

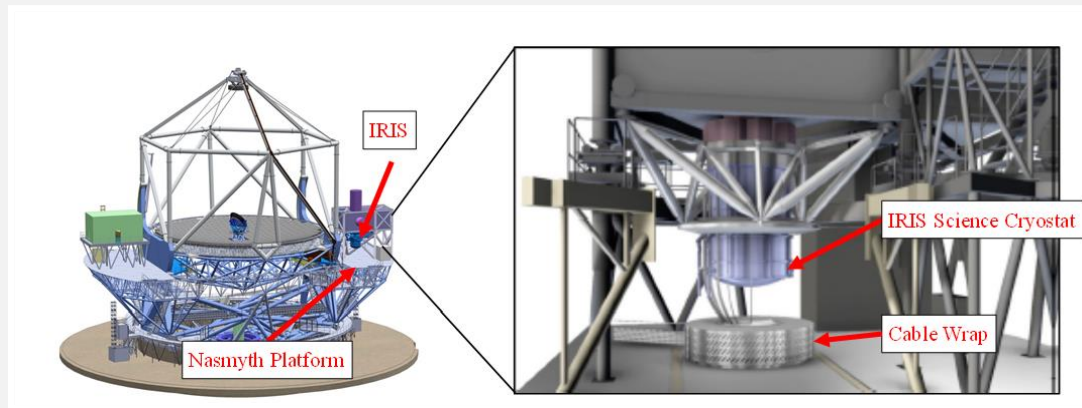
IRIS 撮像系の駆動機構のホール素子による原点出し・位置検出の検討その2

2024/1/18 技術シンポジウム

国立天文台 先端技術センター

小俣 孝司

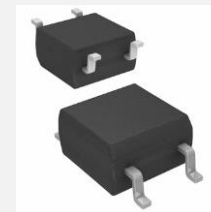
IRISの駆動系



- TMTの第一期観測装置
- 国際協力(米・加・日)
- 日本(国立天文台)は撮像系を担当
- 光学機器の駆動には真空モーターを使用
(Phytron社製VSSシリーズ)
- 位置決めにはホール素子を使用
(Asahi Kasei Microdevices社製HG-I06A)



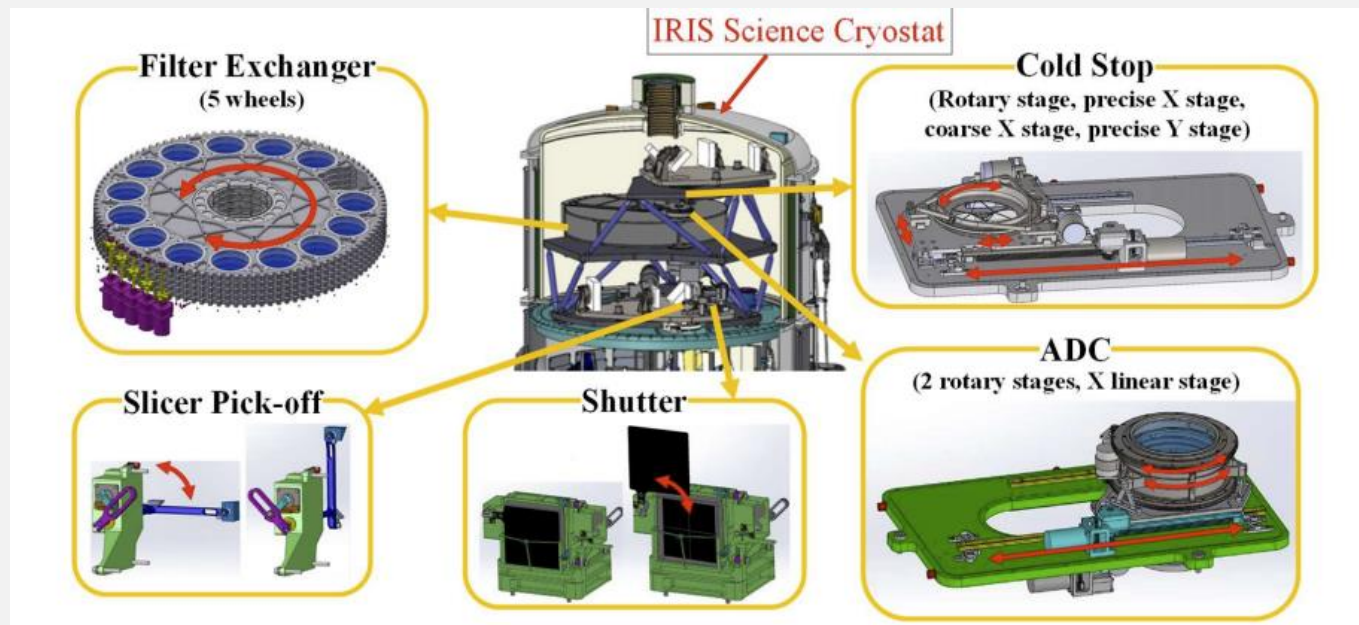
出典:Phytron



出典:Digi Key

ホール素子の使用場所

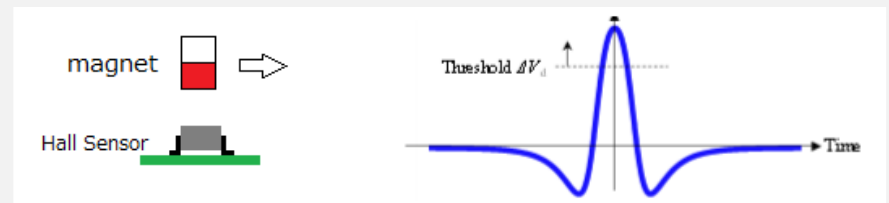
- ホール素子の使用箇所(計18箇所)
 - Cold Stop: 5
 - ADC: 4
 - Filter Exchanger: 5
 - Slicer Pick-off: 2
 - Shutter: 2



ホール電圧読み出し方法

- 正対

- 利点：静止状態での位置検出ができる
- 欠点：ピークの高さで検出位置が移動
- →精度のいらない所に使用



- ゼロクロス

- 利点：ピークの高さによらない検出位置
- 欠点：静止状態での位置検出が出来ない
- →原点出しにumオーダーの精度が必要な所に使用



- ※今回はゼロクロス方式での位置精度に与える各種因子(例: ノイズ)を実験を通じて調査した

目的

- 前回までの発表では正規分布に従うノイズによる原点検出誤差の見積もり方法が示された
- ホール素子の温度サイクル試験も行われノイズの個体差や冷却サイクルの繰り返しで変動する不平衡電圧が精度に影響することが懸念された
- 今回はこれに続きcRIOを使用したホール電圧読取機器のプロトタイプを行った
- ここでcRIOの性能評価、および不平衡電圧を含む個々の電圧誤差要因の定量的な調査を行った

COMPACT RIO (CRIO)について

- ホール電圧の出力範囲は数 mVと非常に微小である
- すばるの赤外観測装置MOIRCSではホール電圧をアンプで増幅し、ハードウェア回路で位置決め信号を出力していた
- IRISではホール電圧出力範囲に対し十分な分解能を持つADCにより読み取った信号を制御コンピュータで処理し、位置決め信号を出力する
- 今回のプロトタイプではNI社製CompactRIO(cRIO-9053)を使用
 - ADC/IOモジュール増設可
(IRIS撮像系でのホール電圧入力18 CH, デジタル出力25 CHに対応)
 - FPGA上でデジタル信号処理(フィルタ)が可能
 - RTコンピュータで上位との通信・内部ストレージに記録
 - 全てLabVIEWでプログラム可能
 - 標高5000 mまで使用可能



