

# IRIS 撮像系の駆動機構のホール素子による原点出し・位置検出の検討

○中本崇志、大淵喜之、浦口史寛、池之上文吾、斎藤栄、小俣孝司、  
鈴木竜二、早野裕（国立天文台）

## 概要

TMT の第一期観測装置である近赤外線撮像分光装置 IRIS の撮像部はクライオスタットの中にあり、撮像部のいくつかの駆動機構では、液体窒素温度下で原点や現在位置を検出するのに永久磁石とホール素子を用いる。現在、磁場シミュレーションや温度サイクル試験などを通じて詳細な設計検討を行っており、その進捗を報告する。

## 1. 背景

IRIS 撮像部の駆動機構のうち、Cold Stop、ADC、フィルター交換機構、スライサーピックアップ鏡、シャッターでは、永久磁石とホール素子を用いて非接触の原点検出と現在位置検出を行う。磁石には低温での減磁が少ないサマリウムコバルト磁石を、ホール素子には GaAs 半導体を用いた旭化成エレクトロニクス of HG-106A を用いる。データシートによれば同ホール素子の最低動作温度は $-40^{\circ}\text{C}$ であるが、これまでのプロトタイプ試験<sup>[1]</sup>などで液体窒素温度での動作実績がある。ホール電圧に乘るノイズが精密な原点検出に与える影響と、ホール素子が室温と液体窒素温度間の繰り返しの冷却・昇温に耐えられるかが懸念された<sup>[2]</sup>ため、それぞれについて検討を進めている。

## 2. ホール素子の動作原理とゼロクロス点

図 1 のように半導体薄膜に電流 $I$ を流し、電流に垂直な磁束密度 $B$ をかけると、電流と磁束密度に垂直な向きにホール電圧 $V_H = BI/en_c t$ が発生する。ここで、 $e$ は電気素量、 $n_c$ は半導体のキャリア密度、 $t$ は薄膜の厚さである。このうち、温度に依存するのは基本的にキャリア密度だけである。n 型 GaAs 半導体の場合、不純物濃度を高くしていき、不純物原子間平均距離が同原子の実効ボーア径と同じ桁かそれ以下になると、極低温にてキャリアが凍結せずにキャリア密度がほぼ一定に保ち続けられる<sup>[3]</sup>。その結果、幅広い温度域でホール電圧の温度ドリフトが小さくなる。実際、温度以外の条件を同一にし、HG-106A のある一個体でサマリウムコバルト磁石の磁束密度を計測すると、77 K では室温と比べてホール電圧が 11%だけ増加した。仮にこの増加率が温度に非依存とすれば、ホール電圧の温度係数は $-0.05\%/^{\circ}\text{C}$ と非常に小さいことになる。

位置検出を行うには、様々なホール素子と磁石の配置方法がありうる。IRIS 撮像部では、磁石を駆動部に、ホール素子を固定部に取り付け、図 2 のように駆動方向、磁石の磁化方向、ホール素子の半導体薄膜面の三つを全て平行にする。すると、図 3 の赤線のようなホール電圧の波形が出力される。磁石がホール素子の真正面に来るとホール電圧が 0 になり、この位置をゼロクロス点と呼ぶ。図 3 の波形は様々な理由で形状や大きさが変動する可能性があるが、ゼロクロス点の位置はそれらに左右されにくいため、IRIS 撮像部ではこれを精度の良い原点として利用する。

