

LiteBIRDにおける偏光変調器用 連続回転機構の開発

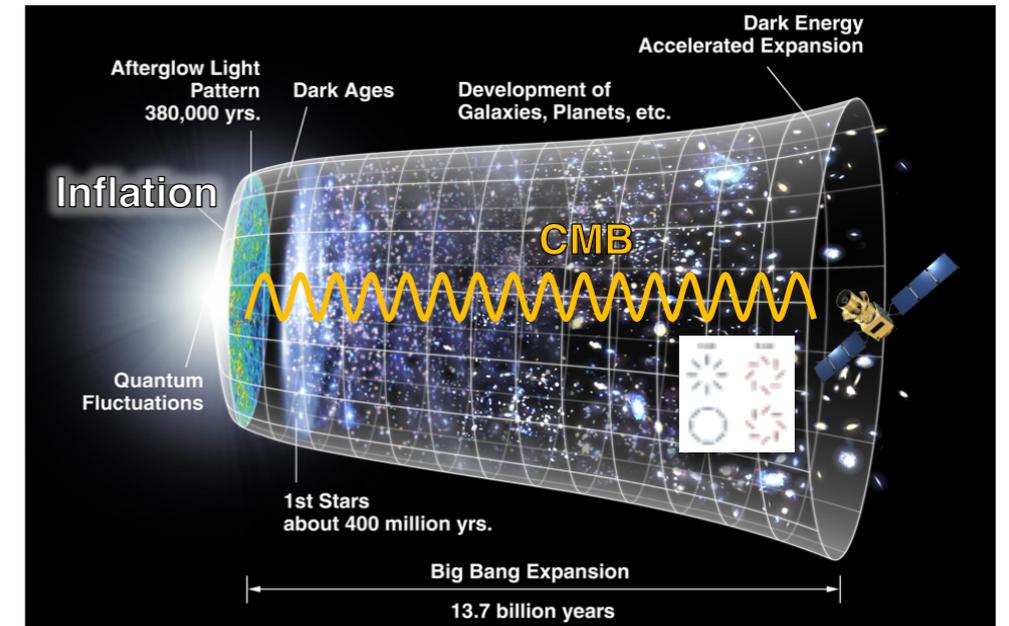
桜井雄基, 松村知岳^A, 片山伸彦, 菅井肇, 羽澄昌史^B, 山本亮^A,
宇都宮真, 片坐宏一^A, 他 LiteBIRD WG
Kavli IPMU, ISAS/JAXA^A, KEK^B





LiteBIRD計画

- ✓ インフレーション探索を目的としたCMB偏光観測衛星
- ✓ JAXA戦略的中型衛星計画
- ✓ 全天 "精密" 観測

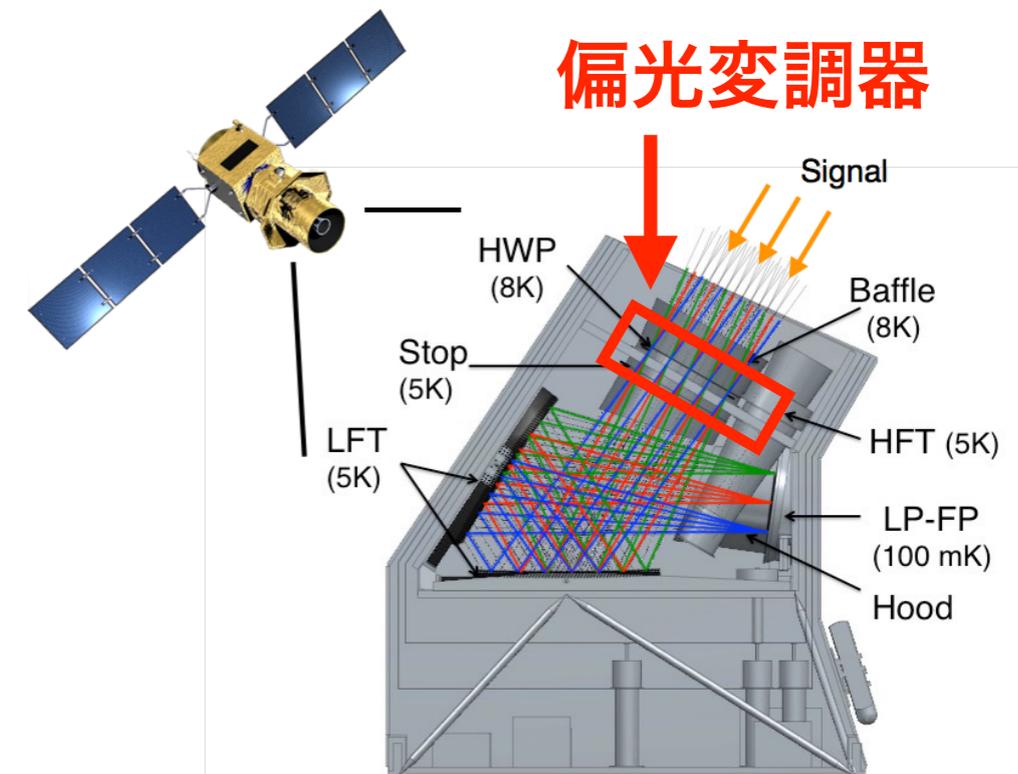


科学目標を達成するためには**系統誤差の軽減**が不可欠。

→ 系統誤差の大幅な改善のために、

偏光変調器を導入予定

感度 + 衛星の要求を満たす偏光変調器の開発を推進中。



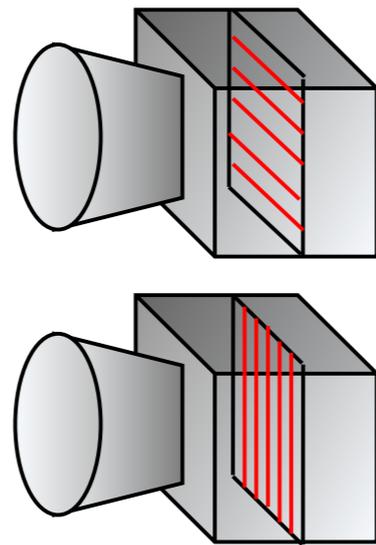
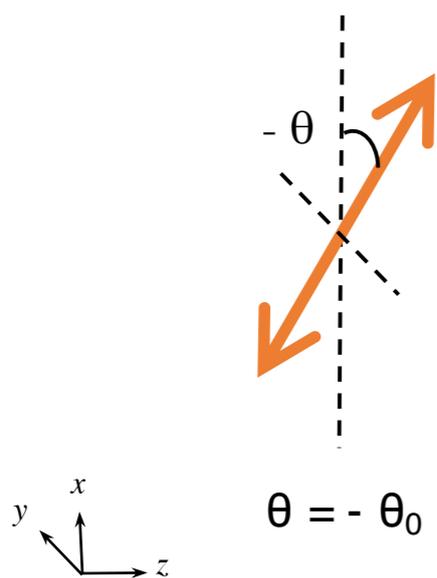
衛星ミッション部



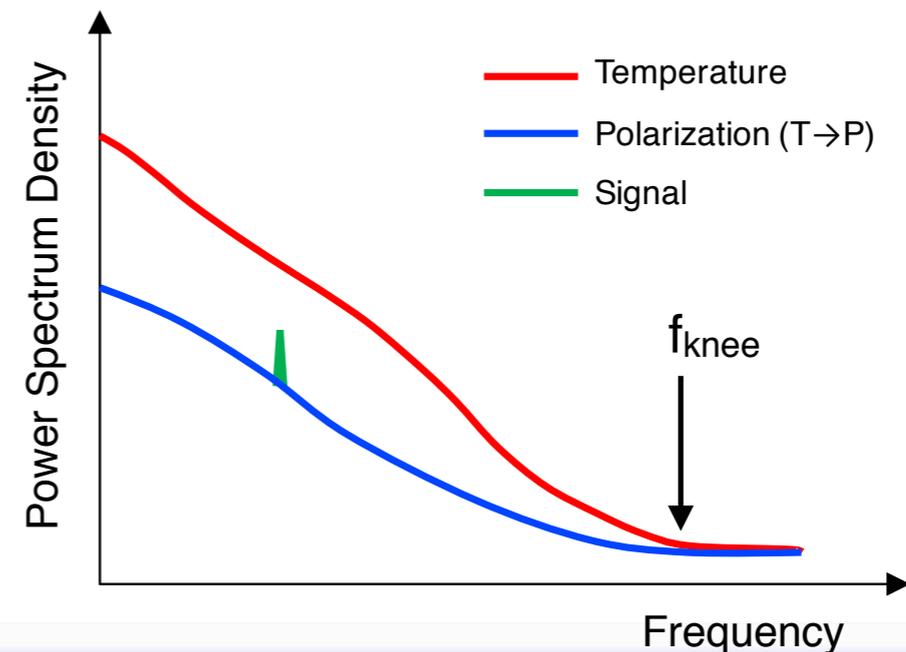
連続回転する半波長板 (HWP) によりCMB偏光信号を変調

1. 信号帯域を変調によりアップコンバート
 - 検出器の低周波揺らぎ ($1/f$ ノイズ) を低減
2. 信号の偏光成分を1つの検出器で測定
 - 検出器のゲインに起因する系統誤差を低減