CRIOが使えるか検証(ソフトウェア)

- FPGA上でLabVIEWプログラムを作成し必要な機能を実装した
- ただしFPGAのリソース量はホール素子チャンネル数を増やすと不足することが分かり、上位機種を導入することにした

NI-MAXでの読み取り

FPGAプログラムでの読み取り

FPGAリソース調査

データ取得時のADCチャンネル同定法

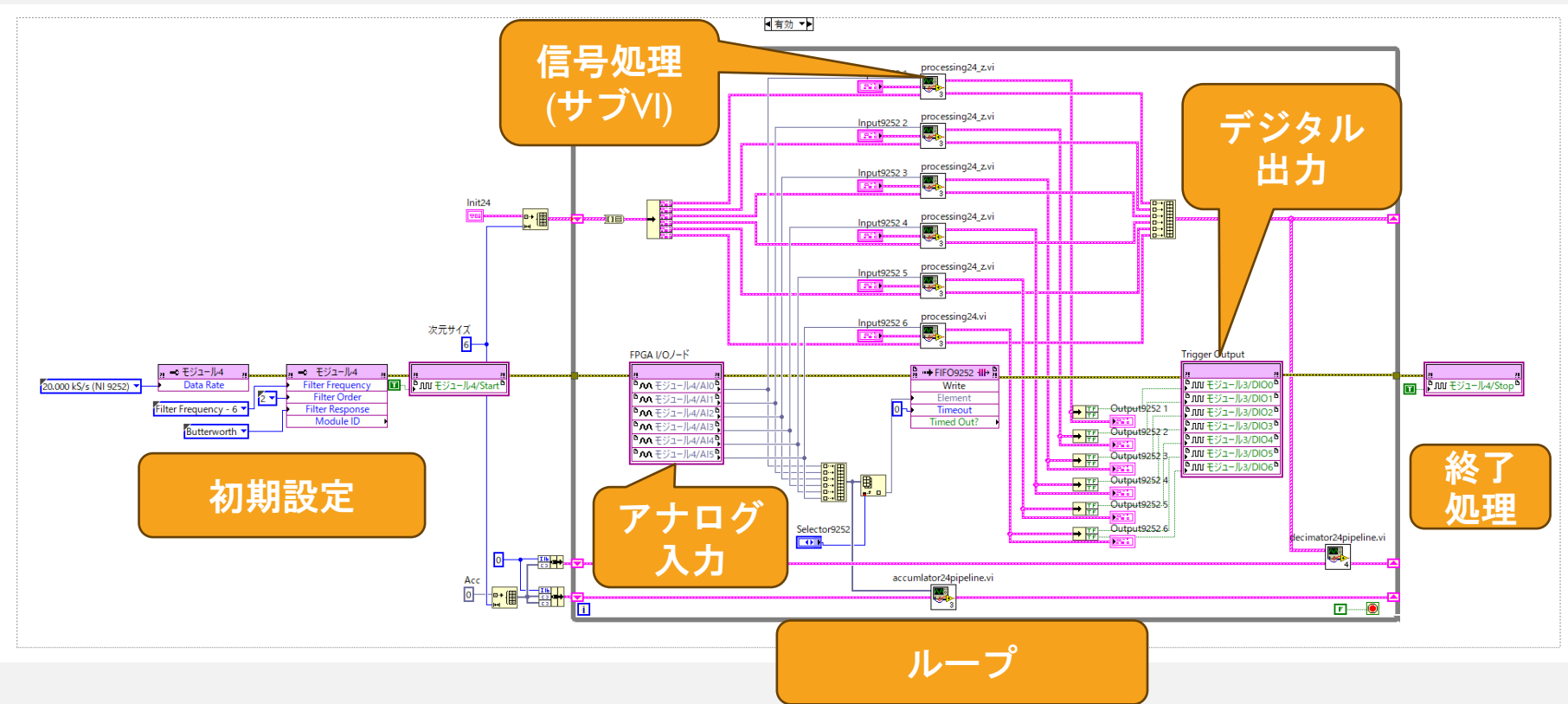
cRIOのスタンドアロン動作実証*

cRIOのスタンドアロン動作中のLabVIEWとの接続実証*

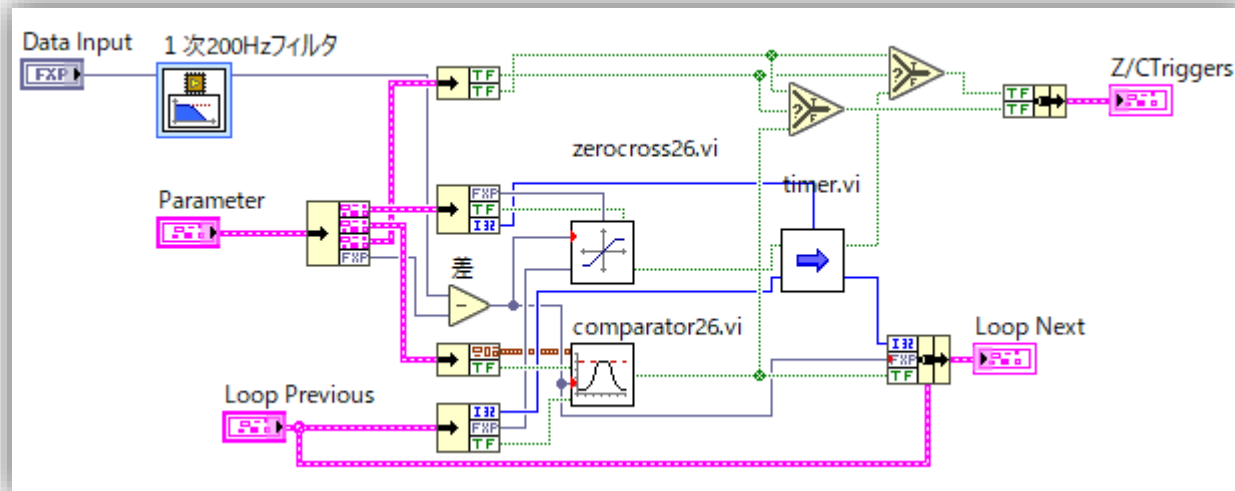
PTPによるタイムスタンプ付与の実装実証*

FPGA内部のプログラム

NI-9252からの信号読み出しとゼロクロスによる
トリガー出力のプログラム(LabVIEWのVI)



