かなた望遠鏡 HONIR 用新検出器読み出しシステムのノイズ改善に向けた研究

広島大学　理学部　物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室
B126273　森裕樹
主査：川端弘治　副査：岡本宏己

2016 年 02 月 10 日

概要

かなた望遠鏡に搭載されている観測装置 HONIR では現在、近赤外線検出器読み出しシステムとして名古屋大学で開発された MACS2 が使用されており、読み出し時間は約 5 秒である。本研究室では MACS2 の 4 倍の約 1.2 秒での読み出しが可能な新読み出しシステムの開発を進めてきた。新システムは、実験室系での試験では低ノイズ読み出しを実現しているが、望遠鏡装着時に正常な読み出しが行えないという問題がある。本研究の目的は、望遠鏡装着時に正常な読み出しを行えない原因を調査・改善し、新システムの観測投入を目指すことである。調査の結果、望遠鏡周りの電源には最大 3V のノイズが乗っており、読み出し不調の原因はこのノイズによりグラウンドが不安定になることで生じる PC と新システム間の通信障害であった。電源の供給法を工夫することで PC と新システムのグラウンドを一致させ通信障害を解消することで、望遠鏡装着時でも読み出しが可能になった。読み出しが可能になったことで新たに見えてきたノイズが 3 つある。1 つは実験室系でも現れていた許容範囲(～30e^-)のノイズ。1 つはプログラムによって補正が可能な緩やかなノイズ(100～150e^-)。そしてもう 1 つは、新システムの回路もしくは検出器由来と思われる、今後調査予定のノイズである。最後に挙げたノイズを改善することでノイズ値は許容範囲に収まることから、新システムの観測投入の目途が立ったといえる。

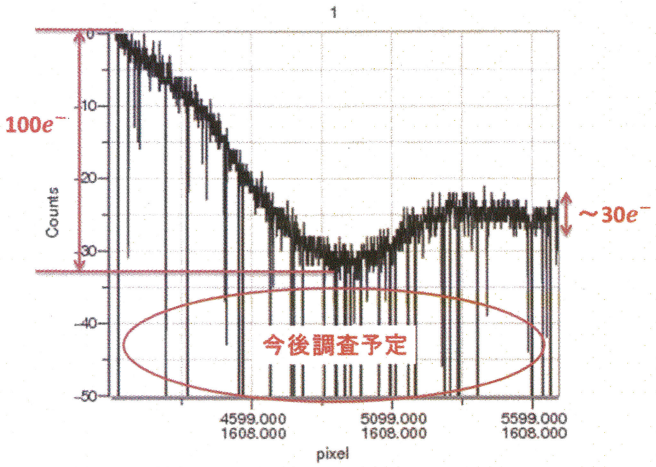


図. 望遠鏡装着時に読み出しが可能になったことで新たに見えてきた 3 つのノイズ。

目次

1 序論 10

1.1 東広島天文台とかなた望遠鏡 10

1.1.1 概要 10

1.1.2 かなた望遠鏡の観測装置 10

1.2 可視赤外線同時カメラ HONIR 12

1.2.1 HONIR の仕様と構成 12

1.2.2 HONIR でのサイエンス 13

1.3 HONIR の近赤外線検出器読み出しシステム 17

1.3.1 現読み出しシステム 17

1.3.2 現読み出しシステムの問題点 19

1.3.3 新読み出しシステム 20

1.3.4 新読み出しシステムの問題点 26

1.4 本研究の目的 27

2 測定と結果 28

2.1 ノイズの測定法と読み出しカウント 28

2.1.1 読み出しノイズ測定法 28

2.1.2 オシロスコープを用いたノイズ測定法 30

2.1.3 カウントの仕組み 30

2.2 実験室でのノイズ調査 31

2.2.1 冷却 VIRGO の読み出しノイズ 31

2.2.2 常温マルチプレクサの読み出しノイズ 32

2.2.3 読み出しボード単体の読み出しノイズ 33

2.2.4 外来由来のノイズ 34

2.2.5 実験室でのノイズ調査まとめ 36
2.3 観測室（ドーム内）でのノイズ調査 36
2.3.1 外来由来のノイズ 36
2.3.2 回路上でのノイズ信号 38
2.3.3 ノイズ源の特定 39
2.3.4 ノイズ侵入経路の特定 42
3 ノイズ対策とその考察 44
3.1 ノイズ信号の特徴まとめ 44
3.2 AC 電源用高周波ノイズカットフィルタ 44
3.3 AC 電源の接地線に関する対策 45
3.3.1 TEXIO 電源 2 端子コンセント 45
3.3.2 アースありノイズカットフィルタ 46
3.3.3 アースなしノイズカットフィルタ 47
3.4 DC 電源への対策 50
3.4.1 バイパスコンデンサ 50
3.4.2 2 次 RC ローパスフィルタ 52
3.5 ノイズ対策のまとめ 53
4 通信障害と reference ピクセル 54
4.1 グラウンドのゆらぎによる通信障害 54
4.2 スクリプトの見直し 55
4.2.1 ドーム内での冷却 VIRGO 読み出し 55
4.2.2 読み出し失敗への対策 56
4.3 読み出しノイズ軽減対策 61
4.3.1 reference ピクセルのゆらぎとその補正 61
4.3.2 reference ピクセルに現れる線状ノイズに関する考察 66

4.3.3 reference ピクセルのゆらぎへの対策 70
5 まとめと今後 72
6 謝辞 74
A 新読み出しシステムの詳細設定 75
A.1 新読み出しシステムの各種設定・性能 75
A.1.1 定電流回路とカレントミラー回路 75
A.1.2 コンバージョンファクタとリニアリティ 75
A.1.3 ADC ボード 77
A.1.4 低温・常温読み出し設定 78
A.2 新読み出しシステムのデータ通信部 79
A.2.1 DIO ボード 79
A.2.2 LVDS ボード 80
A.2.3 IF ボード 80
A.2.4 DRV ボード 81

1 序論

1.1 東広島天文台とかなた望遠鏡

1.1.1 概要

東広島天文台は、東広島市や国立天文台の協力によって 2006 年 3 月に建設された宇宙科学センター付属の施設である。この天文台では、2006 年 4 月に国立天文台から移設された口径 1.5m の赤外シュミレータ (現在の名称は「かなた」) を主力装置として用いており、広島大学から車で約 20 分というアクセスの容易さからほぼ毎晴夜観測が 行われている。東広島天文台が主なターゲットにしているのは、ガンマ線バースト (GRB) などの突発天体の即時観測であるため、かなた望遠鏡の駆動速度は方位速度 5 度/秒、高度速度 2 度/秒と、この規模の望遠鏡では世界最速クラスの動作速度を誇っている。図 1 、表 1 にかなた望遠鏡の写真と仕様をそれぞれ示す。

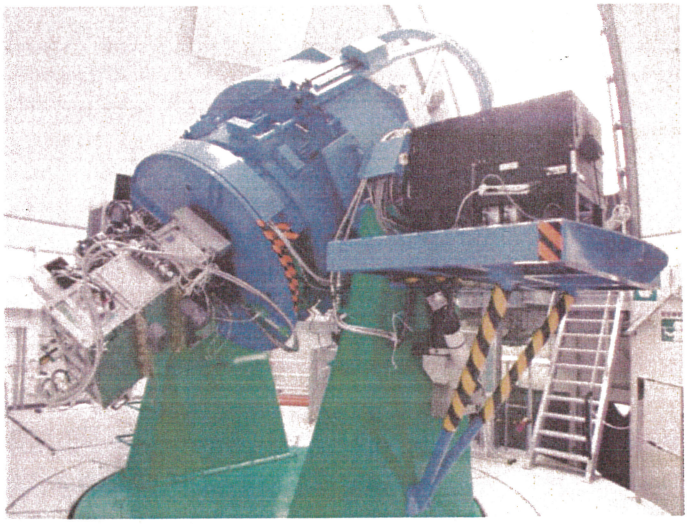


図 1: かなた望遠鏡

1.1.2 かなた望遠鏡の観測装置

かなた望遠鏡にはカセグレン焦点に 1 つ、ナスミス焦点に 2 つの観測装置を取り付けることが可能である。2016 年現在、カセグレン焦点には HONIR、ナスミス焦点には HOWPol と高速分光器がそれぞれ取り

光学系	リッチー・クレティアン光学系
主鏡有効径	1540 mm
主鏡材	ULE（超低膨張ガラス）
合成 F 値	F=12.2
視野	15'
架台	経緯台
総重量	約 17 トン
搭載可能重量	500kg(カセグレン焦点)、1000kg(ナスミス焦点)

表 1: かなた望遠鏡の仕様

付けられている。以下に HOWPol と高速分光器について述べる。HONIR については本研究において重要であるため、次節にて詳しく述べる。

- HOWPol

この装置は、広島大学宇宙科学センターが独自に開発した一露出型広視野偏光撮像装置 (Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter) で、一回の露出で直線偏光パラメータの導出が可能な偏光素子を用いており、広視野撮像、偏光撮像、分光、の 3 つの観測モードを備えている。表 3 に HOWPol の仕様を示す。

- 高速分光器

この装置は、広島大学と京都大学が共同で開発した装置で、高速読み出しが可能な CCD を用いていることで、最高 35.8frame/sec の撮像・分光観測が可能とした、可視光の短時間変動を追うことに特化した観測装置である。表 2 に高速分光器の仕様、図 2 に HOWPol と高速分光器の写真をそれぞれ示す。

波長帯	0.4-1.0 μm
ピクセル数	512×512
ピクセルスケール	0.32" /pix
Frame/s	最高:35.8 frames/s
撮像時間	27.1ms - 10s

表 2: 高速分光器の仕様

波長帯	0.45-1.1 μm
視野	広視野撮像 : 15'×15'
	広視野偏光 : 7'×7'
	狭視野偏光 : 15'×1'
	分光 : 2.3'×15'
フィルター	B,V,R,I,Z

表 3: HOWPol の仕様

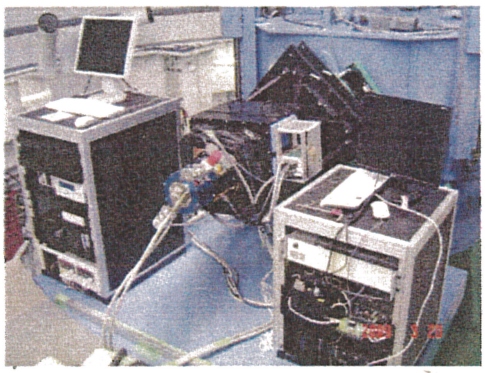
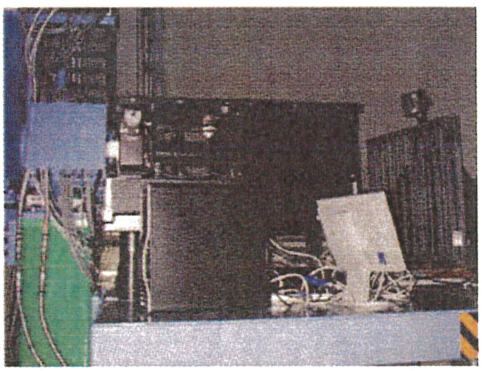



図 2: 左 : HOWPol　右 : 高速分光器

1.2　可視赤外線同時撮像カメラ HONIR

1.2.1　HONIR の仕様と構成

可視赤外線同時撮像カメラ HONIR(Hiroshima Optical and Near-InfraRed camera) は広島大学が 2007 年より開発を行なってきた、可視 CCD1 素子、近赤外検出器 2 素子の計 3 素子による同時撮像 · 偏光撮像 · 分光撮像が可能な装置である。

2016 年現在では可視 1 素子 (浜松ホトニクス社製の完全空乏層型 CCD)、近赤外検出器 1 素子 (Reytheon 社製の VIRGO-2k) の検出器が搭載されており、2 バンドでの同時撮像が可能となっている。図 3 に HONIR の写真、表 4、5 にそれぞれの検出器 の仕様を示す。

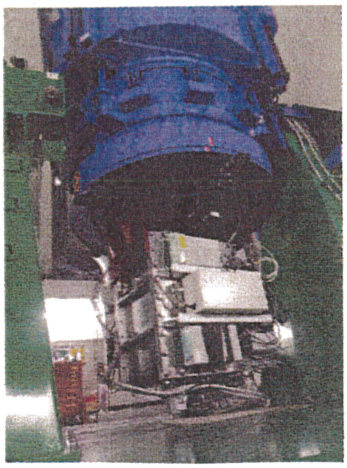


図 3: HONIR

1.2.2 HONIR でのサイエンス

本小節では、HONIR によって観測が期待される主な天体について述べる。

- 太陽系外惑星

太陽系外惑星 (系外惑星) はその名の通り太陽系とは別の星系に存在する惑星である。1995 年に主系列星ペガサス座 51 番星を主星とする 51Pegb で初めて発見され、2016 年現在では 1000 個以上の系外惑星が発見されている。系外惑星を観測することによって地球の過去や未来を知ることができるかもしれない。系外惑星の観測法はいくつがあるが、その中でも代表的なドップラーシフト法とトランジット法について述べていく。

ドップラーシフト法

主星の周りを惑星が公転していると主星も僅かにふらつく。これにより、主星からの光が僅かにドップラーシフトする。この僅かな波長の変化を観測することで軌道長半径や惑星の質量の下限値を求めることができる。図 4 にドップラーシフト法の概略図を示す。

	完全空乏層型 CCD
ピクセル数	2048×4096
ピクセルスケール	0.29”/pix
読み出しノイズ	≤5 electrons rms
転送効率	≥0.999995
暗電流	≤5 electrons/pix/hour
動作適正温度	170K

表 4: 完全空乏層型 CCD の仕様

	VIRGO-2k
ピクセル数	2048×2048
ピクセルスケール	0.29”/pix
読み出しノイズ	5-15 electrons rms
暗電流	≤1electron/s
有感度波長域	0.9-2.5μm
量子効率	≥70%(1-2.4μm)
出力数	4 or 16
操作適正温度	80K

表 5: VIRGO-2k の仕様

トランジット法

この手法は系外惑星が主星を掩蔽するときに起こる主星のわずかな減光を検出することで系外惑星を発見する方法で、現効率や軌道周期から惑星の半径を推定することができ、先述のドップラーシフト法と組み合わせることで正確な半径や質量、密度を求めることができる。視線方向に対して主星の表面を惑星が掩蔽することで起きる一次星食は主に可視光領域で観測することができるが、惑星が主星に掩蔽されることで起きる二次星食の変動は赤外線領域において卓越していることから、地上からは地球大気を通して観測が可能な近赤外線領域によって行われる。以上の理由から、トランジット法による系外惑星の観測は、可視と近赤外の両方の領域で同時に観測が可能な HONIR が役立つと考えられる。図 5 にトランジット法の概念図を示す。

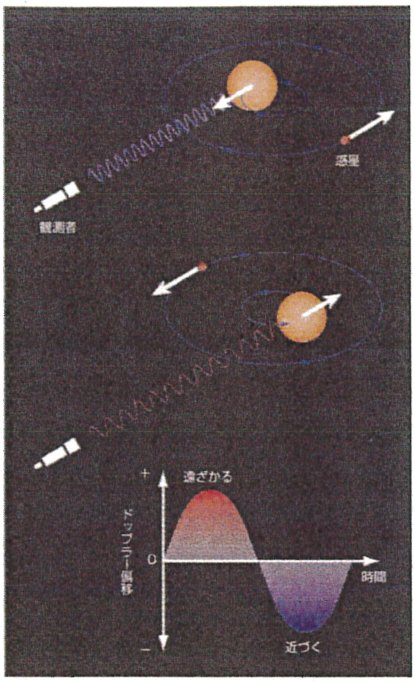


図 4: ドップラーシフト法の概念図 [1]

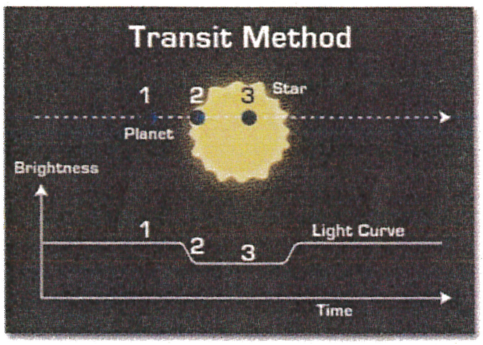


図 5: トランジット法の概念図 [2]

- XRB

XRB とは、主星がコンパクト星 (ブラックホールや中性子星) 伴星が恒星の X 線連星 (X-Ray Binary) で、ジェットを持っており、シンクロトロン放射起源とされる偏光が観測されている。ジェット成分を見るためには、観測される放射全体から降着円盤や伴星の寄与を差し引く必要があり、XRB の可視 · 近赤外の観測では一般的に降着円盤や伴星の寄与が卓越しているため、可視域までの幅広い観測が必要となる。また、ジェットの偏光観測を行うことで磁場構造に制限をつけることができ、XRB の構造の解明に繋がる。以上の観測を行うには可視 · 近赤外域での同時撮像及び偏光観測が可能な HONIR が活躍すると考えられる。図 6 に XRB の模式図を示す。

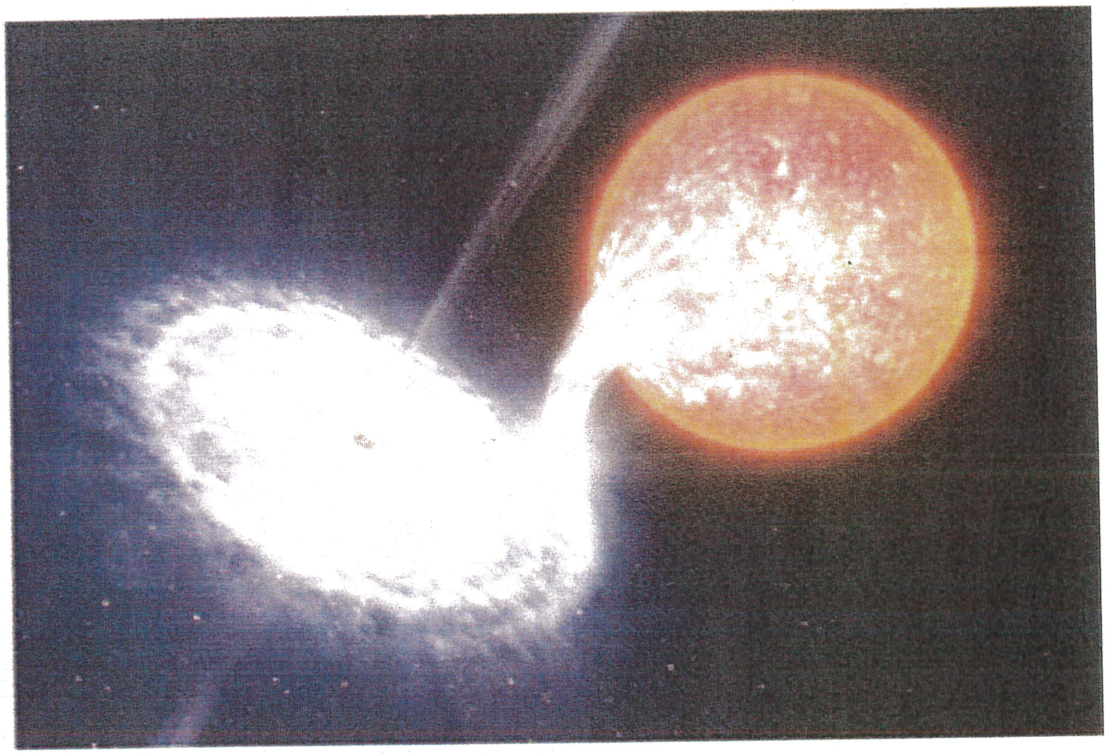


図 6: XRB の模式図 [3]

1.3 HONIRの近赤外線検出器読み出しシステム

1.3.1 現読み出しシステム

現在、近赤外線検出器 VIRGO の読み出しシステムはデジタル部とアナログ部の 2 つにの読み出しシステムに分かれている。デジタル部には国立天文台で開発された汎用データ取得システムである Messia5、アナログ部には名古屋大学で開発された汎用検出器回路である MACS2 が用いられている。本小節では、これらのシステムの概要について述べる。

