

# ねじれ振り子型重力波望遠鏡

## TOBAの開発(24):

### 低温ねじれ振り子の運転および改良計画

---

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，低温懸架系を開発中
- 4 Kにおける運転に成功
- 迷光，ビームジッター，磁場雑音が支配的
- これらの問題を解決するプロトタイプの設計



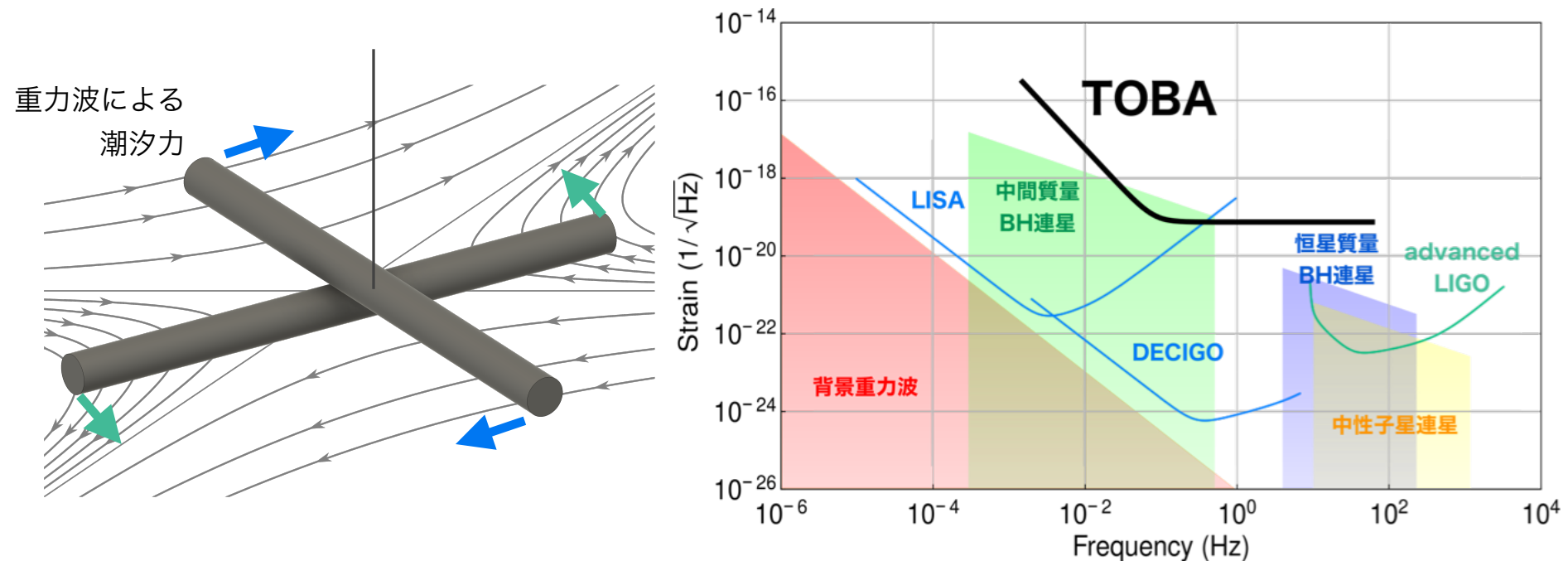
# Contents

- TOBAについて
  - ▶ Overview
  - ▶ Phase-III TOBA
- 低温懸架系の現状
- 改良案
- 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  $h \sim 10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$

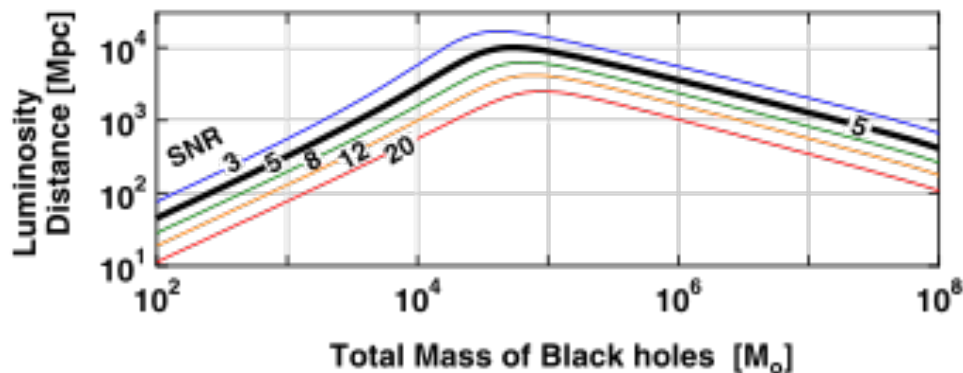


# TOBAのサイエンス

## 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



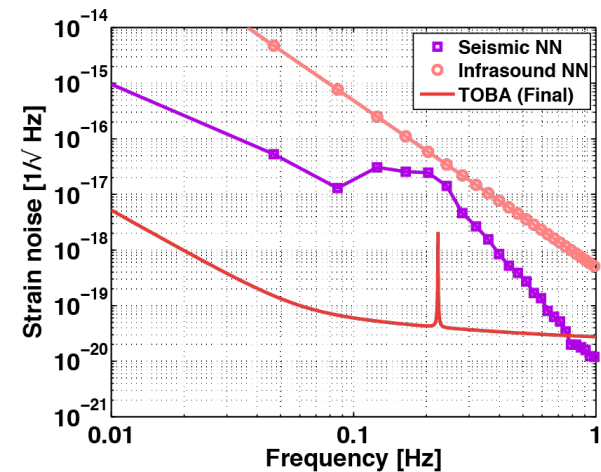
M. Ando et al., PRL, 105, 161101(2010)

- 背景重力波探査
  - ▶ 初期宇宙の直接探査

## 地球物理学的応用

= 重力偏差計としての活用

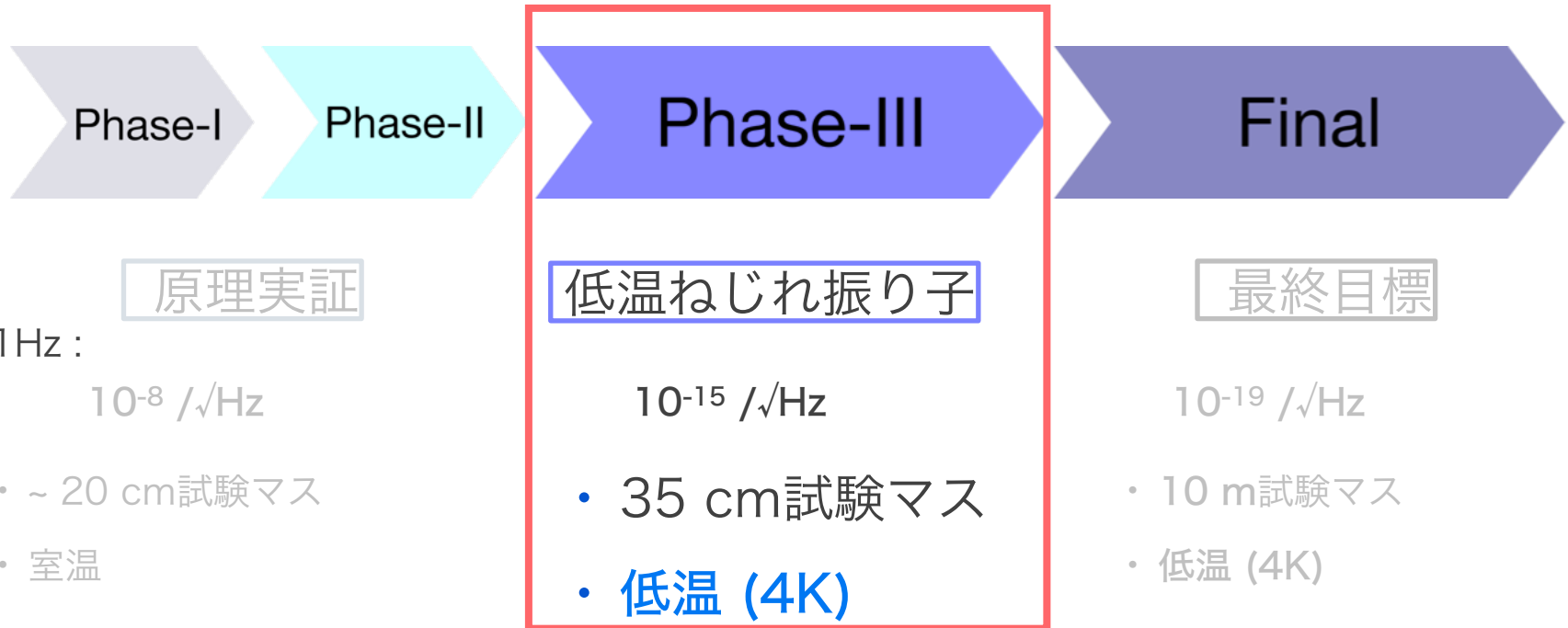
- Newtonian Noise
  - ▶ モデル検証
  - ▶ 第3世代レーザー干渉計のR&D



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

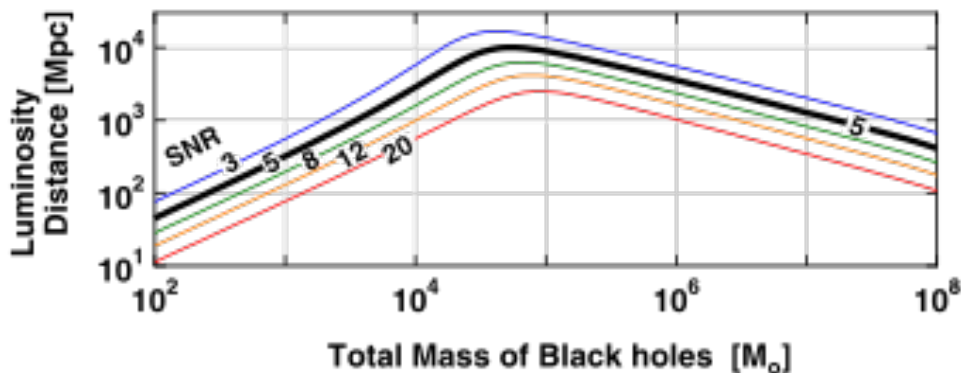
- 低温ねじれ振り子の実証
- 障害となる雑音源の特定と低減

# 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



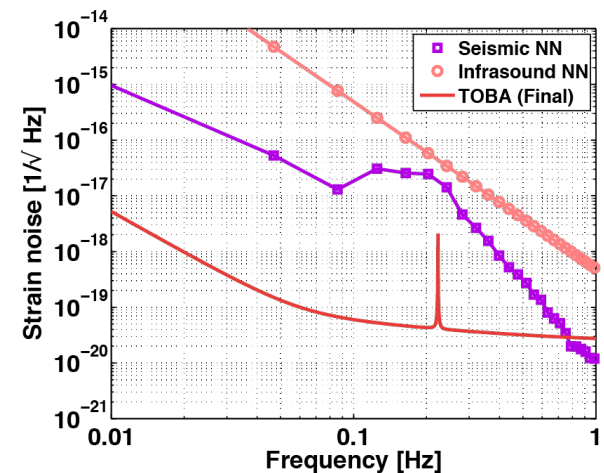
M. Ando et al., PRL, 105, 161101(2010)