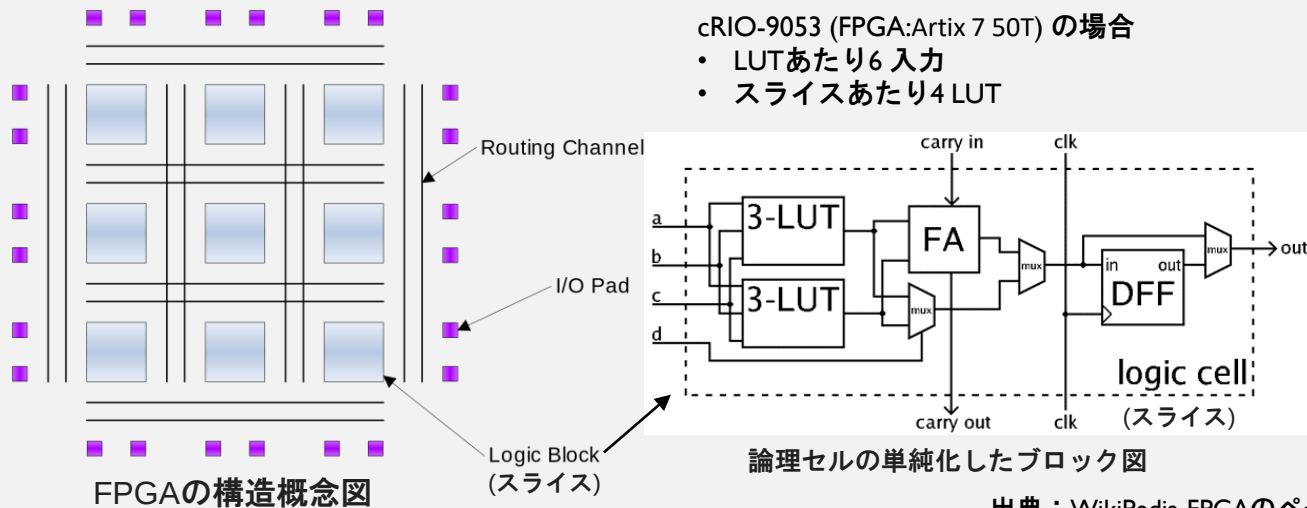
FPGA内部のプログラム(サブVI)



機能

- 信号フィルタ (1次 200 Hzフィルタ)
- ゼロクロス判定 (Zerocross)
- 閾値判定 (Comparator)
- トリガー継続時間設定 (Timer)

FPGAのプログラムと必要リソース



入出力チャンネル数とプログラムによるリソースの量

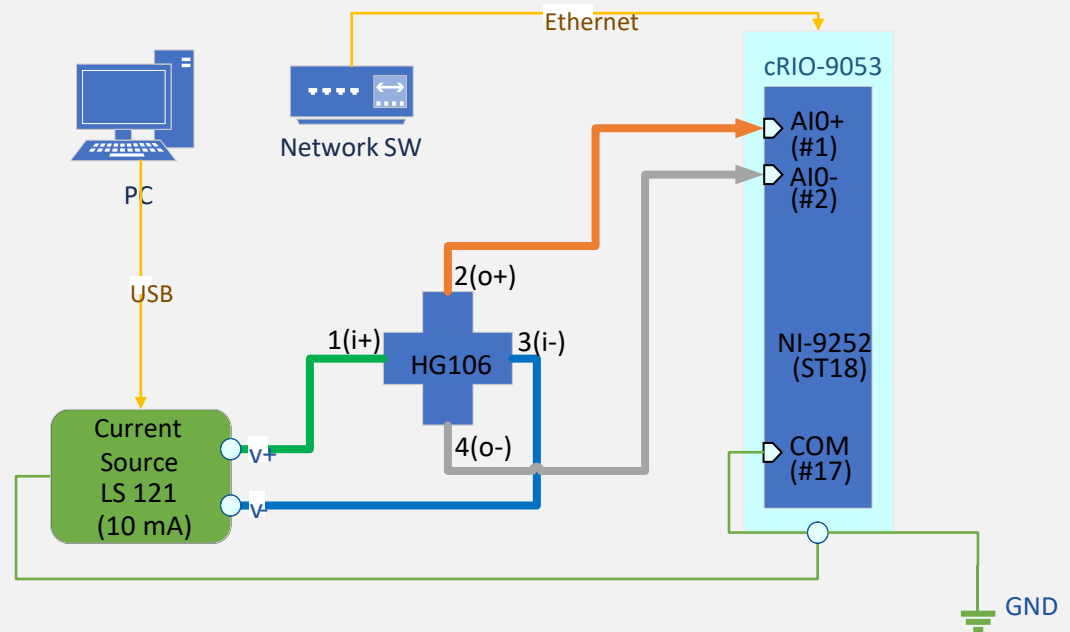
Version	Input CH	Output CH	Total Slice	Slice Regis	Slice LUT	Block RAM	DSP 48s	Description
i15c	2	4	5322	15663	14310	13	11	NI9205とNI9252両方2ch(合計4ch)
i15d	6	12	6509	20250	18470	13	27	両方3ch(合計6ch)
i15e	12	14	7511	22760	21253	13	22	両方6ch(合計12ch)
i15f_10	18	15	8128	29236	26897	13	75	NI9205は12ch, NI9252は6ch
cRIO9053	18	24	8150	65200	32600	75	120	最終仕様値

※cRIO-9054(上位機種) Total Slice: 15850 を使用予定

NI-9252によるホール電圧の計測

NI-9252にはプログラマブルフィルターが搭載されている。
以下の設定で室温でのホール電圧のノイズを調べた。

- 設定
 - サンプリングレート: 20 kS/s
 - フィルタ: バターワース
 - 次数: 2
 - カット周波数: 125 Hz
 - 入力電流: 10 mA
 - データ取得時間: 800 ms



ホール電圧読取機器の仕様

- ADC (NI-9252) の仕様

- 測定範囲： $\pm 10\text{V}$
- 解像度：24 bit
- サンプリングレート：最大50 kS/s
(実験では20 kS/sを使用)
- 接続：8 CH 差動入力



- ホール素子 (HG-106A) の仕様

- 定格電圧：8V
- 動作温度： $-40 \sim +125\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 入力抵抗：450 ~ 750 Ω
- 出力抵抗：1000 ~ 2000 Ω
- 感度：1.5 ~ 1.9 V/T
- 出力電圧温度係数：最大0.06 %/C



- 定電流源 (Lakeshore Model 121) の仕様

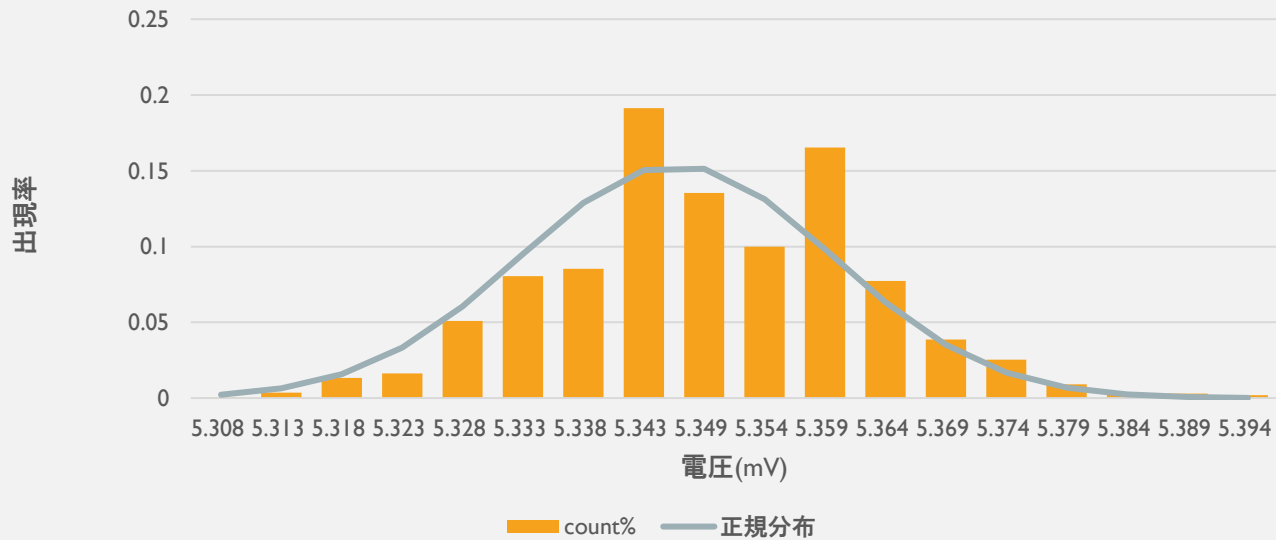
- 出力電流：最大 100 mA
(実験では10 mAで使用)
- コンプライアンス電圧： $\pm 11\text{V}$



