

近赤外分光装置 ESPRIT の駆動系と検出器読み出し回路の開発および中間赤外観測装置 MIMIZUKU 搭載コールドチョッパーの開発

木下凌太(1), *坂野井健(1), 鍵谷将人(1), 平原靖大(2), 上塚貴史(3), 宮田隆志(3)

(1) 東北大学大学院理学研究科, (2) 名古屋大学環境学研究所, (3) 東京大学理学研究科

木星磁気圏内のエネルギーと物質輸送の理解のために、衛星イオの火山活動と木星極域オーロラ発光の長期モニタリングが重要である。東北大学のハワイ・ハレアカラ観測所に口径 60 cm の占有望遠鏡 (T60) で近赤外域の長期連続観測を行うために、近赤外撮像装置 TOPICS と近赤外分光撮像装置 ESPRIT の開発が進められてきた。また、東京大学はチリのアタカマ砂漠 (標高 5640 m) に口径 6.5 m の赤外望遠鏡を建設する TAO 計画を進めており、TAO 望遠鏡に搭載される中間赤外観測装置 MIMIZUKU は 1-38 μm の非常に広い観測波長を持つ。本研究では、これら 2 つの装置による木星磁気圏の長期協調観測を目標に、それぞれの開発に取り組んだ。ESPRIT に関しては機構系試験、校正用光源光学系の設計、リードノイズ低減のための FET 対向回路の開発を、MIMIZUKU に関しては視野切り替え用コールドチョッパーの開発と試験を行った。以下にその結果を示す。

(1) ESPRIT 機構系動作試験

ESPRIT の 4 つの機構系 (スリット切り替えユニット、分光・イメージングモード切り替えユニット、フィルターターレット、エ歇尔回折格子角度調節ユニット) について、チャンパー内に設置した状態で PC 制御するために、ハーネス、コントローラ、制御プログラムを作成した。これらの機構系について、常温では目視で、真空冷却下ではリミットスイッチからの信号を用いて動作試験を行い正常に駆動し、リモート制御できることを確認した。また、エ歇尔回折格子角度調節ユニットに関しては角度再現性試験と角度安定性試験を行った。角度再現性試験に関しては、原点からピ III コモーターを一定パルス動かしたとき、波長決定要求である 0.33 deg 以内の精度で角度が再現されることを確認した。角度安定性試験では、ピコモーターを静止した状態で 3 時間半撮像し、5 分間での最大角度変化量が要求である 1 arcsec 以下であることを確認した。

(2) ESPRIT の校正用光源光学系の設計

本研究では、ESPRIT を T60 クーデ焦点に設置することを想定して、チャンパーに外付けする校正用光源光学系の設計を行った。この光学系の焦点位置と瞳位置は ESPRIT のスリットとコールドストップに一致するような設計案を得た。

(3) ESPRIT/TOPICS 検出器のリードノイズの低減を目的とした FET 対向回路の開発

ESPRIT および TOPICS に共通する検出器駆動回路においてリードノイズが大きいという問題を解決するために、検出器電圧をソースフォロワしながら、コモンモードノイズをキャンセルする FET 対向回路を開発した。

(4) 中間赤外観測装置 MIMIZUKU 搭載コールドチョッパーの開発

MIMIZUKU に搭載し、実際の観測運用に用いる本番用コールドチョッパーとチョッパーユニットの開発を行った。このユニットの組み立てにおいて懸念される、光路長の変化について検討するため計測を行った。ユニットの組み立て誤差による光路長への影響に関しては、筐体天井から駆動鏡面までの光路方向の距離を三次元非接触測定した結果、その誤差がおおよそ 0.04 mm であることを確認した。これにより冷却光学系 IV 内の光学ベンチから筐体天井までの組み立て誤差が最大量であっても光路長誤差許容量以内に収まることを確認した。また、止めネジの緩みとギャップセンサーの断線を防ぐため、それぞれに接着剤 Arathane を塗布することで、ユニットの取り付けや観測中にかかるストレスへの耐性を向上させた。

(5) MIMIZUKU 搭載コールドチョッパー駆動試験

本番機を MIMIZUKU に搭載し、30 K まで冷却した状態で撮像試験およびチョッピング駆動試験を行った。撮像試験においてはチョッピングの前後で 2 枚の画像を撮り、視野の変化量を求めることでセンサー出力電圧から計算されるチョッピングスローが実際のチョッピングスローと一致することを確認した。これによりチョッピングが正しく行われていることを光学的に初めて確かめた。

チョッピング動作試験においては真空冷却下でも本番用コールドチョッパーが正常に駆動し、チョッピング周波数・安定性・静定時間・周波数の 4 つの要求をすべて満たすことを確認した。一方でセンサー出力電圧において、冷凍機の振動に由来すると思われる周期的な揺れが見られた。その揺れ幅は内周駆動でより顕著で、天球面上での角度 0.07 arcsec 相当であった。この値は MIMIZUKU の 5 μm での標準的な空間分解能 0.5 arcsec よりも十分小さいことから、観測への影響は小さいと判断した。これらの結果から、本研究で開発した本番機が MIMIZUKU 搭載時にも問題なくチョッピング運用可能であることを確認した。

