

超伝導を用いた低発熱ボイスコイルモータの開発

東京大学理学系研究科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（東大・理・天文センター）、大崎博之、広江貴（東大・新領域）、本田充彦（久留米大学）、片ざ宏一（JAXA/ISAS）

概要

衛星搭載機器において低温環境下で低発熱で駆動する動力源の存在は、衛星の熱的安定性や冷媒を用いる場合の寿命を延ばす点で非常に有用である。ボイスコイルモータ（VCM）は機構が単純かつ駆動部と支持部が非接触であることから、Herschel衛星などにも使用されている有望な技術である。しかし、衛星搭載される小型VCMで広域または高速駆動を行うと、従来のものでは大きなジュール熱が発生してしまう。そこで我々は、ジュール熱ゼロとなる超伝導技術を使用して、おおよそ 100 mm 以下のサイズの小型超伝導モータで低発熱かつ広域（> 2 mm）または高速駆動（静定時間 < 10 ms）を実現するようなボイスコイルモータの開発に取り組んでいる。本ポスターではそのプロトタイプとして、衛星搭載機器に近い条件を要求される地上中間赤外線観測装置に使用する超伝導VCMの設計・試作並びにその性能評価と、現在の課題について発表する。

衛星搭載駆動部品の要求

衛星搭載機器に必要となる駆動部品は、低温環境下で低発熱で動作することが求められる。例えば、Herschel 衛星の装置 SPIRE では視野やキャリブレーションソースとのビームの切り替えに、同じ衛星の装置 PACS では主鏡の熱放射を取り除くためのチョッピングに、それぞれコイルを使用したモータを用いているが、これらのモータには 4 mW 以下の発熱という条件が課されている。このような制限のため、現在の衛星搭載駆動部品の速度またはストロークは、小さなものしか存在していなかった。コイルモータでは、コイル自身のジュール熱が最大の発熱源となるため、**ジュール熱ゼロの超伝導線**を用いてこの発熱を削減できれば、**高速もしくは高ストロークのモータが実現可能**となる。

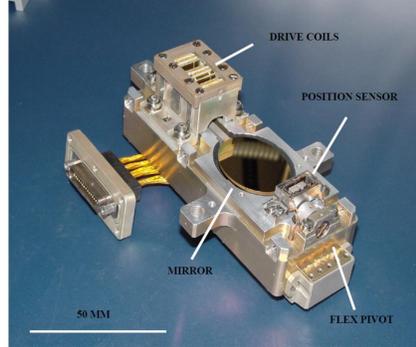


図1: Herschel 衛星の装置 PACS のチョッパー (Krause et al., 2006)

我々のグループでは上記目標を達成するため、まずは**衛星搭載環境に近い要求のある地上中間赤外線装置に使用する、超伝導線を用いたモータの開発**を行っている。また、モータの設計としては**仕組みが単純で接触部品の少ないボイスコイルモータ（VCM）に着目し、超伝導VCMの設計・試作・性能評価**を行った。

地上中間赤外線チョッピング

ここでは我々のグループが現在行っている、地上中間赤外線装置に使用するVCMについて、用途と設計を簡単にまとめる。

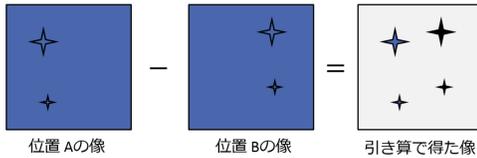


図2: チョッピングの概念図

VCMの用途

地上中間赤外線での観測では、大気放射の変動が大きいため、図2のように、位置のわずかに異なる2枚の画像を差し引きすることで、天体の画像から大気放射を取り除くチョッピングが用いられる。撮像する位置は、中間赤外線装置内の鏡をわずかにずらすことで変化させる。鏡をずらす目的で用いるモータは、像に熱放射が入るのを防ぐため、真空低温環境下で低発熱で駆動することが要求される。また、大気放射の変動のタイムスケールよりも短い時間で、天体の撮像位置がもとの位置と重ならないように変化させることも重要となる。

チョッピングの要求

チョッピングの具体的な要求値は、真空低温環境下における発熱量と、駆動時間及びストロークである。我々は30メートル望遠鏡（TMT）への搭載を目指す中間赤外線装置MICH（Mid-Infrared Camera, High disperser, and Integral field unit）計画に使用することを想定し、チョッピング機構の要求を表1の通り算出した。

表1: チョッピング機構の要求

要求項目	値
駆動幅	> 2.5 [mm]
駆動時間	< 10 [ms]
温度環境	20 - 30 [K]
発熱	< 100 [mW]

VCMと試作機の製作

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、表2のようにVCMの要求に直した。VCMは電流が磁場から受けるローレンツ力で動くため、VCMの性能を高めるためには磁束密度を大きくすることが有効である。ただし、一般に最強とされるネオジウム磁石は低温環境下では磁束密度が低下することが知られている。そこで、図3に示されているように、低温時でも磁束密度の下がらないプラセオジウム磁石を利用した。また、超伝導線材については、転移温度が39Kである、Hyper-Tech社で市販されているMgB₂線材を用いた。この線材の断面図を図4に示している。我々はまず、これらの材料を使用してできるだけ要求に近づけた試作機を製作した。そのパラメータを表3に、写真を図5に示した。

表2: 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	< 100 [mW]

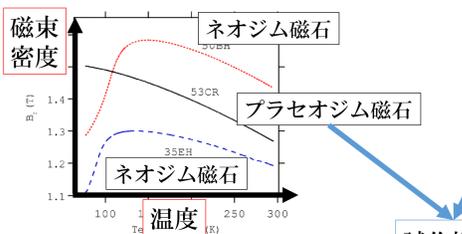


図3: 低温での磁石の物性 hara et al. (2004)