NI-9252によるホール電圧の計測

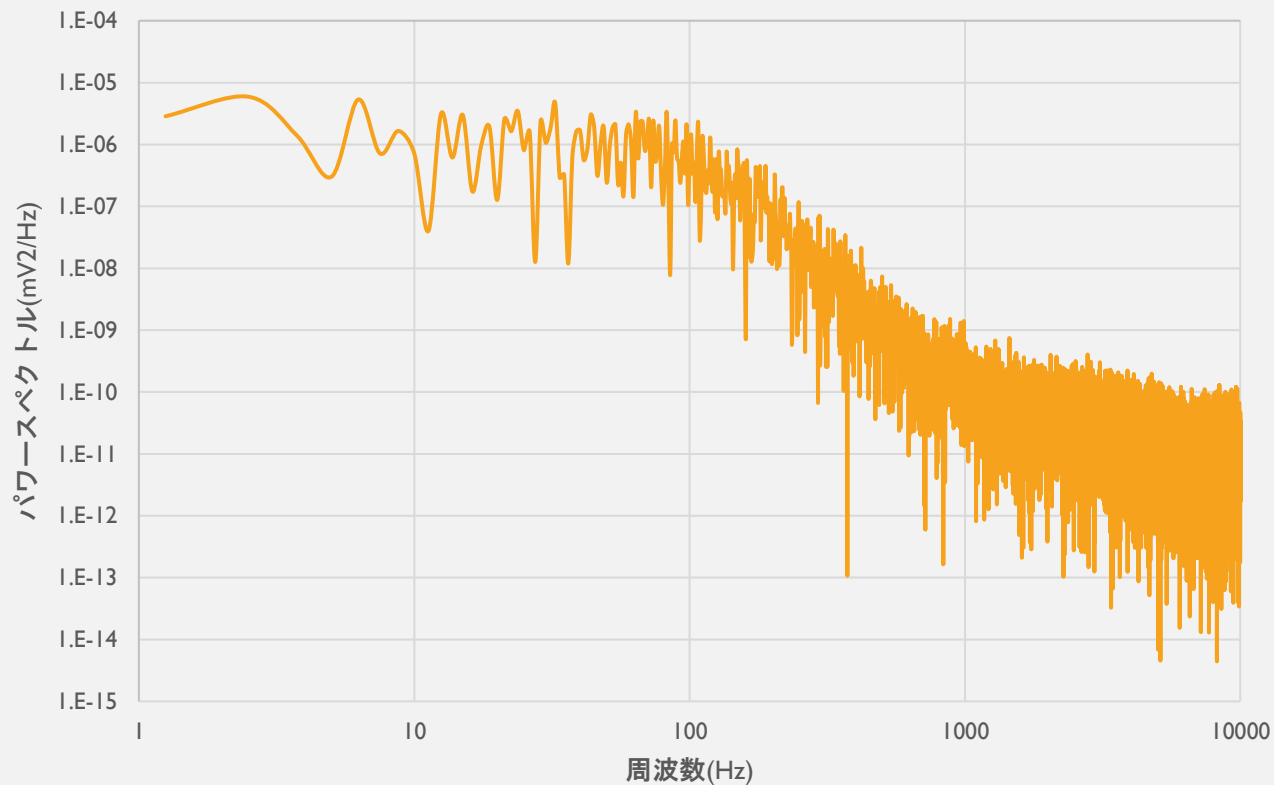
電圧ノイズ

- サンプル数：16000
- 標準偏差：13 μV
- 電圧ノイズバジェット66.3 μV_{rms} に対して十分に小さい



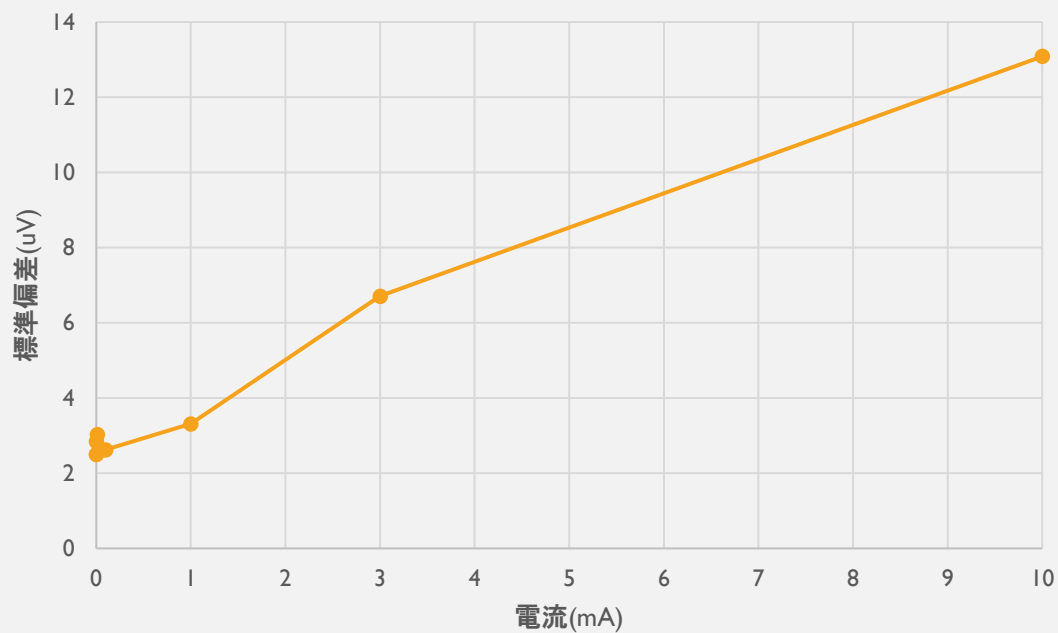
NI-9252によるホール電圧の計測

パワースペクトル密度において懸念された商用電源
50 Hzの周波数成分は見られなかった



NI-9252によるホール電圧の計測

ホール素子入力電流に比例してノイズが増大しており、1 mA以上では入力電流によるノイズが支配的となる。定電流源のスイッチングノイズが原因の一つと考えられる。



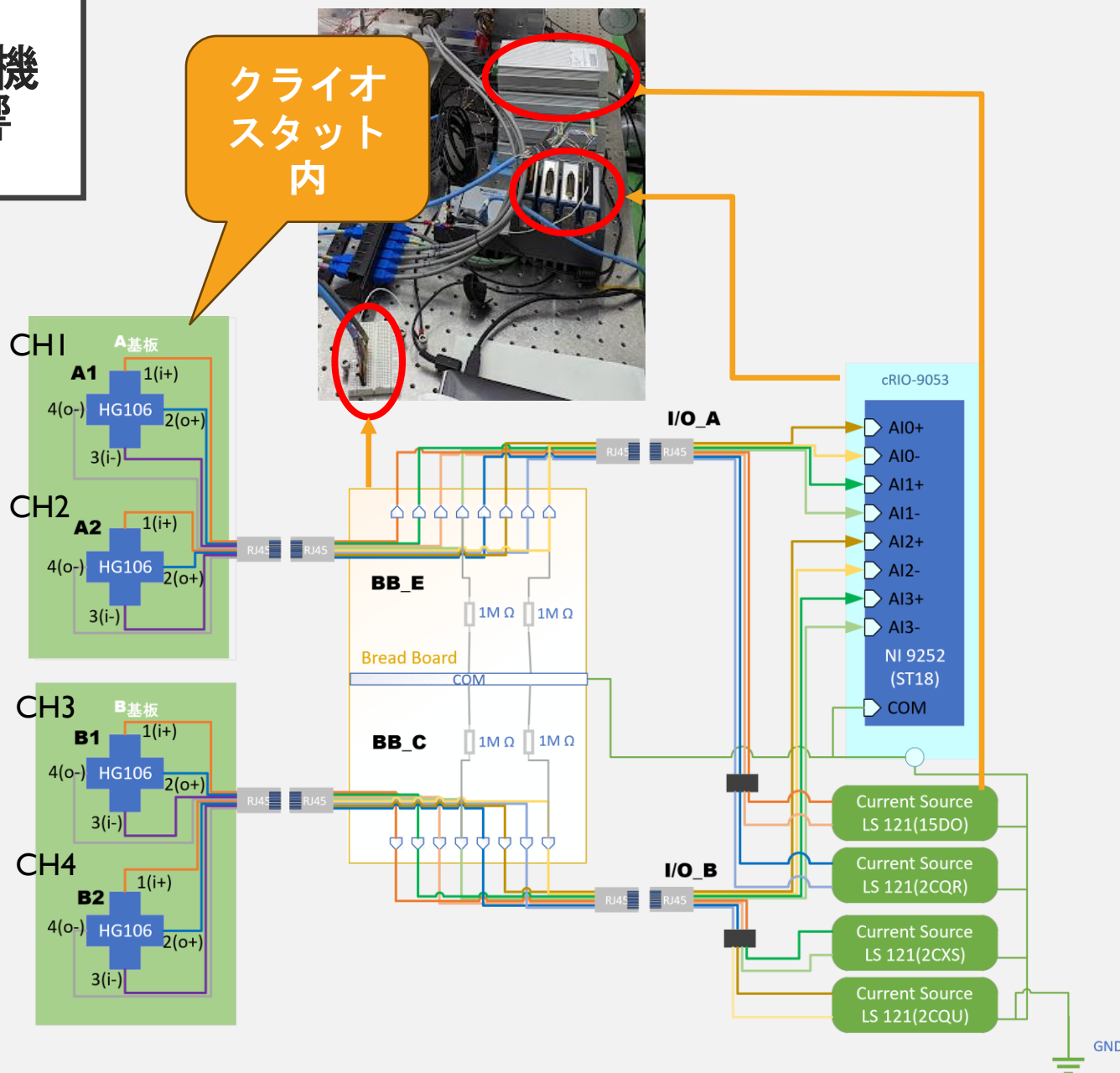
ホール素子の周辺磁気

- 地磁気の水平成分はマウナケア山頂で 27.5 μT ※
- 方角に対する姿勢の変化は最大104.5 μV の差を生む