(6) MIMIZUKU の姿勢による制御への影響の検証

チョッピング駆動において、チョッピングの中心電圧が基準電圧とずれるという問題を解決するために、制御器の改良を行った。入力電圧が 0 の時のセンサー出力電圧 $V_{\text{GS},0}$ を考慮した制御器を作ることによって誤差 5 mV 程度の精度で出力電圧の中心を決定できるようになった。

一方でこの制御器は $V_{\text{GS},0}$ の値を入力する必要があるため、観測中 MIMIZUKU が回転することにより $V_{\text{GS},0}$ が変化することを想定し、その影響を検証した。その結果、 $V_{\text{GS},0}$ は MIMIZUKU の回転に伴って変化し、チョッピングの中心電圧は $V_{\text{GS},0}$ の変化量に比例して指令値からずれていくことが分かった。このずれは最大で天球面上での 2arcsec に相当し、観測において無視できない。また、 $V_{\text{GS},0}$ の変化に伴って回転の動作特性も変化するため特性を表現する 3 つのパラメーター、ゲイン G_0 、周波数 ω_n 、減衰比 ζ も数 % 程度変化した。しかし、これらの変化による静定時間および安定性への影響は微小であることを確認した。よって観測中に、制御器に入力する値を変化さすパラメーターは $V_{\text{GS},0}$ のみであることがわかった。この結果を踏まえた制御器の改良は今後の課題である。

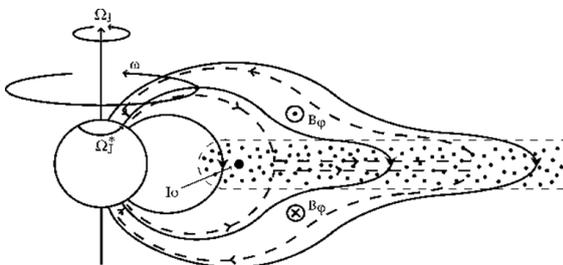
近赤外分光装置ESPRITの駆動系と 検出器読み出し回路の開発 および中間赤外観測装置MIMIZUKU搭載 コールドチョッパーの開発

木下凌太(1), *坂野井健(1), 鍵谷将人(1), 平原靖大(2)
上塚貴史(3), 宮田隆志(3)

(1)東北大学大学院理学研究科, (2)名古屋大学環境学研究科
(3)東京大学理学研究科

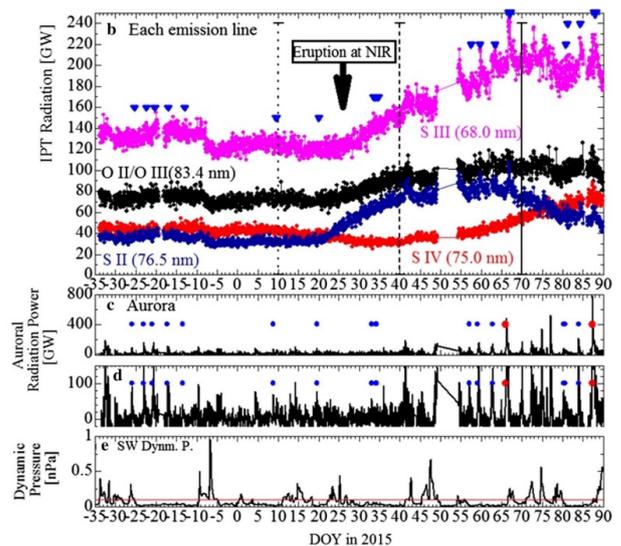
1. 研究背景

木星磁気圏内のプラズマ質量の大部分はイオから供給
イオの火山から噴出した中性ガスが電子衝突などによりイオン化
> 磁気圏尾部まで輸送されたあと、磁気リコネクションによって解放
されることで磁力線に沿って木星極域に降り込む
> 降り込み粒子が木星大気H₂を励起 > H₂オーロラ
> 降り込み粒子によって生じた H₃⁺ が励起 > H₃⁺オーロラ



図：木星回転駆動型磁気圏の駆動メカニズム(Cowley and Bunce, 2001)。

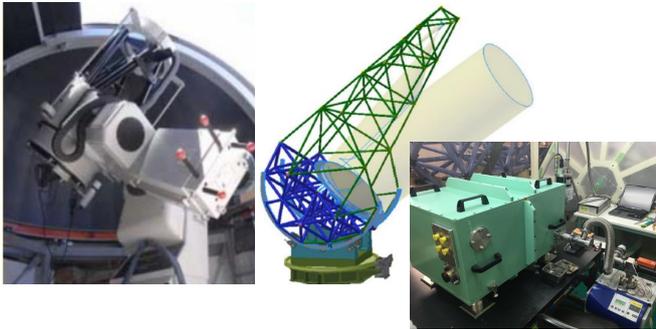
2015年1月末のKurdalagon Pateraのアウトバーストののちに、
IPTの増光とオーロラ突発増光時の強度の上昇を観測
イオ噴火と木星オーロラの関係を示す観測例は少ない



