

# ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBAの開発(26):

## 低温モノリシック光学系に向けた特性評価

---

高野 哲, 下田 智文<sup>A</sup>, Ooi Ching Pin, 有富 尚紀, 道村 唯太,

正田 亜八香<sup>B</sup>, 安東 正樹

東大理, 産総研<sup>A</sup>, 国立天文台<sup>B</sup>

# 概要

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡TOBAの開発を行い，0.1 Hz帯の重力波の検出を目指している
- Phase-IIIと呼ばれるプロトタイプに向けて，低温ねじれ振り子を開発中
- 低温下でのねじれ振り子の運転に成功，ビームジッター等の雑音が感度を制限
- モノリシック光学系を用いた読み取り光学系を計画
- モノリシック光学系構築に向けて，構成要素の低温下での特性評価を行った

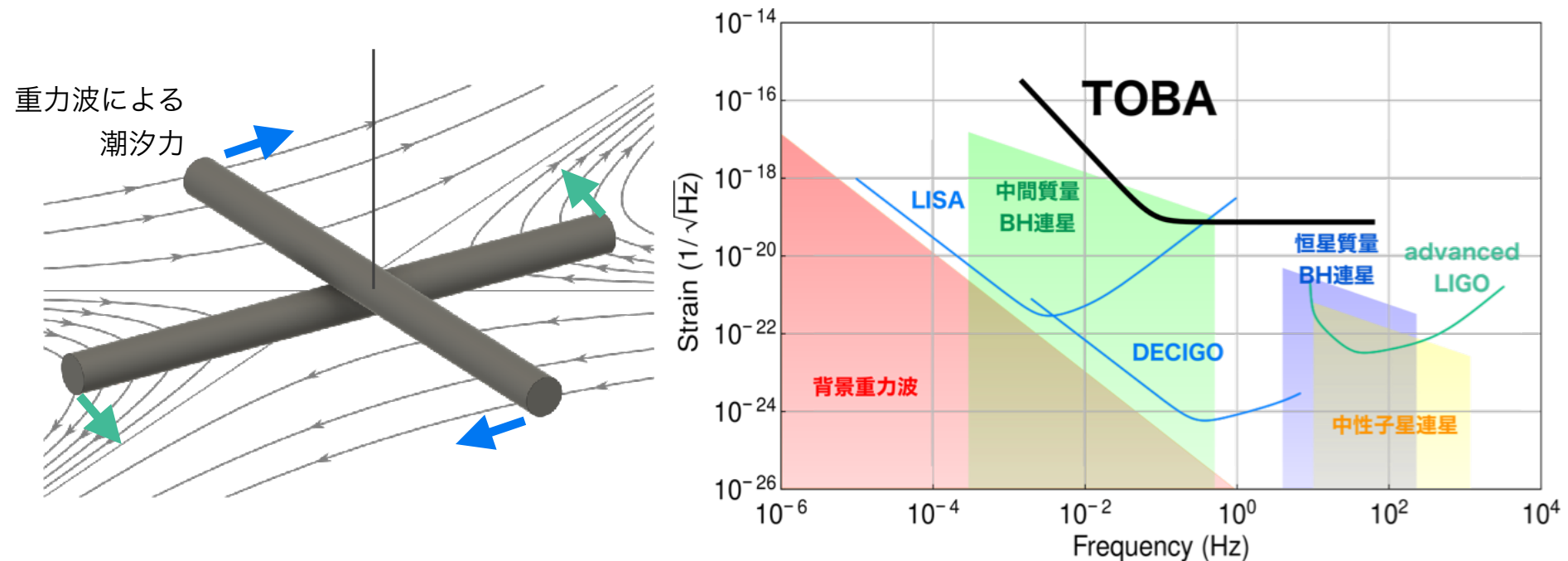
# Contents

- TOBAについて
  - ▶ Overview
  - ▶ Phase-III TOBA
- 光学系の改良
  - ▶ モノリシック光学系
  - ▶ 低温下での特性評価
- まとめ, 今後の展望

# ねじれ振子型重力波望遠鏡TOBA

## ねじれ振子型重力波望遠鏡TOBA (TOrsion Bar Antenna)

- 水平に懸架した棒状マスのねじれ回転を検出
- 共振周波数~数mHz → 0.1-10Hzの低周波重力波の地上観測が可能
- 地上で観測可能(宇宙に打ち上げる必要がない) → 低コスト
- 目標: 10mスケールで  $h \sim 10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$

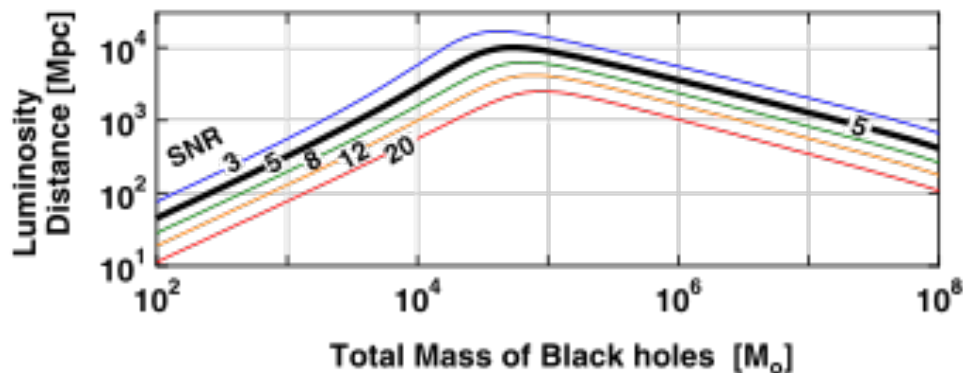


# TOBAのサイエンス

## 天文学的観測

= 低周波 (~0.1 Hz) の重力波

- 中間質量BH連星の合体
  - ▶ 大質量BH形成過程の解明



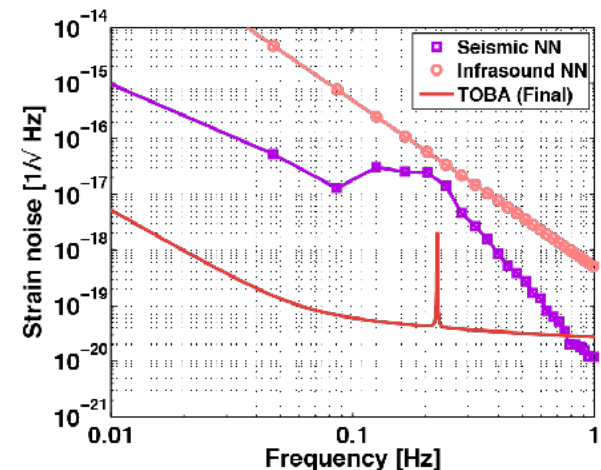
M. Ando et al., PRL, 105, 161101(2010)

- 背景重力波探査
  - ▶ 初期宇宙の直接探査

## 地球物理学的应用

= 重力偏差計としての活用

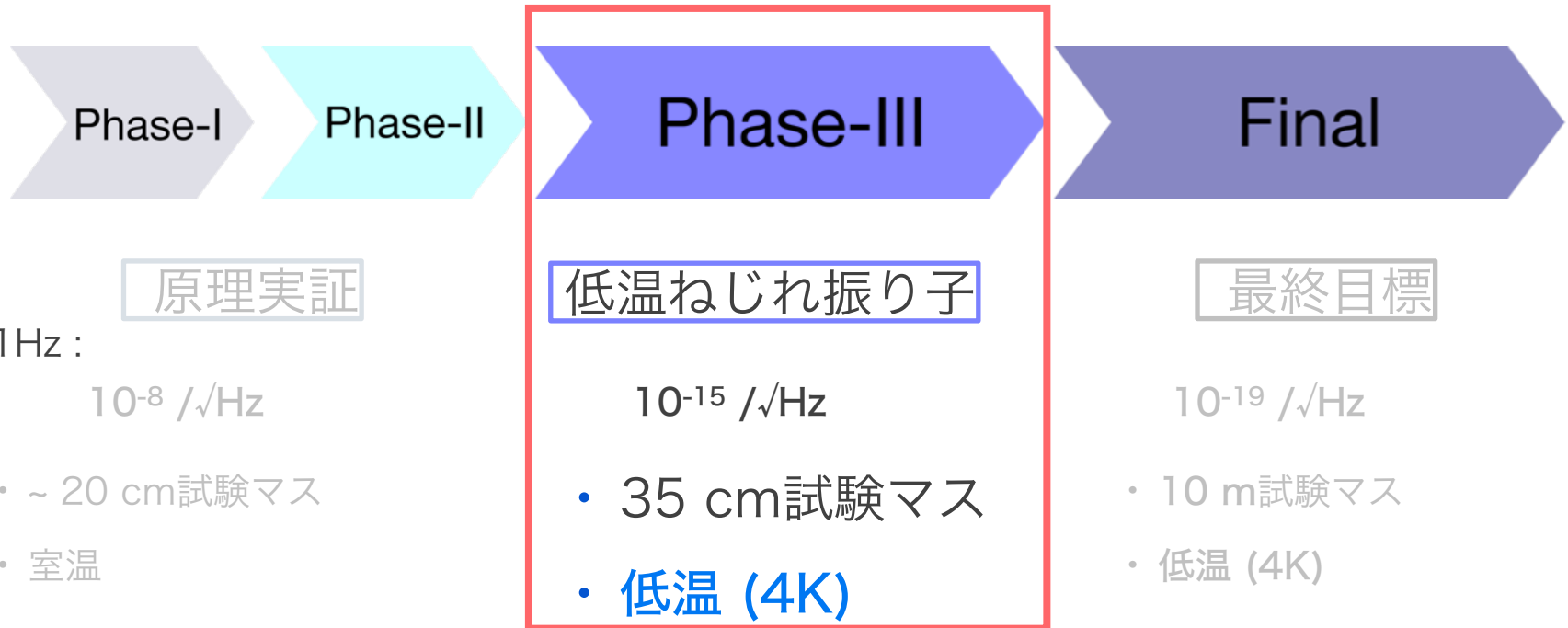
- Newtonian Noise
  - ▶ モデル検証
  - ▶ 第3世代レーザー干渉計のR&D



J. Harms et al., PRD, 88, 122003(2013)

- 地震の即時アラート
  - ▶ 社会, 産業への貢献

# 研究計画



## 現在: Phase-III TOBAの開発

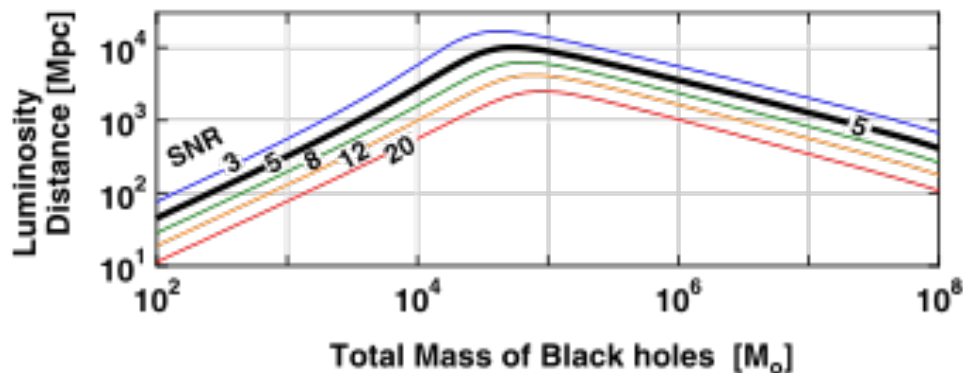
- 低温ねじれ振り子の実証
- 障害となる雑音源の特定と低減

# TOBAのサイエンス

## 天文学的観測

= 低周波 (~0.1 Hz) の重力波

- 中間質量BH連星の合体
  - ▶  $10^5 M_{\odot}$ , 1 Mpc以内のイベント



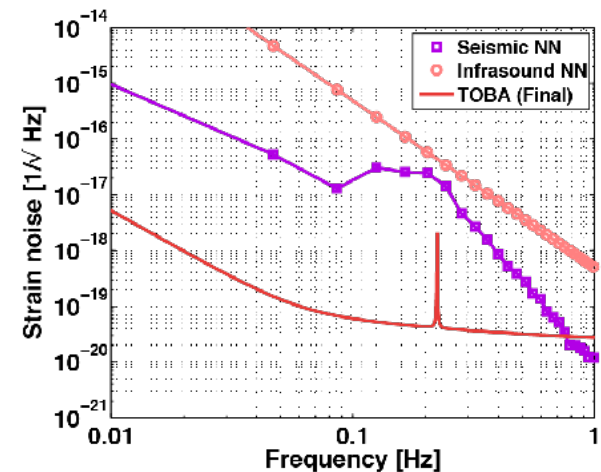
M. Ando et al., PRL, 105, 161101(2010)