- Messia5

Messia5 は国立天文台が開発した汎用データ取得システムで、CMC(Common Mezzanine Card) 規格の Mezzanine Card と、市販の PCI バス用 DSP ボードである Bitwire 社の Hammerhead から構成される。Messia5 とホストコンピュータは PCI バスで直結しており、DSP ボードのバススロットで CMC と接続されている。また、1 枚の CMC は CSB(Clock Sequencer Block) と FGB(Frame Grbber Block) の 2 つのブロックから構成されており、DSP のリンクポートを通じてデータを高速でやり取りしている。CSB はクロックパターンを発生させるためのブロックで、ホストコンピュータ上に保存されているファイルを DSP が読み込み、それを CSB に送られることでクロックを出力する。FGB はアナログ部から送られてきた画像を DSP へと送り出すブロックである。図 7 に Messia5 の写真を示す。

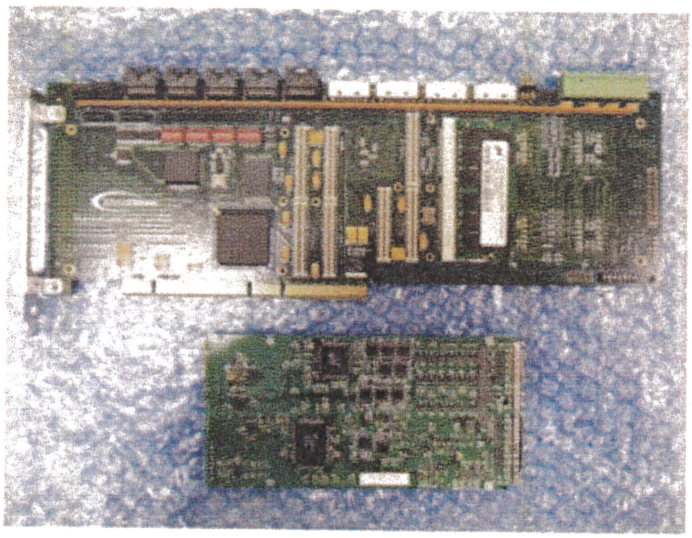


図 7: Messia5(上：DSP ボード、下：CMC ボード)

- MACS2

MACS2 はアイソレーションボード、クロックドライバーボード、ADC ボード、preamp ボードの計 4 つのボードから構成されている。クロックドライバーボードは Messia5 から送られてきたクロックパターンを元に検出器に印加するバイアスを発生させ、検出器に供給する役割がある。preamp ボードと ADC ボードで検出器からの信号を増幅及び AD 変換を行い、Messia5 へと画像データを出力する。ADC ボードは 4 つの AD 変換器が搭載されているため、MACS2 では 4ch 読み出しが可能である。図 8 に MACS2 の写真、図 9 に Messia5 と MACS2 の通信構成をそれぞれ示す。

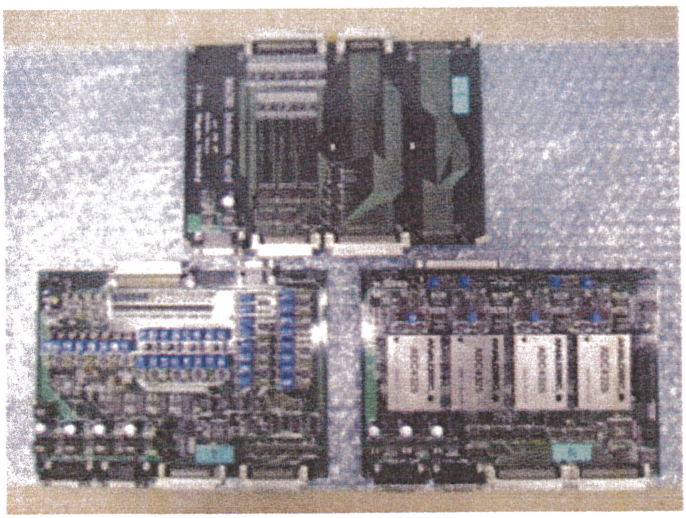


図 8: MACS2(上：アイソレーションボード、左下：クロックドライバボード、右下：ADC ボード+プリアンプカード)

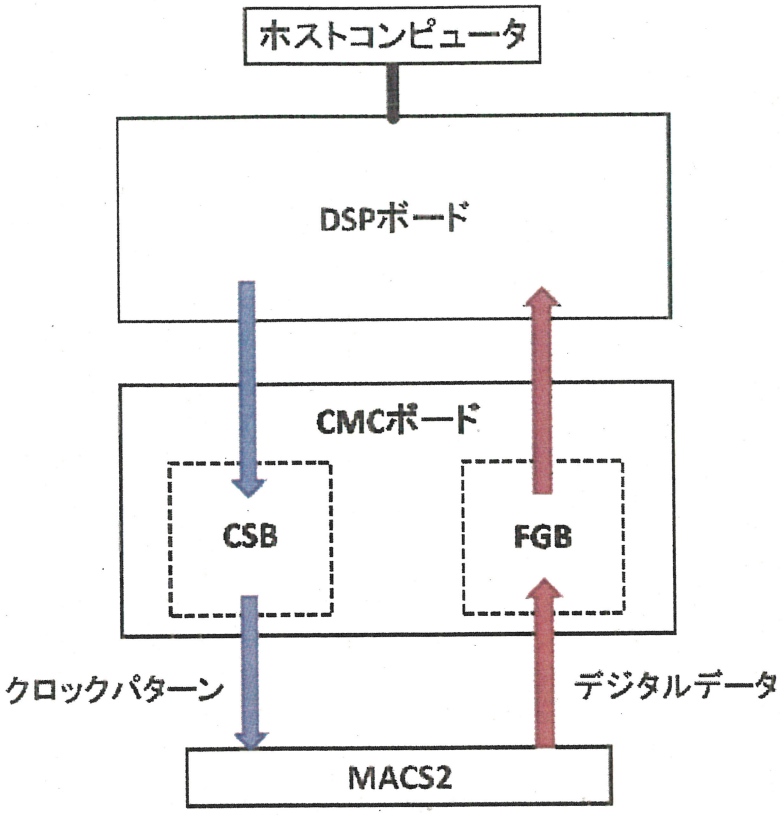


図 9: Messia5 と MACS2 の通信構成

1.3.2 現読み出しシステムの問題点

現在の近赤外線検出器用読み出しシステムは低温下にて正常に作動しなくなることがある。調査の結果、MACS2 に搭載されている FPGA という電子回路が低温下で動作しなくなることが原因であることが判明した。FPGA の代替素子はあったため修復は可能だったが、MACS2 は 10 年以上前に作成されたもので既に廃版となっている素子も多く、今後の安定した運用が懸念される。また、VIRGO は最大 16ch 同時読み出しによる高速読み出し機能が特徴だが、MACS2 は 4ch 読み出ししか行えず、VIRGO の高速読み出し機能を活かしきれていない。これらの問題を解決するために、新しい読み出しシステムの開発を行うこととなった。

1.3.3 新読み出しシステム

先述の問題を解決し、HONIR の更なる高性能化による観測効率の向上を目的とし、VIRGO 用新読み出しシステムの開発を本研究室の宇井氏 (現博士課程後期 3 年) が中心となり 2011 年から進めてきた。新システムは、低外気温下での安定駆動実績のある東京大学木曽観測所で開発された汎用 CCD 読み出しシステム KAC(Kiso Array Controller) をベースにし、VIRGO 用の近赤外検出器読み出しシステムへと改修を行ったものである。KAC をベースに開発を行った理由としては、主に市販製品を用いて開発が行われているため導入が容易であること、完全作動入力方式によるコモンモードノイズ除去や、3 次ローパスフィルタによる低ノイズ仕様である等が挙げられる。また、新システムでは検出器の駆動電圧の生成・供給、クロック信号の伝達、検出器からの信号の増幅や AD 変換、PC へのデジタルデータの出力等をまとめて行うことができ、先に述べた Messia5 と MACS2 の両方の働きを統合したものとなっている。システムの駆動に必要な電源は TEXIO 電源から供給している。新システムの回路基盤の写真を図 10、TEXIO 電源から電源を供給している時の写真を図 11 に示す。

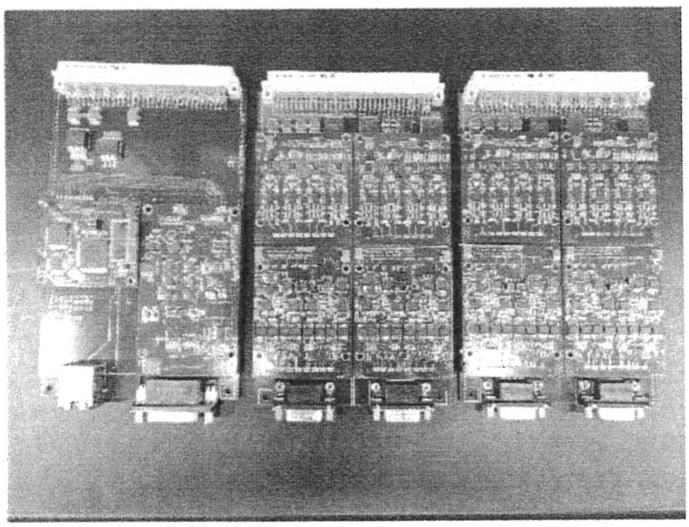


図 10: 左：DIF ボード　真ん中・右：ADC ボード



図 11: TEXIO から電源を供給している時の新読み出しシステム

以下に新システムの読み出しの際のデータ通信の構成、読み出しに用いるクロック、新システムの要求性能について述べる。

- 読み出しシステムの通信構成

PC と読み出しシステムの通信の仕組みについて詳しく述べる。LinuxPC の CPU で VIRGO 駆動のクロックパターンを生成し、DIO ボードを通り LVDS ボードへ送られる。LVDS ボードはイーサネットケーブルによって読み出しシステムの IF ボードと繋がっており、LVDS ボードから IF ボードへとクロックパターンが送られ、DRV ボードでクロックパターンに応じたクロック電圧を生成し VIRGO へと送られる。クロック電圧に応じて VIRGO が読み出しを行い、ADC ボードにて信号の増幅、AD 変換を行い、DRV ボード、IF ボードを経由しデジタルデータを LVDS ボードへと送る。LVDS ボードにてパラレル信号に変換し、DIO ボードを経由して CPU へ送られ、データの処理を行い画像を生成する。これが PC と読み出しシステム間の通信の仕組みである。通信の一連の流れを図 12 にまとめた。(DIO ボード等の詳細については付録 A.2 を参照。) また、読み出しの際にはプログラムによって 1 枚の画像を生成するために CPU で処理するピクセル数を指定し、その後クロックを読み出しシステムを経由して VIRGO へと送る。以降、このプログラムの名称をを frp(FRame Pattern) とする。

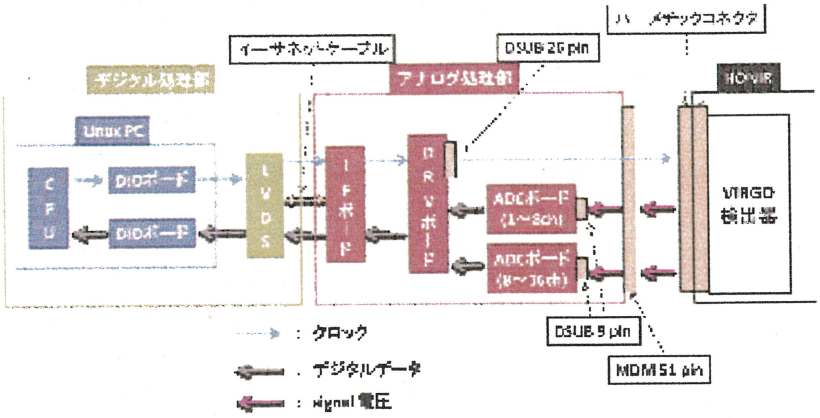


図 12: PC· 読み出しシステム ·VIRGO 間の通信構成

- 読み出しに用いるクロック

クロックは PC で生成され読み出しシステムを経由して VIRGO へと送られ、VIRGO の読み出しにはいくつかのクロックを送る必要がある。図 13 に 16ch 読み出しで用いるクロックパターンを示す。クロックには様々な種類があるが、読み出しに大きく関わるのは FrameStart クロックと pmc クロックである。それぞれ 0-4V のクロックで、FrameStart クロックが入力されることで読み出し待機状態に入り、待機状態の時に pmc クロックが入力されることで読み出しが開始される。FrameStart クロックが入力された状態で pmc クロックの立ち上がりと立ち下がり時に 1 つのピクセルを読みだしていく。つまり、検出器信号は 1 ピクセル毎に pmc クロックに同期して出力されるため、検出器信号の周波数は pmc クロックの周波数と同じになる。また、AD 変換のタイミングは検出器から送られてくる信号に同期しているのが最も効率が良いため、pmc クロックは AD 変換を開始するための電源の役割も担っている。クロックを記述したプログラムの名称は clp(CLock Pattern) としている。

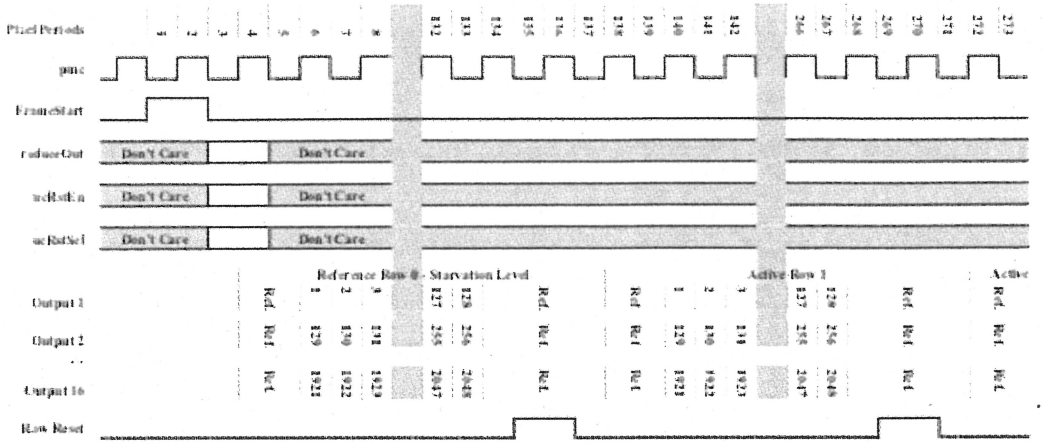


図 13: 16ch 読み出し時のクロックパターン [4]

- 要求性能

新システムに求める性能は大きく分けて以下の 4 つである。2015 年 10 月時点での新システムの性能と共に述べていく。

1. 低温下での安定駆動

   現システムの問題点である低外気温下での動作不良を改善し、安定的に運用できるようにする。本システムでは、-20 ℃で駆動実績のある KAC をベースとすることでこの問題を解決できるよう目指した。

   2015 年 10 月時点では低外気温下での運用試験は行われていないため、低外気温下での安定駆動が可能かは確認されていない。

2. 検出器線形性の向上

   検出器からの出力信号の線形性を向上し、検出器の視野内に存在する暗い星から明るい星まで精度の良い測光を行えることを目指した。

   検出器からの出力信号は Output Source Follower と呼ばれる回路によって読み出しシステムへと伝達される。Output Source Follower は P-Channel MOSFET を用いた回路構成となっており、読み出しシステムから電流を供給することで駆動を行う。広いダイナミックレンジに渡り線形性を確保する

ためにはOutput Source Followerを適切に駆動する必要があり、その為には検出器信号に依らず一定の電流を供給し続ける必要がある。これを実現するために、定電流回路とカレントミラー回路の組み合わせにより一定の電流を供給できるよう設計を行った(付録A.1.1参照)。これによりリニアリティはMACS2の150000e^-から200000e^-へと向上した為、測光の精度が向上した。(付録A.1.2参照)

3. 高速読み出し対応

VIRGO の 16ch 高速読み出し機能を活かしきるため、16ch 分の入力を同時に AD 変換処理を行えるよう設計し、現システムの約 4 倍の読み出し速度を目指した。

新システムには AD ボードと preamp ボードそれぞれ 2 つずつから構成される ADC ボードが 2 つ搭載されている。ADC ボードは 1 つで 8ch 分の信号を処理することができることから、新システムでは 16ch の同時読み出しを行うことができる。そのため VIRGO の高速読み出し性能を十分に活かすことができると言える。読み出しにかかる時間は Output Source Follower が読み出しを行うピクセル数に pmc クロックの周期を掛け合わせたものとなる。現在、pmc クロックの周波数を約 120kHz に設定しており、図 14 より 16ch 読み出しの場合 1 つの Output Source Follower が担当するピクセル数は 128 なので、読み出し時間は約 1.2s となる。これは現在の MACS2 の読み出し時間は約 9.2s と比較すると飛躍的な向上であると言える。図 14 に 16ch 読み出しの概念図を示す。

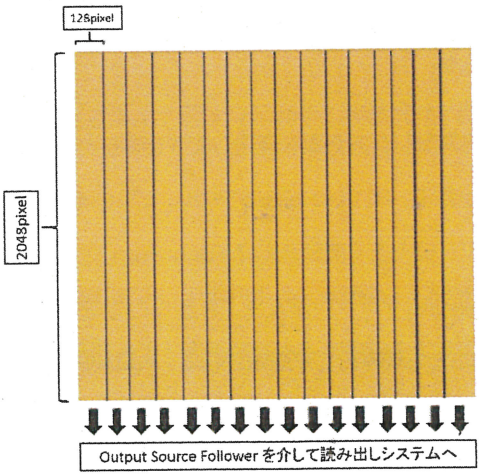


図 14: 16ch 読み出し概念図

4. 低ノイズ読み出し

読み出しシステムのノイズが読み出し全体のノイズに影響を与えないように、VIRGO のノイズの仕様値である 5electron〜15electron を下回る値 (冷却状態の VIRGO 読み出しで〜30e^-) を目指した。

KAC に用いられている完全作動入力回路や 3 次ローパスフィルタ等のノイズ除去機構をそのまま導入し、設計に用いる素子も市販されている物の中から低ノイズな素子を選び開発が行われた。その結

果、実験室での冷却下における VIRGO の読み出しノイズは $25e^-$ と良好な値を得ることができた。これは現在のシステム MACS2 のノイズ値と同等なことから、実際の観測でも使用出来るレベルであると言える。しかし、このノイズ値は望遠鏡電源が OFF の時の値であり、原因は判明していないが望遠鏡電源を ON にすると異常な高ノイズを検出する。実際の観測では望遠鏡の電源は ON になっていることから、現在の状態だと新システムを観測で用いることができない。本研究の目的は、この異常な高ノイズの原因を調査し改善することである。

以上が新システムの概要である。

1.3.4 新読み出しシステムの問題点

現状、新読み出しシステムには実用化を妨げる問題が大きく別けて 2 つある。1 つは先述の通り望遠鏡電源を ON にすることにより発生する異常な高ノイズであり、もう 1 つは望遠鏡電源を ON にして VIRGO の読み出しを行うと、本来ならば CPU に frp を送ってから VIRGO へクロックを送ることで読み出しが行われるはずが、frp を送った段階で勝手に読み出しが開始されるというものである。図??に読み出しが勝手に行われる時のクロックパターンの模式図を示す。

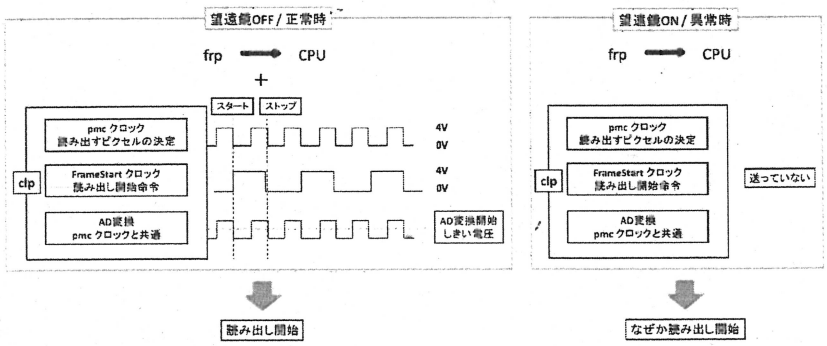


図 15: 読み出しが勝手に行われる時のクロックの模式図　左：望遠鏡電源 OFF· 正常な読み出し時のクロック　右：望遠鏡電源 ON· 読み出しが勝手に行われる時のクロック

