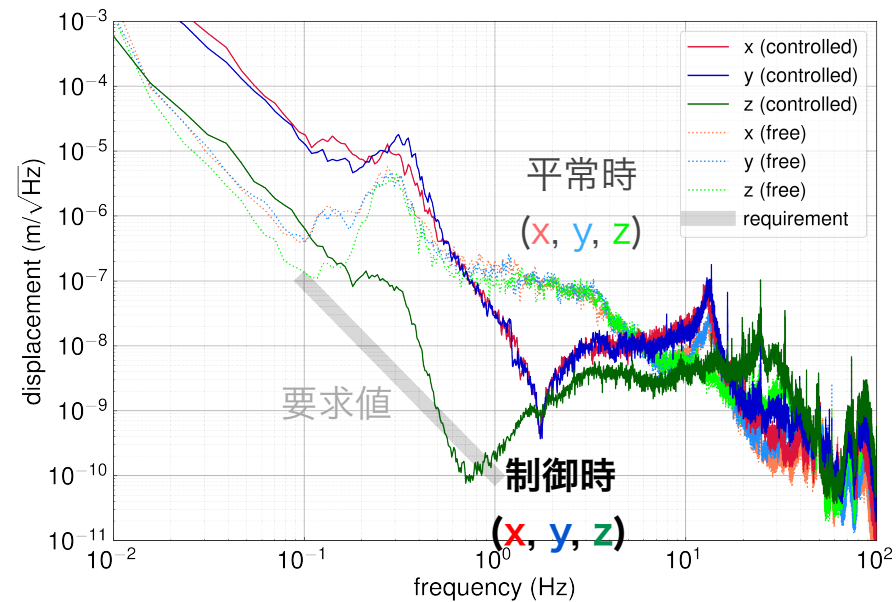


ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBAの開発(17): 傾斜計の開発

高野哲, 下田智文, 宮崎祐樹, Ooi Ching Pin, 有富尚紀, 道村唯太,
正田亜八香^A, 麻生洋一^A, 高橋竜太郎^A, 山元一広^B, 安東正樹
東大理, 国立天文台^A, 富山大^B

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，能動防振系を開発中
- 並進3軸の同時制御に成功し，最大で防振比1/1000を達成
- 傾斜カップリングが現在の防振性能を制限
- 傾斜を読み取る傾斜計の開発を進めている



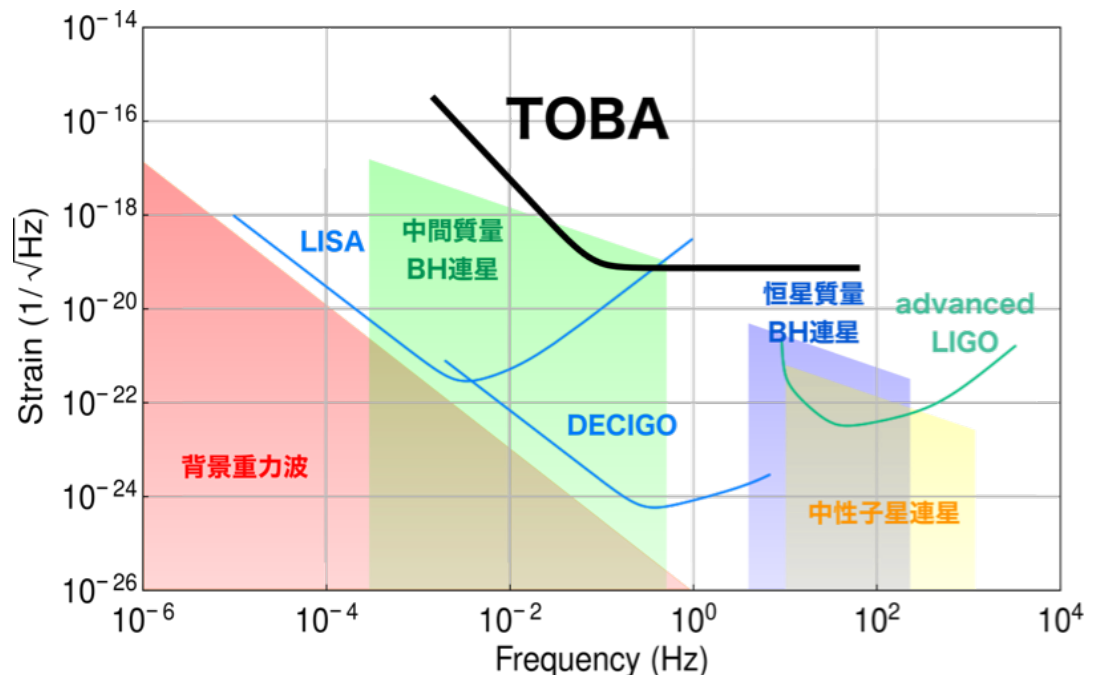
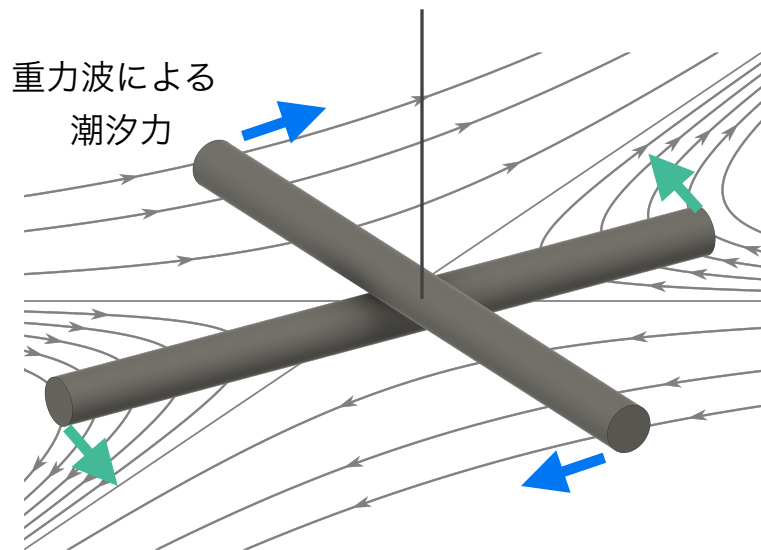
Contents

- TOBAについて
 - ▶ Overview
 - ▶ Phase-III TOBA
- 能動防振系
 - ▶ 防振系の構成
 - ▶ 現在の性能
 - ▶ 傾斜計の開発
- 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 $h \sim 10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$

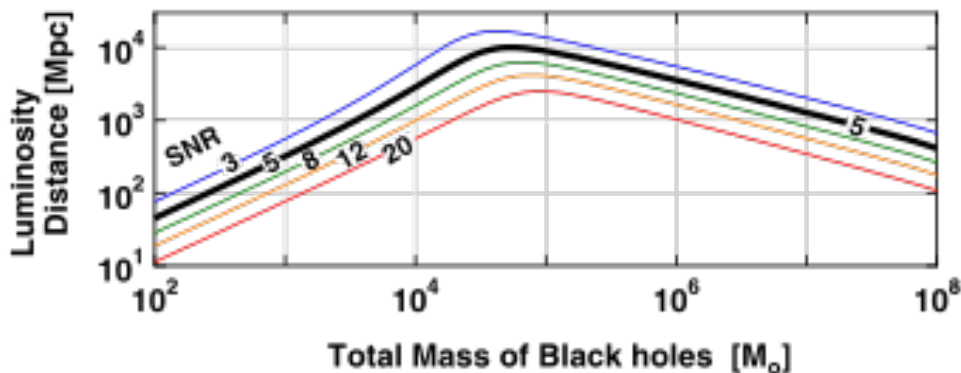


TOBAのサイエンス

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



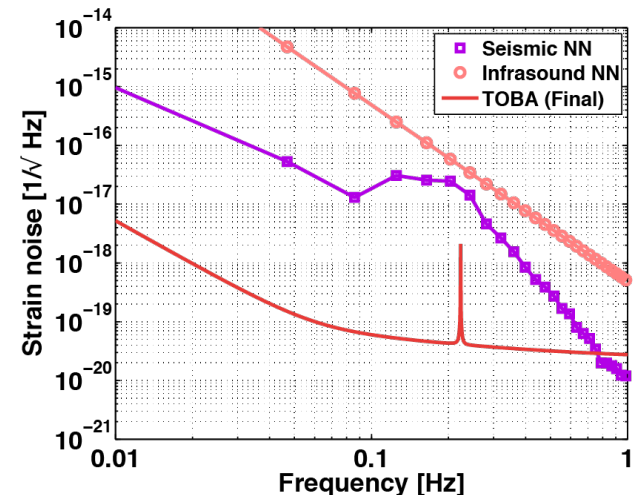
M. Ando et al., PRL, 105, 161101(2010)

- 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

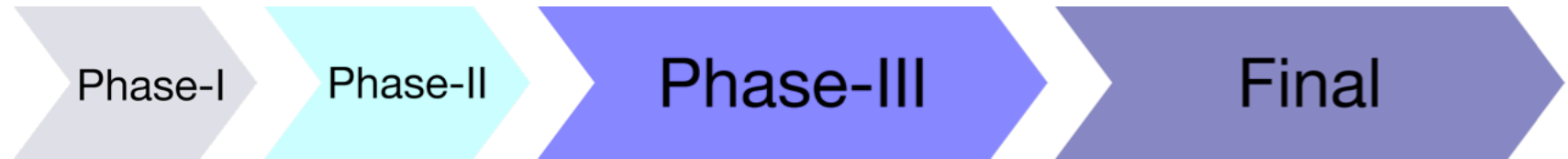
- Newtonian Noise
 - ▶ モデル検証
 - ▶ 第3世代レーザー干渉計のR&D



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



原理実証

@ 0.1Hz :

10^{-8} / $\sqrt{\text{Hz}}$

- ~ 20 cm試験マス
- 室温

低温ねじれ振り子

10^{-15} / $\sqrt{\text{Hz}}$

- 35 cm試験マス
- 低温 (4K)

