

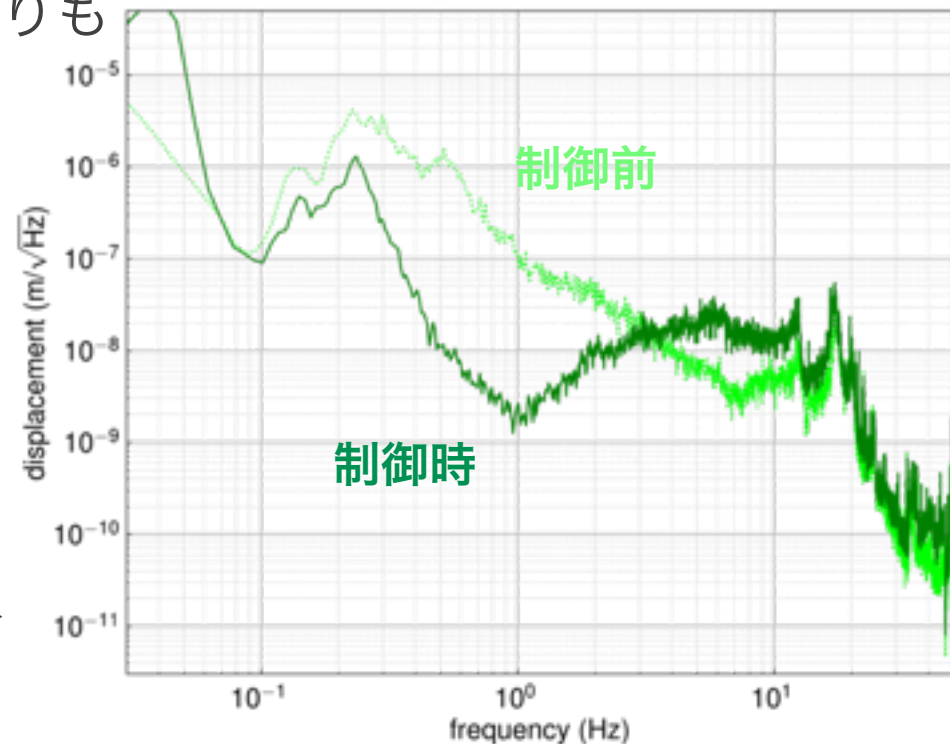
ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBAの開発(13): 能動防振系の開発

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
- プロトタイプ開発に向けて，能動防振系の開発を行った
- 制御帯域を先行研究(~1 Hz)よりも低周波側へ広げることに成功
- 最大で防振比~1/100を実現

地面振動スペクトル →



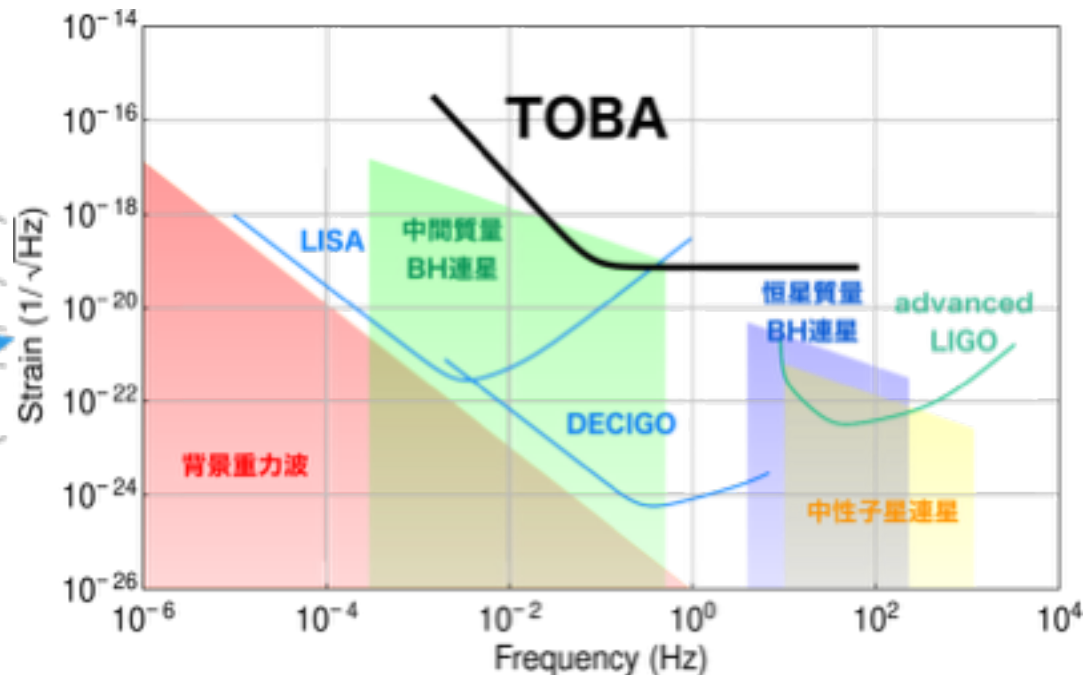
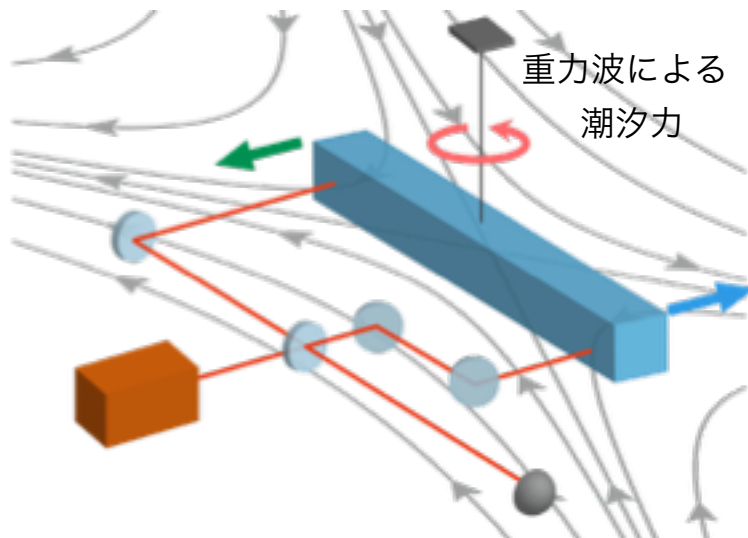
Contents

- TOBAについて
 - ▶ Overview
 - ▶ Phase-III TOBA
- 防振系の設計
 - ▶ 先行研究
 - ▶ 問題点
- 防振系の性能試験
- まとめ, 今後の展望

ねじれ振り子型重力波望遠鏡TOBA

ねじれ型振り子重力波望遠鏡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 $h \sim 10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$

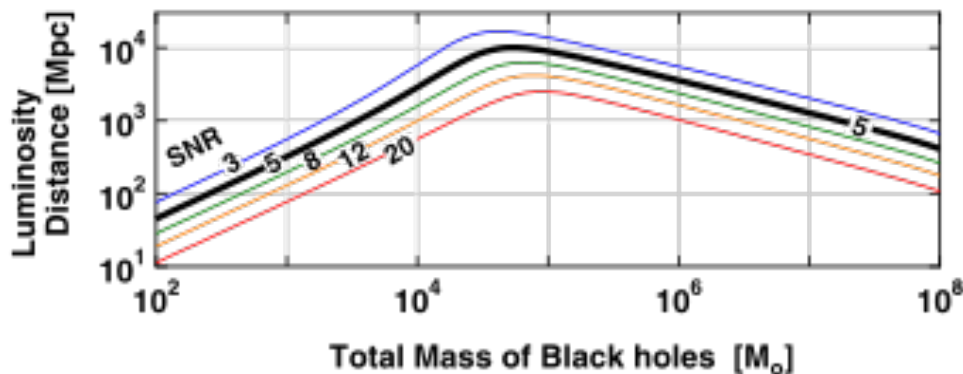


TOBAのサイエンス

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



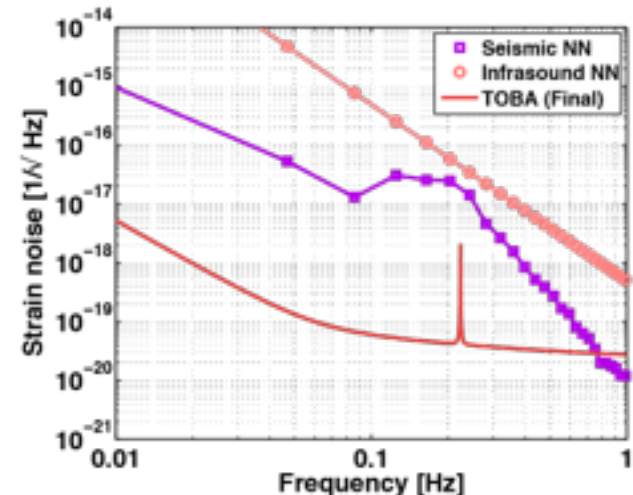
M. Ando et al., PRL, 105, 161101(2010)