1.4 本研究の目的

本研究では、先述の問題の原因を調査·改善することを目的とし、新読み出しシステム完成によるVIRGO検出器の読み出し性能の向上を目指す。具体的には、望遠鏡電源ONの時の読み出しノイズをOFFの時と同等のノイズ値まで下げるのが目標である。また、望遠鏡電源ONの時にFrameStartクロックを送った段階で勝手に読み出しが行われるという問題の原因を突き止め、改善するのが目標である。

次章では本研究で行ったノイズ調査について述べる。

2 測定と結果

本章では、実際に行った新読み出しシステムのノイズ調査の方法、結果、考察について述べていく。尚、以降では宇井氏の報告より、デジタル値の単位で ADU を電子数 e^- に変換するためのコンバージョンファクタを 8 e^-/ADU として換算して用いる。(付録 A.1.1 参照)

2.1 ノイズの測定方法と読み出しカウント

本研究では大きく別けて 2 つの方法でノイズの調査を行った。本節ではこれら 2 つのノイズ測定法について述べる。

2.1.1 読み出しノイズ測定法

電子の熱運動に起因する熱的雑音をジョンソンノイズという。読み出しノイズとは、検出器内部の回路及び読み出し回路に起因するジョンソンノイズのことである。

天体の観測で検出されるノイズは以下の式で表される。

$$\sigma_{tot} = \sqrt{(\sigma_{sky} + \sigma_{dark} + A)t + {\sigma_{read}}^2} \tag{1}$$

σ_{sky} はスカイバックグラウンド、σ_{dark} は暗電流、A は望遠鏡の集光面積、t は露光時間、σ_{read} は読み出しノイズである。上式より、露光をせずに読み出しを行うと読み出しノイズのみを測定することができる。本研究では 10 回の読み出しを行い、その標準偏差を取ることで読み出しノイズとした。読み出しの流れは、最初にリセットを 10 回行うことで検出器に溜まっている電荷を除去し、読み出し · リセット ·2 秒間のスリープを 1 セットとしてこれを 10 回繰り返す。dat 形式で得られたデータを fits 形式の画像に変換するが、この時得られる画像は最初のリセット中の画像、積分前後に読み出した画像の 3 種類の画像が得られるので、積分後の画像と積分前の差分を取ることで 1 つの画像を作り出す。その後 10 枚の画像の標準偏差を取った 1 枚の読み出しノイズ画像を取得する。図 16 に読み出しで得られる fits 画像 · 差分を取った後の画像 · 標準偏差を取った後の読み出しノイズの画像例を示す。

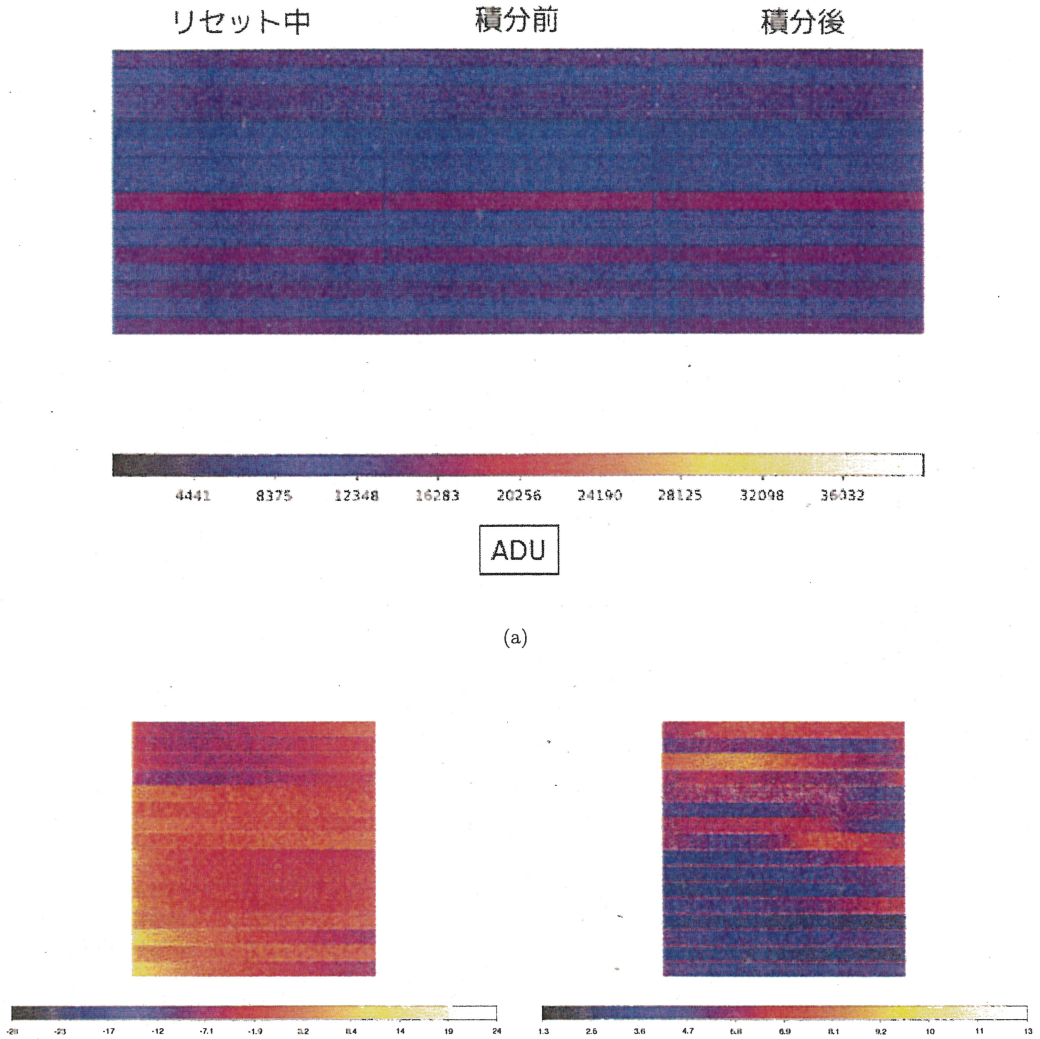


図 16: (a)fits 画像の画像例　(b) 差分を取った後の画像例　(c) 標準偏差を取った後の画像例

読み出しノイズの調査は、AD 変換によって出力されたデジタル信号を画像データ化し、画像のカウント (ADU) のゆらぎからノイズ値を調べる。画像上でのチャンネルは上から順に 16ch、15ch と続いていき一番下が 1ch となっている。また、今回の調査では、preamp 上の可変抵抗の抵抗値を調整することで、1〜8ch を低音用チャンネル、9ch〜16ch を常温用チャンネルとした (付録 A.1.3 参照)。

2.1.2 オシロスコープを用いたノイズ測定法

図 17 に測定した箇所の写真を載せる。ch1 は AD 変換直前の差分の電圧、ch2 は電源回路によって生成された AD ボード上の DC+5V とドーム内壁にあるドームグラウンドとの電圧差を観察した (ドームグラウンドの場所は図 25 を参照)。

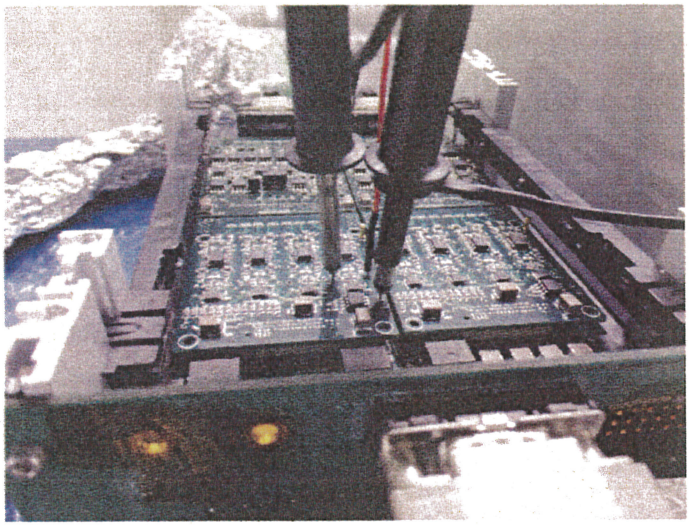


図 17: オシロスコープの測定箇所

2.1.3 カウントの仕組み

読み出しによって得られるカウントは検出器からの signal 電圧と読み出しシステムのグラウンドを基準として DRV ボードで生成される reference 電圧の差を表している (付録 A.1.2 参照)。読み出しの際はチャンネルとチャンネルの間に reference ピクセルと呼ばれる検出器からの暗電流量を読んだピクセルを挟んでいる。図 18 に reference ピクセルの画像例を示す。

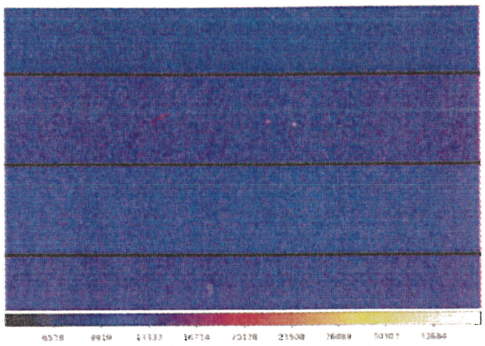


図 18: reference ピクセルの画像例。チャンネル間の黒い線が reference ピクセル。

2.2 実験室でのノイズ調査

天文台 1 階にある実験室にてノイズの調査を行った。行った調査の結果を述べていく。

2.2.1 冷却 VIRGO の読み出しノイズ

HONIR に搭載されている冷却状態の VIRGO 検出器のノイズ調査を行った。測定結果を図 19 に示す。

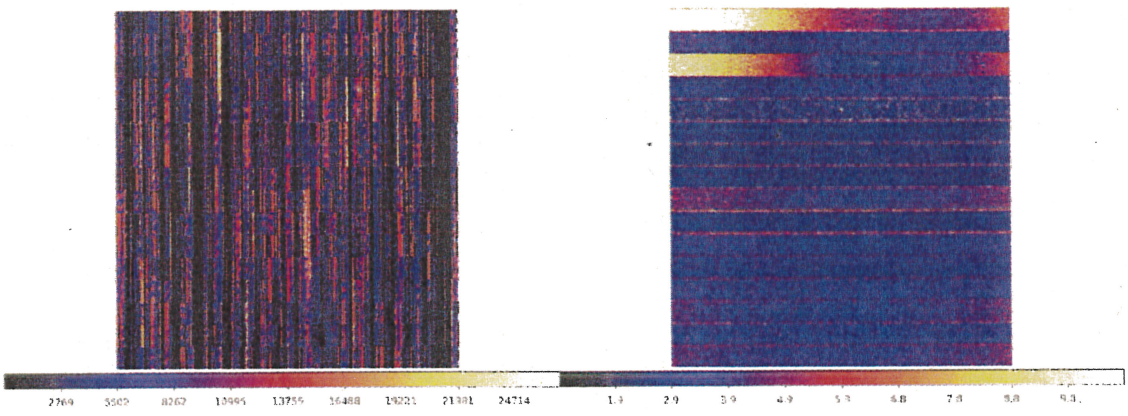


図 19: 実験室 /*cdot* 冷却 VIRGO での読み出しノイズ　横軸：ADU　左：望遠鏡 ON、1〜8ch ノイズ値平均 10000ADU　右：望遠鏡 OFF、1〜8ch ノイズ値平均 3.39ADU

冷却読み出し用に設定しているのは 1〜8ch のみなので、正確に読み出しを行えているのは 1〜8ch のみである。その為、ノイズの平均値は 1〜8ch のみを用いている。

測定を行った結果、望遠鏡を ON にすると異常な高ノイズが検出されるという問題が再現されるのを確認した。また、望遠鏡を ON にして読み出しを行うと pmc クロックを送っていないにも関わらず FrameStart クロックを送った段階で読み出しが勝手に行われるという問題も確認された。左の画像は読み出しが勝手に行われた結果得られた画像である。望遠鏡 OFF の時のノイズは 3.39ADU と良好な結果が得られ、エレクトロン換算で約 $25e^-$ で MACS2 のノイズ値と比較しても同等である。以降では主として異常な高ノイズと勝手に読み出しが行われるという問題の原因を突き止めるために調査を行なった。

2.2.2 常温マルチプレクサの読み出しノイズ

VIRGO は HONIR 筐体に取り付けられている為取り回しが悪く、また、高価なため破損する可能性のある実験は行えないということから、HgCdTe 検出器は付いていないが Si 製の電子回路は VIRGO と同じであるマルチプレクサと呼ばれる素子を用いて測定を行った。測定結果を図 20 に示す。

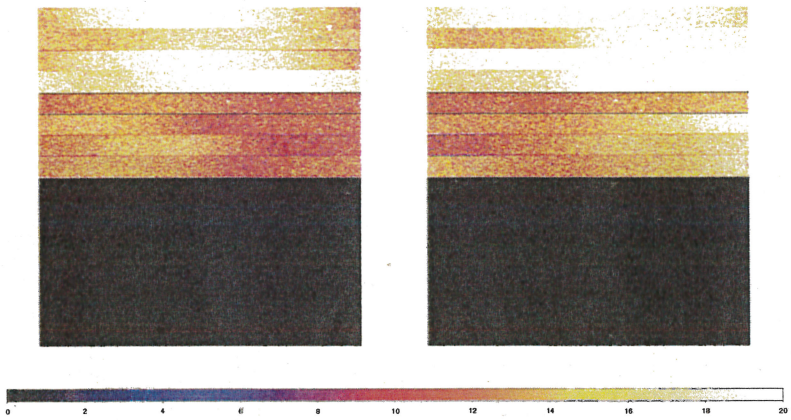


図 20: 実験室 /*cdot* 常温マルチプレクサでの読み出しノイズ。1〜8ch は低温設定のため AD 変換のレンジ外となっているためカウントが 0。　横軸：ADU　左：望遠鏡電源 ON、9〜16ch ノ イズ値平均 15.2ADU　右：望遠鏡電源 OFF、9〜16ch ノイズ値平均 16.87ADU

先にも述べたように、1〜8ch は冷却読み出し用の設定にしているので常温読み出しでは正常な読み出し

は行われておらず、常温での測定なので暗電流などの要因によって冷却 VIRGO に比べてノイズは高くなっている。マルチプレクサでは望遠鏡の電源を ON にしても正常な測定を行うことができ、ノイズに大きな変化は見られなかった。検出器の温度に差はあるが、望遠鏡の電源を ON にした時に読み出しを行えるという VIRGO との違いがどこから生じているのか調査が必要である。HONIR や VIRGO が関わると正常な測定を行うことができないのか、それとも測定の条件を変えることで問題が再現されるのかを調べる為に、様々な条件下で調査を行なっていった。

2.2.3 読み出しボード単体の読み出しノイズ

図 21 のような 5 番ピン以外を短絡させたショートピンを作成し、ボードと検出器を繋ぐ DSUB9pin(図 ??) に取り付けることでボード単体の電圧のゆれによるノイズを測定し、望遠鏡電源 ON の時に正常な読み出しが行えないという問題にボード単体がどの程度影響を与えているのかを調査した。この時、5 番ピンはグラウンドなので一緒に短絡させないように注意する。測定結果を図 22 に示す。

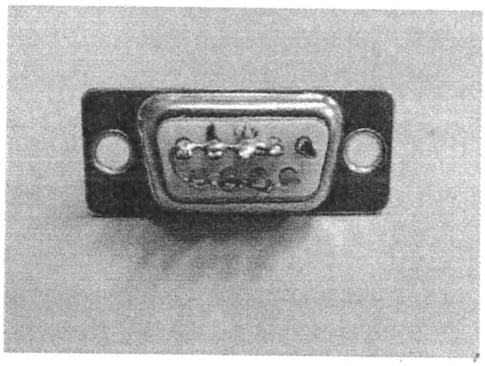


図 21: 短絡させた Dsub9pin

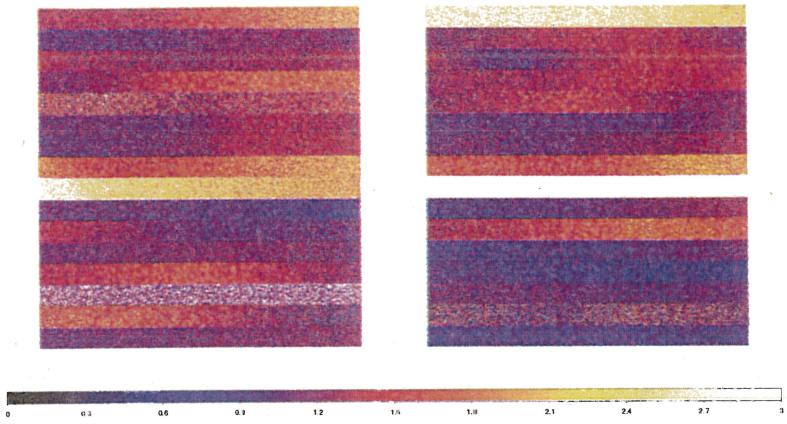


図 22: 実験室 · ボード単体での読み出しノイズ。下側 1〜12ch は測定に用いていないが偶然 AD 変換レンジ内に収まっており読み出しが行われている。　横軸：ADU　左：望遠鏡電源 ON、上側 13〜16ch ノイズ平均 1.35ADU　右：望遠鏡電源 OFF、13〜16ch ノイズ平均 1.60ADU

今回の測定では 13〜16ch のみショートさせているので、比較を行うのは 13〜16ch のノイズのみである。望遠鏡電源 ON と OFF の時のノイズ値の差は測定毎の不定性で説明がつく範囲であり、ノイズの上昇は見られなかった。また、読み出しが勝手に行われることも無かったことから、少なくとも実験室において読み出しボード単体には望遠鏡 ON による影響はないと考えられる。

2.2.4　外来由来のノイズ

望遠鏡の電源を ON にした時の望遠鏡が発する電波などの外来ノイズにより測定に影響が出ている可能性があると考え、図 23 のように検出器に繋ぐ MDM51pin を短絡させ (図??)、ボードと検出器を繋ぐケーブルが拾う外来ノイズの測定を行った。ショートピンを作成する際に短絡させるピンは、27〜34,38,44〜51 番ピンである。38 番ピンはボードのバイアス電圧で、27〜34,44〜51 ピンは全て検出器側からの信号をボードへ送るピンなので、これらを短絡させることでケーブルを含めたボードのノイズを測定することができ、ケーブルをアンテナとして外来由来のノイズによる影響をを調査することができる。また、測定の際の注意事項として、ボード最下段の DRV ボードの Dsub26 ピンを外すことで、ボード単体にケーブルを付けた状態での正確なノイズを測定することができるので、Dsub26pin を外すことを忘れないようにする。測定

結果を図 24 に示す。

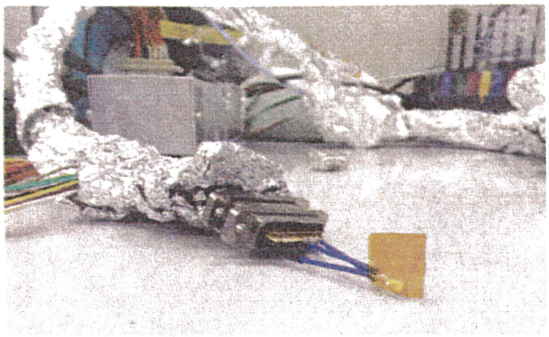


図 23: 短絡させた MDM51pin

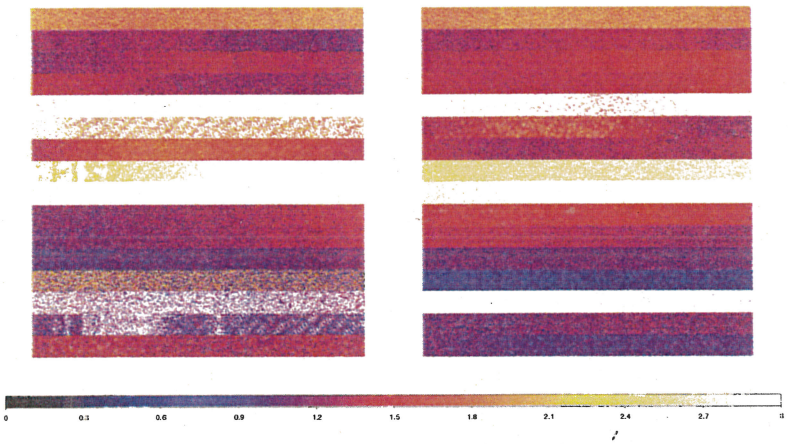


図 24: 実験室 /*cdot* ケーブルを付けた状態での読み出しノイズ　横軸：ADU　左：望遠鏡電源 ON、13〜16ch ノイズ平均 1.45ADU　右：望遠鏡電源 OFF、13〜16ch ノイズ平均 1.51ADU