- 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

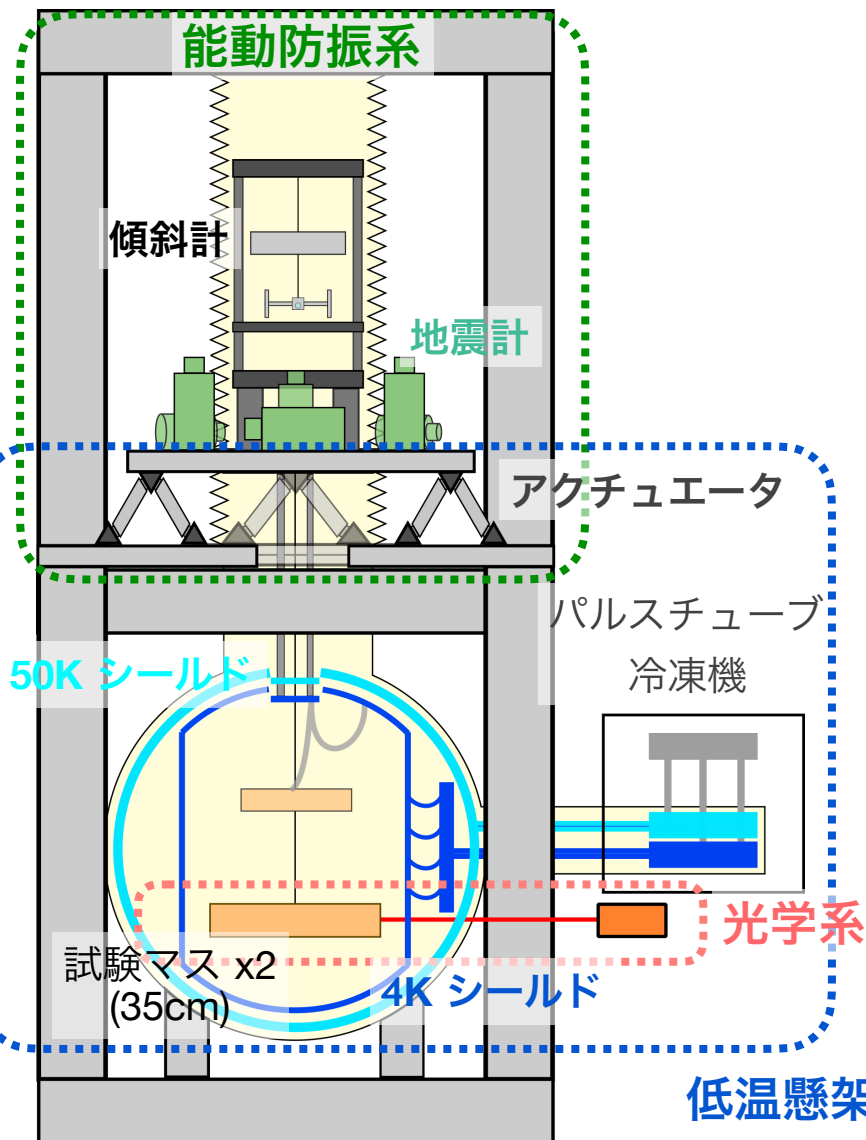
- Newtonian Noise
  - ▶ モデル検証, 低減実証



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

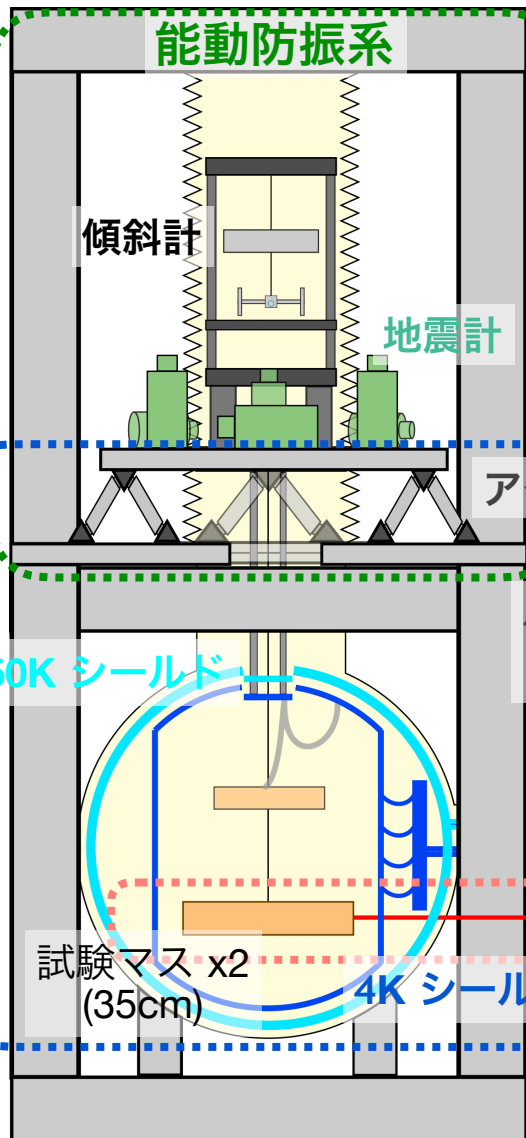
# Phase-III TOBAの構成



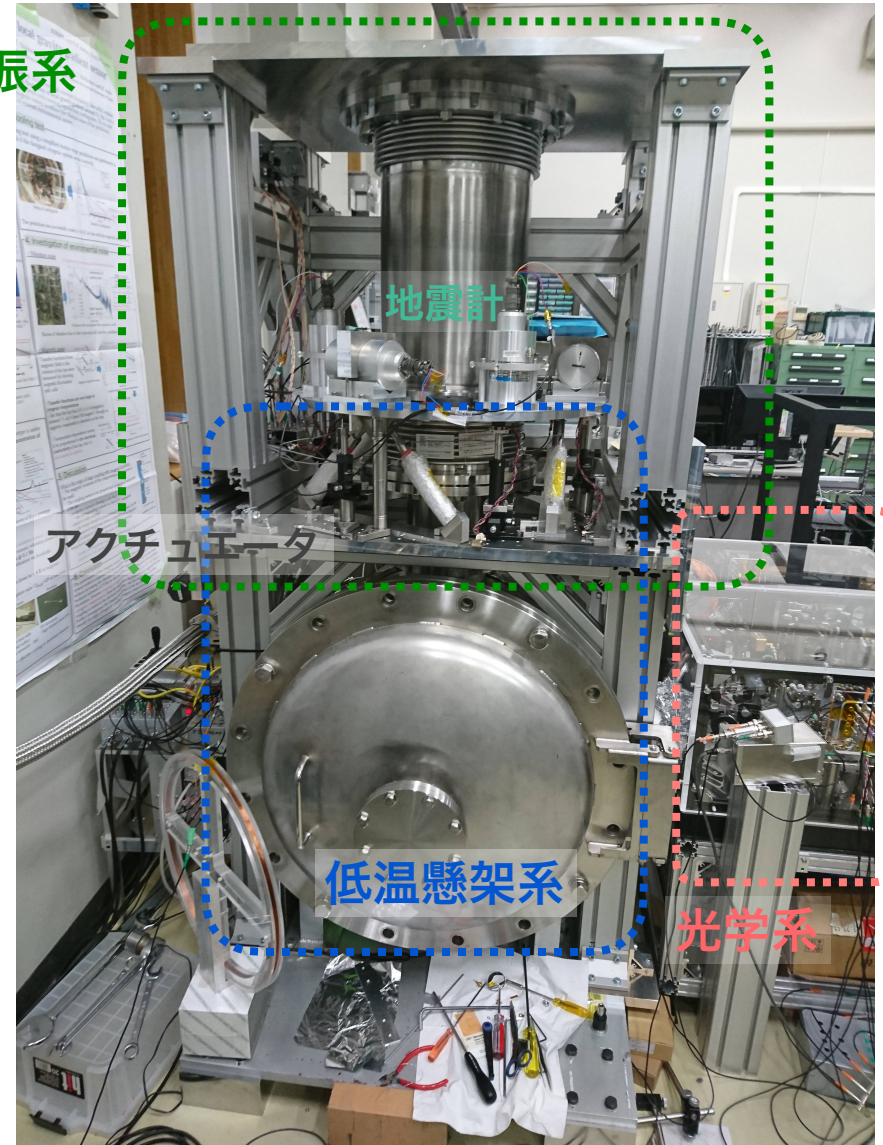
低温系でのねじれ振り子の実証

- 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



能動防振系



地震計

アクチュエータ

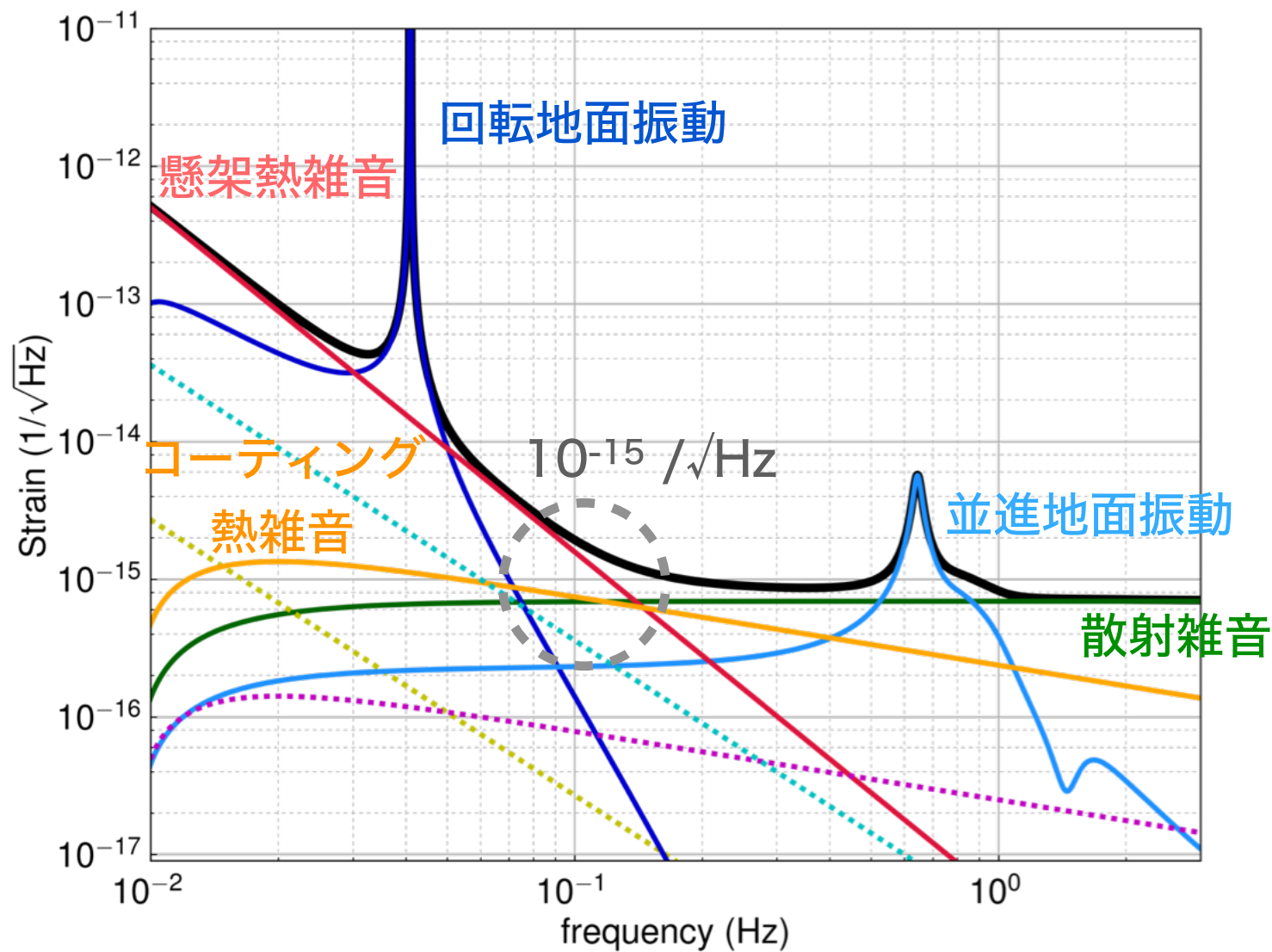
低温懸架系

光学系

低温懸架系



# 目標感度





# 目標感度のための課題

## ・ 低温懸架系

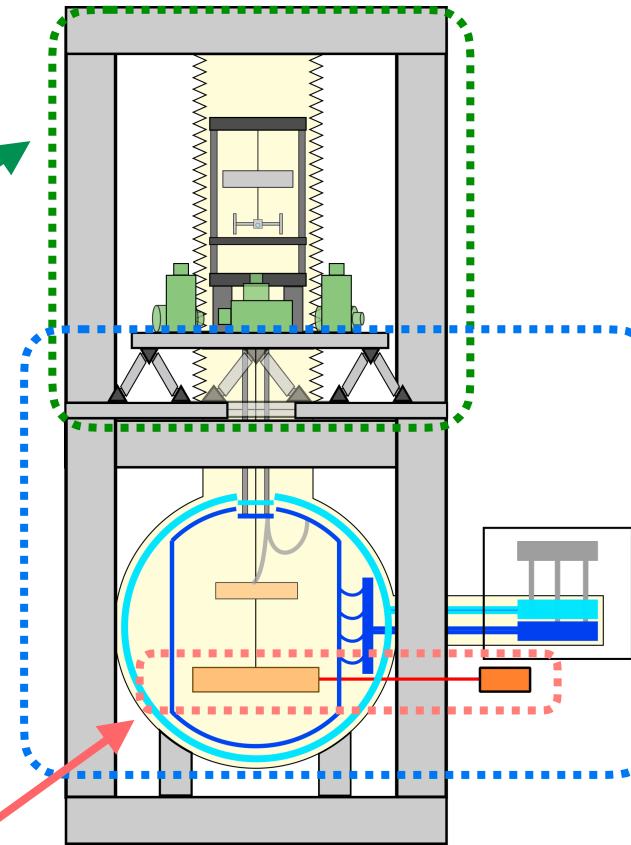
- ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却
- ▶ Q値: 4 Kで $Q = 10^8$

## ・ 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



# 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 → 本講演
- ▶ Q値: 4 Kで $Q = 10^8$  → Ooi氏 (20aT11-11)

## • 防振系

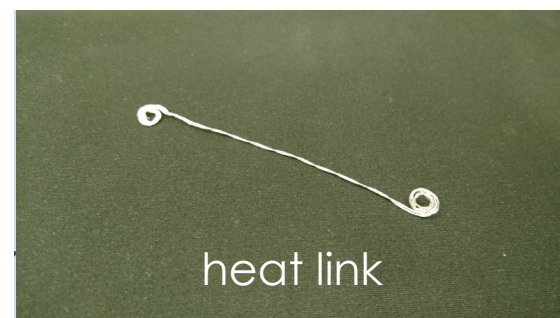
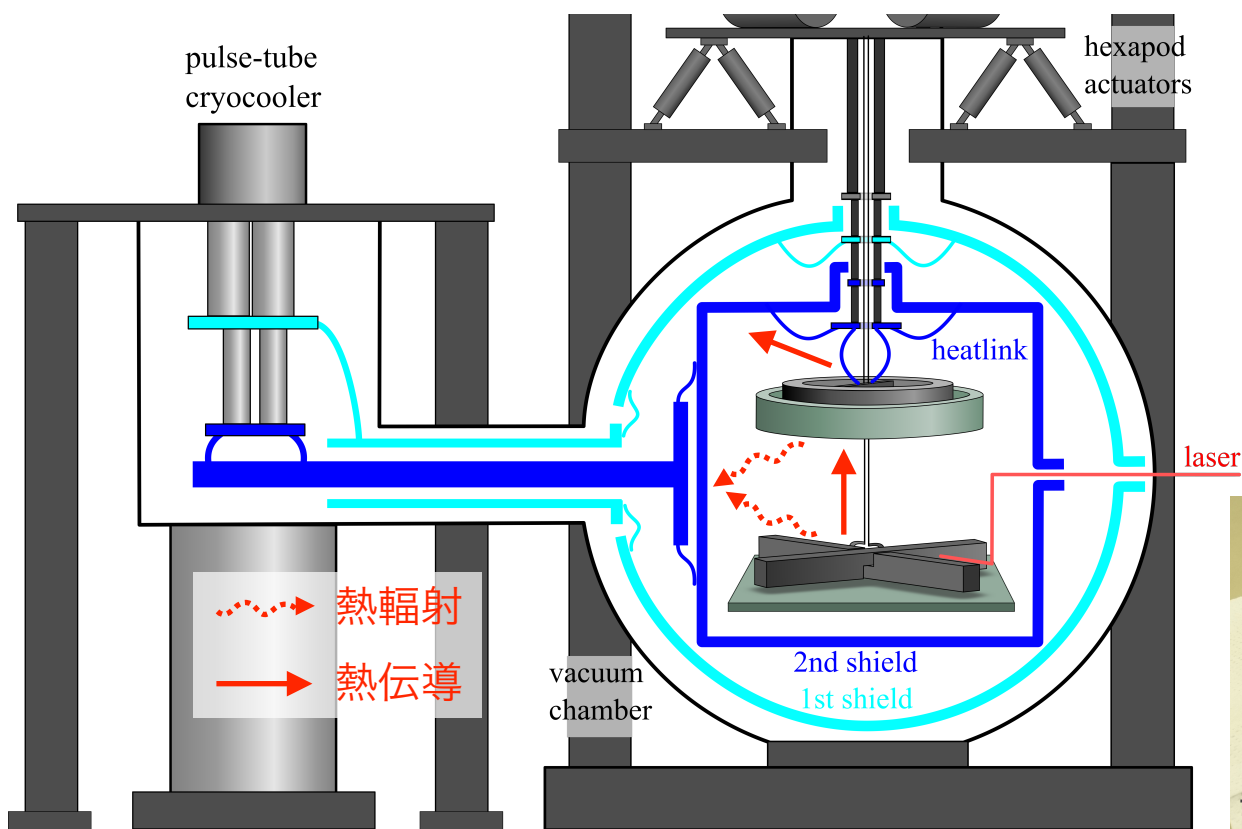
- ▶ 回転地面振動 ✓ 2段振り子+同相雑音除去
  - ▶ 並進とのカップリング ✓ 低減手法の開発
  - ▶ 並進地面振動:  $10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$
  - ▶ 冷凍機から導入される振動の低減
- 能動防振

## • 光学系

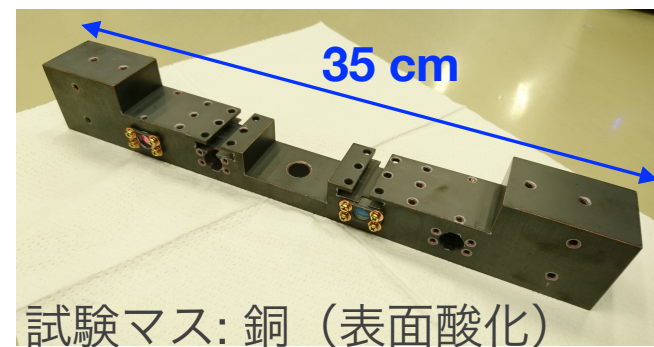
- ▶ Wave Front Sensorを応用した読み取り系 ✓ 原理実証済み

# 低温懸架系

- 熱雑音を下げるために4 Kまで冷却
- 低振動と両立させるために効果的に冷却
  - ▶ 熱輻射 (300 K - 100 K) と熱伝導(100 K - )