最終目標

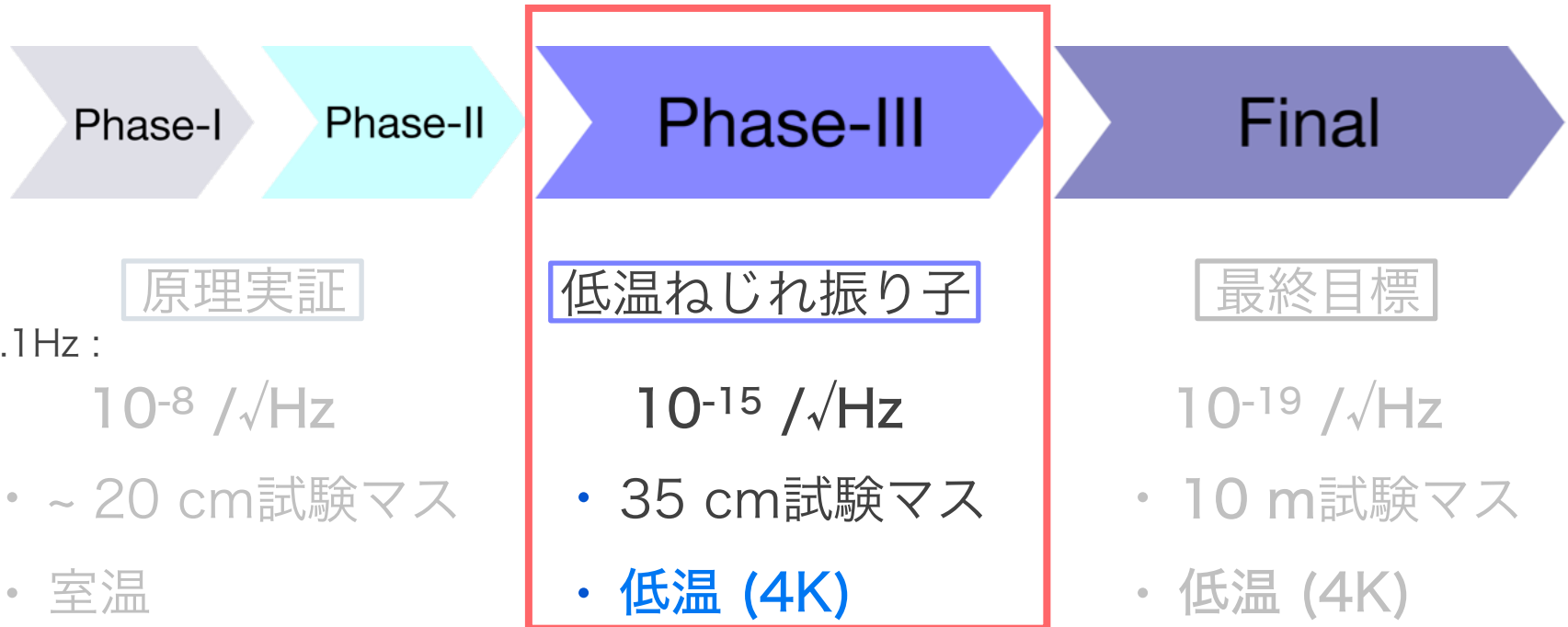
10^{-19} / $\sqrt{\text{Hz}}$

- 10 m試験マス
- 低温 (4K)

これまで:

Phase-III実現に向けた、障害となる雑音源の特定とその低減手法の確立

研究計画



➤ **現在: Phase-III TOBAの開発**

これまで:

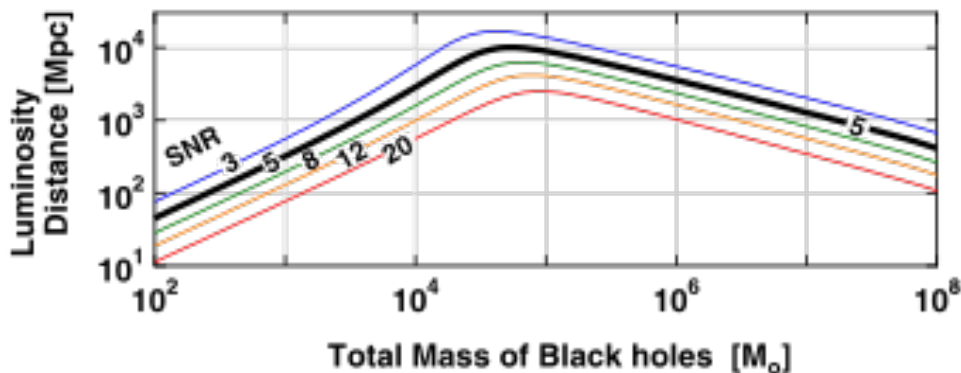
Phase-III実現に向けた, 障害となる雑音源の特定と
その低減手法の確立

Phase-III 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



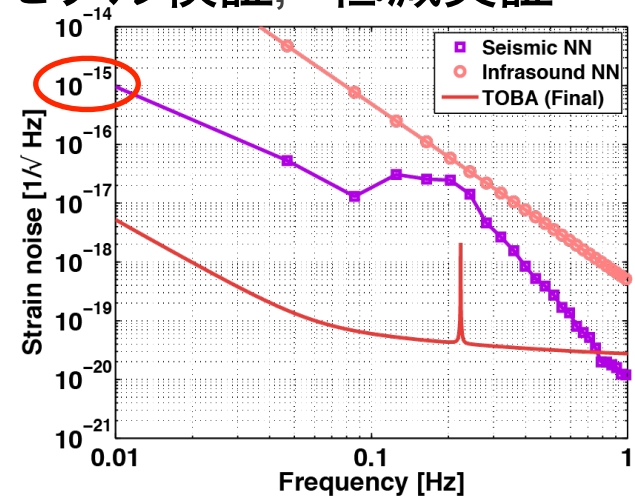
M. Ando et al., PRL, 105, 161101(2010)

- 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

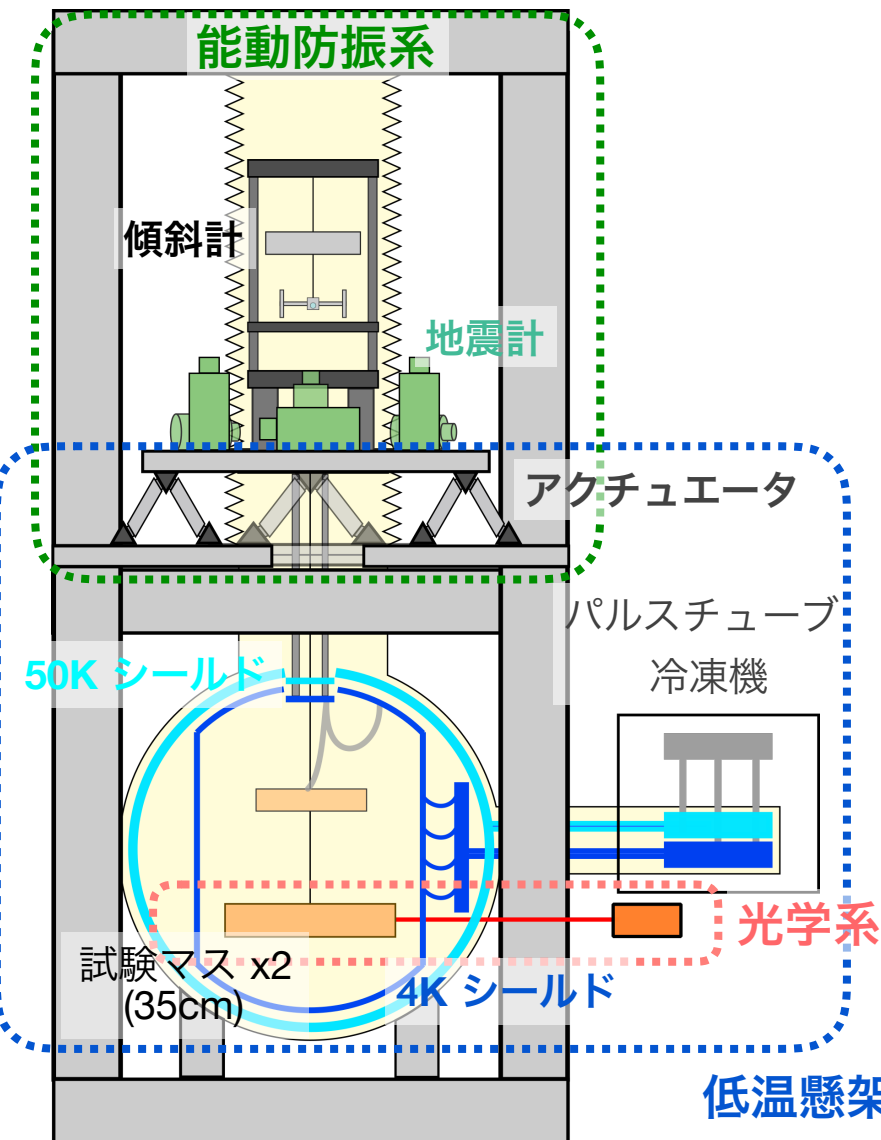
- Newtonian Noise
 - ▶ モデル検証, 低減実証



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

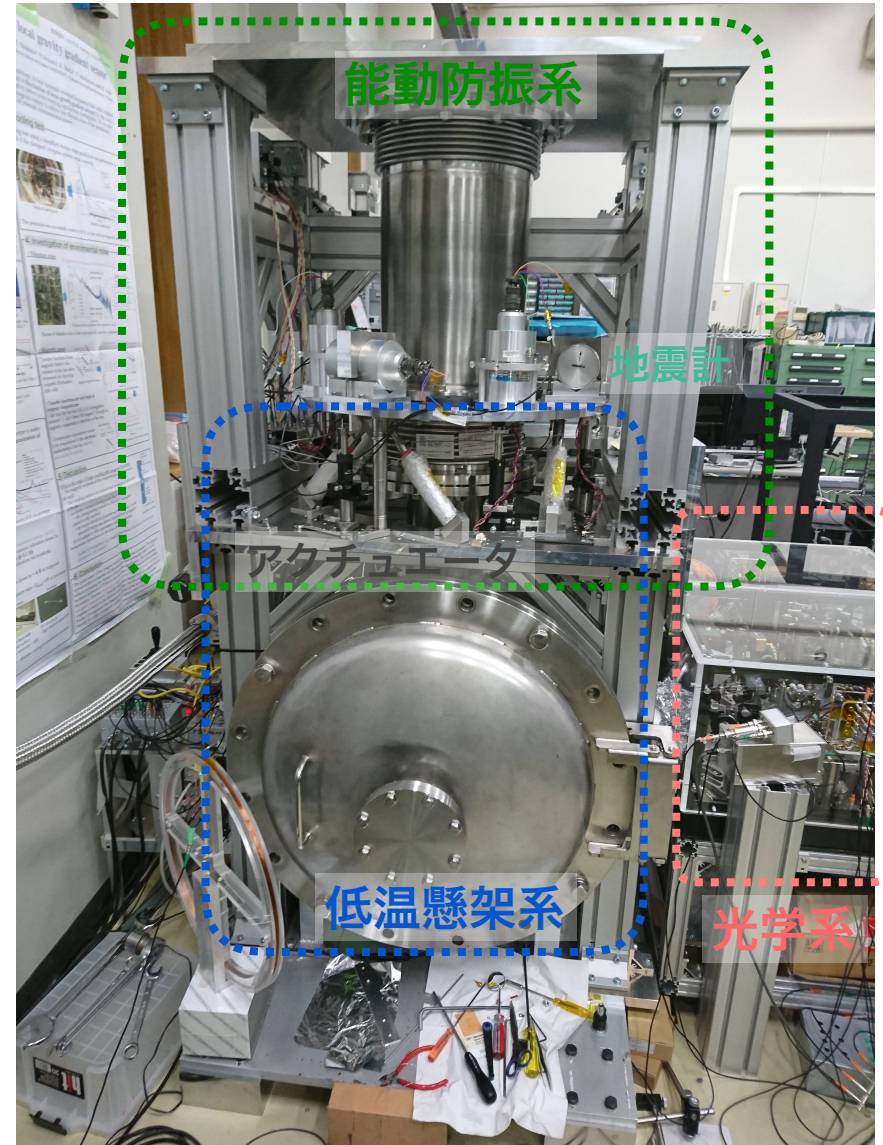
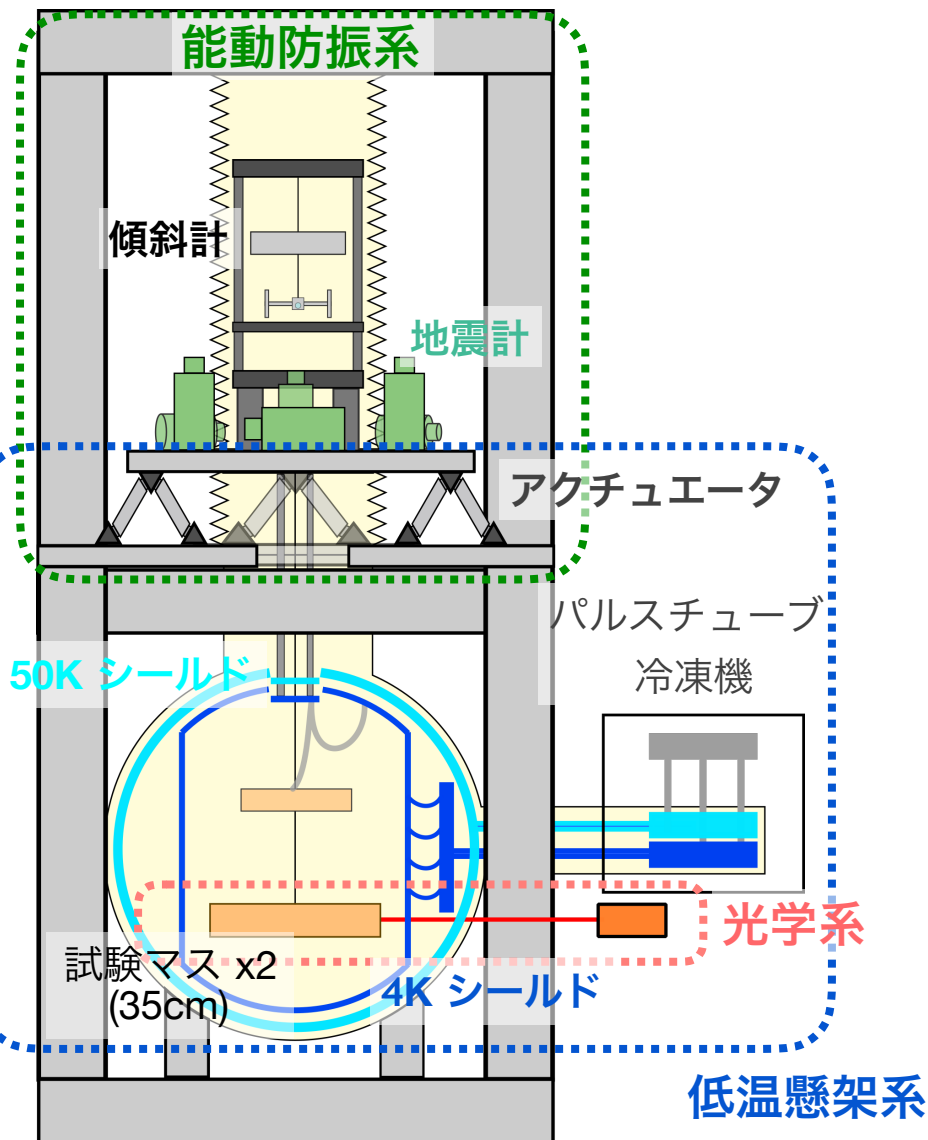
- 能動防振系

