

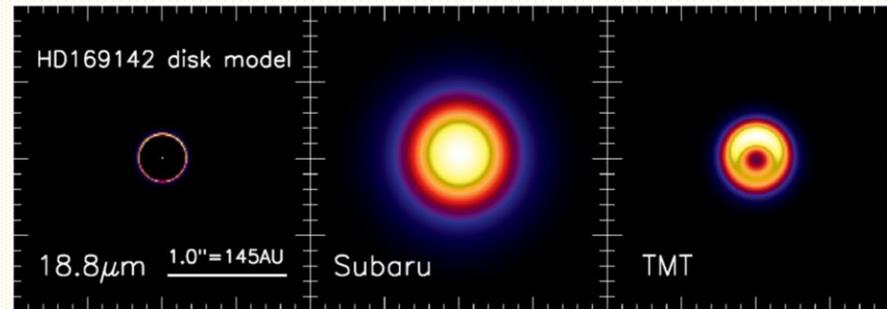
# TMT搭載中間赤外線観測装置 冷却チョッピング実現に向けた 超伝導ボイスコイルモーターを用いた アクチュエーターの開発検討

東京大学天文学教育研究センター 修士1年 毛利 清

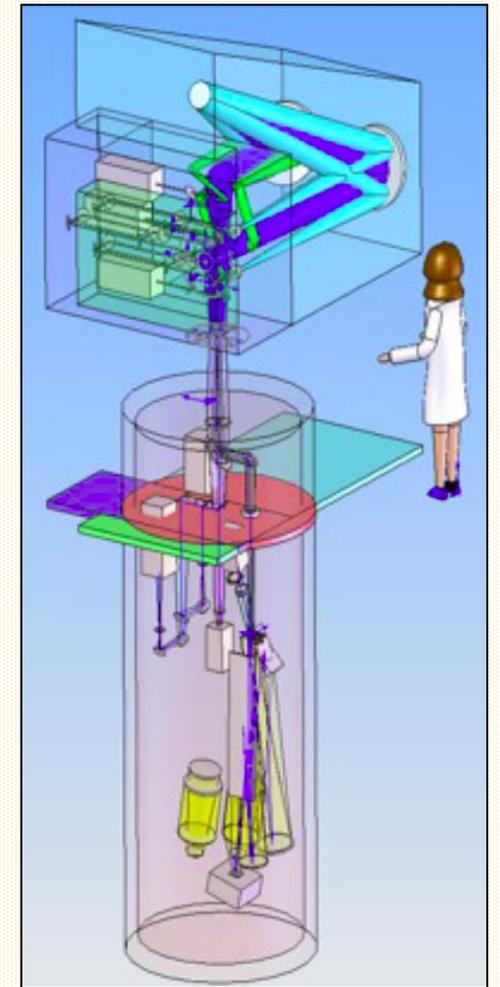
宮田 隆志、上塚 貴史、高橋 英則、酒向 重行、大澤 亮、岡田  
一志、内山 允史、大崎 博之、広江 貴（東京大学）、本田 充彦  
（久留米大学）

# MICHI計画

- MICHI (Mid-Infrared Camera, High-disperser, and Integral field unit)  
中間赤外線観測装置
- TMT第二期装置としての運用を目指す
  - 原始惑星系円盤の直接分解
  - 系外惑星の大気分光などを目標とする