(27.5 μT $\times$ 1.9 V/T = 52.25 μV 南北の差はこの倍)
- これは原点検出エラーバジェット100 μV に対して無視できない
- さらに実験環境では周辺に磁気を帯びた物体が存在する
(建物などで地磁気と同レベルの影響)
- TMTも磁気を帯びた構造物に囲まれており原点出しのときは、
装置の姿勢を一定にする必要がある。

※NOAAによるシミュレーション

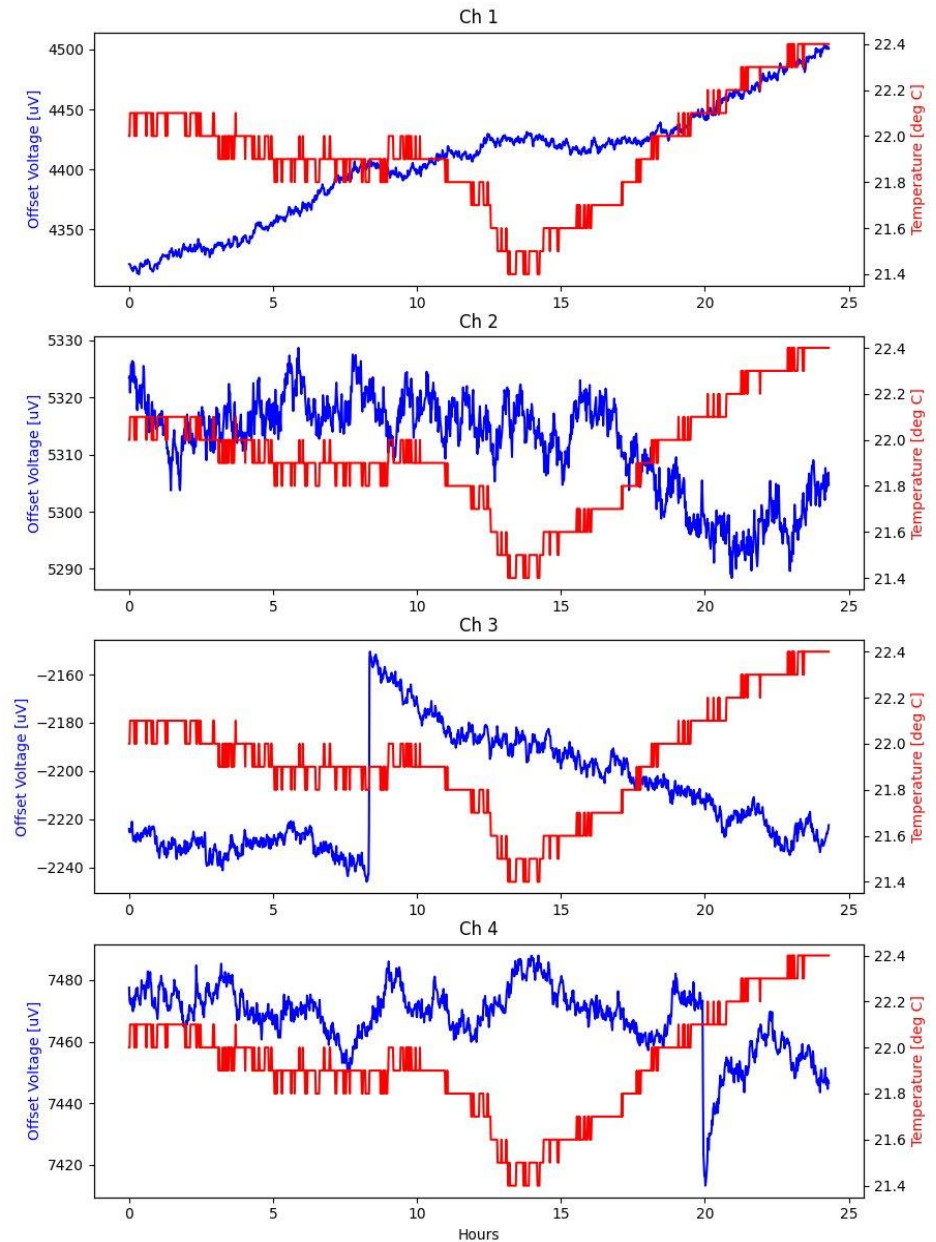
定電流源や周辺機器の環境の影響

- 定電流源や周辺機器の環境の影響（温度と磁場）を確認
- ホール素子の温度依存性と磁場の影響を取り除くため、ホール素子を冷却環境下(77 K)に置く
- 長期に渡る温度測定（前回報告では温度サイクルでの変化を見たことに対して継続的な変化を見る）
- 1秒に一回 0.1 秒間 20 kS/sでサンプリングを行い平均値をログに記録
- さらに60 秒ごとに平均して長期的な変動を見た



