

TMT搭載中間赤外線装置冷却チョッピング実現に向けた超伝導ボイスコイルモーターを用いたアクチュエーターの開発検討

東京大学天文学教育研究センター 毛利清 kmori@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

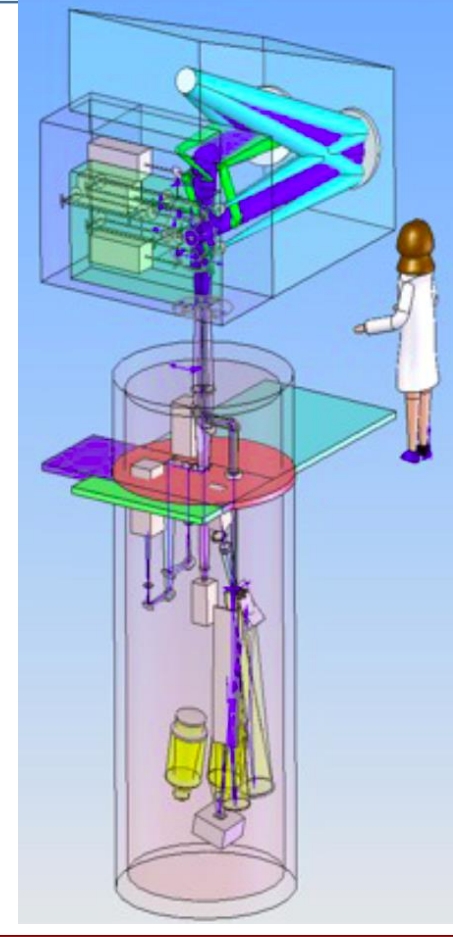
宮田隆志、上塚貴史、高橋英則、酒向重行、大澤亮、岡田一志、内山允史、大崎博之、広江貴（東京大学）、本田充彦（久留米大学）

概要

地上中間赤外線観測では、これまで大気放射の変動を望遠鏡の副鏡を動かす副鏡チョッピングという手法で除去してきた。しかし大口径望遠鏡では副鏡の駆動が困難であり、代替案として挙げられている装置内の鏡を動かす冷却チョッピングの技術開発が必須である。我々のグループでは、TMTの第二期装置としての運用を目指すMICH計画における冷却チョッピング機構の開発を行っている。そして要求性能である 20-30 K 環境下で 0.1 W 未満の発熱・2.5 mm 以上のストロークが達成できるものとして、超伝導線を使用したボイスコイルモーター（VCM）を用いた試作機の作成を行った。試作機は実験評価段階であるが、有限要素法を用いた発熱解析などの性能評価によって、VCMに大幅な改良が可能であることが判明した。これを受けて、現在ある試作機の評価と並行して新たなVCMを用いた試作2号機的设计・製作を進めている。

MICHI計画

MICHI (Mid-Infrared Camera, High-disperser, and Integral field unit) は、TMT (Thirty Meter Telescope) の第二期装置として運用を目指している、中間赤外線の観測装置である。既存の装置と比較して分解能と感度が上昇するため、原始惑星系円盤のダスト形成現場と星を分解することや、系外惑星の大気を分光し、大気組成の理解や生命の兆候をとらえることなどが可能になる。