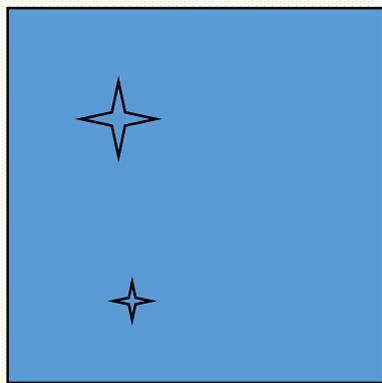
原始惑星系円盤をTMTで見た場合の想像図



MICHIの完成想像図

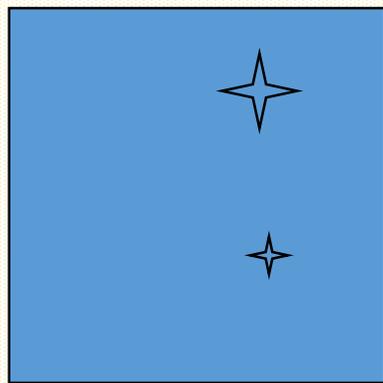
# チョツピングとは

- 異なる視野の画像の差し引きで  
大気の放射を取り除く技術
- 一般的に視野の切り替えは  
副鏡を動かして行う（副鏡チョツピング）



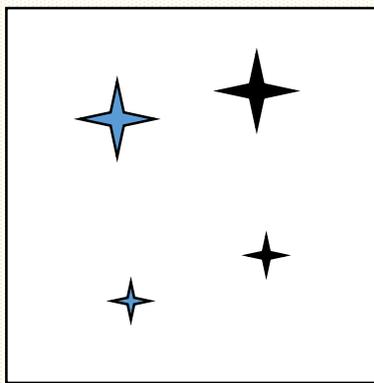
位置 A の像

—

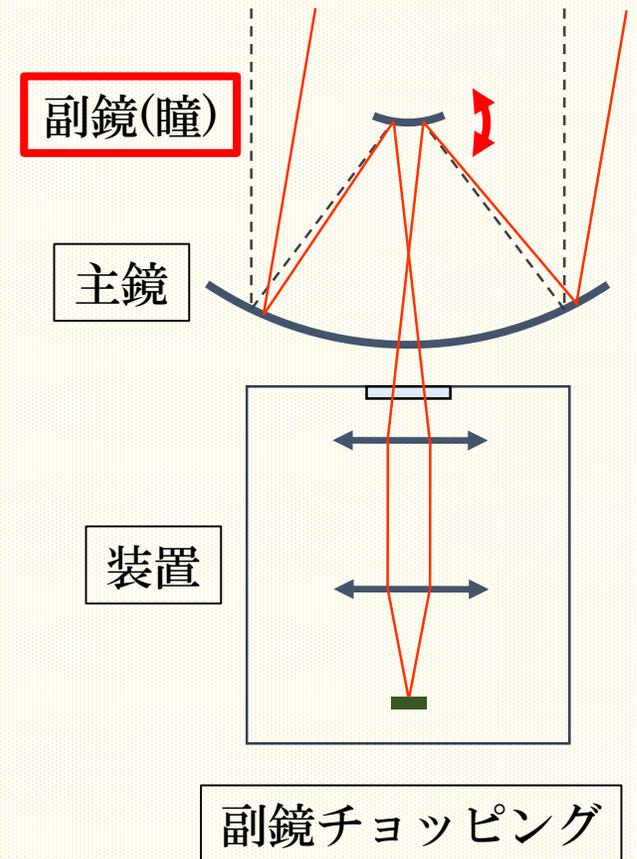


位置 B の像

=

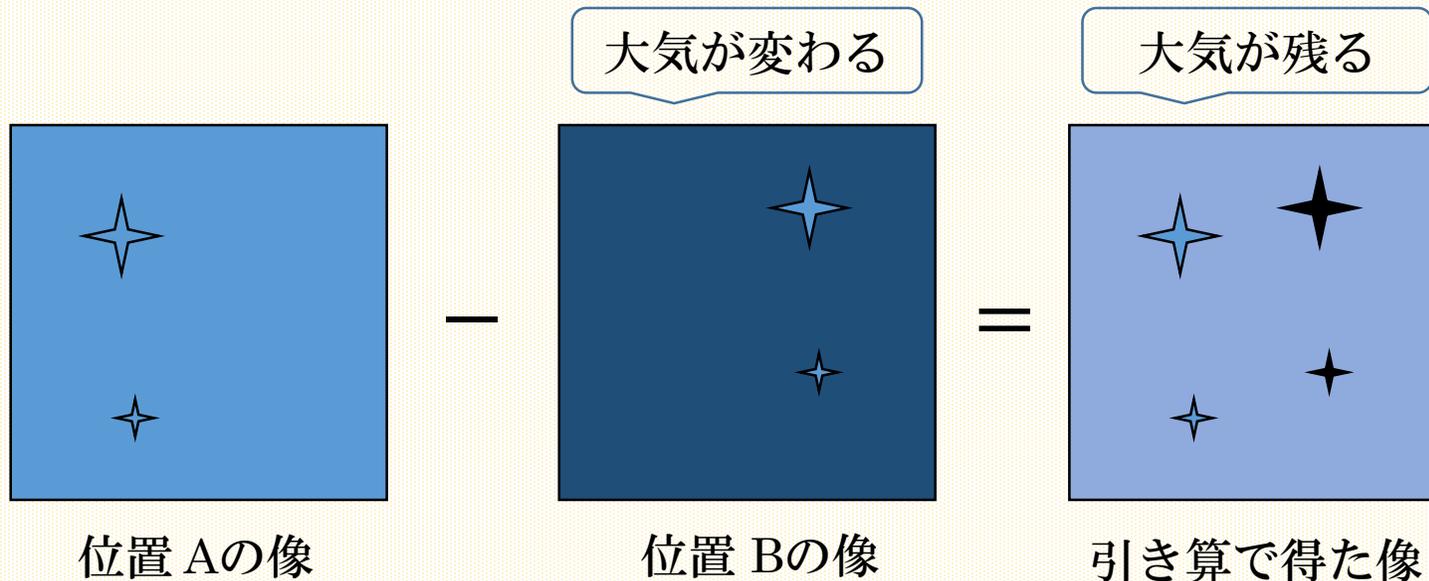


引き算で得た像



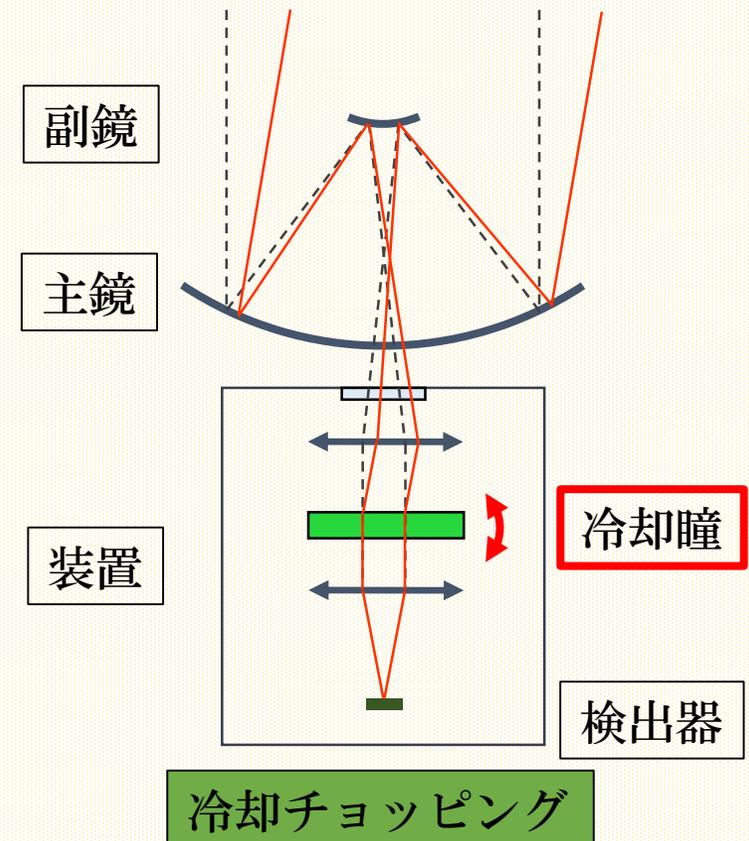
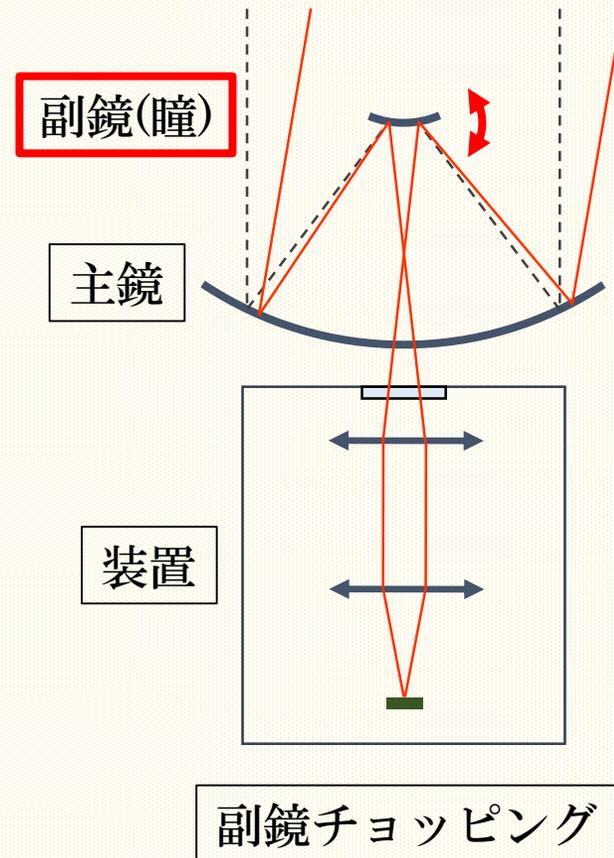
# 副鏡チョッピングの限界

- 差し引きは大気放射の変動のタイムスケール内に行う
- 大気の中間赤外線放射変動の典型的なタイムスケール < 1 秒  
→副鏡が巨大（3.1 m）なTMTでは難しい