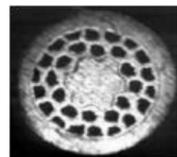


図4: MgB₂を使用した超伝導線の断面図 黒い部分がMgB₂である (Hyper-Tech社)

表3: 試作機のパラメータ

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	102 [m/s ²] (2A 導通)

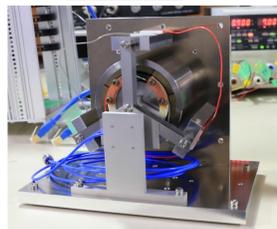


図5: 試作機の写真

試作機の改良

試作機の欠点

これらの工夫を行い製作した試作機だが、実験測定以前から、シミュレーションなどにより以下の点に問題があることが判明していた。

1. 超伝導線

Hyper-Tech社より購入した超伝導線は巻き径が太く、VCMが大型化して駆動部が重くなってしまった。また、高純度の銅線よりも発熱が大きいということも、シミュレーション解析（表4）により明らかとなった。

表4: 発熱量の見積もり 単位はすべて [mW]

損失\線材	SC wire	Copper RRR=10	Copper RRR=100
ヒステリシス損	24	24	24
渦電流損 (鉄心)	5	5	5
渦電流損 (PM)	7	7	7
交流損失	27	-	-
銅損	-	59	8
合計	63	95	44

※摩擦などの損失は除いている

2. 磁束密度の最適化

試作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、試作機は要求達成のための導通電流が大きく、発熱が大き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、新たな試作機の設計を行った。

新試作機の設計

試作機で明らかとなった問題点を踏まえ、新試作機の設計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が存在するため、熱損失が発生する。超伝導線の細線化は、超伝導線のフィラメント数の減少や、フィラメント径の縮小により、超伝導線内での磁場変動が減り、上記の発熱の減少が期待できる。我々のグループは、Hyper-Tech社よりも細い超伝導線の製作を行っている企業に、市販されていない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

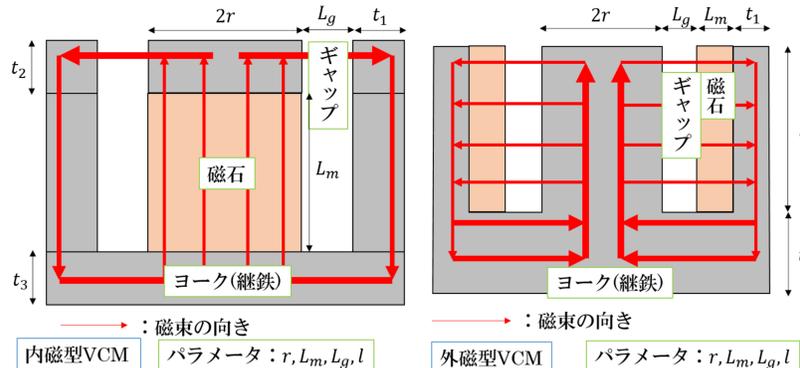


図6: パラメータサーチで仮定したVCMの形状 左: 内側に磁石のある内磁型 右: 外側に磁石のある外磁型

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。VCMの構造を図6のようないくつかのパラメータに割り振り、VCMの出力を計算する、ということをして全パラメータ範囲に対して行った。

VCMの構造として、内磁型、外磁型の2つを用いた。サーチの結果、図7に示す通り加速度の要求を満たす設計は多く見つかったため、より体積の小さい設計を採用することとした。この設計を用いた新試作機として、我々のグループで開発を進めているTAO望遠鏡用中間赤外線装置MIMIZUKUに搭載するMIMIZUKU試作機を製作中である。この試作機のパラメータは表5に示した。また、ボビンの写真を図8に示している。新たな設計の評価も含め、実際に装置に搭載して実証試験を行う計画である。

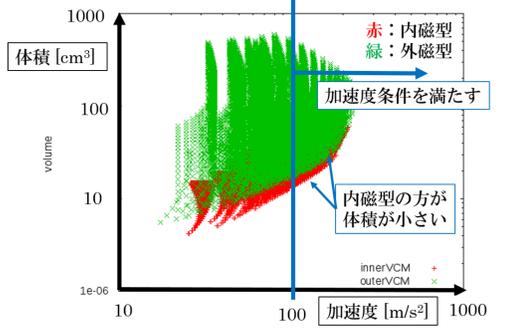


図7: 各構造における加速度と体積の関係

表5: MIMIZUKU試作機のパラメータ 加速度の要求がMICHと異なる(> 40 [m/s²])

パラメーター	値
磁束密度	1.02 [T]
コイルの長さ	2.48 [m] (磁束の貫く箇所)
質量	50.4 [g] (駆動部)
加速度	50.4 [m/s ²] (1A 導通)

今後の課題

試作機: 低温での駆動試験、発熱計測、物性調査
MIMIZUKU試作機: 駆動部の設計、発熱・駆動解析、実証試験
その他: MICH用試作機の設計・製作

MIMIZUKU試作機の発熱見積もり
更なる低発熱線材の使用、線材以外の発熱の軽減検討 (超伝導線と高純度金属線の比較、ヒステリシスや渦電流の軽減など)

以上の開発を通じて、最終的にはスペースに利用できる駆動素子の完成を目指す

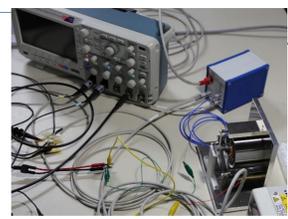


図9: 試作機の駆動試験の様子 オシロスコープで電圧を加えた時のVCMの変位を見ている