変調器なしの場合



直線偏波に感度のある検出器

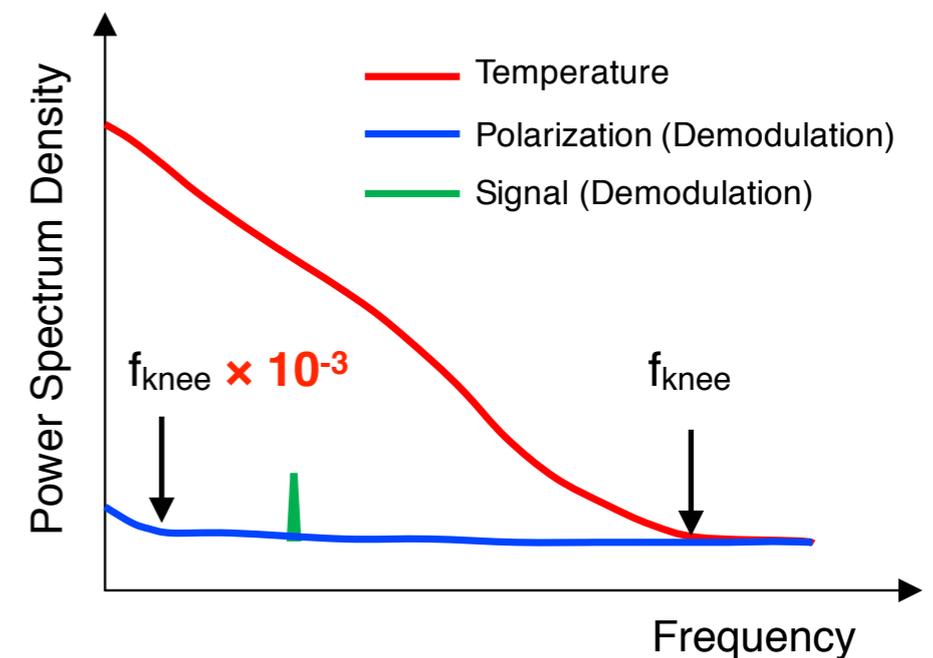
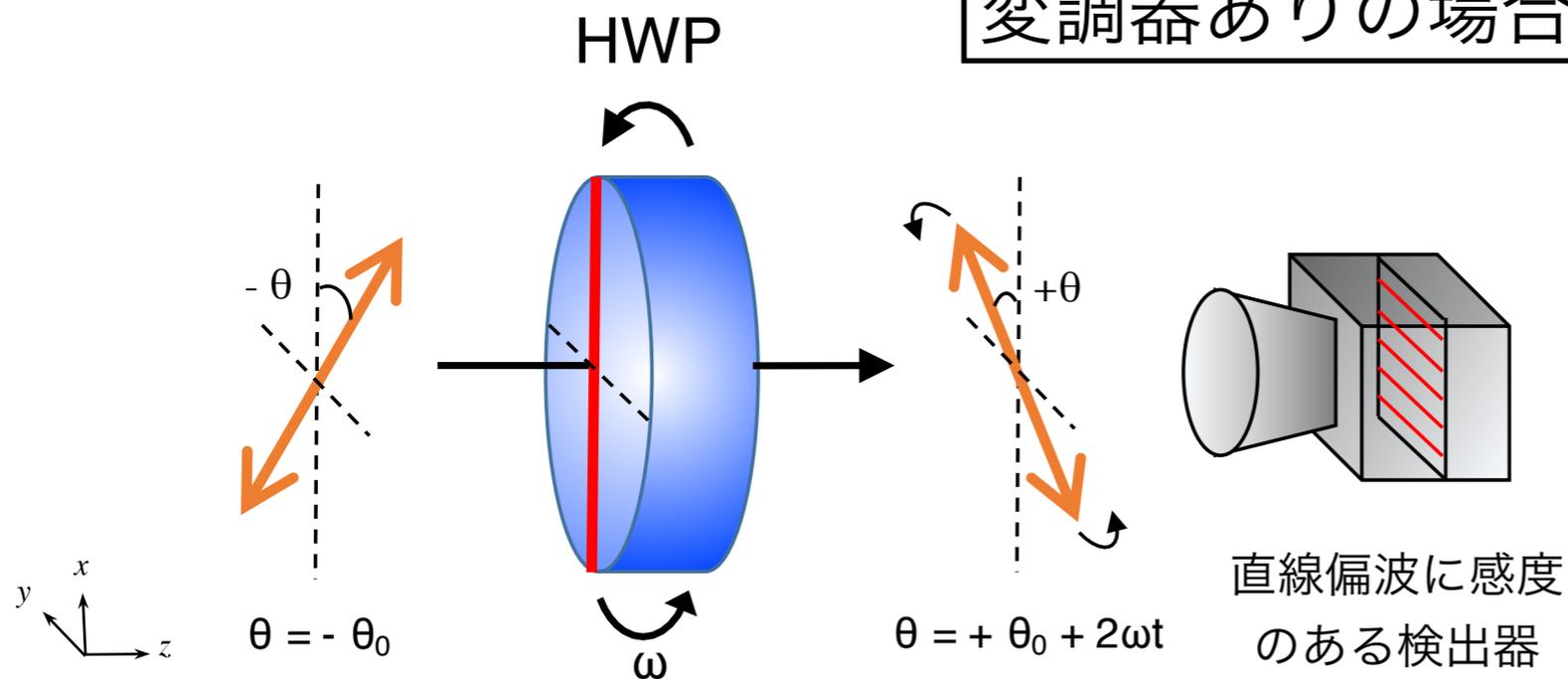




連続回転する半波長板 (HWP) によりCMB偏光信号を変調

1. 信号帯域を変調によりアップコンバート
 - 検出器の低周波揺らぎ ($1/f$ ノイズ) を低減
2. 信号の偏光成分を1つの検出器で測定
 - 検出器のゲインに起因する系統誤差を低減

変調器ありの場合





偏光変調器の構成

→ 回転機構 (本講演)、広帯域半波長板 (松村氏 : 23aSR-10)

回転機構の要求値

要素	要求値
半波長板直径	400 mm
半波長板温度	< 10 K
許容発熱	< 3.5 mW
半波長板光軸のズレ	< 0.1mm
回転数	1.2 Hz
寿命	3 years