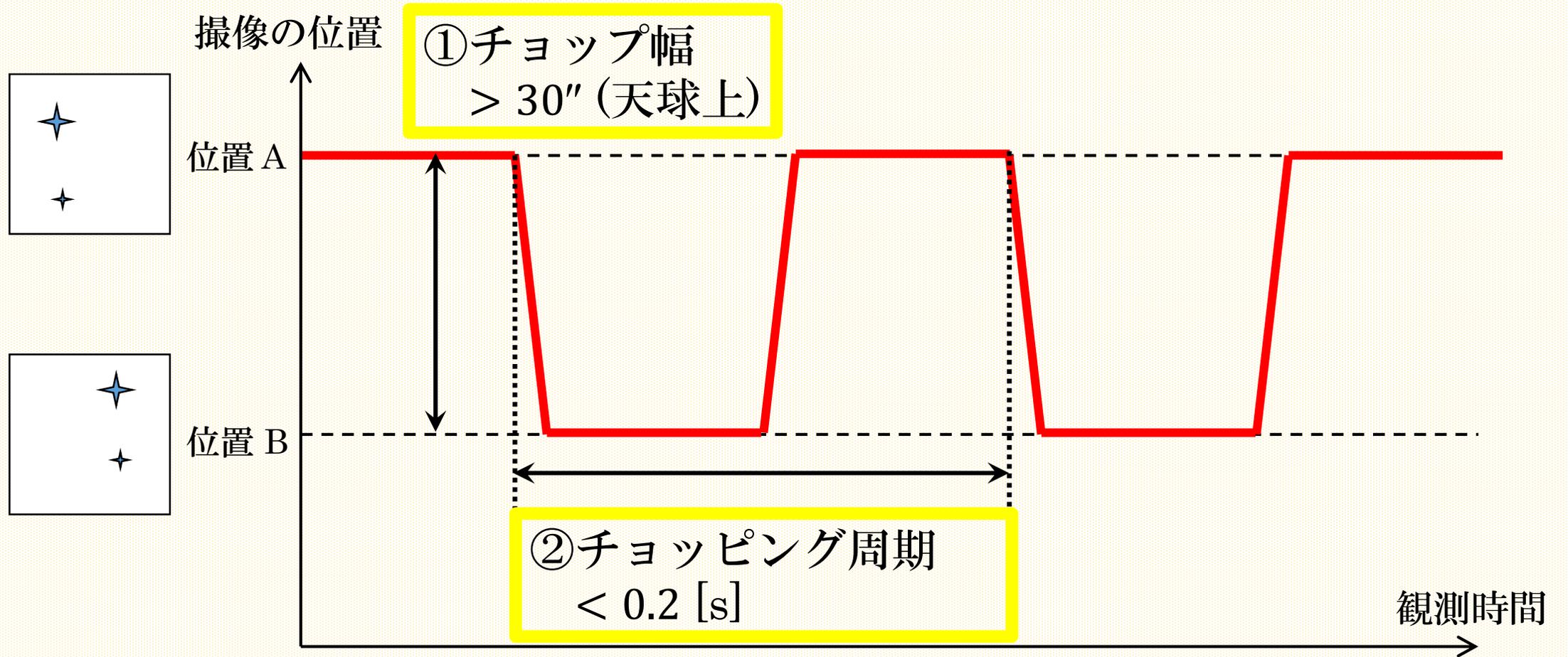
# 冷却チョッピング

- 副鏡の代わりに装置内に設定した瞳位置の鏡を動かす  
→副鏡を動かした時と同等の効果を得ることが可能
- 装置からの放射を抑えるため冷却が必要  
→冷却チョッピング



# 観測の要求

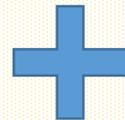
————— : 撮像位置の動き



# 装置の要求

- 装置の要求に焼き直す

観測の要求項目	値
チョップ幅	> 30" (天球上)
チョッピング周期	< 0.2 [s]



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]

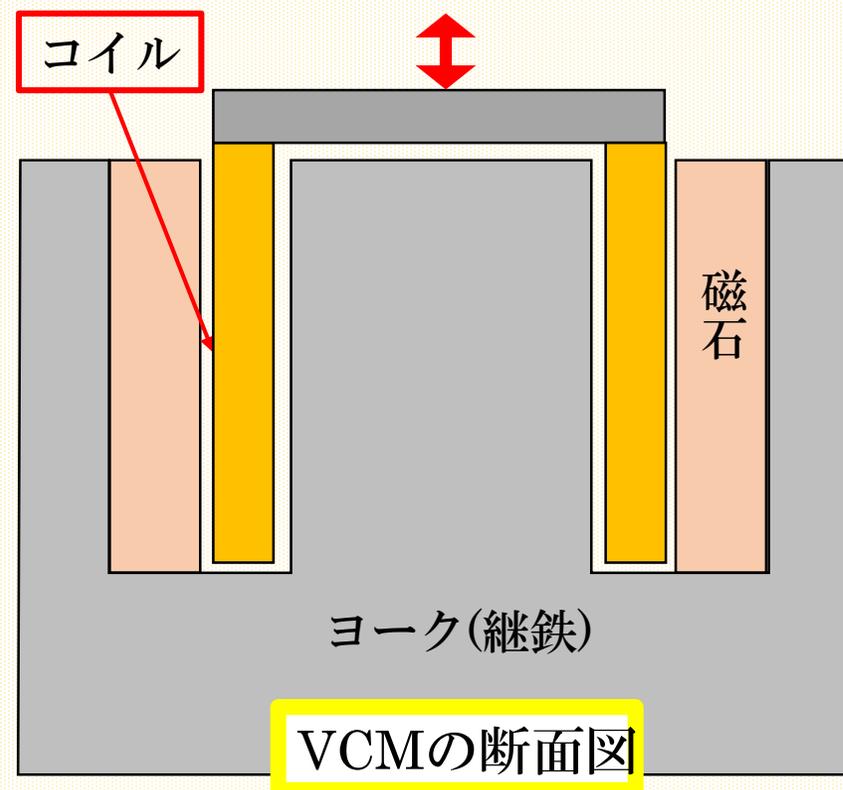
- これらの条件を満たす装置としてボイスコイルモーターに着目

# ボイスコイルモーター (VCM) とは

- スピーカーの仕組みを応用した直動モーター
- 駆動部と固定部が非接触、  
駆動、構造が単純で扱いやすい

➤ モーターの出す力  $F = IBL$

- $F$  : 力
- $I$  : 電流
- $B$  : 磁束密度
- $L$  : コイルの長さ



# VCMの要求

- VCMに対する要求は以下のようなになる

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の要求項目	値
加速度	$\geq 100$ [m/s <sup>2</sup> ]
環境の要求項目	値
温度環境	20 – 30 K
発熱	< 0.1 [W]

➤ 運動方程式  $F = ma \rightarrow$  VCMでは  $a = \frac{IBL}{m}$

- $a$  : 加速度
- $m$  : 質量

• • • VCMの性能を加速度で評価することが可能

# VCMの設計

- 前項の要求が満たされるようなVCMの製作を考える
  - 加速度の要求について

VCMの要求項目	値
加速度	$\geq 100$ [m/s <sup>2</sup> ]