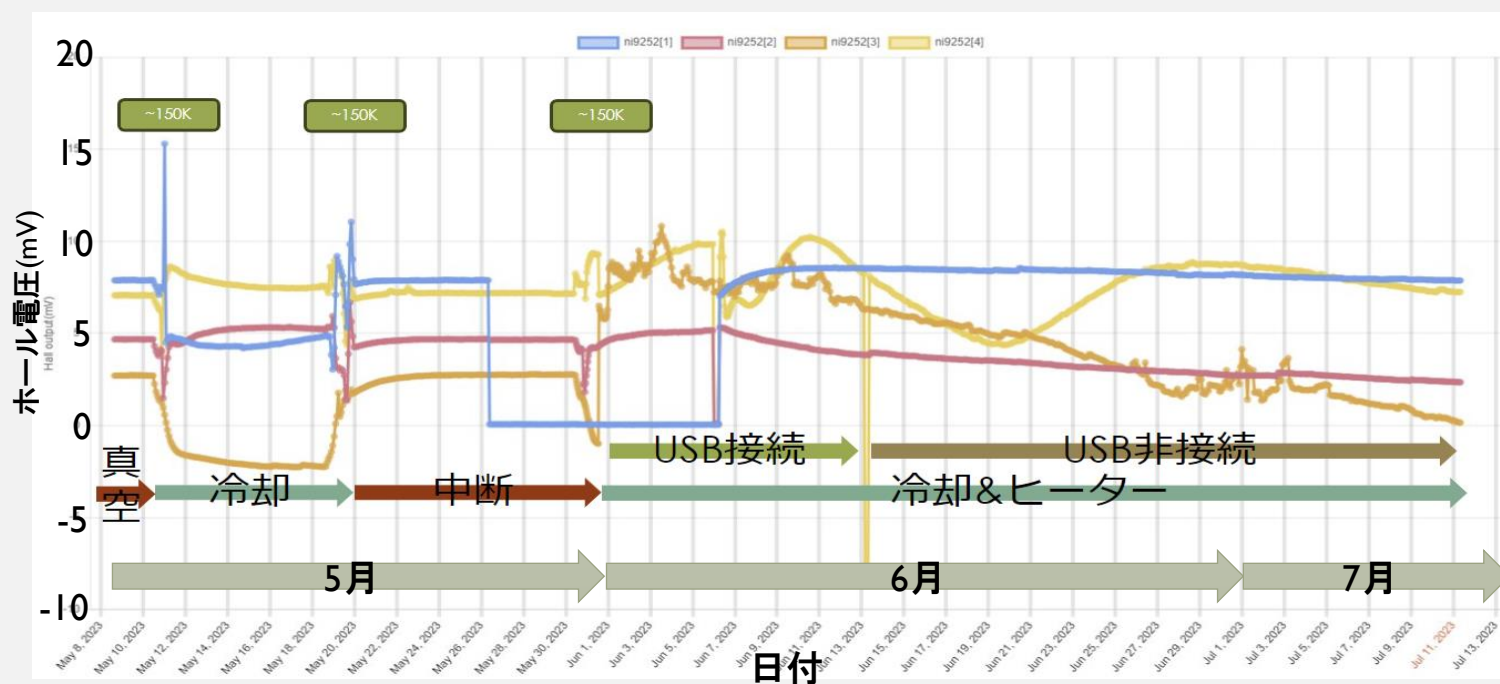
定電流源や周辺機器 の温度の影響

- ホール素子が低温状態での温度と電圧の時系列グラフを得た
- ホール電圧に大きな変動は見られるが、室温との明確な相関が認められず、室温の影響は無視できる



液体窒素温度でのホール電圧安定性

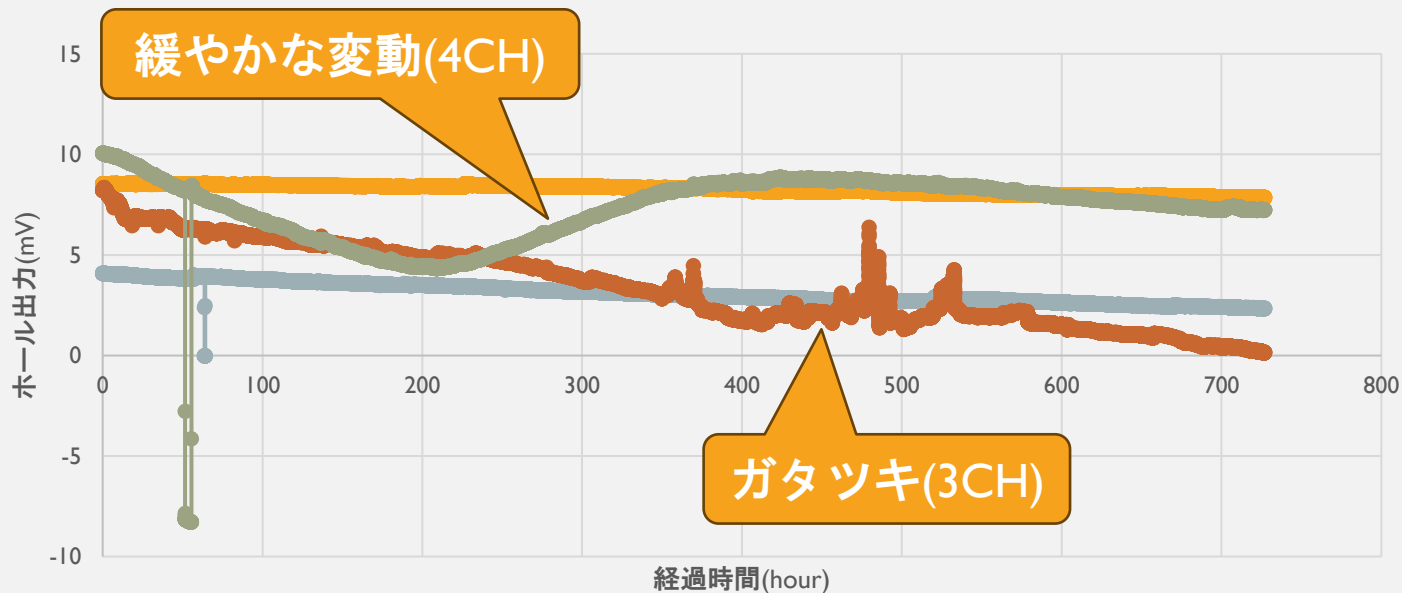
- 数か月にわたる長期計測を行ってホール電圧の波形を取得
- ホール素子の温度は一定(77 K付近)
- 同じ環境である4つのホール素子はそれぞれ異なった電圧波形を描いた
- 特に液体窒素温度への冷却後は波形に顕著な違いが表れた