Note: 関連する代表的項目、要求値はTBCを含む

半波長板の冷却、低発熱、滑らかな連続回転、長寿命



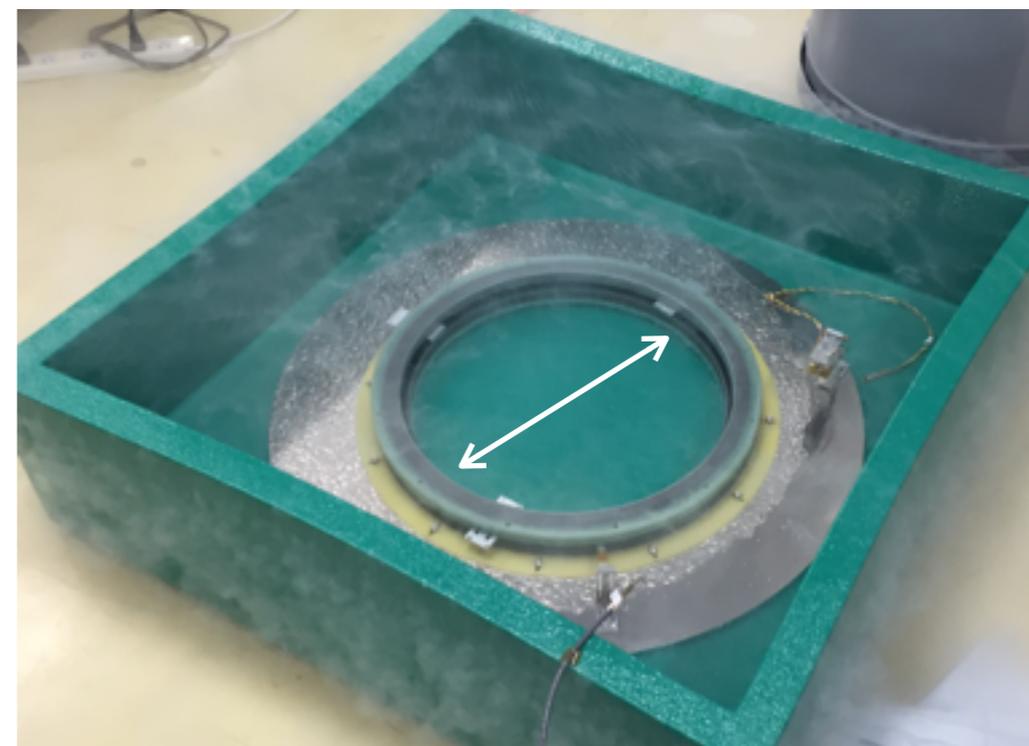
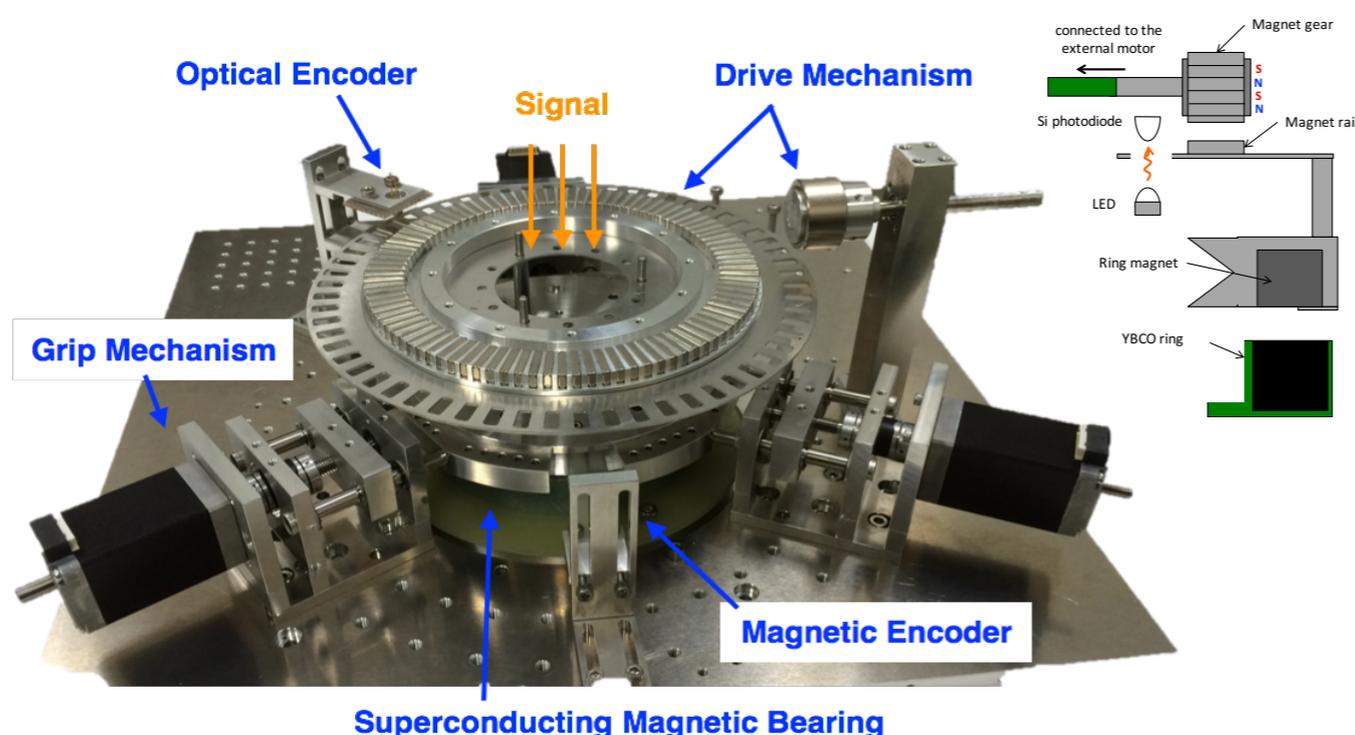
超伝導磁気軸受を使用した非接触回転機構

