

TMT 中間赤外線観測装置冷却チョッパー用ボイスコイルモーターの開発

毛利 清 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学教育研究センター)

Abstract

中間赤外線と呼ばれる波長域 ($\lambda = 5\text{--}40 \mu\text{m}$) は、ちょうど地上大気からの放射のピーク ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$) を含んでいるだけではなく、大気放射の変動が大きいので、星からの信号が大気の変動によるノイズに埋もれてしまう。そのため観測においてはチョッピングという方法を用いてこのノイズを取り除いており、現在は副鏡を素早く動かす「副鏡チョッピング」が用いられている。しかし、Thirty Meter Telescope (TMT) などの大口径望遠鏡では副鏡が巨大化し、素早い動きができないため、代わりに装置内の鏡をチョッパーで動かす「冷却チョッピング」という新たな手法の導入が検討されている。

本収録では、まずはチョッピングとは何か？というところから始め、「副鏡チョッピング」と「冷却チョッピング」の違いについて説明する。次に、筆者らが開発を進めている冷却チョッパーの搭載を計画している、中間赤外線観測装置 MICHU について説明する。MICHU は TMT の第 2 期装置としての運用を計画している装置であり、望遠鏡の高い空間分解能と装置の高い波長分解能を組み合わせることで、原始惑星系円盤の形成・構造解析や、生命兆候の探査、AGB 星におけるダスト形成領域の直接撮像などをターゲットとしている。続けてこの装置に搭載するにあたってチョッパーに必要な条件と、それを実現するボイスコイルモーター (VCM) という装置の設計について説明する。最後に、冷却チョッパーの開発の進捗と、今後の課題や展望、ひいては装置技術の応用の可能性についても述べる。

1 チョッピングとは

地上中間赤外線観測においては、地上付近の大気の温度は約 300 K となるため、大気放射が観測に入ってくることは避けられない問題である。この放射がほぼ一定であれば、sky の像を天体とは別に撮像するなどして大気放射成分を取り除くことができる。しかし、放射の変動が天体の光にとって無視できないほど大きくなってしまったため、この手法を用いることはできない。したがって、地上からの中間赤外線観測においては、光学系の瞳位置にある鏡を数 Hz の振動数で動かす、望遠鏡の視野を高速で切り替えてそれぞれの位置の像を撮像し、この像を差し引きして、大気放射を取り除くということが行われる。この鏡を動かして視野を高速に切り替える技術がチョッピングである。ある位置 A と位置 B で像を取り、それを差し引きする様子を図 1 に示した。

さらに、中間赤外線の検出器として用いられる Si:As や Si:Sb はかなり温度に対して敏感であり、少しの入熱で暗電流が指数関数的に増加してしまう、という特徴を持っている。短時間のうちに撮られた 2

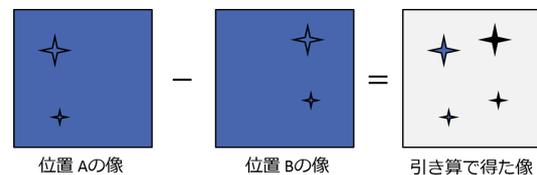


図 1: チョッピングの概要

つの画像を差し引きすることは、大気放射を取り除くだけではなく、検出器の感度むらを補正するという意味でも重要な意味を持っているため、チョッピングは地上での中間赤外線の観測においては欠かせない技術となっている。

(1) 副鏡チョッピング

現在の地上中間赤外線観測のほとんどで行われているのがこの副鏡チョッピングであり、その名の通り副鏡を動かして視野を切り替える技術である。これは現存する望遠鏡では副鏡の大きさが比較的小さく動かしやすいため、特に技術的な課題を生じてはいないが、次世代の大口径望遠鏡では副鏡の巨大化により、副鏡を高速で動かすことが不可能となる。例え

ば TMT の副鏡の口径は 4 m であり、これを数 Hz で動かすことが困難であるのは想像に難くない。したがって、大口径望遠鏡で中間赤外線観測を行うには、副鏡以外の鏡を動かす必要が生じるのである。