- ▶ 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

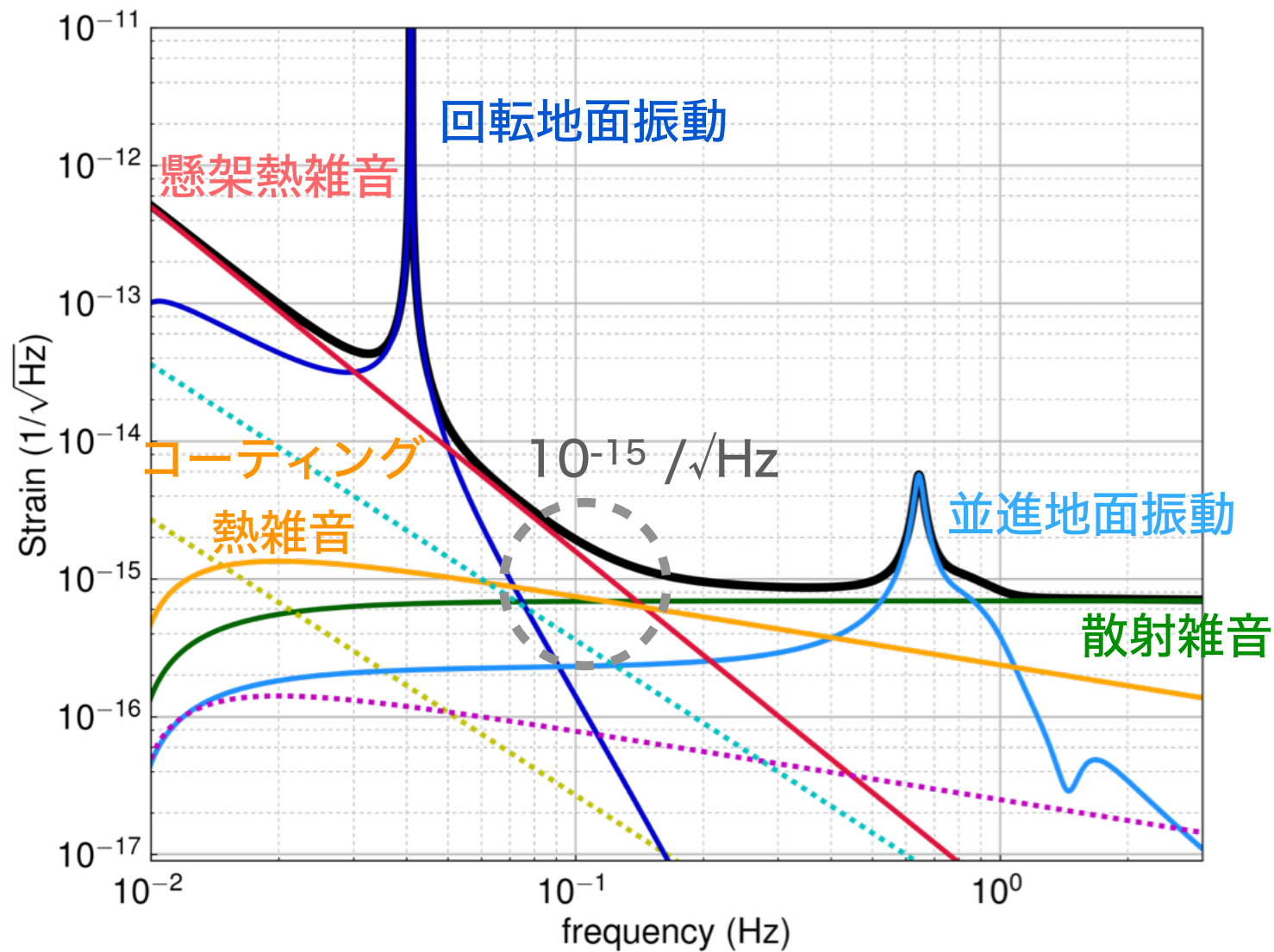
- 光学系

- ▶ 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

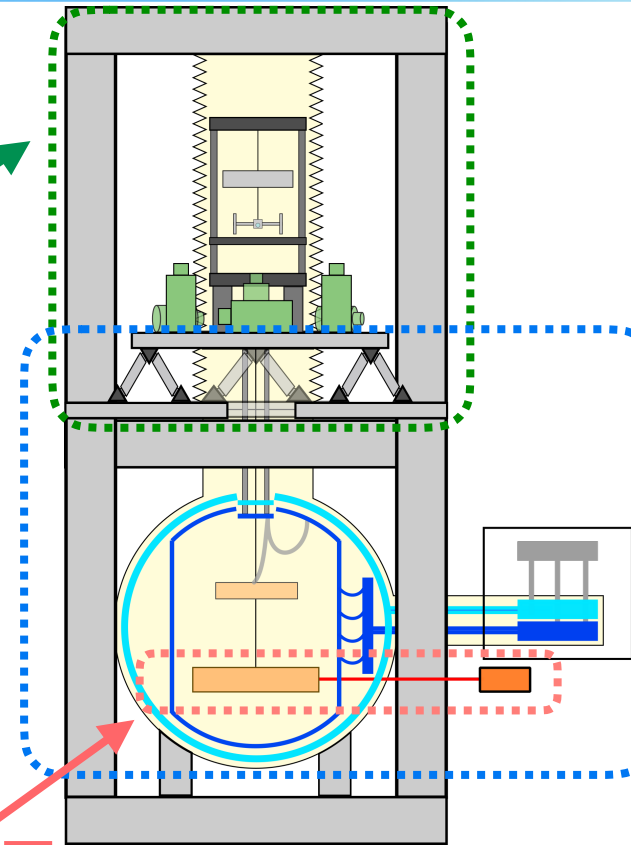
- ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却
- ▶ Q値: 4 Kで $Q = 10^8$

・ 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



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 → 下田氏 (20aT11-10)
- ▶ 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

→ 本講演

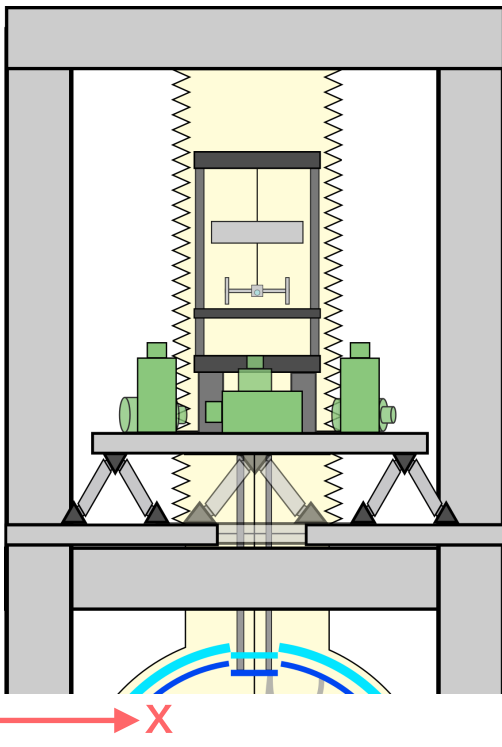
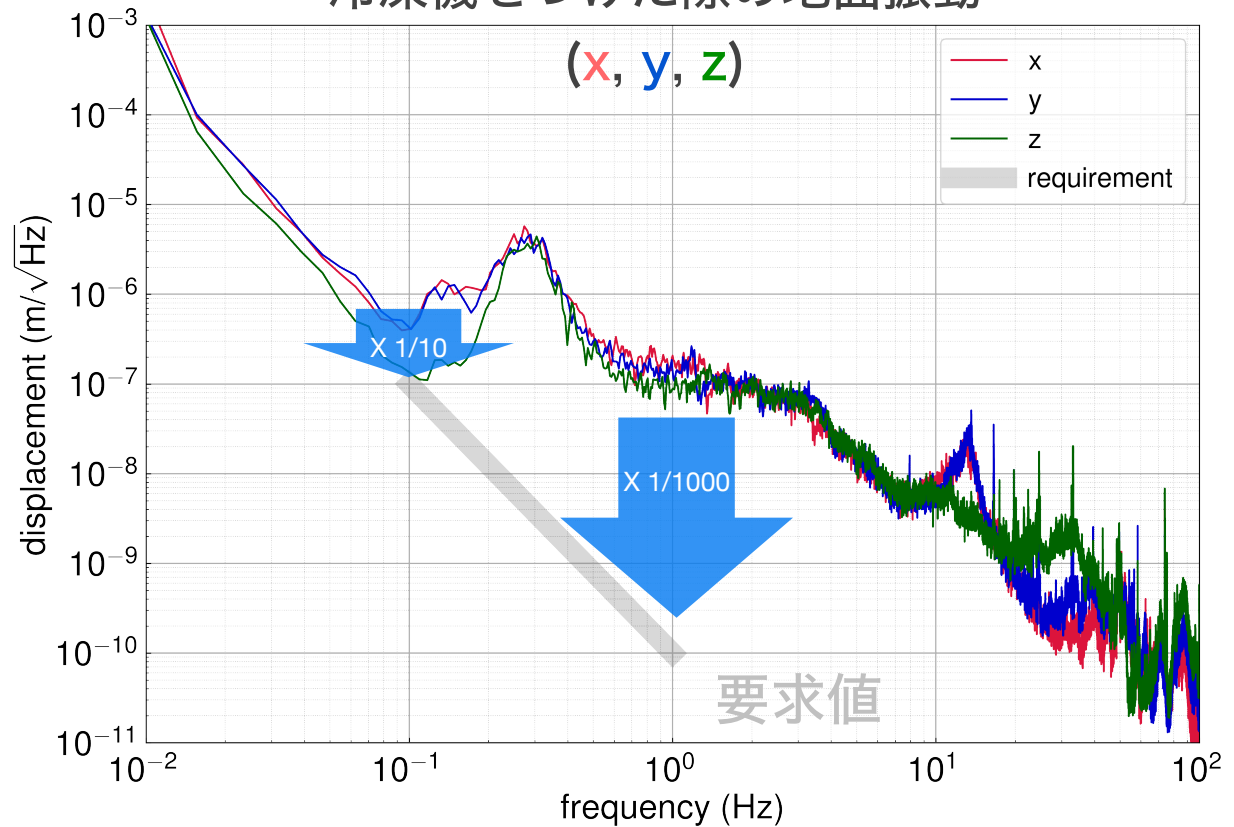
• 光学系