- 背景重力波探査
  - ▶ 初期宇宙の直接探査

## 地球物理学的应用

= 重力偏差計としての活用

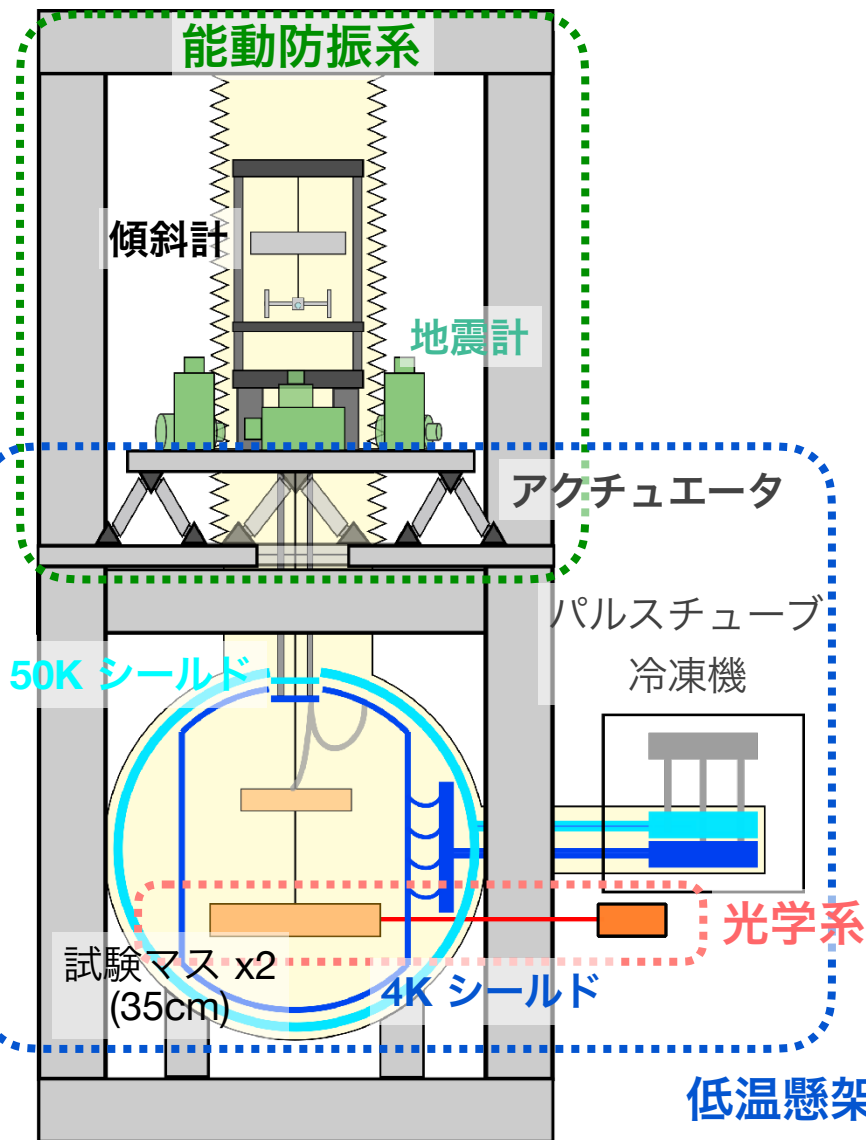
- Newtonian Noise
  - ▶ モデル検証, 低減実証



J. Harms et al., PRD, 88, 122003(2013)

- 地震の即時アラート
  - ▶ M7.0の地震を100 km先まで10秒以内

# Phase-III TOBAの構成

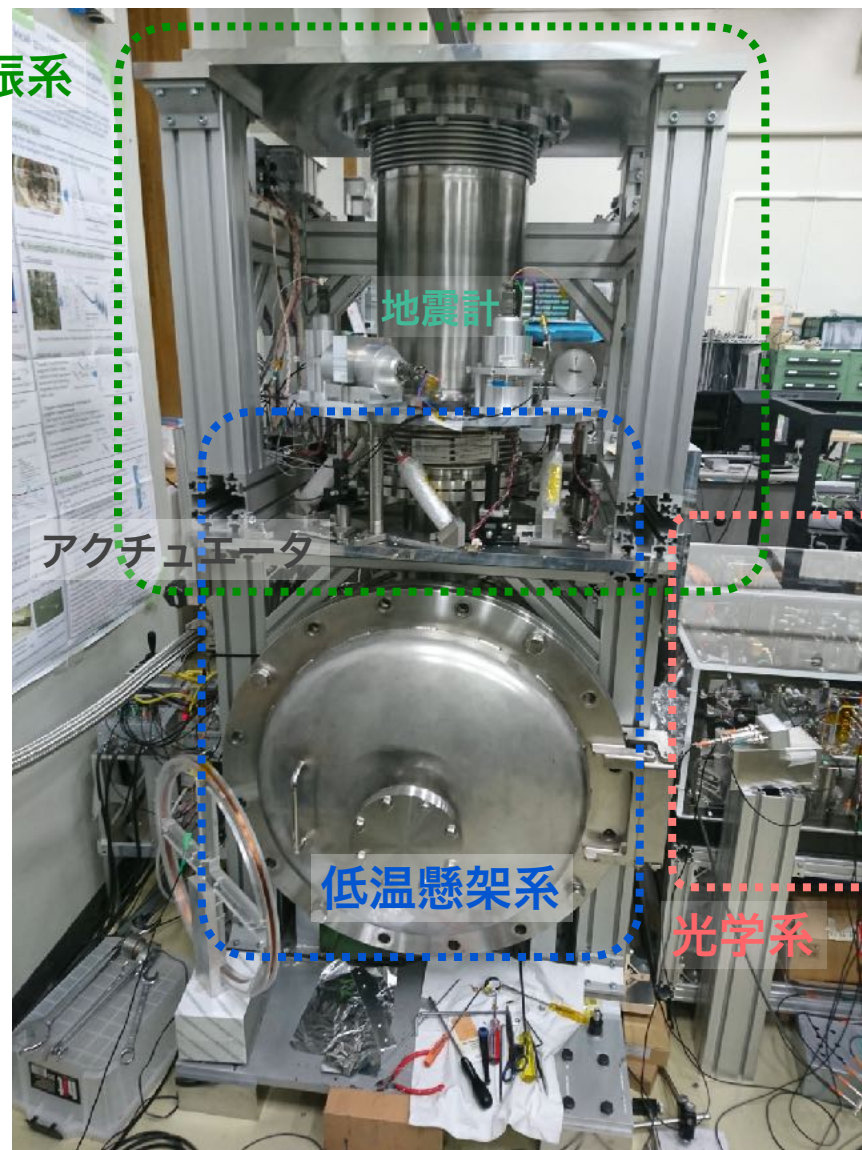
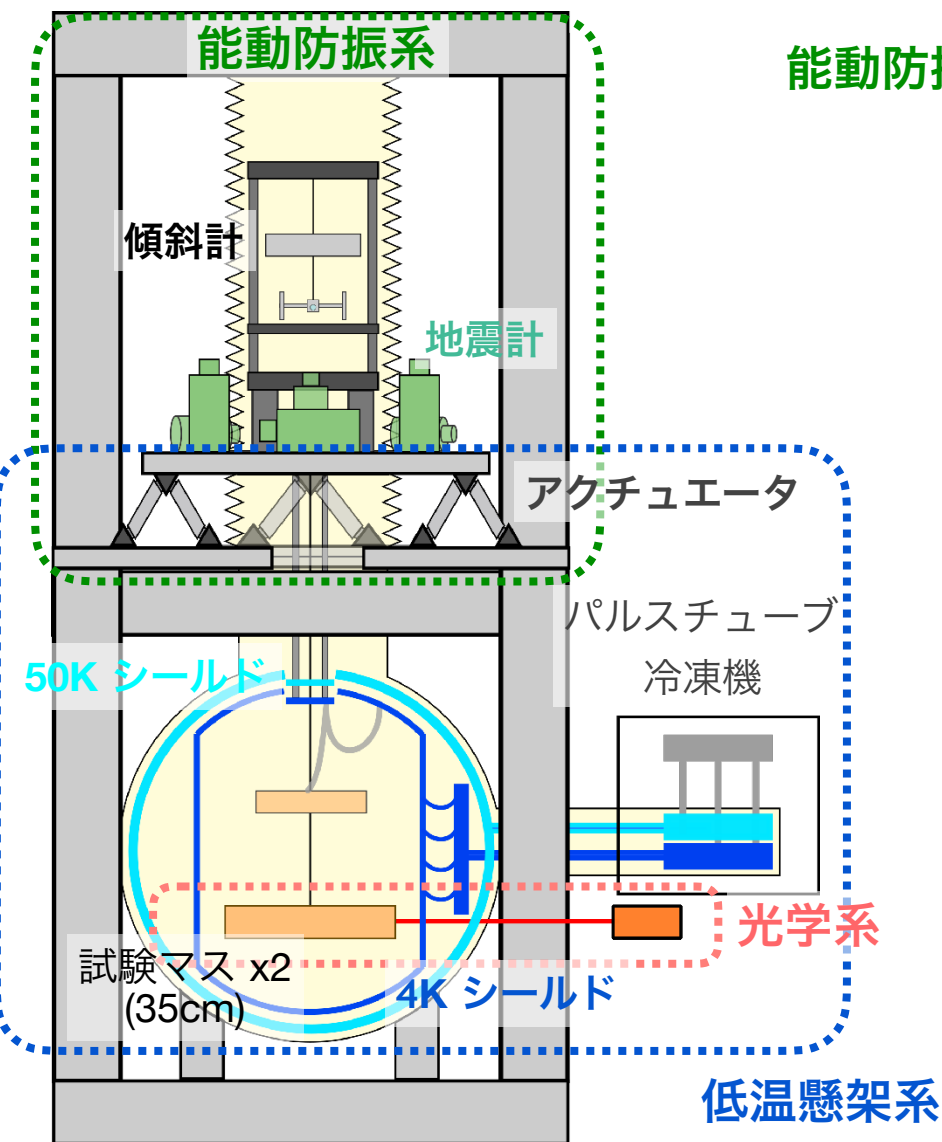


低温系でのねじれ振り子の実証

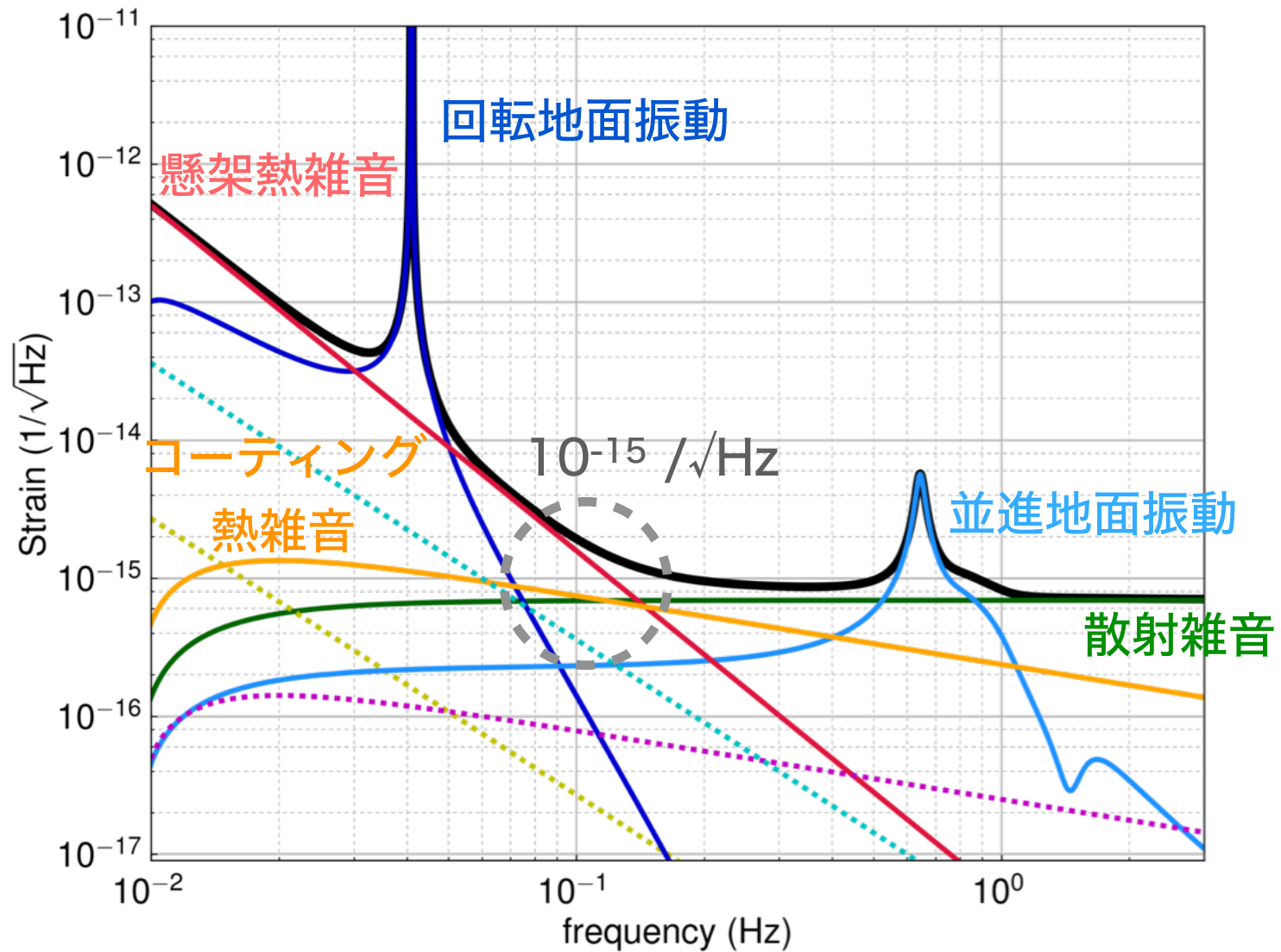
- 低温懸架系
  - ▶ 2段ねじれ振り子, 35 cm 試験マスx2
  - ▶ 50 Kと4 Kの2つの輻射シールド
- 能動防振系
  - ▶ 地震計とピエゾアクチュエータによるフィードバック制御系
  - ▶ 角度変動を読む傾斜計
- 光学系
  - ▶ 改良型WFS



# Phase-III TOBAの構成



# 目標感度



# 目標感度のための課題

- 低温懸架系

- ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却
- ▶ Q値: 4 Kで $Q = 10^8$

- 防振系

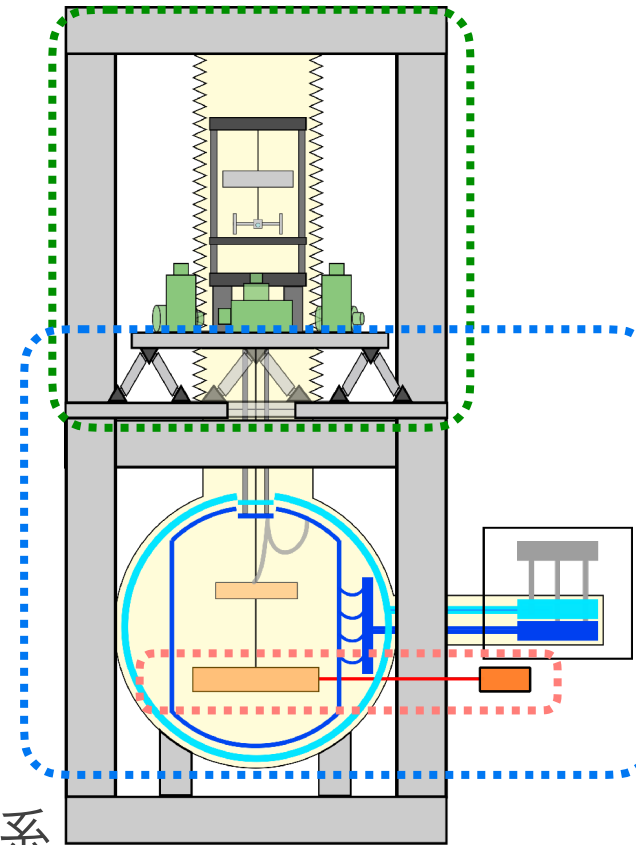
- ▶ 回転地面振動
- ▶ 並進とのカップリング
- ▶ 並進地面振動:  $10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$
- ▶ 冷凍機から導入される振動の低減

- 光学系

- ▶ Wave Front Sensorを応用した読み取り系
- ▶ ビームジッター雑音の低減

- その他

- ▶ 環境磁場雑音の低減



# 目標感度のための課題

## • 低温懸架系

- ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却 ✓ 6Kまでの冷却に成功
- ▶ Q値: 4 Kで  $Q = 10^8$  → Ooi氏 (14pW3-11)

## • 防振系

- ▶ 回転地面振動 ✓ 2段振り子+同相雑音除去
  - ▶ 並進とのカップリング ✓ 低減手法の開発
  - ▶ 並進地面振動:  $10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$
  - ▶ 冷凍機から導入される振動の低減
- 能動防振

## • 光学系

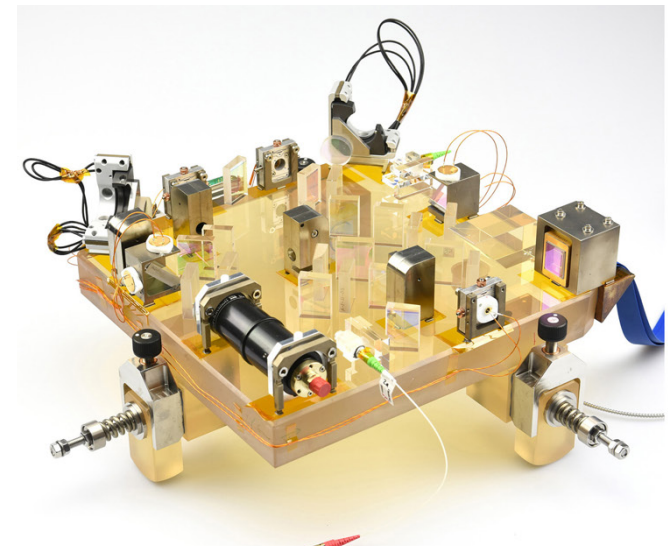
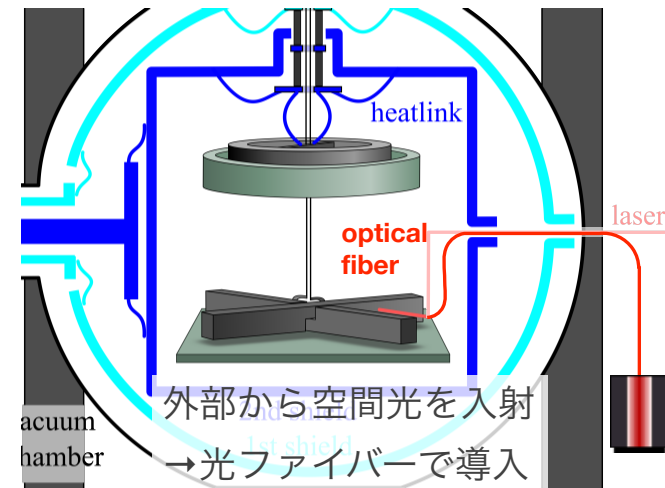
- ▶ Wave Front Sensorを応用した読み取り系 ✓ 原理実証済み
- ▶ **ビームジッター雑音の低減 → モノリシック光学系**

## • その他

- ▶ 環境磁場雑音の低減

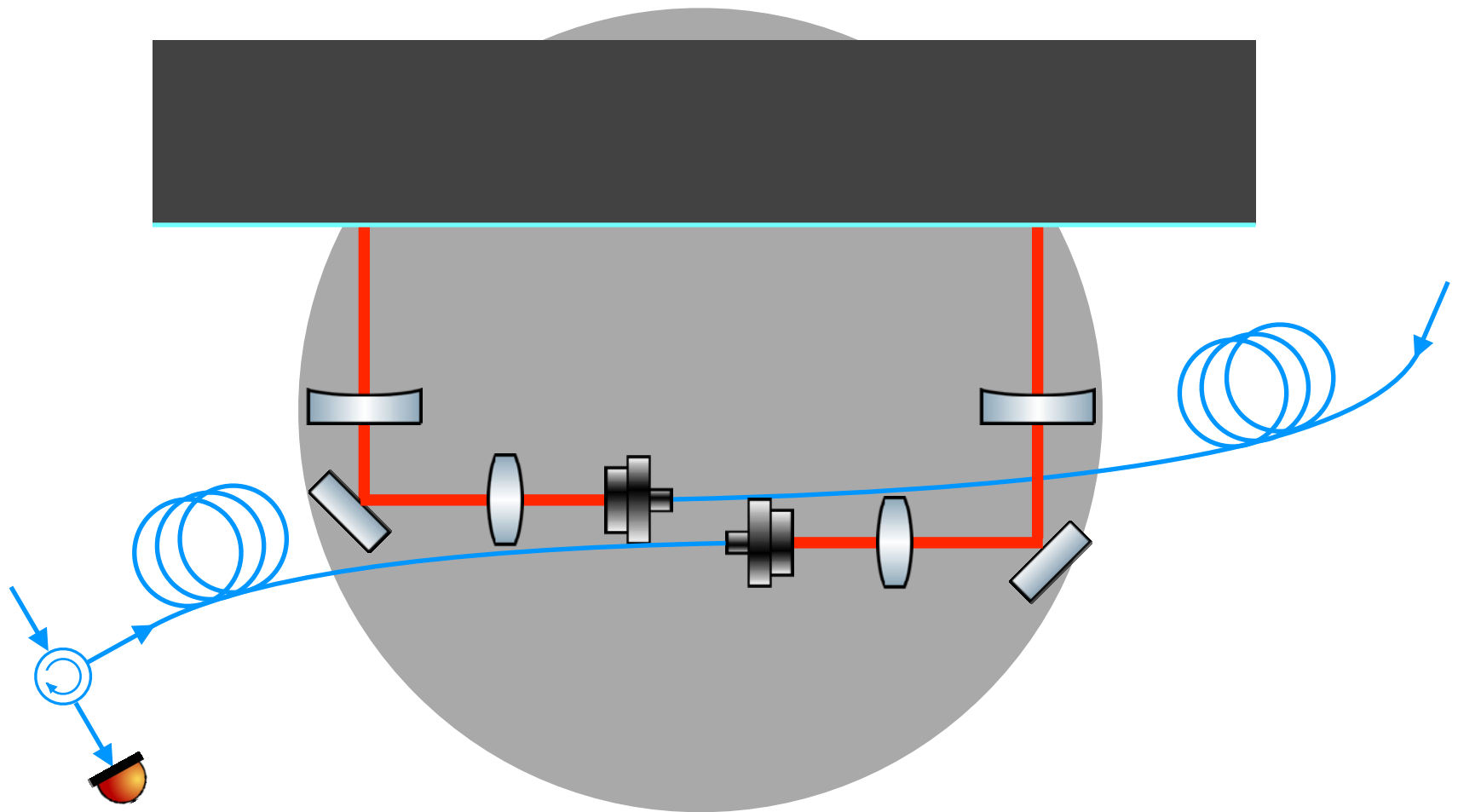
# 光学系改良

- 入射光学系
  - ◎ これまでは、懸架された光学ベンチへ真空槽外から空間光レーザーを入射
    - ▶ 光ファイバーを用いて導入
- 読み取り光学系
  - ◎ モノリシック光学系
    - ▶ ジッターの低減
    - ▶ Fabry-Pérot干渉計での読み取り