- 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

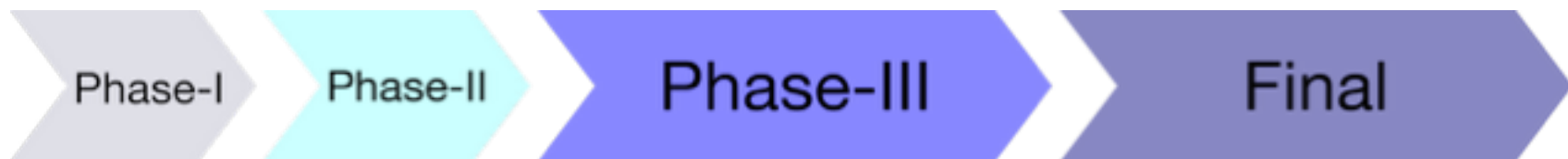
- Newtonian Noise
 - ▶ モデル検証
 - ▶ 第3世代レーザー干渉計のR&D



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

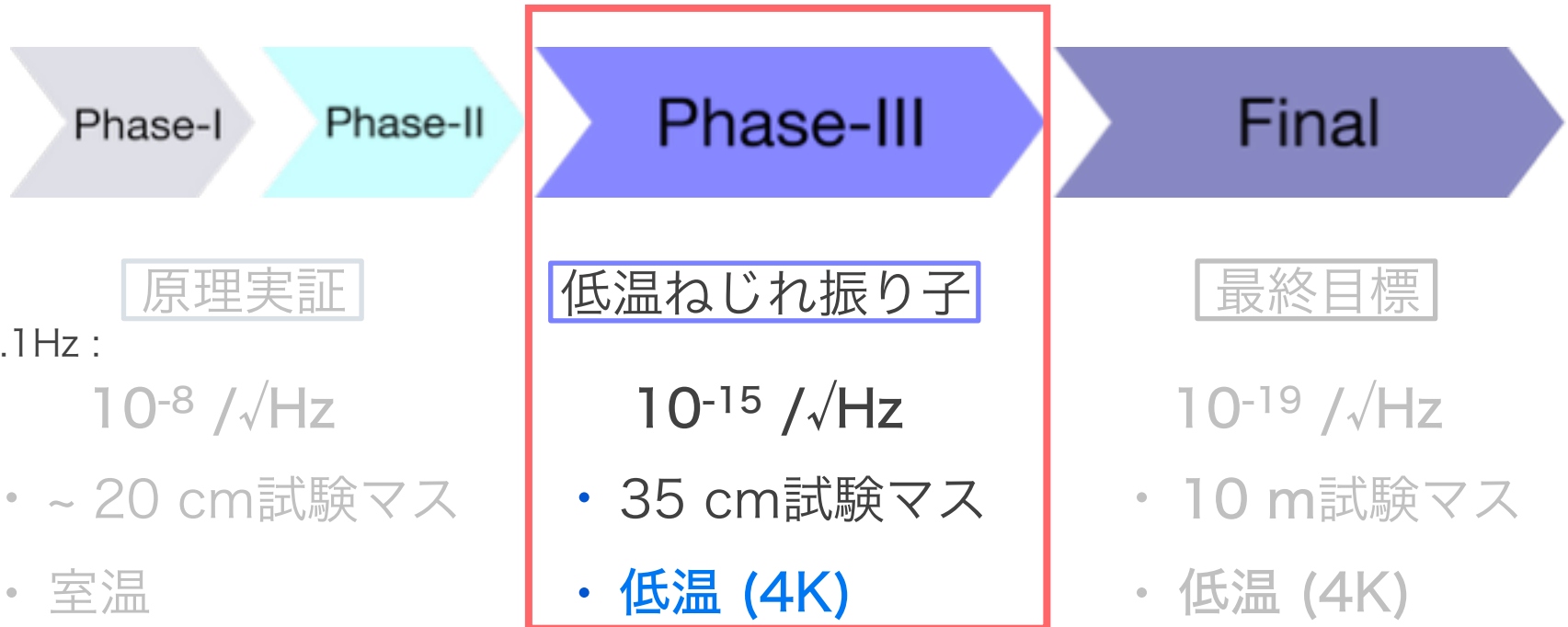
10^{-19} / $\sqrt{\text{Hz}}$

- 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



@ 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)



現在: Phase-III TOBAの開発

これまで:

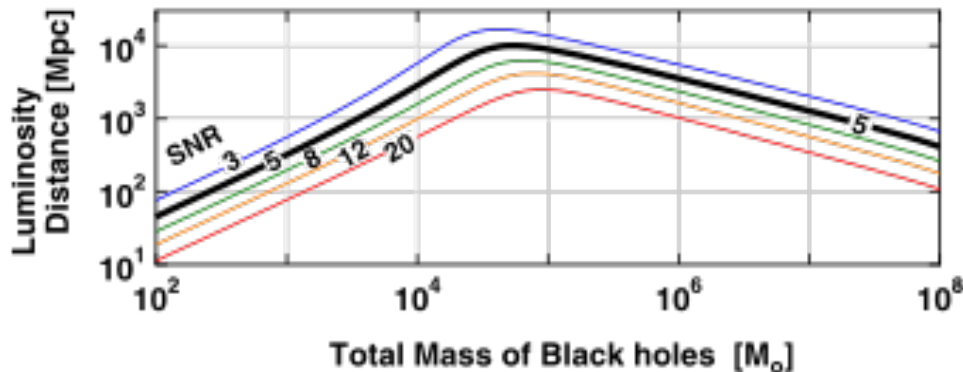
Phase-III実現に向けた, 障害となる雑音源の特定とその低減手法の確立

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



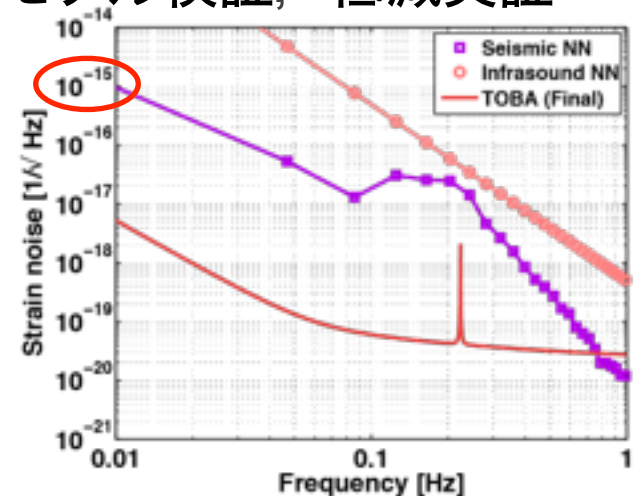
M. Ando et al., PRL, 105, 161101(2010)