- ▶ Wave Front Sensorを応用した読み取り系 → 宮崎氏 (20aT11-9)

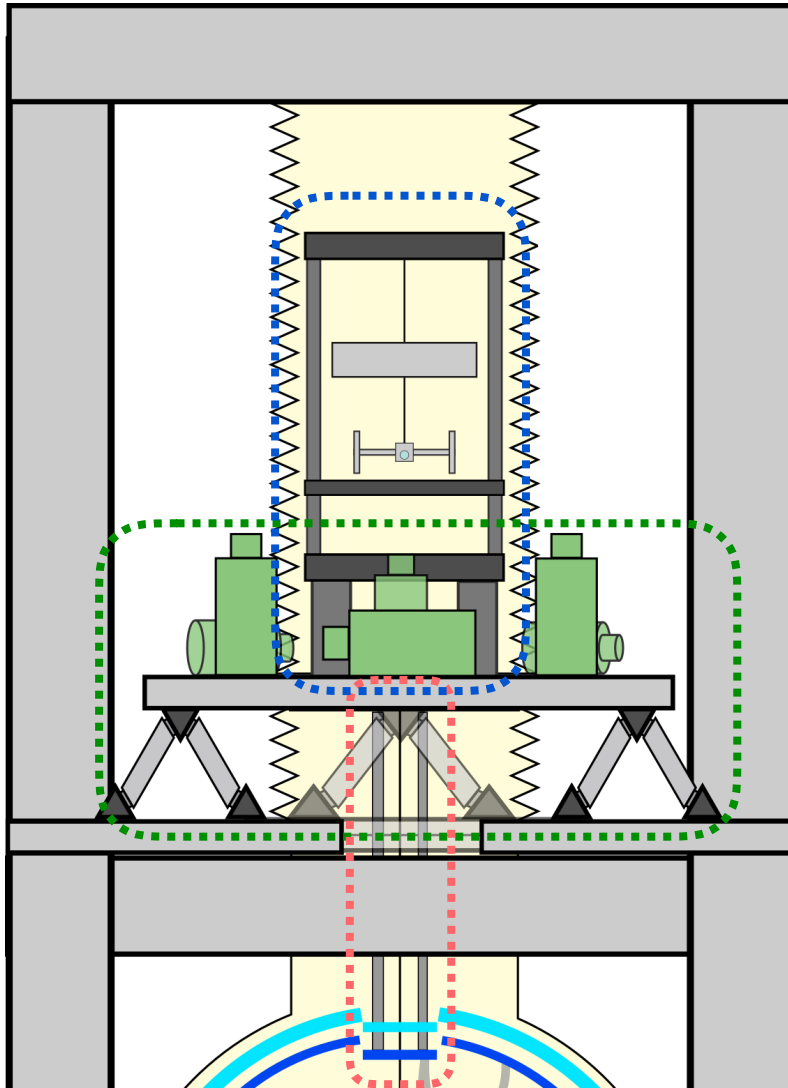
懸架点の防振

- 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

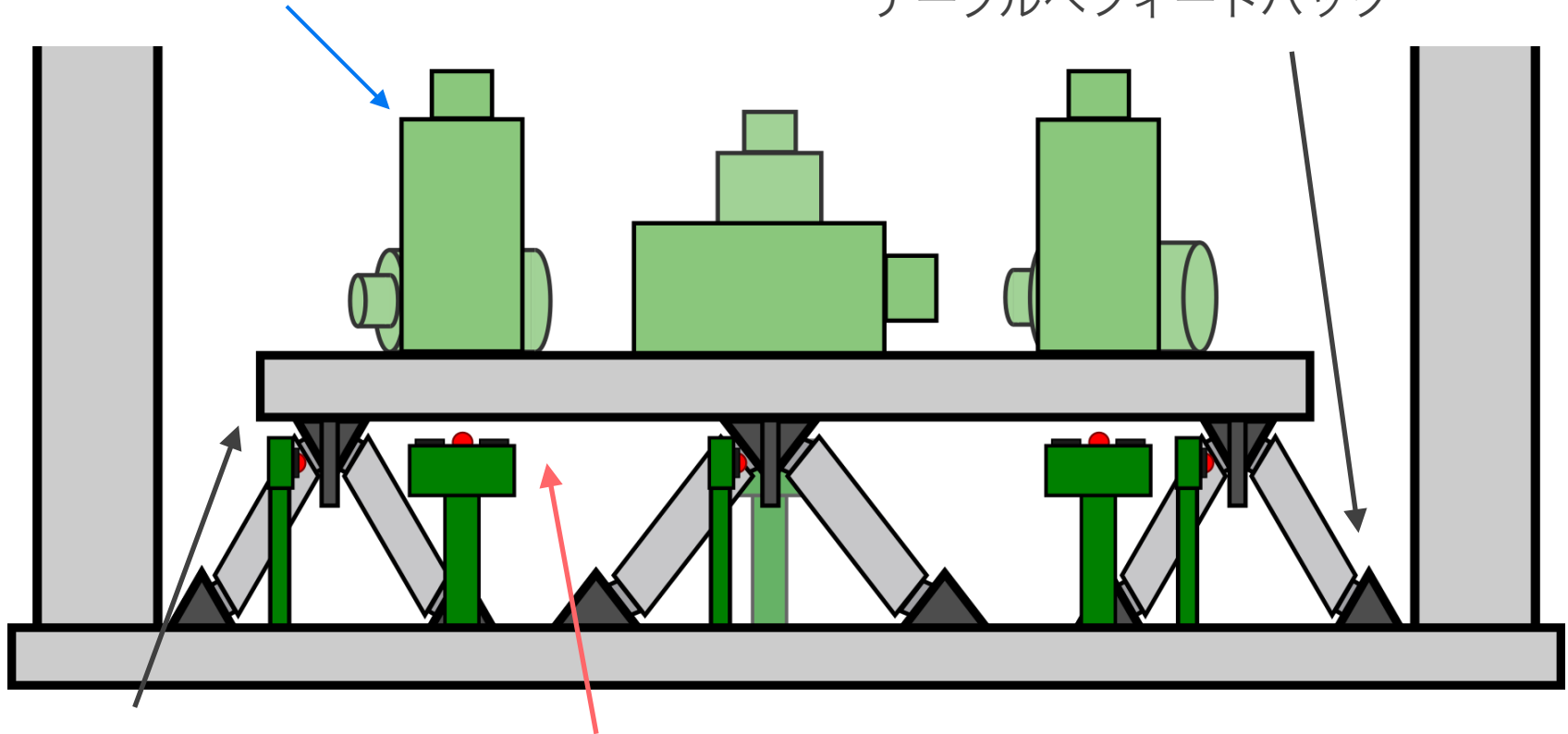
断熱ロッド

→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：
地震計，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

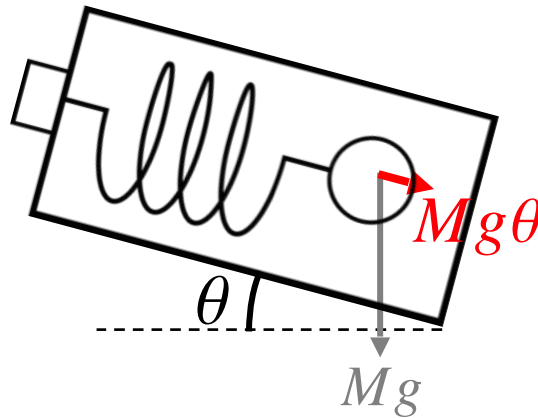
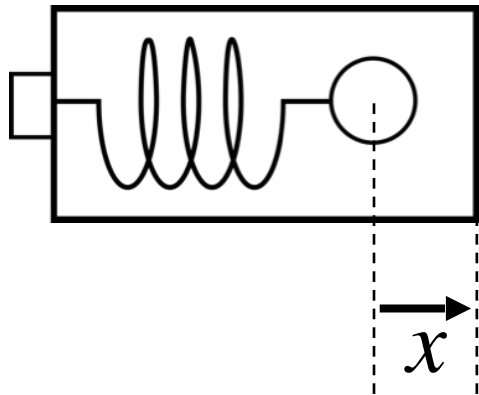