オフセット電圧変動の原因調査

液体窒素温度でのホール電圧はバジェットに対して無視できない変動があり以下の様な現象が見られた

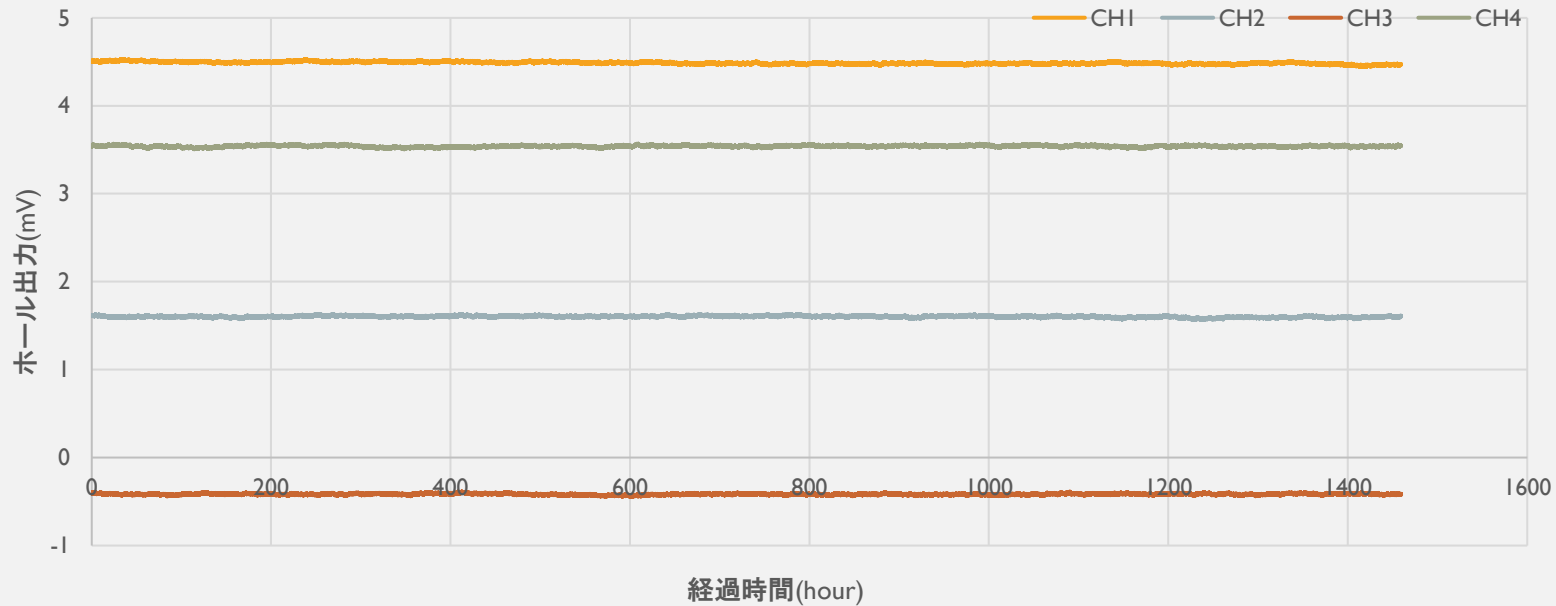
- 特定のチャンネルの週単位での緩やかな変動
- 週に一度程度のエラーバジェットを超えるステップ変動



冷却時のオフセット電圧カーブ

オフセット電圧変動の原因調査

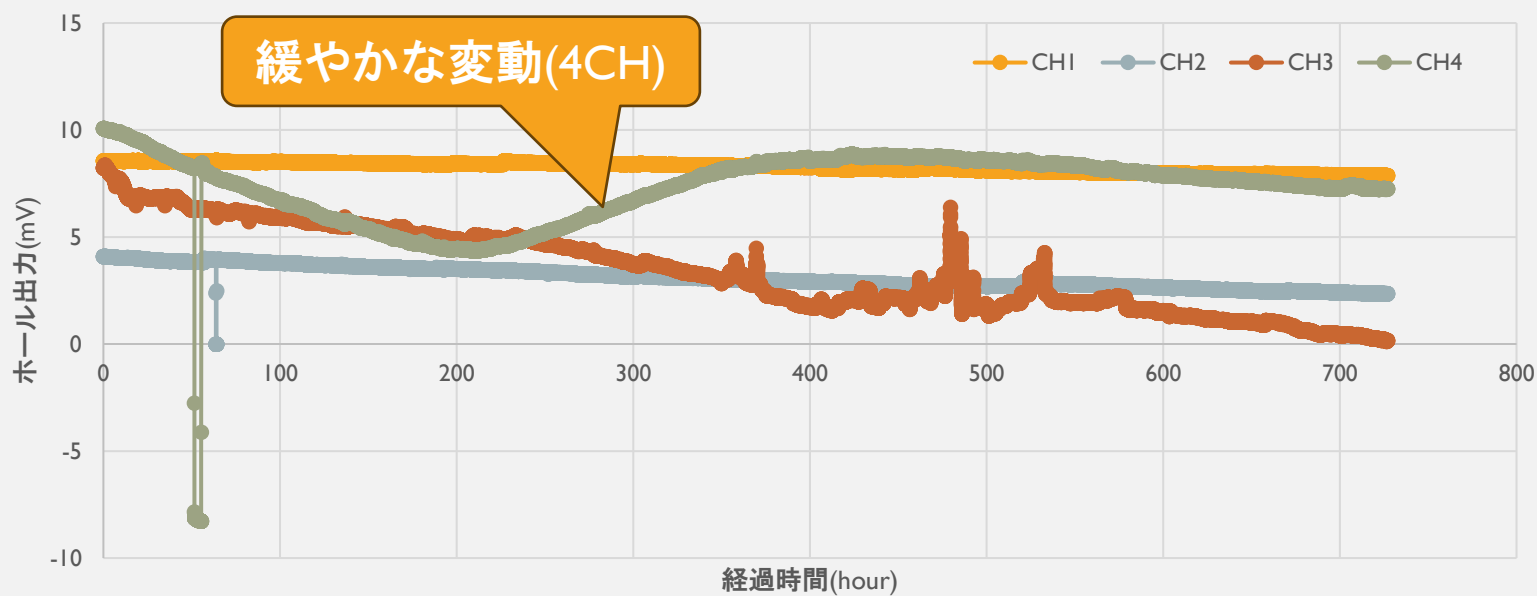
ちなみに冷却試験後 2 ヶ月に渡って計測された常温真空での各ホール素子のオフセット電圧は最大86 μV の変動しかなくエラーバジェットにも満たなかった。したがってバジェットに対して無視できないホール電圧の変動は液体窒素温度下でのホール素子特有の挙動であるといえる。



常温真空時のオフセット電圧カーブ

オフセット電圧変動の原因調査 (週単位でのゆるやかな変動)

ホール素子のオフセット電圧は 30 日間の計測で 10 mV 近い振幅を伴う素子(4CH)がある一方、最も変動の少ない 1CH のホール素子でも 30 日間で 0.7 mV の変動があり、どれもエラーバジェット 100 μV_{rms} に対し無視できない値である。
対策として原点出し直前にゼロ磁場補正をする。