(2) 冷却チョッピング

望遠鏡の副鏡の代わりに、装置内の瞳位置にある鏡を動かすことができれば、大口径望遠鏡でも高速で視野を切り替えることが可能となる。ただし、この鏡は装置内部にあるため、常温では中間赤外線のノイズとなる熱放射を大量に出すことになってしまう。したがって、この鏡は極低温下に置かれることとなる。これが、冷却チョッピングと呼ばれる新たなチョッピング手法である。ここではさらに、この鏡を動かす機構についても、ノイズとなる熱放射を極力抑える必要があるため、低発熱で鏡を高速に動かす必要がある。低発熱と高速駆動は相反する要求であるため、これらを実現する冷却チョッピングの技術はまた確立されていないのが現状である。

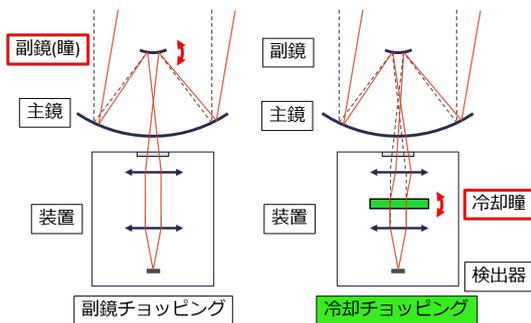


図 2: 冷却チョッピングと副鏡チョッピングの違い

2 中間赤外線観測装置 MICHI

MICHI は、Mid-Infrared Camera, High-disperser, and Integral field unit の略であり、TMT の第 2 期装置としての運用が計画されている。TMT に搭載することによって実現される高い空間分解能によって、AGB 星のダスト形成領域を直接分解したり、高波長分解能の分光素子の搭載により、原始惑星系円盤に生命の兆候となるラインがあるかを探索したりすることが可能となると考えられている。

表 1: MICHI の仕様の一覧 (A.T. Tokunaga, et al. 2010)

Wavelength Range	
Wavelength Range	N (7.3-13.8 μ m) and Q (16-25 μ m) bands
Imager	
Field of View	27.5" \times 27.5"
Pixel Scale	0.028"/pix (~ λ /2D)
Spectral Resolution	R~10-100
Detector	Raytheon Aquarius 1024 \times 1024 Si:As array
Low-dispersion Spectrometer in Imager	
Pixel Scale	0.028"/pix
Slit	27.5" in length, 0.10" to 0.3" in width. Reflective.
Disperser	Grisms.
Spectral Resolution	R~810 at N-band, R~1,100 at Q-band. Each band covered in a single exposure.
High-dispersion Spectrometer	
Pixel Scale	0.027"/pix
Slit	2.0" in length, 0.10" to 0.3" in width. Transmissive.
Disperser	Echelle and cross-disperser.
Spectral Resolution	R~ 1.2 \times 10 ⁵ at N-band.
Detector	Raytheon Aquarius 2048 \times 2048 Si:As array
Low-dispersion Spectrometer with IFU	
Pixel Scale	0.035"/pix
Slicing Mirror Unit	Composed of 22 reflective slits.
Wavelength	N-band; Q-band is optional.
Field of View	~3" (in length) \times 2" (in slices of ~22)
Disperser	Reflective gratings.
Spectral Resolution	R~300
Detector	Two Raytheon Aquarius 1024 \times 1024 Si:As arrays
Cold sky chopping mirror	
Chopper mirror	At the second pupil image in the MIRES fore-optics.
Throw	Up to 27.5" for the MIRES. Up to 55" for the IFU.
Chop frequency	Assuming up to a few Hz.
Polarimetric capabilities	
Method	Dual-beam polarimeter (half wave retarder and Wollaston prism based system)
Mode	Imaging- and spectro-polarimetry
Wavelength	Optimized at the N-band. Available to material transmission cutoff (~23 μ m)
Others	No effect to other observing modes when out of polarimetry mode.

表 1 は、MICHI の仕様の一覧である。MICHI の光学系設計において、装置内の瞳位置に入ってくる光のビームの直径は 31.1 mm と設計されている。そのため瞳位置に置く鏡の直径はマージンをとって 35 mm となっている。冷却チョッピングはこの鏡を高速で駆動することを要求しており、副鏡チョッピングと比較すると駆動する鏡の大きさが 100 分の 1 になっている。このような駆動部の大きさの比較から、大口径望遠鏡の場合は冷却チョッピングの方が高速駆動の実現が容易であると考えられているのである。