図：ひさき/EXCEEDによって観測された IPT および木星
オーロラの放射強度(Yoshikawa et al., 2017)。

東北大学の占有望遠鏡と近赤外観測装置 東京大学アタカマ望遠鏡 (TAO) と中間赤外観測装置

T60・PLANETS/ESPRIT
TAO/MIMIZUKU



図：(左) T60。(中央) PLANETS (Suzuki, 2019)。(右) ESPRIT。



図：(左) TAO の概観 (東京大学 TAO プロジェクト)。(右) MIMIZUKU の概観 (Kamizuka et al., 2022)。

観測波長：1-4 μ m

> H₂やH₃⁺の輝線発光が存在

エシェルを用いた高波長分解能：20000

> H₃⁺イオン風速の導出等が可能

AOを用いて回折限界まで空間分解可能

> 木星オーロラをT60で 18x6 分割
PLANETSで 50x18分割程度可能

観測波長：1-38 μ m

> 太陽反射光の影響を受けにくい中間赤外 (~10 μ m) で観測

> 昼面でも観測可能

空間分解することはできないが、観測時のイオの経度から活動中の火山を推定することが可能 (Yoneda et al., 2014)

3

ESPRIT と MIMIZUKU の協調観測の意義：本研究の目的

観測時間の (比較的) 取りやすい 2 装置で長期協調観測を行うことで、イオの火山活動度と木星極域オーロラ発光強度の時間的相関やイオン風 とオーロラ発光強度の空間的相関について新たな発見をもたらす。



- ・MIMIZUKUでイオの火山活動度をモニタリングしながら、ESPRITで木星オーロラの変動を観測
- ・望遠鏡設置サイトの経度がの違い (経度差136度) により、観測可能な時間帯が拡大
- ・複数波長でイオの熱輻射を見ることでホットスポット内での温度の違いを切り分け

各装置の運用に向けて以下に示す課題を解決する

ESPRIT

- これまでの開発経緯
- ・設計仕様と各コンポーネントの選定 (Uno, 2012)
 - ・各機構系とチャンバーの開発 (Uno, 2012)
 - ・熱バスの開発とチャンバー冷却試験 (Kambara, 2020)
- 本研究での取り組み
- ・機構系動作試験(常温)
 - ・機構系動作試験(冷却下)
 - ・校正用光源光学系開発
 - ・読み出しノイズ低減のためのFET対向回路の作成

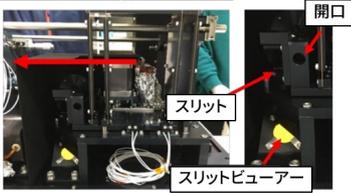
MIMIZUKU搭載コールドチョッパー

- ・試作機と制御則の開発(東大, 金沢大, 岡山理科大)
- ・試作機での試験 (Michifuji, 2021)
- ・搭載機の開発
- ・MIMIZUKU搭載冷却試験
- ・撮像試験
- ・動作要求試験
- ・MIMIZUKU の姿勢による制御への影響の検証

4

2. ESPIRTの機構系動作試験（常温および低温環境下）

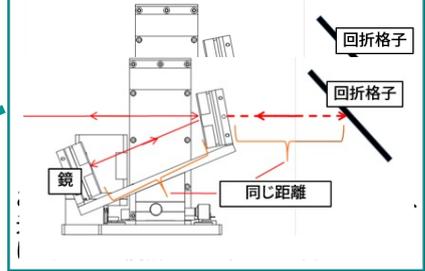
①スリット交換ユニット



stepping motorで矢印の向きに制御することで、入射光が開口を通るかスリットを通るかを切り替える。

図：スリット交換ユニット。

⑤分光・撮像切り替えユニット



図：分光・イメージングモード切り替えユニット

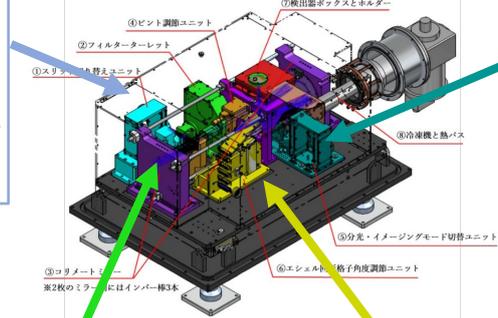
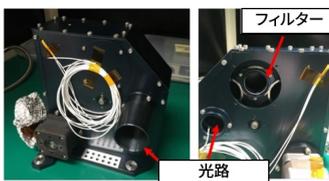