MICHIの完成想像図

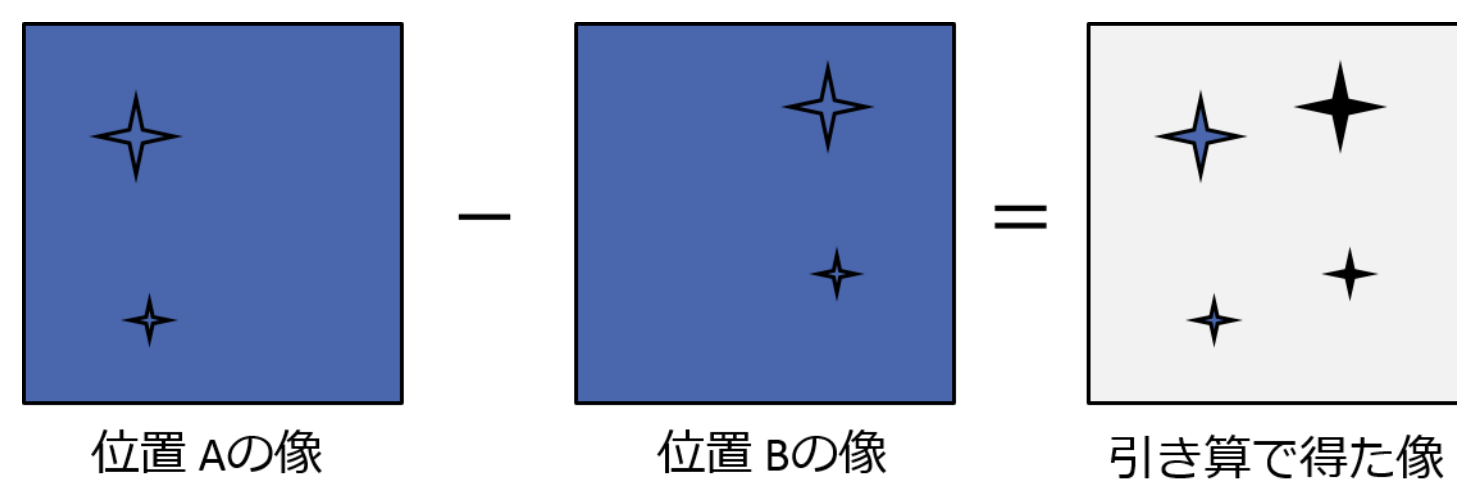


TMTの完成予想CG

冷却チョッピング

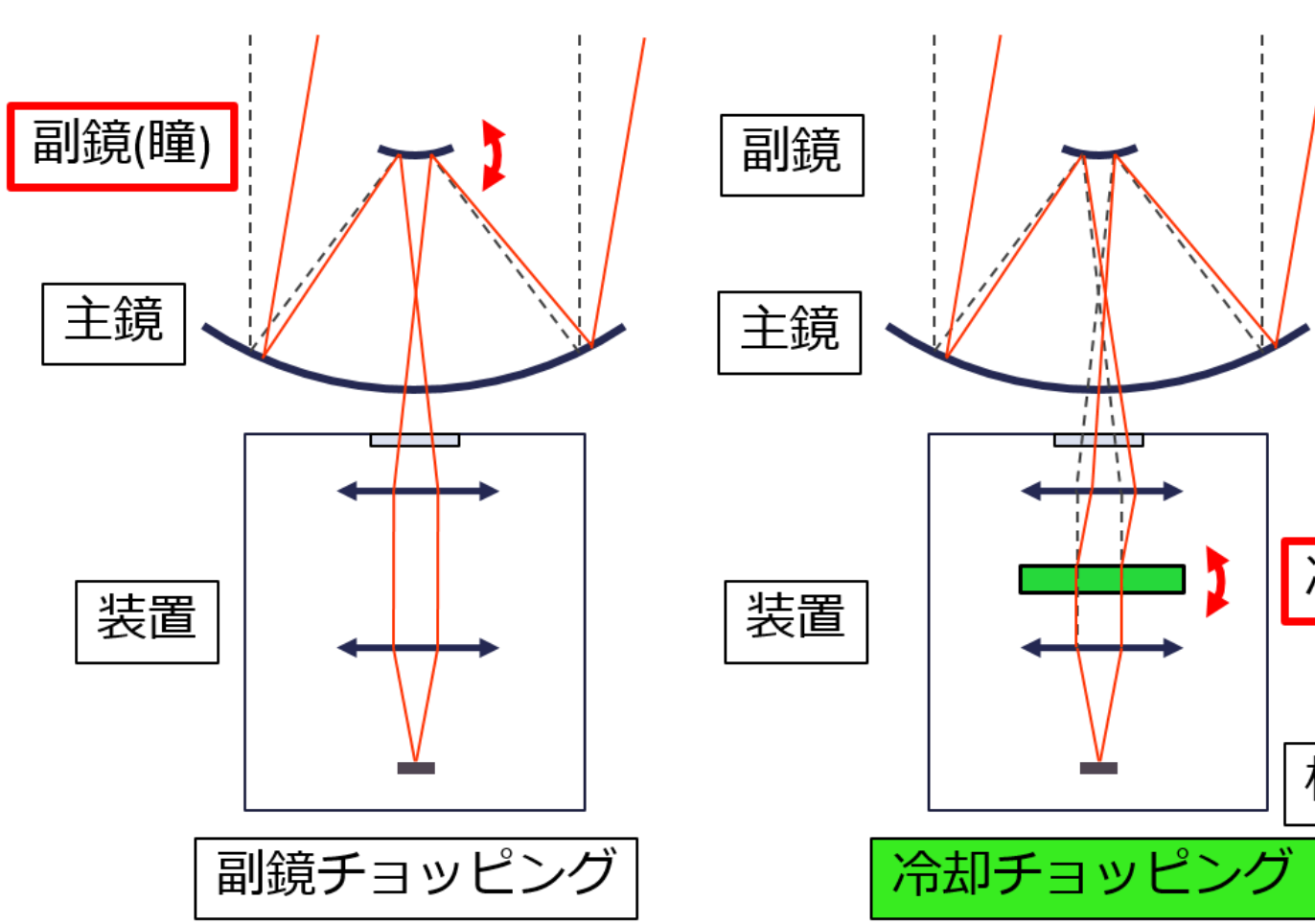
チョッピングとは

大気放射の変動が大きい地上中間赤外線での観測において、変動のタイムスケールより短い時間に撮った位置のわずかに異なる2枚の画像を差し引くことで、天体の画像から大気放射を取り除く技術である。一般に撮影する位置は副鏡をわずかにずらすことで変化させる。中間赤外線における大気放射の変動のタイムスケールは、およそ1秒未満であるとされているため、チョッピングは1秒未満に行えることが望ましい。



チョッピングの概念図

副鏡チョッピングから冷却チョッピングへ



TMTなどの大型望遠鏡では、従来のような副鏡チョッピングを行うには副鏡が巨大すぎ、駆動が難しい。そこで副鏡の代わりに装置内に設置した鏡を動かす、副鏡を動かした時と同じ効果を得るのが冷却チョッピングである。装置内部は中間赤外線の放射を抑えるために冷却されており、鏡も低温環境下で駆動させる必要がある。