- 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

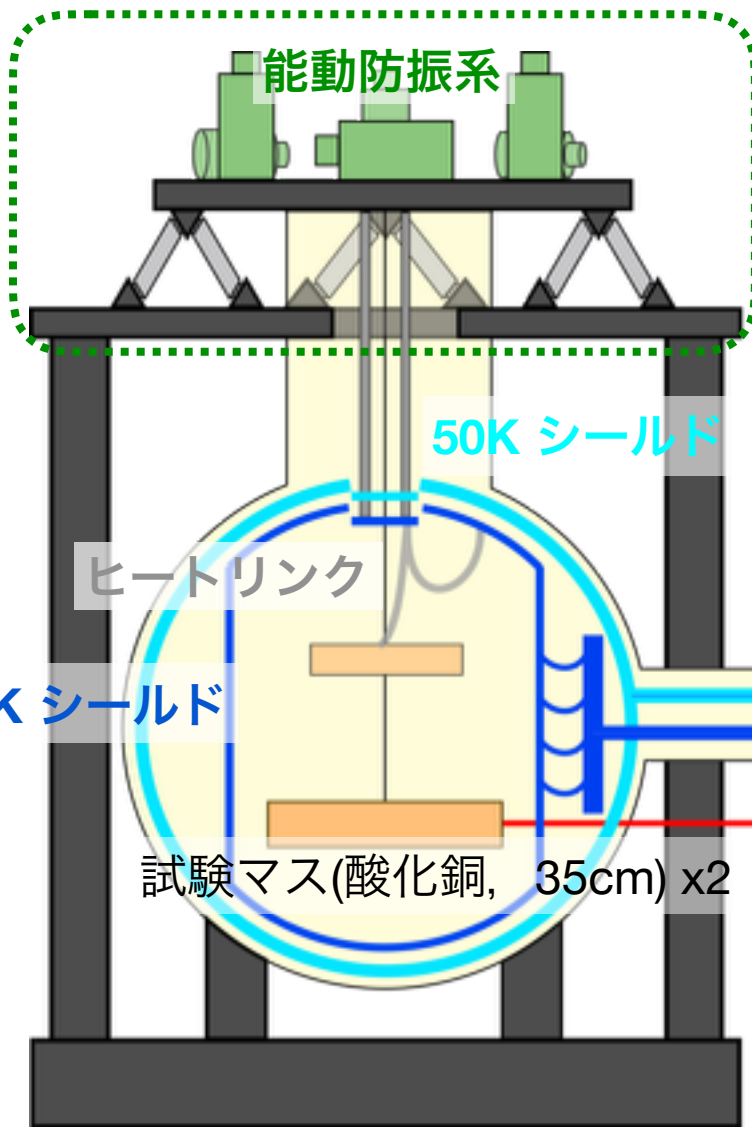
- Newtonian Noise
 - ▶ モデル検証, 低減実証



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

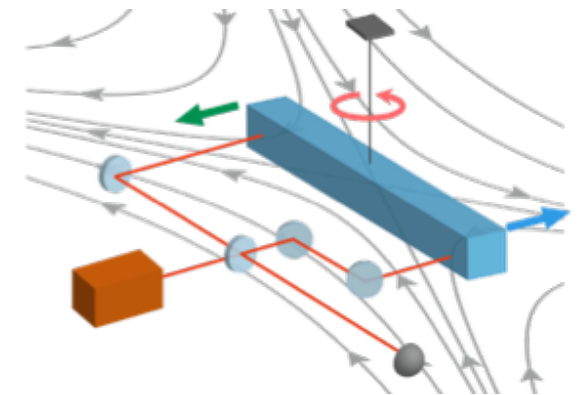
Phase-III TOBAの構成



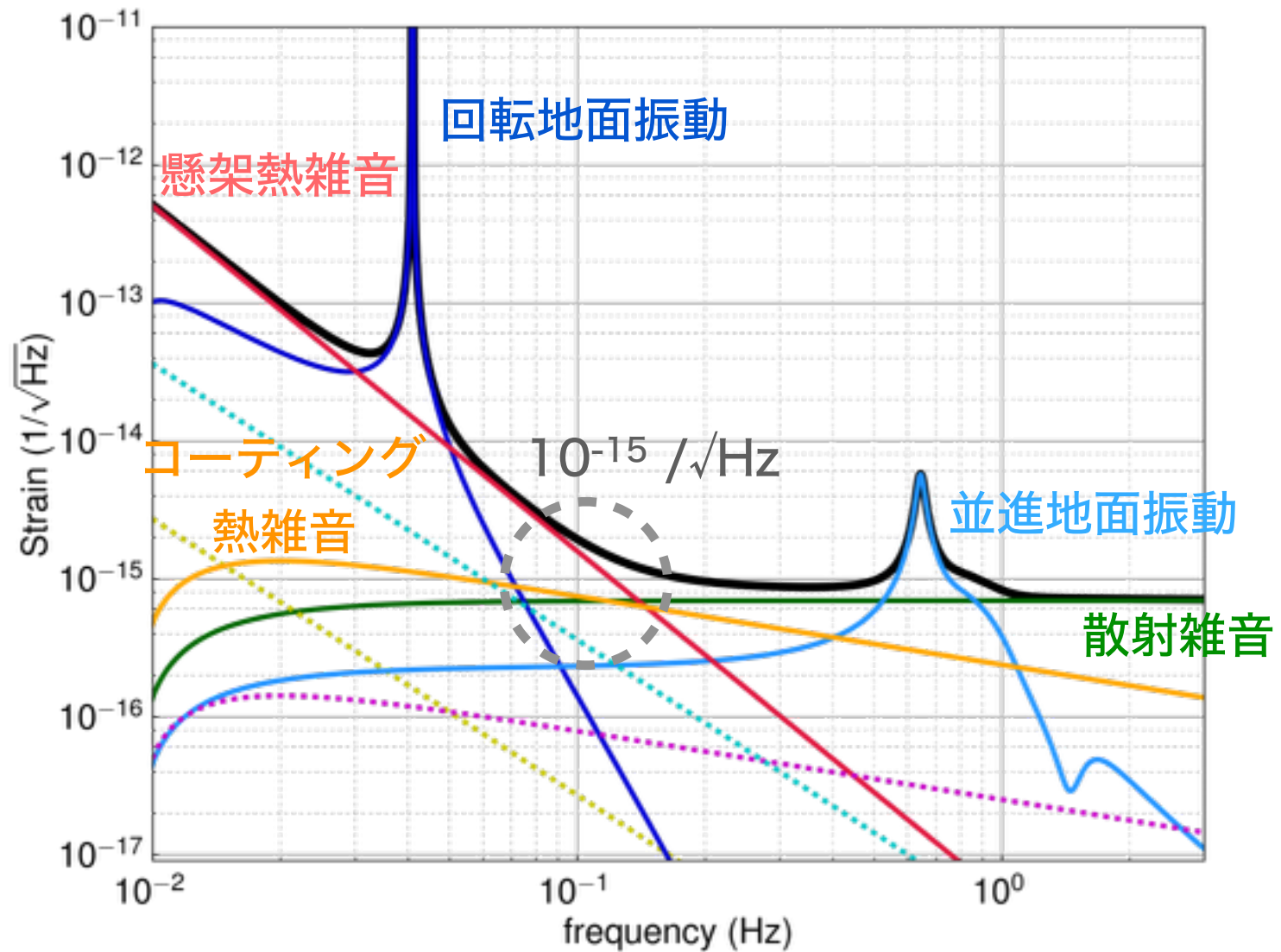
低温系でのねじれ振り子の実証

- 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
- 地震計とピエゾアクチュエータによる能動防振系

パルスチューブ
冷凍機



目標感度



目標感度のための課題

・ 低温懸架系

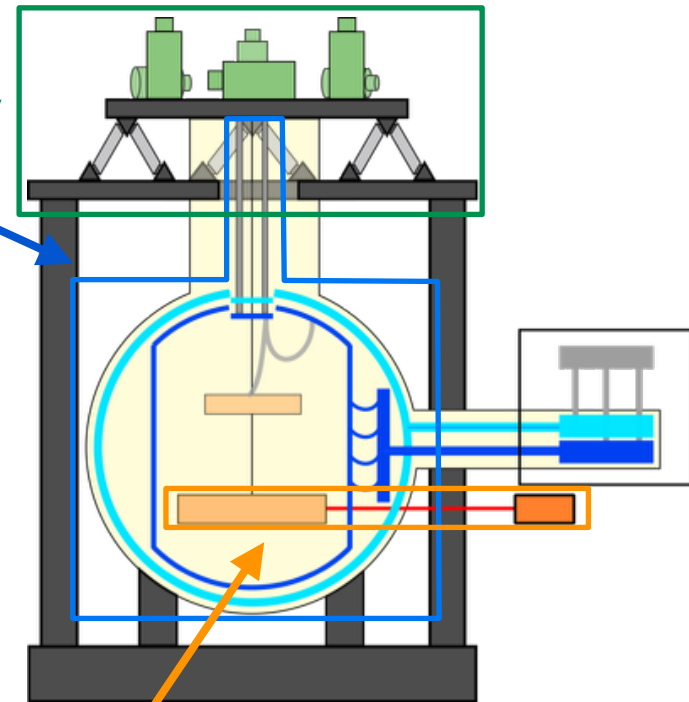
- ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却
- ▶ Q値: 4 Kで $Q = 10^8$

・ 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 (17pK407-12)
- ▶ Q値: 4 Kで $Q = 10^8$ → Ooi氏 (17pK407-13)