[Chwalla et. al. \(2016\)](#)

# 光学系デザイン

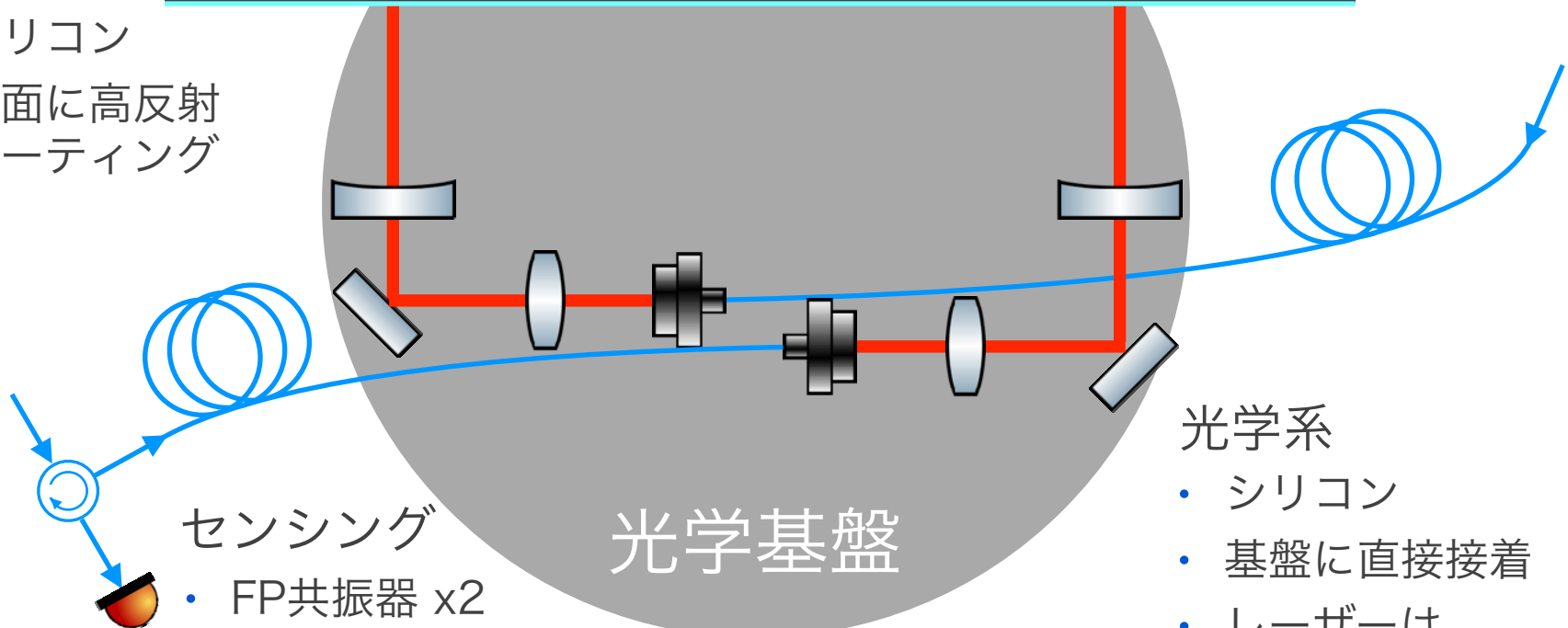


# 光学系デザイン

## 試験マス

- シリコン
- 表面に高反射コーティング

試験マス



## センシング

- FP共振器 x2
- PDH法で制御
- 反射光はコリメーターに戻す

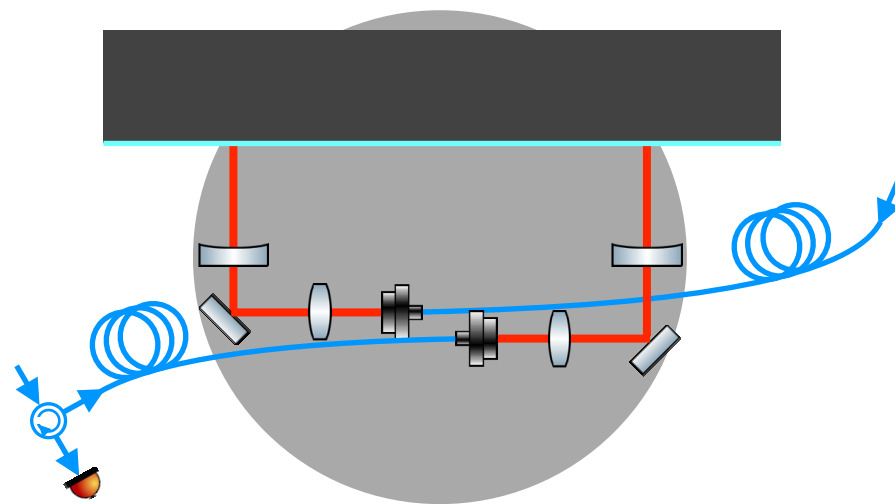
光学基盤

## 光学系

- シリコン
- 基盤に直接接着
- レーザーは光ファイバーで導入

# 開発項目

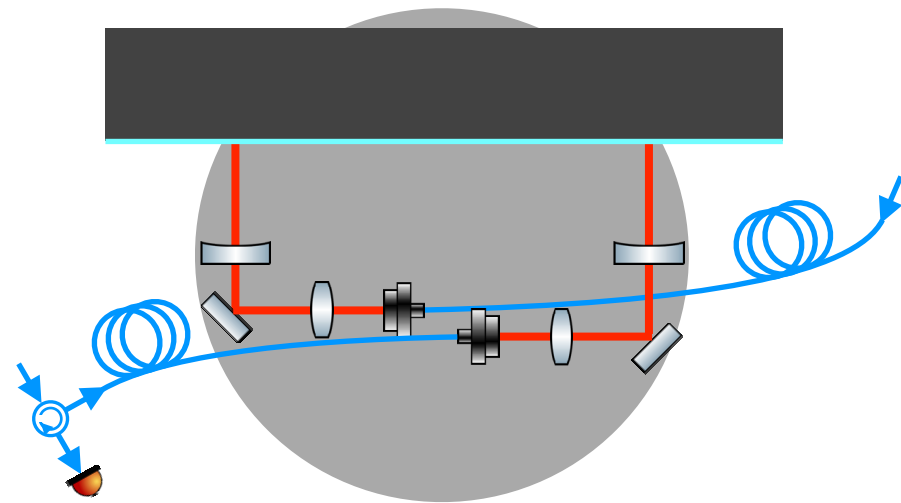
- モノリシック光学系の構築手法
  - ▶ 接着方法
  - ▶ アライメント方法
- 低温における動作
  - ▶ コリメーター
  - ▶ アライメントずれ
  - ▶ PDの動作（透過光，強度モニター用， etc.）
- 光学系の雑音レベルの測定
  - ▶ 目標感度： $10^{-16}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$





# 開発項目

- モノリシック光学系の構築手法
  - ▶ 接着方法
  - ▶ アライメント方法
- 低温における動作
  - ▶ コリメーター
  - ▶ アライメントずれ
  - ▶ PDの動作（透過光，強度モニター用， etc.）
- 光学系の雑音レベルの測定
  - ▶ 目標感度： $10^{-16}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$



# 接着手法

モノリシック光学系で使用されている接着手法

	Hydro Catalytic Bonding	Optical Contact	エポキシ接着剤	紫外線硬化樹脂
機械強度	○	○	○	△
機械安定度	○	○	○	△
取り扱い	乾燥に数週間～	職人技を要する	○	○
低温	○	○	ものによる	不明

- ▶ エポキシ, 紫外線硬化樹脂の低温耐性を調査

# 低温試験

シリコン同士を

- Stycast 1266
- DP190

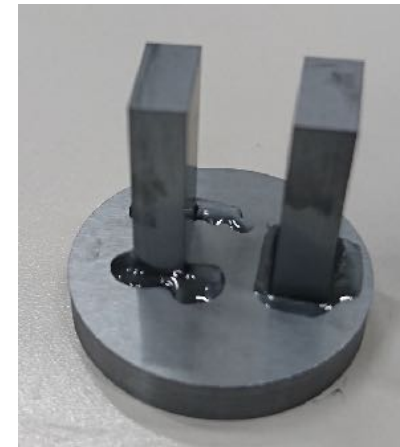
エポキシ

- NOA63
- NOA81

紫外線硬化樹脂



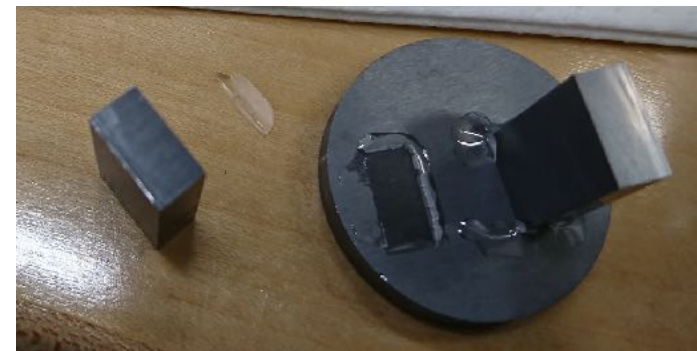
冷却&  
昇温後



で接着し，4Kまで冷却

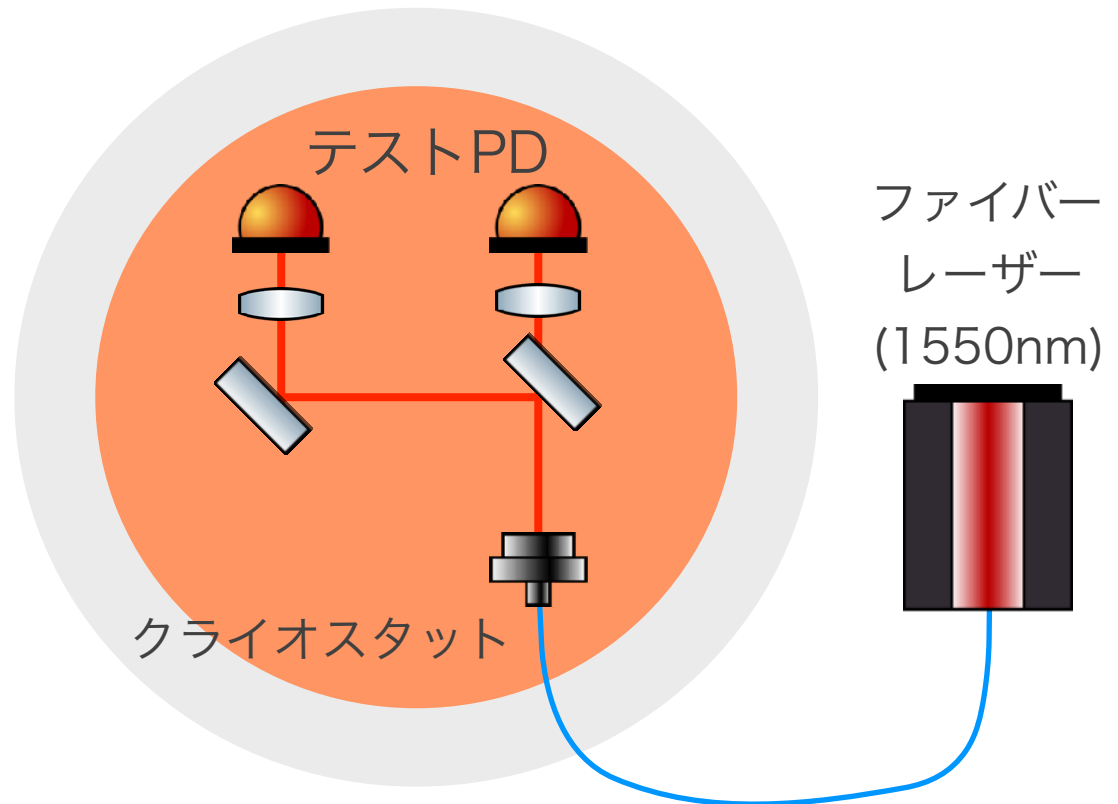
- ▶ 紫外線硬化樹脂は昇温後に剥離
- ▶ エポキシは昇温後も問題なし

**エポキシでの接着を採用**

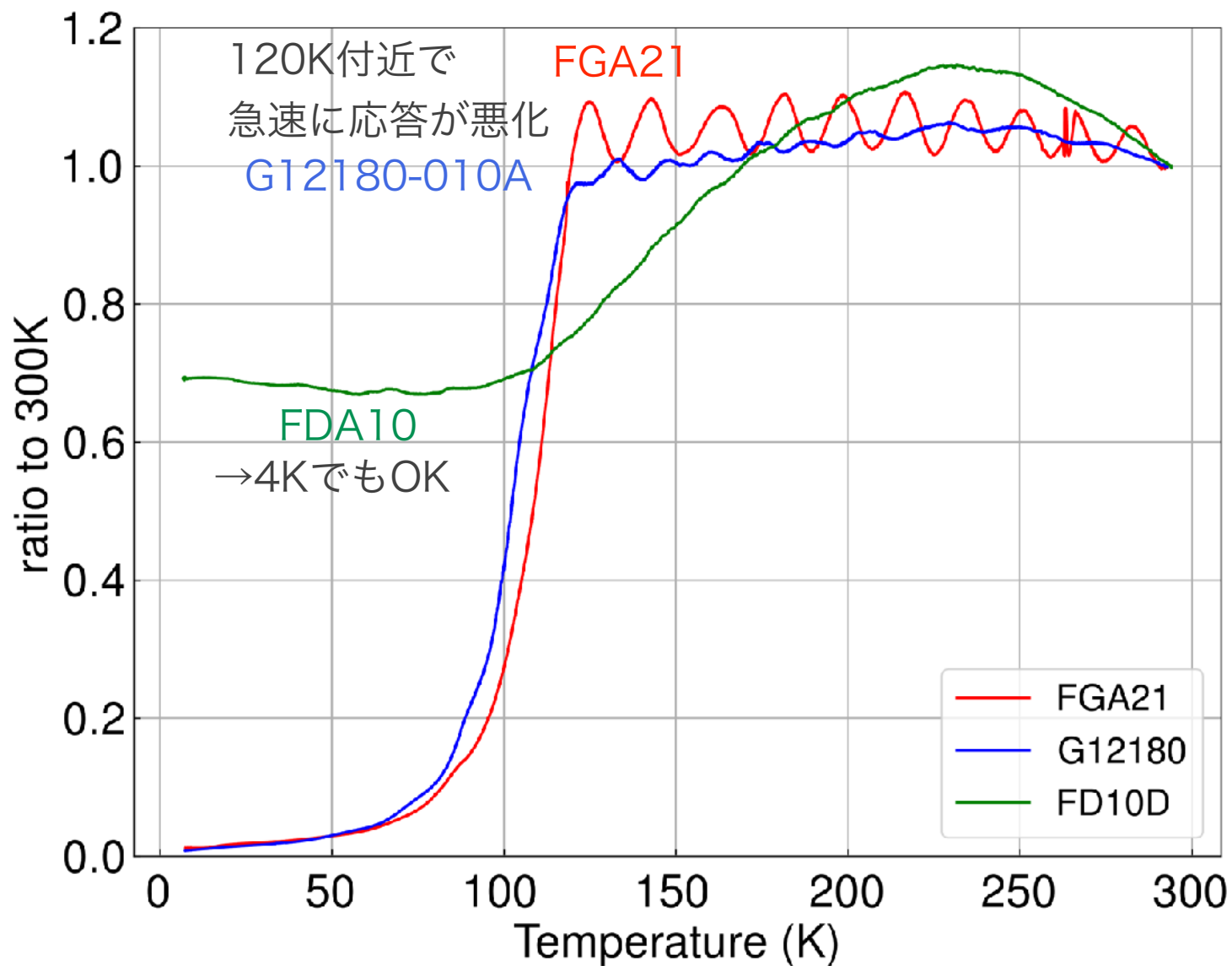


# PD動作

- コリメーターからPDにレーザー光(1550nm)を入射
- FGA21 (Thorlabs)
- G12180-010A (Hamamatsu)
- FD10D (Thorlabs)