- ✓ システムの冷却 → 超伝導体
- ✓ 低摩擦による低発熱化
- ✓ 摩耗の影響がなくなり長寿命化



小型試作機 $\Phi = 65 \text{ mm}$

大型軸受試作機 $\Phi = 394 \text{ mm}$



熱・動作試験のため小型試作機・大型軸受試作機を構築
 小型試作機：変調器全システムの試験 → 前回の学会で報告
 大型試作機：軸受の性能試験

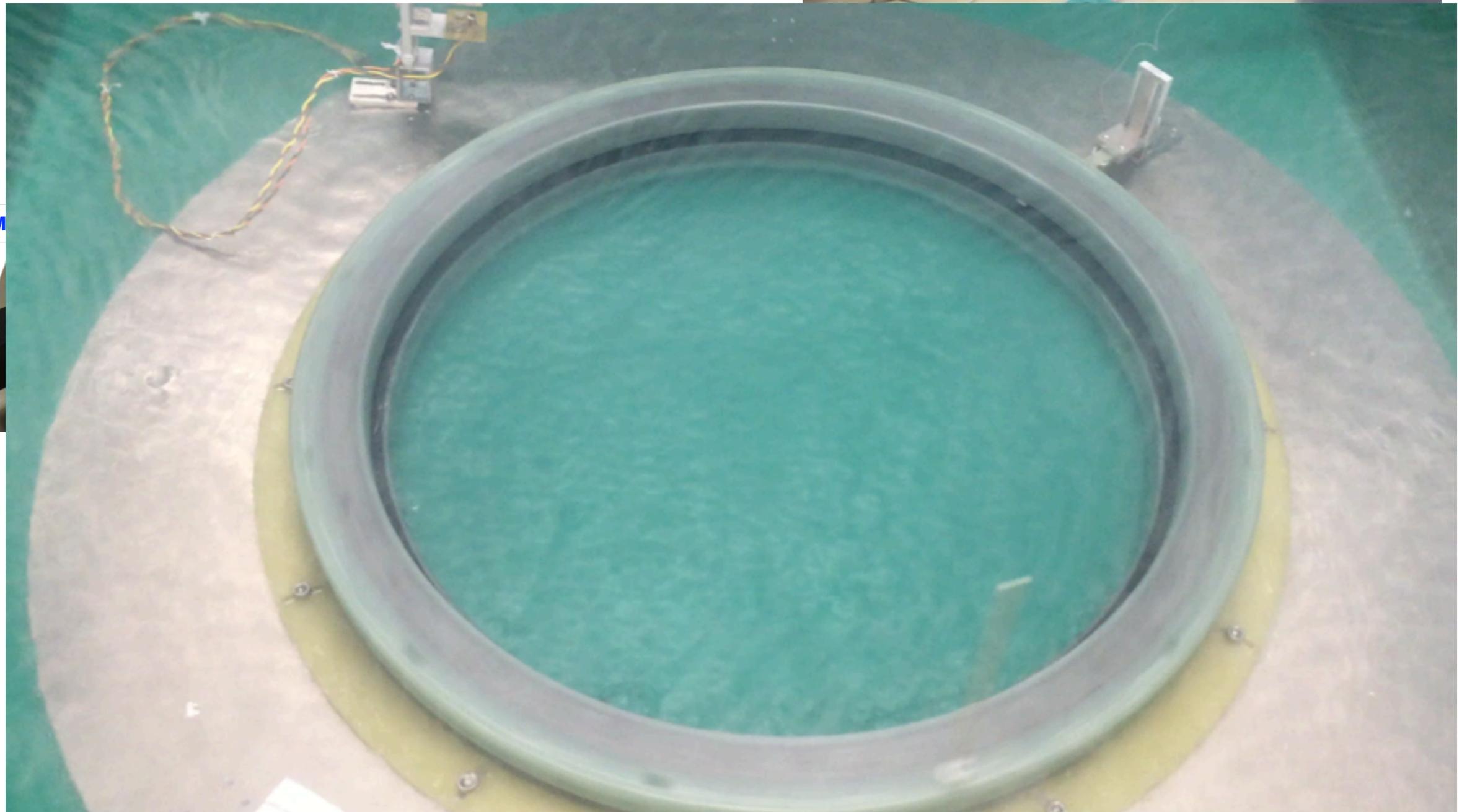
本講演の主題

大型試作機を使用した磁場摩擦による発熱・保持力の評価

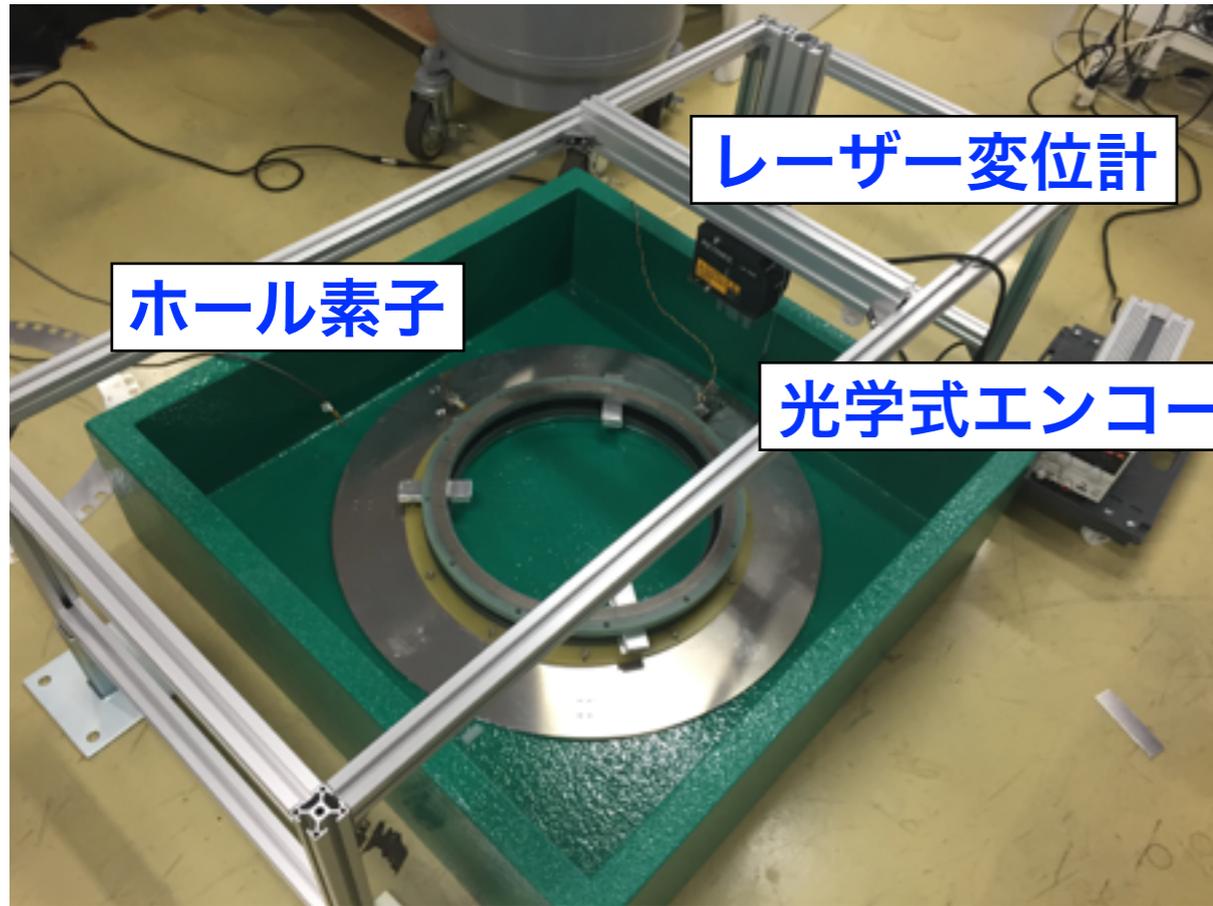


小型試作機 $\Phi = 65 \text{ mm}$

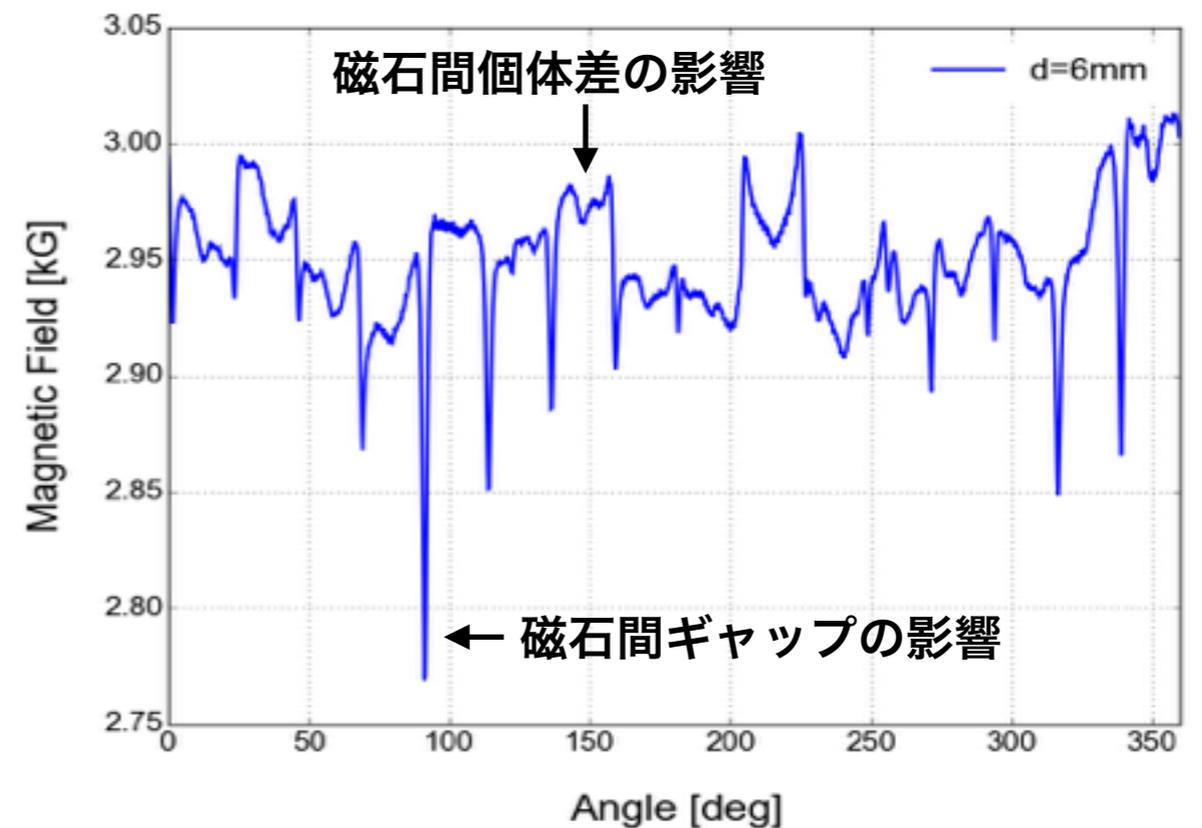
大型軸受試作機 $\Phi = 394 \text{ mm}$



大型試作機で使用した磁物厚膜による光熱・伝導力の計測



- ✓ 大型Φ394mmのSMBの振動・磁場評価を行っている (LN2で冷却)
- ✓ 大型のため磁石・超伝導は16分割リング磁石を使用
 - 磁場分布に特徴的なばらつき
 - **摩擦による発熱を生む**