• 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

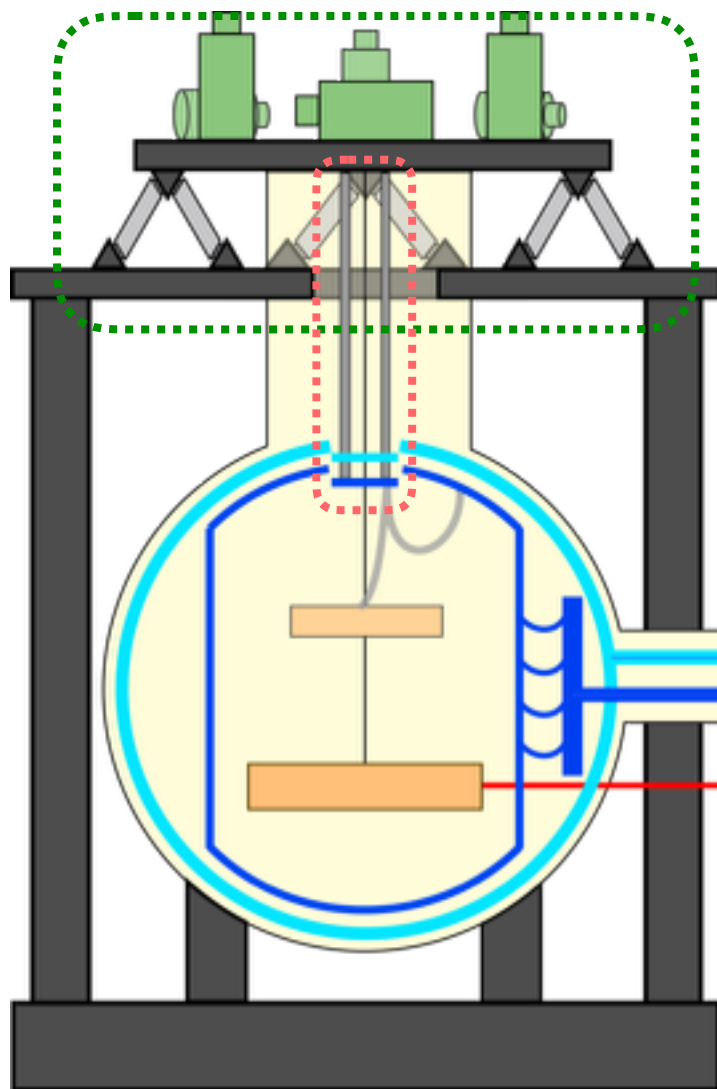
能動防振

→ 本講演

• 光学系

- ▶ Wave Front Sensorを応用した読み取り系 → 宮崎氏 (17pK407-11)

能動防振系の構成



Active Vibration Isolation Stage (AVIT)

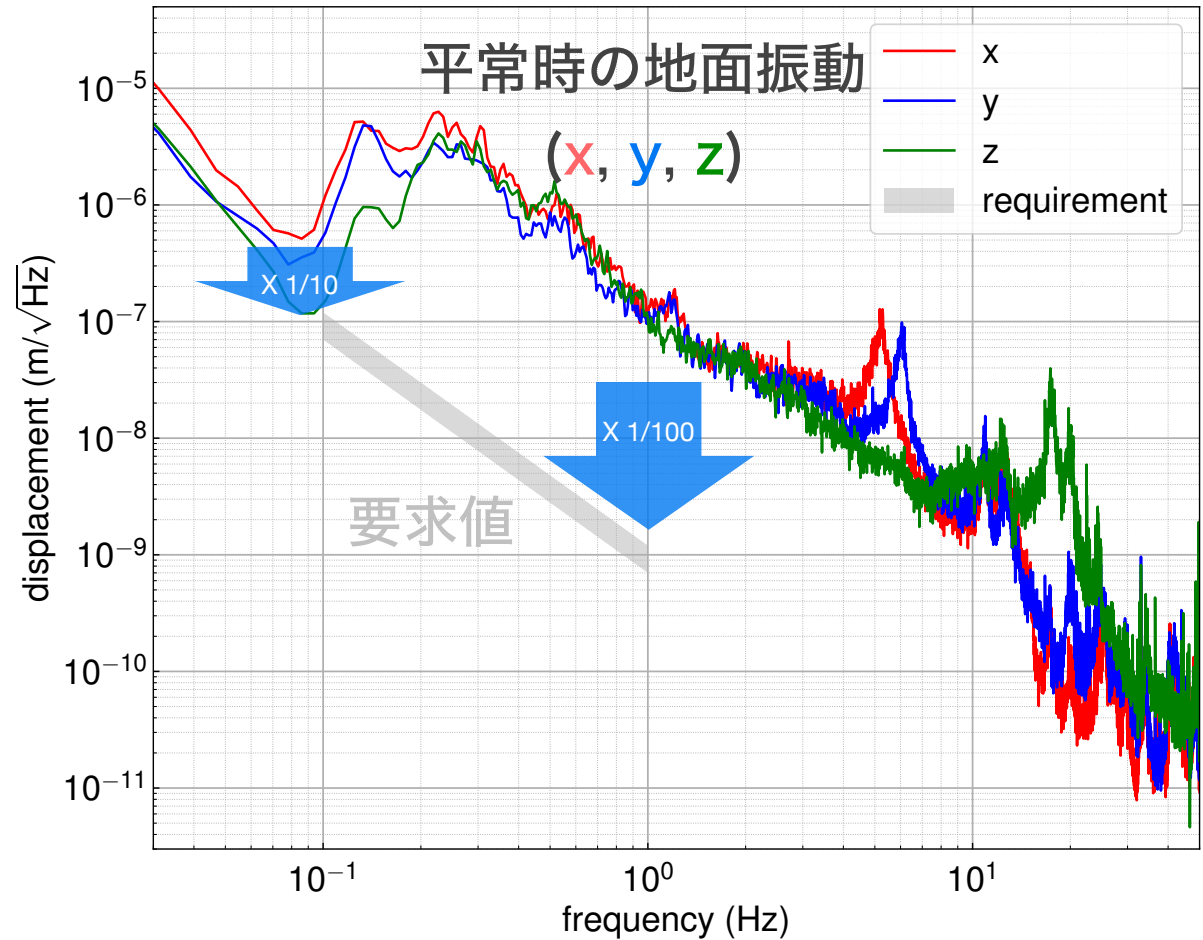
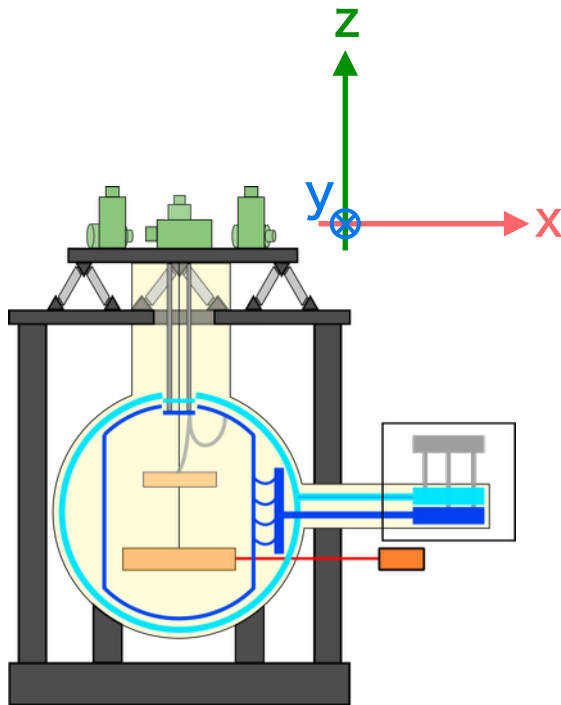
→懸架点の防振