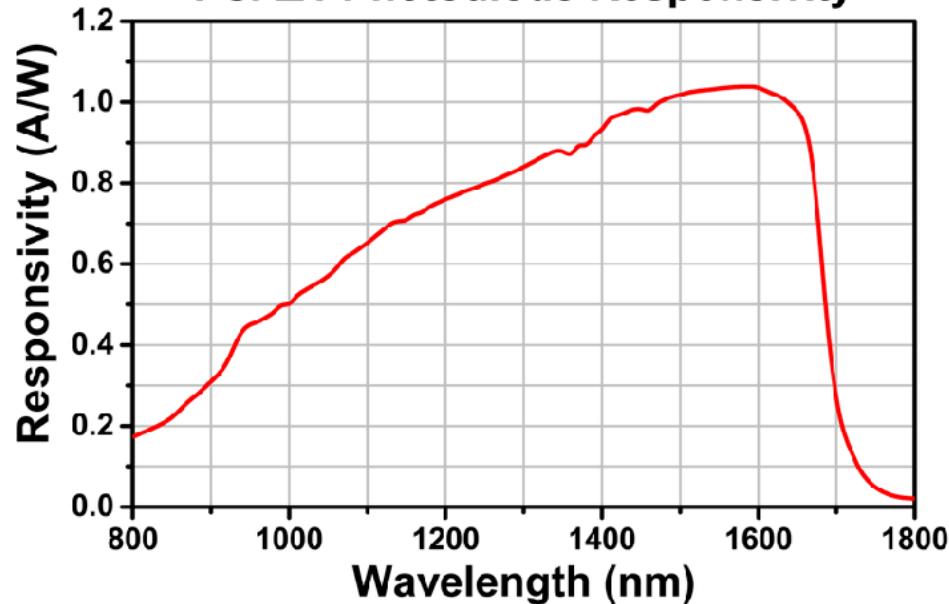
# 測定結果



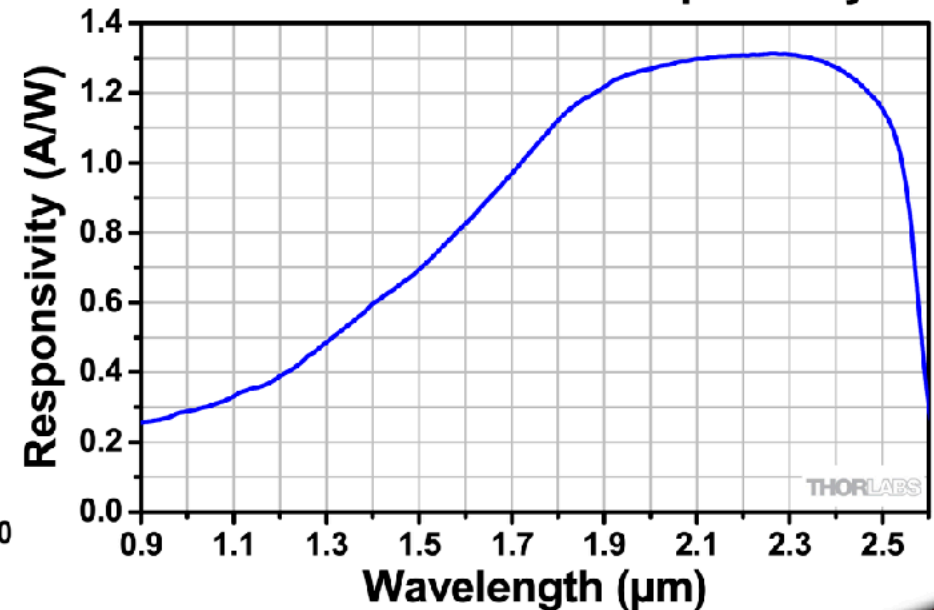
# PDの応答

- FGA21, G12180-010A : ピーク波長 ~ 1550nm
- FD10D : ピーク波長: ~ 2300nm
- 低温化でピーク波長が短波長側にシフトしたのが原因か

FGA21 Photodiode Responsivity



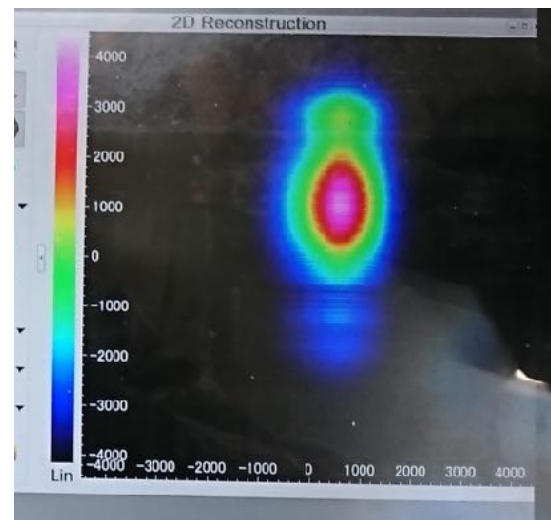
FD10D Photodiode Responsivity



# コリメーター

焦点固定コリメーター（F260APC-1550, Thorlabs）を使用

- 何度か冷却&昇温を繰り返していると出射ビームの形が変化



- 他の種類のコリメーターでも同様の現象
  - ▶ 低温化でレンズの位置が変化した可能性

現在はピグテールコリメーターを使用

- 今のところビームの形に異常はない

# まとめ

- 低周波重力勾配測定に向けたPhase-III TOBAの開発
  - ◎ 6.1 Kまで冷却したねじれ振子子の運転に成功
- 高感度化に向けた光学系の改良案
  - ◎ モノリシック光学系の構築
  - ◎ 2つのFabry-Pérot共振器で読み取り
- モノリシック光学系構築に向けた特性評価
  - ◎ 接着手法→エポキシ接着剤を採用
  - ◎ PD→常温でピーク波長が $\sim 2\mu\text{m}$ 程度のものが使用可能
  - ◎ コリメーター→焦点固定型は使用不可



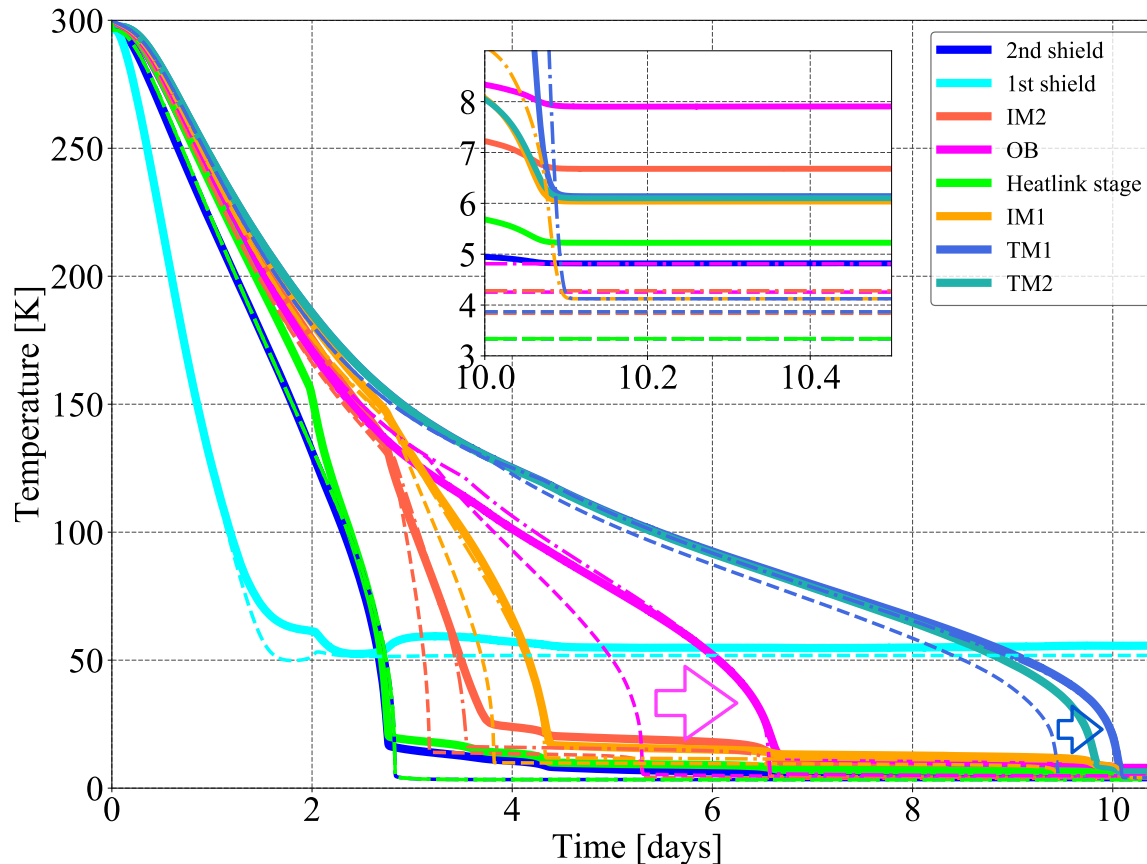
# 今後の展望

- モノリシック光学系の構築手法の開発
  - ◎ テンプレートで位置を定める
  - ◎ ステージ, ピコモーターなどを用いたアライメント
- 雑音レベルの測定
  - ◎ 固定した試験マスで測定, 目標感度 $10^{-16}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を目指す
  - ◎ 最終的には試験マスを懸架して測定を行う