副鏡チョッピングと冷却チョッピングの比較図

チョッピングの要求

チョッピングの要求は観測からの要求と、環境の要求で決めることができる。観測においては、広がった天体をチョッピングした際、異なる写真の上で天体が重ならないこと、大気の変動よりも早い周期でチョッピングを行うこと、の2点を満たす必要がある。環境からの要求としては、低温状態かつ、その温度に影響を及ぼさないような低発熱で動く、という2点である。これらの要求をTMT/MICHIの場合に具体的な数値で表したのが以下の表である。

観測からの要求

観測の要求項目	値
チョップ幅	> 30"
周期	< 0.2 [s]

チョッピング機構の要求

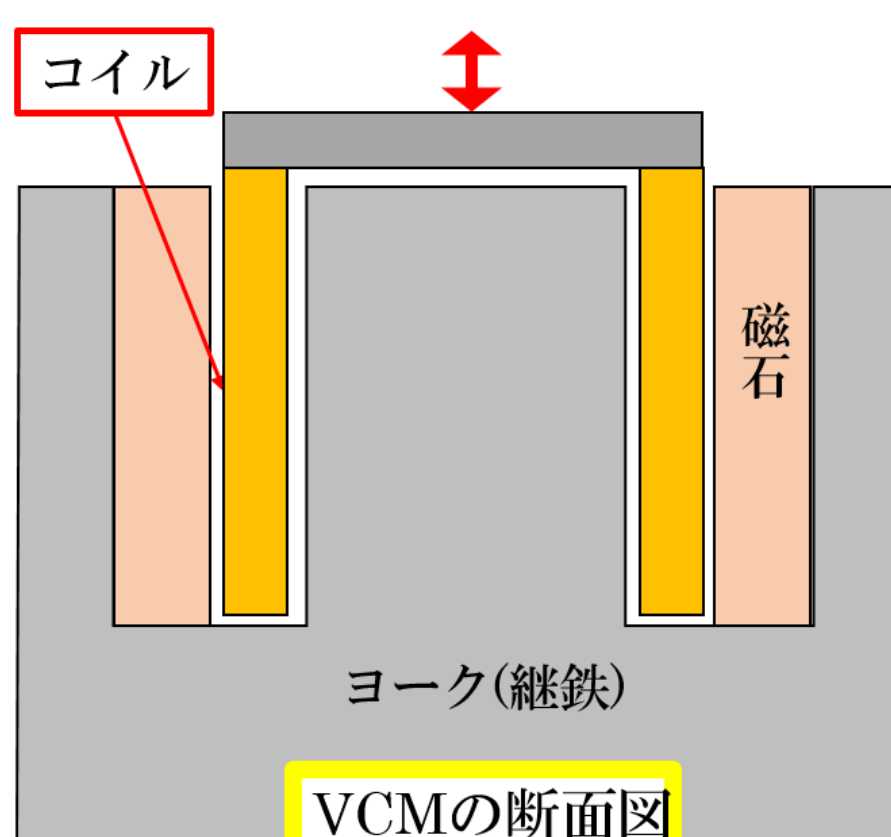
装置の要求項目	値
駆動幅	> 2.5 [mm]
駆動時間	~ 0.01 [s]
環境の要求項目	値
温度環境	20 - 30 [K]
発熱	< 0.1 [W]