断熱ロッド

→冷凍機から導入される振動の低減

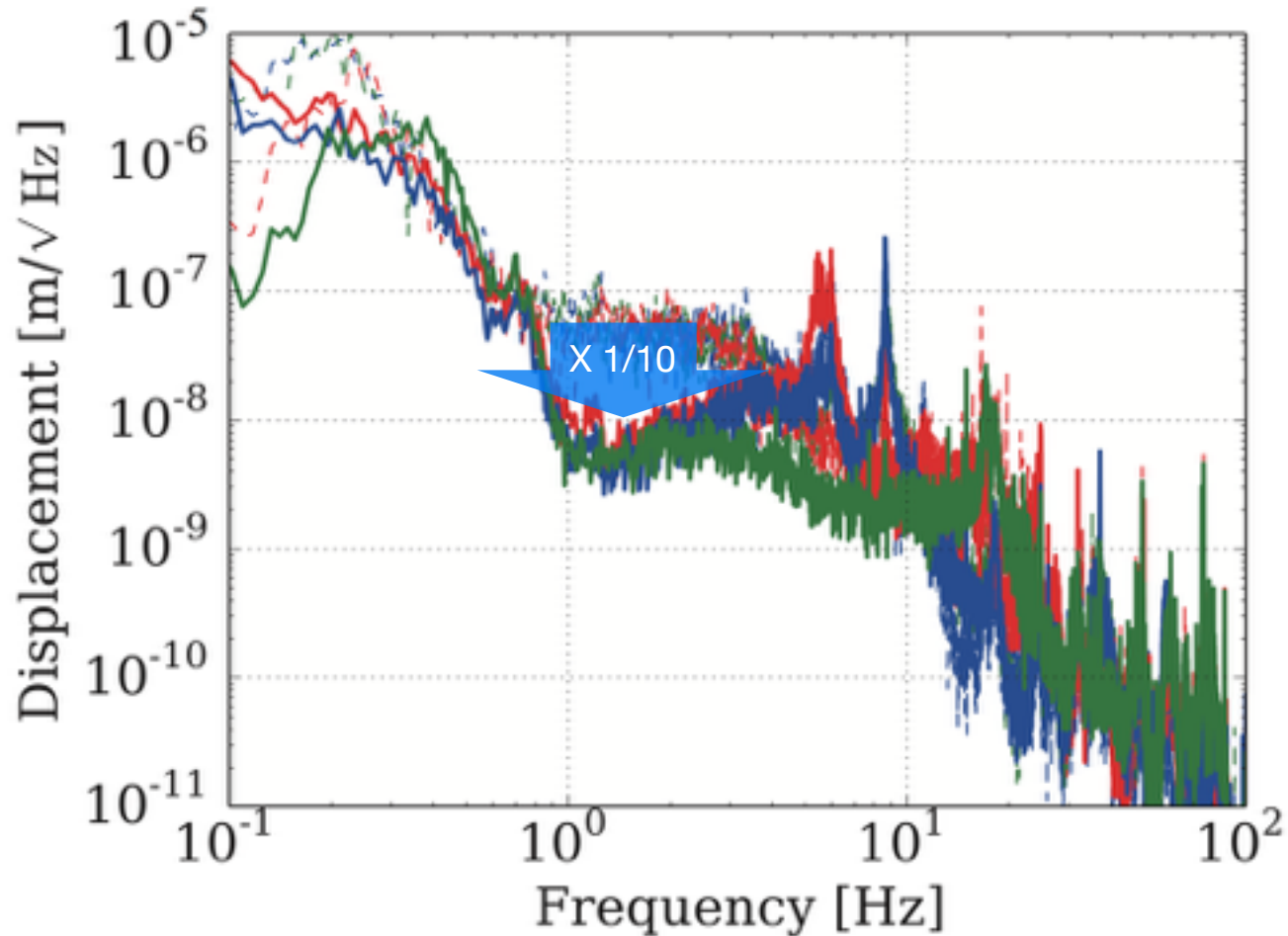
懸架点の防振

- 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1/100 程度の防振が必要



先行研究

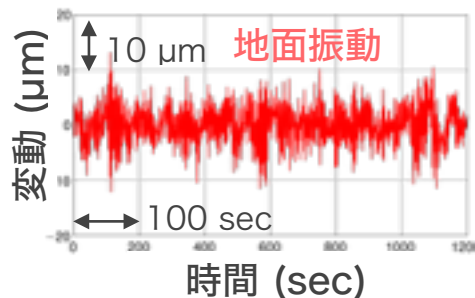
- x, y, z軸の並進振動を同時に制御
- 1 Hzで1/10の低減に成功



先行研究における問題点

- ・ 制御帯域は0.5 Hz ~ 7 Hzに制限

- ▶ (1) 低周波→アクチュエータのレンジ不足

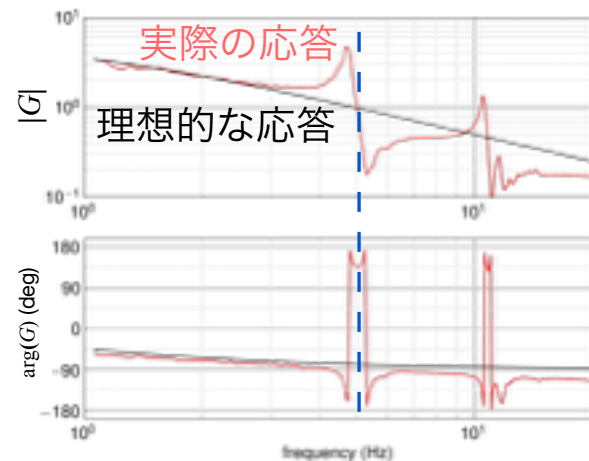


3軸同時制御:
 $18 \times \sqrt{3} \sim 30\mu\text{m}$
 アクチュエータの
 レンジ: $30\mu\text{m}$

- ▶ (2) 高周波→フレームの共振

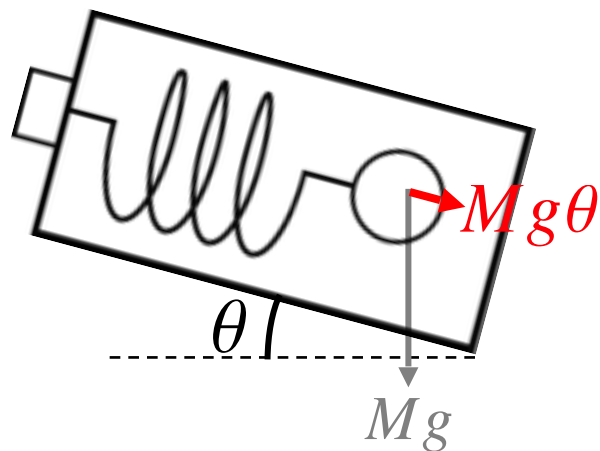
$$\underset{\text{制御後}}{\tilde{x}} = \frac{1}{1+G} \underset{\text{制御前}}{\tilde{x}_0}$$

G : オープンループ伝達関数
 $G = -1$ となると発散



- ・ 低周波数帯での感度

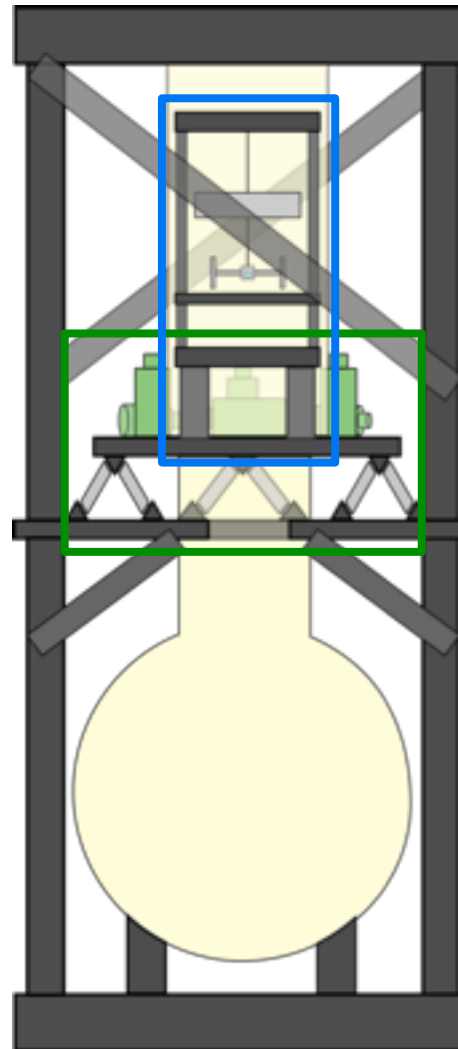
- ▶ (3) 傾き変動が変位センサーとカップル



防振系の全体図

能動防振系

- 懸架テーブル（制御対象）
- 変位センサー
- アクチュエータ
 - ▶ アクチュエータをより
レンジの大きなもので構成
 - ▶ 制御帯域を底周波数側へ拡大



