

成 果 報 告 書

(1) 研究の実施日程

研究項目	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①チョッパー搭載機開発 製作 冷却試験 調整							←→		←→	←→		
②チョッパー搭載機 MIMIZUKU 内動作試験											←→	→
③チョッパー制御則開発							←					→

(2) 研究成果

本研究は、地上中間赤外線観測において必須となるチョッピング観測を実現するための冷却チョッパーの開発を目的とする。チョッピング観測とは頻繁に観測視野を切り替えて各視野でデータを取得し、その差を取ることで短時間に変動する中間赤外線背景光を除去し、天体光の検出を可能とする観測手法である。その実現には高速駆動する視野の切り替え機構が必要となる。過去の観測では望遠鏡副鏡を駆動することで視野の切り替えを行ってきたが、TMTのような超巨大望遠鏡では不可能である。冷却チョッパーは観測装置の冷却光学系に搭載する高速の視野切り替え鏡で、この問題を解決する、次世代超巨大望遠鏡時代の地上中間赤外線観測のための重要なキーデバイスである。

東京大学がチリ共和国に建設中の東京大学アタカマ観測所（TAO）6.5 m 望遠鏡も副鏡を高速駆動できないため、本望遠鏡に搭載する中間赤外線観測装置 MIMIZUKU も冷却チョッパーを必要とする。このため、TMT 用冷却チョッパーの実現に向けた冷却チョッパー技術の獲得を目的として、MIMIZUKU 用冷却チョッパーの開発をこれまで進めてきた。これまでの開発の結果、「約 20 K の温度環境下にて、周波数 2 Hz 以上、遷移時間 50 ms 以下、振幅 0.42 度、静定精度 6×10^{-4} 度の矩形動作」という要求動作をほぼ満たすプロトタイプ機、およびその制御則を実現してきた。これをもとに 2022 年度は冷却チョッパーの、①MIMIZUKU 搭載機の開発、②MIMIZUKU 内部での動作試験、③制御則の改善を進めた。以下にその実施内容と結果を報告する。

① MIMIZUKU 搭載機の開発

冷却チョッパーのプロトタイプ機は、駆動部の冷却動作試験、およびその制御則開発を目的としていたため、鏡とするべきパーツが質量を模したアルミブロックであり、設置精度も甘いものであった。また、駆動部のみの構成となっており、そのままでは MIMIZUKU 搭載機にはできなかった。そこで MIMIZUKU に搭載可能な搭載機の開発、およびそのための配線等の周辺環境の整備を行った。

MIMIZUKU 搭載機の開発として一部駆動部の部品の追加製作を行い、鏡のダミー部品を搭載用の鏡に置き換え、さらに MIMIZUKU 光学系に搭載するための筐体や折り返し鏡と組み合わせることで搭載

機を完成させた（図1）。搭載機の完成までに、搭載用駆動部の冷却動作試験、三次元測定による鏡の設置精度計測、搭載状態で鏡の面形状測定を実施した。その中で、搭載用駆動部の十分な冷却動作性能、十分な鏡の設置精度、駆動鏡の十分な面精度を確認した。一方折り返し鏡については、単体では十分な面精度を保持する一方、設置用の台座に固定した際にミクロン単位の歪みが発生することが判明した。その原因は台座の平面度の不足にあることも判明した。天文観測用にはこの歪みの修正が求められるが、②の MIMIZUKU 内部での動作試験では問題にならないと判断した。

搭載のための配線等周辺環境の整備では、主に冷却チョッパーの動作を検知する静電容量型ギャップセンサの配線に関する整備を行った。本ギャップセンサは専用ケーブルのみを用いて冷却環境下から常温部の制御機器まで接続する必要があり、その延長ケーブルやフィードスルーを整備した。また、配線長が長くなるため、配線の途中に専用のアンプを入れる必要となり、これを整備した。

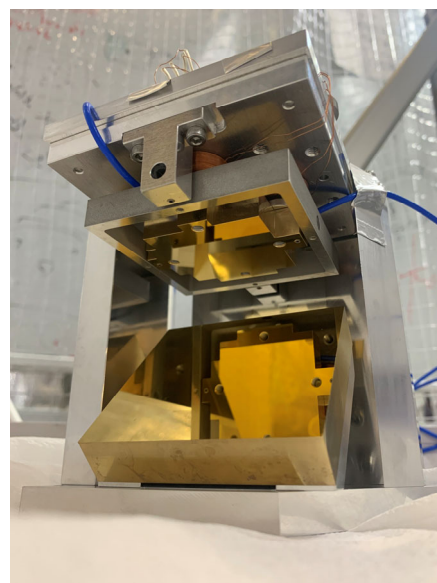


図 1: 冷却チョッパー搭載機。上部が駆動部。下部のミラーは折り返し鏡。

② MIMIZUKU 内部での動作試験

MIMIZUKU 内部での動作試験は、実運用環境下での動作実証として大きな意味がある。また、冷却チョッパーの動作振幅を MIMIZUKU の光学系を通して評価するという、これまでのギャップセンサ出力をもとにした測定とは独立に評価することができる重要性が、この試験を行った。

本冷却チョッパーは、直行する二つの軸周りに鏡を傾けることができるが、残念ながら本実験初期の冷却光学系搭載直後の常温動作試験の時点で片側の動作に不良が見受けられた。この不良の原因は現状では不明であるが、もう片方の軸は正常に動作していたため、その動作試験を目的として実験を継続した。実験の結果、約 20 K の動作環境のもと、要求を満たす動作を確認することができた。また、MIMIZUKU 光学系による撮像データを用いた動作振幅評価を行った結果、ギャップセンサ出力をもとに予想していた振幅と矛盾しない振幅を確認し、チョッピング動作の達成を確たるものとすることができた。過去のプロトタイプ機の試験結果から懸案となっていた冷凍機振動による擾乱振動は MIMIZUKU 内部でも確認された。P-V 値で天球面上 0.1 秒角相当の振動と、許容できなくはないがやや大きい量であった。その対策の一つの可能性として、制御即に外乱推定オブザーバを組み込むことで低減できる可能性があることも本実験で確認できた。

③ 制御則の改善

現在の冷却チョッパーでは、モデルマッチング型二自由度 PD 制御という制御則を採用している。しかし本制御即は設定すべきパラメータが多く、また制御対象の動作特性が変化により制御の精度が悪化しやすいことなどの欠点もあり、より設定が容易かつ安定的な制御則の開発が求められる。また、さらなる高速化が好ましい状況のため、そのような制御則の実現を目的とした制御則開発を進めた。

前者の要求に対しては微分先行型 PD 制御という制御則が、設定パラメータが少ないにもかかわらずモデルマッチング型二自由度 PD 制御と遜色ない動作速度を達成し、より安定的に良い性能を示すことが確認された。この様子は②の MIMIZUKU 内部での動作試験の際にも確認することができた。

さらなる高速化の可能性については、最短時間制御を利用した制御則のシミュレーションおよび実機試験による検討が進められた。シミュレーションでは遷移時間を現状の約 30 ms から約 10 ms に短縮できる可能性が認められたが、実機試験の結果、実機の非理想的なふるまいによりシミュレーション通りには動作せず、現状程度の遷移時間が現在の限界とみられることが分かった。この検討については金沢大学近藤氏の修士論文としてまとめられた。