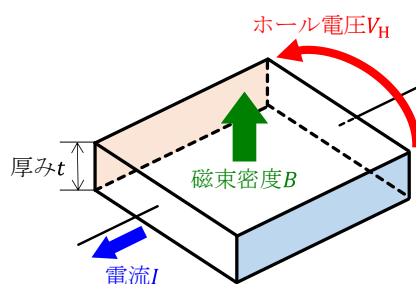


図 1. 半導体薄膜とホール電圧

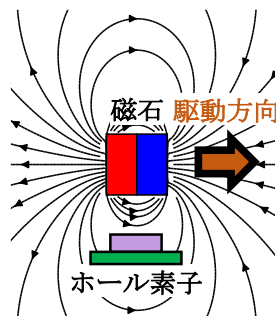


図 2. 永久磁石の磁力線

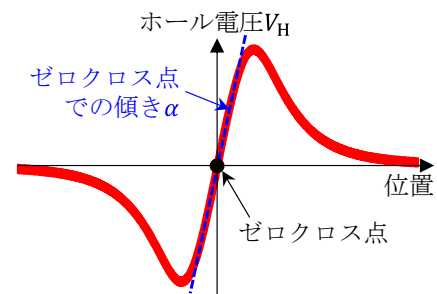


図 3. ゼロクロス波形

そのために、クライオスタットの外でホール電圧に各種信号処理を施す。まず、差動アンプによるコモンモードノイズ除去と信号増幅、AD変換、ローパスフィルタによるノイズ除去、オフセット電圧除去といった処理を行う。そして、ホール電圧の時間微分が閾値以上で、かつ、同電圧の符号が変化したら、原点パルス信号をモーションコントローラに出力する。これにより、機械的なスイッチと同じように扱うことができる。時間微分を判定条件に含めるのは、磁石がホール素子から離れてホール電圧が0になる場合と区別するためである。しかし、静止した物体では時間微分が常に0であるため、この方法では現在位置が検出できない。そのため、シャッターなどのように、位置検出精度が粗くても良いので現在位置を知りたい駆動機構向けには、ホール電圧が閾値以上ならON信号を出すようにもする。

### 3. 磁荷モデルによる磁場シミュレーション

ホール電圧に乗るノイズは完全には除去できないため、図3の波形のゼロクロス点での傾き $\alpha$ が緩いとノイズにより原点検出精度が悪くなる。そこで、どの程度の傾きになるかを簡単に見積もるため、磁荷モデルを用いた磁場シミュレーションを行うことにした。磁極面に仮想的な磁荷が残留磁束密度 $B_r$ で等分布していると仮定し、クーロンの法則を用いれば、直交座標系での任意の位置 $\vec{p} = (x, y, z)$ における磁束密度は

$$\vec{B}(\vec{p}) = \frac{B_r}{4\pi} \left\{ \int_{A_N} \frac{\vec{p} - \vec{q}_N}{|\vec{p} - \vec{q}_N|^3} dA_N - \int_{A_S} \frac{\vec{p} - \vec{q}_S}{|\vec{p} - \vec{q}_S|^3} dA_S \right\} \quad (1)$$

と書ける。ここで、 $A_N$ と $A_S$ はそれぞれN極面とS極面であり、 $\vec{q}_N$ と $\vec{q}_S$ は各面上の1点を表す位置ベクトルである。式(1)を用いると、対称軸方向に磁化された半径 $R$ 、長さ $L$ の円筒型磁石の対称軸上の磁束密度は

$$B(l) = \frac{B_r}{2} \left\{ \frac{l+L}{\sqrt{(l+L)^2 + R^2}} - \frac{l}{\sqrt{l^2 + R^2}} \right\} \quad (2)$$

と求まる。ただし、 $l$ は磁極面からの距離である。式(2)は便利で広く用いられているが、対称軸以外の位置での磁束密度を求めるには、式(1)の面積分を数値計算する必要がある。そこで、図4のように磁石の中央を直交座標系 $(x, y, z)$ の原点 $(0, 0, 0)$ に置き、磁化方向を $x$ 軸に一致させ、N極を $x$ 軸正方向にする。また、図5に示す通り、 $yz$ 面内の円形磁極面を径方向に $n$ 個で等分割し、分割してできる中空円を内側から $i = 0 \sim (n-1)$ と番号を付ける。さらに、 $y$ 軸を起点に中空円 $i$ を周方向に $(8i+4)$ 個の扇型の面素に等分割し、 $j = 0 \sim (8i+3)$ と番号を付ける。すると、面素数は $4n^2$ 個、全ての面素の面積は $\pi R^2/4n^2$ となり、面素 $(i, j)$ の中央の極座標 $(r_i, \theta_{i,j})$ は図5の通りとなる。各面素の中央に磁荷が集中していると考えれば、磁束密度は