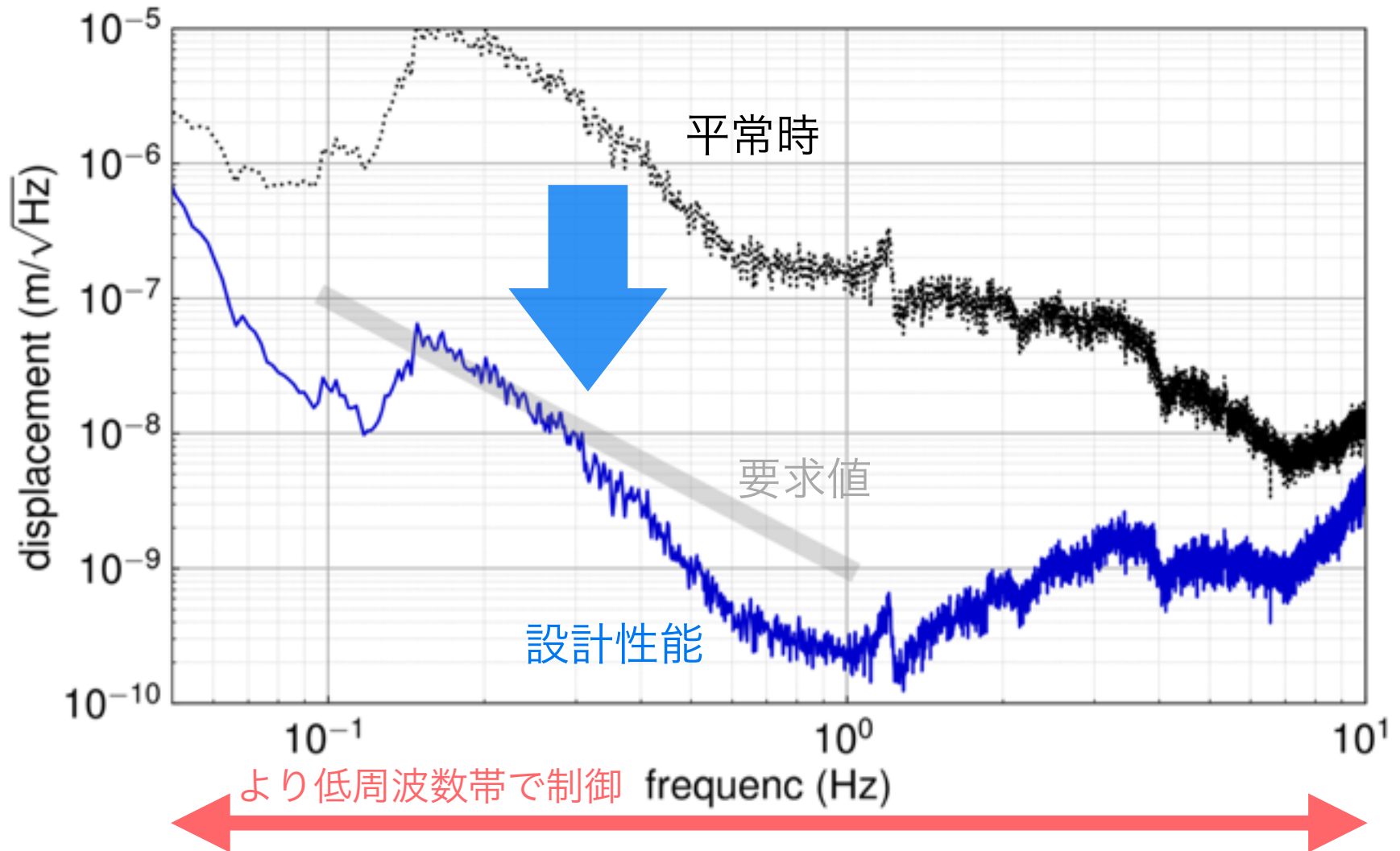
傾斜系

- 懸架テーブルの傾き変動を測定
- 傾き変動を制御
 - ▶ カップリングを回避

フレームの補強

- 共振モードの共振周波数を上昇
 - ▶ 制御帯域を高周波数側へ拡大

設計性能

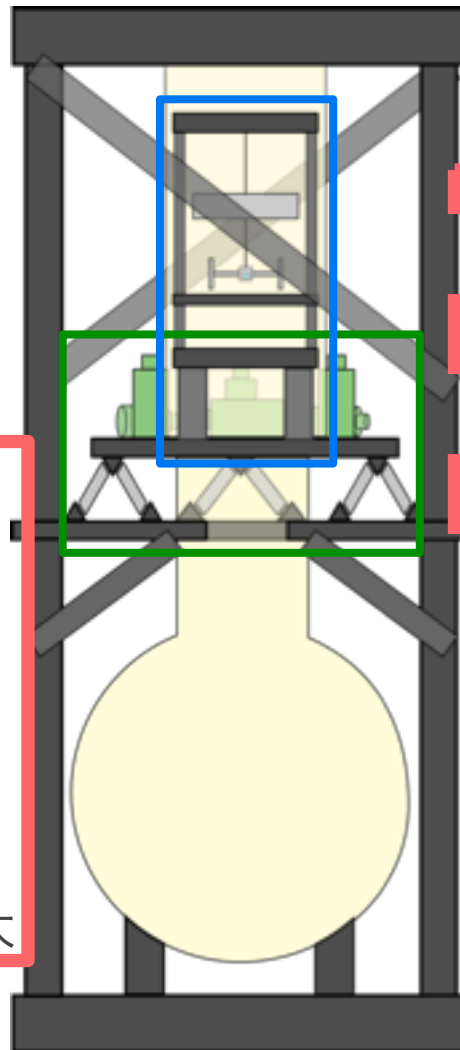


防振系の全体図

メインに開発

能動防振系

- 懸架テーブル（制御対象）
- 変位センサー
- アクチュエータ
 - ▶ アクチュエータをより
レンジの大きなもので構成
 - ▶ 制御帯域を低周波数側へ拡大



一部開発

傾斜系

- 懸架テーブルの傾き変動を測定
- 傾き変動を制御
 - ▶ カップリングを回避

フレームの補強

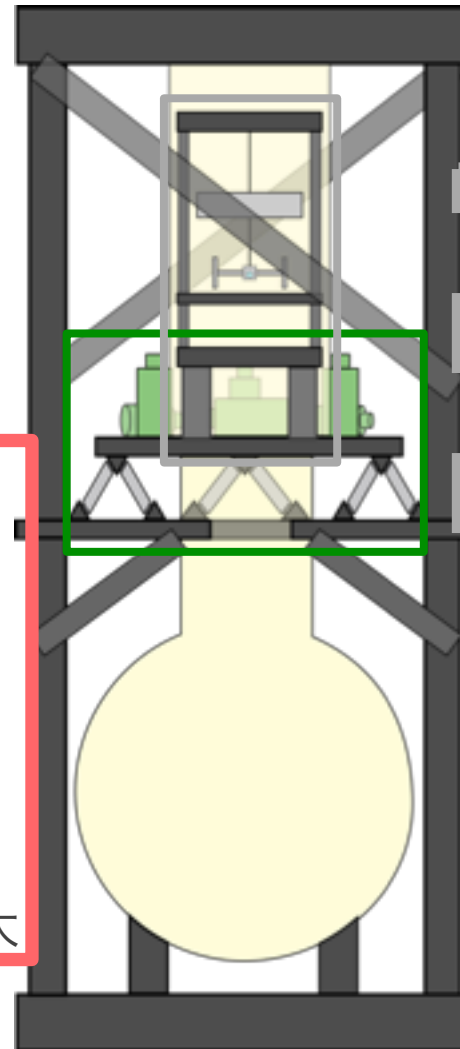
- 共振モードの共振周波数を上昇
 - ▶ 制御帯域を高周波数側へ拡大

防振系の全体図

メインに開発

能動防振系

- 懸架テーブル（制御対象）
- 変位センサー
- アクチュエータ
 - ▶ アクチュエータをより
レンジの大きなもので構成
 - ▶ 制御帯域を低周波数側へ拡大