VCMと試作機の製作

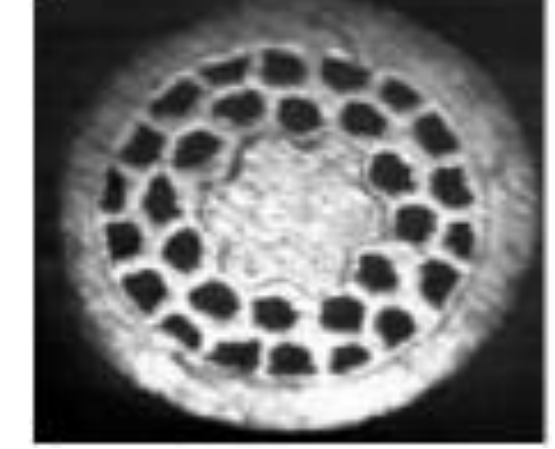
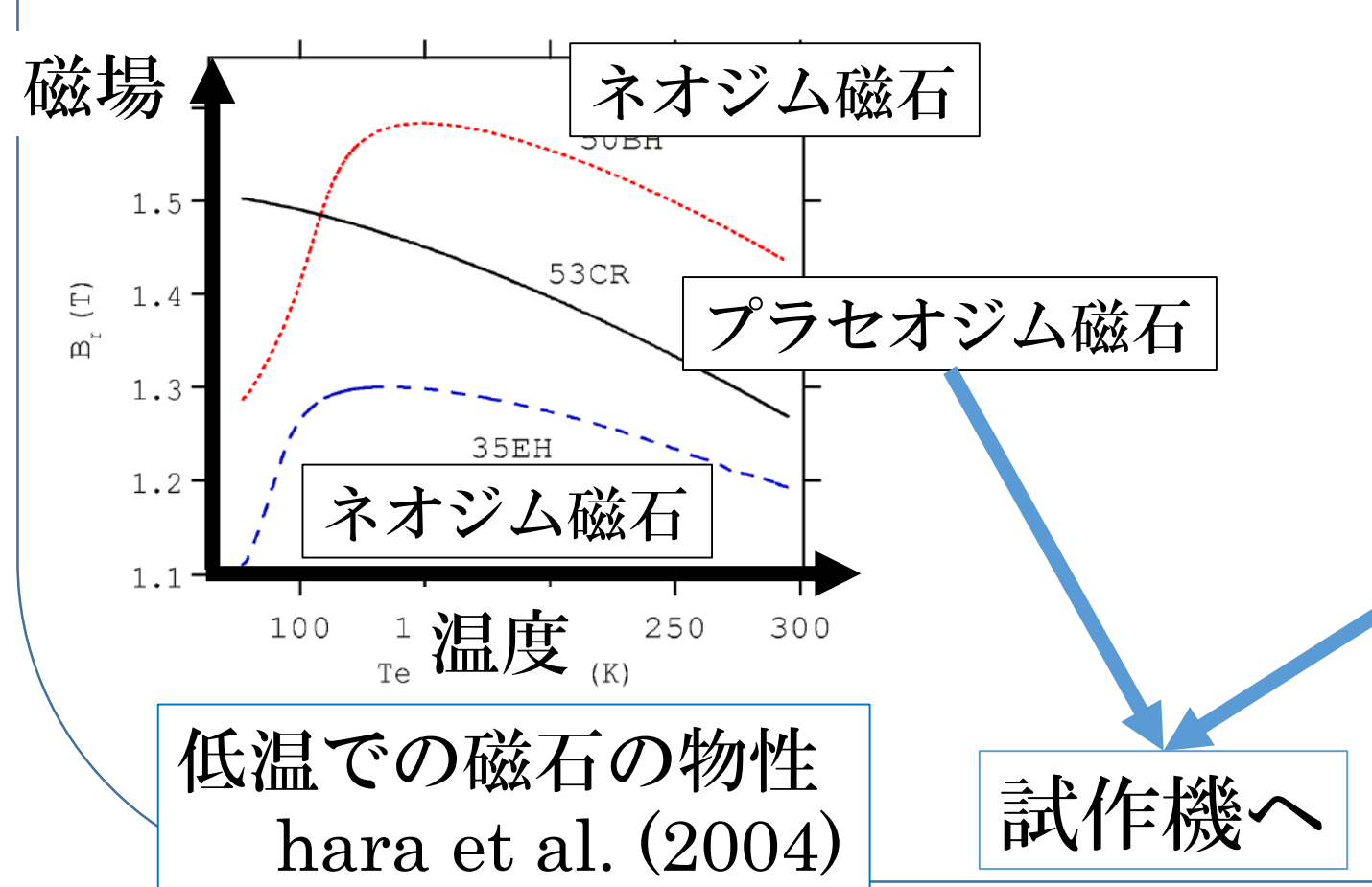
上記の要求を満たす機構を製作する際、我々はボイスコイルモーター（VCM）に着目した。ボイスコイルモーターはスピーカーの仕組みを応用した直動モーターであり、駆動部と固定部が非接触、仕組みが単純で扱いやすい、などの利点を持つ。今回はこのVCMを利用した機構を考えるため、チョッピング機構の要求をVCMの要求に直した。そして加速度的要求に対しては低温時でも磁束密度の下がらないプラセオジム磁石の利用で、温度環境と発熱に対しては39K以下で超伝導状態となるMgB₂を用いた超伝導線と、それぞれ要求に近づけた試作1号機を製作した。