発熱要求による磁場変位許容値： $\Delta B / \bar{B} < 1\%$

\bar{B} : 磁場の平均値、 $\Delta B = B_{\max} - B_{\min}$

→ 最もシンプルな低減方法：浮上高さの変化

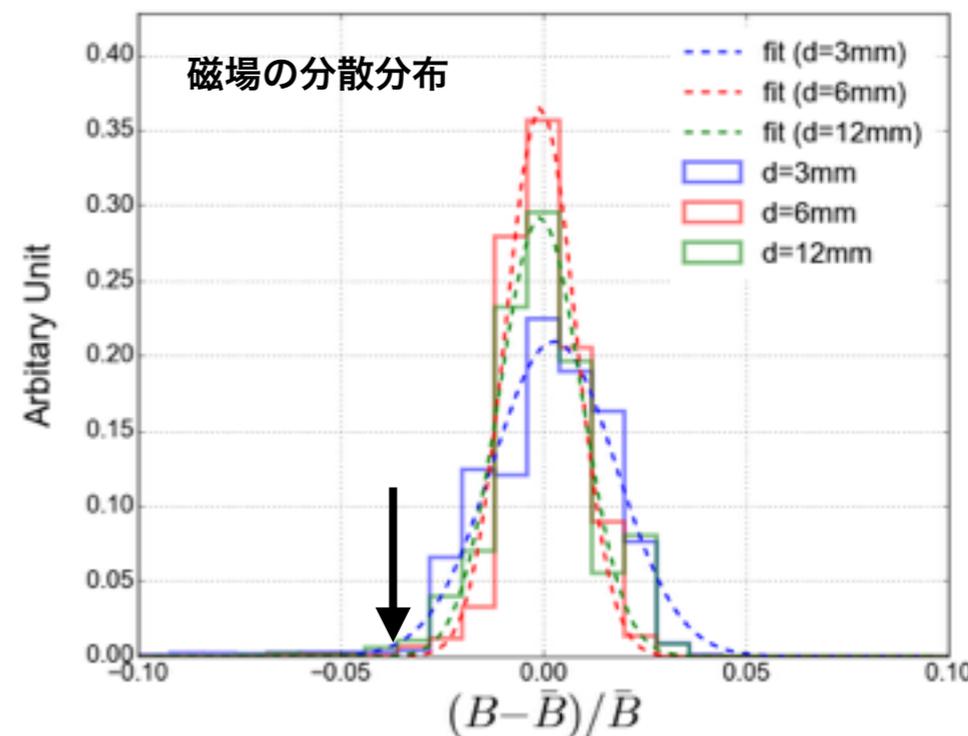
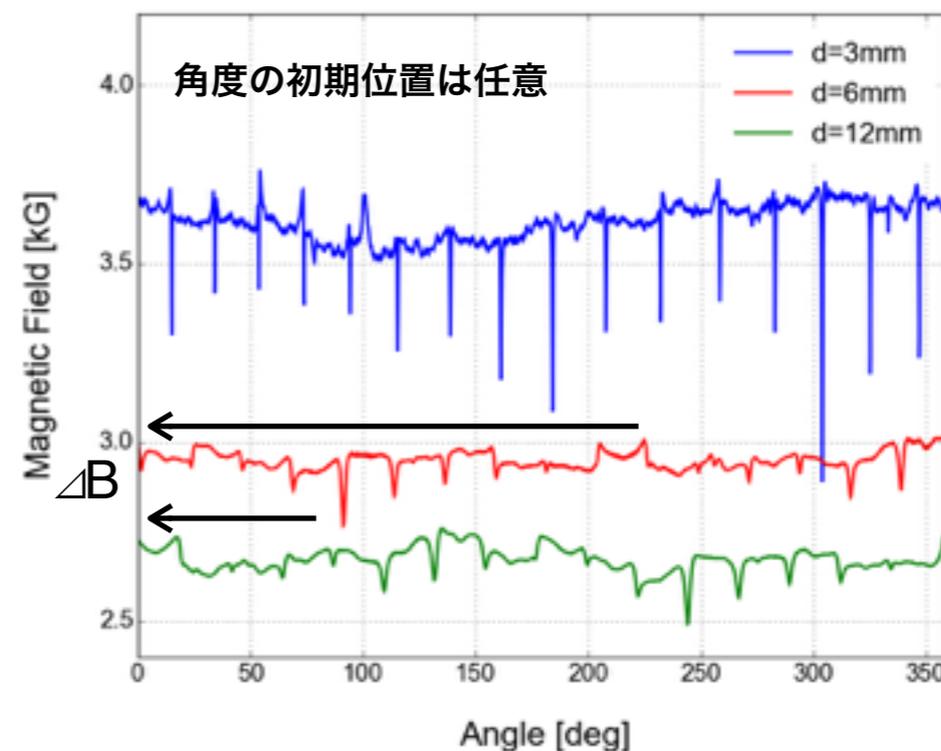
スパイクによる磁場変位

d	3mm	6mm	12mm
$\Delta B / \bar{B}$	$22.1 \pm 1.7\%$	$6.1 \pm 0.5\%$	$6.8 \pm 0.5\%$

スパイクを考慮しない場合 (ガウス分布の 3σ)

d	3mm	6mm	12mm
$\Delta B / \bar{B} (3\sigma)$	4.5%	3.0%	3.0%

- ✓ 要求を達成するにはスパイクの低減が必須
- ✓ 浮上高さを変化させることで変位を軽減可能だが、軸受としての**保持力**も変化する





現状セットアップでの発熱量を推定

→ 自由回転による減衰 (Spindown) の測定

$$\alpha = 2\pi \frac{df}{dt} = a_0 + 2\pi a_1 f$$

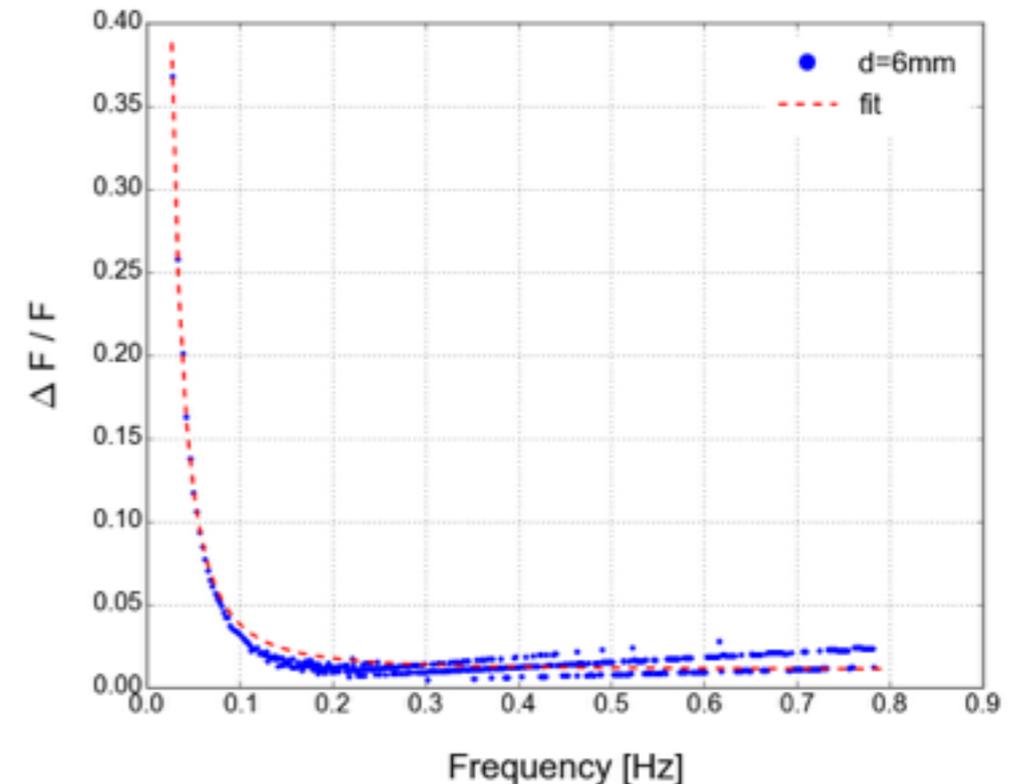
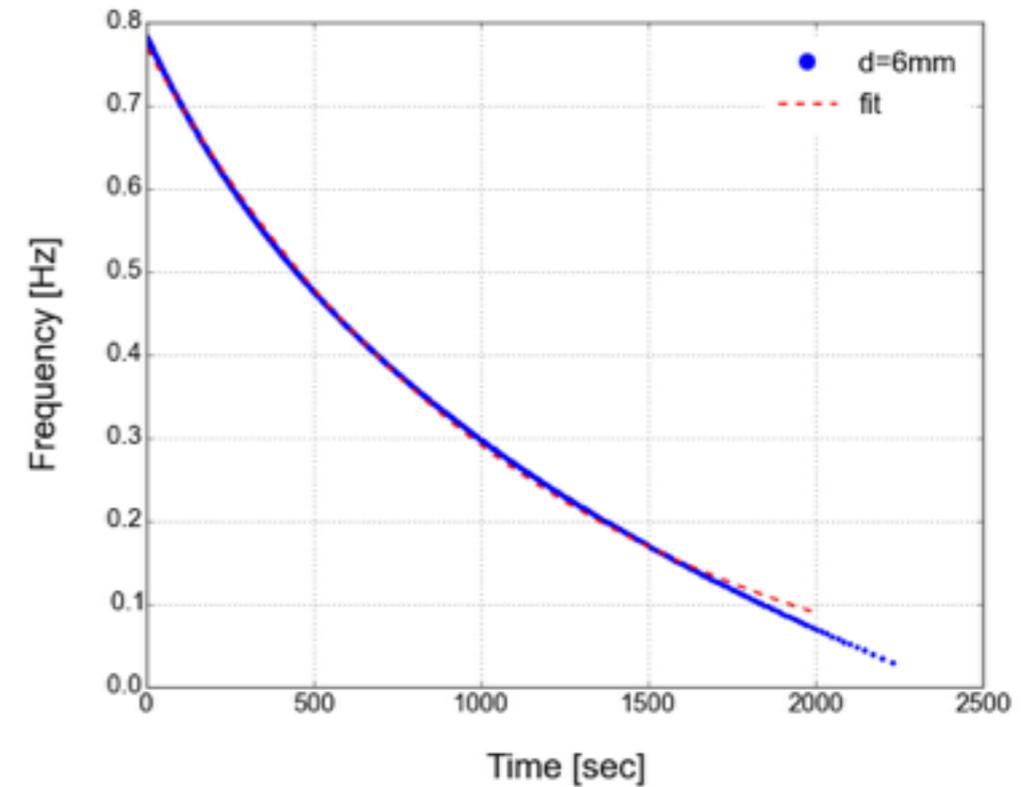
α : 加速度, f : 回転周期