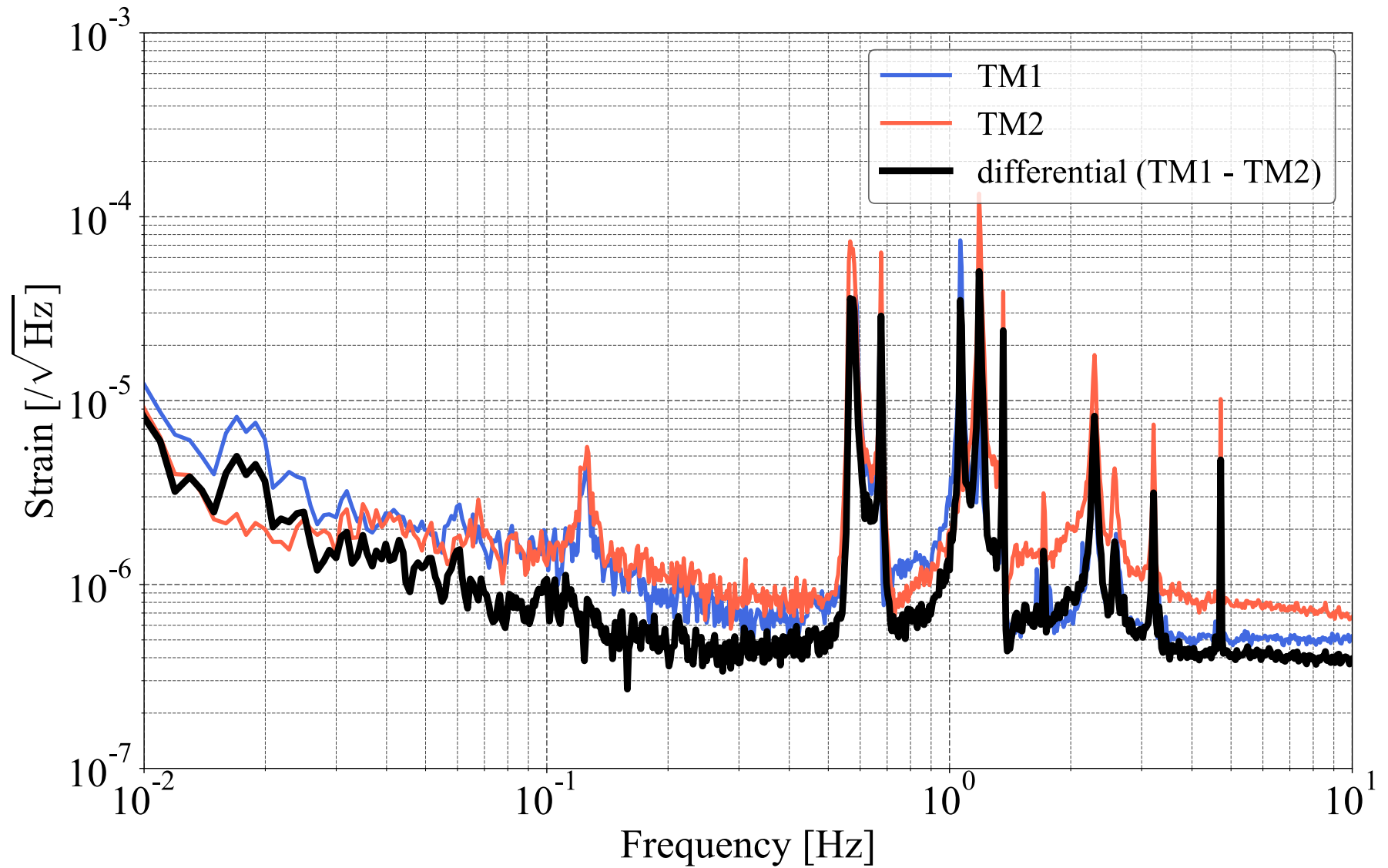


# 冷却結果

- 6.1 Kまでの冷却に成功 (4 Kの場合より1.2倍の熱雑音)
- 理論よりも冷却速度が遅い
- ▶ ヒートリンクの熱接触が想定よりも悪い

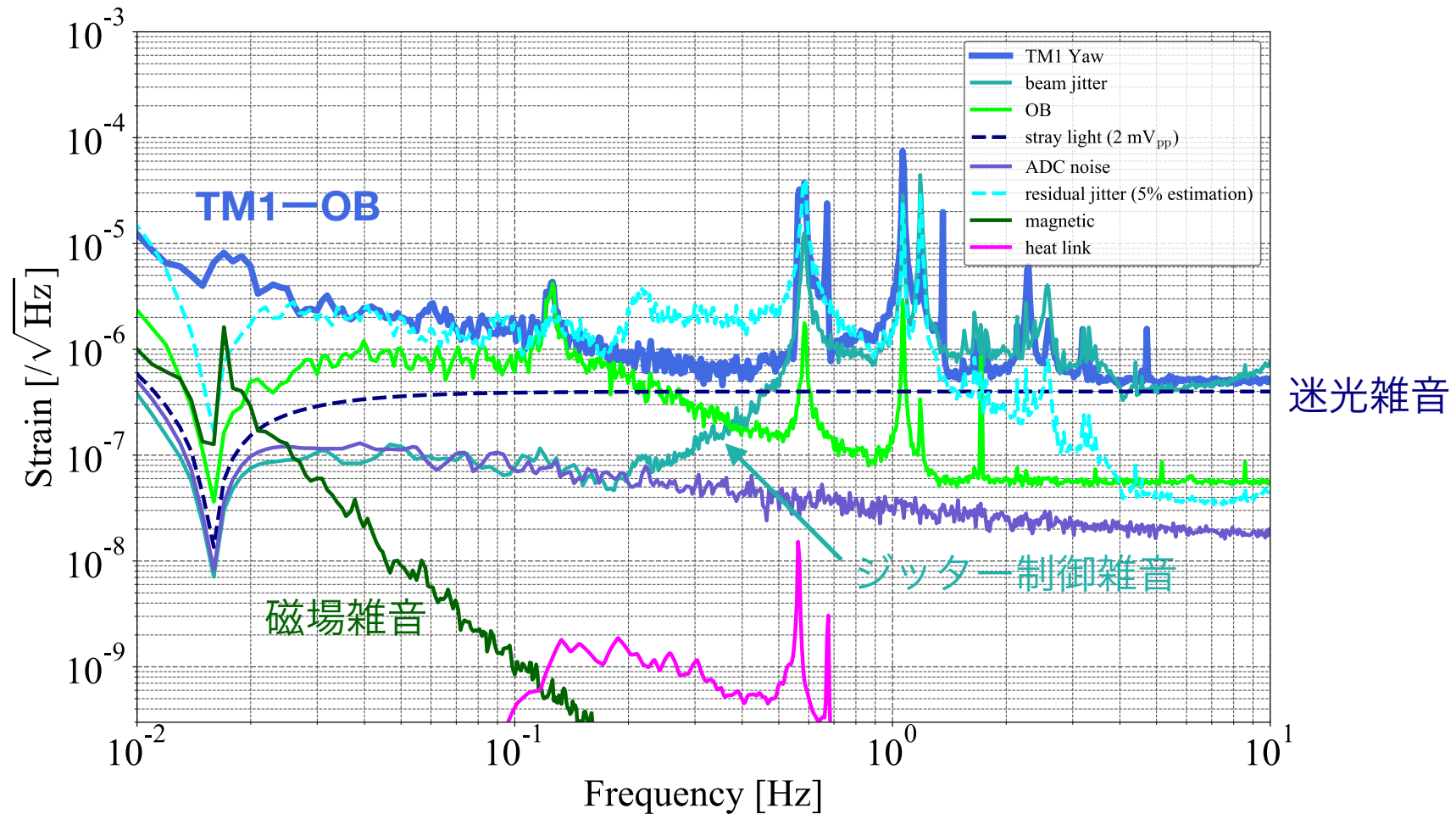


# 現在の感度

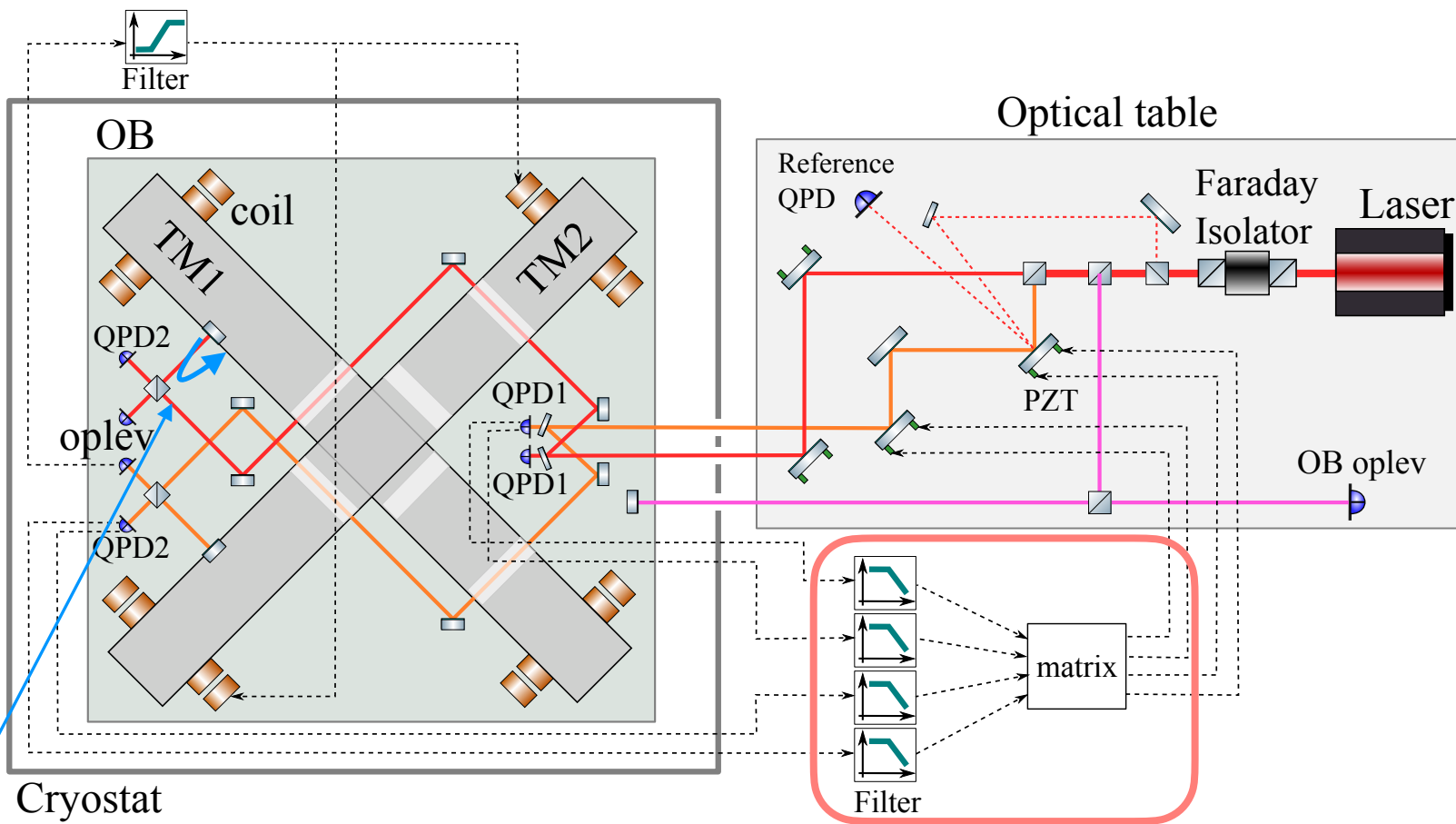


# 雑音源

- ビームジッター制御雑音, 迷光雑音が現状の感度を制限
- 磁場雑音がPhase-IIIの目標感度を大きく制限しうる



# ビームジッター，迷光



迷光雑音：

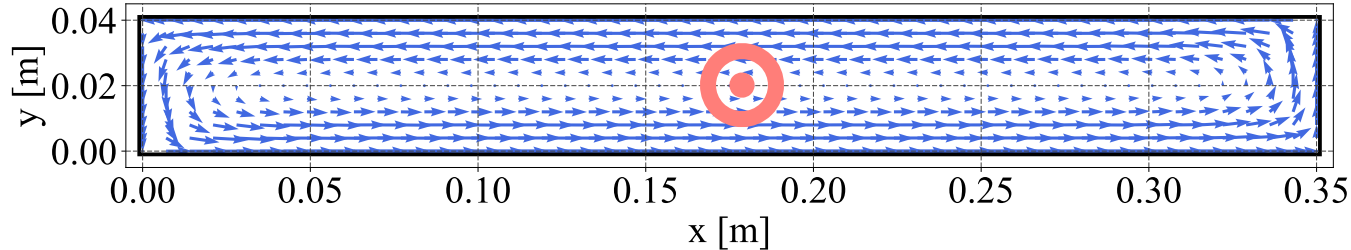
BSの表面反射などによる迷光が計測信号と干渉し，強度変動を起こす雑音

ビームジッター制御雑音：

ビームジッターの制御信号に強度変動などの信号が混入し，制御を介して逆にビームを揺らしてしまう

# 磁場雑音

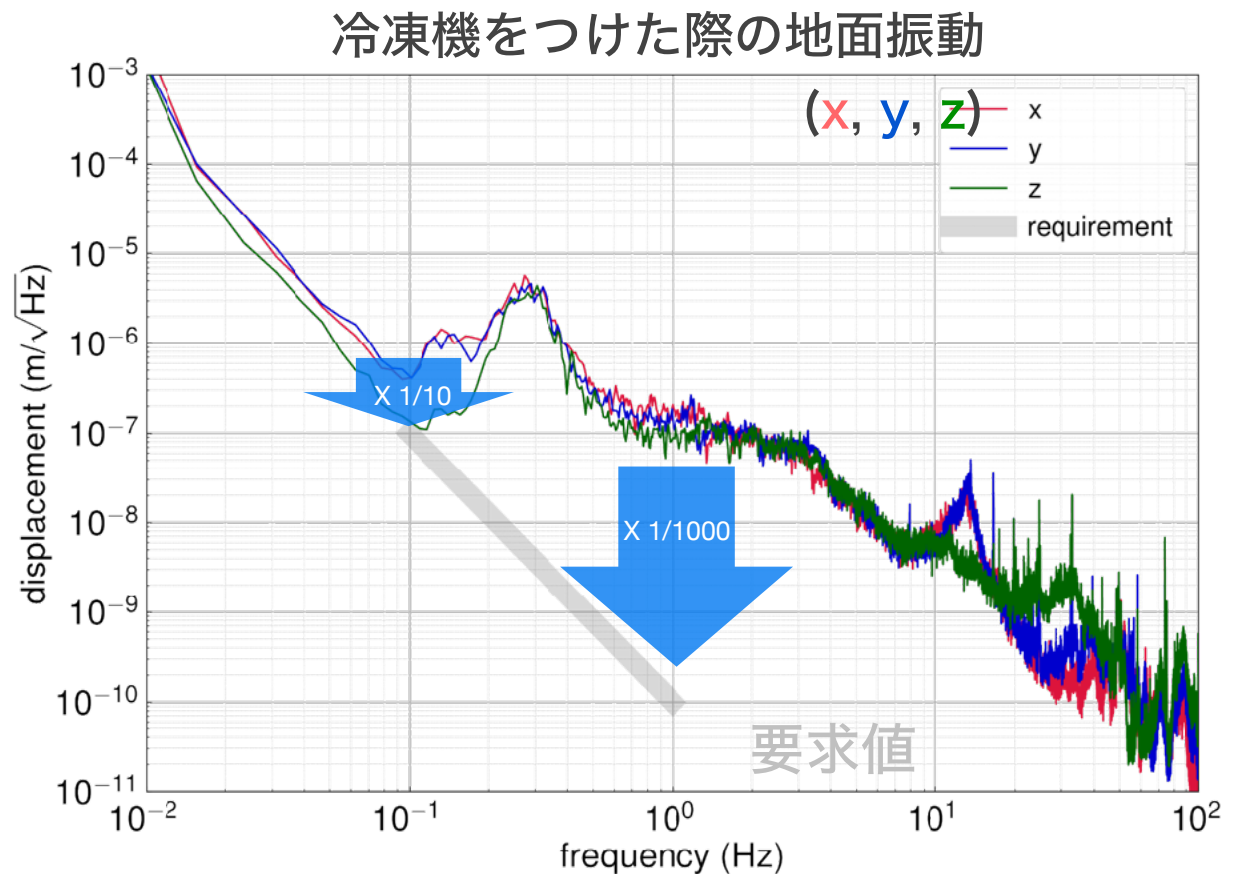
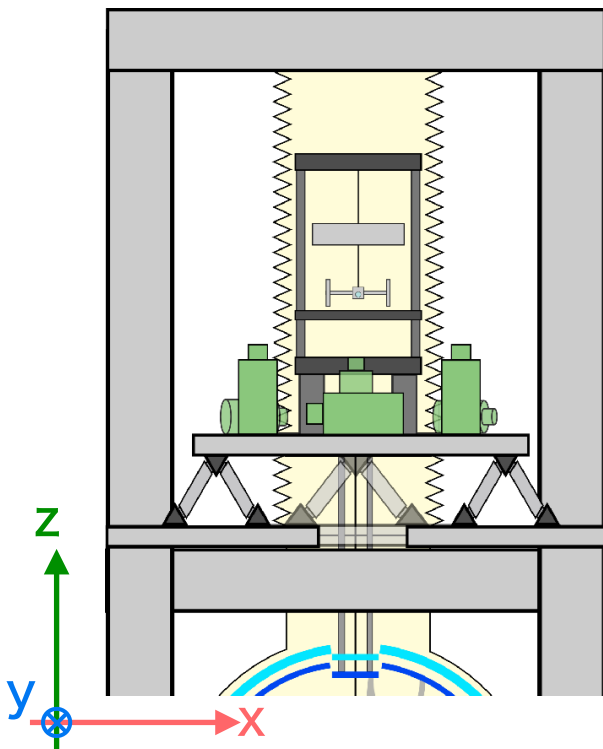
- 環境磁場変動による誘導電流が試験マスに流れ、磁気モーメント  $\mu$  をもつ
- 環境磁場のDC成分  $B$  とカップルし、トルク雑音  $N=B \times \mu$  が生じる



- $\mu$  は電気伝導度に比例
  - ▶ 低温になるほど寄与が大きくなる
- 現状  $10^{-9} / \sqrt{\text{Hz}}$  @ 0.1 Hz
  - ▶ 目標感度  $10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$  達成には6桁の低減が必要

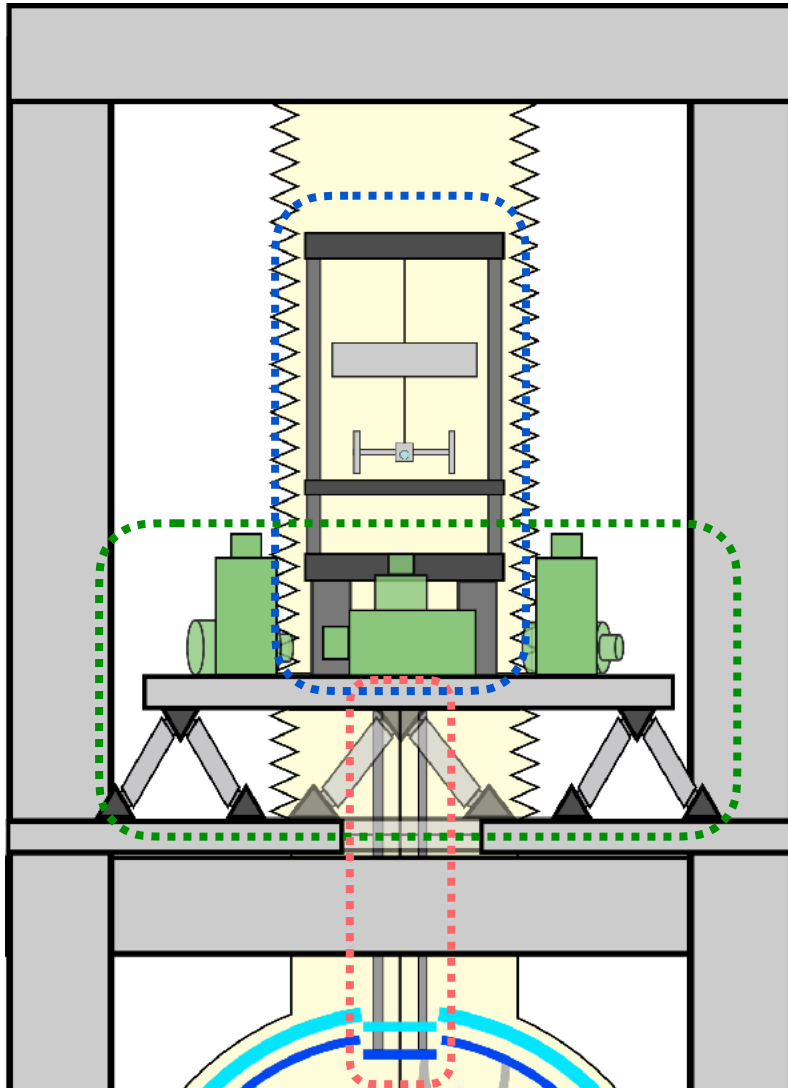
# 懸架点の防振

- 懸架点の振動への要求値:  $10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 0.1 Hz
  - ▶ 0.1 Hzで1/10, 1 Hzで1/1000 程度の防振が必要