$$\vec{B}(\vec{p}) = \frac{B_r R^2}{16n^2} \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{8i+3} \frac{\vec{p} - \vec{q}_{N,i,j}}{|\vec{p} - \vec{q}_{N,i,j}|^3} - \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{8i+3} \frac{\vec{p} - \vec{q}_{S,i,j}}{|\vec{p} - \vec{q}_{S,i,j}|^3} \right\} \quad (3)$$

で求められる。ただし、 $\vec{q}_{N,i,j} = (L/2, r_i \sin \theta_{i,j}, r_i \cos \theta_{i,j})$ 、 $\vec{q}_{S,i,j} = (-L/2, r_i \sin \theta_{i,j}, r_i \cos \theta_{i,j})$ である。これをホール電圧に換算すると、図3のような波形とゼロクロス点での傾き $\alpha$ が求まる。IRIS撮像部では図6のように磁石とホール素子を配置する。ホール素子2個を1つの基板に実装し<sup>[2]</sup>、一方はコールドスペアとする。この配置での一例として $R = 1.5 \text{ mm}$ 、 $L = 3 \text{ mm}$ 、 $B_r = 890 \text{ mT}$ 、 $V_H/B = 1.5 \text{ V/T}$ として、ゼロクロス点での傾き $\alpha$ を求めると、磁石・ホール素子間ギャップ $g$ に応じて図7のようになる。