ボード単体でのノイズ調査の際、ノイズの比較に用いたのは 13〜16ch のみだったので今回の測定でも 13〜16ch のみを比較し、その結果をボード単体でのノイズと比較する。図 24 より、望遠鏡の電源を ON にしても OFF の時と比べて変化は見られない。また、ボード単体でのノイズと比較しても有意な差は見られない。以上より、望遠鏡の電源を ON にすることにより生じる電波などの外来ノイズが測定に影響を与えているとは考えにくく、影響を与えていたとしてもケーブルに巻いたアルミホイルのシールドで遮蔽できる

程度の影響であると考えられる。よって、実験室において外来ノイズの影響はないと判断した。

2.2.5 実験室でのノイズ調査のまとめ

実験室での調査結果を以下にまとめる。望遠鏡 OFF での冷却 VIRGO 読み出しでは、MACS2 のノイズ値と遜色ない結果が得られた。しかし、望遠鏡を ON にすると読み出しが勝手に行われ、ノイズが異常に上昇するという問題が確認された。同様の実験を常温マルチプレクサで行ったところ望遠鏡電源の ON/OFF に関わらず読み出しが正常に行われた。なぜこのような違いが生じているのか、また、望遠鏡の電源が読み出しシステムにどのような影響を与えているのかを調べるために読み出しシステム単体、及びケーブルを付けた状態でのノイズ調査を行ったが、望遠鏡 ON による読み出しシステム単体への測定障害は見られなかった。以上が実験室で行った調査のまとめである。

2.3 観測室 (ドーム内) でのノイズ調査

天文台 2 階にあるドーム内にてノイズの調査を行った。行った調査の結果を述べていく。

2.3.1 外来由来のノイズ

実験室での外来由来のノイズ調査と同様の調査をドーム内で行った。ドーム内の内壁には複数のコンセントがあり、望遠鏡にも複数の電源タップが取り付けられている (図 25)。その為、ドーム内での測定では読み出しシステムに電源を供給する為の TEXIO 電源の電源供給場所の違いによるノイズの差があるかも調査するため、ドーム内壁のコンセントと望遠鏡の電源タップの 2 種類から TEXIO 電源に電源を供給し、それぞれに対して望遠鏡 ON と OFF の時のノイズを調査した。測定結果を図 26、図 27 にそれぞれ示す。

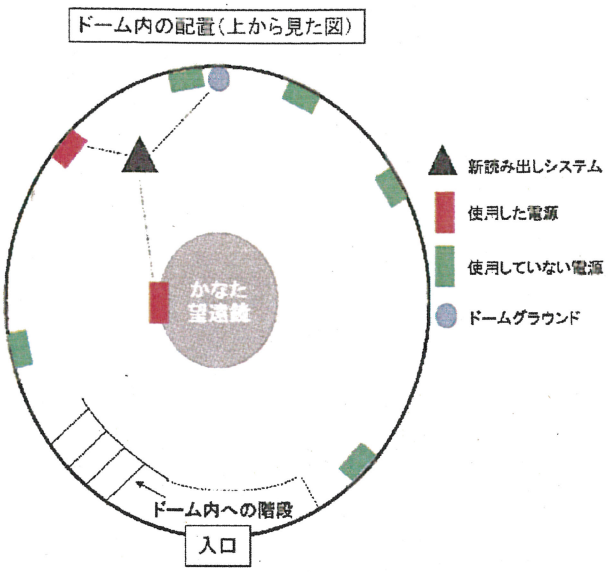


図 25: ドーム内を上から見た時の配置図

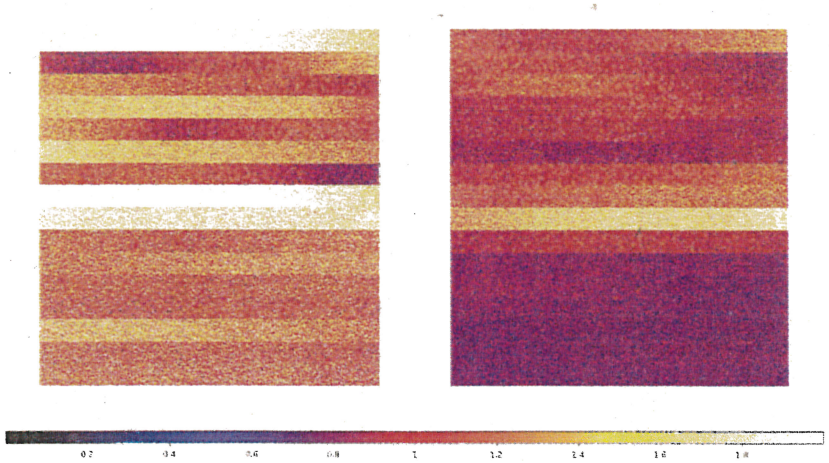


図 26: ドーム内 /*cdot* 壁から電源を供給 /*cdot* ケーブルを付けた状態での読み出しノイズ　横軸：ADU　左：望遠鏡電源 ON、13〜 16ch ノイズ平均 1.46ADU　右：望遠鏡電源 OFF、13〜16ch ノイズ平均 1.46ADU

まず、図 26 の電源を壁から供給している場合を見ていくと、望遠鏡 ON の時のノイズは OFF の時に比

べて約 1.4 倍増加している。この増加量は測定の不定性によるものというには大きすぎる差であることから、望遠鏡の近くでノイズを測定したことによりケーブルが電波を拾いノイズが上昇しているのではないかと考えられる。次に図 27 の電源を望遠鏡から供給している場合を見ていく。

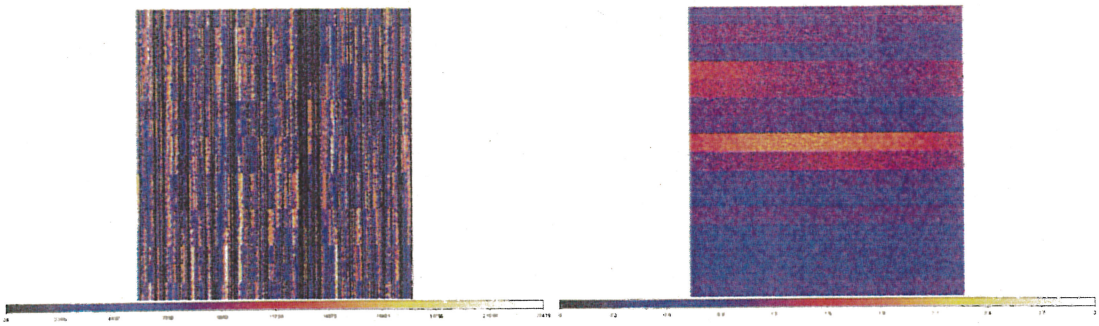


図 27: ドーム内 /*cdot* 望遠鏡から電源を供給 /*cdot* ケーブルを付けた状態での読み出しノイズ　横軸：ADU
左：望遠鏡電源 ON、13〜16ch ノイズ平均 10000ADU　右：望遠鏡電源 OFF、13〜16ch ノイズ平均 1.02ADU

図 27 の 2 つの画像はスケールが違うので色は同じでもノイズの値は異なる。この結果を見ると、望遠鏡を ON にすると測定に問題が生じていることが分かる。望遠鏡 OFF のノイスは電源を壁から供給した場合と差はないが、望遠鏡を ON にすると読み出しが勝手に行われ、異常な高ノイズが検出された。また、読み出しを 10 回行うはずが 5 回程しか行われていないこともあった。この事から、外来のノイズが原因でノイズが上昇しているのではなく、望遠鏡からの電源に何らかの問題があるのではないかと考えられる。これを調査するために、望遠鏡から電源を供給しオシロスコープを用いて電圧の振る舞いを確認した。

2.3.2　回路上でのノイズ信号

前小節までで望遠鏡の電源が何らかのノイズの原因となっていることが判明した。その為、望遠鏡電源で生じているであろうノイズに対して 2.1.2 で述べたオシロスコープを用いた方法で調査を行った。本小節ではその結果を述べていく。

TEXIO 電源を望遠鏡から供給し、回路上でのノイズの振る舞いをオシロスコープを用いて調査した。測定結果を図 28 に示す。

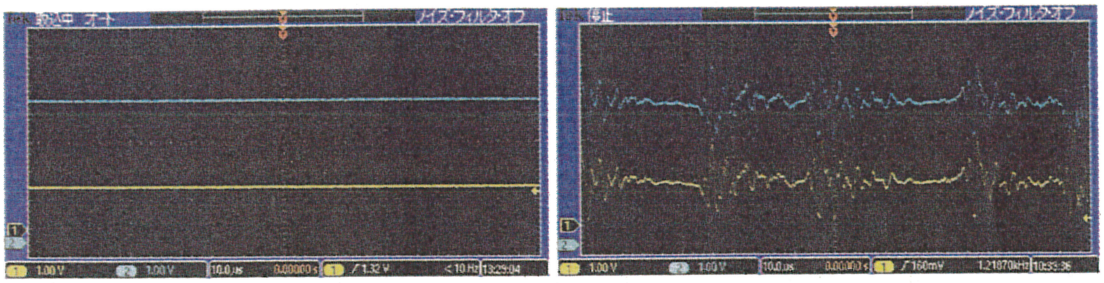


図 28: TEXIO の電源を望遠鏡から供給した時のノイズ　左：望遠鏡電源 OFF　右：望遠鏡電源 ON

結果から、周期が 1MHz、振幅が最大 1.5V の非常に大きなノイズが生じていることが判明した。また、同様の調査を TEXIO 電源を壁から供給した場合についても行った。測定結果を図 29 に示す。結果から、壁からの電源においても周期が 1MHz、振幅が最大 0.5V のノイズが確認されれた。以上の結果より、ドーム全体の電源にノイズが生じていることが判明した。このノイズの影響でドーム内での外来ノイズの調査の際に、読み出しノイズが異常な値を示したと考えられる。

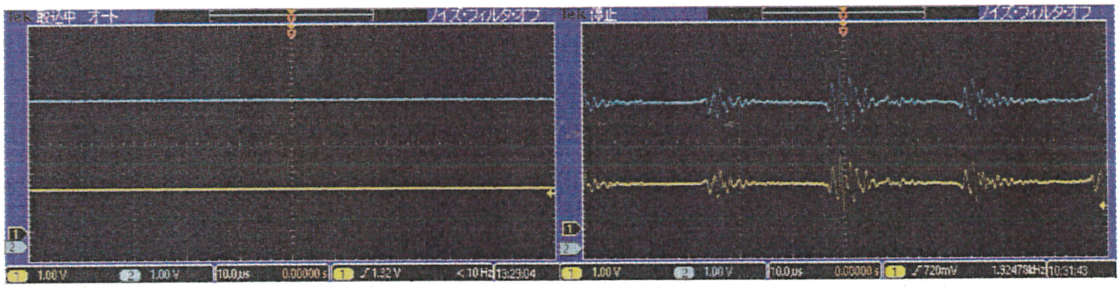


図 29: TEXIO の電源をドーム内壁から供給した時のノイズ　左：望遠鏡電源 OFF 右：望遠鏡電源 ON

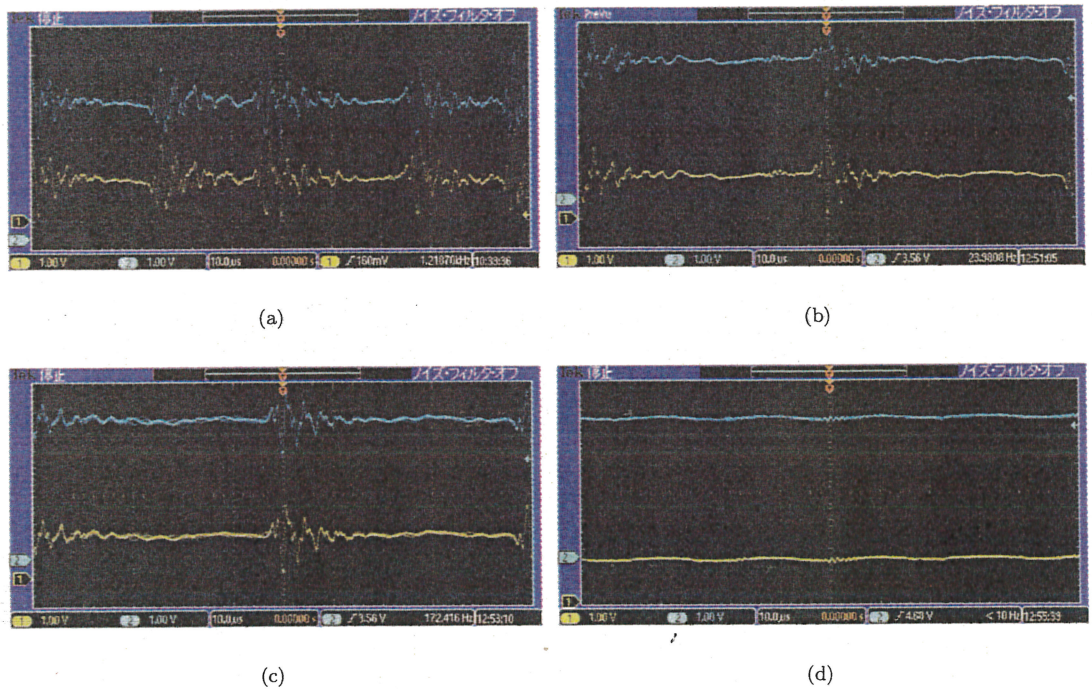
2.3.3　ノイズ源の特定

本研究で調査しているノイズは望遠鏡を ON にした時に現れることから望遠鏡内で生じていると考えられ、望遠鏡内でノイズの原因となる電波を発しているものとして考えられるのは望遠鏡を動かすためのモーターであることから、モーターの電源の ON/OFF でノイズがどのように変化するかを調査した。かなた望遠鏡には 5 つのモーターが搭載されている。表 6 にモーターの種類とそれぞれの役割についてまとめた。

モーター由来のノイズを調査するために、それぞれのモーターを順番に切っていきオシロスコープで回路上の電圧のゆらぎを観察し、どのモーターがノイズを生じているのかを調査した。測定結果を図 30 に示す。

X 軸モーター	方位方向制御
Y 軸モーター	高度方向制御
θ_1 モーター	カセグレン焦点ローテーター
θ_2 モーター	ナスミス焦点ローテーター
副鏡焦点モーター	副鏡焦点調整

表 6: かなた望遠鏡に搭載されているモーターの種類と役割



(a) (b)

(c) (d)

図 30: モーター由来のノイズ調査 (a) 全てのモーター ON (b)X 軸モーター OFF (c)Y 軸モーター OFF (d)X·Y 軸モーター OFF

X · Y 軸モーターを OFF にした時に変化が見られ、他のモーターを OFF にしても変化は無かったため、X · Y 軸モーターについての結果のみ示した。結果から、X · Y 軸モーターがそれぞれノイズを生じており、他のモーターはノイズを生じていないという事が判明した。以降では X · Y 軸モーター由来のノイズを X ノイズ · Y ノイズと呼ぶことにする。X ノイズ · Y ノイズの振幅や周期は同じであるが、1 つのノイズ群が

生じた後に次のノイズ群が生じるまでの反復周期が若干異なることから、時折Xノイズと Yノイズが重なり合成され非常に大きなノイズが生じている。この合成されたノイズを XY ノイズと呼ぶことにする。測定結果から判明したXノイズと Yノイズの特徴を表7にまとめた。Xノイズ·Yノイズが発生している正確な原因は判明していないが、かなた望遠鏡のモーターには 10kHz のインバータが使用されており、ノイズ群反復周期がインバータ周期の2倍の 20kHz となっていることから両者には何らかの関係があると考えられる。

	X · Y ノイズ	XY ノイズ
振幅	～1.5V	～3V
周期	～1μs(1MHz)	～1μs
ノイズ群持続時間	～10μs	～5μs
ノイズ群反復周期	～50μs(20kHz)	～25μs

表 7: X · Y · XY ノイズの特徴

2.3.4 ノイズ侵入経路の特定

ノイズの発生源を特定したので、TEXIO 電源に入る前の AC 電源からの電圧を直接オシロスコープで見ることで、どのようにして新システムにノイズが侵入しているのかを調査した。図 31 のように TEXIO 電源に使用しているのと同じアース付き 3 端子コンセントのケーブルを切断し、内部の導線を直接オシロスコープに繋ぐことで測定を行った。測定結果を図 32 に示す。出力間の波形にはノイズが見られないがアースやドームグラウンドが関わってくると非常に大きなノイズが見られることから、グラウンドに影響を与えるノイズであるという事が分かった。望遠鏡を ON にするとドーム全体のグラウンドにノイズが乗ってしまう為、TEXIO 電源の電圧供給を望遠鏡から行なってもドーム内壁から行なっても読み出しノイズが上昇してしまうと考えられる。

次章では本研究で行ったノイズ対策を述べる。

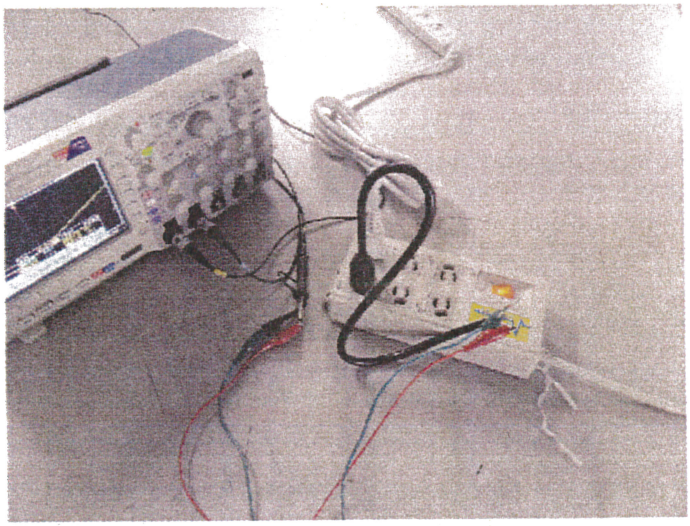
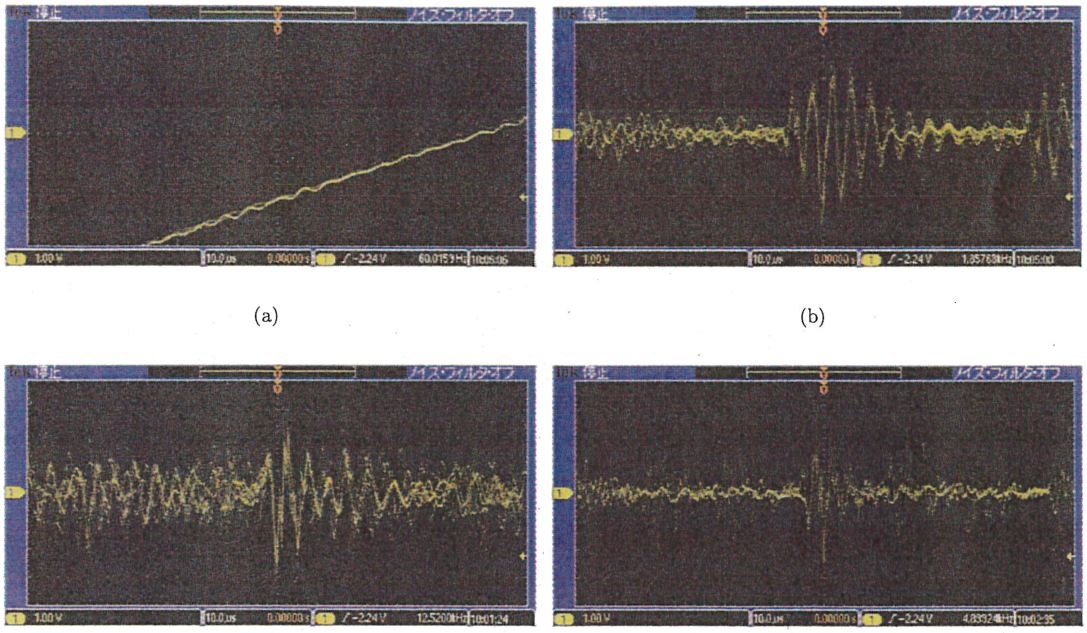