VCMの要求

要求項目	値
加速度	≥ 100 [m/s ²]
温度環境	20 - 30 [K]
発熱	< 0.1 [W]



VCMの出力は加速度で評価できる



MgB₂を使用した超伝導線の断面図 (Hypertech)

試作1号機とその改良

試作1号機の欠点

これらの要求から製作された試作1号機だが、以下の点の改良が可能であった。

1. 超伝導線

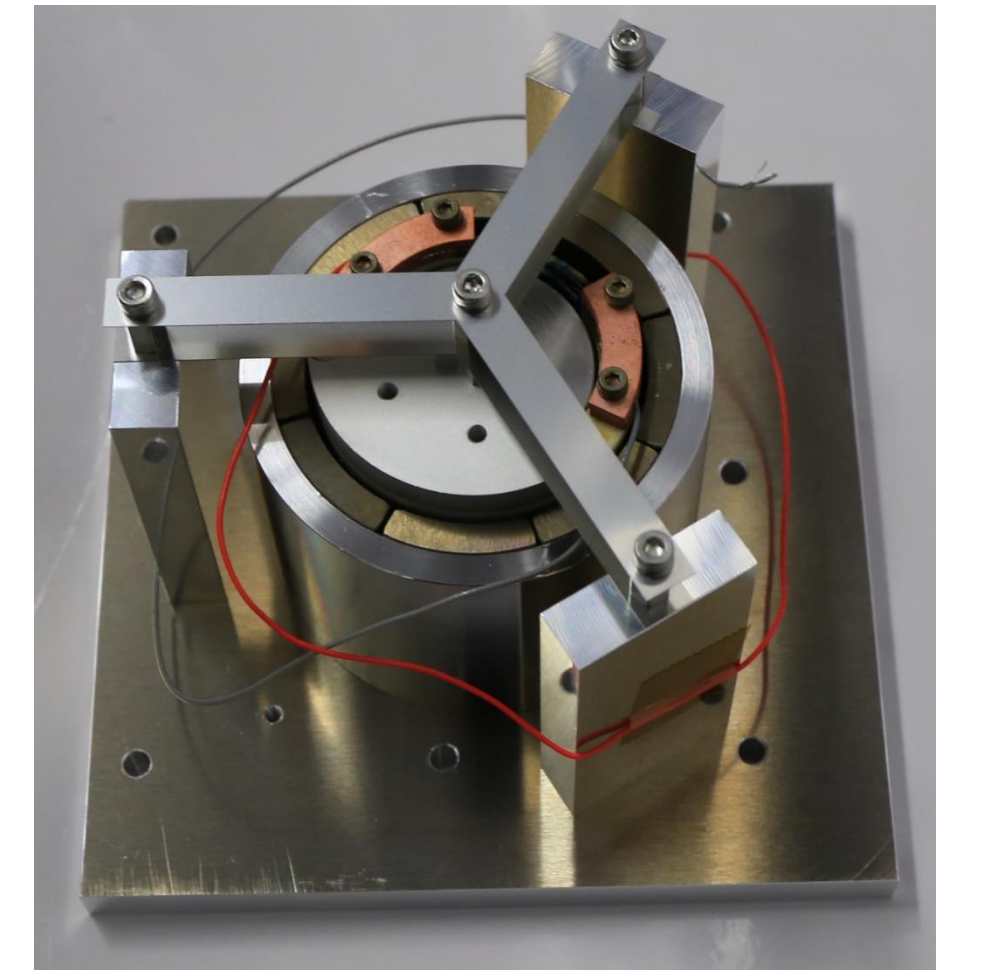
Hypertech社より購入した超伝導線は我々の用途に使うには大きく、VCMが大型化して駆動部が重くなってしまった。また、銅線よりも発熱が大きいということも、東京大学新領域創成科学研究科大崎研究室の解析により明らかとなった。