減衰の原因となる項目

- ✓ 磁場のばらつきによる摩擦
- ✓ 磁石の動作による渦電流
- ✓ 空気抵抗

d [mm]	a_0 [1/s ²]	a_1 [1/s ²]	P[W]
3	5.7×10^{-3}	1.2×10^{-3}	3.6×10^{-2}
6	5.1×10^{-4}	7.6×10^{-4}	3.2×10^{-3}

- ✓ 軸受の磁場摩擦のみで $> 10^{-3} \text{ W}$ の発熱
- ✓ その他要素からの発熱を考慮すると要改善





軸受の保持力をバネ定数で評価

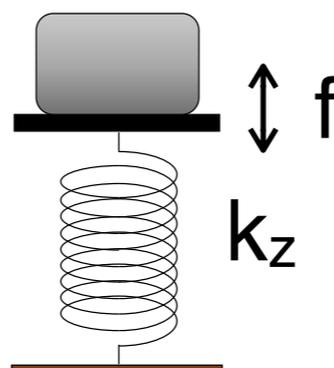
→ 浮上状態の磁場のPower Spectrumのピーク値から固有振動数・バネ定数を算出

→ 半波長板の光軸のズレを0.1mm以下に抑える

要求値： $k_z > \sim 10^6$

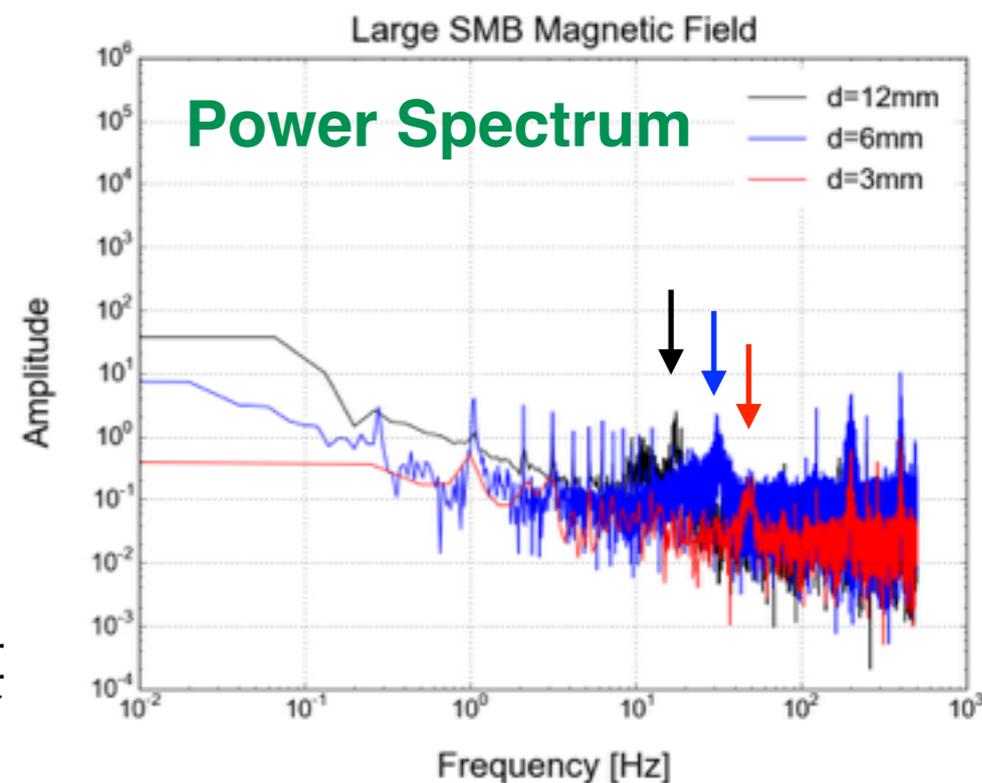
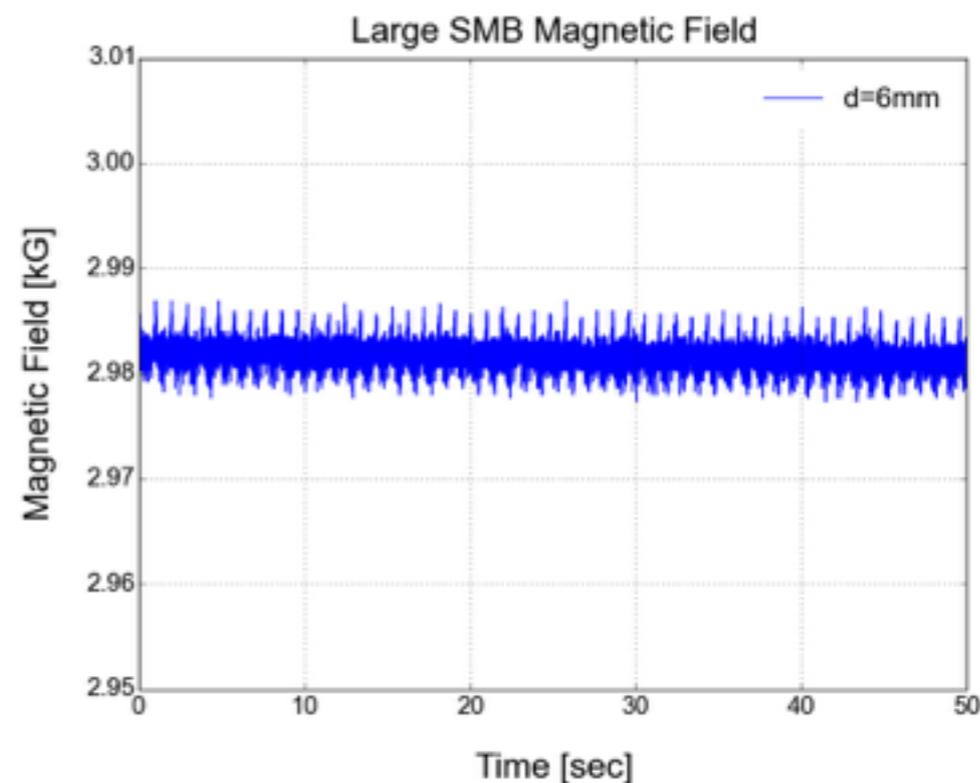
$$k_z = (2\pi f)^2 \cdot m$$

f : 固有振動数, m : 回転子の質量 (3.0kg)



d [mm]	3	6	12
f [Hz]	47.2	31.3	17.6
k_z [N/m]	2.6×10^5	1.2×10^5	3.7×10^4

- ✓ 現セットアップでは要求未達成
- ✓ 磁石パラメータ調整、新しい磁気回路設計が必要





軸受の保持力をバネ定数で評価

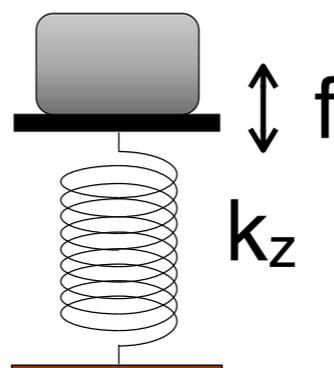
→ 浮上状態の磁場のPower Spectrumのピーク値から固有振動数・バネ定数を算出