図 2.5：ESPIRT 機構系の概念図

②2段フィルターターレット

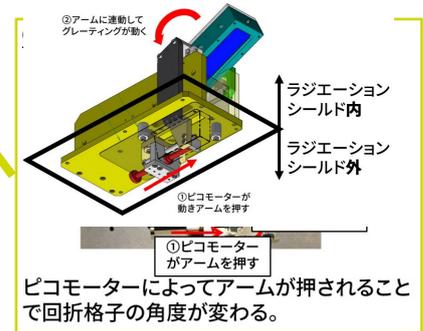


stepping motorを回転させることでバンドパスフィルターを切り替える。（最大8×2ポジション）

図：フィルターターレット

- ・コントローラー
- ・ハーネス
- ・制御プログラム

を一部作成し、常温及び真空冷却下でリモート制御できることを確認



ピコモーターによってアームが押されることで回折格子の角度が変わる。

図 エシェル角度調節ユニット

エシェルグレーティング保持角度安定性の検証

ESPIRT入射口から可視レーザー光を照射し、エシェルグレーティングに当たって回折した光をカメラで撮像

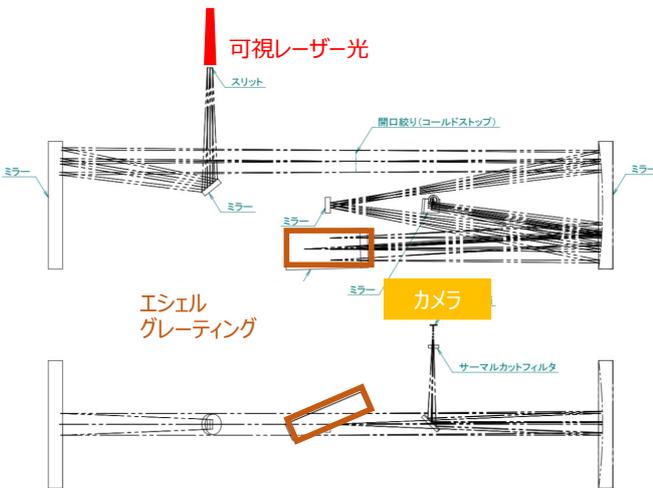
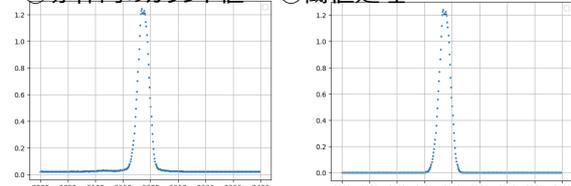


図 .ESPIRT光学系レイアウト(上：上から見た図 下：横から見た図)

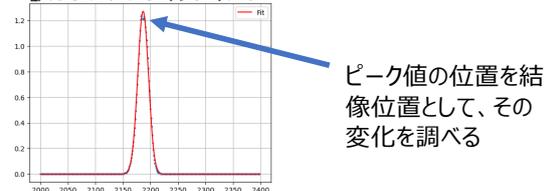
①撮像した画像 ②背景光(10秒平均)を引く



③赤枠内のカウント値 ④閾値処理



⑤ガウシアンフィッティング



ピーク値の位置を結像位置として、その変化を調べる

実験結果

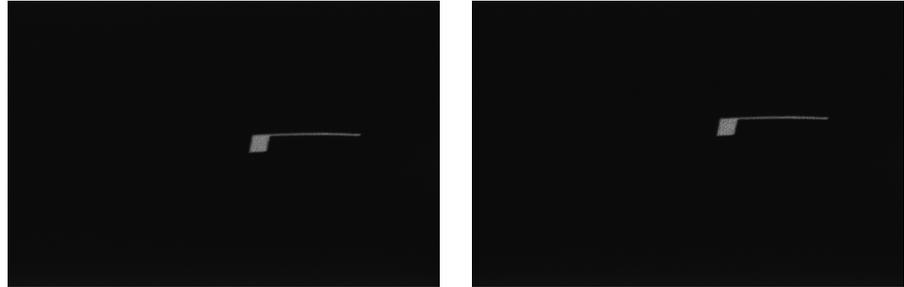
角度再現性試験

ある観測波長が検出器の中心に来るように狙ってエシエル回折格子角度調節ユニットを動かしたとき、目的の波長が少なくとも検出器の中に入っていれば、その後調整可能

➤角度再現性要求：検出器面での結像位置のずれ < 3.84 mm = 検出器の大きさ/2

原点から700000Pulse(グレーティングの角度変化約 3 [deg])動かす操作を五回行い、結像位置を記録した。

	結像位置[pixel]
1回目	1714
2回目	1693
3回目	1587
4回目	1502
5回目	1643



図：1回目（左）と4回目（右）の撮像結果。

最も結像位置のずれた2回の差 = 212 pixel = 0.509 mm < 3.84 mm = 検出器の大きさ/2

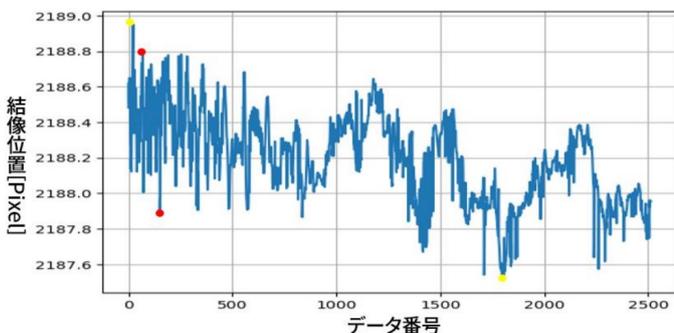
7

実験結果

角度安定性試験

ESPRITの速度分解能要求500m/sのドップラーシフトに相当するグレーティング角度変化量は $H_3+Q(1,0^-)$ (3.9530 μm) で 2.1 arcsec、 $H_3+R(1,0^-)$ (3.4128 μm) 観測時で 1.5 arcsec。想定積分時間5分の間に上記の値以上変化しないことが条件 ➤安定性要求：1arcsec/5min