2. 磁束密度の最適化

試作1号機は最高の飽和磁束密度を誇るパーメンジュールの使用にも関わらず磁束飽和を起こしており、また磁石の作る反磁場の大きい形状であった。以上の理由から、試作1号機は要求水準に加速度が届かないものとなってしまった。我々はこれらの点を改善すべく、新たな試作機的设计を行った。

試作1号機のパラメータ

パラメーター	値
磁束密度	0.33 [T]
コイルの長さ	30.8 [m]
質量	0.2 [kg] (駆動部)
加速度	51 [m/s ²] (1 A 導通)



試作1号機の写真

試作2号機的设计

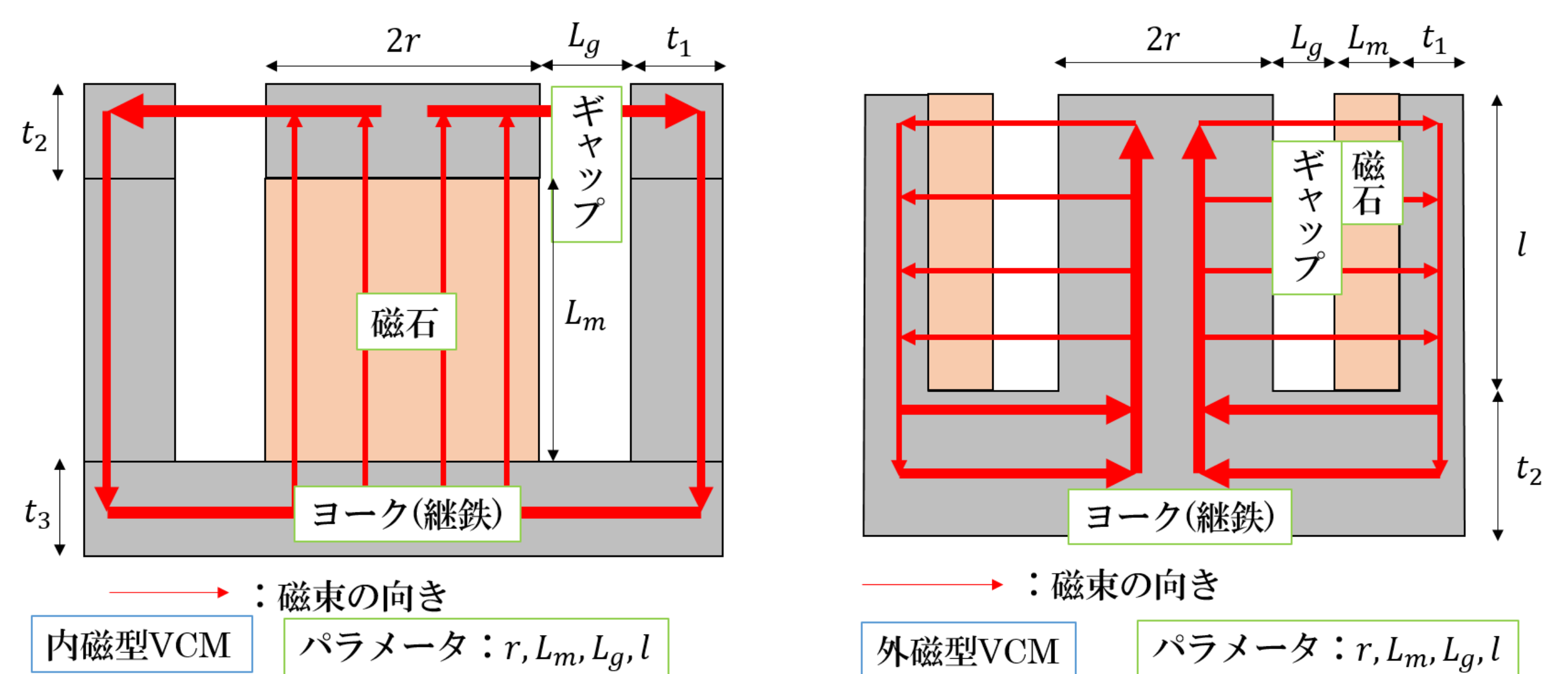
試作1号機で明らかとなった問題点を踏まえ、試作2号機的设计においては以下の点を新たに検討した。