# 能動防振系の機能



傾斜計

→AVITの角度変動の読み取り

**Active Vibration Isolation Table (AVIT)**

→懸架点の能動防振

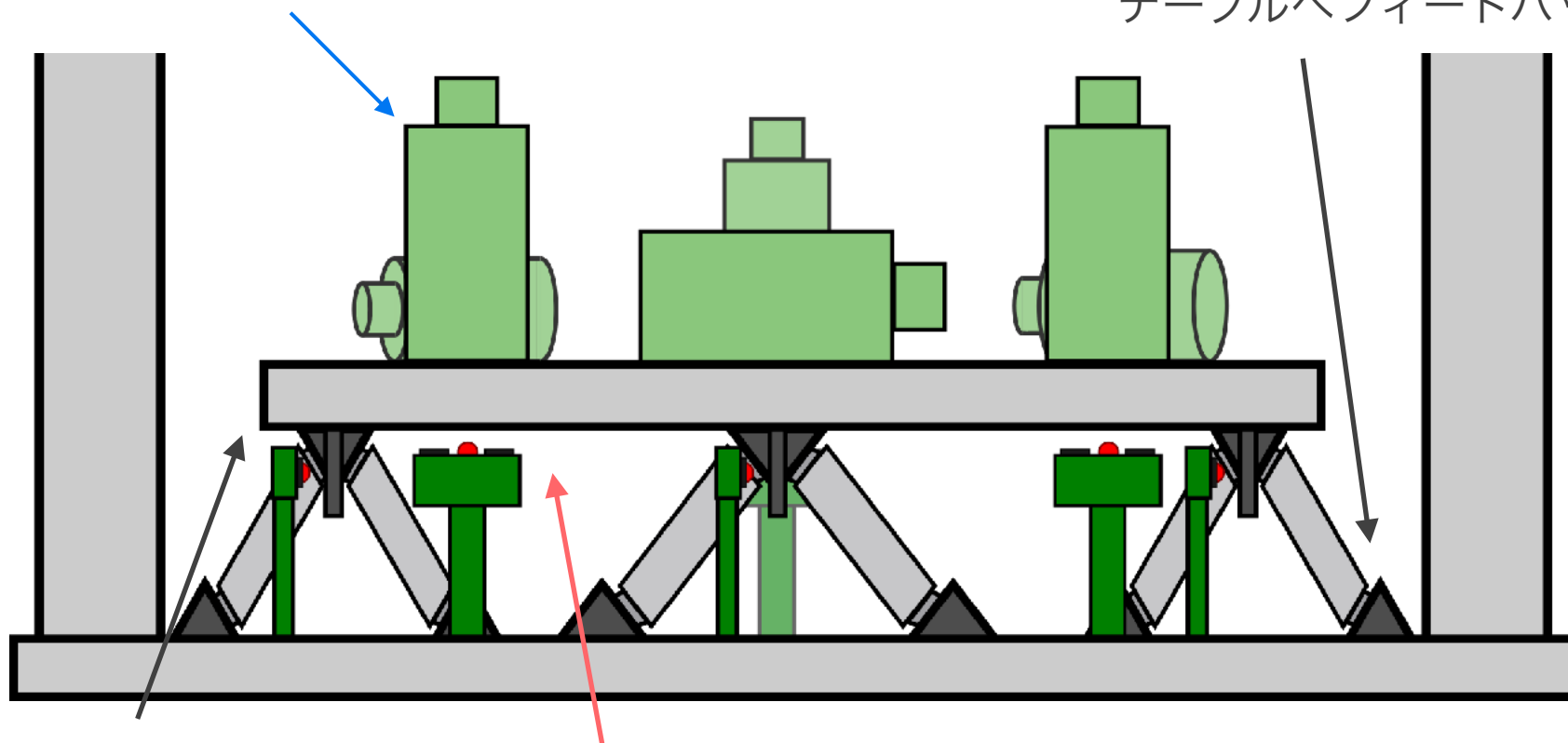
断熱ロッド

→冷凍機から導入される振動の低減

# 能動防振系の構成

地震計：テーブルの慣性系での変位を測定  
高周波(> 0.03 Hz)における制御

ピエゾアクチュエータ：  
フォトセンサーからの信号を  
テーブルへフィードバック

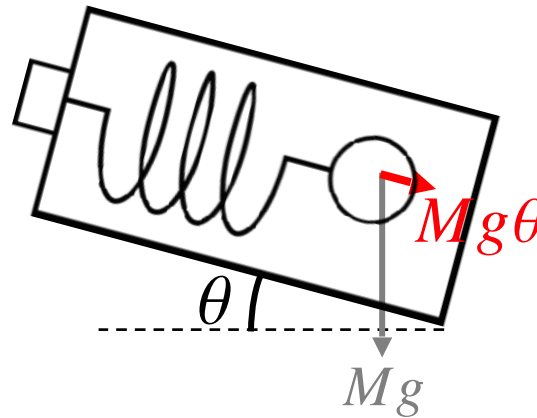
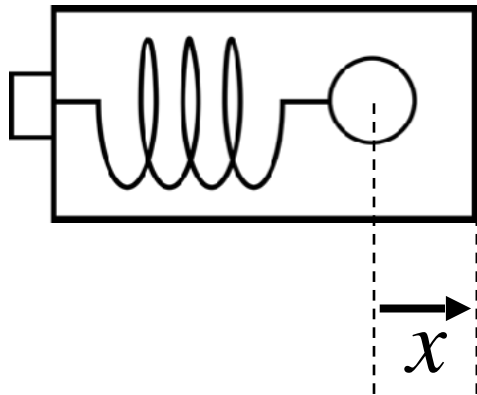


懸架テーブル：  
制御対象

フォトセンサー：テーブルとフレームの相対変位を測定  
低周波(< 0.03 Hz)における制御

# 傾斜カップリング

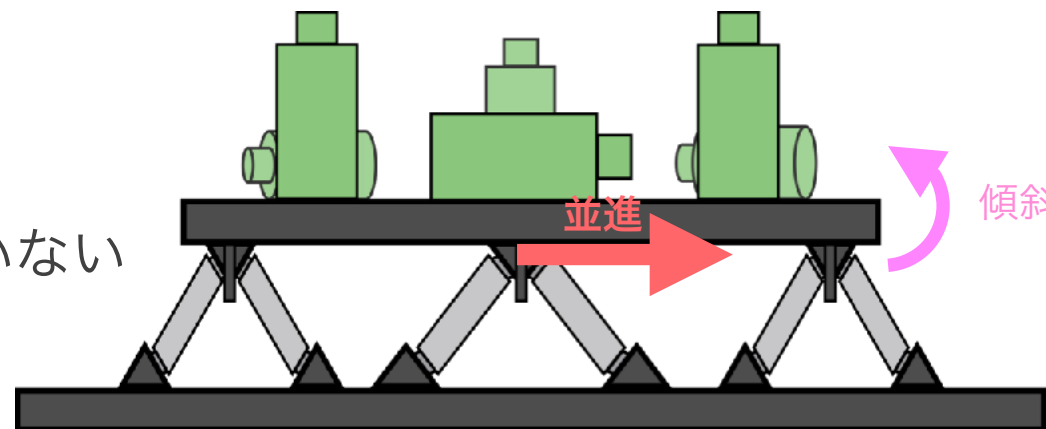
- 一般に慣性センサーは並進だけでなく傾き変動にも感度を持つ



$$M\ddot{x} = Mg\theta$$

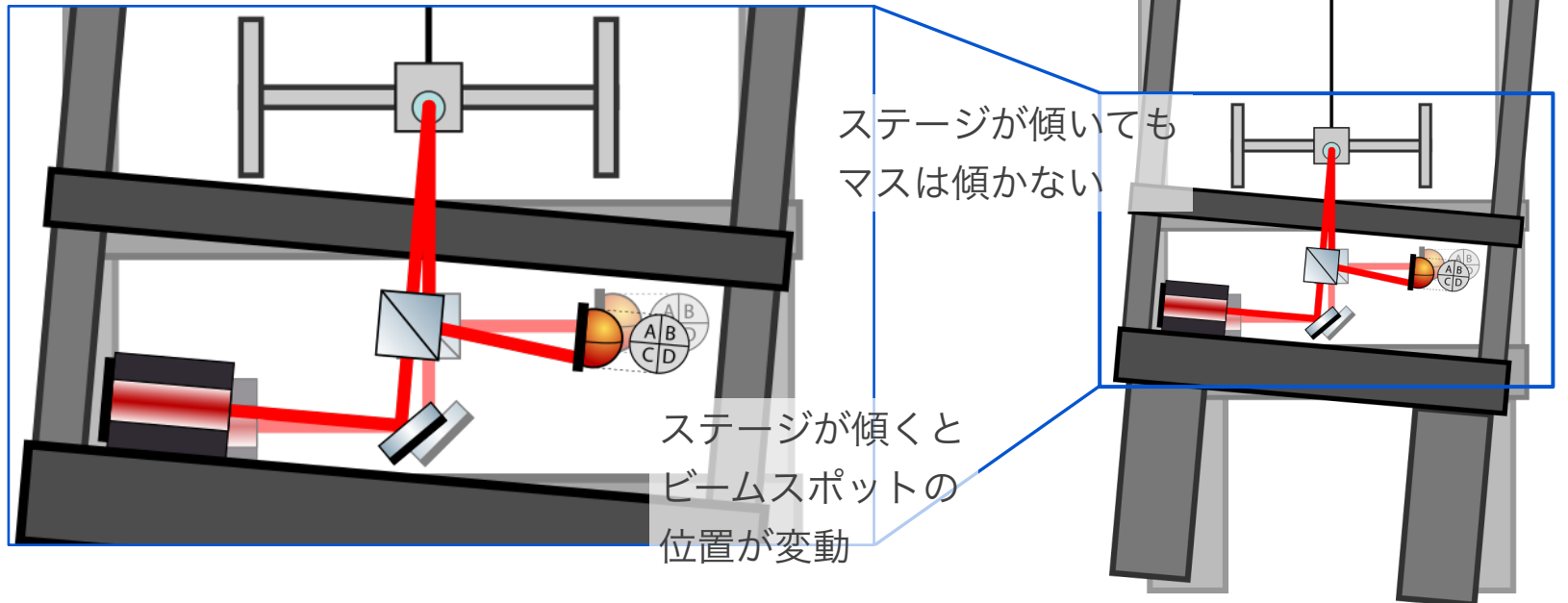
$$\tilde{x} = -\frac{g}{\omega^2}\tilde{\theta}$$

- ▶ 低周波ほど傾き変動の影響が大きい
- アクチュエーターの傾斜カップリング
  - ▶ 並進に揺らすと同時に傾斜方向にも加振
  - ▶ 低周波では並進を読めていない
  - ▶ 対角化 or 傾斜計の利用

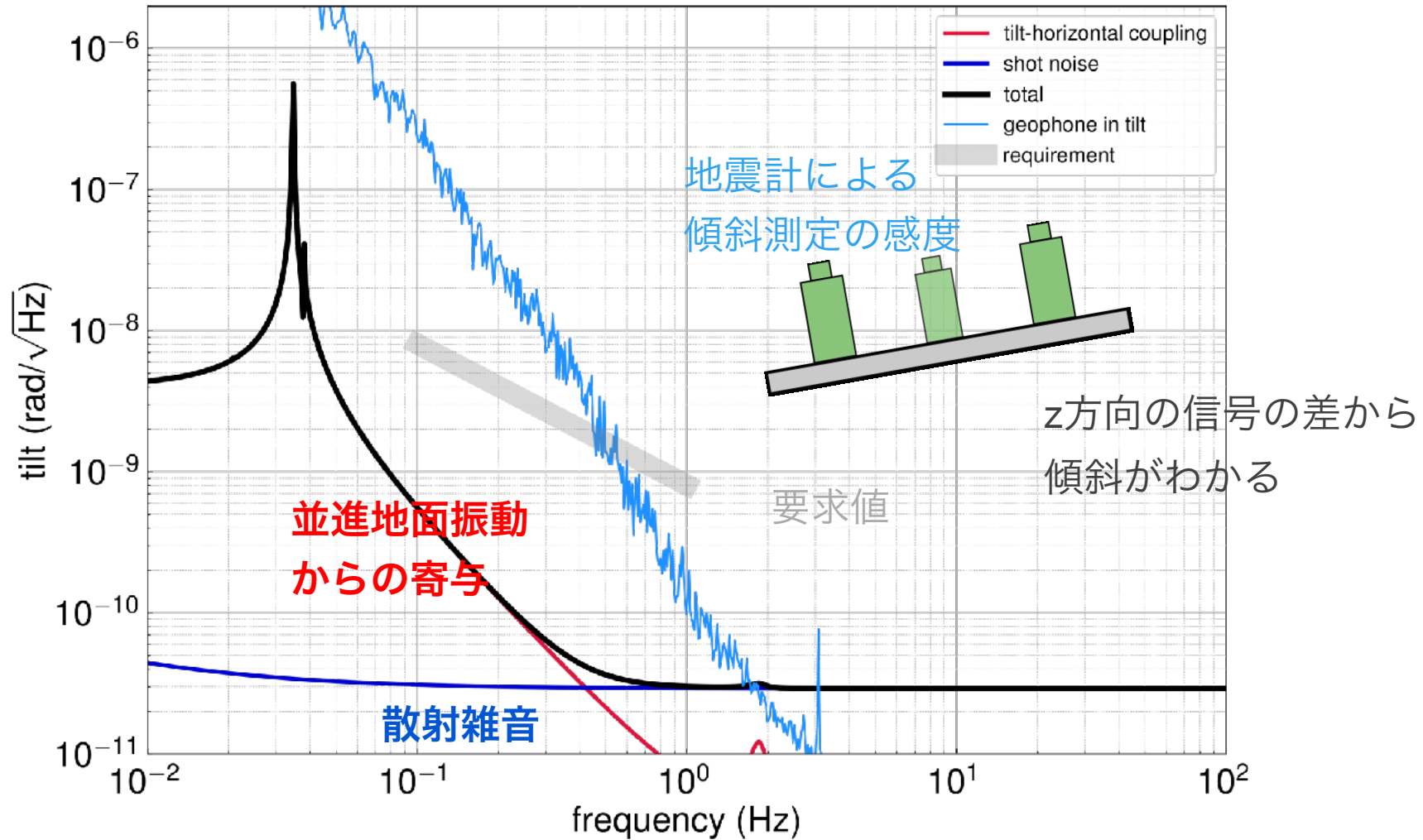


# 傾斜測定の実理

- 懸架点が傾いても振り子の傾きは変化しない
  - ▶ 懸架したマスとテーブルに固定された光学系の相対傾きから、テーブルの慣性系からの傾き変動を読み取る
- 読み取り光学系
  - ▶ 光てこを用いた角度読み取り