→ 半波長板の光軸のズレを0.1mm以下に抑える

要求値： $k_z > \sim 10^6$

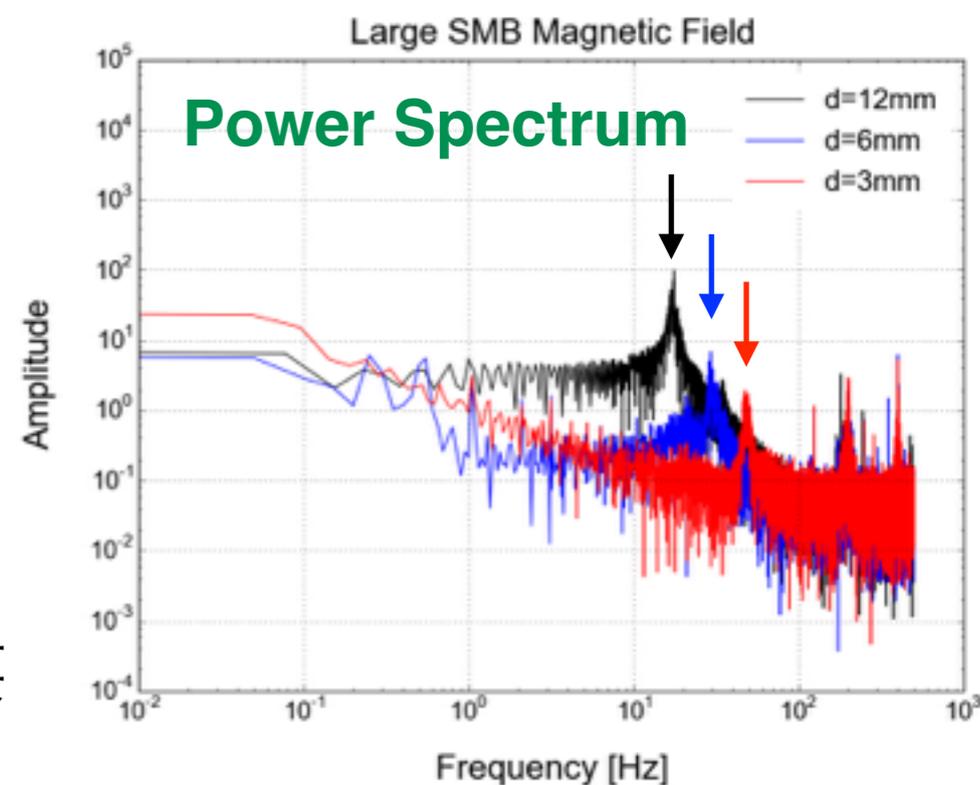
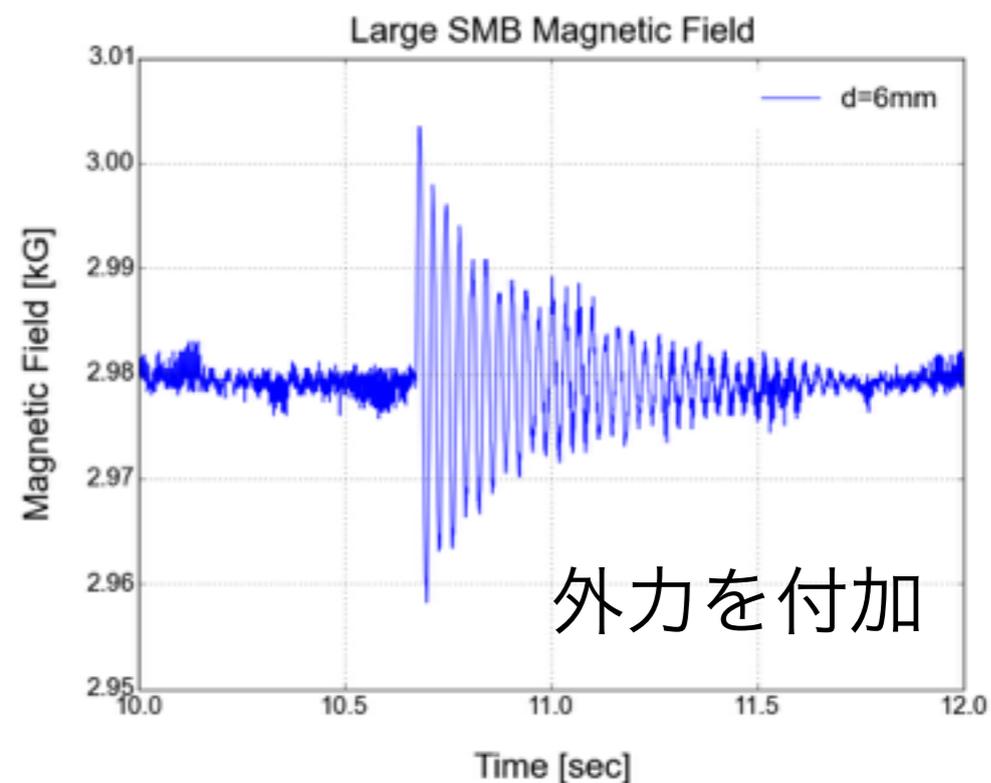
$$k_z = (2\pi f)^2 \cdot m$$

f : 固有振動数, m : 回転子の質量 (3.0kg)



d [mm]	3	6	12
f [Hz]	47.2	31.3	17.6
k_z [N/m]	2.6×10^5	1.2×10^5	3.7×10^4

- ✓ 現セットアップでは要求未達成
- ✓ 磁石パラメータ調整、新しい磁気回路設計が必要





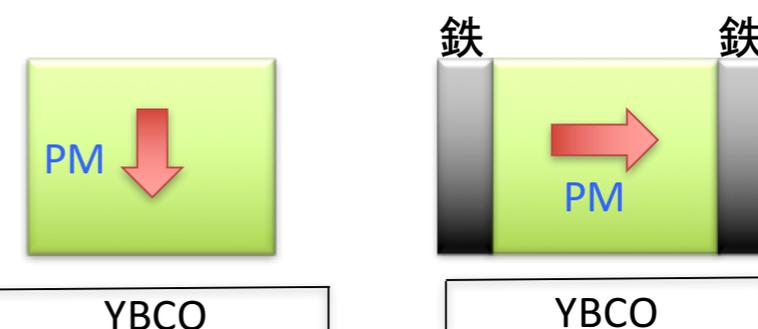
d [mm]	3	6	12	Requirement
$\Delta B/\bar{B}$ (w/ spike) [%]	22.1	6.1	6.8	< 1.0
$\Delta B/\bar{B}$ (w/o spike) [%]	4.5	1.5	1.5	< 1.0
k_z [N/m]	2.6×10^5	1.2×10^5	3.7×10^4	$> 1 \times 10^6$
P [W]	3.6×10^{-2}	3.2×10^{-3}	-	$< 3.5 \times 10^{-3}$ (全システム)

✓ 要求は未達成であるが、問題は明確化された。

→ 問題点：磁石間ギャップ・磁石の磁力個体差、保持力(磁場強度)不足

解決案

- 磁石アセンブリ時の圧力を上げる
- 磁石パラメータの変更 ($B_r = 1.24\text{kG} \rightarrow 1.48\text{kG}$)
- **ギャップ、個体差を打ち消す磁気回路の設計**



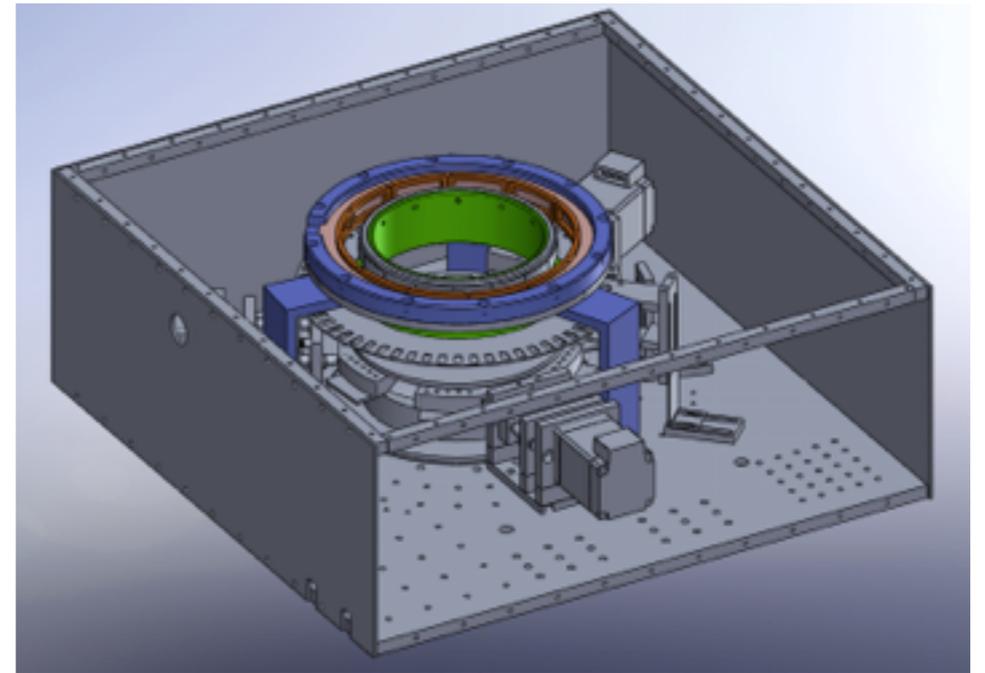
磁石を径方向に着磁、鉄ヨークで挟む
 → ギャップ間の影響を大幅に低減
 → ヨークから軸方向に強磁場を発生