1. 細い超伝導線の利用

超伝導線を交流電源のもとで用いた場合、磁場に対するヒステリシスにより発熱が発生する。超伝導線の細線化は小型化だけでなく、超伝導線のフィラメント数の減少や、フィラメントの径の減少により、超伝導線特有の発熱の減少も期待できる。

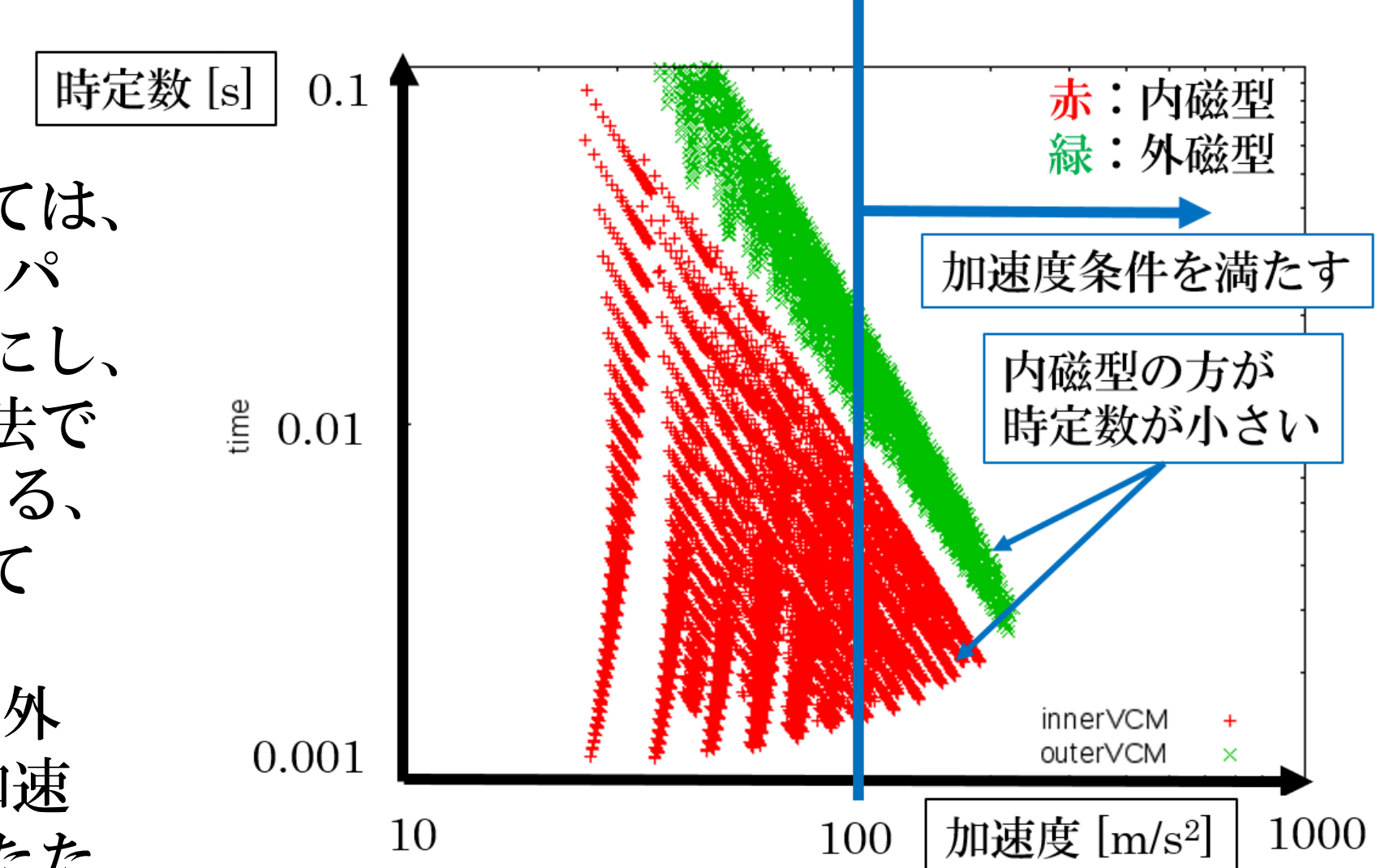
我々のグループは大崎先生の紹介により、細い超伝導線の製作を行っている企業に細線の作成を依頼することができた。これにより使用する超伝導線の直径は 0.98 mm から 0.35 mm へと大幅に減少した。