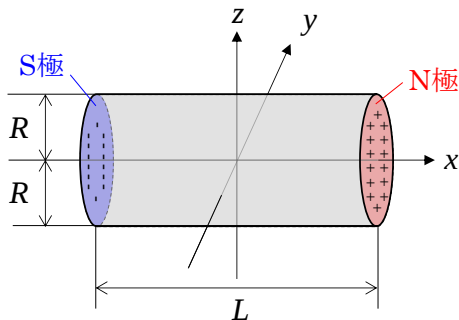


図4. 直交座標系上の円筒型磁石

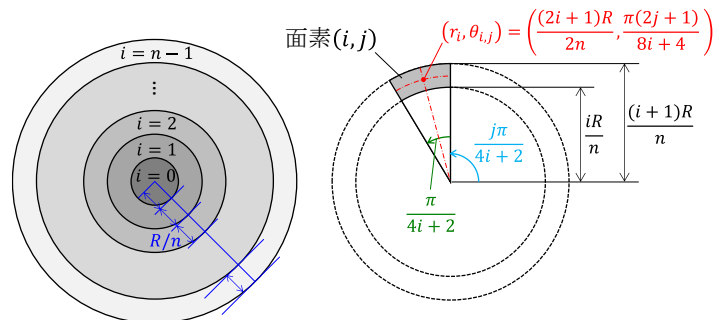


図5. 円形磁極面の扇型面素への分割

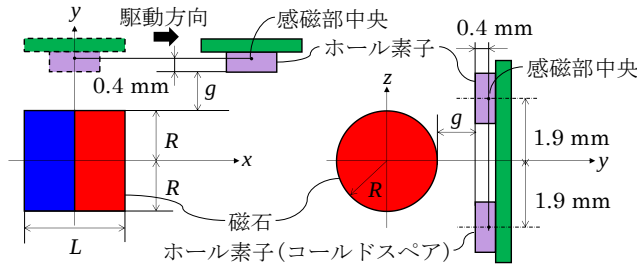


図 6. IRIS 撮像部駆動機構の磁石とホール素子の配置

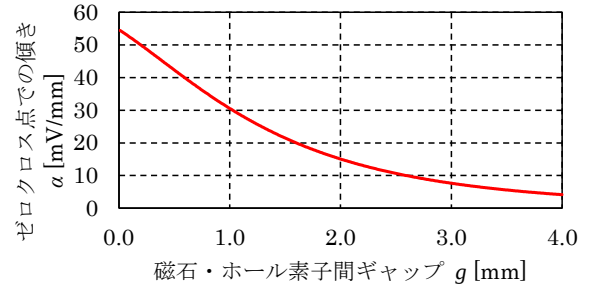


図 7. ゼロクロス点での傾き  $\alpha$  の例

#### 4. ノイズがある場合の原点検出精度

次に、ノイズがある場合の原点検出精度を見積もる。ノイズ電圧の標準偏差を  $\sigma_n$  とし、正規分布を仮定すると、ノイズ電圧が  $V_n$  となる確率密度関数は  $f(V_n) = \exp[-V_n^2/(2\sigma_n^2)]/\sqrt{2\pi\sigma_n^2}$  と書ける。AD 変換のサンプリング周期を  $\Delta t$ 、サンプリング時刻を  $t_k$  ( $k$  は整数) とし、 $t_0 = 0$ 、 $t_{k+1} = t_k + \Delta t$  とする。原点復帰動作速度を  $v$  とし、ノイズが無い場合のゼロクロス時刻を  $t_0$  とすると、ノイズが重畳したゼロクロス点付近でのホール電圧は  $avt_k + V_n$  となる(図 8)。これが 0 以上になるためには  $V_n \geq -avt_k$  であればよく、その確率は

$$F(t_k) = \int_{-avt_k}^{\infty} f(V_n) dV_n = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{avt_k}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) \quad (4)$$

である。ここで、 $\operatorname{erfc}$  は相補誤差関数である。ある時刻  $t_k$  までにホール電圧が 0 以上になる累積確率を  $\Lambda(t_k)$  とすると、 $\Lambda(t_k) = \Lambda(t_{k-1}) + F(t_k)\{1 - \Lambda(t_{k-1})\}$  という漸化式が得られる。 $k < 0$  において  $F(t_k)$  が十分に 0 とみなせる時刻  $t_k$  を初項とすれば、任意の時刻  $t_k$  での  $\Lambda(t_k)$  が求まる。ある時刻  $t_k$  で初めてホール電圧が 0 以上になる確率は  $\lambda(t_k) = \Lambda(t_k) - \Lambda(t_{k-1})$  であるので、ホール電圧が初めて 0 以上となる時刻  $\tau$  の平均は  $\bar{\tau} = \sum t_k \lambda(t_k)$ 、分散は  $\sigma_\tau^2 = \sum (t_k - \bar{\tau})^2 \lambda(t_k)$  と求められ、原点検出精度(標準偏差)は  $v\sigma_\tau$  と見積もられる。具体例として、サンプリング周波数を 15.625 kHz、 $\alpha = 39$  mV/mm、 $v = 0.1$  mm/s、 $\sigma_n = 0.1$  mV とすると、確率分布  $\lambda(t_k)$  は図 9 のようになり、原点検出精度  $v\sigma_\tau$  は  $1 \mu\text{m}_{\text{rms}}$  となることが分かる。

このように、設計パラメータやノイズが原点検出精度に与える影響を定量的に見積もりながら詳細設計を進めている。なお、AD 変換器によるサンプリングや、AD 変換器のオフセット電圧の温度ドリフト、無磁場時のホール素子の不平衡電圧の変動も原点検出精度を悪化させるため、これらも考慮する必要がある。