懸架テーブル：
制御対象

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

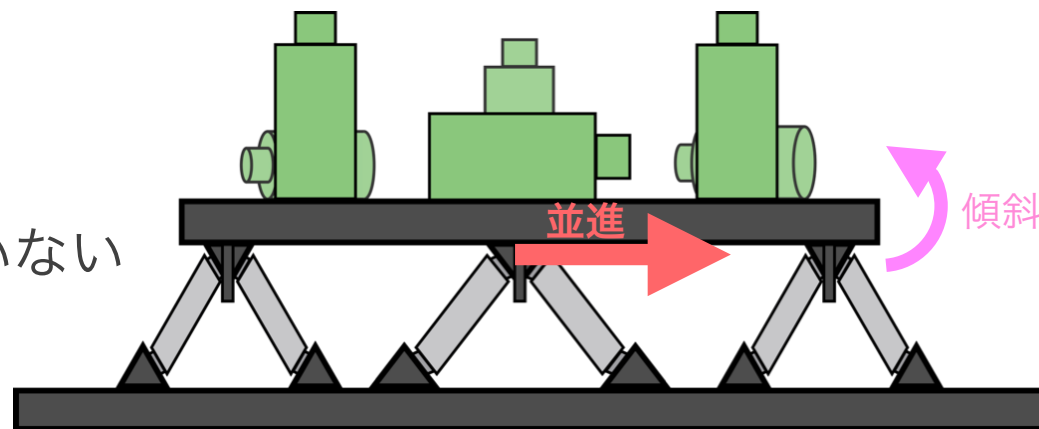
- 一般に慣性センサーは並進だけでなく傾き変動にも感度を持つ



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

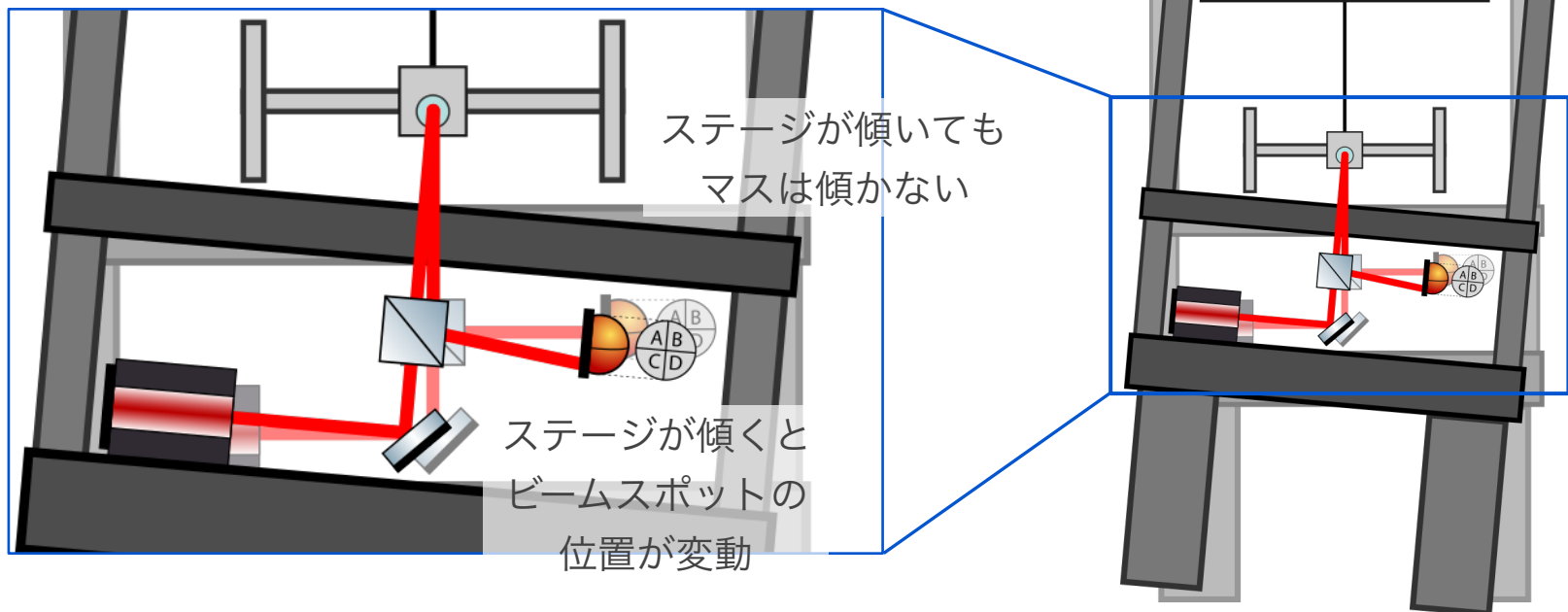
$$\tilde{x} = -\frac{g}{\omega^2}\tilde{\theta}$$

- ▶ 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

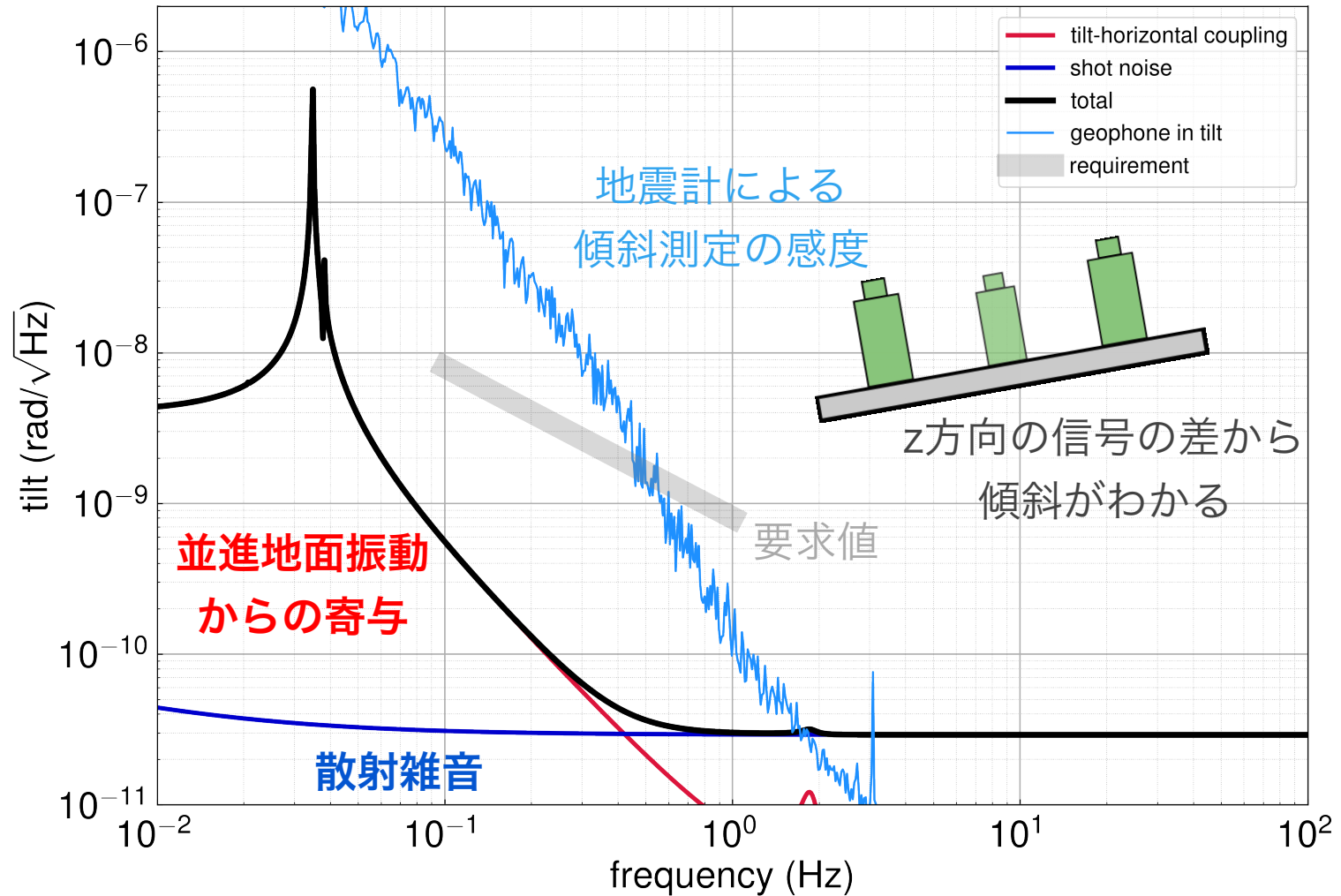


傾斜測定の実理

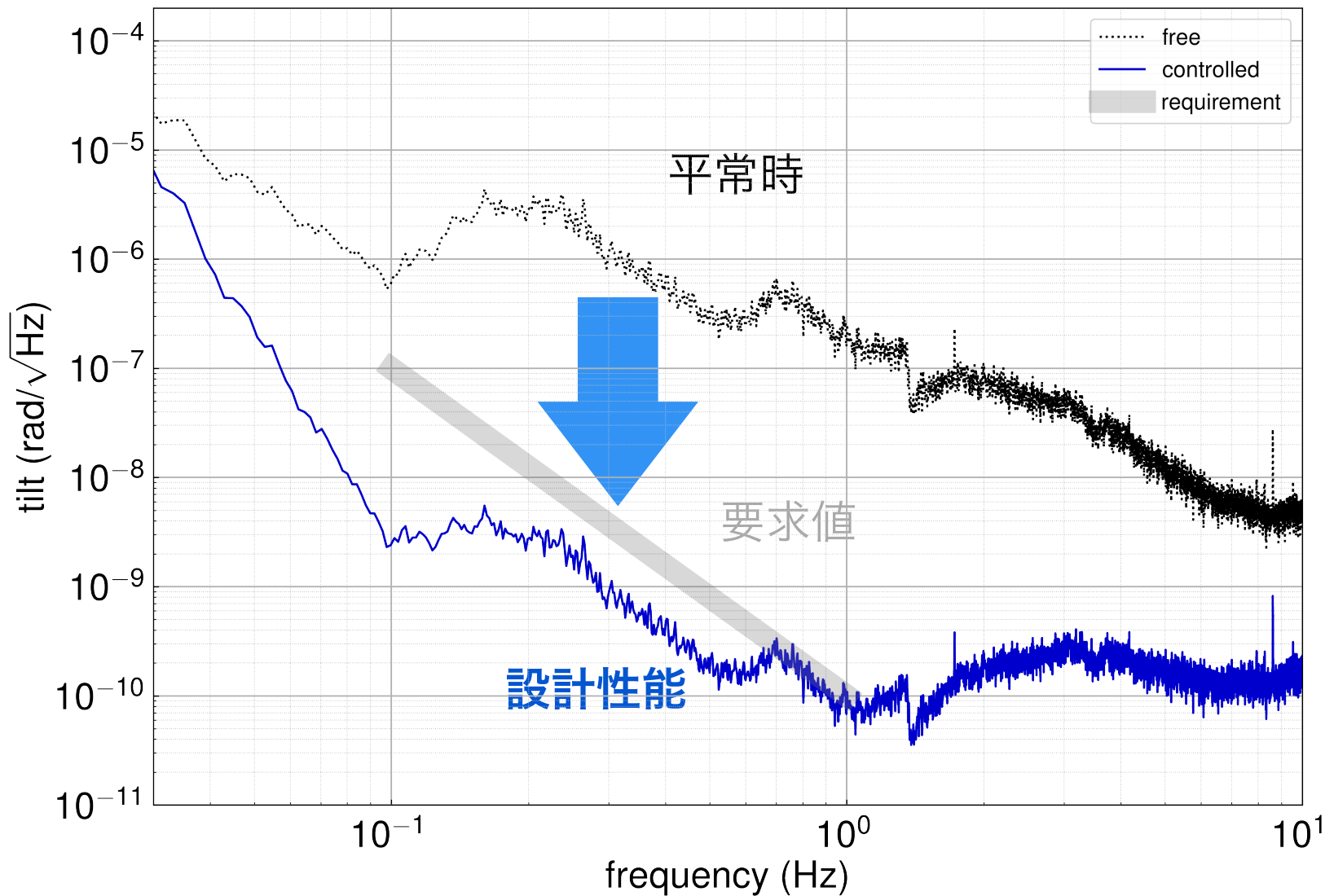
- 懸架点が傾いても振り子の傾きは変化しない
 - ▶ 懸架したマスとテーブルに固定された光学系の相対傾きから、テーブルの慣性系からの傾き変動を読み取る
- 読み取り光学系
 - ▶ 光てこを用いた角度読み取り