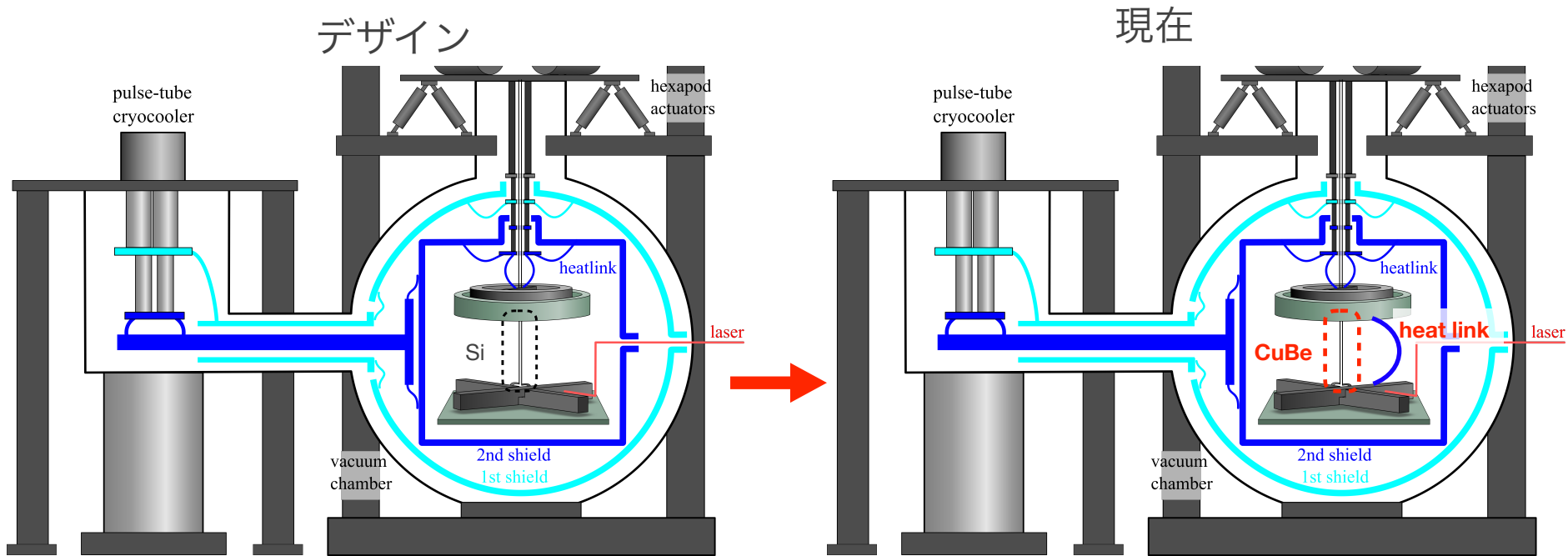
6N アルミ細線を  
より合わせたもの



# 冷却試験

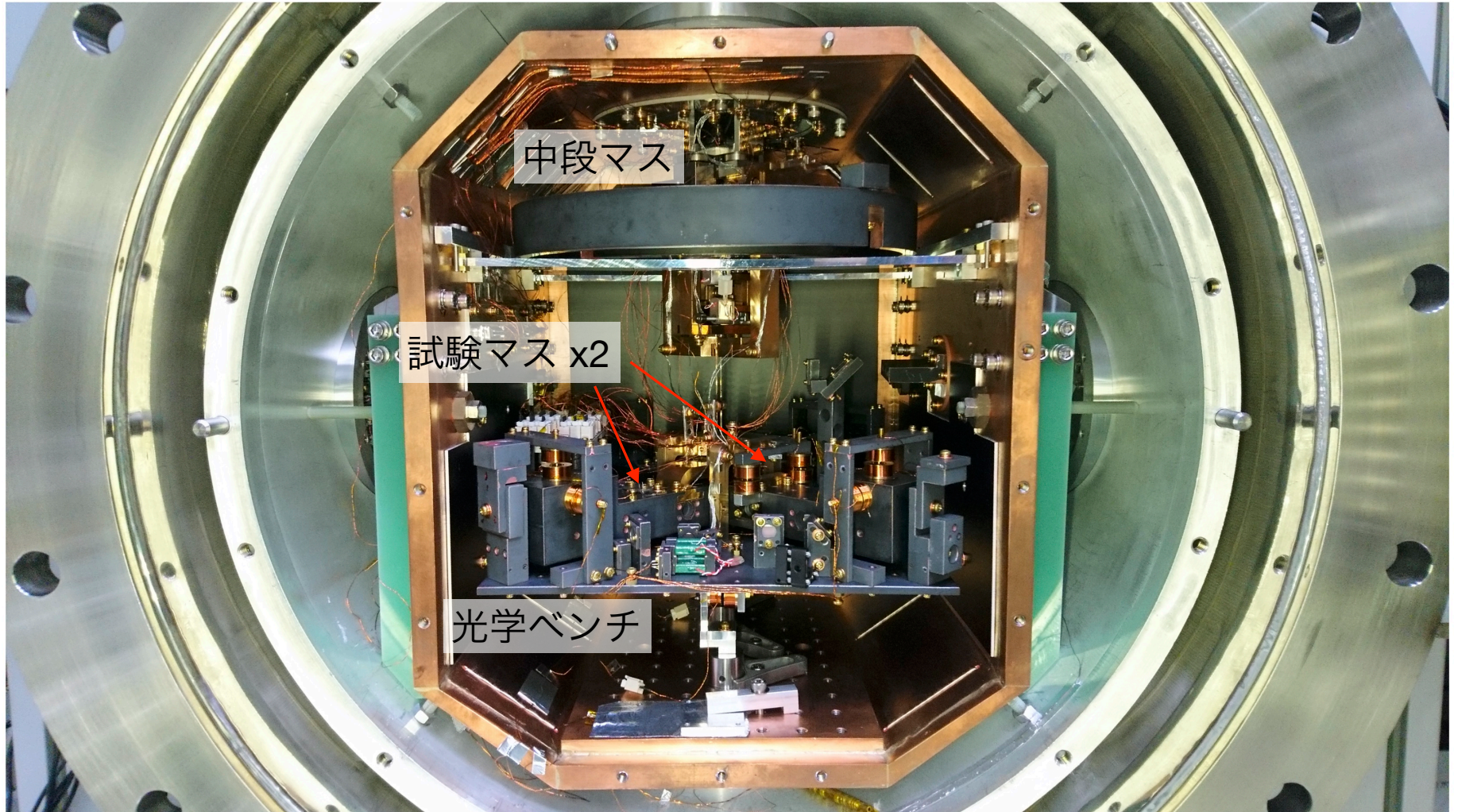
冷却系の動作確認&低温での雑音源特定のために  
やや簡素化したセットアップ

- シリコンファイバー → CuBeファイバー
- 中段マスー試験マス間にヒートリンク
- 角度読み取り光学系：光てこ



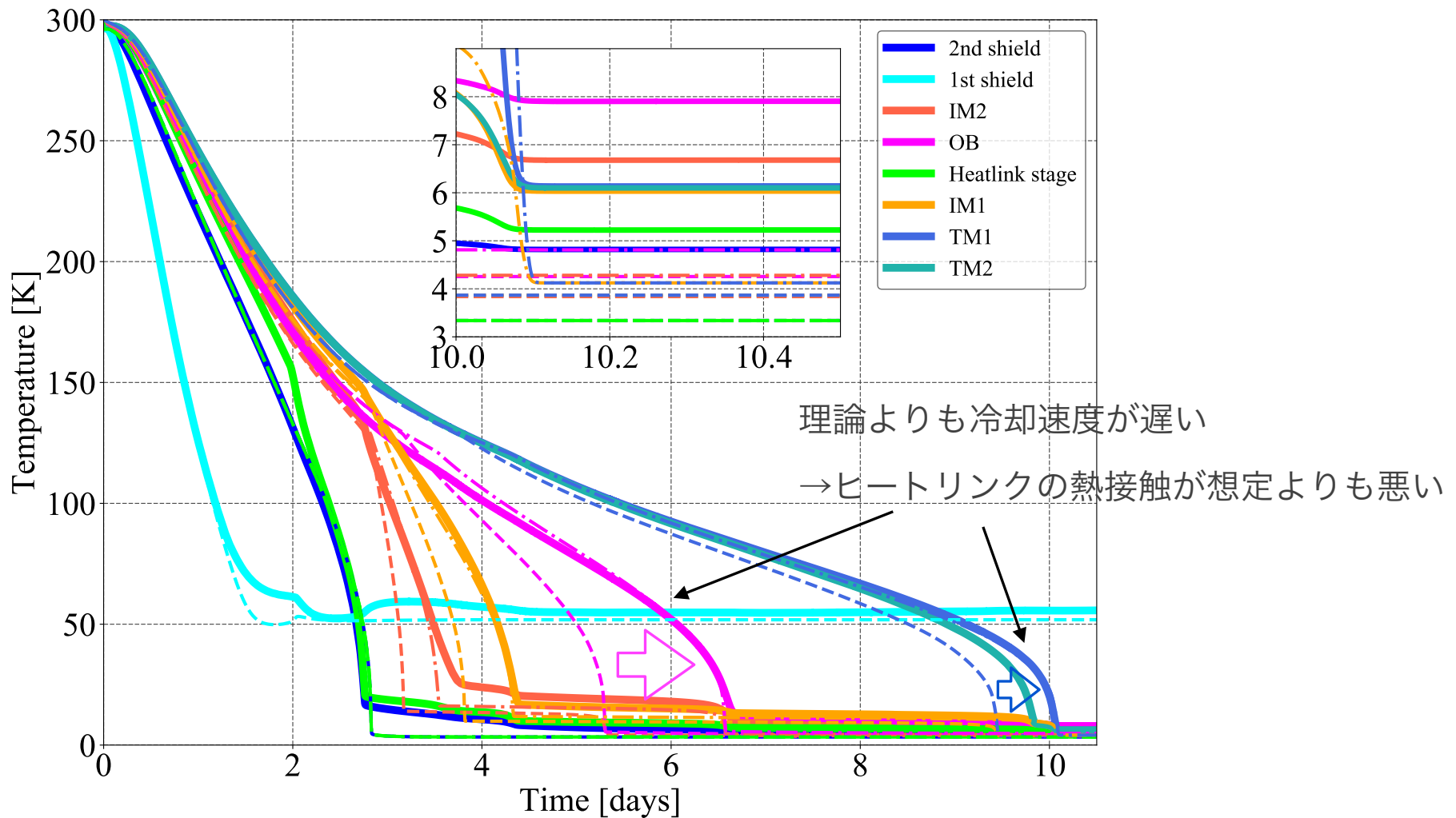


# セットアップ



# 冷却結果

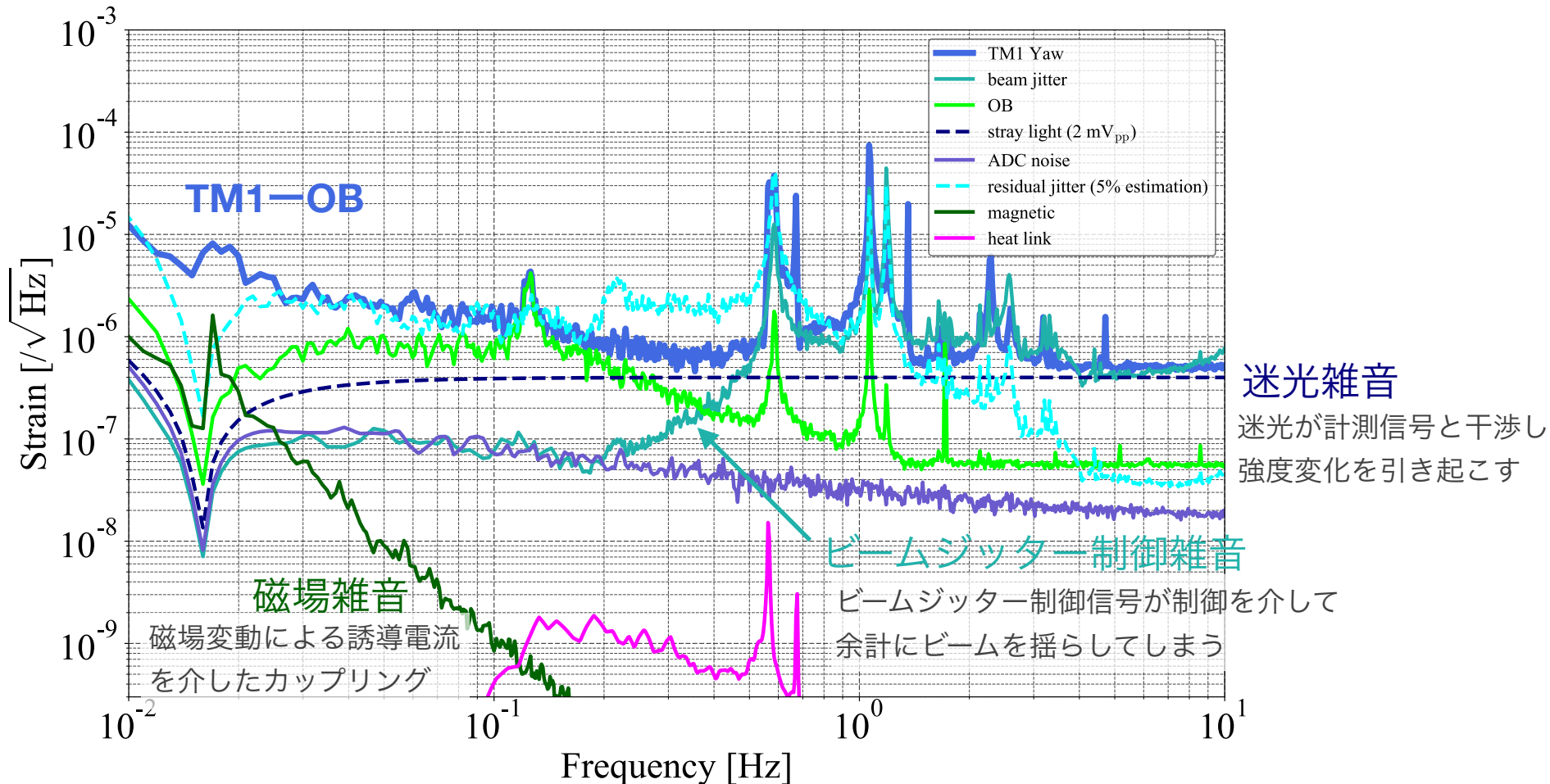
## 6.1 Kまでの冷却に成功 (4 Kの場合より1.2倍の熱雑音)





# 現在の感度

- ・ **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



# 現状のまとめ

- 低温懸架系
  - ▶ 冷却: 試験マスを6.1Kまで冷却
  - ▶ 懸架ファイバー: CuBeで  $Q \sim 10^3$
- 光学系
  - ▶ 光てこで読み取り
  - ▶ 迷光雑音
  - ▶ ビームジッター制御雑音
- その他
  - ▶ 環境磁場カップリング



# 現状のまとめ

## • 低温懸架系

- ▶ 冷却: 試験マスを6.1Kまで冷却      ✓ 概ね完了
- ▶ 懸架ファイバー: CuBeで  $Q \sim 10^3$  → 懸架ファイバーをシリコンに

## • 光学系

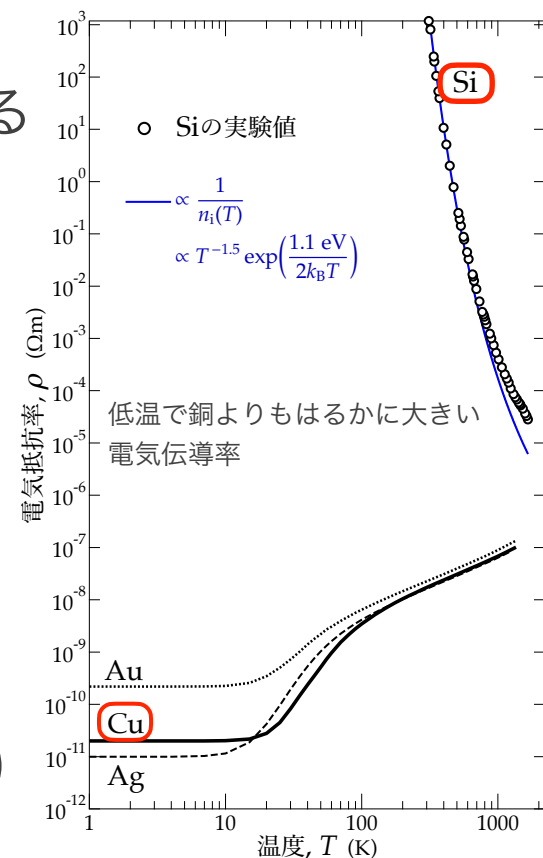
- ▶ 光てこで読み取り      → マイケルソン干渉計
- ▶ 迷光雑音      • 光ファイバーで真空槽へ導入
- ▶ ビームジッター制御雑音      → • モノリシック光学系

## • その他

- ▶ 環境磁場カップリング      → 試験マスをシリコンに

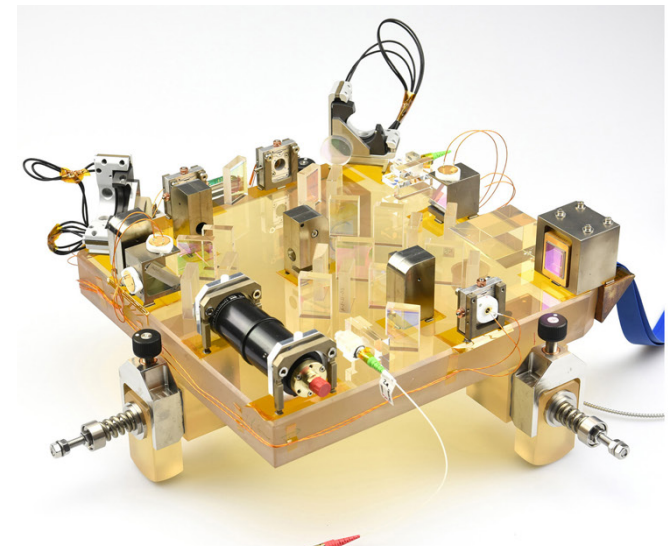
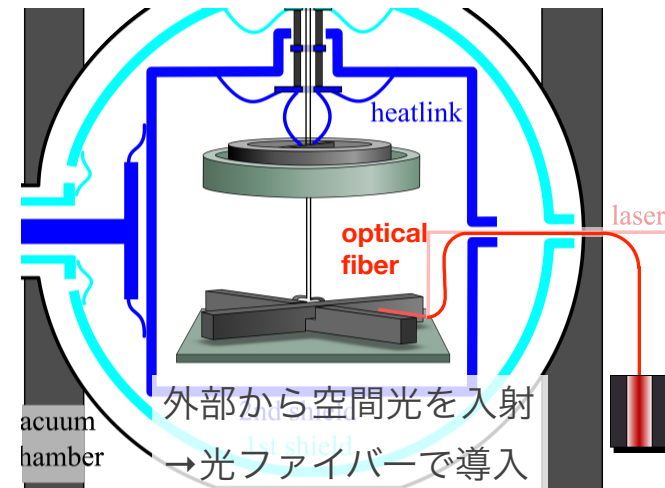
# シリコン懸架系