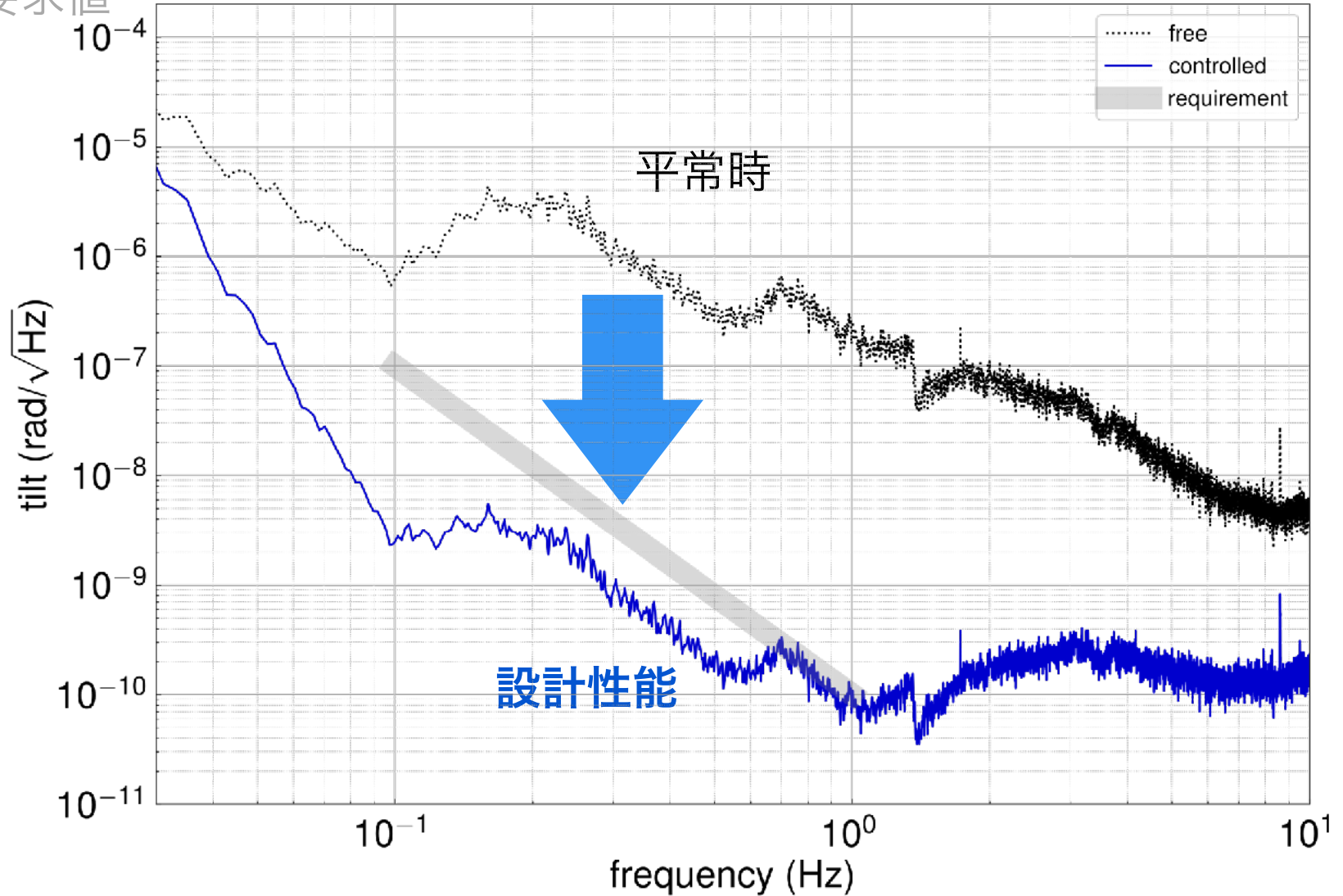


# 傾斜計の目標感度

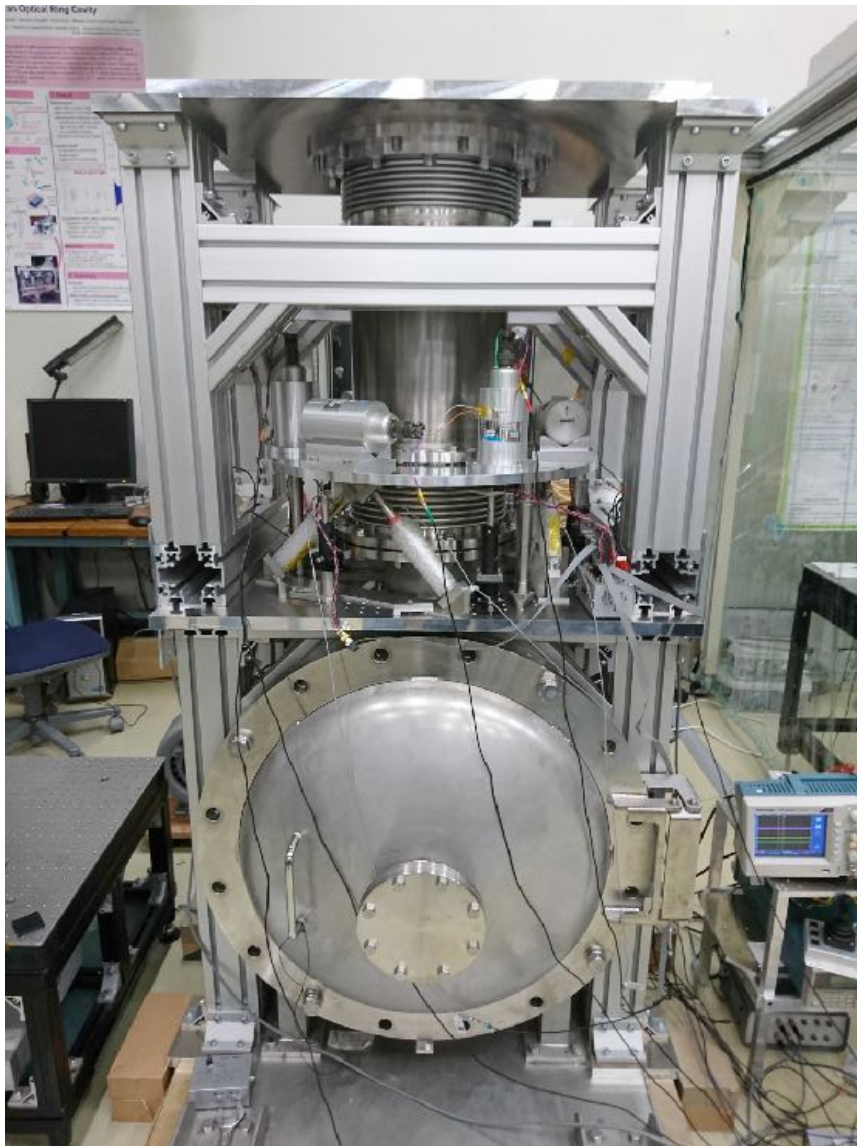


# 設計性能

要求値



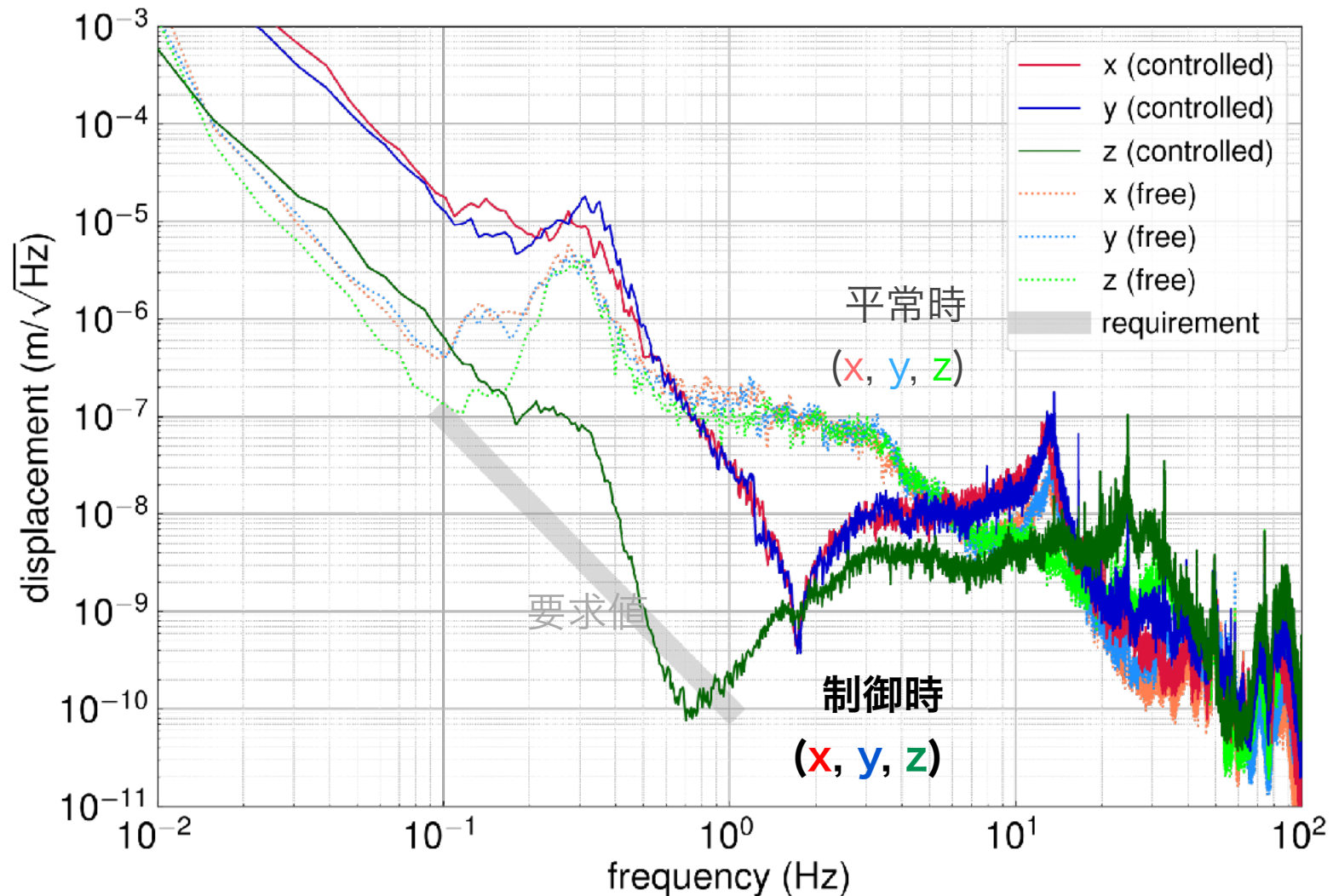
# 防振性能試験



同様の寸法だが、冷凍機の付いてい  
はなし、AVITのみ

# 現在の防振性能

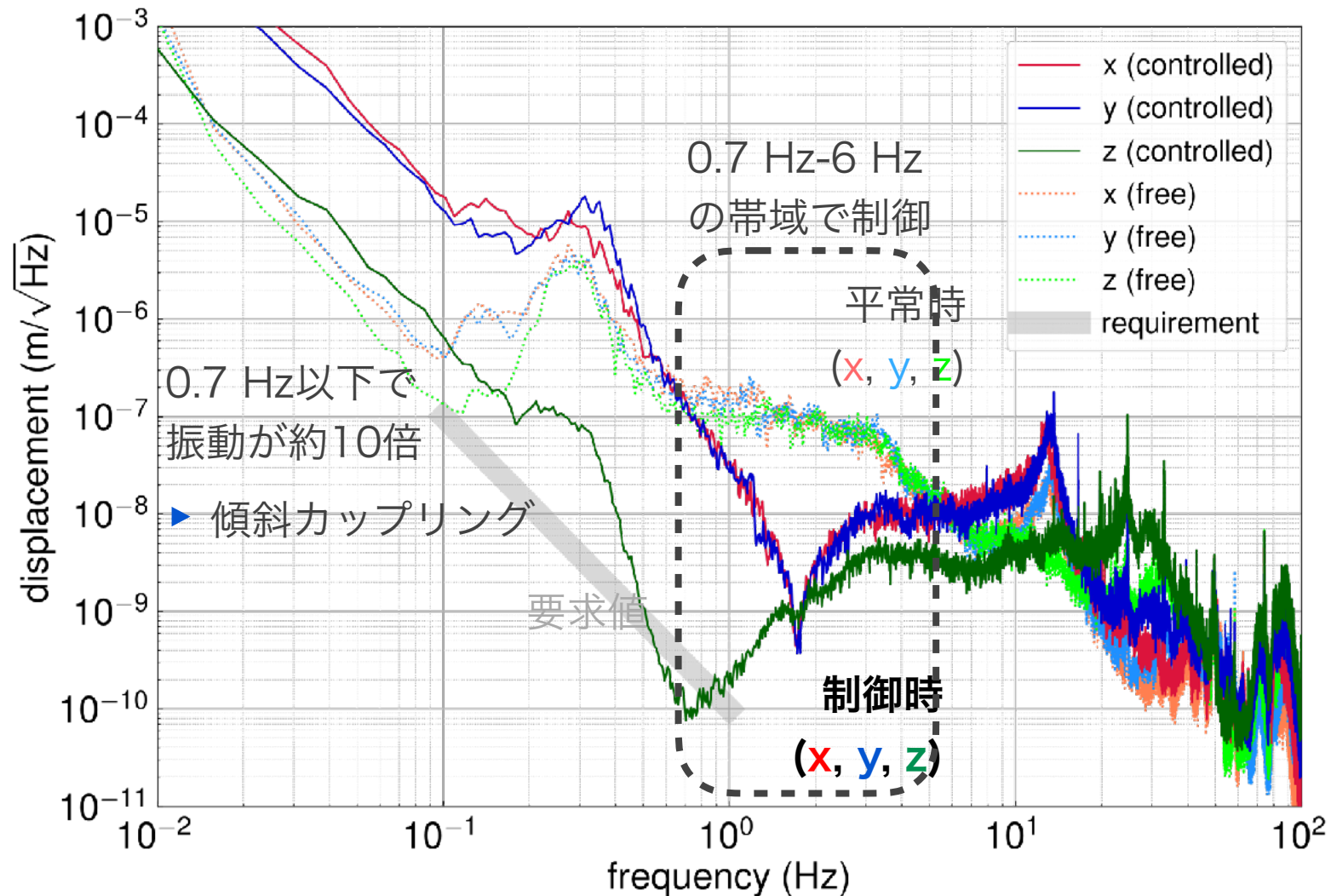
- **x, y, z**軸の3軸同時制御に成功





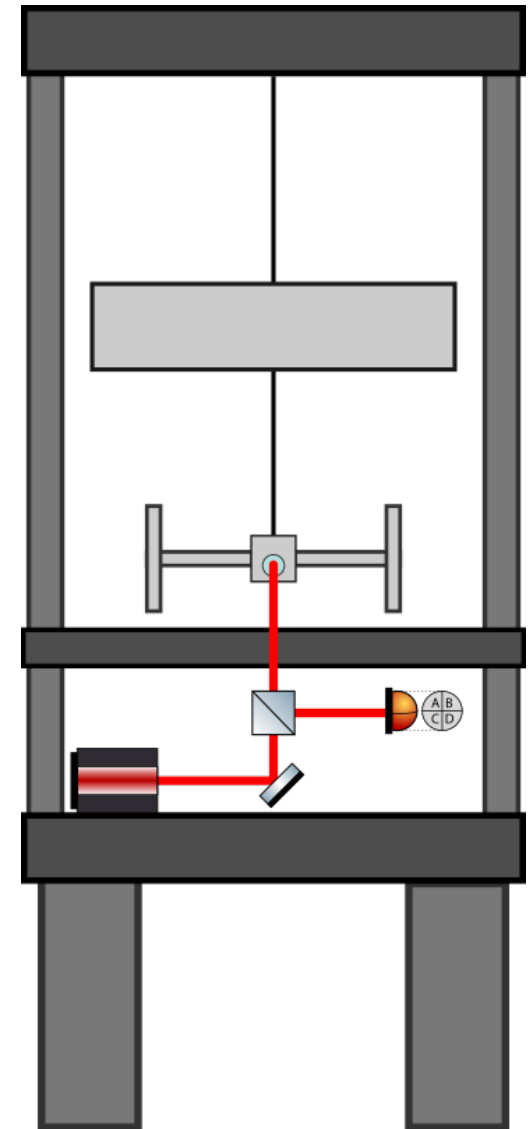
# 現在の防振性能

- **x**, **y**, **z**軸の3軸同時制御に成功



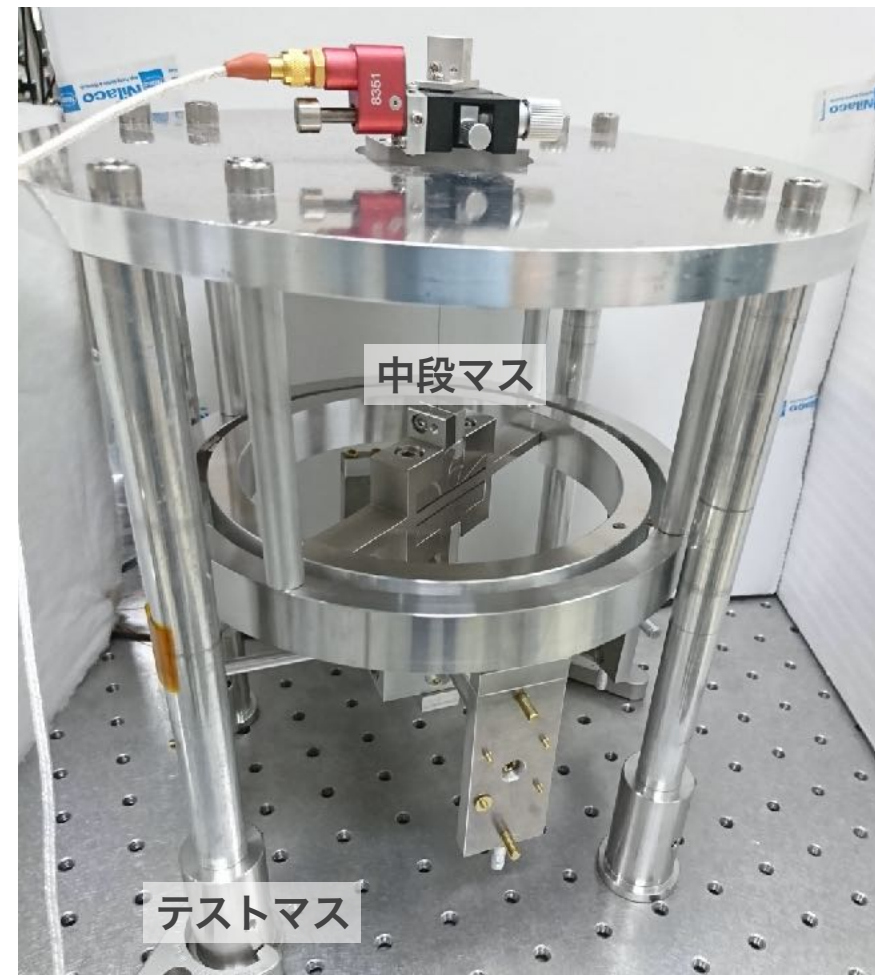
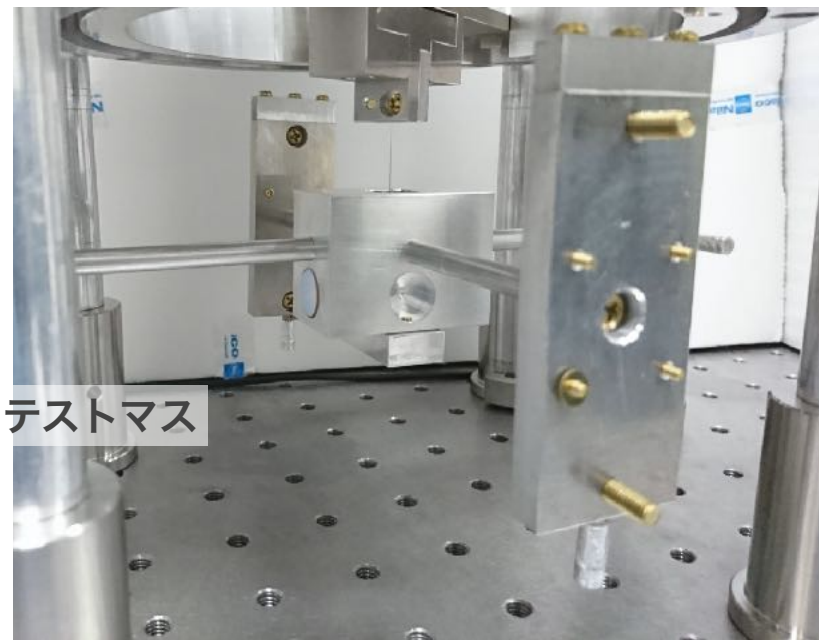
# 傾斜計の開発