エシエル回折格子角度調節ユニットを静止した状態で3.5時間撮像し、結像位置の時間変化を記録した。



図：角度安定性試験結果。横軸はデータ番号で5秒に一回撮像された。

3.5時間の中で最も大きい結像位置の変化(黄色点)
= 3.41 μm = 1.05 arcsec

5分間で最も大きい結像位置の変化(赤点)
= 2.38 μm < 0.78 arcsec < 1 arcsec

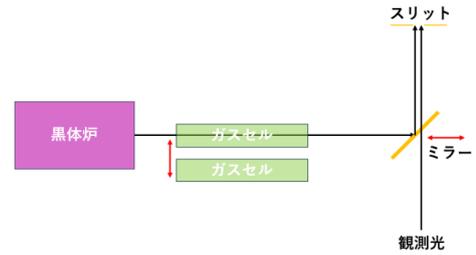
安定性要求を満たすことが確認されたが、真空冷却時に冷凍機の振動によるがどう影響するかは今後検証する必要がある。

8

波長校正用光源光学系の設計

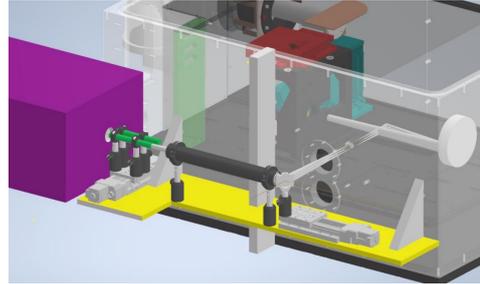
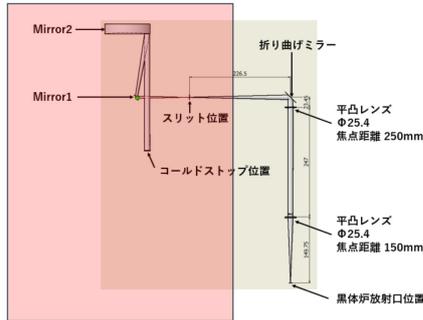
ESPRITをT60 ケーデ焦点に置くことを想定して校正用光源光学系を設計した。

- ・ガスセルの吸収線によって波長校正
 - 2本のガスセル (CH₄, N₂O) を観測波長によって切り替え
- ・折り曲げミラーを移動させ、観測時と波長校正時を切り替え



校正用光源光学系の焦点位置と瞳位置がESPRITのスリットとコールドストップに一致するようにZemaxで光学系を設計

➢ この光学系に沿って、T60 ドームとの干渉を考慮した基本的なコンポーネントの配置案を提示



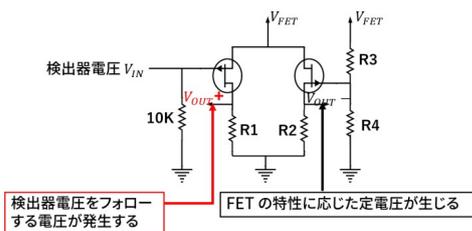
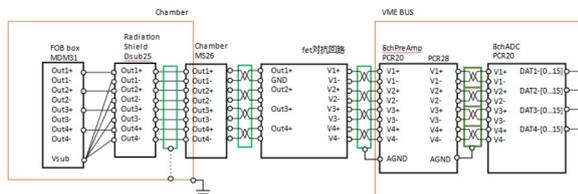
図：Zemax で設計された校正用光源光学系。
赤い領域は ESPRIT 内を示す。

図：校正用光源光学系のコンポーネント配置案（横から見た図）。

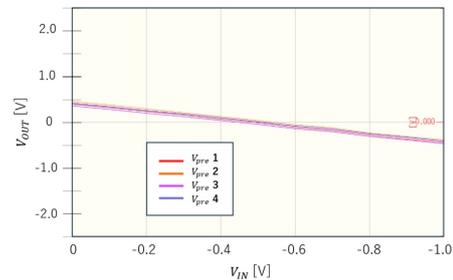
3. 近赤外カメラ TOPICS と ESPRIT 共通の検出器読み出し回路の改良

TOPICSと共通の検出器読み出し回路においてリードノイズが仕様値の17倍という問題があり、分光観測においてこれは無視できないため、改良する必要がある。

- 読み出し回路および検出器に使用されているGNDの揺れが原因の可能性はある。
- プリアンプで増幅する信号の一方にもノイズを乗せることでコモンモードノイズとして打ち消す。



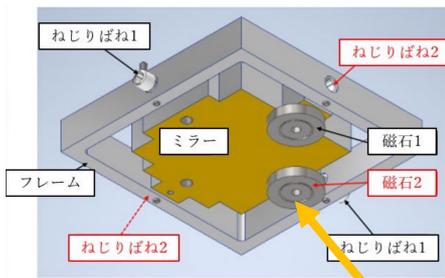
(上) 図：検出器から ADC までの信号系統図 (FET 対向回路導入後)。
(下) 図：FET 対向回路の概念図。