- 試験マス
  - ◎ 電気伝導率を下げることで誘導電流を減らす
    - ▶ 試験マスの材質を絶縁体・半導体に
    - ▶ 熱伝導, 機械損失の観点からシリコンを用いる
- シリコン懸架ファイバー
  - ◎ 熱伝導率の向上
    - ▶ ヒートリンクの本数の削減
  - ◎ 高いQ値
    - ▶ 現状の懸架ファイバー: CuBe,  $Q \sim 10^3$
    - ▶ シリコンに変更 →  $Q \sim 10^8$  (1/300の熱雑音)



# 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
  - ◎ 光てこ → マイケルソン干渉計
    - ▶ 読み取り感度の向上



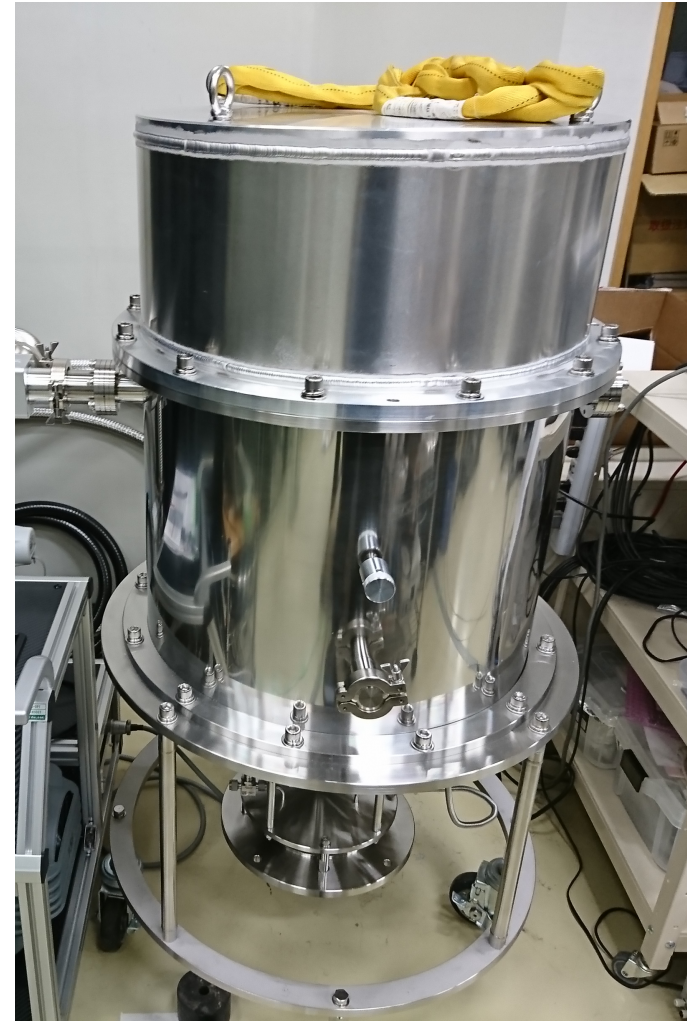
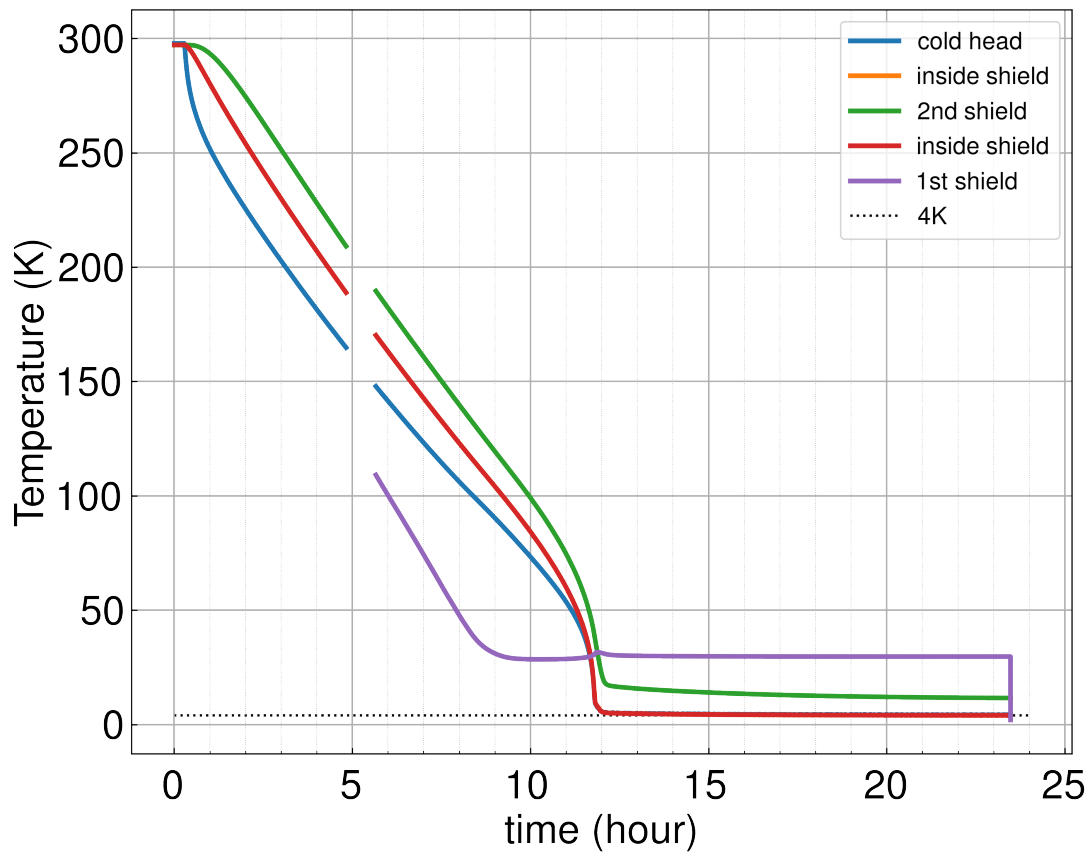
[Chwalla et. al. \(2016\)](#)

# 改良計画

- シリコン懸架系
  - ◎ 懸架ファイバーを発注, 懸架テスト予定
  - ◎ 試験マスは入手先を検討中
- 光学系
  - ◎ 光学系の発注, 設計
  - ◎ 低温に冷やした際のミスアラインメントの評価
- 低温試験を行う別の冷凍機が稼働
  - ▶ メインの懸架系と並行して測定を行う

# 新規冷凍機

- 今月初めに稼働
- 約12時間で4 Kまでの冷却を確認



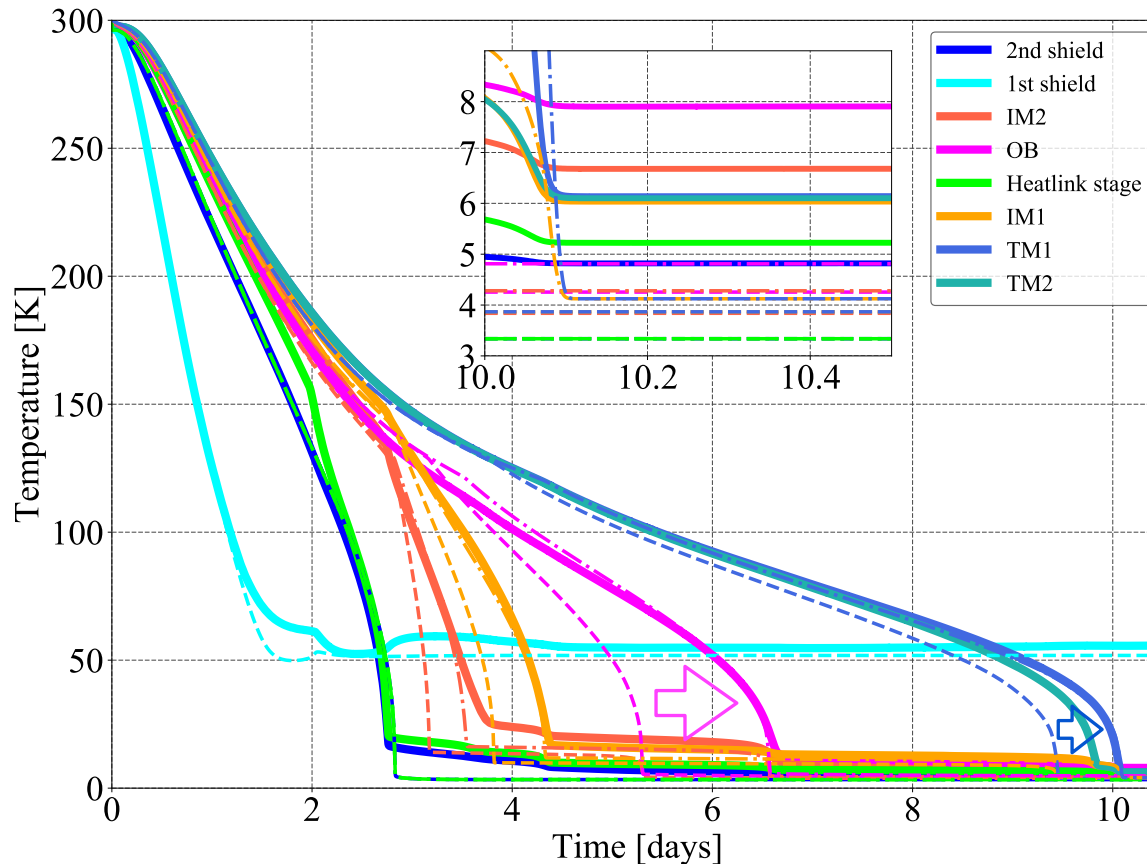
# まとめ、今後の展望

- Phase-III TOBA実現に向けた低温懸架系の開発
  - ◎ 低温運転に成功
  - ◎ ビームジッター制御，迷光，磁場雑音などの低減が必要
- 低温懸架系の改良計画
  - ◎ 試験マス，懸架ファイバーをシリコンで製作
    - ▶ 磁場カップリングの低減
    - ▶ Q値の向上
  - ◎ モノリシック光学系
    - ▶ ビームジッターの低減
    - ▶ 高感度化
- メインの懸架系と並行して低温試験を行う予定