一部開発

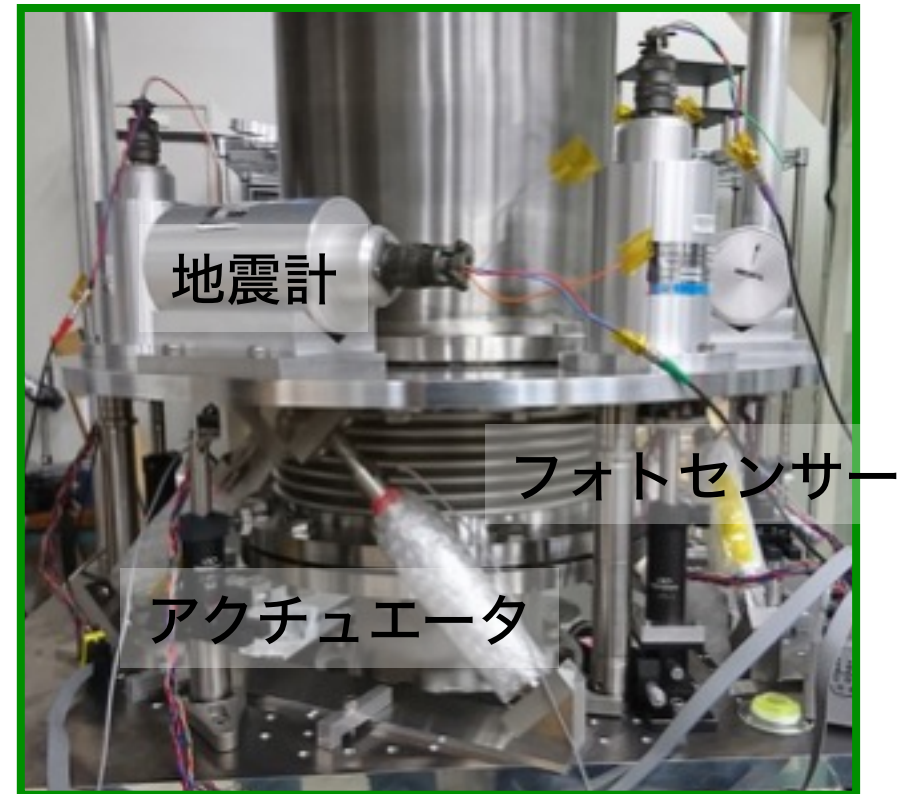
傾斜系

- 懸架テーブルの傾き変動を測定
- 傾き変動を制御
 - ▶ カップリングを回避

フレームの補強

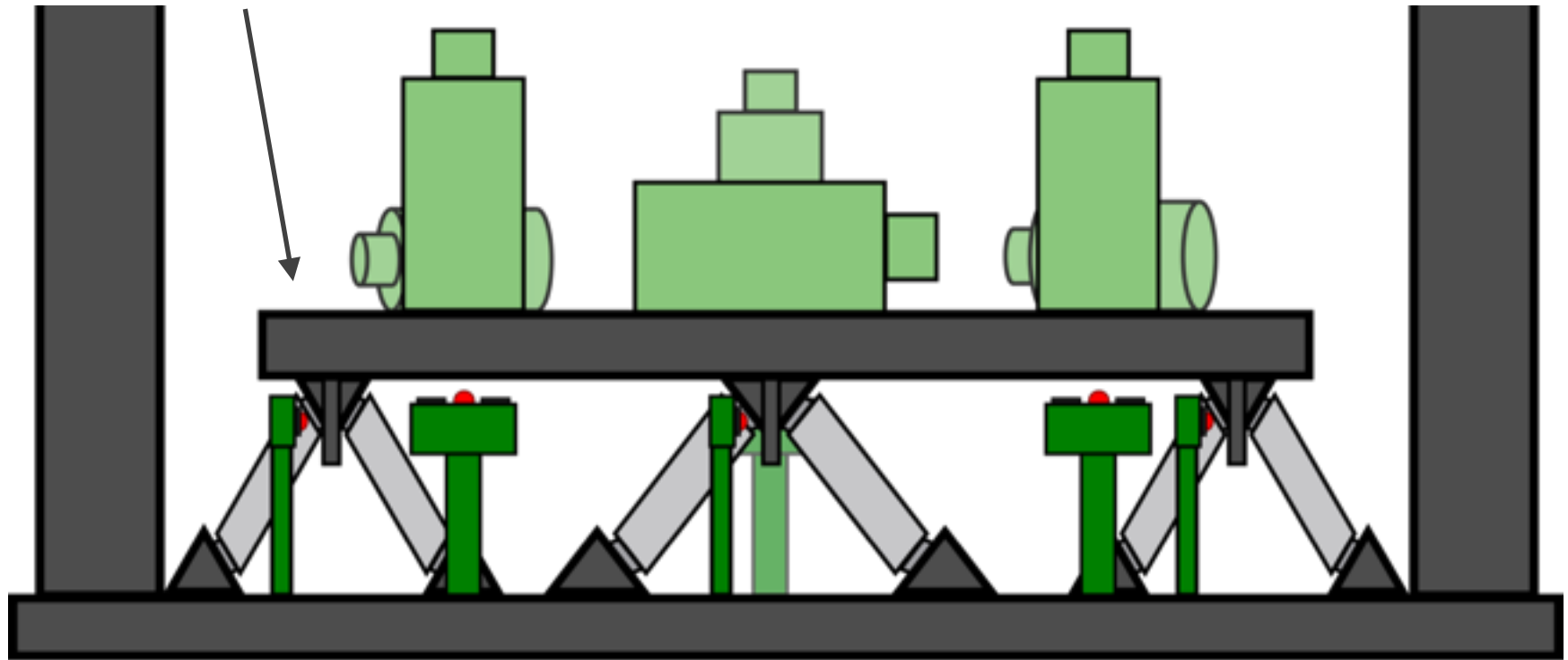
- 共振モードの共振周波数を上昇
 - ▶ 制御帯域を高周波数側へ拡大

防振系のセットアップ



能動防振系の構成

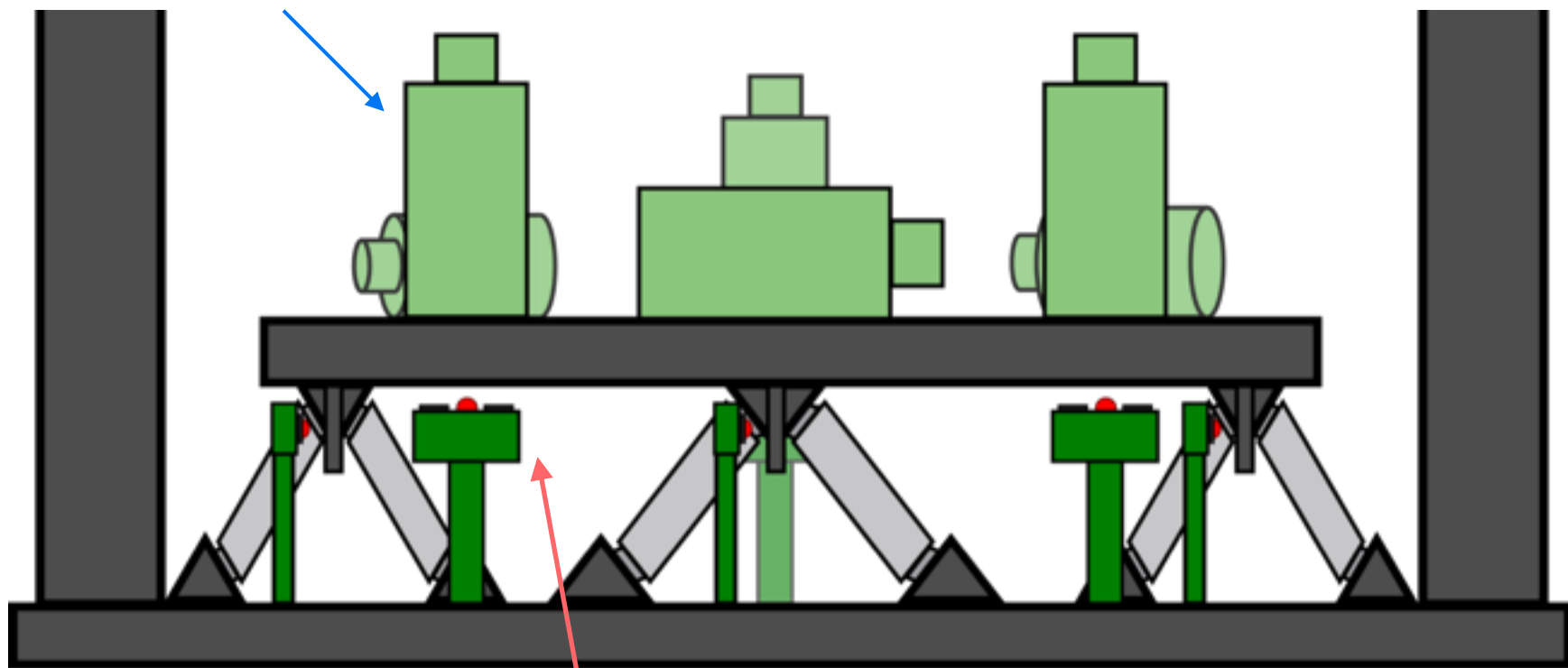
懸架テーブル：
制御対象



フレーム：
能動防振系が載っているやぐら

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

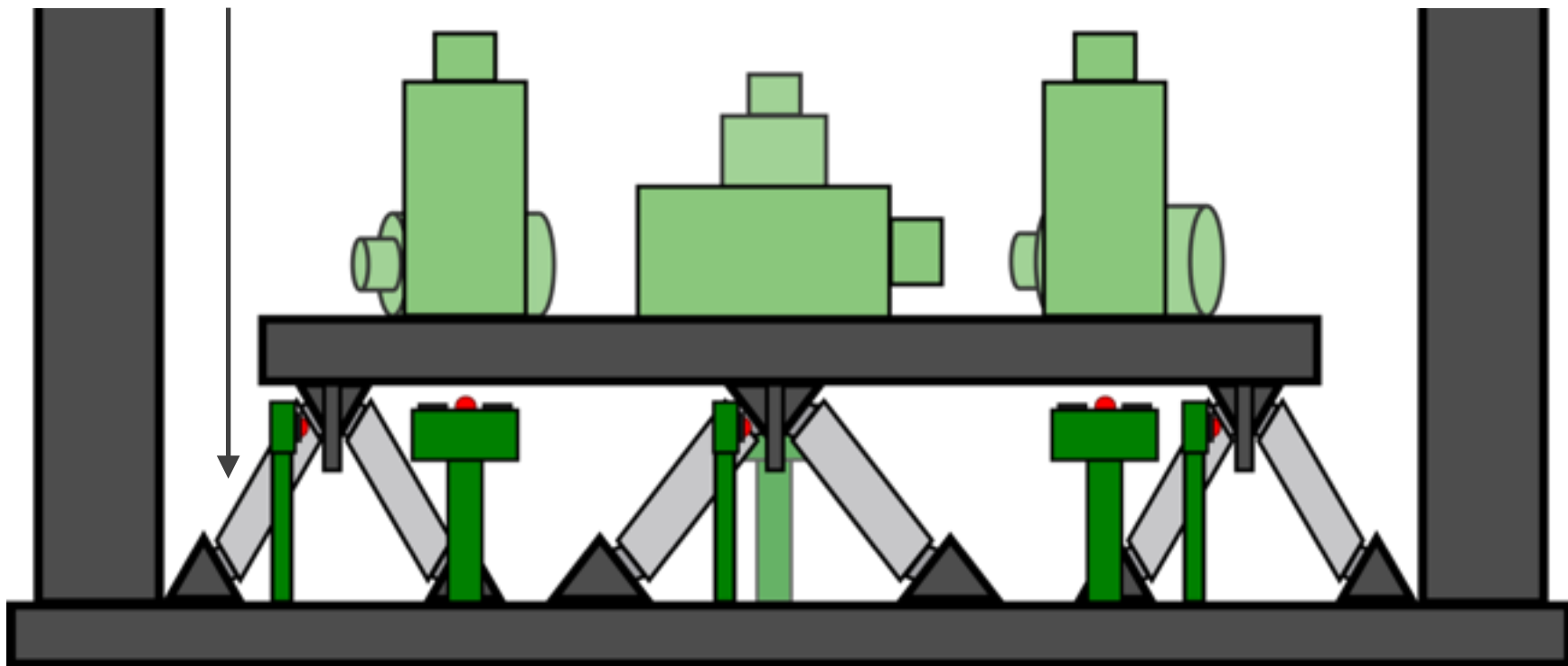


フォトセンサー：テーブルとフレームの相対変位を測定
