

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試験機冷却動作試験							●	●	●	●		
②MIMIZUKU搭載機開発								●	●	●	●	●
③微分先行型PD制御試験							●			●	●	●
④モデルマッチング型二自由度PD制御試験								●	●	●	●	●

(2) 研究成果

本研究は、次世代大型望遠鏡を用いた地上中間赤外線観測のキー技術となる冷却チョッパーの開発を目的とする。冷却チョッパーは観測装置の冷却光学系（数十 K に冷却される）に設置できる低温高精度高速駆動鏡で、観測視野の高速切り替えを実現する。地上中間赤外線観測では地球大気の大気熱放射に起因する非常に強い背景光が観測され、さらにこの背景光が短時間（ ≤ 1 秒）で変動する。冷却チョッパーは、背景光の変動前に観測視野の切り替えをおこない、これにより切り替え前後の各視野のデータを減算することで高精度の背景光除去を実現し、微弱な天体光の検出を可能とする重要なデバイスである。

本研究では、東京大学アタカマ観測所（TAO）6.5-m 望遠鏡用中間赤外線観測装置 MIMIZUKU に搭載する冷却チョッパーを実際に開発し、近い将来に天文観測実証ができるものを開発する。冷却チョッパーに求められる性能は「低温動作・低発熱・高精度高速駆動」であるが、本研究ではこの開発を通し、20-30 K の温度環境で動作し、30 mm 角程度のアルミ鏡を周波数 2 Hz、遷移時間 50 ms 以下で駆動、さらに発熱量を 100 mW より十分抑えた冷却チョッパーを実現する。これにより、次世代大型望遠鏡の地上中間赤外線観測の実現につながるキー技術を確立する。

冷却チョッパーの開発では「機械設計」「制御設計」「動作試験」が基本要素となる。MIMIZUKU 用冷却チョッパーについてはこれまでの研究のなかで、「試験機の機械設計」「制御測の基本設計」「試験機の要素試験」が完了していた。結果、試験機を踏襲すれば、冷却環境下である程度で動作するチョッパーが実現できる見込みがある一方、さらなる高速化も必要であることがわかった。これを受けて今年度は、**①試験機の冷却動作試験・②MIMIZUKU 搭載機の開発・③微分先行型 PD 制御試験・④モデルマッチング型二自由度 PD 制御試験**の四つの課題を設定し、冷却チョッパーの性能向上と MIMIZUKU 搭載機の開発を進めることとした。以下、各課題の目標と成果について報告する。

- ① **試験機の冷却動作試験**: 本課題ではこれまで開発・試験してきた冷却チョッパー試験機を対象に、詳細な冷却動作特性の評価（約 20 K）と動作の高速化を行うことを目的に設定した。動作特性評価では「動作振幅」「静定時間」「静定精度」といった通常の評価項目に加え、「オートコリメータを用いた実

動作角の測定」「動作発熱量の測定」「長時間動作試験」を実施した。実動作角の測定では、チョッパー搭載ギャップセンサーと動作角の間に良好な線形性を確認した。発熱量測定では、チョッパーが数 mW の低発熱を実現していることを確認した（要求値: ≤ 100 mW）。長時間動作試験ではまだ 1 時間程度であるが、連続動作を経ても動作特性が変わらないことを確認した。さらに、制御測のパラメータ調整の結果、約 40 ms の静定時間を定常的に達成できるようになった（要求値: ≤ 50 ms）。ただし新たな課題として、少なくとも冷却試験デュワーの環境下においては冷凍機振動による擾乱が大きく、静定精度が要求をやや下回ることが分かった。MIMIZUKU 搭載時の振動環境は MIMIZUKU に搭載してみないとわからないため、本課題は MIMIZUKU 搭載機の試験で今後調査を進めることとした。新たな課題を除き、本課題の目標は達成できたと思われる。本課題の成果は担当学生（道藤）により、日本天文学会での発表、修士論文がなされ、2022 年の国際光工学会（SPIE）での発表も予定されている。

② **MIMIZUKU 搭載機の開発**: 本課題では、実用化の目途がたった試験機を踏襲して MIMIZUKU 搭載機を設計・開発することを目的とした。冷却チョッパーを MIMIZUKU 光学系に組み込むためには、MIMIZUKU 光学ベンチに対して適切な位置精度でこれを設置する必要がある。そのための機械光学設計を行い、光学デザインより要求設置位置精度を明らかにし、これを実現するための機械設計を実施した。その後、設計した機械部品、および平面鏡・駆動鏡の製作を実施した。当初はこれに加え、センサや駆動系のワイヤハーネスも開発して MIMIZUKU への搭載も実施する予定であったが、想定より機械部品・鏡の価格が高く、スケジュールの問題もありこれを断念した。残るハーネス製作を行い、来年度早期の MIMIZUKU 搭載を目指したい。

③ **微分先行型 PD 制御試験**: 試験機の制御測として「モデルマッチング型二自由度制御系」を現在採用しているが、即応性・安定性を向上したい状況にある。そこで本課題では、過去に検討した制御候補を再検討することで改善を目指した。中でも即応性の観点で有力な「微分先行型 PD 制御」に焦点を絞り、制御実験を再実施した。この実験では、ループ整形により選定された制御ゲインを基礎として、実験的にパラメータ調整を行い、制御系の特性と課題を見極めることを目的とした。

結果としては、制御ゲインをうまく選定することにより、モデルマッチング型二自由度制御系と遜色のない性能を達成できる場合があることが明らかとなった。一般に、PD 制御では定常偏差が残ることが課題とされる。本実験においても、微分先行型 PD 制御に定常偏差が生じることが確認された。定常偏差の補正を行うために矩形波指令値の振幅を変えて多数の測定を行った結果、微分先行型 PD 制御の定常偏差には線形性があることが確認された。この結果をもとに、矩形波指令値の振幅を定数倍補正することにより定常偏差を補正することができた。

④ **モデルマッチング型二自由度 PD 制御試験**: 現行のモデルマッチング型二自由度 PD 制御では定常偏差が存在することが確認されており、その補正方法が求められていた。本研究では、この定常偏差の補正方法の確立を目的とした。また、テーマ③において微分先行型 PD 制御も有力であると判断されたことから、モデルマッチング型二自由度 PD 制御の制御パラメータを再調整し、微分先行型 PD 制御との対比を行うことも追加目的として設定した。

定常偏差の補正を行うために矩形波指令値の振幅を変えて多数の測定を行った結果、モデルマッチング型二自由度 PD 制御の定常偏差にも線形性があることが確認された。ただし、微分先行型 PD 制御の定常偏差は定数倍であったのに対し、モデルマッチング型二自由度 PD 制御の定常偏差にはバイアスがのることが明らかとなった。この矩形波指令値のバイアスを補正することにより定常偏差を補正できた。この点で一つ目の目的は達成できたと思われる。

微分先行型 PD 制御との比較では、両制御測とも評価指標上は類似する性能が確認された。しかし詳しくみると、モデルマッチング型二自由度 PD 制御はうまく動作するときには即応性がよいが動き方に癖があるのに対し、微分先行型 PD 制御は癖のない動きであり平均的に安定した応答特性を示すということもわかった。この違いの原因解明は今後の課題であるが、先行研究で見過ごしていた微分先行型 PD 制御の有用性を再発見したことも、本研究の重要な成果である。