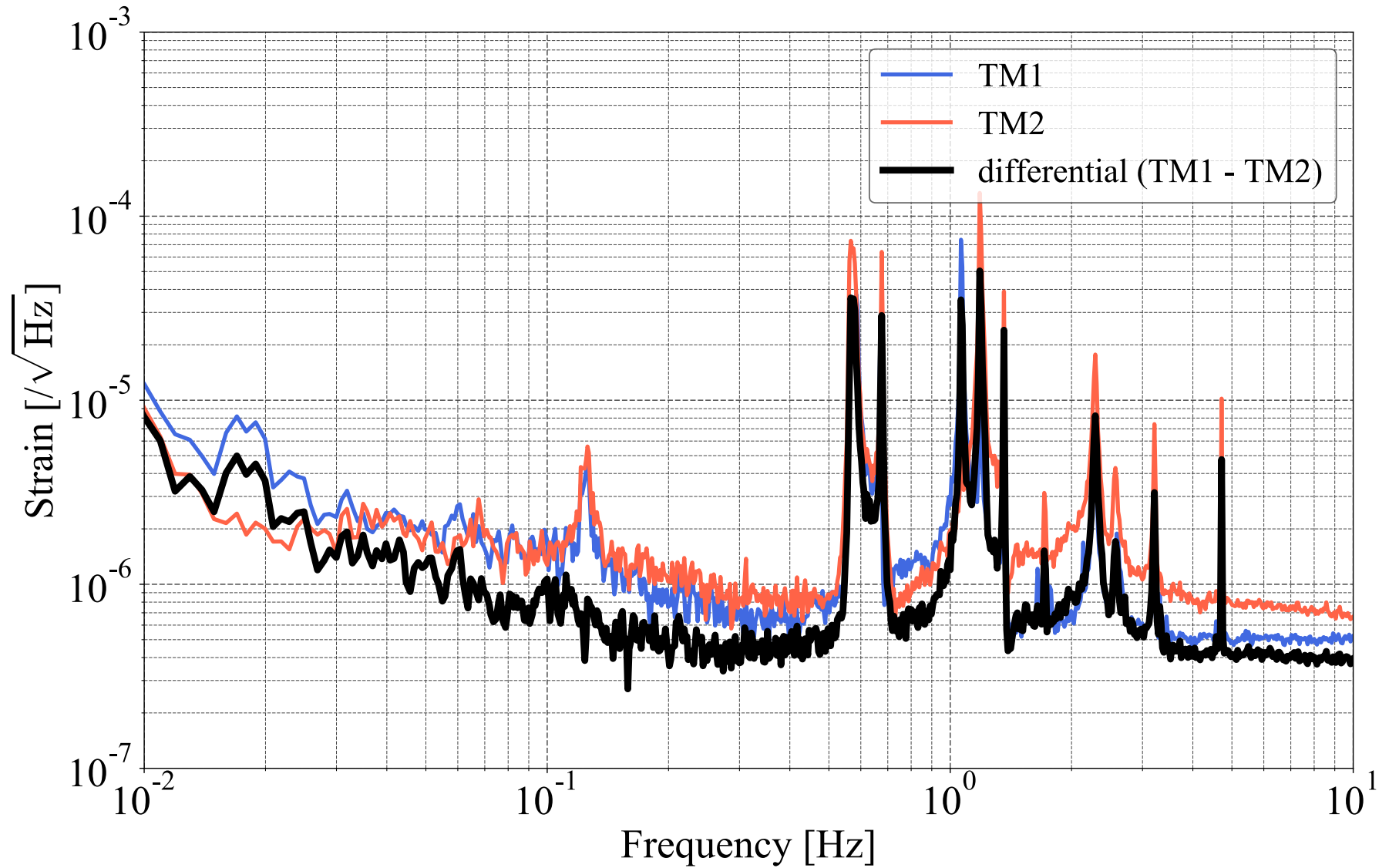
# 冷却結果

- 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



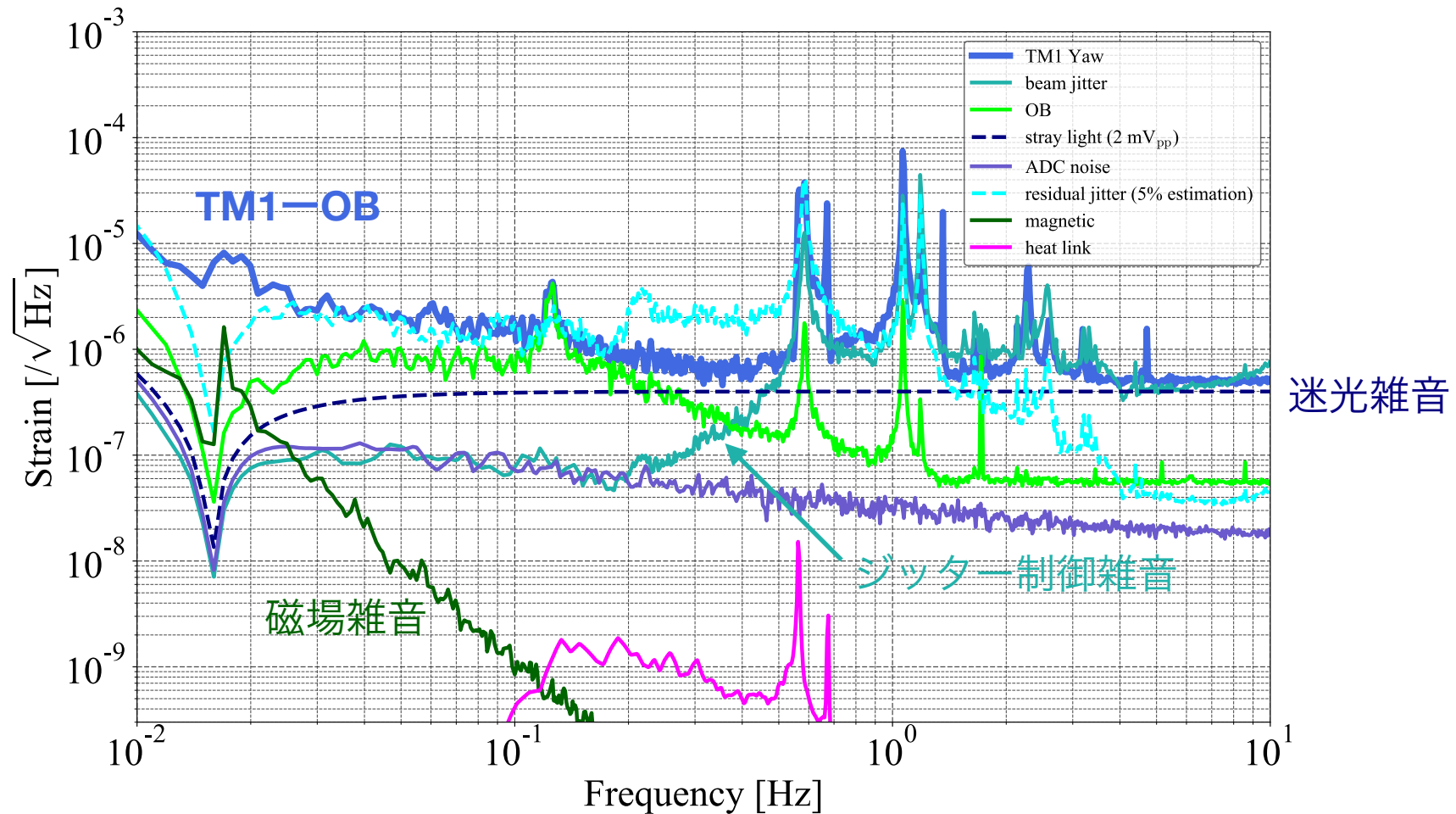


# 現在の感度

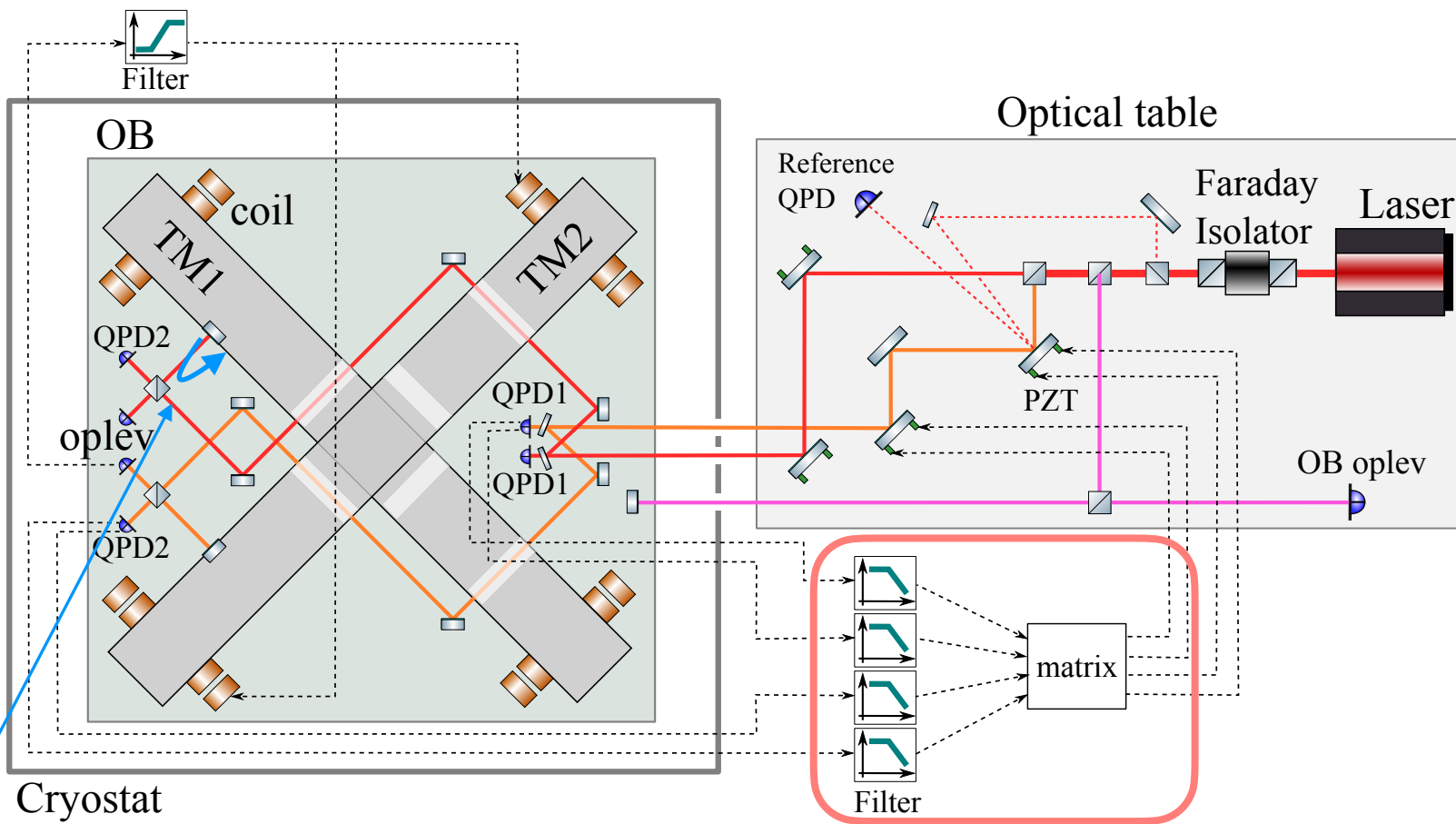


# 雑音源

- 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：

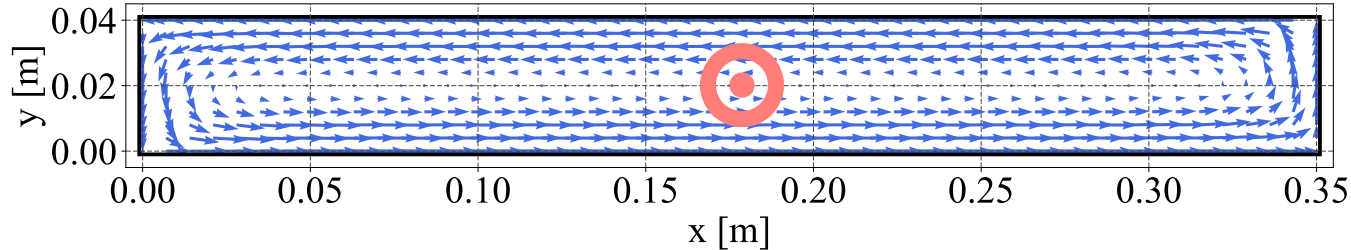
BSの表面反射などによる迷光が計測信号と干渉し，強度変動を起こす雑音

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

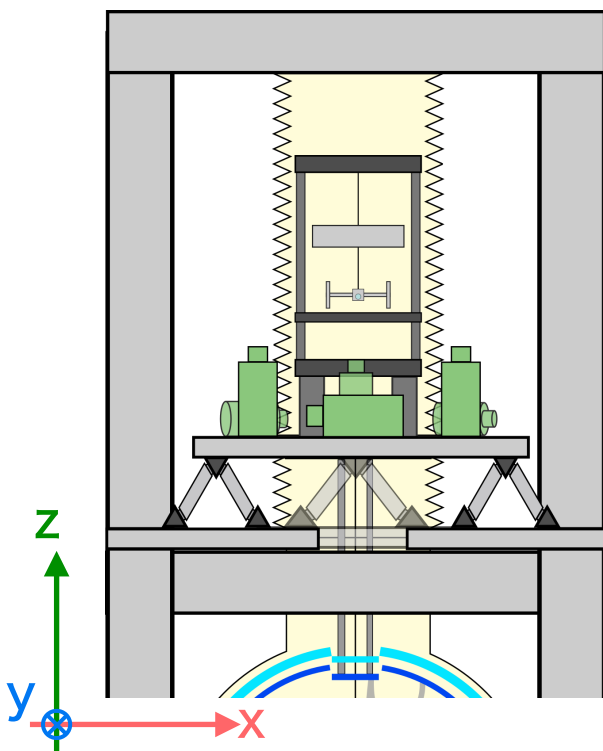
- 環境磁場変動による誘導電流が試験マスに流れ、磁気モーメント  $\mu$  をもつ
- 環境磁場のDC成分  $B$  とカップルし、トルク雑音  $N=B \times \mu$  が生じる



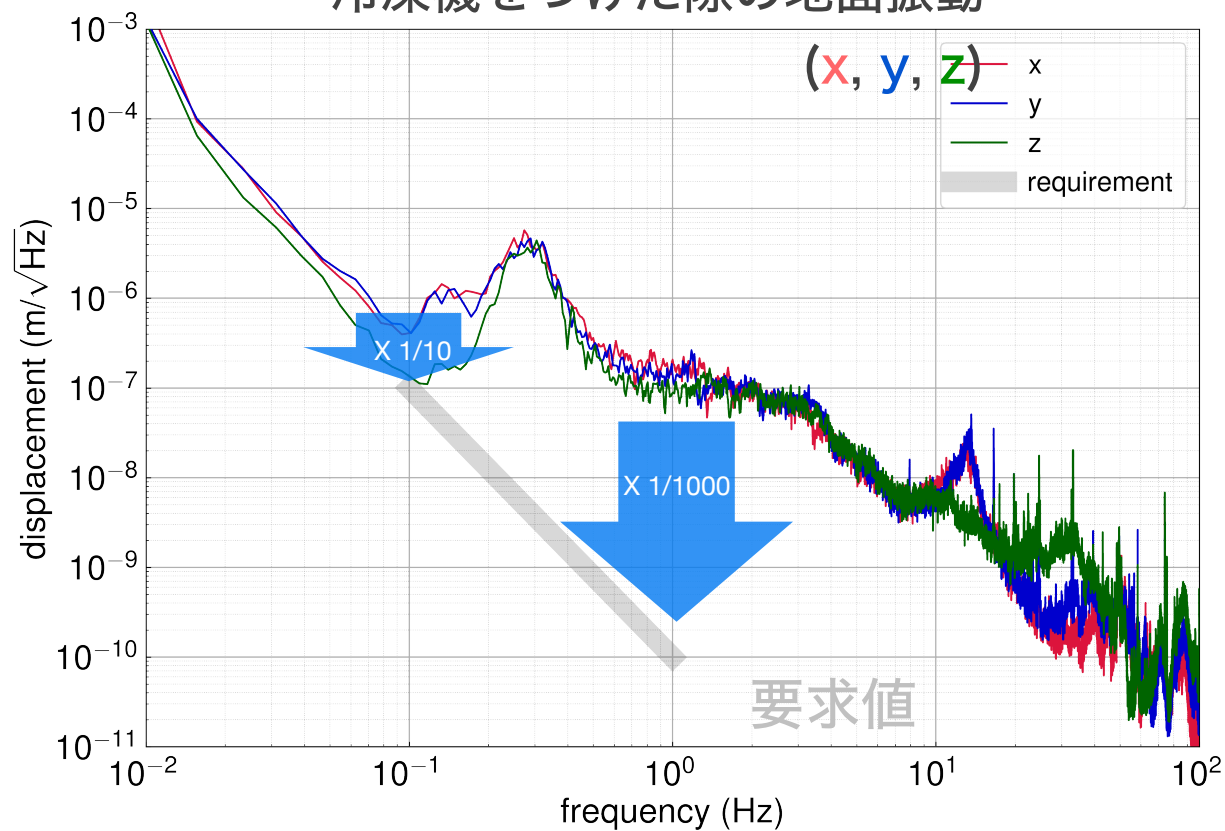
- $\mu$  は電気伝導度に比例
  - ▶ 低温になるほど寄与が大きくなる
- 現状  $10^{-9} / \sqrt{\text{Hz}}$  @ 0.1 Hz
  - ▶ 目標感度  $10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$  達成には6桁の低減が必要

# 懸架点の防振

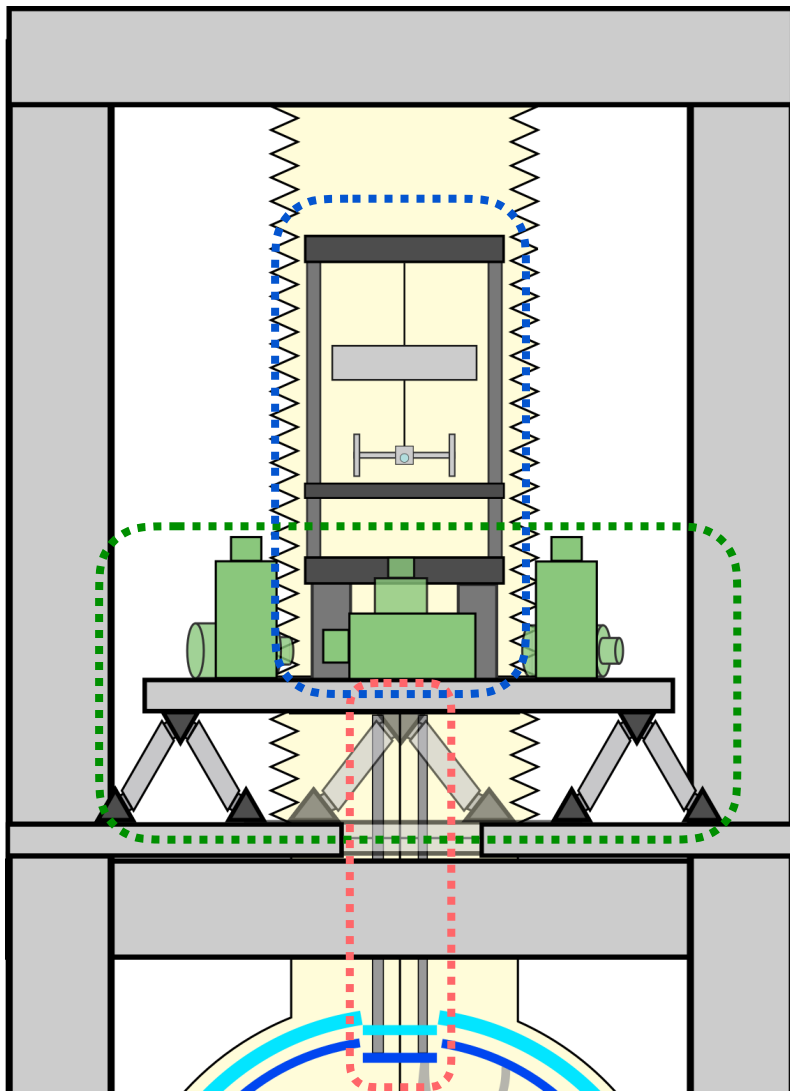
- 懸架点の振動への要求値:  $10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 0.1 Hz
  - ▶ 0.1 Hzで1/10, 1 Hzで1/1000 程度の防振が必要