$L$ と $m$ はほぼ比例すると考えられる

$$a = \frac{IBL}{m} \geq 100$$

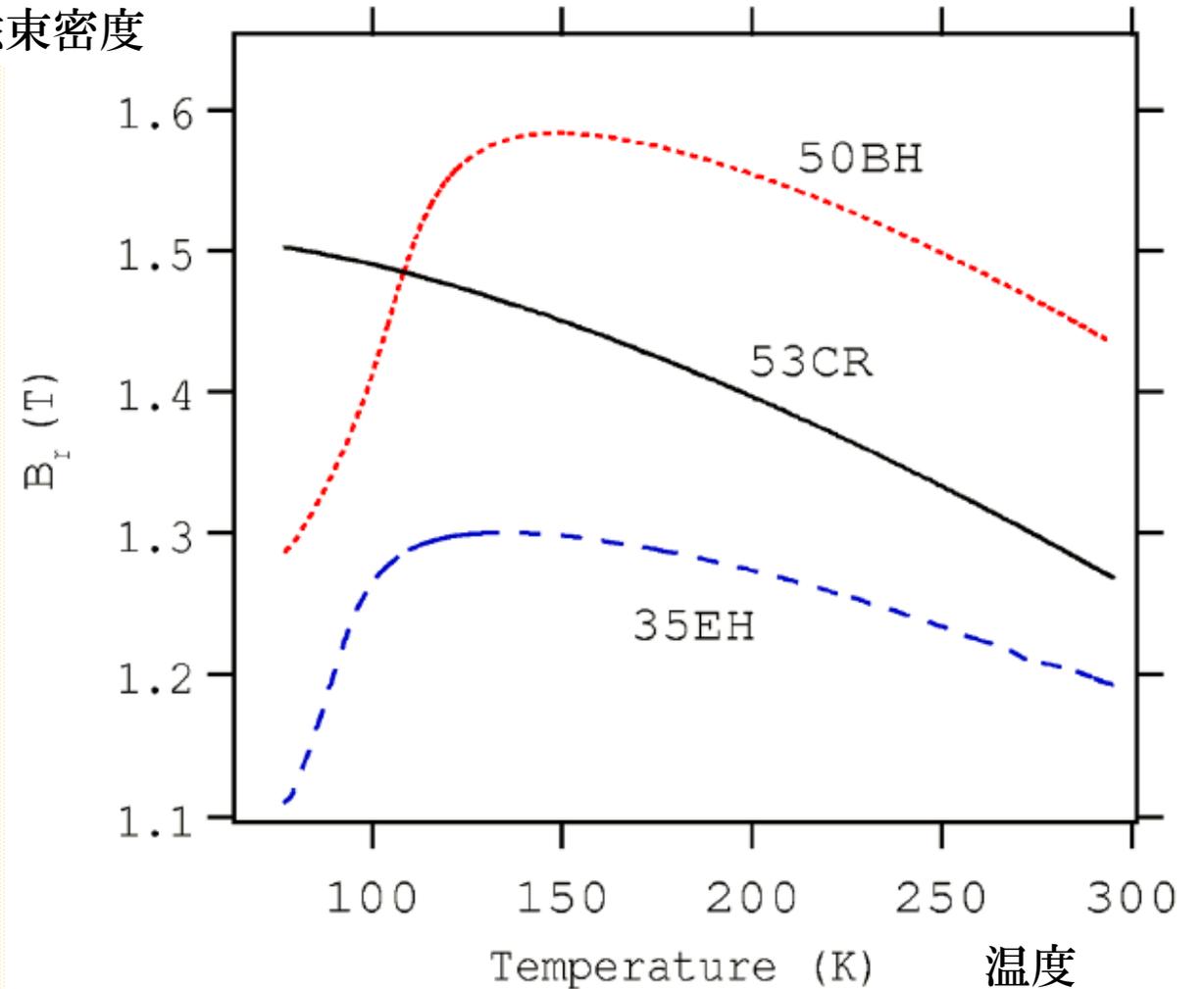
$I$ はVCM以外の配線の  
発熱を考慮して1 [A]以下が望ましい

- 磁束密度  $B$  をなるべく大きくする必要がある

# 磁束密度の強化

- 低温でも強力な磁石が必要
- ネオジム磁石
  - 135 K 付近でスピン再配列
  - それ以下の温度では磁力が低下
- 低温時でも磁力の下がらない  
プラセオジム磁石を用いる

磁束密度

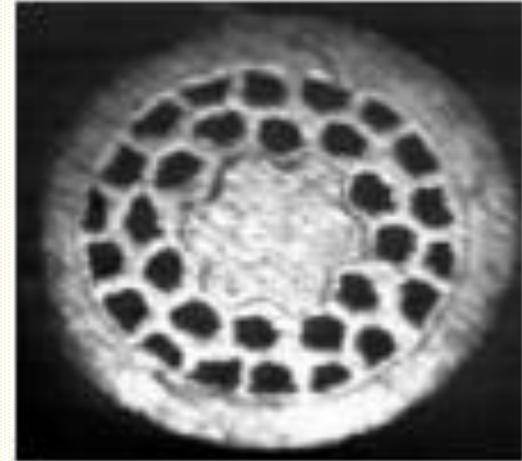


低温時の磁束密度変化のグラフ (Hara et al. 2004)  
赤・青：ネオジム磁石、黒：プラセオジム磁石

# 超伝導線の利用

- 次に環境条件について

環境の要求項目	値
温度環境	20 – 30 K
発熱	< 0.1 [W]



用いたMgB<sub>2</sub>線材の断面図（Hypertech 社より）

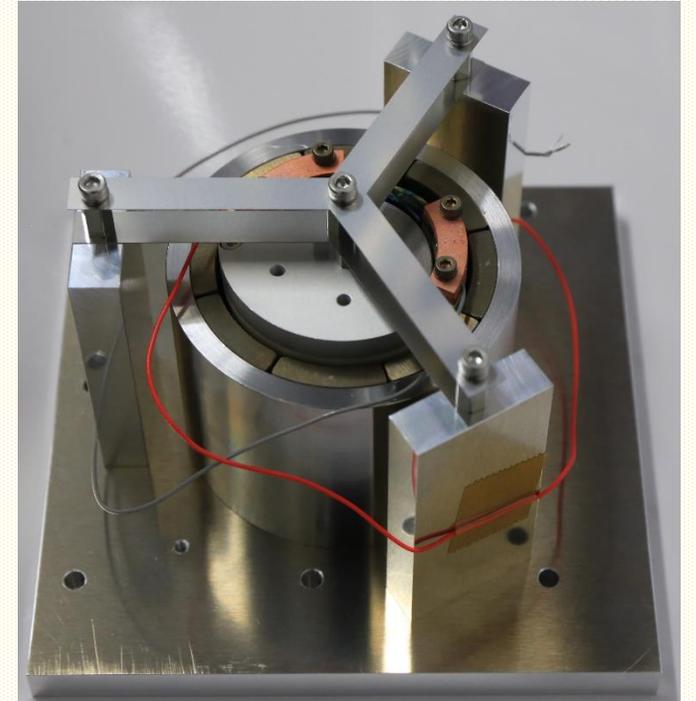
- コイルに超伝導線材を用いることで発熱を削減
  - ✓ジュール発熱ゼロ
  - ✓高純度金属線も要求を満たすが、更なる発熱の軽減に期待
- 超伝導材はMgB<sub>2</sub>（転移温度 39 K）を用いる
  - ✓他の高温超伝導材はコイルに不向き

# 試作1号機

- 以上を考慮した試作機を作成  
性能は以下の通り

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] ※駆動部のみ
加速度	51 [m/s <sup>2</sup> ] (1 A 導通時)