図：新規製作した対向回路の試験結果。
縦軸 $V_{OUT} = (V_{OUT+}) - (V_{OUT-})$

新規作成したFET対向回路が検出器電圧 V_{IN} をソースフォロウすることを確認。
➢ ノイズ低減効果の検証は未実施。

4. MIMIZUKU搭載コールドチョッパー：動作原理



図：チョッパーのミラーおよびフレームを裏側から見た図

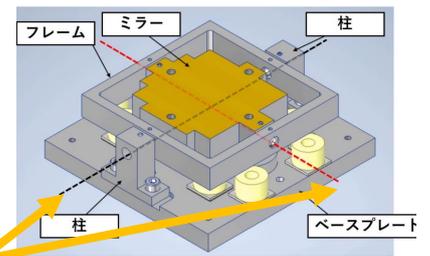
高速で視野を切り替えて二枚の画像を減算することで、大気の発光を除去するための装置。

土台とフレーム、フレームと鏡をねじりばねで繋ぐことで、鏡は二軸で駆動する。

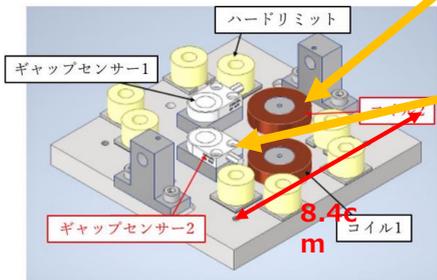
コイルに電圧をかけることで、鏡の裏側につけた磁石にかかる磁力を調整し、鏡の角度を変える。

鏡との距離をセンサーで測ることで、角度を電圧として記録する。

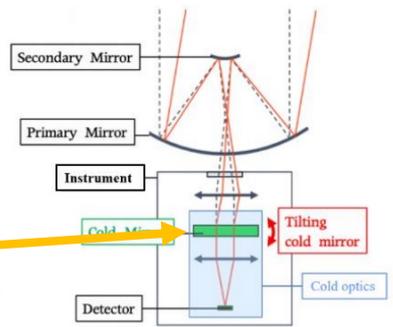
冷却光学系の瞳位置に設置し、鏡を動かすことで視野を切り替える。



図：コールドチョッパーの 3D CAD



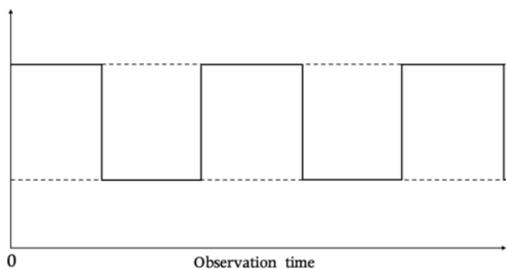
図：(左) ベースプレートの概観図



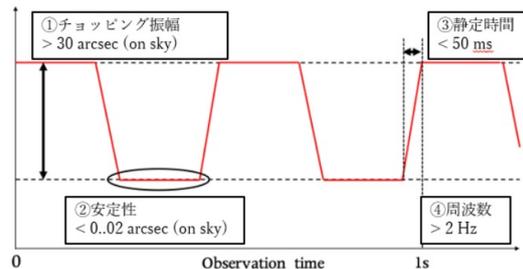
図：コールドチョッピングの概念図

チョッパーの動作要求

理想的なチョッピング(左図)に対して、実際は右図のように駆動する。これを以下の4つのパラメーターで評価する。



(左) 図：理想的なチョッピング動作 (Michifuji, 2021)



(右) 図：実際のチョッピング動作 (Michifuji, 2021)

① チョッピング振幅

観測対象より十分大きい値

Nominal : > 30" on sky = ±0.42 [deg]
Maximum : > 60" on sky = ±0.83 [deg]

② 安定性

空間分解能より1桁小さい値(0."5 @5 μm).

$< \frac{0."5/10}{2\sqrt{2}\ln 2} = 0."02 \text{ on sky} = 6 \times 10^{-4} [\text{deg}]$

③ 整定時間

2Hzで駆動した際に全体の80%が観測に使える値
< 50[ms]

④ 周波数

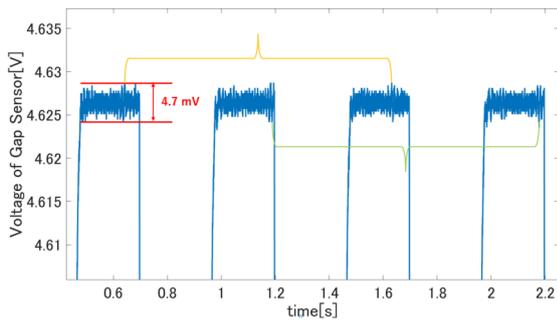
大気の変動スケールより早い値
> 2[Hz]