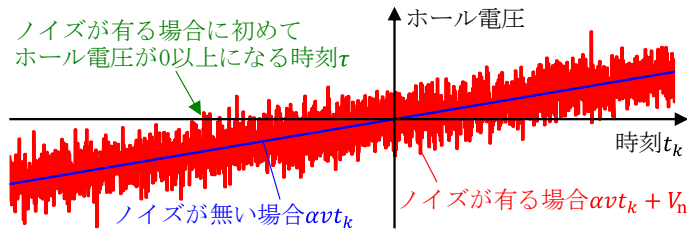


図 8. ノイズが有る場合のホール電圧

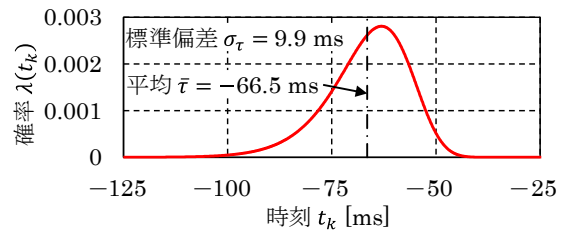


図 9. 確率分布  $\lambda(t_k)$  の一例

#### 5. 温度サイクル試験

前述のとおり、ホール素子の耐久性が懸念されたため、8 個のホール素子 HG-106A で温度サイクル試験を行った。本試験では、ホール素子をクライオスタットに入れ、室温から液体窒素温度への冷却とその逆の昇温を 10 回繰り返し、各サイクルの室温(293~295K)と液体窒素温度(81~83K)それぞれでゼロクロス波形を測定した。1 回の冷却時間は約 30 分、温度変化率は最大で 780 K/h であった。磁石として二六製作所 KE125(サマコバ  $\phi 3 \times 3$ 、YKG28)を 1 個だけ使い、試験装置内の円盤外周に周方向と磁化方向が一致するよう設置した。この円盤の回転軸から磁石外側までは 49.5 mm で、ステッピングモーターにより角速度 1.0 deg/s で回転させて波形を測定した。ホール素子は図 6 のように 2 個を 1 つの基板に実装し、各基板に番号 a~d を割り当てた。また、各基板の上側のホール素子を a1~d1、下側を a2~d2 と名付けた。基板は円盤の外側に沿うように設置し、磁石・ホール素子間の径方向のギャップ  $g$  は室温で 0.30~0.47 mm であった。ホール素子は定電流電源 Lakeshore 121 で 10 mA 駆動し、ホール電圧を NI USB-6008 で計測した。

測定した波形から不平衡電圧を除去し、ゼロクロス点での傾き $\alpha$ を求めたところ、各サイクルの室温と液体窒素温度それぞれにおいて図 10 のようになった。原点位置精度に影響が出るほど傾きは変化しなかったため、IRIS 撮像部での用途に耐えられるだろうと今のところ判断している。

測定した波形から抽出したノイズ電圧を図 11 に示す。NI USB-6008 のシステムノイズ仕様は  $0.5 \text{ mV}_{\text{rms}}$  で、a2 以外で観測されたノイズはどちらの温度でもほぼ同レベルで、有意な変化はなかった。しかし、a2 は室温で最初  $1.06 \text{ mV}_{\text{rms}}$  で、サイクル毎にノイズが漸減し、最後には  $0.86 \text{ mV}_{\text{rms}}$  となった。これより、少なくともノイズの点で個体差があることが分かるため、駆動機構製作時にはホール素子だけの冷却試験を行い、特性の良いものだけ駆動機構に組み込むようにしたいと考えている。