- 2段振り子懸架系
  - ▶ マスの重心位置の調整による  
並進-傾きカップリングの低減
- 読み取り光学系
  - ▶ 光てこを用いた角度読み取り



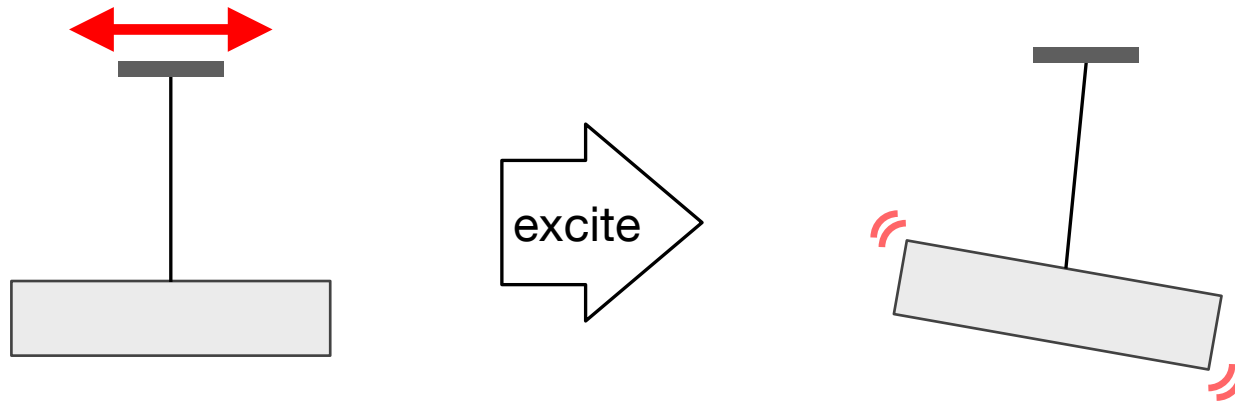
# 傾斜計の開発

- 2段振り子懸架系
  - ▶ マスの重心位置の調整による  
並進-傾きカップリングの低減
- 読み取り光学系
  - ▶ 光てこを用いた角度読み取り



# 地面振動からの寄与

- 並進地面振動が傾き変動を励起

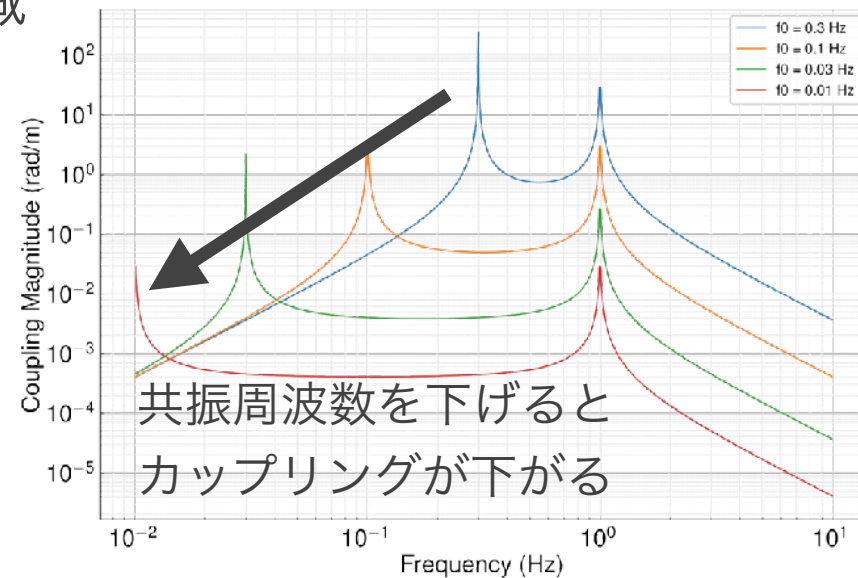


- マスの重心位置の調整により低減

$$C \simeq \frac{f_0^2}{g} \propto \Delta z$$

$\Delta z$ : 重心と懸架点の距離

- 設計値: 0.03 Hz ( $C \sim 4 \times 10^{-3}$ )



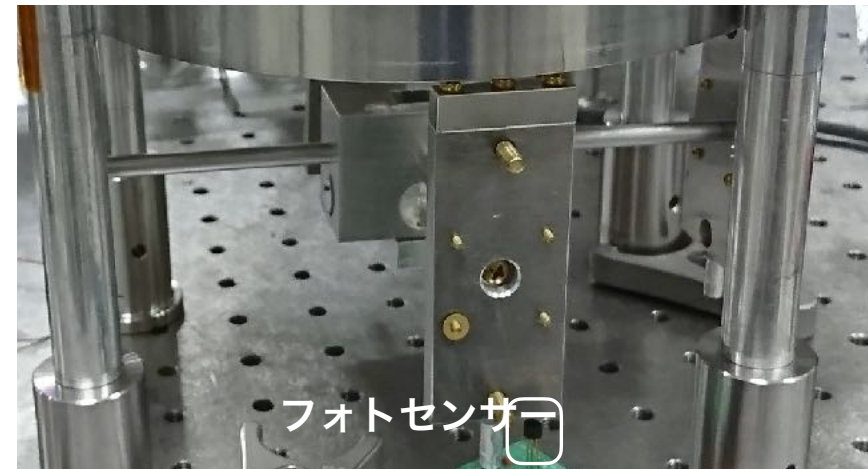
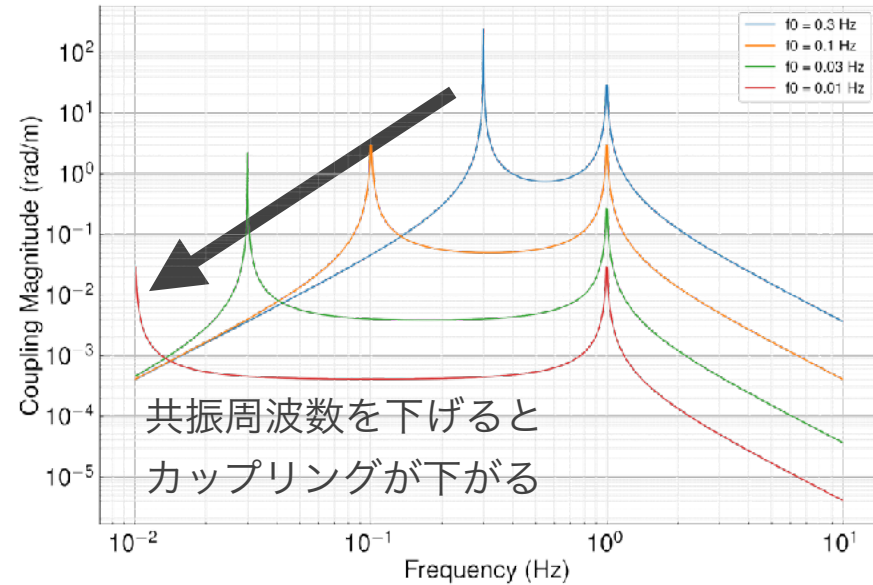
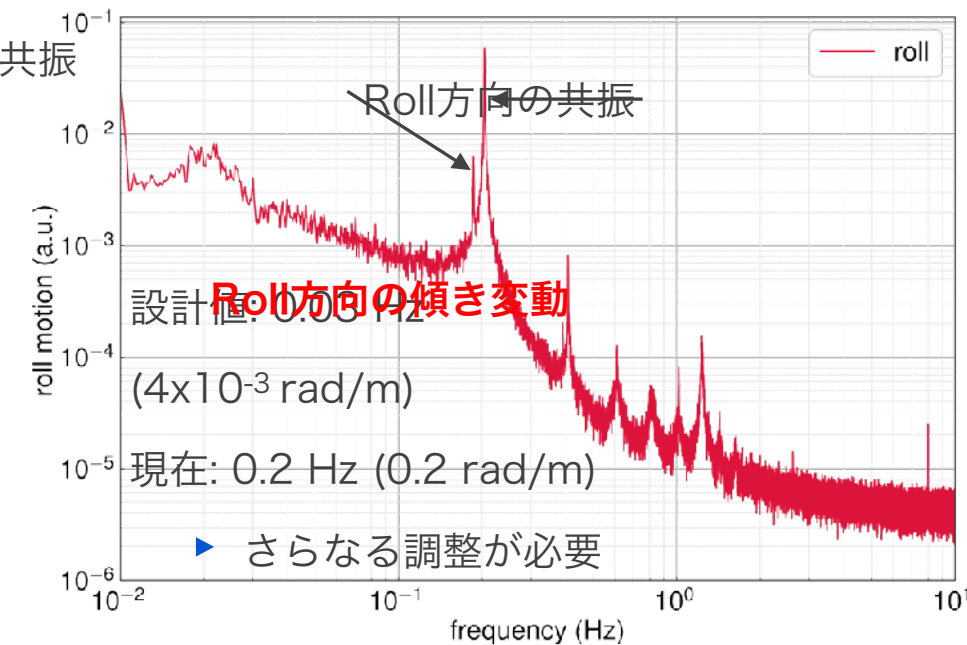
# 重心位置調整

- 並進地面振動が傾き変動を励起

- ▶ マスの重心位置の調整による  
並進-傾きカップリングの低減

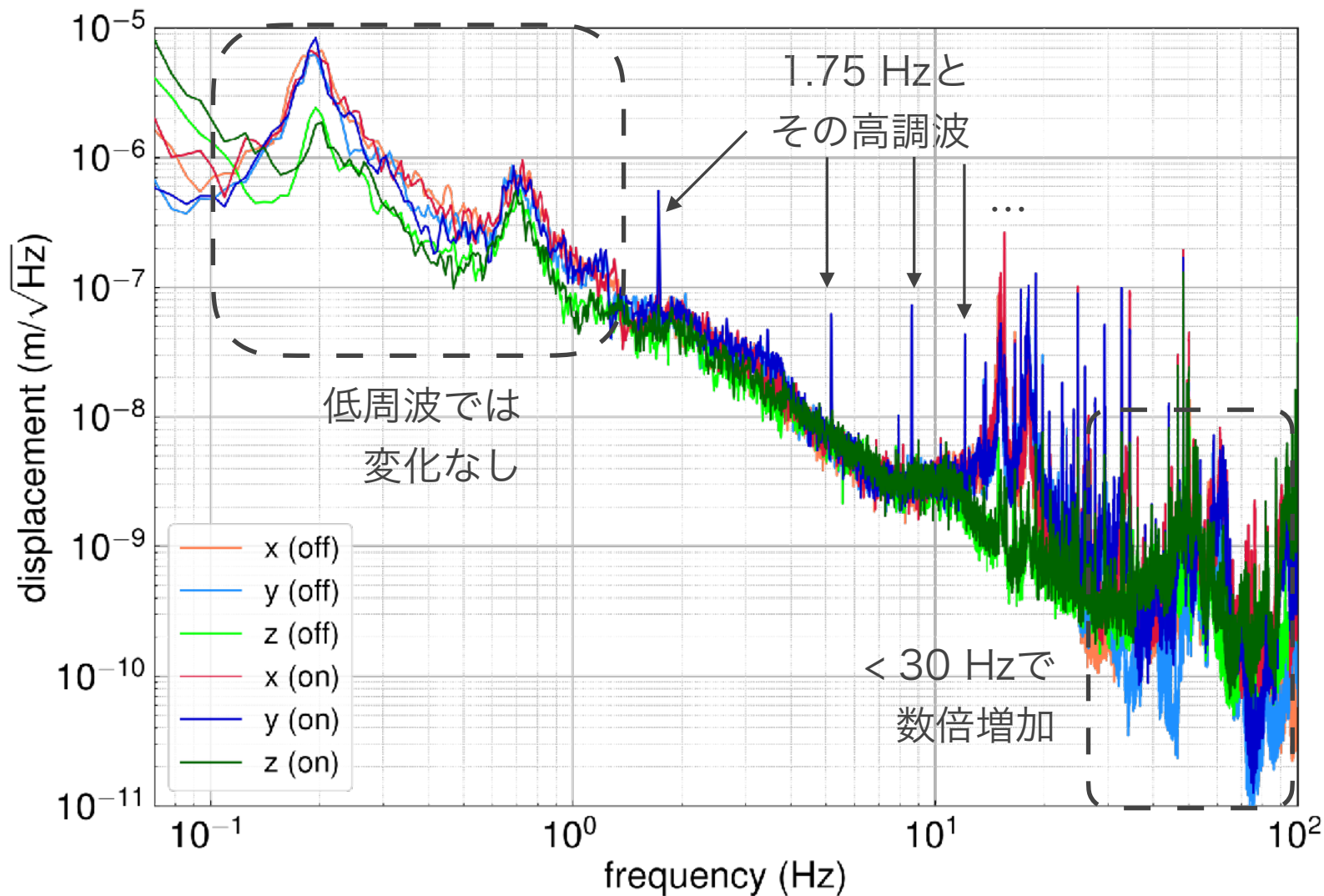
$$C \simeq \frac{f_0^2}{g} \propto \Delta z$$

$\Delta z$ : 重心と懸架点の距離



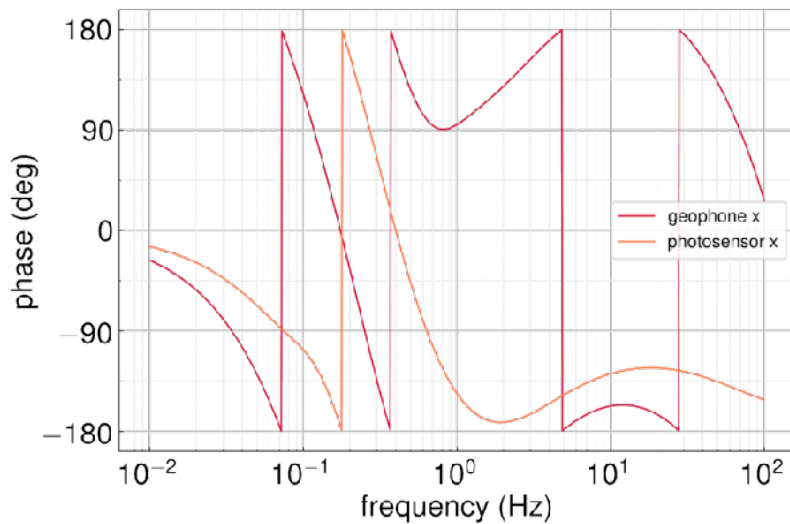
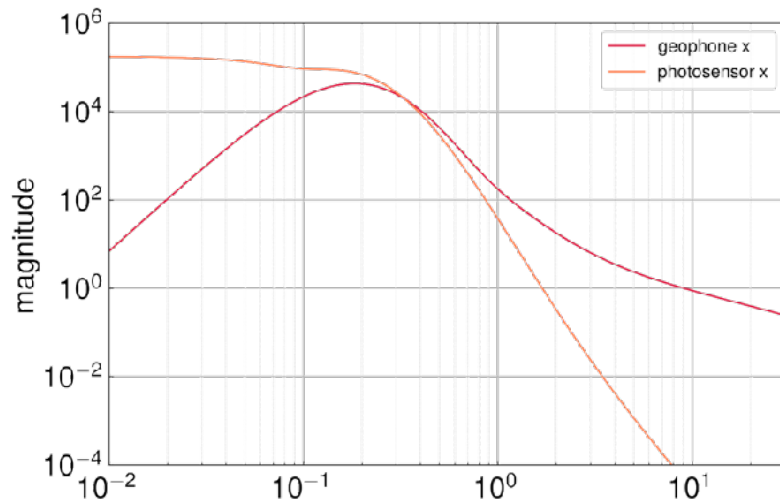


# 冷凍機による地面振動の導入

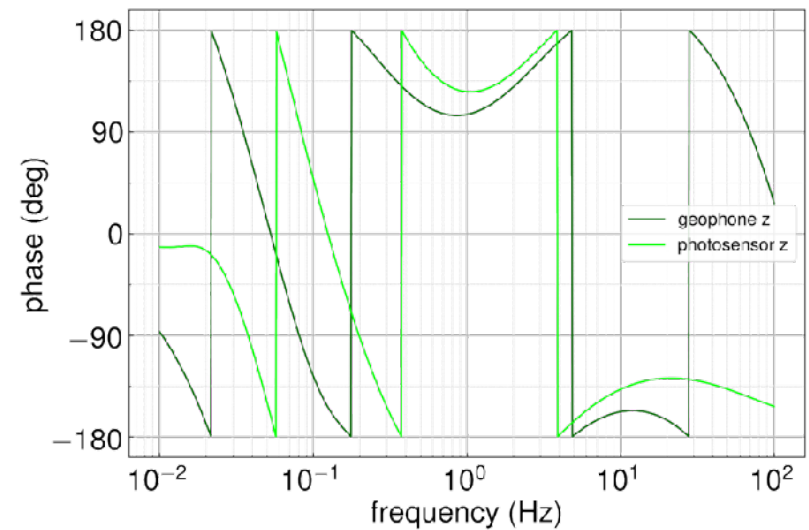
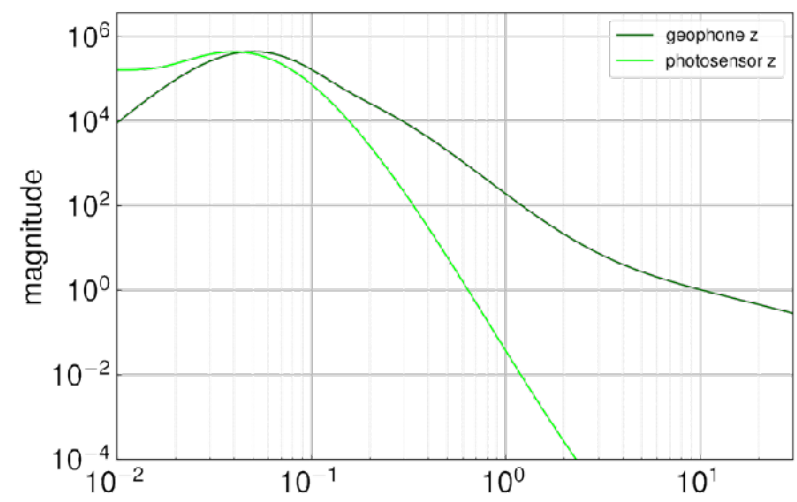


冷凍機off(x, y, z), on(x, y, z)の場合の地面振動

# 制御系



x軸のオープンループ伝達関数(yも同様)



z軸のオープンループ伝達関数



# 傾斜カップリングの低減

- 水平方向と同時に傾斜方向にも揺らすことで打ち消す
  - ▶ 1/10 以下にまで低減
  - ▶ x軸は安定した制御に成功, y軸は未だ不安定
  - ▶ さらなる低減, もしくは傾斜計による傾き制御

エータから地震計への応答の振幅と位相(低減前後)