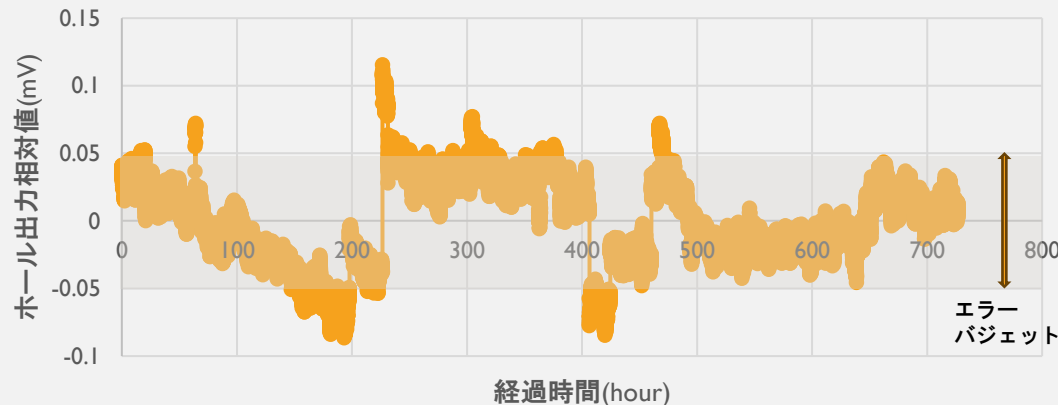


オフセット電圧変動の原因調査 (ステップ変動)

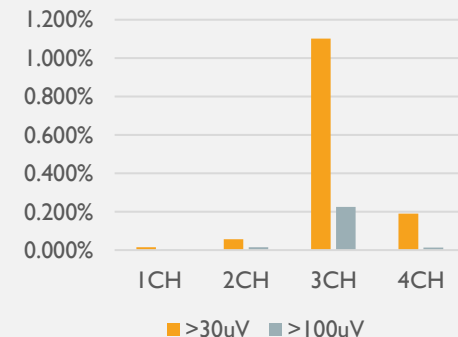
- 全てのホール素子において1分間でエラーバジェットに対して無視できないステップ変動(100 μ Vを超える変動、以降大ステップ変動と呼ぶ)が見られ、その頻度はホール素子によって異なった
- 頻度が0.22%(週に22回以上)を超えるホール素子もあるが、他の3個は頻度が0.016%(週2回)以下なので、原点出しの頻度を1日1回 $\times$ 運用期間20年と仮定すれば、運用期間中に精度を満たせない回数は

$$365\text{日} \times 20\text{年} \times 0.016\% = 1.17\text{回}$$
 であり許容できる

1 CHの3次多項式フィッティング関数との差



ステップ頻度



	1CH	2CH	3CH	4CH
>30 μ V	0.016%	0.056%	1.101%	0.190%
>100 μ V	0.002%	0.016%	0.226%	0.014%

オフセット電圧変動の原因調査 (ステップ変動)

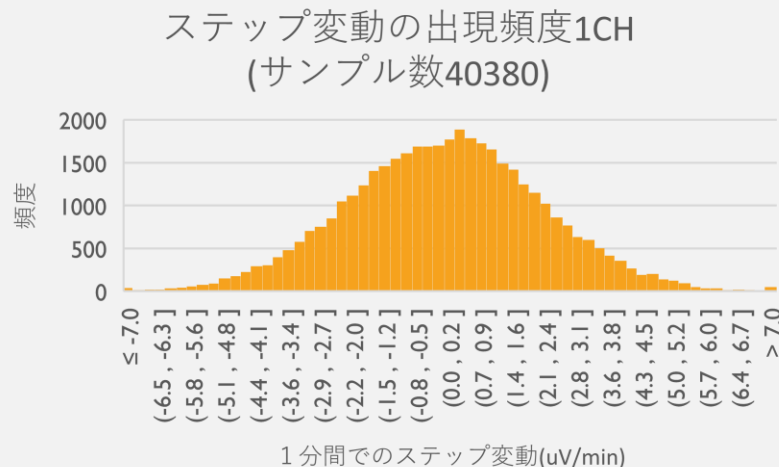
- ホール素子の選定には最低 1 回は大ステップ変動が見込まれる期間の冷却試験が必要である。
- 0.016%の出現率での大ステップ変動を95%の確率で検出できる期間計測し、その間に大ステップ変動がなければ、そのホール素子は採用基準を満たすことにする
- 1 分間あたりの出現率Pの事象をN回(分間)計測を行い、1 回でも大ステップを観測する確率がQ以上となるような最小の試行回数は以下の式を満たす
 - $1 - (1 - P)^N \geq Q \quad (0 < P, Q < 1) \rightarrow N \geq \frac{\log(1-Q)}{\log(1-P)}$
 - $P=0.016\%, Q=95\%$ とすると $N \geq \frac{\log(1-95\%)}{\log(1-0.016\%)} = 18721.829$
 - Nは18722回(分)以上 ～ 13日

よって13日間の冷却下でのホール電圧計測で1分間あたり100 μVを超えるステップが存在しなければ95%の確率で採用基準を満たしている

オフセット電圧変動の原因調査 (ステップ変動)

ステップ変動の幅は実際は下のグラフのように滑らかな確率分布を持っている。ただし大ステップ(100 μV 以上)は正規分布に沿った頻度より非常に高い確率で起こっている。
大ステップは偶然誤差によらない変動であり、標準偏差により出現頻度を算出することはできない。

よってステップ変動の標準偏差によりホール素子の選定をすることはできない。



標準偏差と大ステップ頻度

ステップ変動	1CH	2CH	3CH	4CH
平均($\mu\text{V}/\text{min}$)	-0.015	-0.036	-0.138	-0.011
標準偏差($\mu\text{V}/\text{min}$)	2.356	2.600	14.642	4.272
100 μV は何 σ	42.4	38.5	6.83	23.4
100 μV 上側累積確率	3.9E-393	1.4E-324	4.2E-12	2.1E-121
100 μV 出現頻度	2.3E-05	1.6E-04	2.3E-03	1.4E-04

運用法の提案

- 緩やかなオフセットの変動があるものの、1分単位ではエラーバジェット 100 μV_{rms} を下回る変動であり位置精度への影響は無視できる。
- 原点出しは1分以内に終わる
- 原点出し直前に基準電圧（ゼロクロスの0 Vレベル）を計測すること。

まとめ

- ホール素子読み取りのプロトタイプを行った
- cRIO-9053による制御ソフトウェアの実装を行った
- 本番で必要なチャンネル数ではリソース消費量に余裕が無いので上位機種(cRIO-9054)に変更する
- ホール電圧のノイズは電圧ノイズバジェット以内である
- 周辺磁気の影響を避けるため望遠鏡およびIRISが静止状態の時に原点出しを行う。
- 1週間以上に渡る冷却下でのホール素子変動は無視できないが原点出しに必要な1分程度の時間なら変動は無視できるので、基準電圧は原点出しのたびに行う
- ホール素子の選定は13日連続して液体窒素温度での計測試験を行い、1分間に100 μ V以上のステップが現れないものを選ぶ

エラーバジェット

名称	目標	結果	単位	温度	備考
原点検出	100	-	uVrms		
電圧ノイズ	19.5	13	uVrms	常温	ホール出力
温度ドリフト	66.3	48.1	uVrms	-5 ~ 35 °C	ここでは触れていない
地磁気	-	52.25	uV	常温	シミュレーション結果