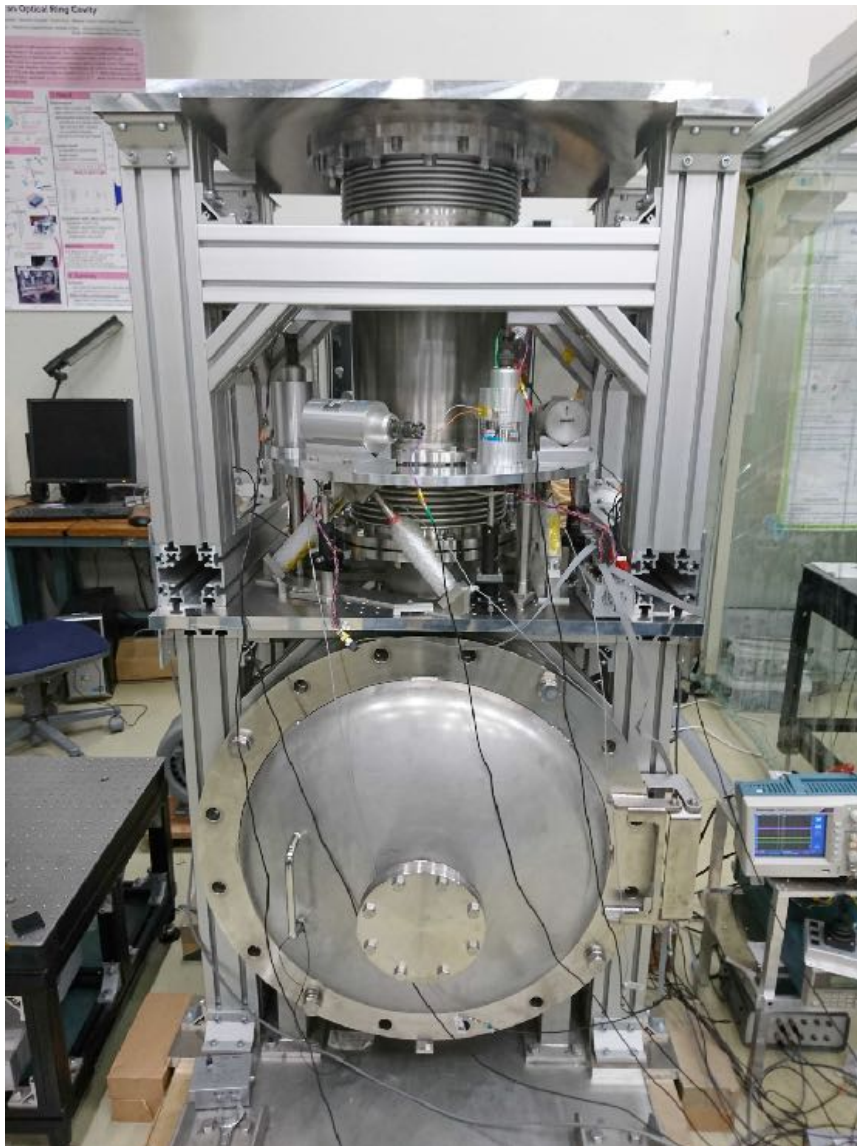
傾斜計の目標感度



設計性能



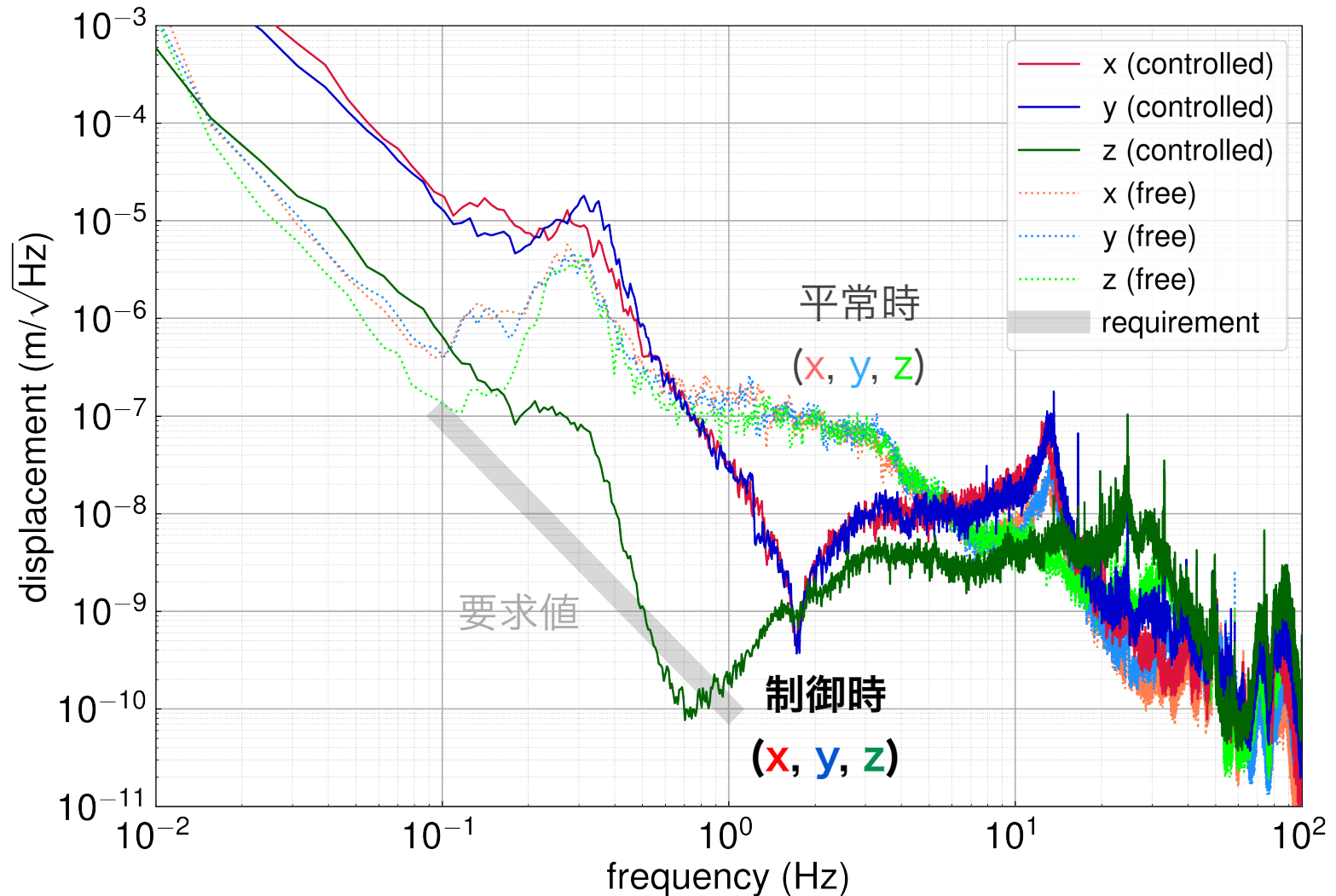
防振性能試験



同様の寸法だが、冷凍機の付いてい
はなし、AVITのみ

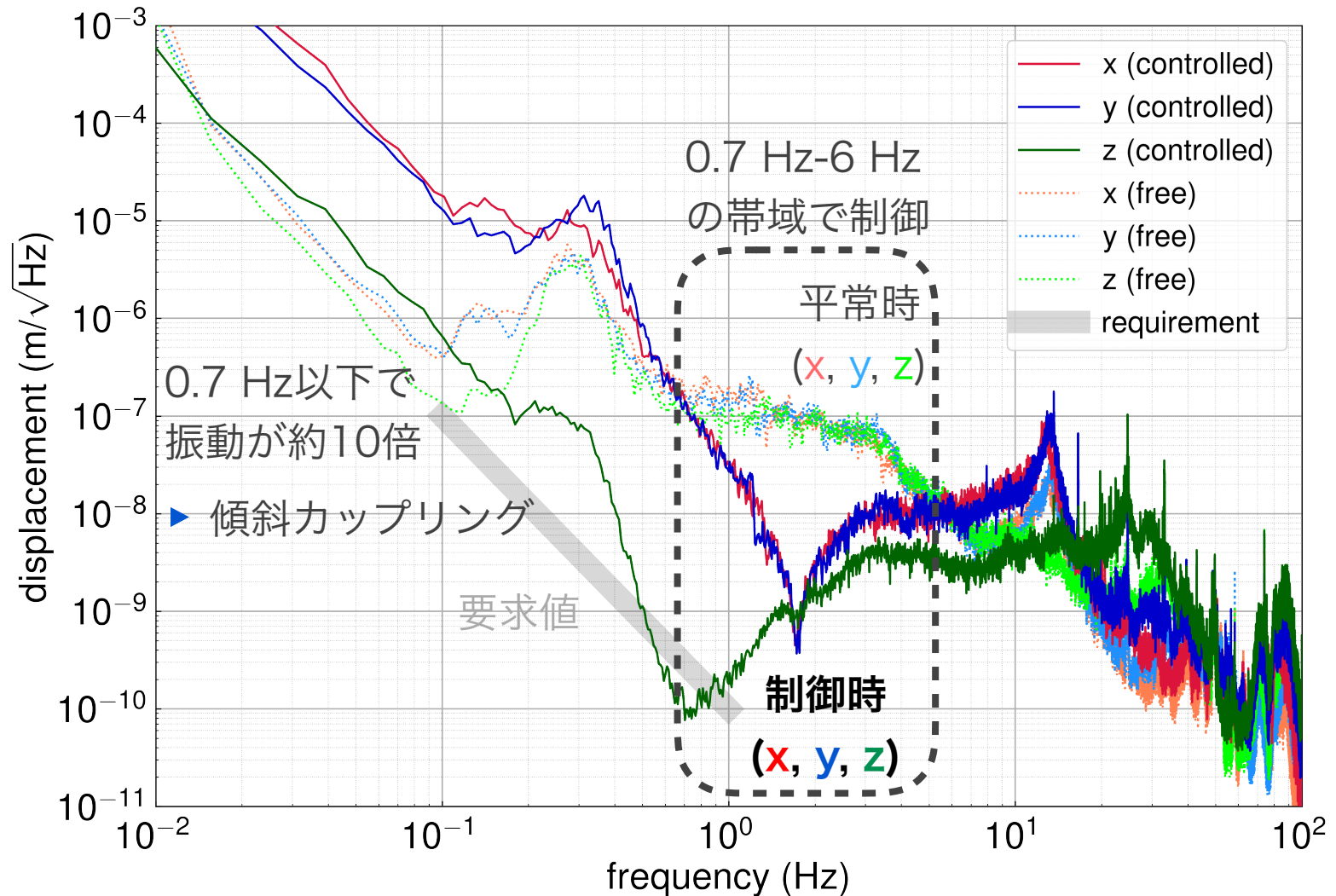
現在の防振性能

- **x, y, z**軸の3軸同時制御に成功



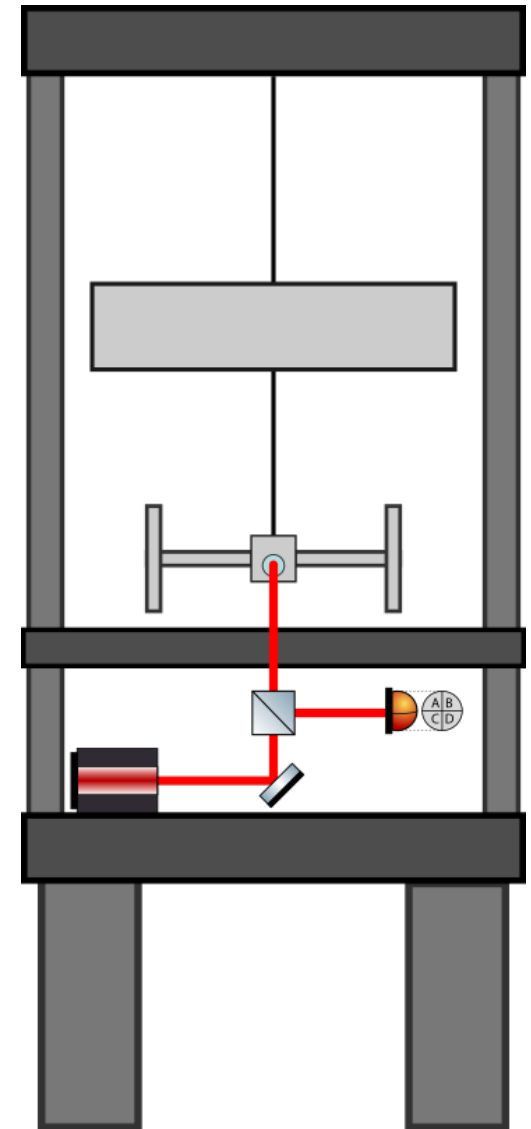
現在の防振性能

- **x**, **y**, **z**軸の3軸同時制御に成功



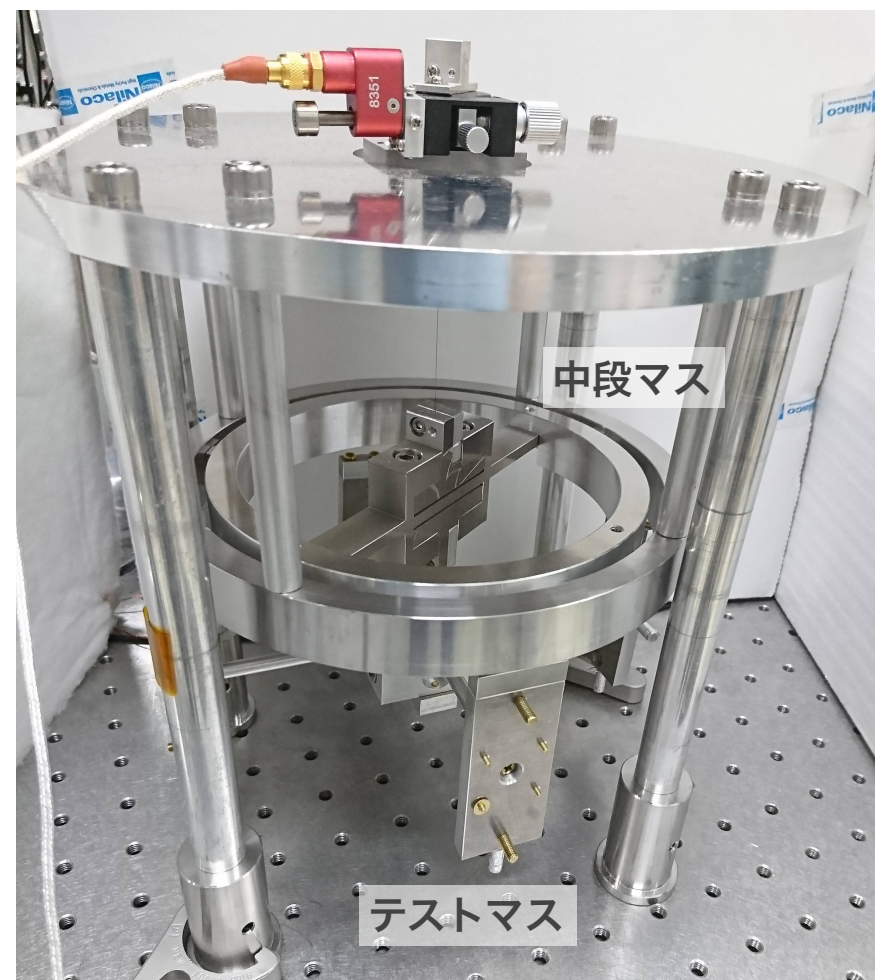
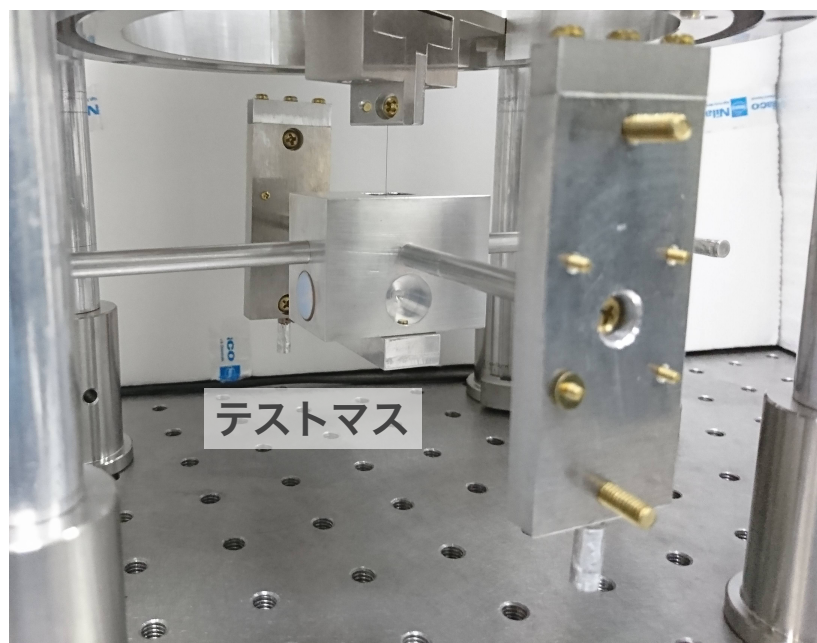
傾斜計の開発

- 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