図 31: AC 電源測定法



(a) (b)

(c) (d)

図 32: AC 電源のノイズ調査 (a) 出力－出力 (b 出力－アース (c) 出力－ドームグラウンド (d) アース－ドームグラウンド

3　ノイズ対策とその考察

3.1　ノイズ信号の特徴のまとめ

前章まででノイズの発生源や侵入経路を特定した。本節ではノイズの特徴をまとめ、どのような対策を行なっていくかを考える。

- ノイズの特徴

今回発見したノイズは周期 1MHz、振幅が最大 3V のノイズである。

- ノイズ発生源

望遠鏡内のモーターが発生源。かなた望遠鏡に 5 つ搭載されているモーターの内、方位方向を制御する X 軸モーターと高度方向を制御する Y 軸モーターがそれぞれノイズを発しており、周期のズレから時折重なり合いノイズの振幅が増大する。なぜノイズが生じているのかは不明だが、ノイズの反復周期がモーターに搭載されているインバータ周期の 2 倍になっていることから何らかの関係があると考えられる。

- ノイズ侵入経路

AC 電源のアース、及びドーム全体のグラウンドにノイズが乗っている。

以上の事から、AC 電源のアースへの対策が有効であると考えられる。次節では行ったノイズ対策について述べていく。

3.2　AC 電源用高周波ノイズカットフィルタ

AC 電源へのノイズ対策、特にアースから侵入するノイズに対して市販の AC 電源用ノイズカットフィルタを用いて対策を行った。望遠鏡 ON の状態で TEXIO 電源を望遠鏡から供給した時のオシロスコープ上でのノイズの振幅の目標値は X·Y ノイズで 0.25V、XY ノイズで 0.5V 以下とした。この目標値に設定した理由は、2 章のドーム内での調査において、TEXIO 電源を望遠鏡から供給した時は読み出しが正常に行えず、壁から供給した時はノイズが上昇したものの読み出しは行えており、この時のノイズの振幅が X·Y ノイズで最大 0.25V、XY ノイズで最大 0.5V だった為である。今回用いるノイズカットフィルタはアースへのノイズ対策を行えるフィルタであり、ノイズ周期の 1MHz に対して高い減衰率が必要であるという事か

ら、COSEL 社製の 10kHz-10MHz 高減衰タイプノイズカットフィルタ NBH-20-432[5] を選定した。AC 電源にノイズカットフィルタを付け、前章の調査と同様にオシロスコープを用いて読み出しボード上でのノイズの振る舞いを調査した。図 33 にオシロスコープで測定した波形を示す。結果から、ノイズの減少は見られなかった。減少しない原因としてはアースからのノイズの種類や振幅がノイズカットフィルタが対応できる範囲を超えているという事が考えられる。また、この状態で読み出しノイズの測定を行ったが、勝手に読み出しが行われ、異常に高いノイズが検出された。

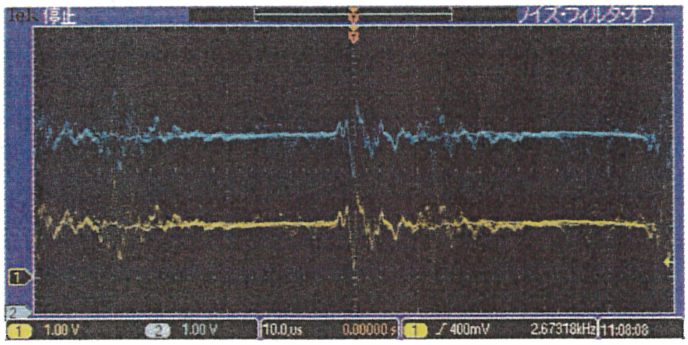


図 33: 望遠鏡 ON、TEXIO の電源を望遠鏡から供給。AC 電源用ノイズカットフィルタを付けた状態でのノイズ

3.3 AC 電源の接地線に関する対策

ノイズカットフィルタではアースからのノイズを減衰することができなかった。そこで、TEXIO 電源に使用しているコンセントをアース付き 3 端子コンセントからアースの取り外しが可能な 2 端子コンセントに変更してノイズの対策をいくつか行った。2 端子コンセントに変更したのは、アースを繋がないため電気的に不安定にはなるがアースからのノイズの流入を防ぐことができると考えた為である。以下に行った対策について述べる。

3.3.1 TEXIO 電源 2 端子コンセント

2 端子コンセントに変更し、他に何の対策も行わずにノイズにどの程度変化が見られるかを調べた。前節までの調査と同様に TEXIO 電源を望遠鏡から供給し、オシロスコープを用いてノイズを測定した。測

定結果を図 34 に示す。図 28 の 3 端子コンセントの時の測定結果と比較すると、全体的にノイズは減少している。電源回路で生成している DC+5V の XY ノイズだけを見ると目標の 0.5V 程度に抑えられている。しかし、AD 変換直前の差分の電圧を見ると時折振幅が最大 1.5V 程のノイズが見られ、今までの測定とは違い ch1 と ch2 で異なる波形となっている。これは、これまでのノイズだと preamp ボードでの作動増幅の際に必要なオフセットが正常に出力できていなかったが、アースを介さないことによりシステムに侵入するノイズが軽減され、オフセットがある程度正常に生成され作動増幅ができるようになり、後段の AD 変換の差分の電圧にも preamp からの電圧が来た結果、ch1 と ch2 ではことなる波形となっているのではないかと推測できる。また、この状態で読み出しノイズの測定を行ったが、勝手に読み出しが行われ、異常に高いノイズが検出された。

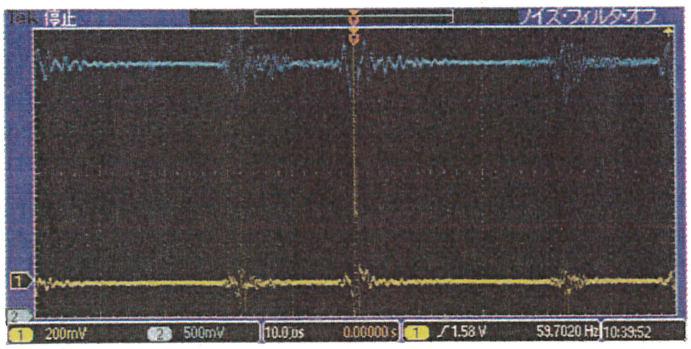


図 34: 望遠鏡 ON、TEXIO の電源を望遠鏡から供給。TEXIO 電源のコンセントを 2 端子コンセントに変更

3.3.2 アースありノイズカットフィルタ

TEXIO 電源のコンセントを 2 端子に変更した状態で前節で使用したノイズカットフィルタを AC 電源に付けてノイズを測定した。測定結果を図 35 に示す。結果から、DC+5V と AD 変換直前の差分の電圧両方の XY ノイズが目標の 0.5V 以下に減少している。しかし、この状態で読み出しノイズの測定を行ったが、これまでと同様に読み出しが勝手に行われ、異常に高いノイズが検出された。通常ならばオシロスコープ上のノイズが減少すると読み出しノイズも低くなると考えられるが、本研究が対象とするノイズはアースから流入しているため通常のノイズとは異なった振る舞いをするという可能性が考えられる。

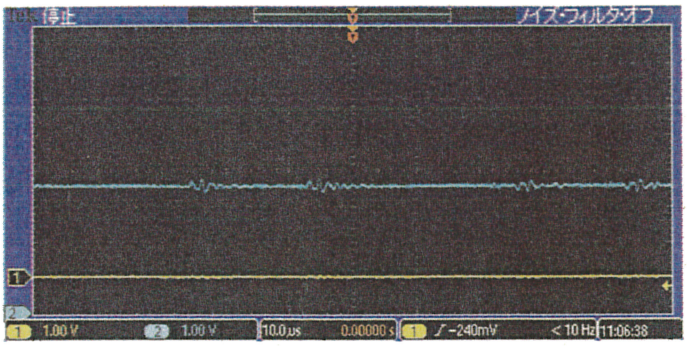


図 35: 望遠鏡 ON、TEXIO の電源を望遠鏡から供給。TEXIO 電源のコンセントを 2 端子コンセントに変更。AC 電源用ノイズカットフィルタを付けた状態でのノイズ

3.3.3 アースなしノイズカットフィルタ

ノイズカットフィルタを介してもアースが関わると読み出しノイズが異常に高くなると考え、TEXIO 電源のコンセントを 2 端子にして、AC 電源用ノイズカットフィルタのアースを繋がない状態でノイズと読み出しノイズの測定を行った。オシロスコープ上での波形を図 36、読み出しノイズの測定結果を図 37 に示す。

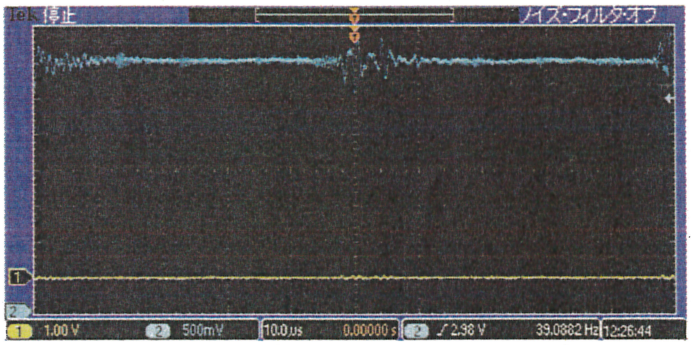


図 36: TEXIO 電源のコンセントを 2 端子コンセントに変更。AC 電源用ノイズカットフィルタのアースを繋がない状態でのノイズ

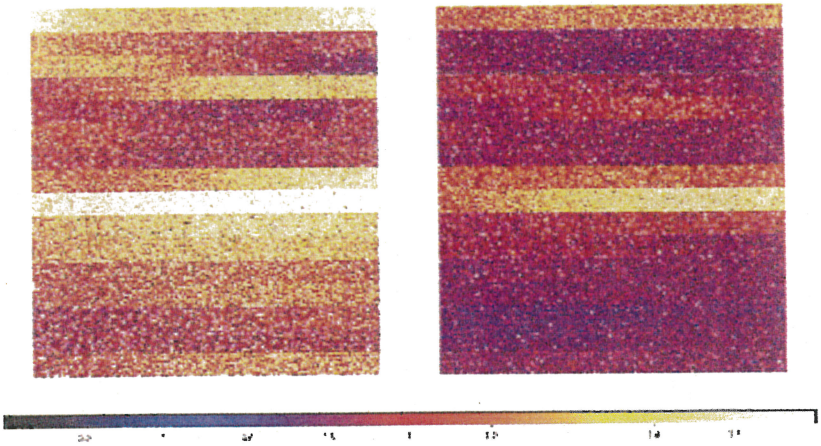


図 37: TEXIO 電源のコンセントを 2 端子コンセントに変更。AC 電源用ノイズカットフィルタのアースを繋がない状態での読み出しノイズ。　横軸：ADU　左：望遠鏡電源 ON、13〜16ch ノイズ平均 1.28ADU 右：望遠鏡電源 OFF、13〜16ch ノイズ平均 0.93 ADU

図 37 を見ると、望遠鏡 ON の時に若干ノイズが高くなってはいるが、望遠鏡 ON/OFF に関わらず読み出しが行われている。しかし、fits データを見てみると 10 回の読み出しを行いその標準偏差を取るはずが 9 回しか読み出しが行われておらず、同じ条件で何度測定を行なっても 10 回中 9 回しか読み出しが行えなかった。この条件ならば望遠鏡を ON にしても読み出しが行えるが、アースを取っていないため電気的に不安定であるので、このまま VIRGO に繋ぐと VIRGO に悪影響を与える恐れがある。その為、この条件の下で TEXIO 電源のアースの取り方を模索した。以下に行った対策を述べる。

- HONIR 筐体

TEXIO 電源のコンセントから伸びている取り外し可能なアースをワニ口クリップを用いて HONIR 筐体と繋ぐことで、HONIR 筐体からグラウンドを取った。その時のオシロスコープ上での波形を図 38 に示す。結果を見ると、非常に大きなノイズが乗っているのが分かる。これは、HONIR 筐体はかなた望遠鏡に搭載されているため同電位になっており、かなた望遠鏡のモーターから生じているノイズがアースから流入している為だと考えられる。この状態で読み出しノイズの測定を行ったが、勝手に読み出しが行われ、異常に高いノイズが検出された。

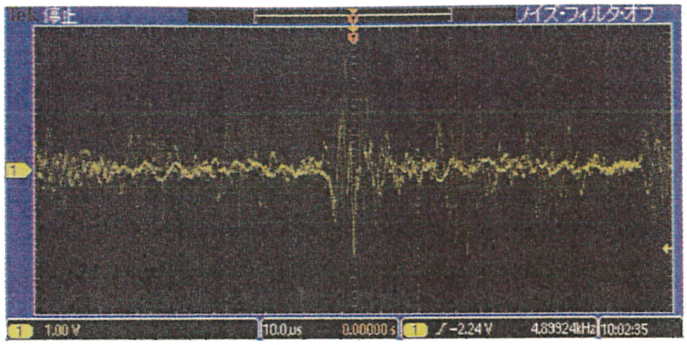


図 38: 望遠鏡 ON、TEXIO の電源を望遠鏡から供給。AC 電源用ノイズカットフィルタあり。TEXIO 電源を HONIR と接地した状態でのノイズ

- ドームグラウンド

HONIR 筐体と繋いだ時と同様に、アースとドームグラウンドとを繋いだ。測定結果を図??に示す。HONIR 筐体と接地した時と同様に、非常に大きなノイズが乗っているのが分かる。この状態で読み出しノイズの測定を行ったが、勝手に読み出しが行われ、異常に高いノイズが検出された。やはり、アースが関わるとノイズ・読み出しノイズ共に急激に上昇し、読み出しが正常に行えないようである。

以上が AC 電源に対して行った対策である。

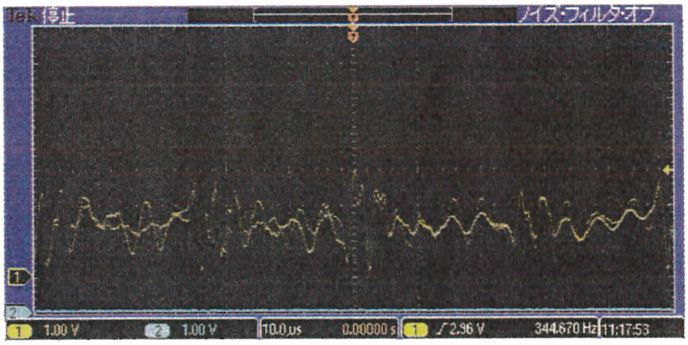


図 39: 望遠鏡 ON、TEXIO の電源を望遠鏡から供給。AC 電源用ノイズカットフィルタあり。TEXIO 電源をドームグラウンドと接地した状態でのノイズ

3.4 DC 電源への対策

ドーム全体のグラウンドにノイズが乗っているということは、現在 VIRGO 読み出しに使用している MACS2 の TEXIO 電源にもノイズが乗っていると考えられる。これを調べるために望遠鏡電源を ON にした状態での TEXIO 電源の出力端子からの波形をオシロスコープを用いて測定した。測定結果を図 40 を示す。

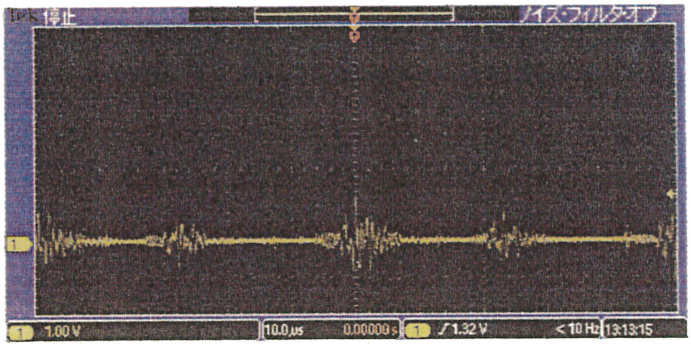


図 40: 現在 MACS2 に電源を供給している TEXIO 電源の波形

結果から、MACS2 に使用している TEXIO 電源にもノイズが乗っていることが判明したが、MACS2 ではノイズが乗っているにも関わらず読み出しは問題なく行われている。この事から、MACS2 には新システムには無いノイズフィルタ回路が実装されており、その回路の働きによって読み出しが行えているのではないかと考えた。そこで、これまで行なってきた AC 電源への対策ではなく、3 端子のアース付きコンセントに戻し TEXIO 電源から新システムへと供給される DC 電源への対策を行うことにした。以下に DC 電源へ行ったノイズ対策について述べる。

3.4.1 バイパスコンデンサ

$1\mu F$,$220\mu F$ のコンデンサをそれぞれ図 41 のように TEXIO 電源の出力ーグラウンド間に噛ませることでバイパスコンデンサとし、これまでと同様にノイズの測定を行った。オシロスコープ上でのノイズの測定結果を図??に、読み出しノイズの測定結果を図 43 を示す。

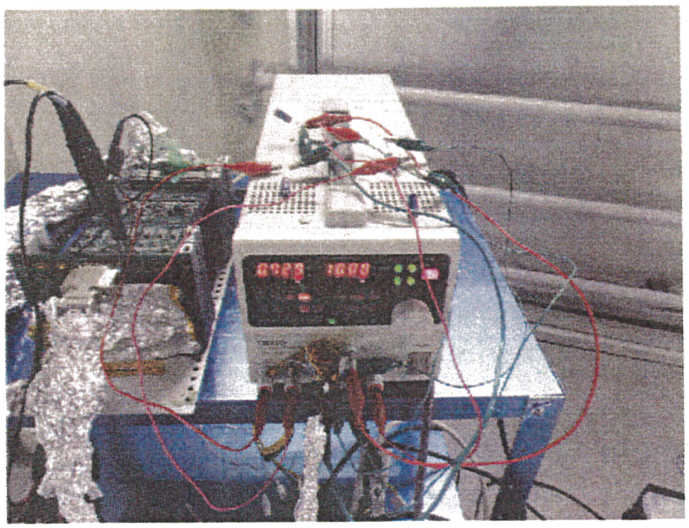


図 41: バイパスコンデンサの付け方

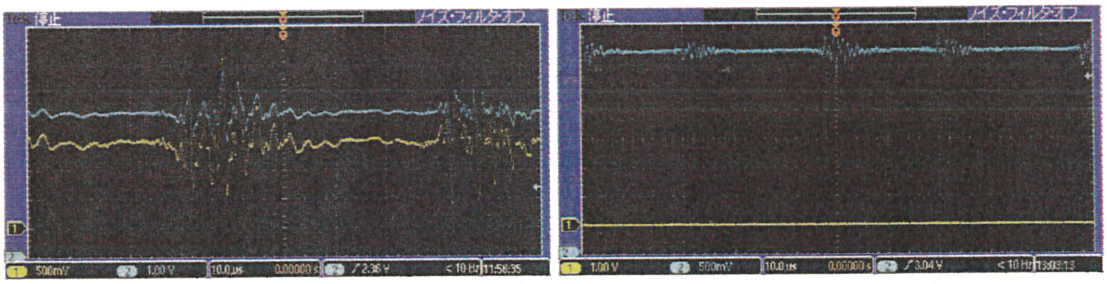


図 42: 望遠鏡電源 ON/*cdot*TEXIO 電源の出力－グラウンド間にバイパスコンデンサを付けた状態での読み出しノイズ　横軸：ADU　左：220μF　右：1μF