3 冷却チョッパーの要求

冷却チョッパーの設計にあたっては、まずは TMT/MICHI の設計から冷却チョッパーに対する要求性能を考える必要がある。観測上の要求としては、(1) 視野を切り替えた時に天体が重ならないこと、(2) 駆動が早いこと、(3) 低発熱であること、の 3 つが挙げられる。まず (1) については、天体が広がりを持つものであった場合、視野を切り替えた際に天体が重なってしまうと、差し引きをした画像を使うことができなくなってしまう。よって、視野の切り替えは天球上である程度の幅を持っている必要がある。MICHI の視野が 27.5" \times 27.5" であることから、今回はこの

幅が地球上で 30'' 以上あれば十分だとした。次に (2) については、大気の変動を取り除くためには数 Hz 以上の駆動が必要となる (T. Miyata et al. 1999) と言われている。駆動周波数を 5 Hz とするならば、片方の視野を向いている時間は理想的には 100 ms となる。実際には 100 ms のうち駆動中の観測データは使えないため、今回は駆動を 10 ms 以内に行えることを要求した。最後に (3) についてだが、冷却チョッパーは 20–30 K 環境下での駆動を行うため、温度環境を保つためにも、低発熱での駆動が要求される。極低温環境下で一般に使われる冷凍機は、4 K の環境下で 1 W の熱量を排出するものであるため、今回はこの冷凍機の負荷にならないよう、0.1 W 以下になることを要求として定めた。これらの要求と、計算によって求められるチョッパーとしての要求性能を、表 2 にまとめている。

表 2: チョッパーの要求性能まとめ

チョッピングの要求		
切り替え幅	駆動時間	発熱
>30'' (地球上での値)	< 10 ms	< 0.1 W
チョッパーの要求		
チョップ幅	加速度	発熱
>2.5 mm	>100 m/s ²	<0.1 W

4 ボイスコイルモーター (VCM)

さて、チョッパーの要求性能に対して、これを満たす駆動機構として今回はボイスコイルモーター (VCM) に着目した。VCM はスピーカーに使われていた仕組みを応用したモーターであり、モーターという名前がついているが直線的に動くという特徴を持つ。モーターの仕組みとしては図 3 のように、コイル部分に電流を流すと、磁場中を電荷が動くことによるローレンツ力を受け、コイルが動く、という単純な仕組みとなっている。コイルに働くローレンツ力 F は、 $F = IBL$ で表すことができ、運動方程式 $F = ma$ と組み合わせることで、要求される加速度を満たすような設計を考えることができる。ここで I は電流であり、装置に使用する電線を考慮して最大 1 A 程

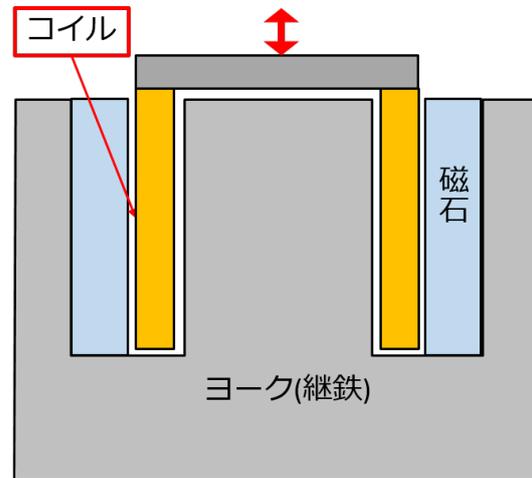


図 3: VCM の概略図

度と仮定している。 B は磁束密度であり、これは磁石の強さと、磁石の出す磁束の通り道となるヨークの形状・物性によって決まる値であり、使用する物質と形状を決定すれば算出することができ、今設計ではその値は 0.33 T である。また、 L はコイルの巻き線の長さである。最後に残った m は駆動部の質量であるが、駆動させる鏡の質量が 30 g 程度であることから、この 10 倍の 300 g を動かせるようであれば問題ないとした。

さて、これらの設計に必要な加速度を出し、かつ発熱が 0.1 W 未満に収まるという条件を満たすためには、コイルの巻き線の長さがある程度長くしながら、それでいてコイルの抵抗は低い値になる必要がある。電気抵抗はコイルの巻き線の長さに比例するため、これを達成するためには電気抵抗率 ρ が低くなければならない。その上限は計算により $\rho < 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ と求められた。常温でこの電気抵抗率の条件を達成できる物質は存在しないが、30 K 以下の極低温環境下であれば、高純度の金属線、具体的には銀線・銅線・アルミ線の電気抵抗率が $10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$ のオーダーとなり、条件を満たすということが明らかとなった。