冷凍機をつけた際の地面振動



# 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

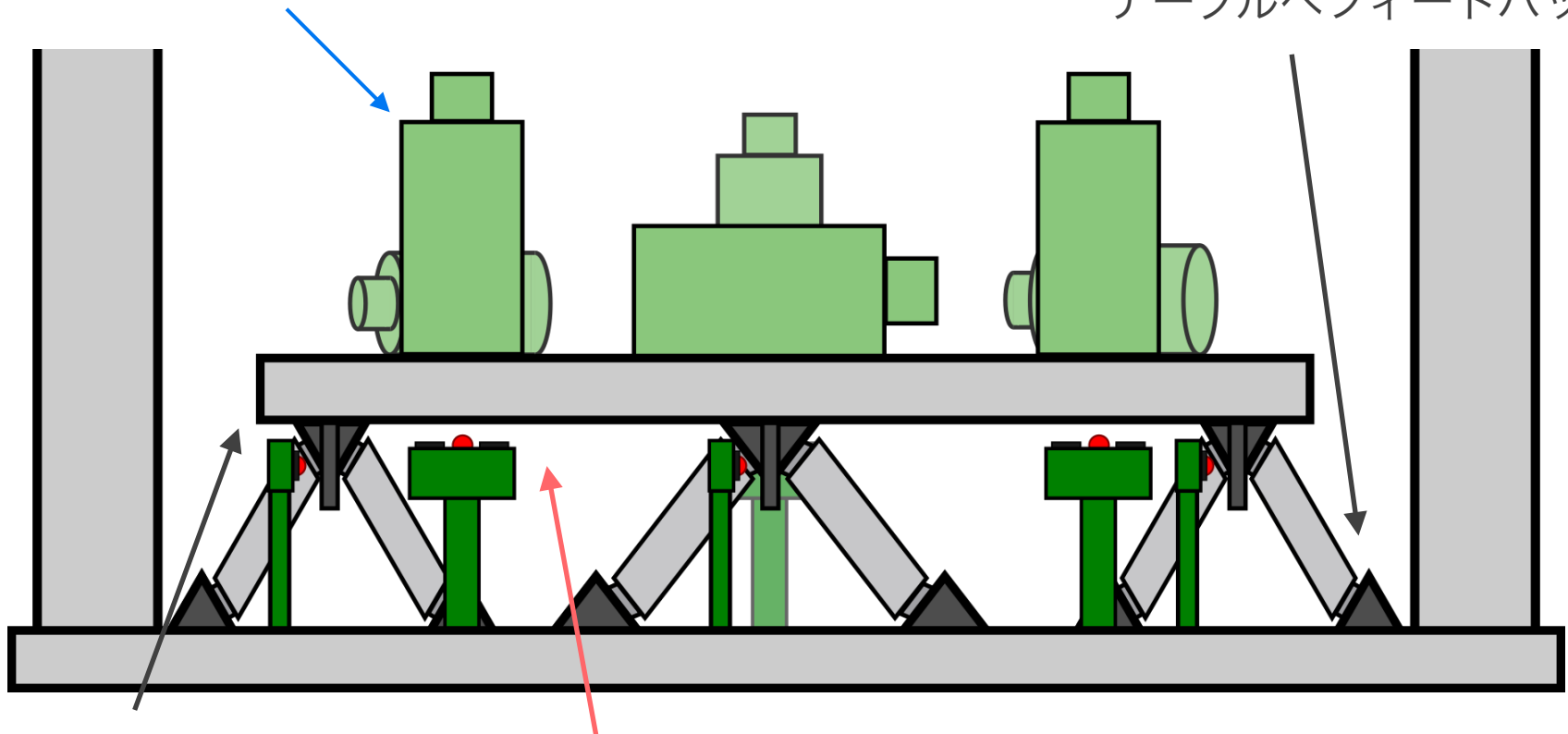
断熱ロッド

→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

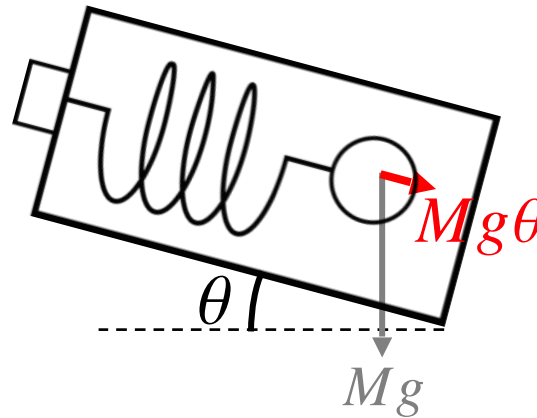
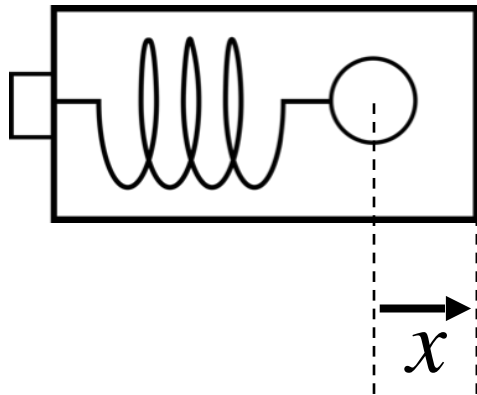


懸架テーブル：  
制御対象

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

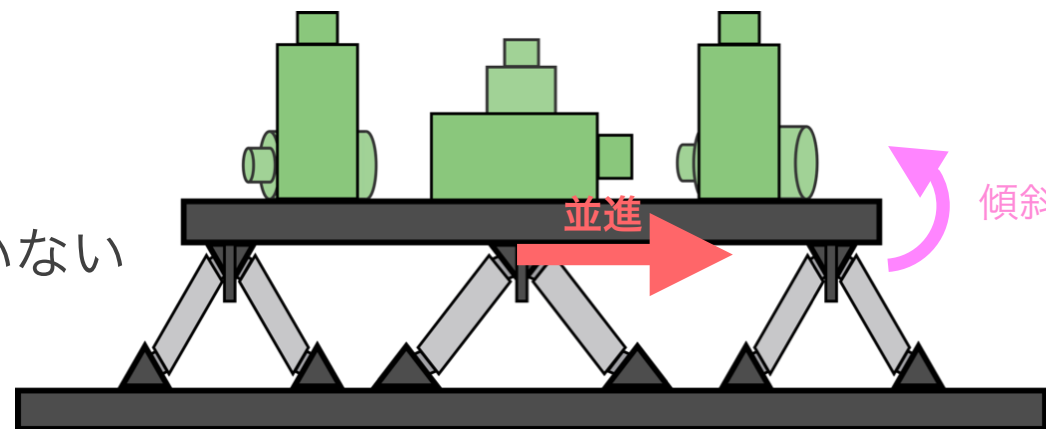
- 一般に慣性センサーは並進だけでなく傾き変動にも感度を持つ



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

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

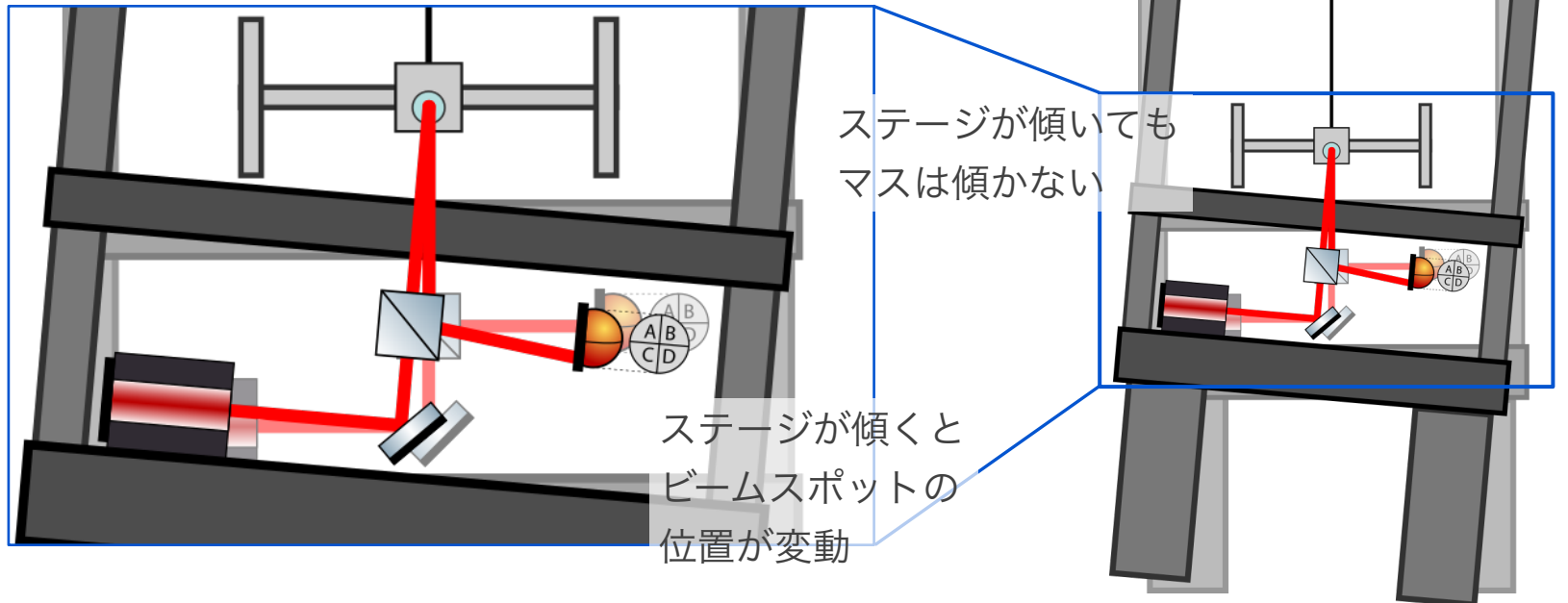
- ▶ 低周波ほど傾き変動の影響が大きい
- アクチュエーターの傾斜カップリング
  - ▶ 並進に揺らすと同時に傾斜方向にも加振
  - ▶ 低周波では並進を読めていない
  - ▶ 対角化 or 傾斜計の利用



