc}} + \theta_{\text{enc0}} + \theta_{\text{sens}} \quad (1.4)$$

と測定される。

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^[?]にてその精度を欠き、SO における要求絶対角度較正精度 $\delta\theta \leq 0.1^\circ$ を満たさないことが示された。この研究結果を受け、新たに Sherborne 社製の DSIC-205-60 という重力参照計の導入を予定している。^{??}にて、その精度を議論する。

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、過去に測定されたその値について述べる。

1.4.1 ワイヤーの設置精度に伴う系統誤差

1.4.2 エンコーダの測定精度に伴う系統誤差

??にて述べた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ラ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 ワイヤーのたわみに伴う系統誤差