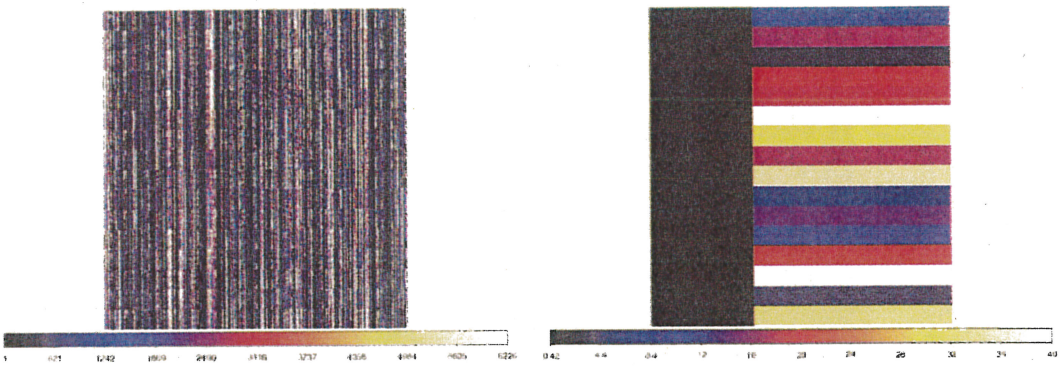


図 43: 望遠鏡電源 ON/*cdot*TEXIO 電源の出力－グラウンド間にバイパスコンデンサを付けた状での読み出しノイズ　左：220μF　右：1μF

220μF の時は読み出しが 10 回中 5 回程しか読み出しが行えず異常に高いノイズが見られ、1muF の時は 10 回の読み出しが行えたが今までに見たことがないパターンの画像が得られた。1μF の時のような画像ができる原因として、何らかの通信トラブル、もしくは 10 枚の画像の標準偏差を取る際に 10 枚の内 1 枚でもこのような画像になっていれば、標準偏差を取った画像もこのようになると考えられる。

3.4.2　2 次 RC ローパスフィルタ

バイパスコンデンサと同様に TEXIO 電源の出力部に 2 次 RC ローパスフィルタを噛ませて、オシロスコープ上でのノイズを調査した。回路はノイズの周期である 1MHz の時に高い減衰率を示すように設計を行った。回路は

1.$R_1 = 120\Omega, R_2 = 1k\Omega, C_1 = 10nF, C_2 = 1nF, 1MHz$ で $-30db, \tau \approx 6\times10^{-6}s$

2.$R_1 = 10\Omega, R_2 = 100\Omega, C_1 = 1\mu F, C_2 = 0.1\mu F, 1MHz$ で $-70db, \tau \approx 10^{-4}s$

の 2 種類を作成した。ローパスフィルタを用いて測定を行ったが全くノイズを軽減できなかった。回路を作成した際に、実験室にてジェネレーターを用いて 1MHz の信号を流し動作を確認したが、その時は正常に作動していた。この事から、ノイズを軽減出来ていないのはローパスフィルタの繋ぎ方を間違えた人為的なミスか、そもそも本研究が対象としているノイズには効果が無いのではないかと考えられる。

3.5 ノイズ対策のまとめ

望遠鏡モーターで生じているノイズが読み出しシステムに侵入することで読み出しに影響を与えていると考え、ノイズ周期 1MHz に対して高い減衰率を示す市販の AC 電源用ノイズカットフィルタ、DDC 電源へはバイパスコンデンサや自作の RC ローパスフィルタを用いて対策を行ったが効果はなかった。効果がなかったのは、グラウンドを介して侵入するノイズを防ぐことができなかった為であると考え、TEXIO 電源のコンセントをアースあり 3 端子コンセントからアース着脱式 2 端子コンセントに変更し、物理的にグラウンドからのノイズを遮蔽した。その結果、読み出しを行える条件があることを発見したが、アースを取っていないため電気的に不安定になり VIRGO の読み出しを行うと VIRGO が故障する可能性があり、また、10 回の読み出しを行えないことがあるなどの問題が残っている。これらの問題を解決するために次章では違う目線からこのノイズの原因と対策を考えていく。

4 通信障害とreferenceピクセル

前章までは、ノイズの原因が望遠鏡から読み出しシステムに侵入するモーター由来のノイズが原因だと考えていたが、本章では通信障害について考えた。

4.1 グラウンドのゆらぎによる通信障害

現在、読み出しシステムの電源(TEXIO電源)は望遠鏡から、PCの電源はドーム内壁から供給して、望遠鏡電源のON/OFFを切り替えて調査を行なっている。2章の調査結果より、望遠鏡の電源をONにすると望遠鏡からの電圧には～1.5V、壁からの電圧には～0.5Vの振幅のノイズが乗っている。つまり、データのやり取りをする際に、PC側のLVDSボード等から見ると読み出しシステム側のIFボード等には最大1VのBiasが掛かっていることになる。また、望遠鏡と壁のグラウンドは大元では共通の箇所から取っているが、大元までの距離が離れているため望遠鏡モーターから発生したノイズが大元のグラウンドを経由して壁の電圧に乗るまでに遅延が生じ、望遠鏡からの電圧のノイズと壁からの電圧のノイズには位相のズレが生じる。以上をまとめると、現在の電源の供給法だとPCと読み出しシステムとの間には

・供給する電圧に乗っているノイズの振幅が異なるため、PCから見ると読み出しシステムの電圧にはBiasが掛かっている。

・グラウンドの位相にズレがあり、且つ、大きく揺らいでいる。

という問題があると考えられる。これを解決するためにPCと読み出しシステムの電源を共に望遠鏡から供給・イーサネットケーブルをシールドが付いているcat7に変えることでLVDSボードと読み出しシステムのグラウンドを一致させ、これまでは正常に読み出しを行うことができなかった条件であるTEXIO電源3端子コンセント・望遠鏡電源ON・ケーブルを付けた状態での読み出しをドーム内にて行った。また、測定結果を図44に示す。

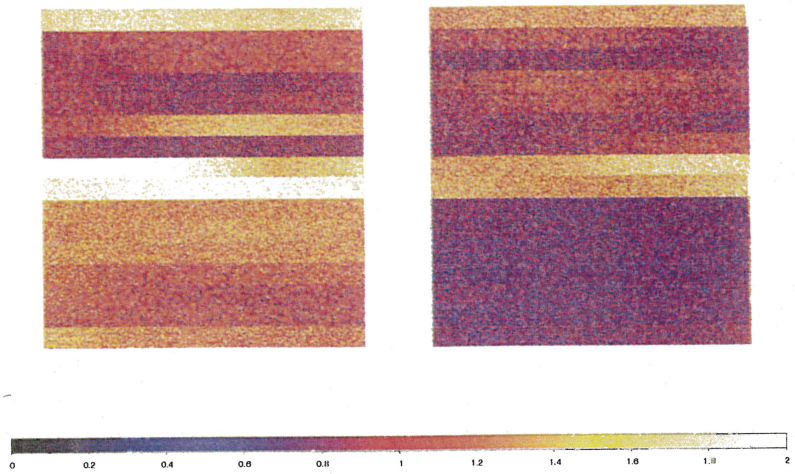


図 44: PC と読み出しシステムの電源を共に望遠鏡から供給 · ケーブルを付けた状態での読み出しノイズ
横軸：ADU　左：望遠鏡電源 ON、13〜16ch ノイズ値平均 1.12ADU　右：望遠鏡電源 OFF：13〜16ch ノイズ値平均 1.01ADU

今までとは異なり、望遠鏡電源を ON にしてもノイズが異常に高くなることなく読み出しが行えた。また、勝手に読み出しが行われるという問題も見られなかった。この事からノイズが異常に高くなるのと勝手に読み出しが行われるという問題の原因は電源の供給箇所の違いによる電圧の Bias、グラウンドの位相のズレによって生じる通信障害だったと考えられる。前章で行ったローパスフィルタ等の望遠鏡電源からの電圧に対する対策が効果がなかったのは、異常な高ノイズの原因がグラウンド差による通信障害だったためである。

4.2　スクリプトの見直し

4.2.1　ドーム内での冷却 **VIRGO** 読み出し

望遠鏡 ON による異常な高ノイズの問題を解決したので、読み出しシステムを冷却用に設定し HONIR に搭載されている冷却状態の VIRGO 検出器の読み出しに取り掛かった。測定結果を図 45 に示す。

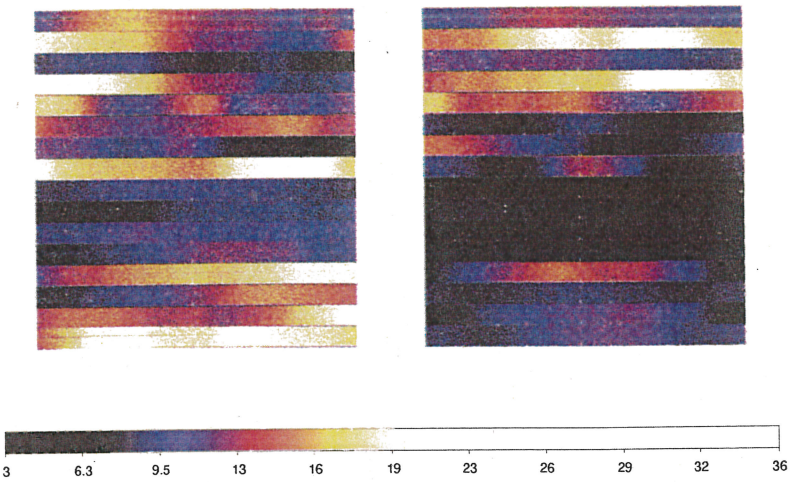


図 45: ドーム内での冷却 VIRGO 読み出しノイズ　横軸：ADU　左：望遠鏡 ON、全 ch ノイズ値平均 12.7ADU　右：望遠鏡電源 OFF、全 ch 平均ノイズ値 13.6ADU

結果から、望遠鏡 ON でも読み出しを行なうことができ、望遠鏡電源 ON/OFF でのノイズの差は見られない。また、fpc クロックを送った段階で勝手に読み出しが行われるという問題も起きなかった。しかし、10 回の読み出しを行うはずが 7〜9 回しか読み出しが行えないことがあった。

4.2.2 読み出し失敗への対策

冷却 VIRGO 読み出しの際に、ケーブルを付けた状態での読み出しでも度々見られていた読み出しの失敗が確認された。読み出しに失敗する時の原因を調査するために、VIRGO 読み出しを行った時の画像を確認し、失敗するときの共通点がないかを調べた。すると、読み出しに失敗する直前の画像とそれ以外の画像とを比べるとカウント数に差があることが判明した。図 46 に読み出しに失敗した直前と失敗する直前以外の差分を取る前の画像を示す。

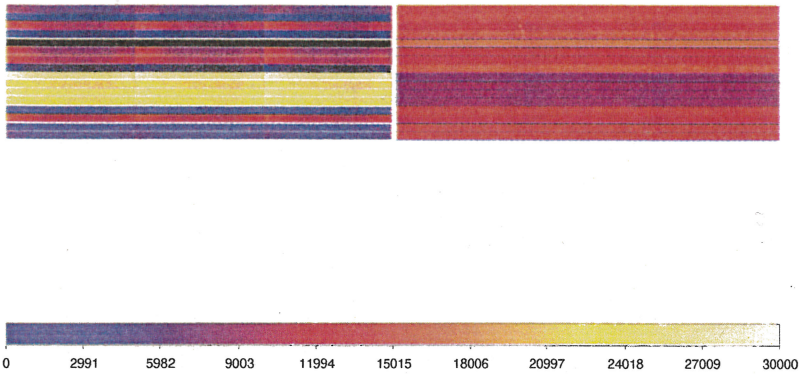


図 46: 読み出しに失敗した時の直前とそれ以外の差分を取る前の画像　左：読み出し失敗直前　右：読み出し失敗直前以外

図 46 を見ると、読み出し失敗直前のカウント数はそれ以外の時の約半分に減少している。カウントが減少するという事は reference 電圧か signal 電圧に異常があるという事である。そこで、どちらに異常があるかを確認するために読み出し失敗直前とそれ以外の時の reference ピクセルを比較した。図 47 に比較した画像を示す。尚、reference ピクセルは検出器を含めた暗電流量を読んでいるため、検出器を接続していないボード単体の読み出しとケーブルを付けた状態での読み出しでは reference ピクセルと通常のピクセルは等しくなる。

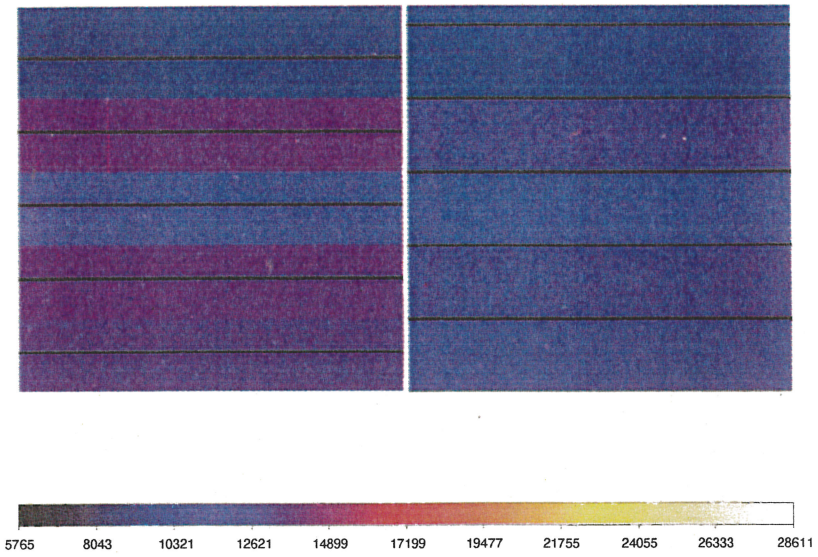


図 47: 読み出しに失敗した直前とそれ以外の時の reference ピクセルの拡大画像　左：読み出し失敗直前　右：読み出し失敗直前以外

図 47 を見ると、本来ならば reference ピクセルはチャンネルとチャンネルの間にあるはずが、読み出し失敗直前の reference ピクセルはチャンネルのほぼ中心にある。reference ピクセルの位置がズレるのは、失敗直前の画像処理の際、CPU が受け取ったデータ数が何らかの原因で frp で指定した数よりも少なくなっており、読み出しのピクセルがずれている為であると考えられる。データ数が少なくなる原因としては、frp を CPU に送信し、画像処理の体制が整う前にデジタルデータが読み出しシステムから CPU に送信され、その間に CPU が受信したデータは認識されないため結果としてデータ数が減少したことになると考えられる。また、読み出しに失敗する時のエラーとして、クロックを送っている途中で「cannot open a dio board」と表示される。DIO ボードは図 12 でも説明したように CPU と LVDS ボードを繋ぐ役割を果たしている箇所である。DIO ボードを開くことができないということはつまり、クロックを CPU から読み出しシステムに送信できない状態になっていることを表している。この原因として

・ CPU からクロックを送ろうとした時に読み出しシステムから LVDS ボードを通してデジタルデータが送られてきており、LVDS ボードがクロックとデジタルデータの送受信の並列処理ができず、データの受信

中に送られてきたクロックがキャンセルされている。

・ クロックを送っている最中に CPU の画像処理が行われ、データの受信をキャンセルし、クロックの送信が途中で中断され、その結果 DIO ボードまでクロックが来なくなる。

などが挙げられる。以上から、失敗直前の読み出しにおいて CPU が frp によって指定されたデータ数を受け入れる体制が整う前にデータが読み出しシステムから CPU に送信され、その間のデータは認識されないため CPU がデータ数が足りないと判断し、次の読み出し、つまり失敗した時の読み出しのデータを受け入れることで 1 枚の画像を生成するために必要なデータ数の帳尻を合わせる。指定したデータ数を受信した段階で画像処理を開始し、その間はクロックの送信を行うことができないため読み出しに失敗するのだと考えられる。

この問題の対策として現在読み出しに使用しているスクリプトの一部を変更した。現在は

・ frp→clp→reset→sleep 2s

を一回の読み出しとして、これを 10 回繰り返しているが

・ frp→sleep 1s →clp→reset→sleep 1s

のように frp と clp の間に 1 秒間の sleep を導入した。このスクリプトを用いて望遠鏡電源 ON での冷却 VIRGO の読み出しを合計 100 回行ったところ失敗は確認されず、rederence ピクセルの位置のズレもなかった。読み出しに失敗するメカニズムを図 48 にまとめた。

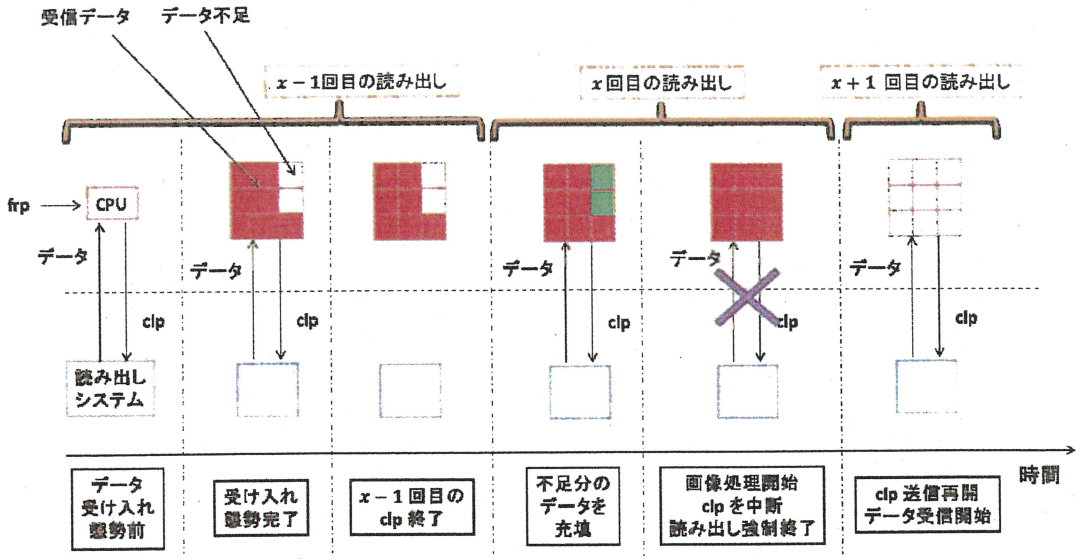


図 48: 読み出しに失敗するメカニズム。x = 読み出し失敗

4.3 読み出しノイズ軽減対策

変更したスクリプトを用いて読み出しを行った望遠鏡電源 ON/OFF での冷却 VIRGO のノイズを比較した。比較結果を図 49 に示す。

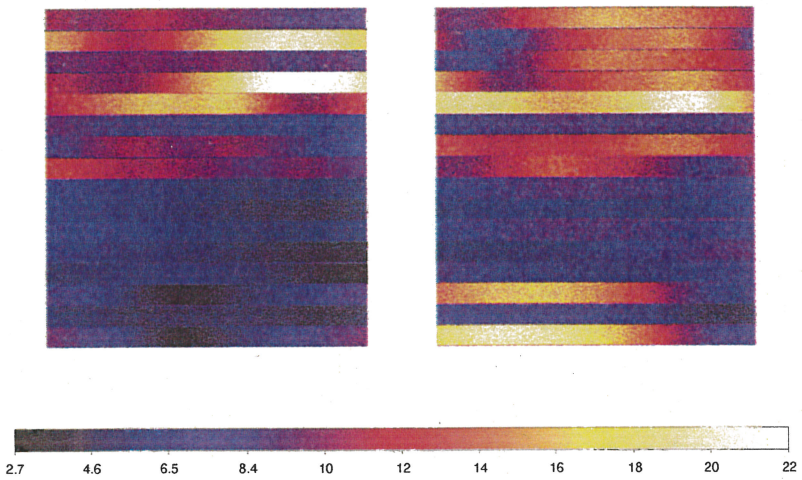


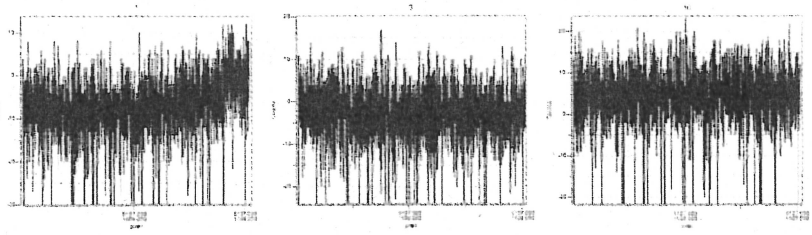
図 49: スクリプト変更後のドーム内での冷却 VIRGO 読み出しノイズ　横軸：ADU　左：望遠鏡電源 ON、全 ch ノイズ値平均 11.86ADU　右：望遠鏡電源 OFF、全 ch ノイズ値平均 11.59ADU

結果から望遠鏡電源 ON/OFF によるノイズの差は見られなかった。しかし、望遠鏡 OFF での読み出しノイズは実験室での読み出しに比べて平均で 7ADU、つまり 60e^- 程上昇しており、ノイズ値平均をエレクトロンに換算すると 90e^-〜と、ノイズ目標値の〜30e^- を大きく上回ってしまっている。本節ではこの原因と対策を考えていく。