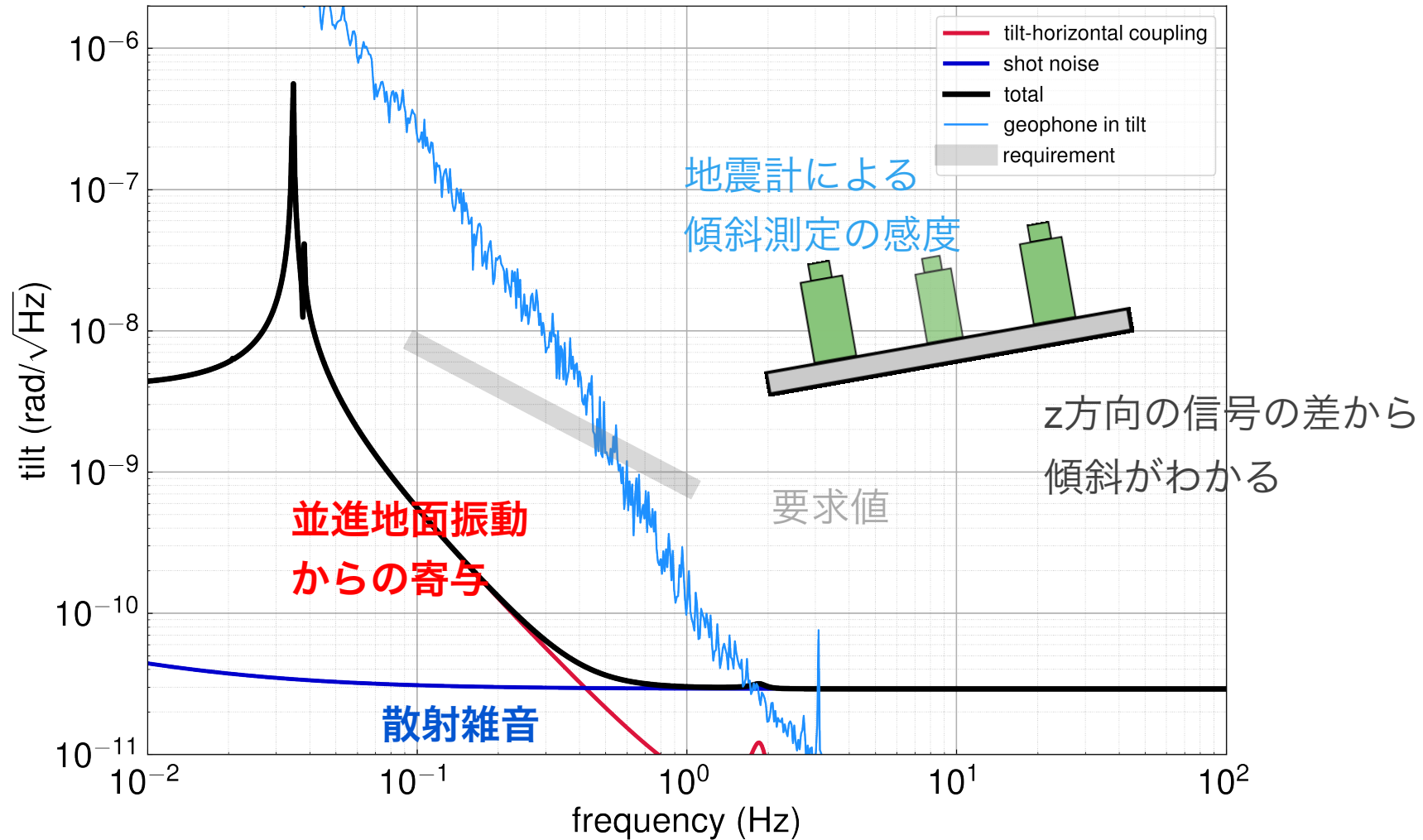


# 傾斜測定の実理

- 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

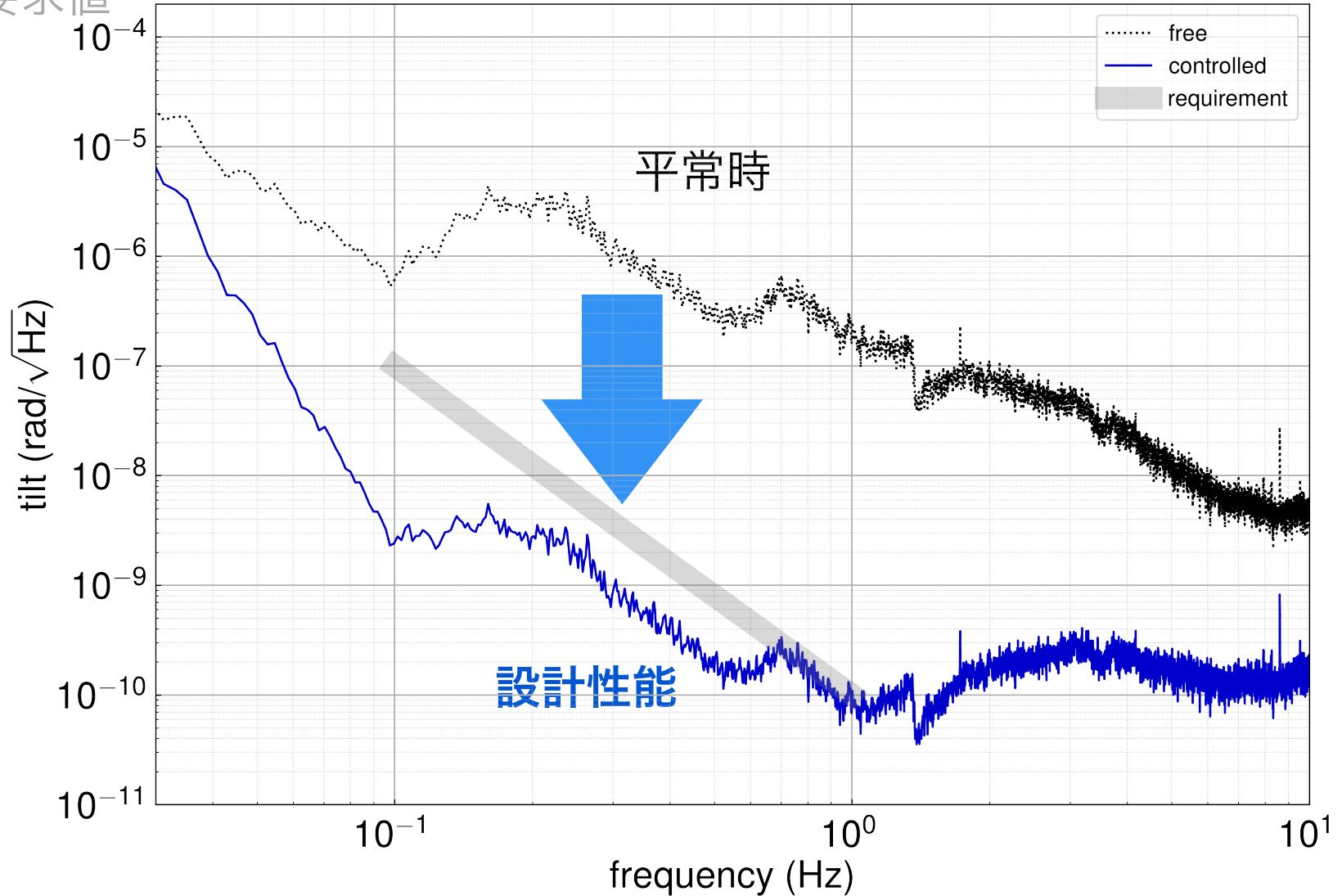


# 傾斜計の目標感度

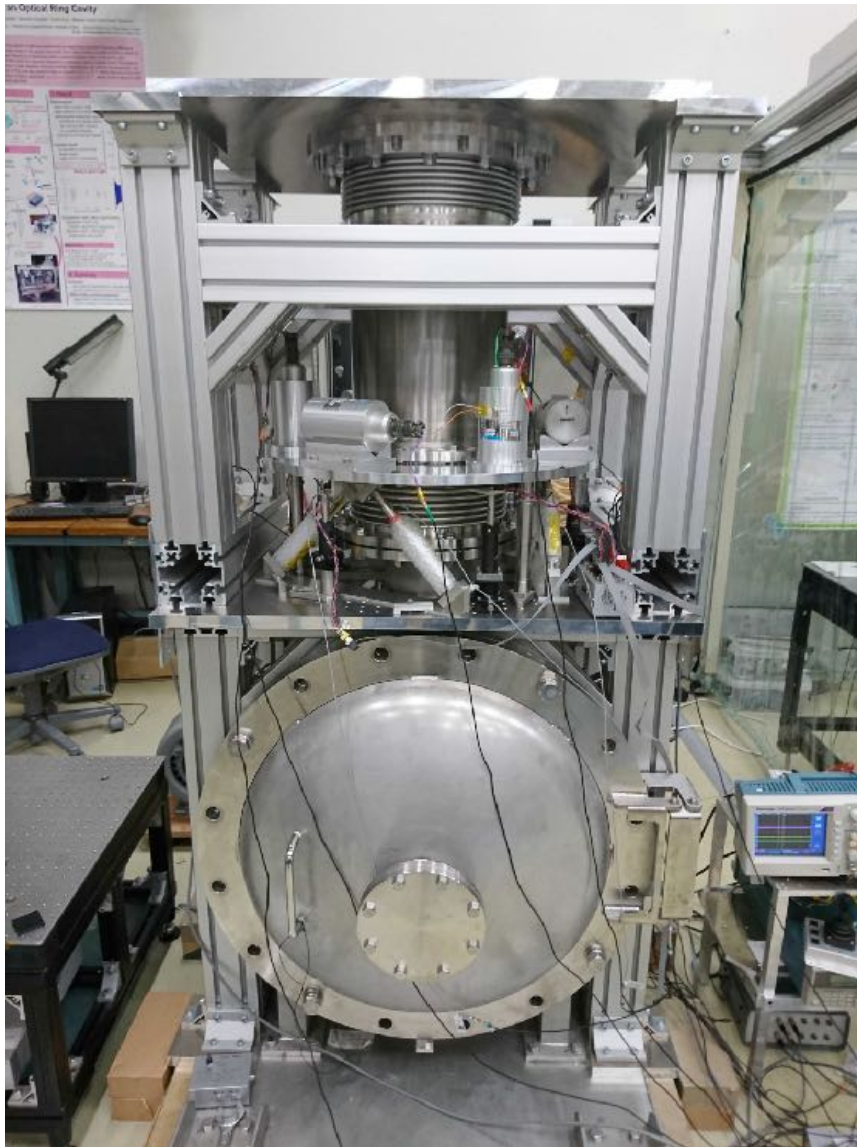


# 設計性能

要求値



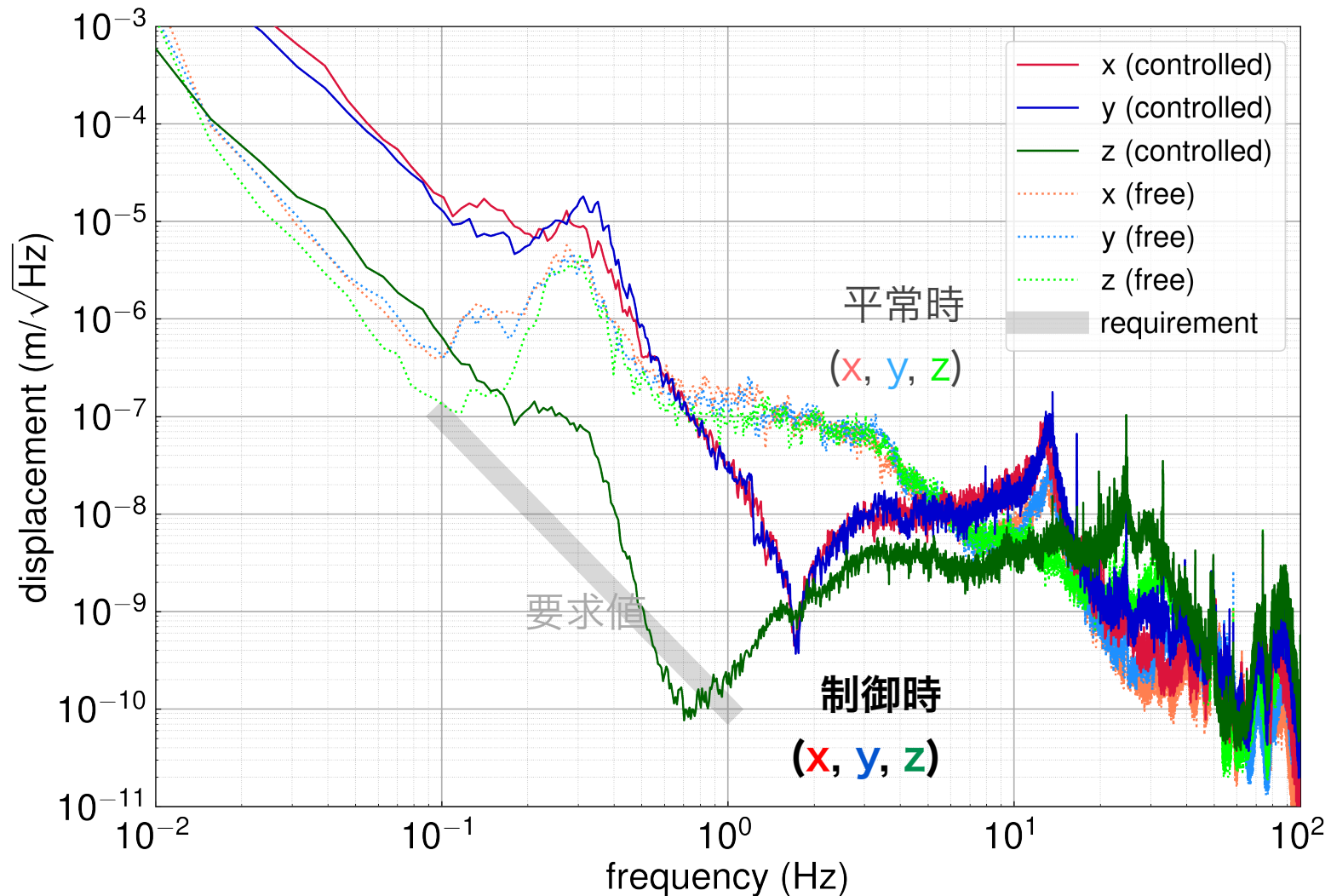
# 防振性能試験



同様の寸法だが、冷凍機の付いてい  
はなし、AVITのみ

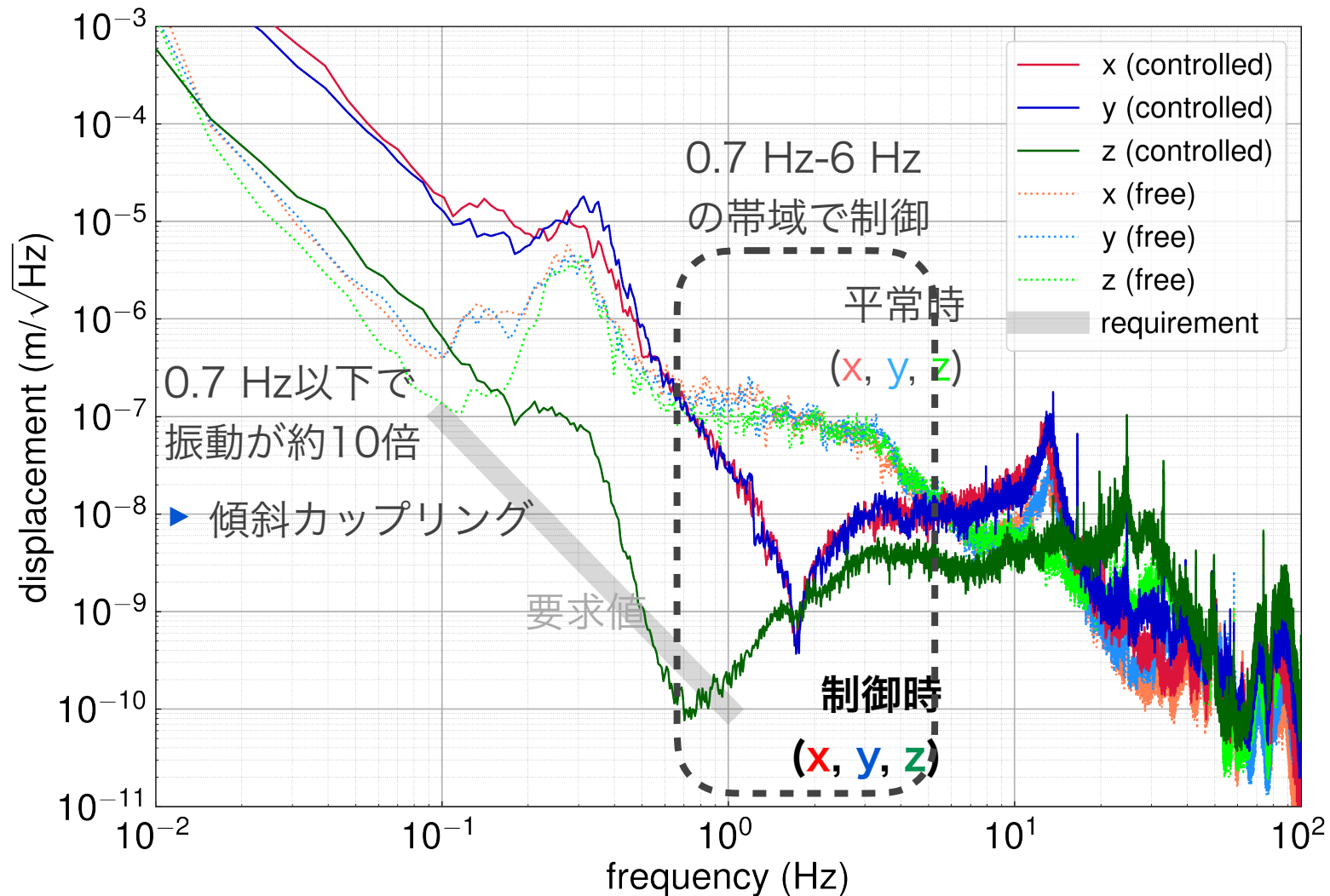
# 現在の防振性能

- **x, y, z**軸の3軸同時制御に成功



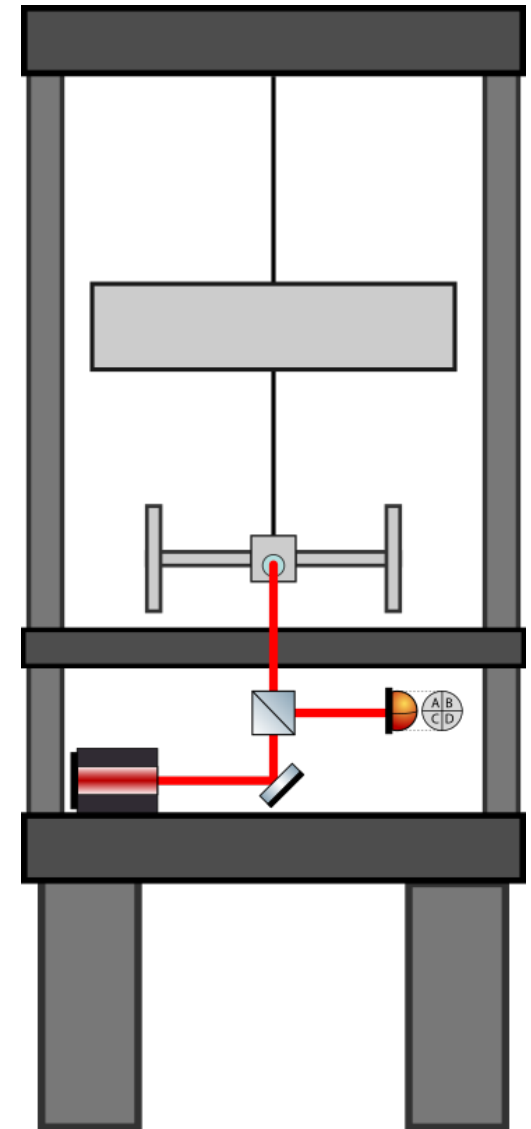
# 現在の防振性能

- **x, y, z**軸の3軸同時制御に成功



# 傾斜計の開発

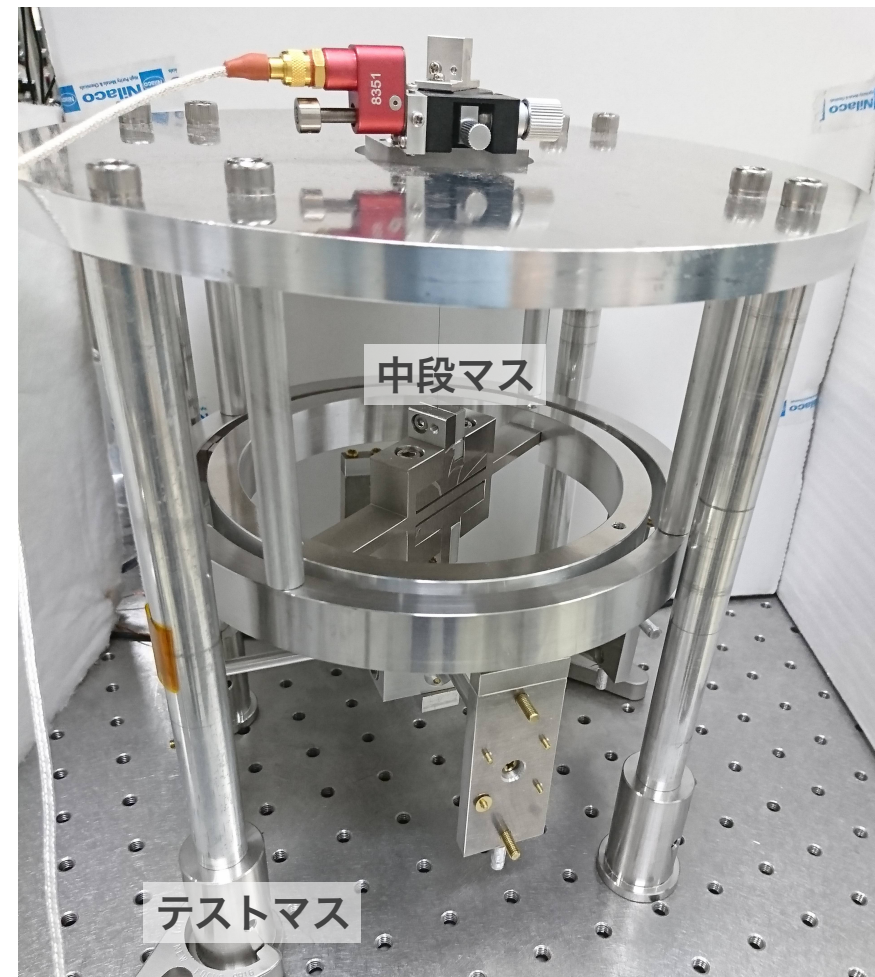
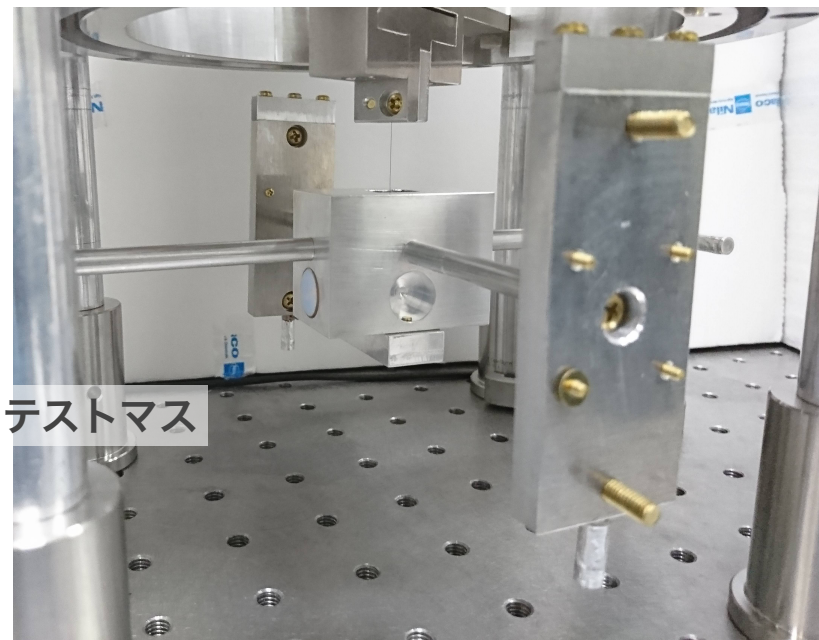
- 2段振り子懸架系
  - ▶ マスの重心位置の調整による  
並進-傾きカップリングの低減
- 読み取り光学系
  - ▶ 光てこを用いた角度読み取り