チョッピング動作試験結果

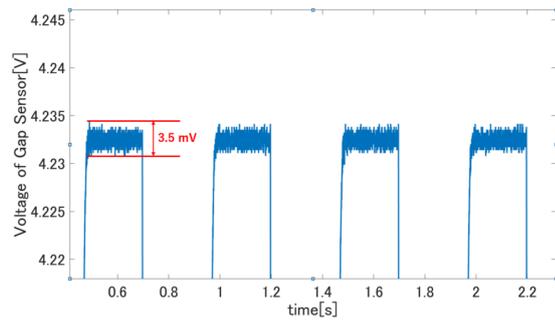
本番機をMIMIZUKUに搭載した状態で真空冷却（30K）試験を行い、チョッピング動作において4つの要求をみたくを確認した。

	振幅[deg]	安定性[deg]	周波数[Hz]	整定時間[ms]
要求	$> \pm 0.42$	$< 6 \times 10^{-4}$	> 2	< 50
外周	± 0.59	3.49×10^{-4}	5	31.2
内周	± 0.59	3.62×10^{-4}	5	33.2

特に内周駆動で冷凍機の振動に由来すると考えられる周期性を持った揺れが見られた。この揺れの振幅 $4.7 \text{ mV} = 0.07 \text{ arcsec on sky}$ はMIMIZUKUの空間分解能 0.5 arcsec と比べて十分小さいため、観測への影響は小さいと判断した。



図：内周の出力波形を拡大したもの。



図：外周の出力波形を拡大したもの。

制御則の改良

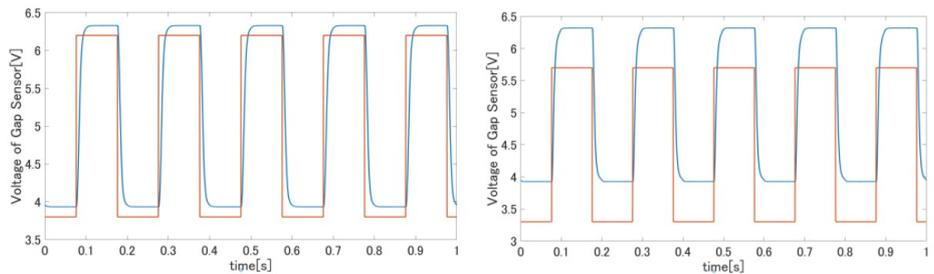
振動の中心が指令値とずれる
 > 既存の制御則は入力電圧が 0 V のときのセンサー出力電圧 $V_{GS,0}$ を考慮していない



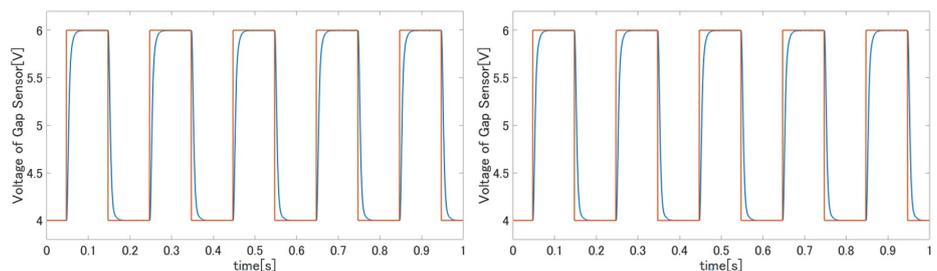
制御則を改良
 > 制御則に $V_{GS,0}$ を入力することで指令値通りに振動するように



観測中MIMIZUKUが回転することで V_{GS} が変化し、制御に影響を与える可能性



図：改良前のセンサー出力電圧。青が実際の出力で橙が基準電圧。（左）外周回転。（右）内周回転。



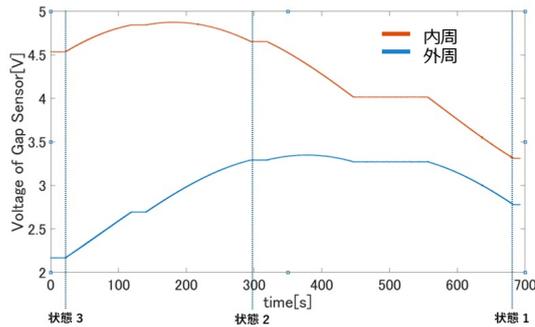
図：改良後のセンサー出力電圧。青が実際の出力で橙が基準電圧。（左）外周回転。（右）内周回転。

MIMIZUKUの姿勢による制御への影響の検証

回転シミュレータにMIMIZUKUを取り付け観測中のM回転を再現した。

$V_{GS,0}$ およびチョッパーの回転特性を決定するゲイン G_0 、周波数 ω_n 、減衰比 ζ の回転による変動と制御への影響を調べた。

$V_{GS,0}$ は回転に対応して連続的に変化し、再現性がある。



図：望遠鏡シミュレータを回転させたときの $V_{GS,0}$ 。青線が外周、橙線が内周。
 $V_{GS,0}$ が変化していない時間は望遠鏡シミュレータは停止している。



図：試験の様子。

MIMIZUKUの姿勢による制御への影響の検証

制御則に入力するパラメーター ($V_{GS,0}$ 、 G_0 、 ω_n 、 ζ) を固定して (状態0の時の値) 5 Vを基準に $\pm 1V$ でチョッピングさせた。状態2~4は図 4.39(状態1) から 90° ずつ回転させた状態。