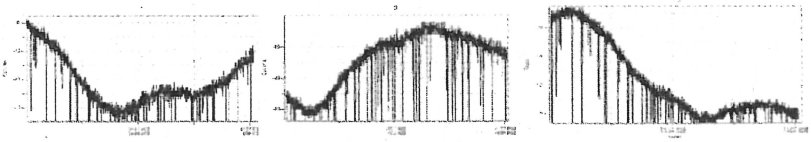
4.3.1 reference ピクセルのゆらぎとその補正

ノイズが大きい原因は、1 枚 1 枚の画像間のカウント差が大きく、その 10 枚の標準偏差を取っているためであると考えられる。カウントは signal 電圧と reference 電圧の差を表しているので、referencce 電圧のゆれがどの程度あるのかを確認するために前節と同様に reference ピクセルのカウントを確認した。比較には

実験室とドームでの冷却 VIRGO 読み出しのそれぞれ望遠鏡電源 OFF、1·3·10· 回目の読み出し画像の 12ch と 13ch の間にある reference ピクセルを用いた。1·3·10 回目の画像を比較に用いるのは、PC の容量の関係で実験室での読み出しノイズと 1·3·10 回目の読み出し以外のデータを削除してしまった為である。図 50 に比較画像を示す。



(a)



(b)

図 50: 冷却 VIRGO 読み出しの reference ピクセルカウントのゆらぎ (a) 実験室 · 望遠鏡 OFF　(b) ドーム · 望遠鏡 OFF

結果から、実験室での読み出しでは reference ピクセルのカウントはほぼ一定であり 0 カウント付近であるが、ドーム内での読み出しではカウントが大きくゆらいでいるのが分かる。また、ドーム内での reference ピクセルは何故かマイナスの方向 (低カウント) にのみ伸びているものも見られる。この事から、本小節の冒頭で述べたように、実験室に比べてドーム内での読み出しノイズが高いのは、画像間の reference ピクセルのゆらぎによる通常の signal−reference ピクセルでのカウントの変動が原因であると考えられる。reference ピクセルのゆらぎについて更に詳しく調べるために、先程比較に用いた読み出し画像の 1〜10 回目の reference ピクセルを調べた。図 52 に画像を示す。

図 52 から、ほぼ全ての読み出し回において負の方向にのみ伸びているものが見られ、また、reference ピクセルのゆらぎには何らかの周期性があり大きくゆらいでいることが分かる。序論でも述べたように、一度の読み出しには 1.2s 掛かり、1 枚の画像を生成するには最初のリセット中の読み出し、積分前 · 後での読み出しの計 3 回の読み出しと、次の読み出しを行うまでの間と frp と clp の間にそれぞれ 1s の sleep の計約

6.6s 掛かっている。つまり、読み出し回数間には 6s 以上の間隔があり、図 52 に見られる周期性は秒単位の周期を持ってゆらいでいるという事になる。同様にして短いスケールでの reference ピクセルのゆらぎを観察した。図 51 に図 50 を拡大した短いスケールでのゆらぎの画像を示す。

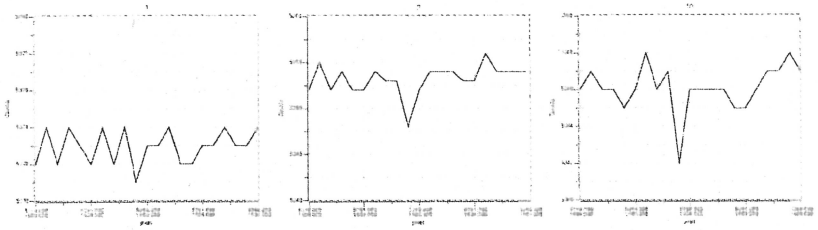
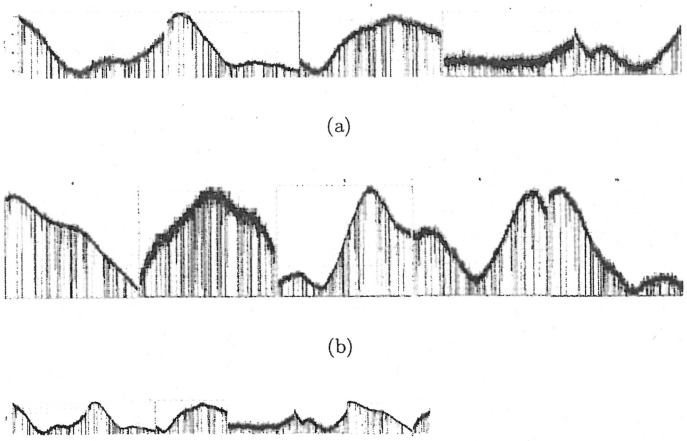


図 51: 図 50(b) の拡大図

図 51 を見ると、20 ピクセルの間に 5〜7 回のゆらぎのピークが来ている。序論より、1ch 分のピクセル数は 128×2048、読み出しに掛かる時間は約 1.2s なので、1 ピクセルを読むのに掛かる時間は $\frac{1.2s}{128\times2048pix} \approx 4.6\times10^{-6}s/pix$ となる。よって、図 51 から見られるゆらぎの周期は約 1MHz となる。この周期は望遠鏡モータからの電源に乗っているノイズの周期とほぼ等しいことから、reference ピクセルの細かいゆらぎは望遠鏡からのノイズが原因であると考えられる。以上から、reference ピクセルは細かい MHz スケールの成分と秒スケールの緩やかなノイズが組み合わさったノイズが原因でゆらいでおり、細かい成分は望遠鏡モーターが原因であると考えられるが緩やかなノイズの原因は判明していない。また、読み出しノイズが大きい原因が reference ピクセルのゆらぎだとすると、標準偏差を取る前の差分後の 10 枚の画像の各チャンネルから、そのチャンネルに相当する reference ピクセルのカウントの平均を差し引き、この処理を各チャンネル計 16 回行い 1 枚の画像を生成し、この処理を行った 10 枚の画像の標準偏差を取ることで reference ピクセルのゆらぎ成分を補正した読み出しノイズを得ることができるはずである。上記の補正を行った後のドーム内での読み出しにおける望遠鏡 OFF での reference ピクセルのゆらぎを図 53、補正前後の読み出しノイズの比較画像を図 54 に示す。

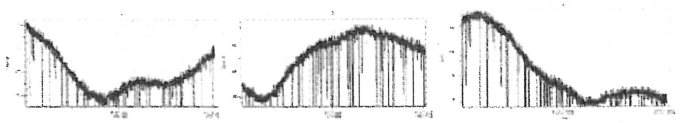


(a)

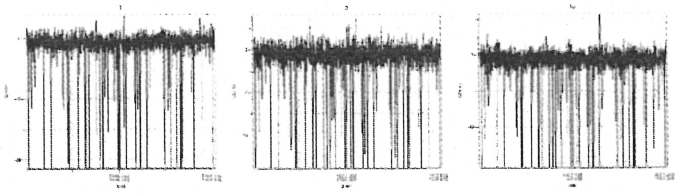
(b)

(c)

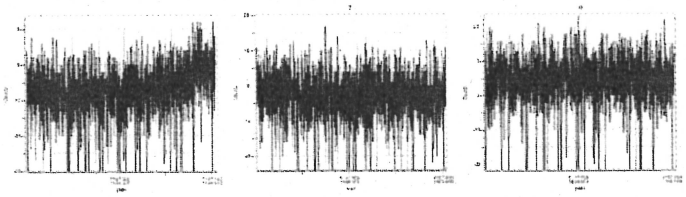
図 52: 望遠鏡 OFF· ドームでの冷却 VIRGO 読み出し画像 (回数) 間の reference 電圧のゆらぎ (a)1〜5 回目 (b)6〜10 回目　(c)1〜10 回目



(a)



(b)



(c)

図 53: 望遠鏡 OFF·reference ピクセルを用いた補正後と補正前の reference ピクセルのゆらぎ比較。(a) ドーム内、補正前の 1·3·10 回目の reference ピクセルのゆらぎ (図 50)　(b)　a の画像を補正した後の reference ピクセルのゆらぎ　(c) 実験室、補正前 (図 50)

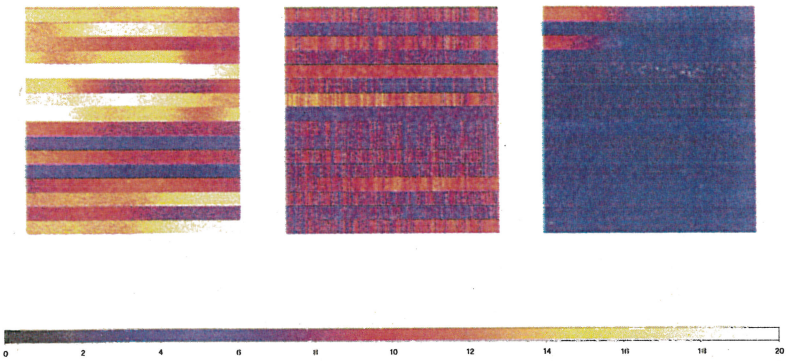
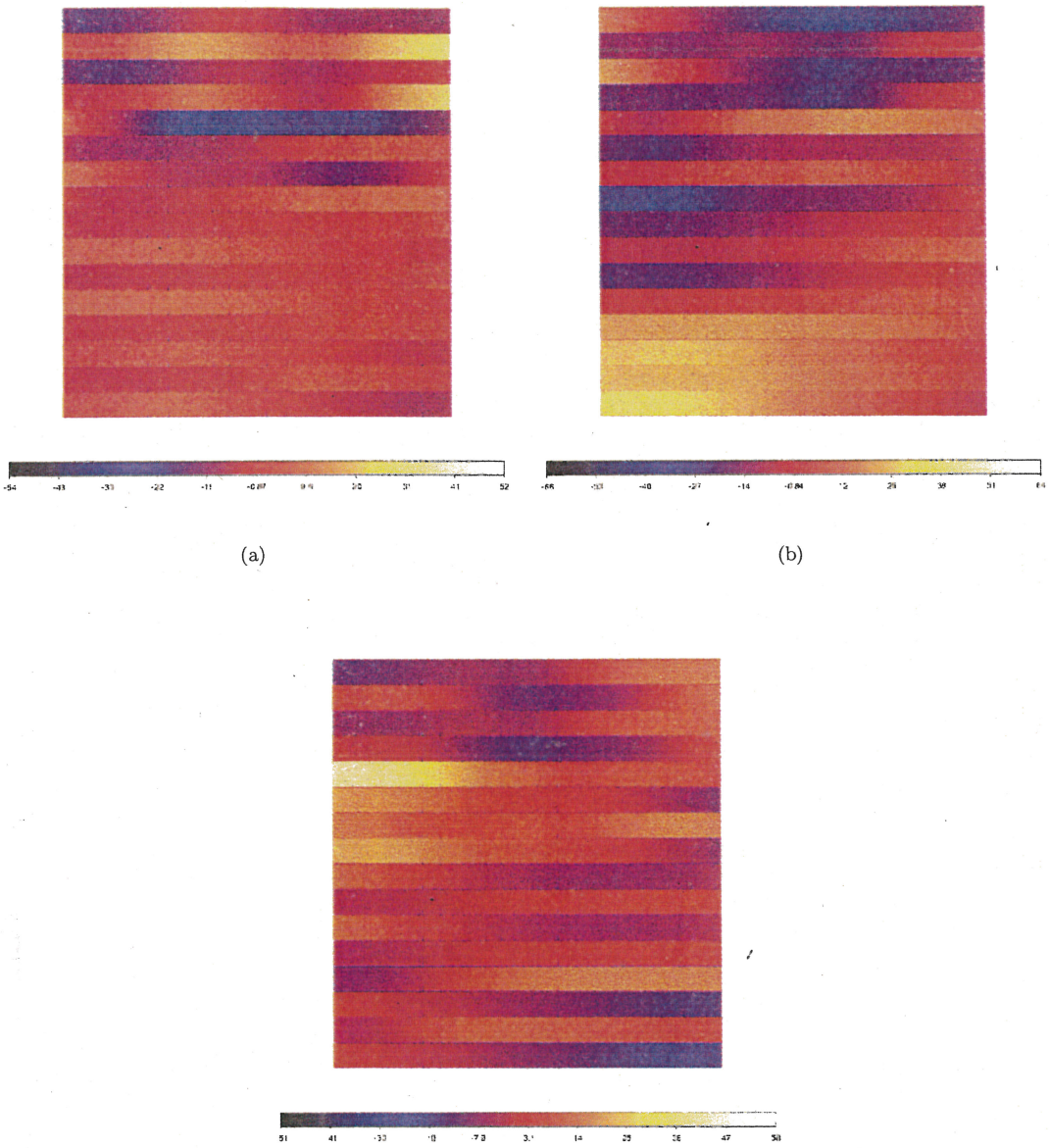


図 54: 望遠鏡 OFF·reference ピクセルを用いた補正後と補正前の読み出しノイズ比較。　横軸：ADU
左：ドーム内、補正前、全 ch ノイズ値平均 11.59ADU(図 49)　中：ドーム内、補正後、全 ch ノイズ値平均 7.46ADU(左を補正)　右：実験室、補正前、1〜8ch ノイズ値平均 3.39ADU(図 19)

図 53 を見ると、補正前に比べると reference ピクセルのゆらぎはなくなっており、実験室でのゆらぎと同様に 0 カウント付近で変動しているのが分かる。しかし、マイナス方向に伸びるノイズを補正することはできていない。図 54 を見ると補正前に比べて平均で 4ADU 程読み出しノイズが減少してはいるが、エレクトロン換算でノイズ目標値の〜$30e^-$ には届かず、約 $60e^-$ となった。また、図 54 の特徴として、縦に線状のノイズが走っていることが分かる。これは恐らく、図 53 にも見られたマイナス方向に走っているノイズが原因だと思われ、補正を行なってもこの線状のノイズに引っ張られることで全体としてのノイズを抑えることが出来ていないのではないかと考えられる。つまり、この線状のノイズを除去することができればrefernce ピクセル補正を用いることで読み出しノイズを抑えることができるのではないかと考えられる。

4.3.2　reference ピクセルに現れる線状ノイズに関する考察

線状のノイズについて詳しく調べるために、補正前の差分後の画像を調査した。図 55 に、図 53 に載せた 1·3·10 回目の読み出しで得られた差分後の画像を示す。



(a)

(b)

(c)

図 55: 補正前の 1·3·10 回目の読み出しで得られた差分後の画像。(a)1 回目の読み出し (b)3 回目の読み出し (c)10 回目の読み出し

図 55 を見ると、各チャンネルの下側にある reference ピクセルから縦に小さなノイズが走っているのが

分かる。このノイズが走っている箇所を拡大して見てみる。図 56 に reference ピクセルの拡大図、また、図 57 に VIRGO の 1 チャンネル分のピクセルの読み出し方法の概念図をを示す。

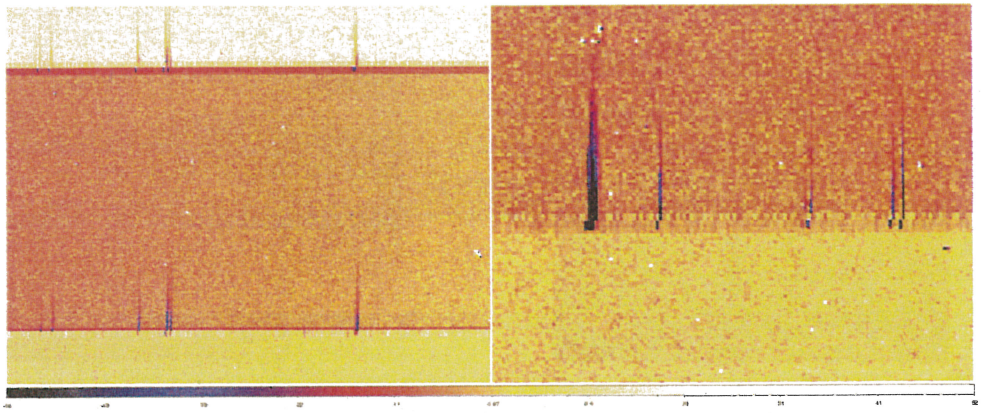


図 56: reference ピクセルの拡大図　左：1ch 分の拡大図　右：左図下側の reference ピクセル拡大図

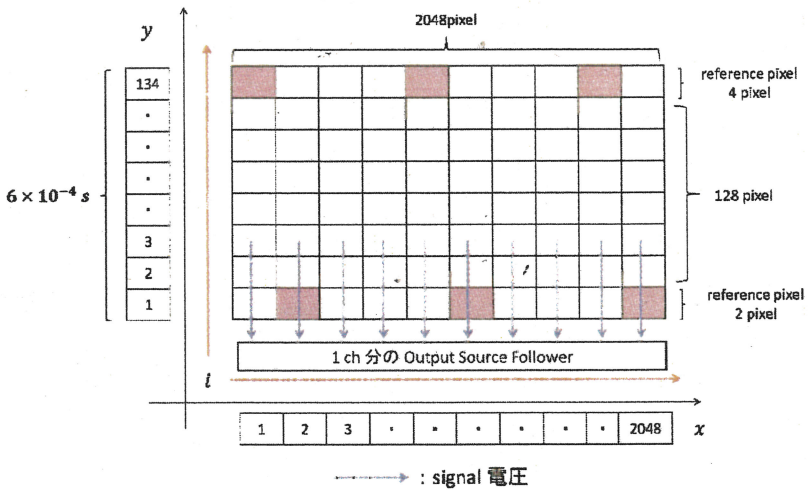


図 57: VIRGO の 1ch 分のピクセルの読み出しの順番

57 に示した通り、VIRGO のピクセルを読み出す順番というのは、各 16ch が同時にそれぞれの (x,y)=(1,1),(1,2)

と順に読み出していき、(1,134) まで読み出すと、列を右にずらし (2,1) から順に (2,134) まで読み出す。これを繰り返していき (2048,134) まで読み出すことで 1ch 分の読み出しを行っており、1ch 分の読み出しには約 1.2s 掛かることから (序論参照)1 列 134 ピクセルを読み出すのに掛かる時間は約 $6 \times 10^{-4}s$ である。図 56 から確認できる症状として、1 列の読み出しを終了し、次の列の読み出しに移るときにカウントが低くなっており、それによって図 53 に見られるようなマイナス方向に伸びるノイズとして現れてしまっている。また、VIRGO では各ピクセルが signal 電圧を Output Source Follower に出力するために、新システムの定電流回路で生成した電流 i を読み出すピクセルに流している。つまり、ピクセルに流す電流と出力される signal 電圧には密接な関係があり、電流が小さくなれば signal 電圧も小さくなってしまう。以上から reference ピクセルのカウントの減少によるマイナス方向へ伸びているノイズの原因として、1 列の読み出しが終わり次の列の読み出しに移る際、ピクセル間の読み出し間隔は $4.5 \times 10^{-6}s$ と非常に短く、読み出し列の切り替わりに電流供給の速度が付いて行けず、列の最初の数ピクセルでは電流不足の状態で signal 電圧の出力を行うためカウントが小さくなり、読み出しを行なっている最中に電流の供給が追い付きカウントが正常に戻ると考えられる。また、列の最後のピクセルのカウントが低くなっているのも、読み出し列の切り替わりによる影響だと考えられる。この問題の対策として、読み出しの速度が若干遅くなってしまうが、クロックの周期を遅らせることで電流がクロックに置いて行かれることなく読み出しを行い、得られた画像に対して reference 補正を行うことで読み出しノイズを軽減できると考えている。

4.3.3 reference ピクセルのゆらぎへの対策

reference ピクセルには線状のノイズ (極端にカウントが低い reference ピクセル)、細かい成分・緩やかな成分のノイズが乗っている。本小節では、細かい成分と緩やかな成分のノイズの原因について考察するために、現在 VIRGO の読み出しに用いている MACS2 の reference ピクセルのゆらぎを調べた。図 58 に画像を示す。