- 要求には加速度が不足  
→ 駆動時間の要求を下げることで利用は可能



試作1号機の写真

# 設計の改良

- 試作1号機の問題点

1. 超伝導線が扱いつらい

- ▶ 巻き径制限 ( $> \phi 30 \text{ mm}$ ) により駆動部が大きく重くなる

- ▶ 高純度の銅線と比較したとき、超伝導線の方が発熱が大きい結果に

2. 磁束飽和を起こしている、かつ反磁場が大きい磁石の形状

- ▶ 磁石の力を十分に活用できていない

- これらの点の改良に取り組んだ

# 超伝導線の発熱

- 交流電源の場合、超伝導線を貫く磁束密度が変わる  
→超伝導線材のヒステリシスによって損失が発生し発熱となる

$$P_{\text{ACloss}} = f \times L \times S \times n \times q$$

$P_{\text{ACloss}}$  : 交流損失 [J]

$f$  : 交流の周波数 [Hz]

$L$  : コイル線材の長さ [m]

$S$  : フィラメント断面積 [m<sup>2</sup>]

$n$  : 線材1本当たりのフィラメント数

$q$  : 一周期単位体積当たりの交流損失 [J/m<sup>3</sup> · cycle] ←求めることが難しい

- 東京大学新領域創成科学研究科の大崎研究室に解析を依頼

# 超伝導線の再検討

- 解析によって求めた超伝導線と銅線の発熱の比較

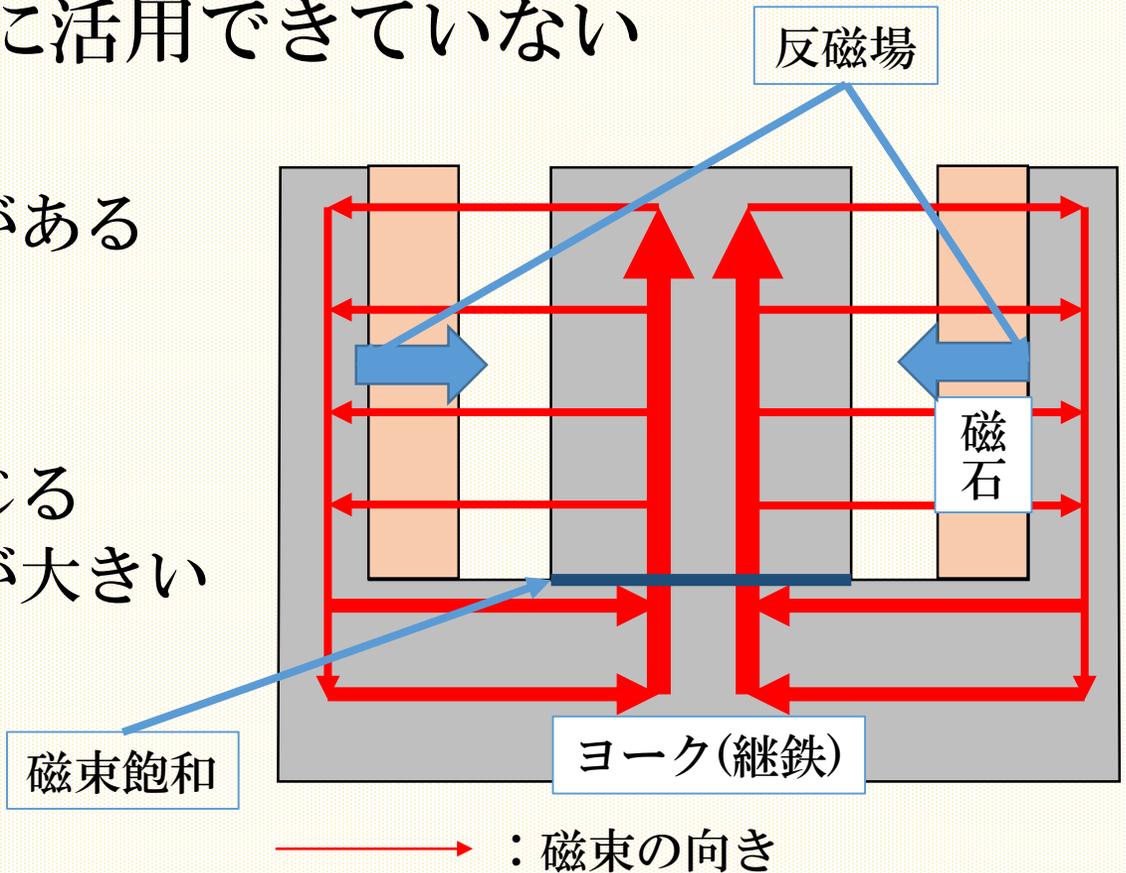
種類	超伝導線	銅線 (RRR=10)	銅線 (高純度) (RRR=100)
交流損失 [W]	0.027	-	-
ジュール熱 [W]	-	0.059	0.008

広江さんの解析結果より引用  
※他の共通発熱部分は無視している

- 超伝導線の方が高純度銅線よりも発熱が大きい結果に
  - コイルの線径が太く ( $\phi 0.98$  mm)、銅線の抵抗が下がった
  - 市販品では細い  $\text{MgB}_2$  線を発見できなかった
- $\phi 0.35$  mmの  $\text{MgB}_2$  線が利用できることになったため、細線の使用で銅線より低発熱になることを期待している

# 磁束密度の再検討

- 試作1号機は磁石の力を最大限に活用できていない
- 磁束飽和
  - ヨークに磁束が通る量には限界がある
  - 限界を超える量になっていた
- 反磁場
  - 磁石内部で逆向きの反磁場を生じる
  - 磁化方向の厚みが薄いと反磁場が大きい
- これらの問題を解消したい