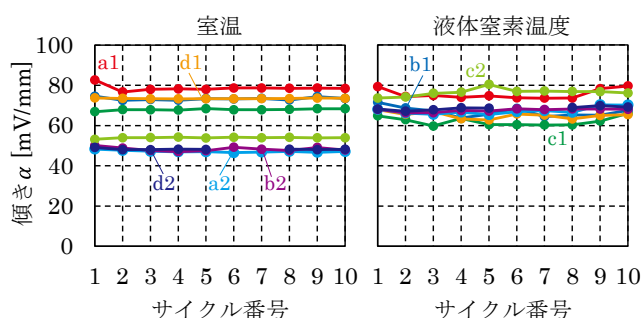


図 10. 温度サイクル試験で求めた傾き $\alpha$

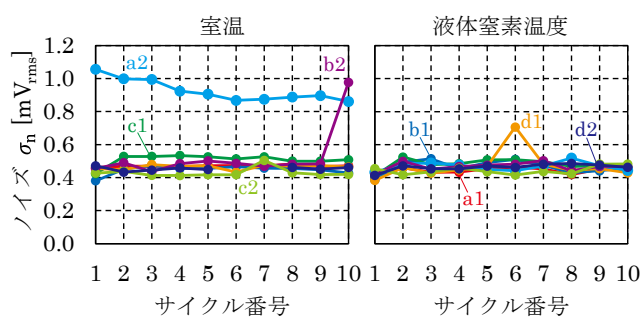


図 11. 温度サイクル試験で測定したノイズ

測定した波形から抽出した不平衡電圧(無磁場時のホール電圧)を図 12 に示す。室温ではほとんど変化がないが、液体窒素温度ではサイクル間で  $\text{mV}$  オーダーの変化があった。図 7 で傾き $\alpha$ が  $55 \text{ mV/mm}$  以下であることと比べると、大きな変化である。このため、IRIS 運用時には毎冷却過程後に不平衡電圧を測定し、信号処理で除去する。不平衡電圧が液体窒素温度下でこれほど変化する理由は不明である。無磁場時のホール素子は図 13 のようなブリッジ回路とみなすことができ、製造時の意図しないばらつきにより 4 つの抵抗値のバランスが崩れて不平衡電圧が発生していると考えられる。一般に半導体の抵抗率はキャリア移動度とキャリア密度に依存した温度特性をもつが、冷却時に連続的に不平衡電圧を測定すると図 14 のように不規則に変化し、明確な温度特性は見られなかった。このことから、低温時に発生するホール素子内の応力により、半導体薄膜が機械的に不均一に歪んでいることなどが疑われる。温度サイクルとは無関係に何らかの理由で液体窒素温度下にて不平衡電圧の経時変化がある場合には、ある頻度で不平衡電圧を測定して補正する必要があることから、その必要性を確認する追加試験を行うことを検討中である。

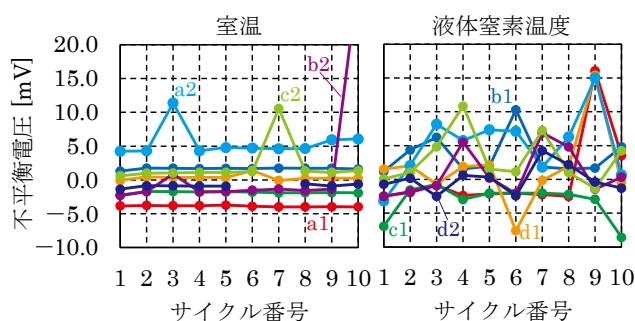


図 12. 温度サイクル試験での不平衡電圧

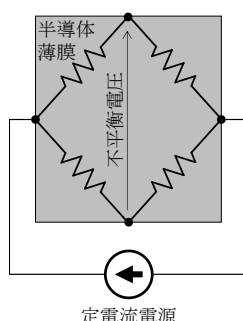


図 13.ブリッジ回路

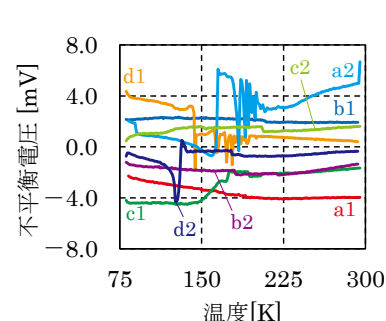


図 14.不平衡電圧の温度依存性

## 6. 参考文献

1. Fumihiro Uraguchi et al., The Infrared Imaging Spectrograph (IRIS) for TMT: prototyping of cryogenic compatible stage for the imager, Proc. SPIE 9908, 9908A8 (9 Aug 2016).
2. 小俣孝司「IRIS/MOIRCS のホールセンサの開発」、第 39 回天文学に関する技術シンポジウム 2019
3. 宮沢久雄「ディジタル・ガウス・メーター (II) 超伝導磁石用装置」、固体物理 Vol.8(1973) No. 12