原理検証による要求達成が予想できており、
 磁場シミュレーション・試作機による実測準備が進行中



✓ 駆動系

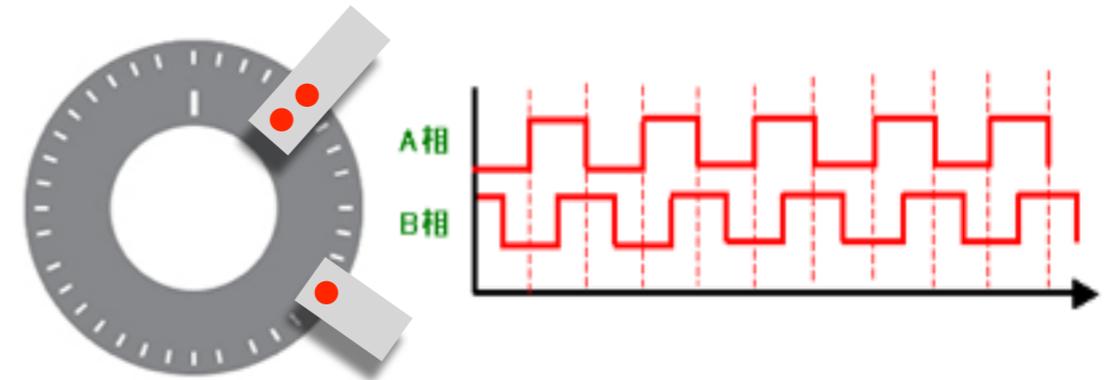
低発熱化を目指し超伝導コイルと永久磁石を使用したAC中空モーターを開発中



✓ エンコーダ

現在の角度精度： $\Delta\theta = 0.072\text{deg}$

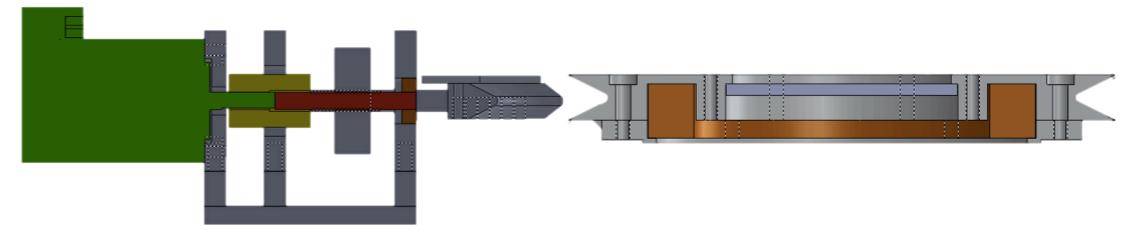
さらなる角度精度向上のためフェイズをずらした2個の光学エンコーダを導入予定



✓ 保持機構

回転子の冷却までの固定・打ち上げ時のローンチロック・半波長板の冷却等の目的を持つ多目的機構

発熱量・応力の解析進行中



小型試作機での開発を進め、実機サイズ試作機の作成につなげる



- ✓ LiteBIRDの重要ミッション機器候補である偏光変調器の連続回転機構の開発を行っている。
- ✓ 連続回転における低発熱化を実現する超伝導磁気軸受の評価を大型試作機を用いて行った。
 - 磁場・振動測定
 - Spindownによる発熱評価
- ✓ 問題点の明確化ができ、解決案の評価に向け準備中。
 - 実機サイズ試作機的设计・作成に大きく前進。
- ✓ 小型試作機でのその他の開発を今年度で終了し、実機サイズ試作機の実成を行う予定。

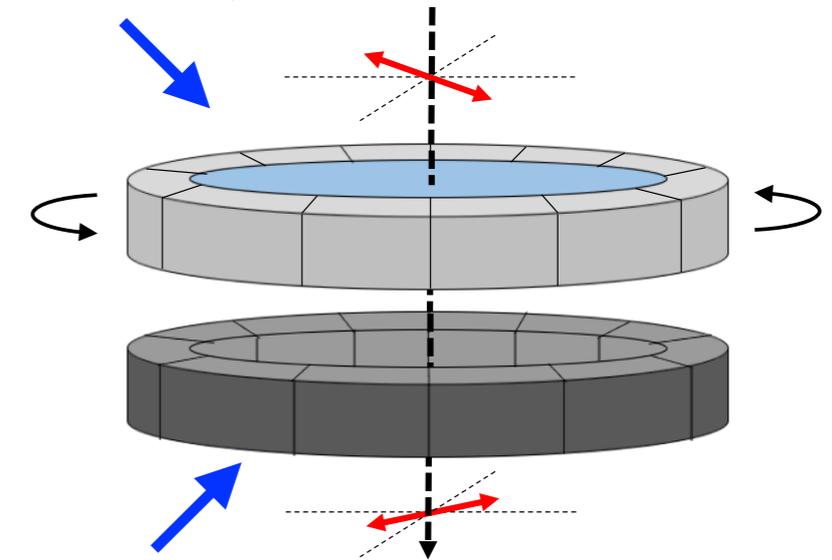
BACKUP



超伝導磁気軸受

- ✓ 永久磁石と超伝導体による浮上型軸受
- ✓ 第二種超伝導体のピン止め効果により回転以外の動作を保持
- ✓ フライホイール等産業用に研究が進んでいる

リング型永久磁石: NdFeB

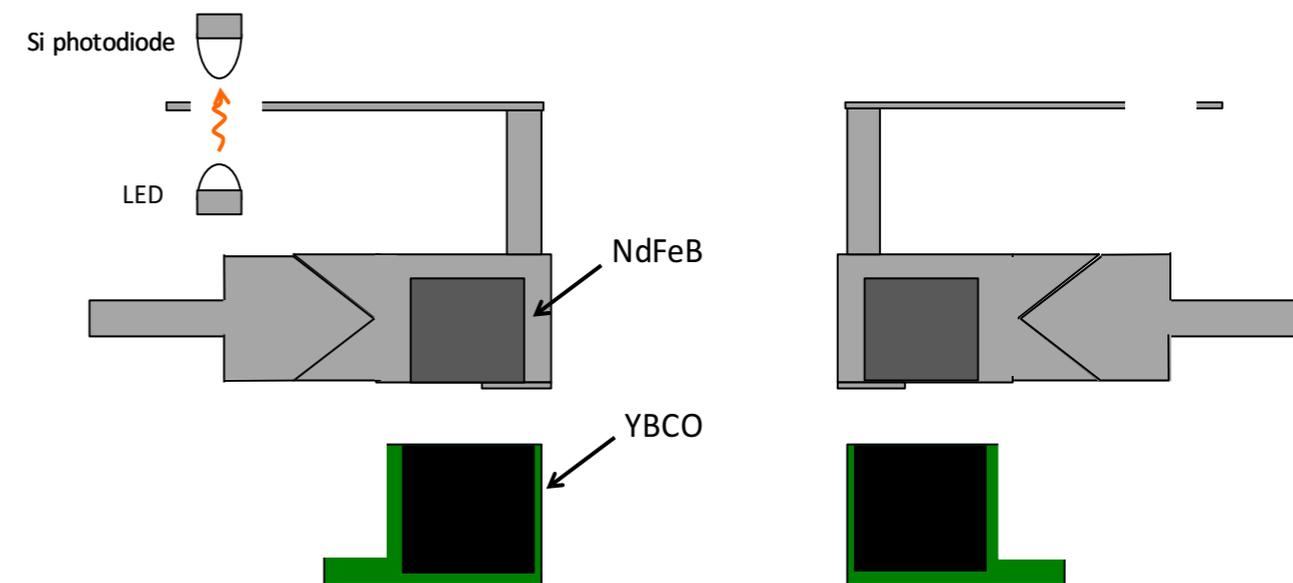


高温超伝導体: YBCO ($T_c=94K$)

実験の流れ

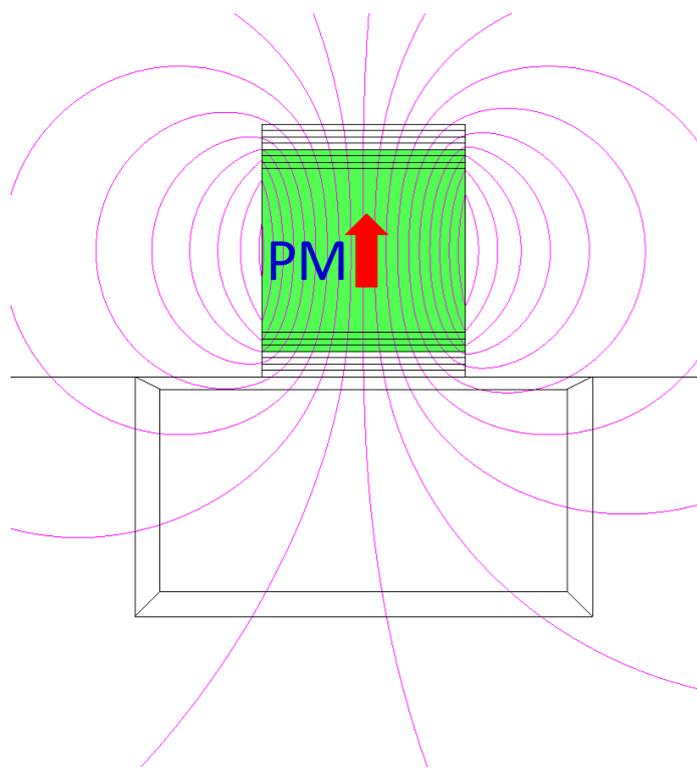
1. スペースを空けた状態で回転子を保持
2. 超伝導材を冷却
3. 超伝導体になったら回転子を開放
4. 回転子が固定状態で浮上

$T = 300K$





z方向磁化のPM
鉄磁路無



r方向磁化のPM
鉄磁路有