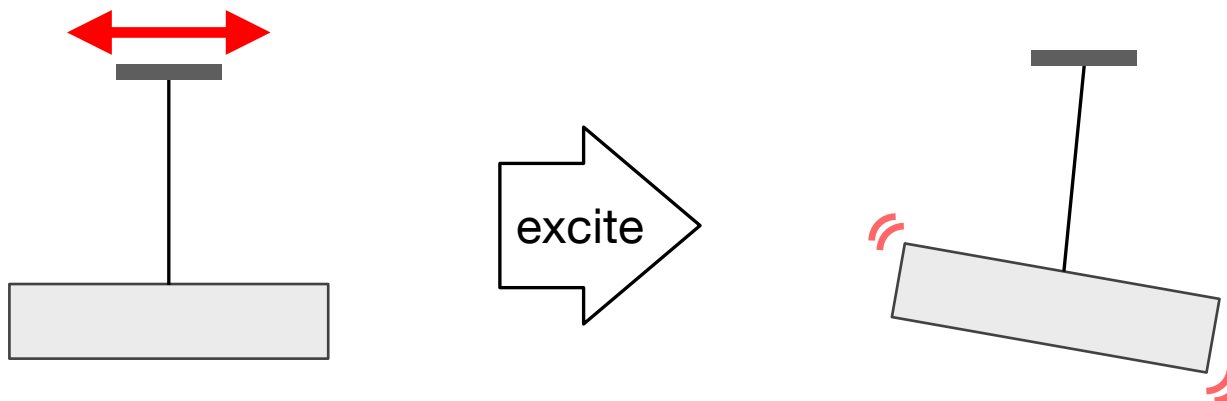
傾斜計の開発

- 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

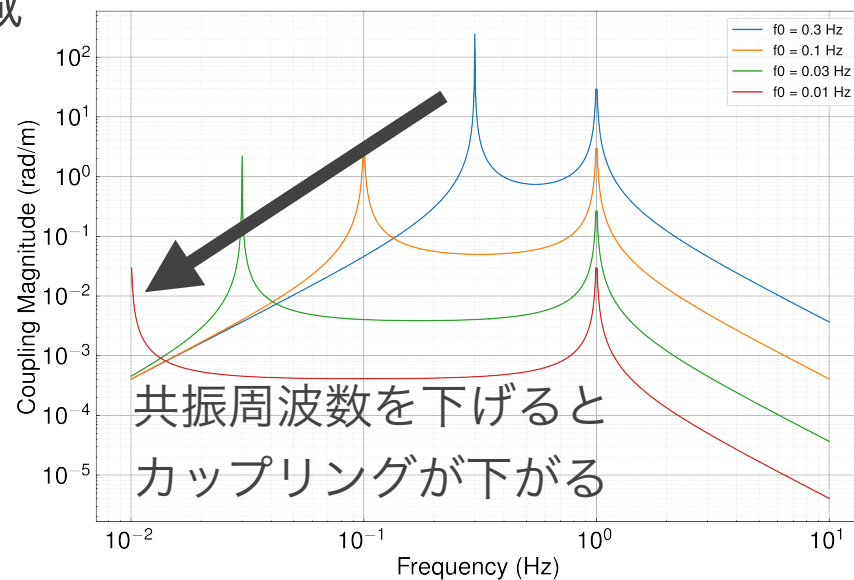


- ▶ マスの重心位置の調整により低減

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

Δz : 重心と懸架点の距離

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



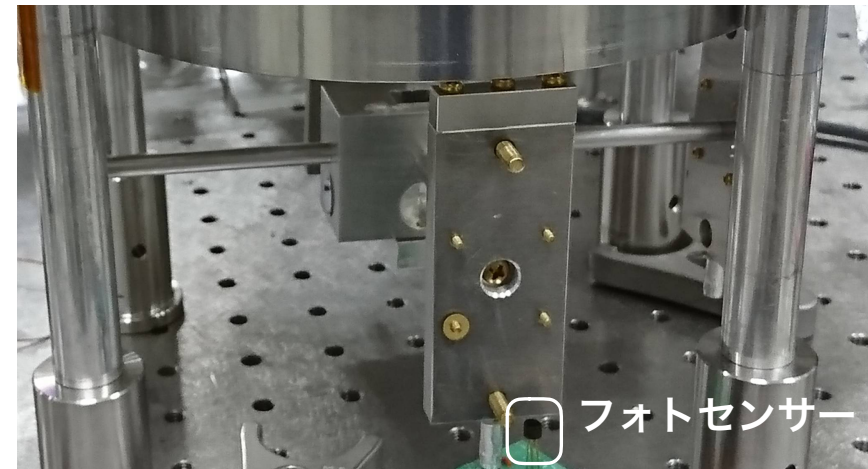
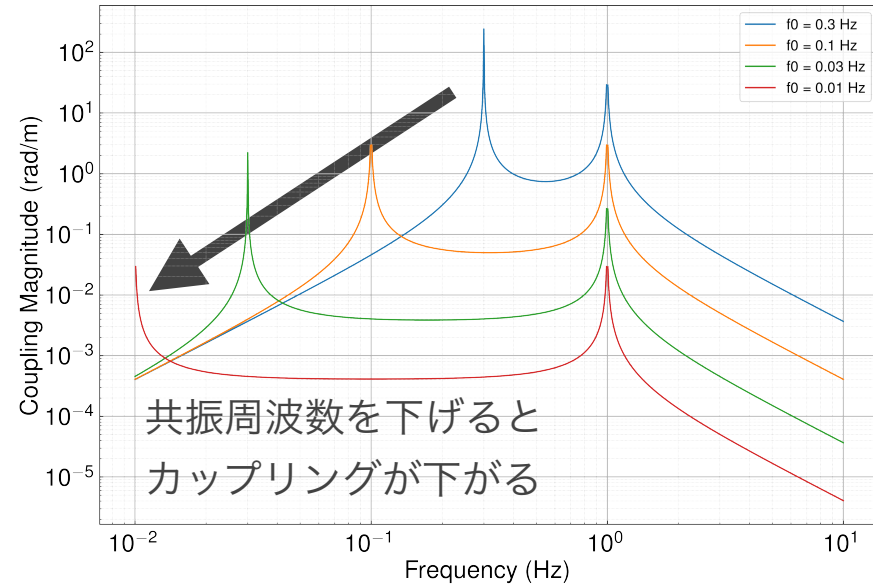
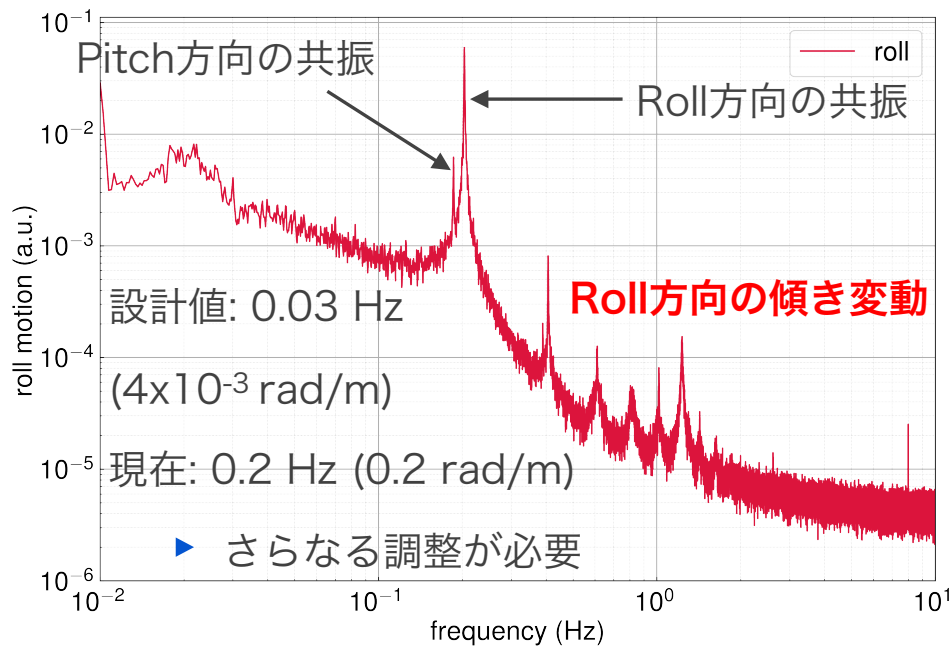
重心位置調整