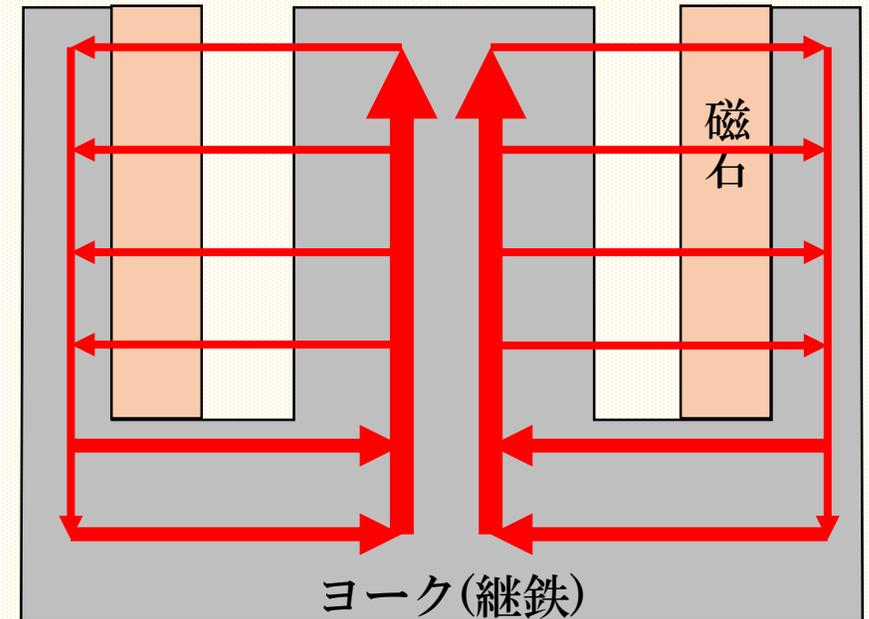
# パラメータサーチによる計算

- 磁束密度  $B$  を仮定磁路法で計算

$$B = \frac{A_m}{A_g} \frac{B_r}{1 + \mu_r / P_c} \frac{1}{\sigma}$$

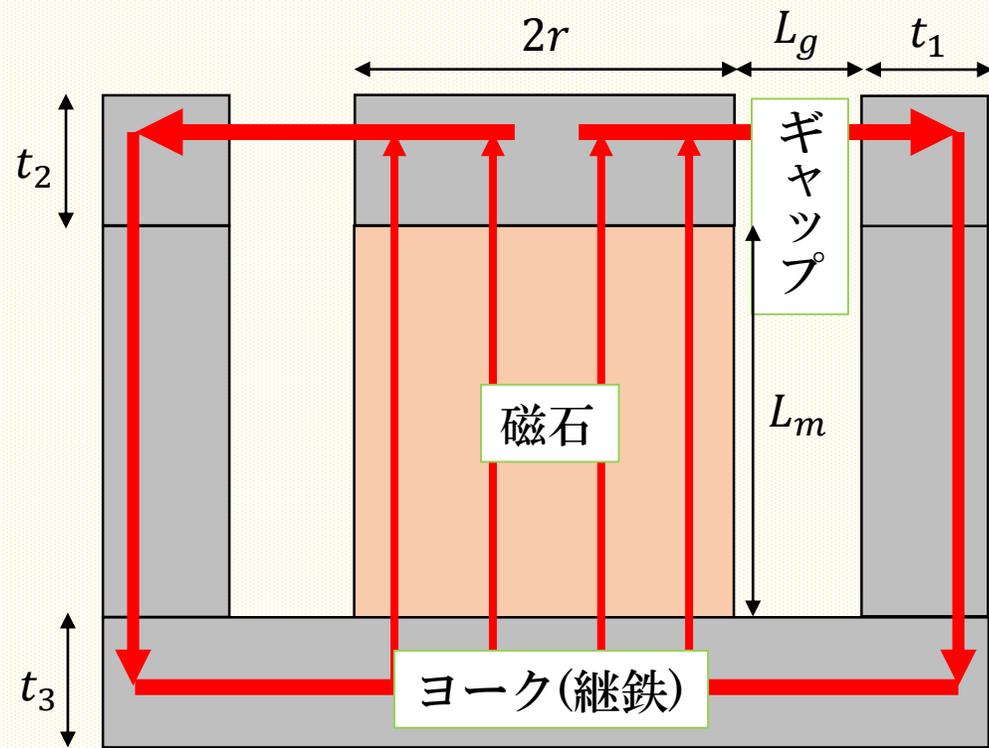
$A_m$  : 磁石の最小断面積       $P_c$  : パーミアンス係数  
 $A_g$  : ギャップの平均断面積       $\mu_r$  : リコイル比透磁率  
 $B_r$  : 残留磁束密度       $\sigma$  : 漏れ係数