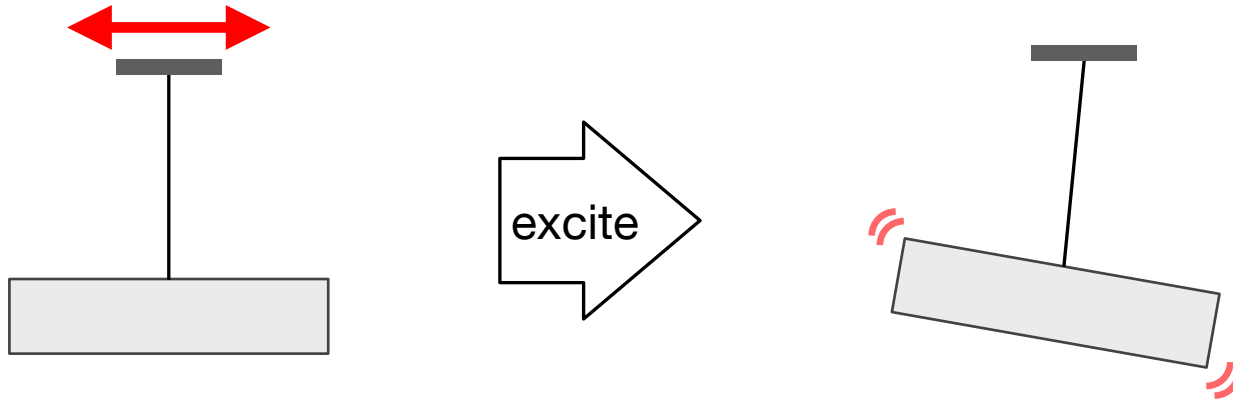
# 傾斜計の開発

- 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

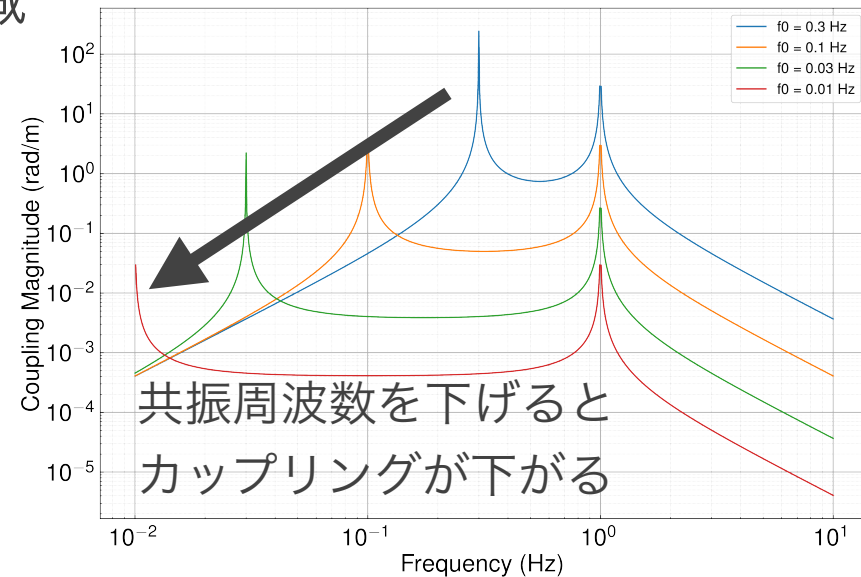


- ▶ マスの重心位置の調整により低減

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

$\Delta z$ : 重心と懸架点の距離

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



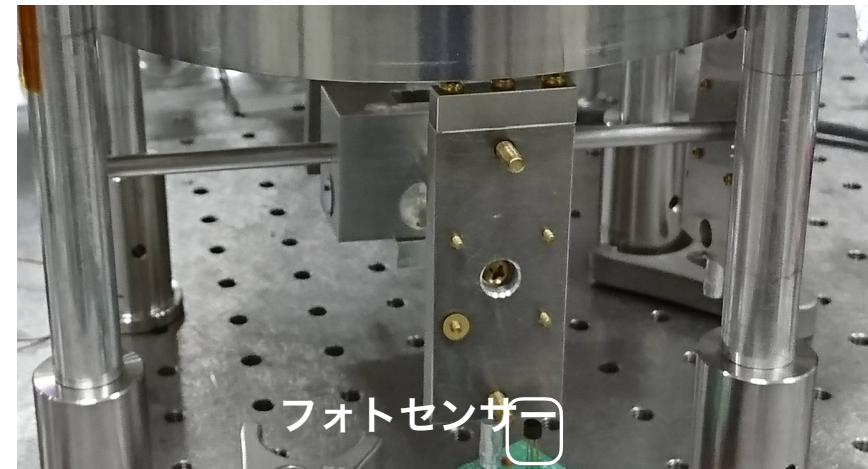
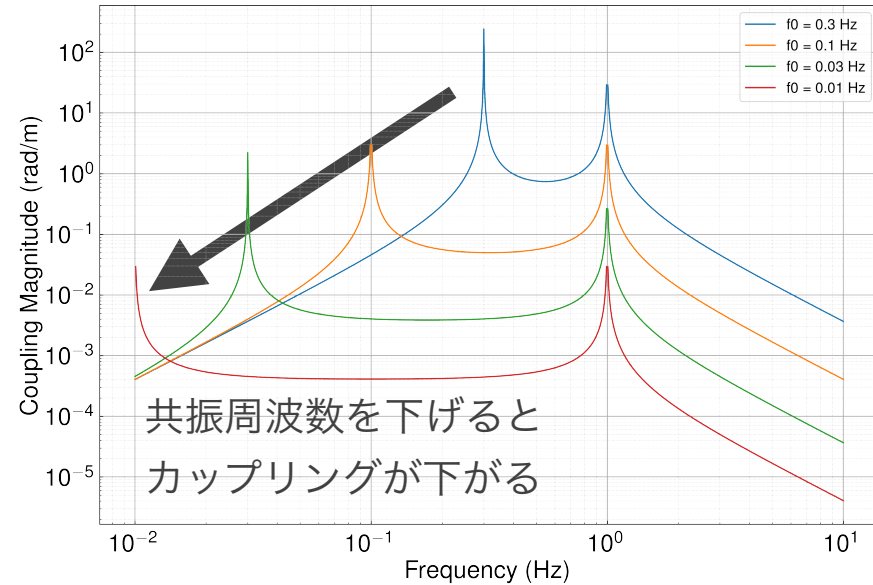
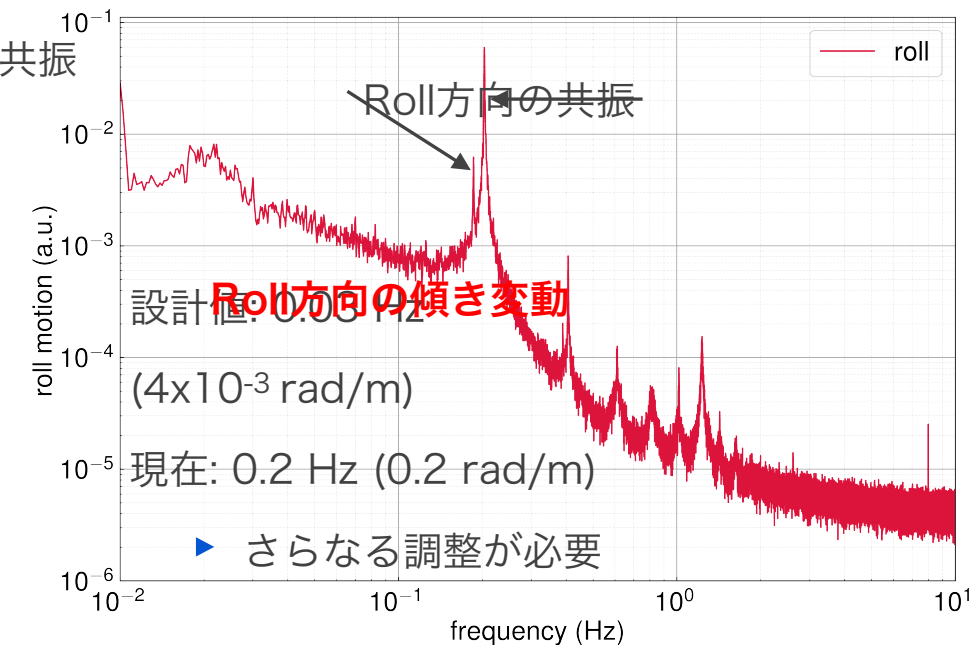
# 重心位置調整

- 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

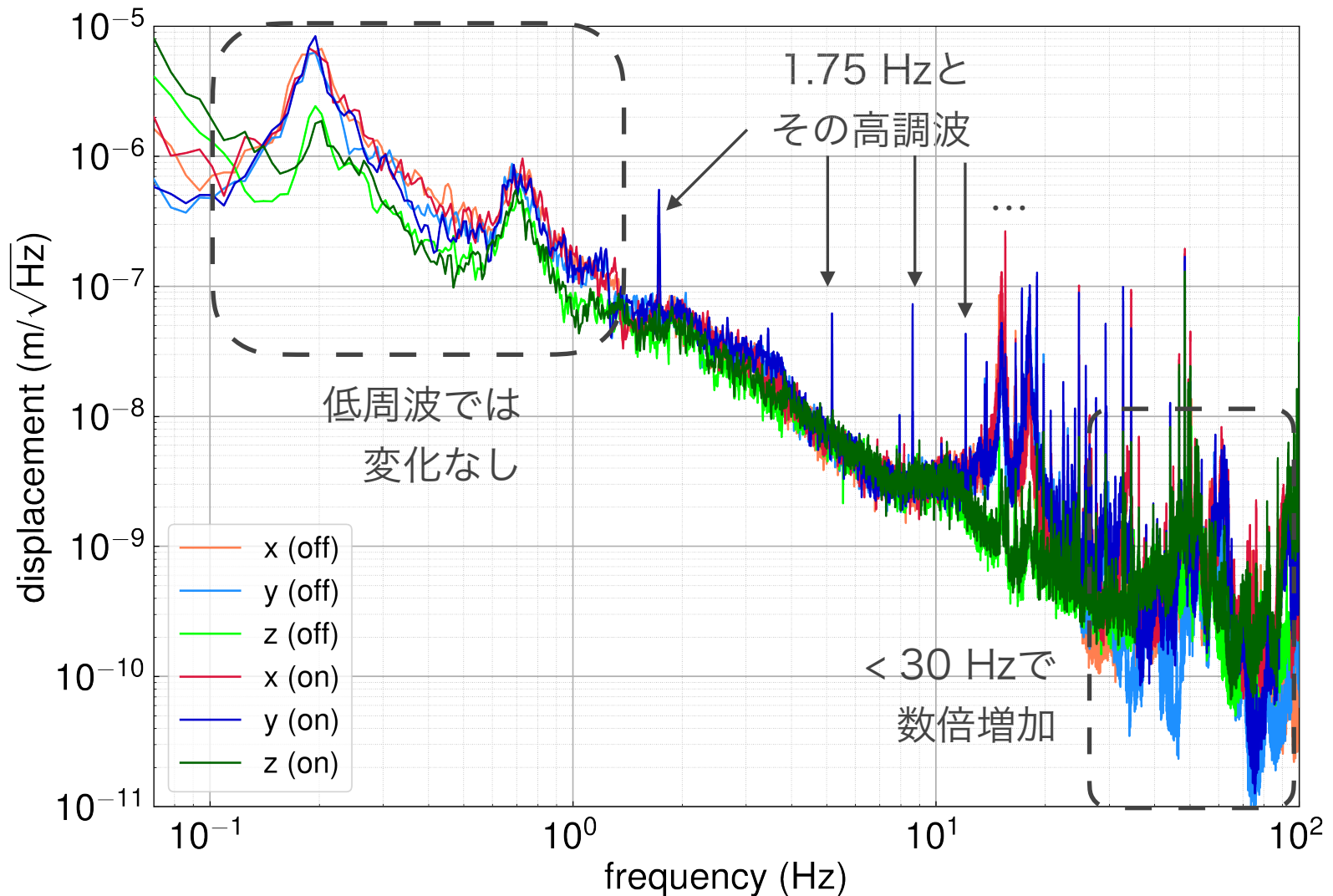
$$C \simeq \frac{f_0^2}{g} \propto \Delta z$$

$\Delta z$ : 重心と懸架点の距離



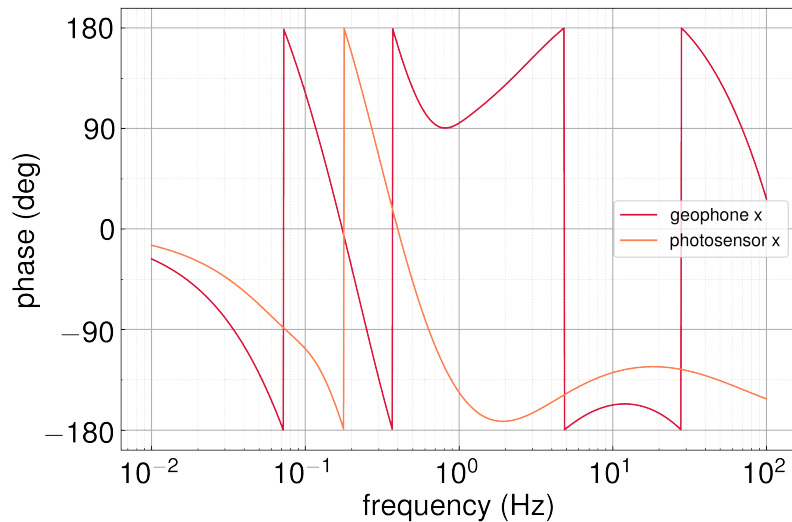
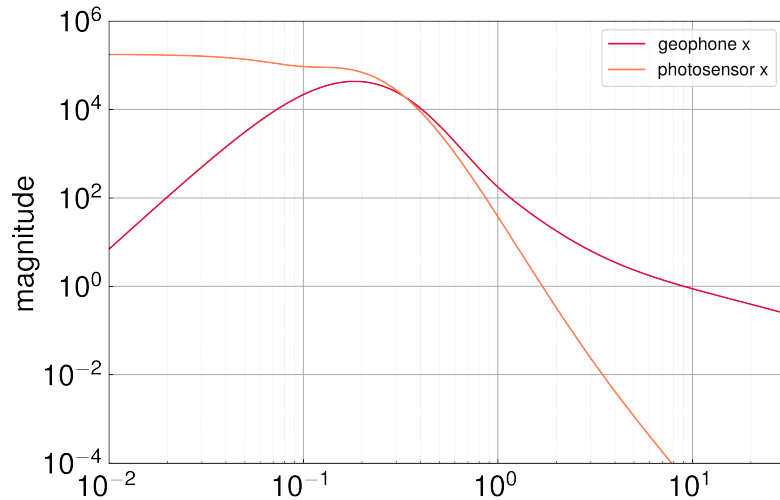


# 冷凍機による地面振動の導入

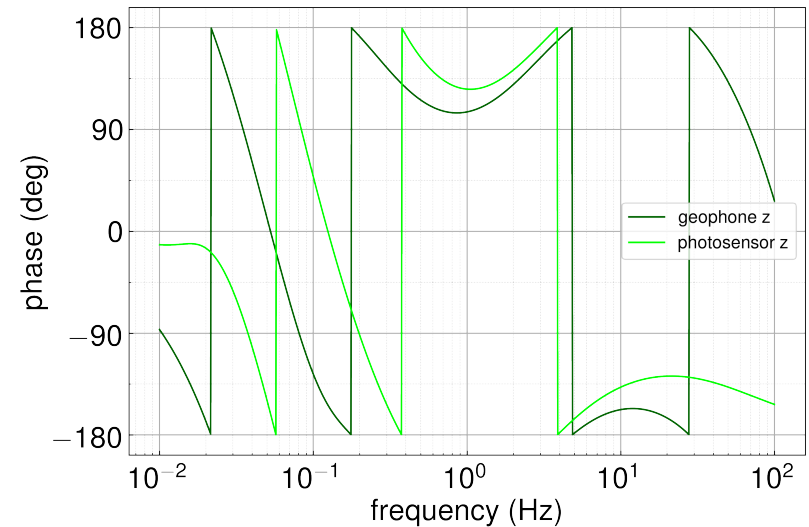
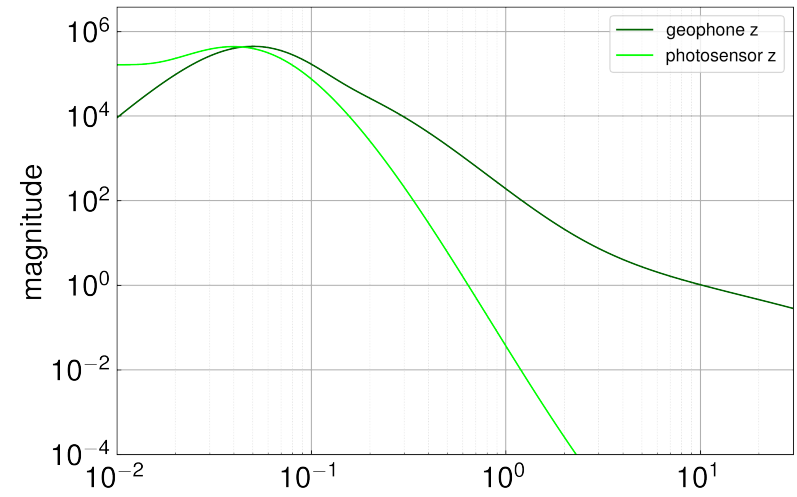


冷凍機off(x, y, z), on(x, y, z)の場合の地面振動

# 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)