- 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

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

Δz : 重心と懸架点の距離



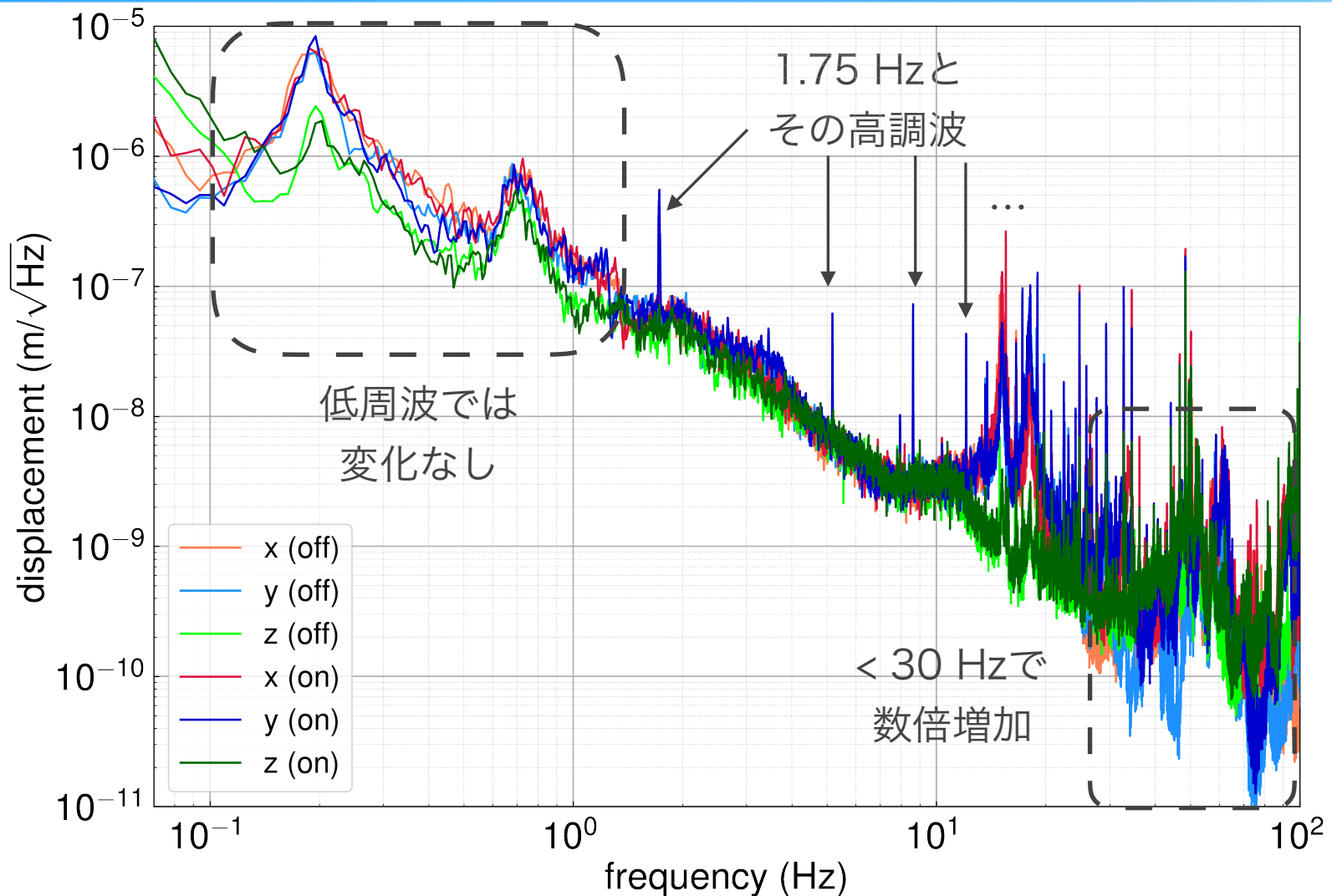
まとめ

- Phase-III TOBA実現に向けた能動防振系の開発
- 能動防振系の制御, 性能試験
 - ▶ 3軸同時制御
 - ▶ 制御帯域: 0.7 ~ 6 Hz
 - ▶ 最大で防振比1/1000
 - ▶ 0.7 Hzで10倍に加振してしまう
- 傾斜計の開発
 - ▶ 懸架系の構築
 - ▶ 傾斜モードの共振周波数を0.2 Hzまで低減

今後の展望

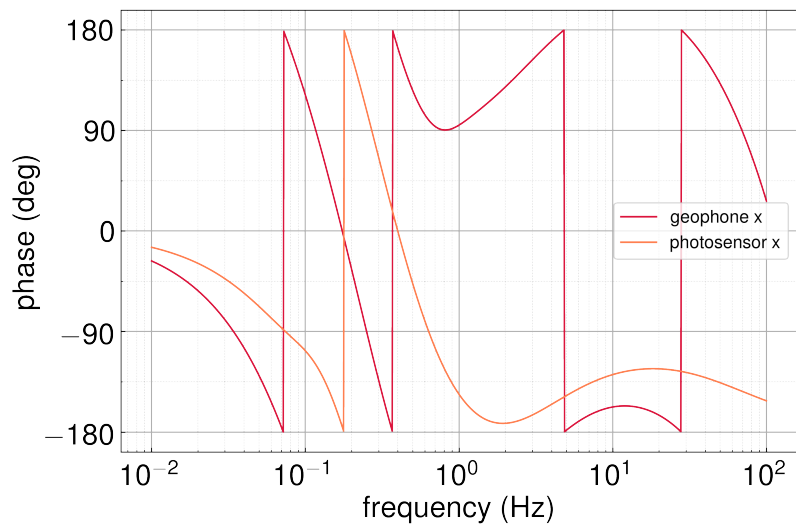
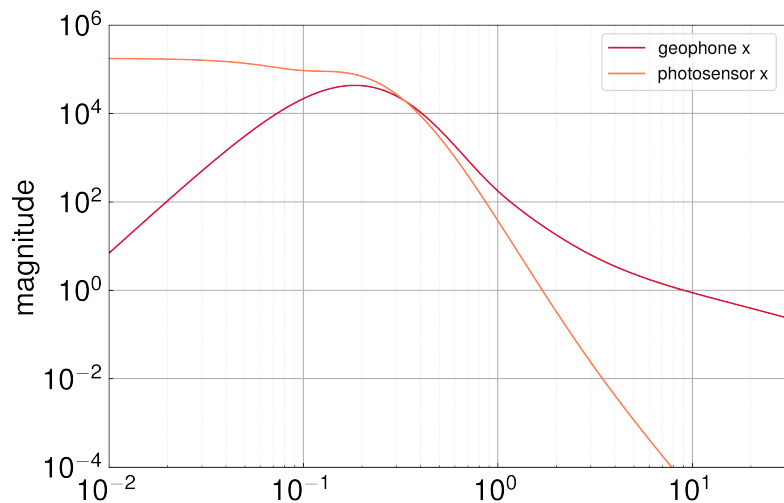
- 重心位置の調整
 - ▶ 共振周波数を ~ 0.03 Hz程度にまで下げる
- 光学系の構築を行う
- 性能評価
 - ▶ 懸架系, 光学系の統合
 - ▶ 傾き変動を測定
- AVITにインストールし, 能動防振の性能を向上させる

冷凍機による地面振動の導入

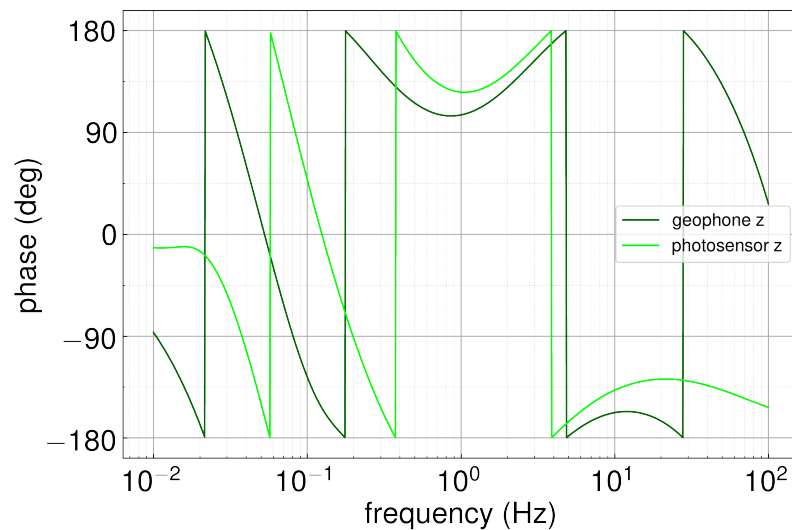
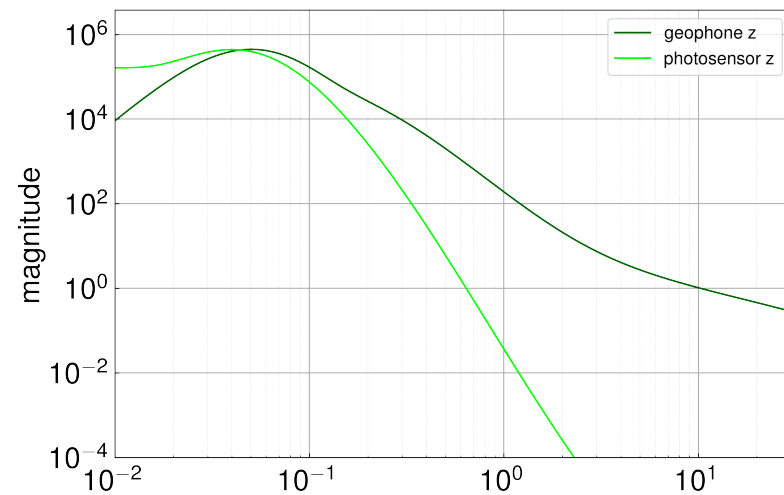


冷凍機off(x, y, z), on(x, y, z)の場合の地面振動

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

↓ アクチュエータから地震計への応答の振幅と位相(低減前後)