- ヨークとコイルの形状をいくつかのパラメータによって定め、計算して磁束密度とVCMの加速度を求める



→ : 磁束の向き

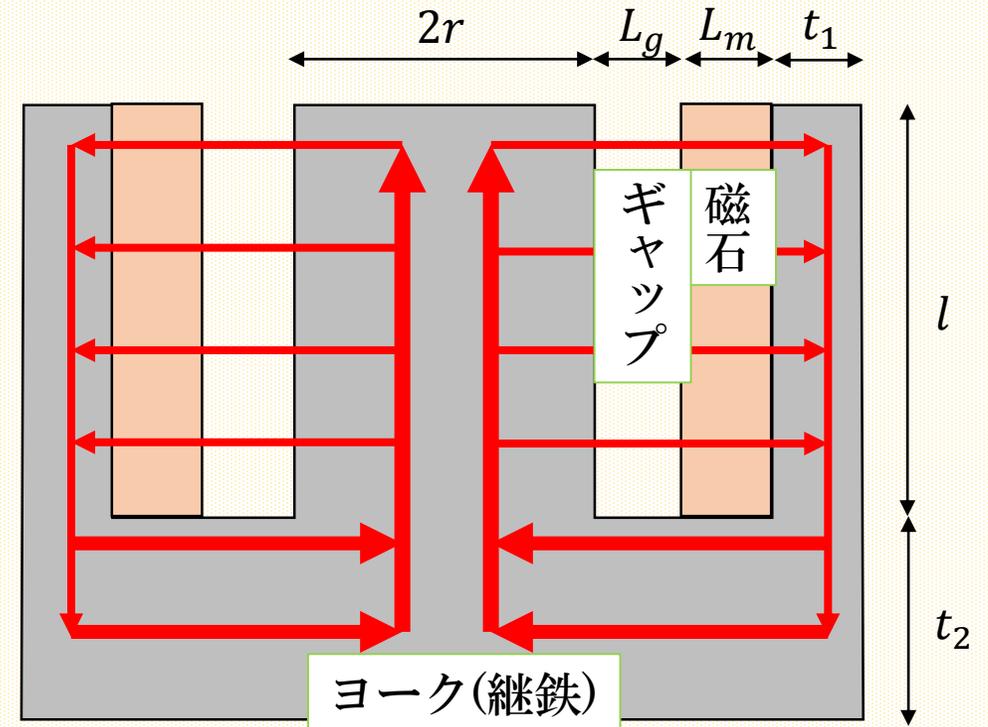
# 2種類のVCMについてパラメータサーチ



→ : 磁束の向き

内磁型VCM

パラメータ :  $r, L_m, L_g, l$



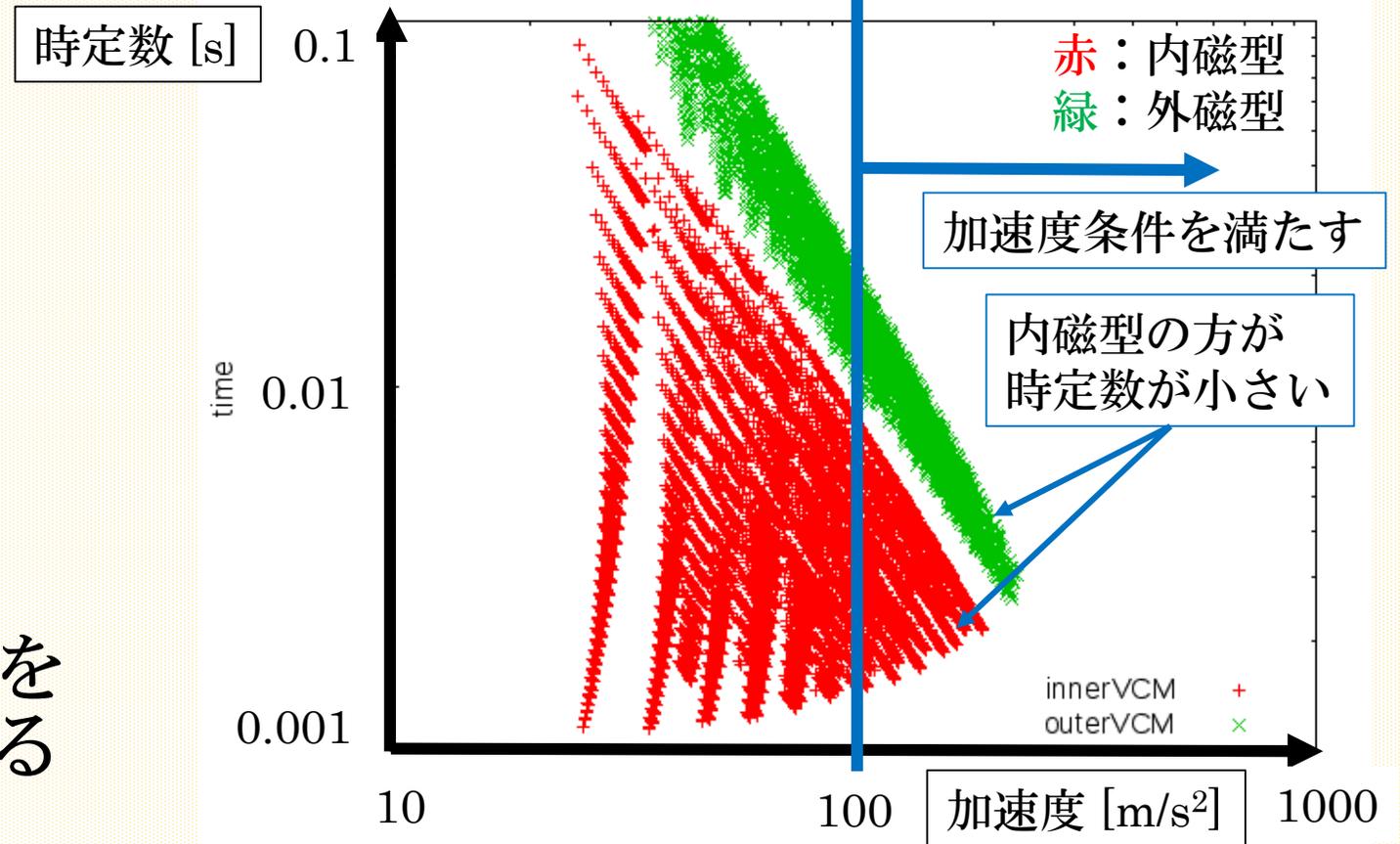
→ : 磁束の向き

外磁型VCM

パラメータ :  $r, L_m, L_g, l$

# VCMの再設計

- 加速度の要求が満たせるパラメータをそれぞれのVCMで発見
- そこで新たな要素としてVCMの駆動の時定数(※)を導入し、これが最小となるものを設計に選んだ



(※)VCMには電流応答の遅れと、逆起電力による遅れの2種類が生じる。ここでは遅い方をVCMの駆動の時定数としている。

# VCMの新設計

- 以上を考慮し、作られた新しい設計が以下のもの

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] (駆動部のみ)
加速度	129 [m/s <sup>2</sup> ] (1 A 導通時)

- 試作2号機として製作を進めている



新しく製作したボビン

# 今後の作業

- 試作1号機
  - 現在常温での駆動試験中
  - 低温での発熱の実測、転移温度を含めた物性の調査
  - 低温での駆動試験、制御試験
- 試作2号機
  - 現在製作中
  - 解析によって発熱などを見積もり
  - 試作1号機と同様に試験



常温試験準備中の試作1号機

# まとめ

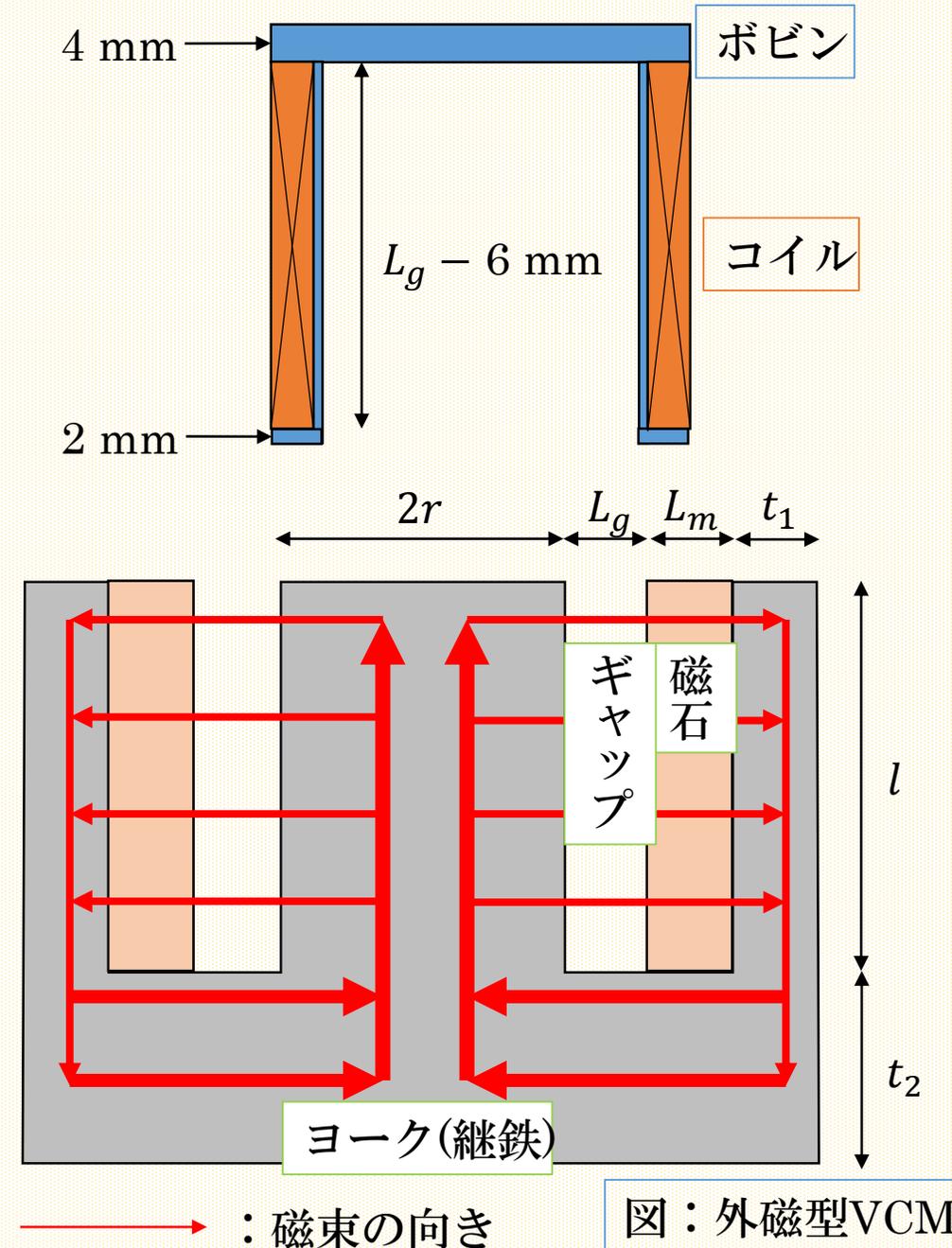
- 中間赤外線装置MICHIに搭載する冷却チョッピング機構の要求を計算し、動力源としてVCMを用いた場合の条件を算出した
- VCMを用いた場合の要求をもとに、試作機の製作を行った
- 試作1号機の構造は改良可能であり、新素材・設計を用いて改良した試作2号機を製作中である。
- 今後は1号機の実験評価に続けて試作2号機の解析や実験評価も行い、更なる改良を進める