2. 仮定磁路法を用いたパラメータサーチによる磁気回路設計



磁束飽和や反磁場の大きい形状を避けるため、仮定磁路法を用いたVCMのパラメータサーチを行った。詳細としては、VCMの構造を上記のようないくつかのパラメータの割り振りによって決定できるようにし、設定したパラメータについて仮定磁路法で磁束密度を求め、VCMの出力を計算する、ということを実行範囲内で行った。

VCMの構造としては上記の内磁型、外磁型の2つを用いた。サーチの結果、加速度的要求を満たす設計は多く見つかったため、その中でもVCMの駆動の時定数の小さな設計をもとに、試作2号機的设计を決定した。駆動の時定数は、VCMの電気的な特性と、機械的な特性により生じる遅れから、機械的な遅れが十分遅くなるように調整したときの遅れ時間である。



各構造における加速度と時定数の関係

試作2号機のパラメータ

パラメーター	値
磁束密度	1.12 [T]
コイルの長さ	17.6 [m] (磁束の貫く箇所)
質量	0.062 [kg] (駆動部)
加速度	129 [m/s ²] (1 A 導通)



試作2号機のボビン

今後の予定

試作1号機

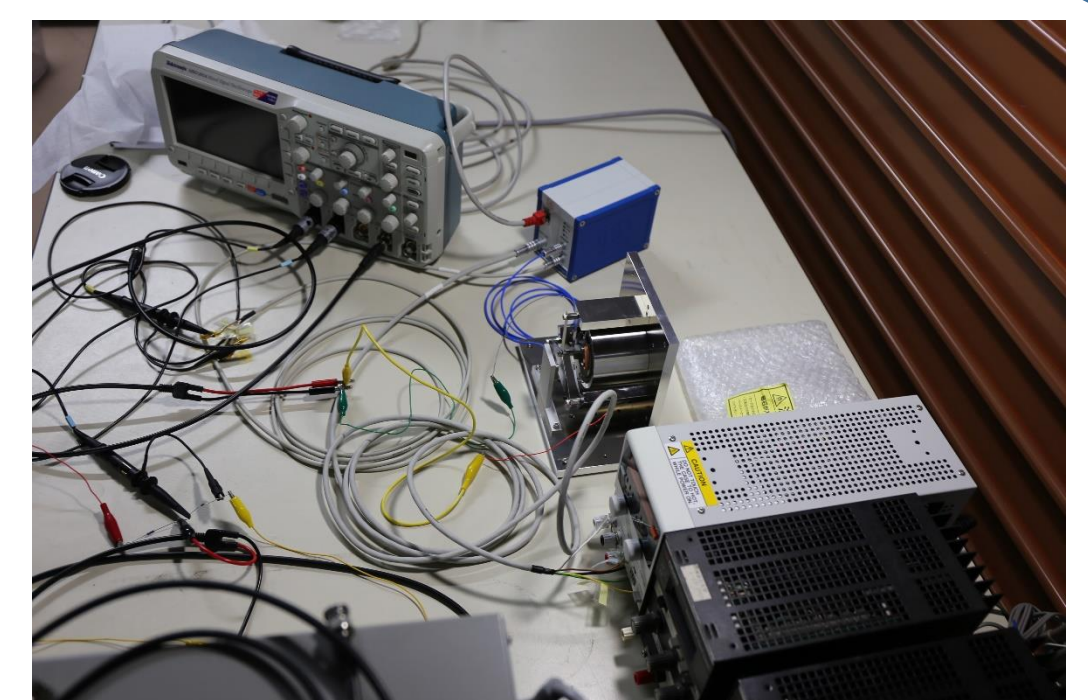
低温での駆動試験、発熱実測、物性調査

試作2号機

駆動部の設計、発熱・駆動解析、駆動試験

その他

同じく冷却チョッピング機構を用いる中間赤外線観測装置MIMIZUKUへの搭載
低発熱衛星搭載機器としての基礎開発



試作1号機の駆動試験の様子