しかし高純度の金属は入手が困難かつ、柔らかいため、線材にした場合は簡単に切れるなどの問題があり、コイルに巻いて使うということが難しい。そこで筆者らが着目したのが、冷却することで電気抵抗が 0 となる超伝導線材である。特にニホウ化マグ

ネシウム (MgB_2) は、金属でありながら転移温度が 39 K であり、また線材化もされているため、コイルの巻き線として使用可能である。チョッパーの要求はこの MgB_2 を使った設計によって達成される。具体的な設計を表 3 に示した。

表 3: 超伝導コイルによる VCM の設計

超伝導コイルの寸法			
50 mm × 50 mm × 40 mm			
力	コイルの長さ	加速度	ジュール熱
33 N	100 m	110 m/s ²	0 W

5 進捗と今後

上記の結果をもとに、現在超伝導アクチュエータの試作を行っている。図 4 がその概略である。この

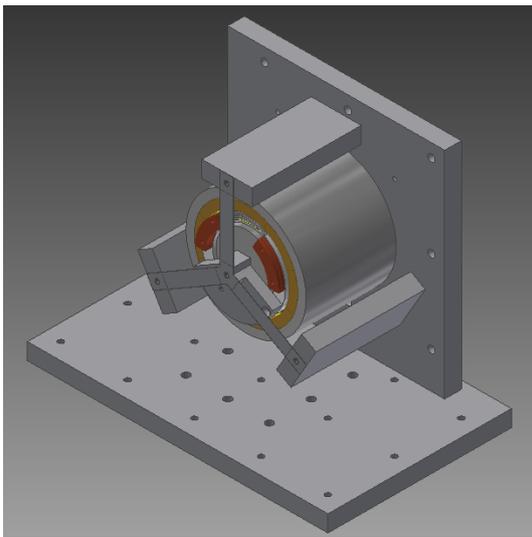


図 4: 試作中のアクチュエータの概略図

試作機はコイルの長さが 30 m であり、設計値の 1/3 にも満たないが、このような小型の超伝導コイルは工業的に見ても製作例がほとんどない珍しいものであるため、常温駆動試験・冷却試験などで性能評価を行い、設計から予測される値と実際の特徴がどれほど違ってくるかを調べる予定である。

次に、現在技術的な課題としては (1) 時定数の問題と、(2) 発熱の問題がある。(1) まず時定数につい

てであるが、コイルの自己インダクタンスと、コイルが動くことで生じる誘導起電力の影響で、定圧駆動では電圧が下がってしまい電流が遅れ、駆動が遅れることとなる。これについては電圧制御ではなく電流制御にすることにより遅れが緩和されると期待しており、実験による検証のための準備を進めている。(2) 発熱については、実は超伝導線材も交流電流では発熱があるということ、またヨークや磁石の中に電流が生じることによる発熱など、ジュール熱以外の発熱を検討する必要があるということが分かってきた。これについてはシステム全体の発熱シミュレーションを、超伝導研究の第一人者である東京大学先端エネルギー工学専攻の大崎先生に依頼しており、今後は実験による検証も含めて、大崎研究室と共同で検討を進める予定である。

最後に、冷却チョッピング技術の応用の可能性について述べる。現在試作を進めている超伝導 VCM は、低発熱でストロークを出すことができるという特徴を生かし、燃料に限界があるため冷却コストを抑える必要がある、人工衛星への搭載が実現できれば大きなメリットとなる。特に超伝導線材は直流電流であればゼロ抵抗が実現でき損失が全くないため、発熱なしでの姿勢維持といったことについては大いに期待が持てるのではないかと筆者は考えている。

Acknowledgement

本収録は筆者の学部での研究をもとに書かれたもので、指導教員の宮田隆志准教授、高橋英則氏並びに MIMIZUKU チーム (東京大学)、共同研究者である本田充彦助教 (神奈川大学) には多大なるご尽力をいただきました。簡潔ではありますがここに感謝の意を表します。

そして、夏の学校の開催にあたり、基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からご支援を賜っておりますことを感謝いたします。

Reference

- A.T. Tokunaga, et al. 2010, SPIE
- T. Miyata, et al. 1999, PASP