# パラメータサーチの詳細

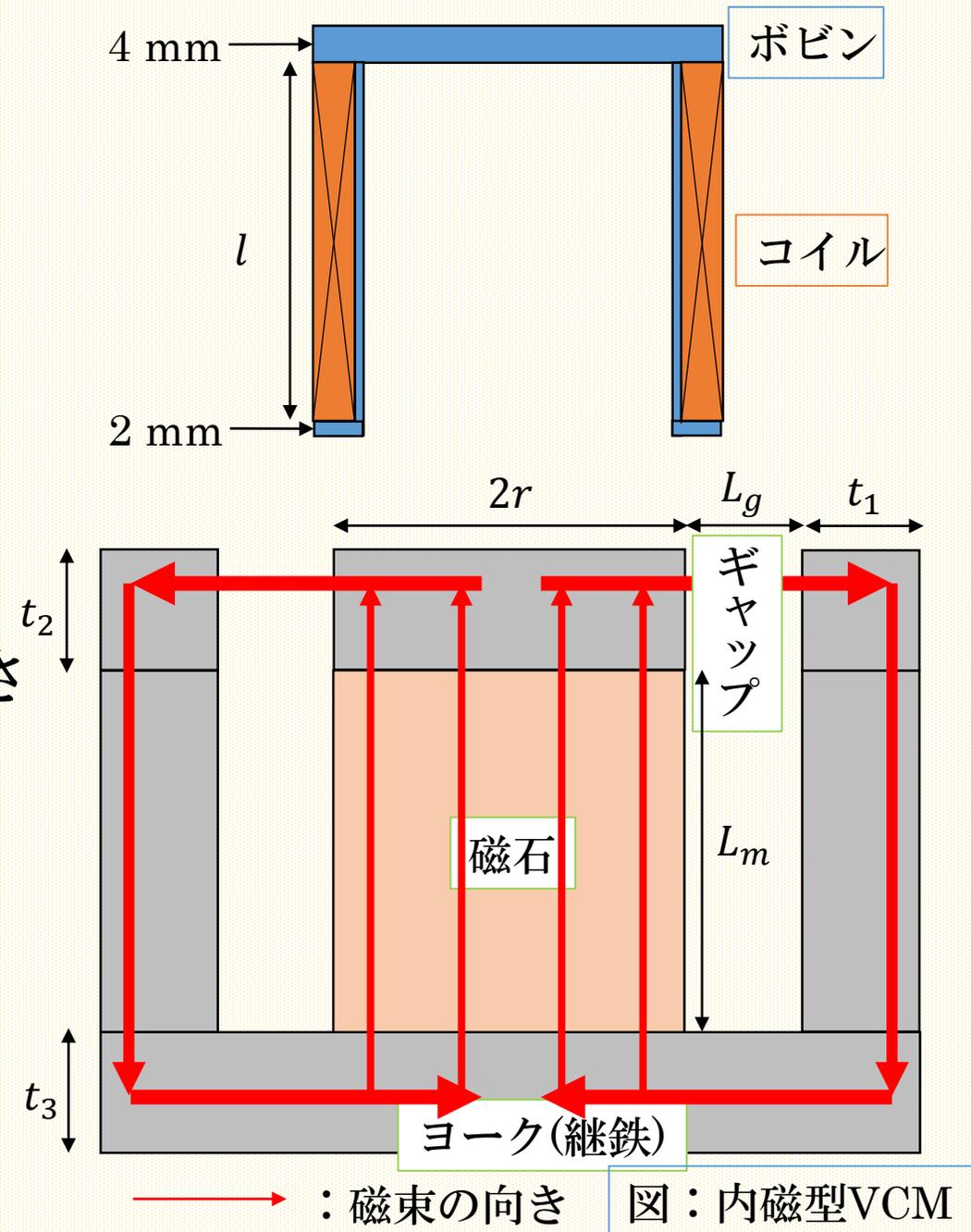
# 1. 外磁型VCM

- 設計パラメータ： $r$  ,  $L_g$  ,  $L_m$  ,  $l$ 
  - $5 \leq r \leq 20$  mm : ヨーク内側半径
  - $4 \leq L_g \leq 10$  mm : ギャップの長さ
  - $1 \leq L_m \leq 20$  mm : 磁石の磁化方向長さ
  - $5 \leq l \leq 50$  mm : 磁石の高さ
- ボビンとコイルの形状は右図を仮定
  - ボビン厚み：1 mm
  - ヨーク-ボビン間隔：0.5 mm
  - コイル-ヨーク間隔：1 mm
- $t_1, t_2$  は磁束飽和しない条件で計算



## 2. 内磁型VCM

- 設計パラメータ： $r$ ,  $L_g$ ,  $L_m$ ,  $l$ 
    - $5 \leq r \leq 20$  mm : ヨーク内側半径
    - $4 \leq L_g \leq 10$  mm : ギャップの長さ
    - $5 \leq L_m \leq 40$  mm : 磁石の磁化方向長さ
    - $t_2 + 3 \leq l \leq t_2 + L_m - 2$  mm : コイルの高さ
  - ボビンとコイルの形状は右図を仮定
    - ボビン厚み：1 mm
    - ヨーク-ボビン間隔：0.5 mm
    - コイル-ヨーク側面間隔：1 mm
- $t_1, t_2, t_3$  は磁束飽和しない条件で計算



# 各設計の共通事項

- ヨーク材としてパーメンジュールを使用（飽和磁束密度：2.4 T）
- 磁石はプラセオジウム磁石（表面磁束密度：1.7 T@30K）
- ボビンとしてはセラミックス（アルミナ）を仮定（密度：3.9 t/m<sup>3</sup>）
- コイルに使用した線材はMgB<sub>2</sub>線材（径：0.35 mm、密度：4.6 t/m<sup>3</sup>）
- 鏡の質量は 30 g と仮定

# 時定数について

# 時定数について

- 電流の遅れによる回路の時定数

$$\tau_C = \frac{l}{R}$$

$l$ : 自己インダクタンス

$R$ : 抵抗

$m$ : 質量

$B$ : 磁束密度

$L$ : コイルの長さ

- 駆動の遅れによる機械的時定数

$$\tau_m = \frac{mR}{B^2 L^2}$$

時定数条件

$\tau_C \ll \tau_m$  (電流が流れてから動く)

$10\tau_C = \tau_m$  となるように  $R$  を定めた

- 2つの時定数の積

$$\tau_C \tau_m = \frac{ml}{B^2 L^2}$$

- $m, l, B, L$  はパラメータが決まれば求められる

- 適当な  $R$  を取ることで遅い方の時定数を定めることができる