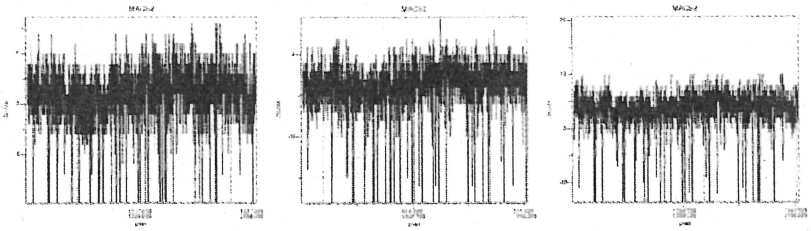


図 58: 実際の観測時に MACS2 で取得している画像の reference ピクセルのゆらぎ

図 58 を見ると MACS2 での reference ピクセルにも若干の変動はあるが、実験室での新読み出しシステムの冷却 VIRGO 読み出しと同レベルの変動であり、0 カウントを中心としてほぼ静定しているように見える。本小節では、MACS2 が低ノイズ ($\sim 30e^-$) での読み出しを行えて、新システムではできない原因を MACS2 と新システムの相違点から考察していく。

現在、VIRGO 検出器は HONIR に搭載されており、内部で HONIR 筐体に固定され、かなた望遠鏡 ·HONIR·VIRGO は同電位になっている。MACS2 はグラウンドピンを HONIR 筐体と VIRGO に伸ばすことでグラウンドを VIRGO と一致させている。更にシールドピンを HONIR に固定することで、かなた望遠鏡 ·HONIR·VIRGO·MACS2 のグラウンドを完全に一致させている。これによって、読み出しノイズの細かい成分の原因と思われる望遠鏡電源に乗っているノイズが、グラウンドが共通なのでキャンセルされ影響を受けずに読み出しが行えている可能性がある。それに対して新システムではグラウンドの取り方が甘くノイズが乗ってしまい細かなゆらぎが現れているのだと思われる。しかし、読み出しノイズに大きな影響を与えているノイズの緩やかな成分が何なのか、どのようにして MACS2 では抑えられているのかは未だに不明である。また、本研究の調査にて回路のショートなどを行なっていたため回路素子に負荷が掛かり、劣化もしくは故障している可能性がある。以上より、reference ピクセルのゆらぎへの対策として有効と思

われるものは

① 新システムのグラウンドの取り方を工夫する。

② 回路素子に対してジェネレーターなどを用いて、擬似的な検出器信号を送ることで不調がないか調査し、不調がある場合は素子の交換、もしくは一部設計のやり直し。

③ HONIR 内部で VIRGO が筐体と接地している箇所を切り離し、読み出しシステムも HONIR から電気的に切り離すことで、望遠鏡から電気的に浮かせる。

また、序論と前小節でも述べたように、signal 電圧の出力のために新システムの定電流回路で生成した定電流をカレントミラー回路で複製し VIRGO へと供給することで読み出しを行なっているが、定電流回路もしくはカレントミラー回路の素子の劣化などにより生成した電流がゆらいでおり、その結果 reference ピクセル ·signal 電圧がゆらいでいるとも考えられるため

④ 定電流回路とカレントミラー回路が設計した性能を発揮しているかを調査。

これらが挙げられる。

以上が本研究で行った内容である。

5 まとめと今後

本研究室で2011年度から開発が行われている、可視赤外線同時撮像カメラHONIRの赤外線検出器用の新読み出しシステムは、観測時の条件下で読み出しを行うとノイズが極めて高くなるという問題が報告されている。本研究ではこのノイズの改善に向けて調査・対策を行った。

調査の結果、望遠鏡の駆動モーターから非常に大きなノイズが発生しており、電源及びグラウンドに載りシステムに侵入していることが判明した。ノイズ周期の1MHzに対して高い減衰率をもつ市販のAC電源用ノイズカットフィルタを用いたが効果はなく、DC電源に対してもバイパスコンデンサやローパスフィルタを作成して対策を行ったが効果はなかった。そこで、読み出しシステムに供給する電源のノイズに対策を行うのではなく、別の視点からノイズの原因を調査を進めた。その結果以下のことが判明した。

① 望遠鏡電源をONにすることにより異常な高ノイズを検出する原因は、PCと読み出しシステムの電源供給箇所の違いによる電源のグラウンド差による通信障害。ローパスフィルタなどの効果が無かったのは、異常な奥ノイズの原因が回路に侵入する電圧ではなく、PC(LVDSボード)と読み出しシステム(IFボード)のグラウンド差による通信障害だったため。

② 時折読み出しに失敗することがあるが、これはfrpとclpの間に間隔がないことにより、PCのCPUのデータ受け入れ態勢が整っていない状態で読み出しシステムからデータが送信され、その結果1枚の画像を生成するのに必要なデータ数に届かなく、次の読み出しからデータを充填することで画像処理が開始され、clpが中断されるのが原因。

③ 読み出しノイズが高い原因はreferenceピクセル(暗電流)がゆらいでいる為。読み出しノイズはreferenceピクセルを用いることで補正することができるが、補正を行なってもreferenceピクセルのゆらぎや、電流供給の遅れが原因と思われる極端にカウントの低いrefereneピクセルのせいで、補正後の画像には縦に線状のノイズが乗ってしまう。

④ referenceピクセルのゆらぎは、緩やかな成分と細かい成分の2つが組み合わさったノイズが原因であり、細かい成分の原因は望遠鏡モーターからのノイズであると思われるが、緩やかな成分の原因については不明である。

今後はreferenceピクセルに悪影響を与えているノイズの原因の調査・定電流回路などの回路を調べることで設計性能を発揮できているかを確認し、クロックの周期を遅らせることでreference補正を上手く行えるかを確認する。また、グラウンドのとり方などを工夫することによりノイズへの対策を強化することによ

り、観測時の条件下でも正常な読み出しを行えるようにし、新システムでの観測に向けて環境を整え実用化を目指す予定である。

6 謝辞

本研究を行うにあたり川端先生には大変お世話になりました。天文台に移動中の車内では研究の話だけではなく、様々なお話をして下さりありがとうございます。大学院進学後も 2 年間お世話になると思いますが宜しくお願い致します。

宇井さんは博士論文の執筆中にも関わらず、私の質問に答えてくださりありがとうございました。名目上は共同研究者となっていましたが、実質、この研究は宇井さんが行ったものだと言っても過言ではないと思います。

東京大学の酒向先生、ノイズ調査のために広島に来てくださり誠にありがとうございました。論文の後半部分は酒向先生が来てくださらなければ書けなかったと思います。

他の皆様、本当はもっといっぱい謝辞を書いていたんですけど、卒論提出 3 日前にハードディスクが壊れまして、卒論のデータが消えちゃって謝辞を書く時間ありませんでした。すみません。

データ破損の件で感謝を述べたい方がいます。大野さん、お忙しい中 HDD の修理のために色々として下さりありがとうございました。事務の須藤さん、その節は大変お世話になりました。

ただ、個人的には HDD が壊れたことで笑いが取れ、話のネタができたので良かったです。就活のネタにもできそうです。

最後になりましたが、本研究に関わってくださった皆様に心より感謝申し上げます。

P.S. 皆さん、バックアップはこまめに取りましょう。

A　新読み出しシステムの詳細設定

A.1　新読み出しシステムの各種設定・性能

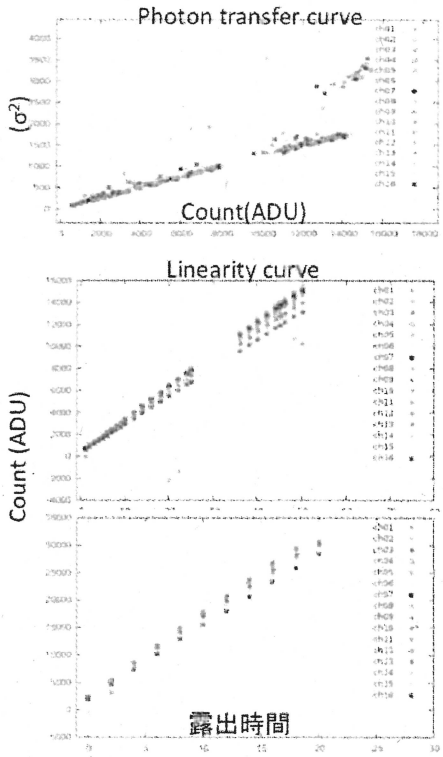
A.1.1　定電流回路とカレントミラー回路

A.1.2　コンバージョンファクタとリニアリティ

これから

です。

本文で述べたコンバージョンファクタとリニアリティについて宇井氏の調査結果を図 59 に示す。この結果は宇井氏の修士論文発表後にシステムの改修を行い、2014 年 11 月に HONIR 開発メンバーにより再調査が行われた最新のものである。調査方法は LED を照らして露光時間を変えながら同じ露出時間で 5 枚ずつ撮像を行い、5 枚の平均値と標準偏差から photon transfer curve を導出、その傾きをコンバージョンファクタとし、露出時間と平均カウントからリニアリティが保持されているカウント範囲のグラフを導出されたものである。尚、12ch のみ測定が上手く行われておらず未だに正確な原因は不明であるが、ADC ボードを入れ替えて測定をしても 12ch に相当する部分が上手く測定が行われていないため、12ch のみ VIRGO 側の電荷供給用 bus line に不具合が起こっているのではないかと考えられる。MACS2 は 4ch 読み出しのため 12ch の line を用いていないため影響はない。



コンバージョンファクタとリニアリティ

ch	e- / ADU	Linearity(e-)
1	7.9	201956.8
2	7.9	205615.4
3	8.0	211241.6
4	7.9	211453
5	7.9	212122.4
6	8.2	217776.4
7	8.1	213044.4
8	7.9	208423.5
9	8.0	210808.7
10	8.2	213863.6
11	8.0	209173.2
12		
13	8.0	203539.5
14	7.7	189927
15	7.9	191506.9
16	7.63	169366.2

図 59: コンバージョンファクタとリニアリティ[6]

A.1.3 ADC ボード

新システムに用いられている AD 変換器の変換可能レンジは 0〜3V であるが、VIRGO からの信号には 3V 程度のオフセットがかかっている。その為、preamp ボードで検出器の信号をそのまま増幅してしまうと AD 変換のレンジから外れてしまう。この問題を解消するために新システムの preamp ボードでは差動入力増幅回路が採用されており、オフセットを生成するための非反転増幅回路によって生成されたオフセット電圧との差分を取ることで AD 変換のレンジに収めることが可能となっている。更に、V_{out} と V_{ref} を後段の完全差動化回路に通すことでコモンモードノイズの除去が可能となっている。図 60、図 61 に作動入力増幅回路と完全作動化回路の回路図を示す。

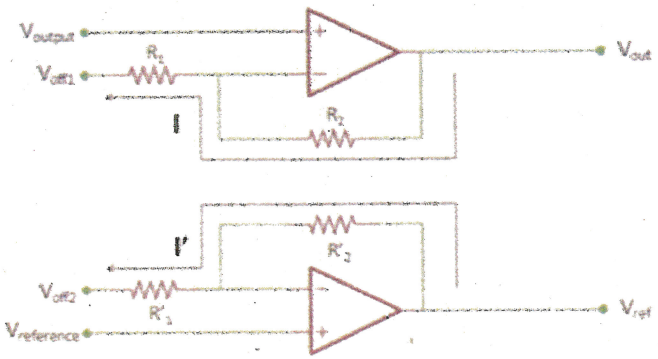


図 60: 作動入力増幅回路の回路図。V_{output}、$V_{reference}$ はそれぞれ検出器からの信号、V_{off1}、V_{off2} はオフセット電圧, V_{off}、V_{ref} はそれぞれ増幅後の信号 [7]

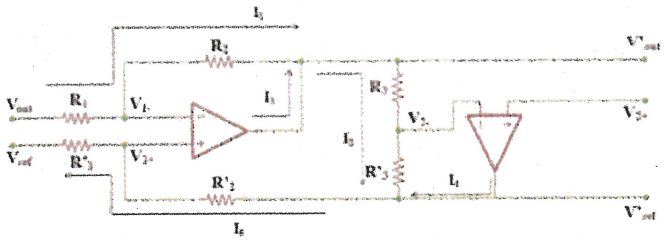


図 61: 完全作動化回路の回路図。V_{out}、V_{ref} はそれぞれ作動入力増幅回路からの信号。[7]

A.1.4 低温・常温用読み出し設定

検出器からの信号は温度によってオフセットの値が変わってくる。その為、低温状態と常温状態の検出器の読み出しで同じ設定で増幅を行うと AD 変換のレンジを超えてしまい、読み出しが上手く行えないことがある。前節にて述べたように、preamp ボードで検出器からの信号を増幅する際、非反転増幅回路にてオフセットを生成し信号との差分を増幅している。その為、生成するオフセットの電圧値を変更することで信号からのオフセットとの差を変えることができ、AD 変換のレンジ内に収めることができる。オフセット電圧の変更は可変抵抗の値を変えることで行う。本研究では低温読み出し時が OFF1 : 27.9Ω、OFF2 : 178.5Ω、常温読み出し時が OFF1 : 24.3Ω、OFF2 : 255Ω とした。また、同様の理由で図 62 の赤丸で囲った preamp ボード裏の定抵抗の抵抗値を低温読み出し時は 0Ω、常温読み出し時は 30$k\Omega$ とする必要がある。図 63 に非反転増幅回路の回路図を示す。

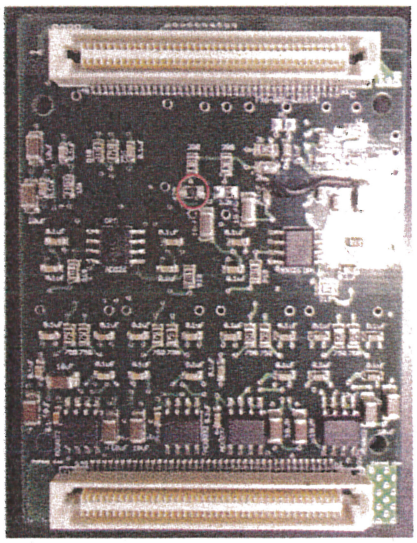


図 62: preamp ボードの裏面。常温時と低温時では赤丸で囲った抵抗を変更する。

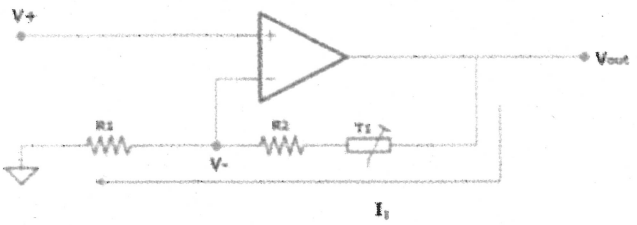


図 63: 非反転増幅回路の回路図。OP アンプの + 入力に V_+(基準電圧) を印加する。[7]

A.2 新読み出しシステムのデータ通信部

A.2.1 DIO ボード

新読み出しシステムでは市販されている DIO ボード (interface 社の PCI-Express ボード、PEX-292144) を用いている。DIO ボードには 16bit のデータの入出力を担当する 2 枚のボードがあり、それぞれ IF ボードなどへクロックパターンの出力を行う DIO ボードと、AD 変換が行われた後のデジタルデータが ADC ボードから入力される DIO ボードに分けられる。図 64 に DIO ボードの写真を示す。

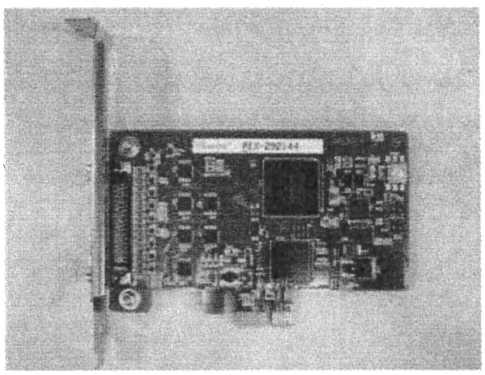


図 64: DIO ボード [7]

A.2.2 LVDS ボード

LVDS は Low Voltage Differential Signaling の略称で、LVDS シリアル信号は高速の信号伝送を実現するために電圧振幅を小さくした小振幅差動信号のことであり、LVDS シリアル信号を用いることで高速通信を行っている。LVDS ボードはシリアライザとデシリアライザにより構成されており、シリアライザ側（クロック出力）のみ「基準クロックが入力される」、「GATE 信号が Low になる」という 2 つの条件を満たした時に DIO ボードと AD ボードが通信を行う（LVDS のロック）よう設計が行われている。新読み出しシステムでは National Semiconductor 社の DS90UR241 シリアライザと DS90UR124 デシリアライザが使用されており、PC の USB ポートより電源を取得できるように設計されている。また、LVDS シリアル信号の入出力部にバリスタを置くことにより、ボードを高電圧から保護している。図 65 に LVDS ボードの写真を示す。

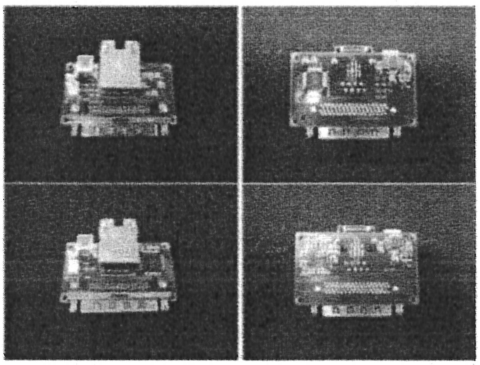


図 65: LVDS ボード。上下はそれぞれシリアライザとでシリアライザ。左右はボードの裏表。[7]

A.2.3 IF ボード

IF ボードはデジタル処理部から送られてきた駆動クロックの LVDS シリアル信号をパラレル信号に変換し、そのうち 4 つの信号を検出器クロックの pmc と　FrameStart、検出器制御ラインの ucRstSel　と ucRstEn　を生成する DRV ボードへと送る。図 66 に IF ボードの写真を示す。

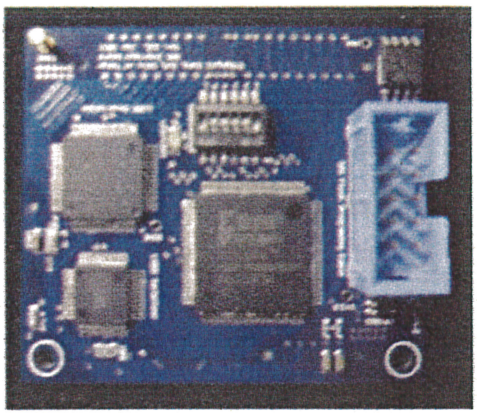


図 66: IF ボード [7]

A.2.4 DRV ボード

DRV ボードには VIRGO 検出器の駆動に必要なバイアスやクロック電圧を生成し供給するという役割がある。検出器を駆動するには様々な電圧値が必要になるが、DRV ボードではジェネレータで生成した基準電圧+3V を元にオペアンプを用いて必要な電圧を生成している。DRV ボードで複数の電圧を生成することで電源の数を減らすことができ、オペアンプの抵抗値を変えることで生成する電圧値を変更できるため、他の読み出しシステムにも対応可能となっており、汎用性が高い仕様となっている。図 67 に DRV ボードの写真を示す。

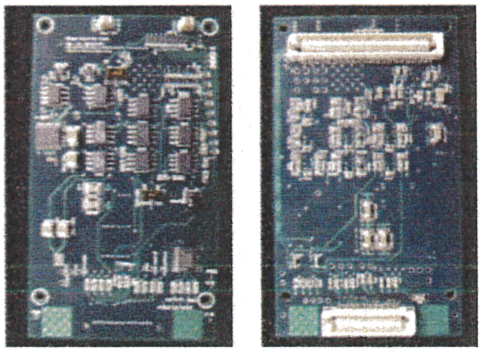


図 67: 右；DRV ボード表　左：DRV ボード裏　[7]

参考文献

[1] http://www.geocities.jp/milkyway_amanogawa/outerplanet.htm

[2] http://www.planetastronomy.com/special/2006-special/mayor-iap-mai06.htm

[3] http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2011/kawai/02.shtml

[4] http://www.sal.wisc.edu/whirc/archive/public/datasheets/raytheon/SB301UsersGuideRevB1.pdf

[5] https://www.cosel.co.jp/product/noisefilter/NBH/

[6] 宇井崇紘　プライベートレポート

[7] 宇井崇紘　「かなた望遠鏡用近赤外線検出器読み出しシステムの開発」　広島大学　修士論文　2013

[8] 宮本久嗣　「かなた望遠鏡「可視赤外線同時撮像カメラ」の開発」　広島大学　修士論文　2009

[9] 原尾達也　「かなた望遠鏡用可視近赤外同時カメラ HONIR の撮像モードの性能評価」　広島大学　修士論文　2012

[10] http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/LECTURE/OBS/reduction.html