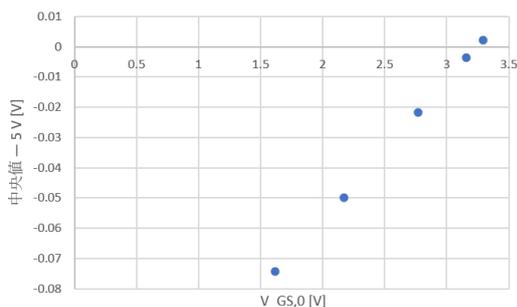
- チョッピングの中央値は $V_{GS,0}$ の変化量に比例してずれていく。
- 最大で 0.15 V (2 arcsec)程度ずれ、これは観測において無視できない。

表：各状態での外周および内周の $V_{GS,0}$

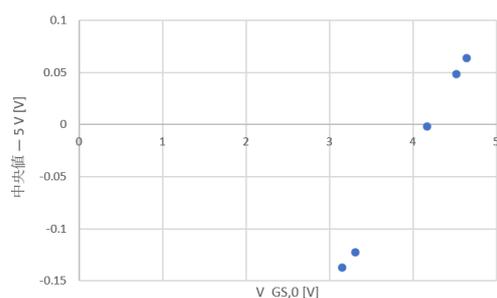
	状態 0	状態 1	状態 2	状態 3	状態 4
外周[V]	3.16	2.77	3.29	2.17	1.62
内周[V]	4.17	3.31	4.64	4.52	3.15

表：各状態におけるチョッピング波形の中央値

	状態 0	状態 1	状態 2	状態 3	状態 4
外周[V]	4.9963	4.9782	5.0023	4.9502	4.9257
内周[V]	4.9984	4.8775	5.0640	5.0481	4.8625



図：中央値の指令値からのずれと $V_{GS,0}$ の関係 (外周)。



図：中央値の指令値からのずれと $V_{GS,0}$ の関係 (内周)。

MIMIZUKUの姿勢による制御への影響の検証

状態によってゲイン G_0 、周波数 ω_n 、減衰比 ζ は数%程度変化



状態0のパラメータを使用しても整定時間と安定性に大きな悪化は見られなかった。
➤ G_0 、 ω_n 、 ζ は固定しても問題ない。

表：各状態におけるゲイン G_0 、周波数 ω_n 、減衰比 ζ

	状態 0	状態 1	状態 2	状態 3	状態 4
G_0 (外周)	2.3563	2.4241	2.3588	2.4753	2.5594
G_0 (内周)	1.9695	2.0096	1.8680	1.8940	2.0582
ω_n (外周)	45.4556	45.0036	45.6608	44.3375	43.6113
ω_n (内周)	83.1666	81.5989	84.7449	83.7837	80.4488
ζ (外周)	0.0206	0.0213	0.0209	0.0216	0.0221
ζ (内周)	0.0328	0.0332	0.0318	0.0319	0.0336

観測中に変化するパラメータのうち $v_{GS,0}$ の値をリアルタイムで入力するように制御則を改良する必要がある。➤ 今後の課題

17

5. 結論と今後の展望

近赤外分光装置 ESPRIT の駆動系と校正光源の開発

(1) ESPRIT 機構系動作試験

4つの機構系をPC 制御するために、ハーネス、コントローラ、制御プログラムを作成し、常温および真空冷却下でリモート制御できることを確認した。エンジェル回折格子角度調節ユニットに関しては角度再現性試験と角度安定性試験を行い、要求を満たすことを確認した。

(2) 校正用光源光学系の設計

ESPRIT を T60 ケーデ焦点に設置することを想定して、チャンバーに外付けする校正用光源光学系の設計を行った。この光学系の焦点位置と瞳位置は ESPRIT のスリットとコールドストップに一致するような設計案を得た。

近赤外カメラ TOPICS と ESPRIT 共通の検出器読み出し回路の改良

(3) リードノイズの低減を目的とした FET 対向回路の開発

新規にFET 対向回路を開発し、検出器電圧の範囲においてこの回路がソースフォロワとして機能することを確認した。この回路によるノイズ低減の効果は実際の検出器を用いて今後試験する必要がある。

中間赤外観測装置 MIMIZUKU 搭載コールドチョッパーの開発

(4) 開発

本番用コールドチョッパーとチョッパーユニットの開発を行った。光路長の方向の組み立て誤差を三次元非接触測定で計測し、その誤差が許容値以下であることを確認した。

(5) 冷却試験

コールドチョッパーをMIMIZUKU に搭載し、30 K まで冷却した状態で撮像試験およびチョッピング駆動試験を行い、正しく動作していることを初めて確かめた。また、真空冷却下でコールドチョッパーを駆動し、チョッピング周波数・安定性・静定時間・周波数の4つの要求をすべて満たすことを確認した。

(6) MIMIZUKU の姿勢による制御への影響の検証

チョッピングの中心電圧が基準電圧とずれるという問題を解決するために、制御則の改良を行い、誤差 5 mV 程度の精度で出力電圧の中心を決定できるようになった。一方で、MIMIZUKU 回転時の電圧変化に対応する制御則の開発は今後の課題である。

18