低周波(< 0.03 Hz)における制御

能動防振系の構成

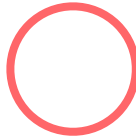

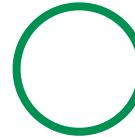
Piezoアクチュエータ:

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

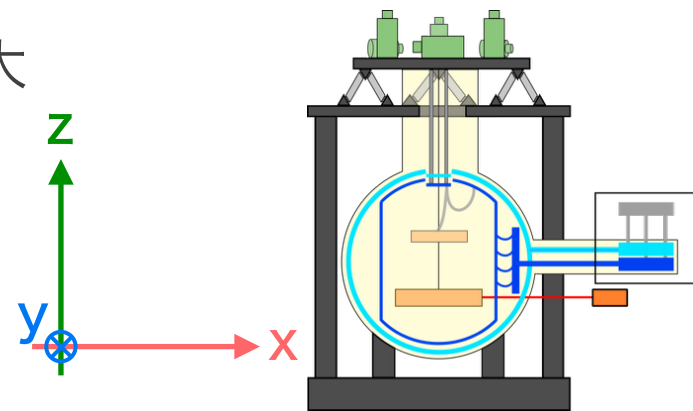


試験結果

3軸を独立に制御（同時制御ではない）

	x軸	y軸	z軸
制御安定性			
最大防振比	1/10	1/2	1/100
制御帯域	0.2 - 2 Hz	0.2 - 1 Hz	0.1 - 3 Hz

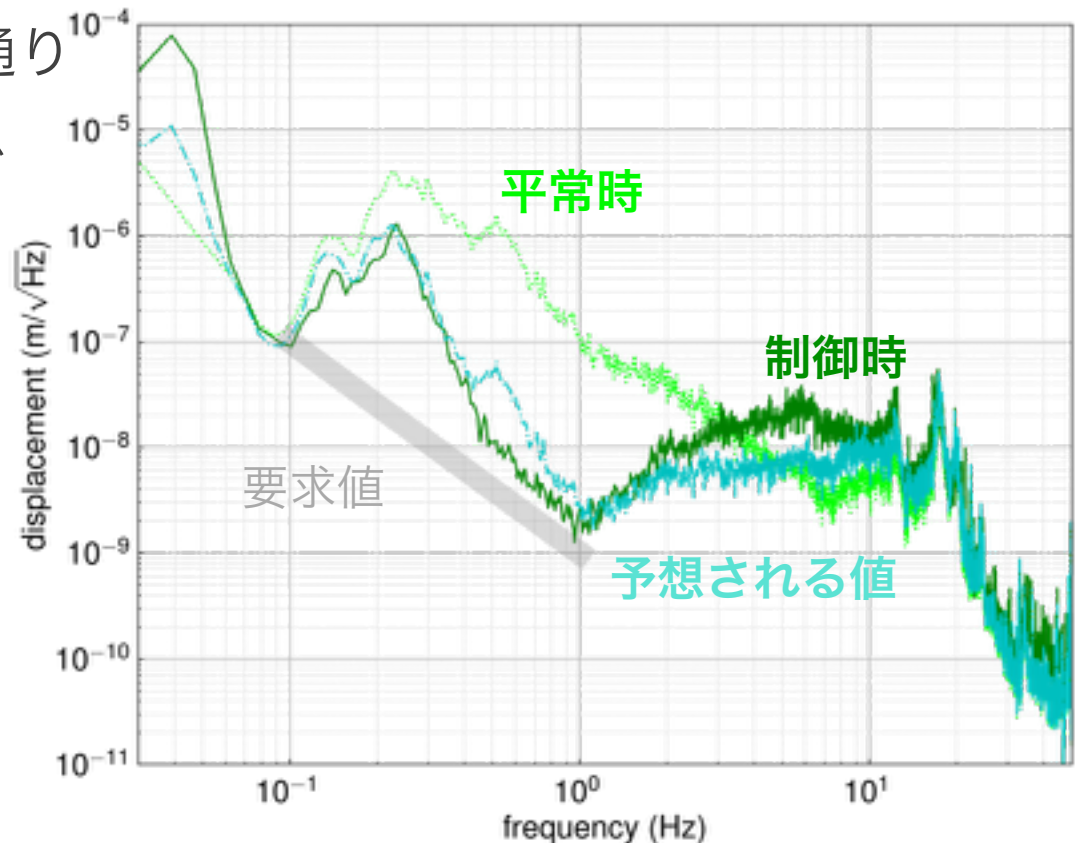
- ▶ 全自由度で制御帯域を低周波数帯へ拡大



z軸の制御試験結果

z軸(鉛直方向)の制御

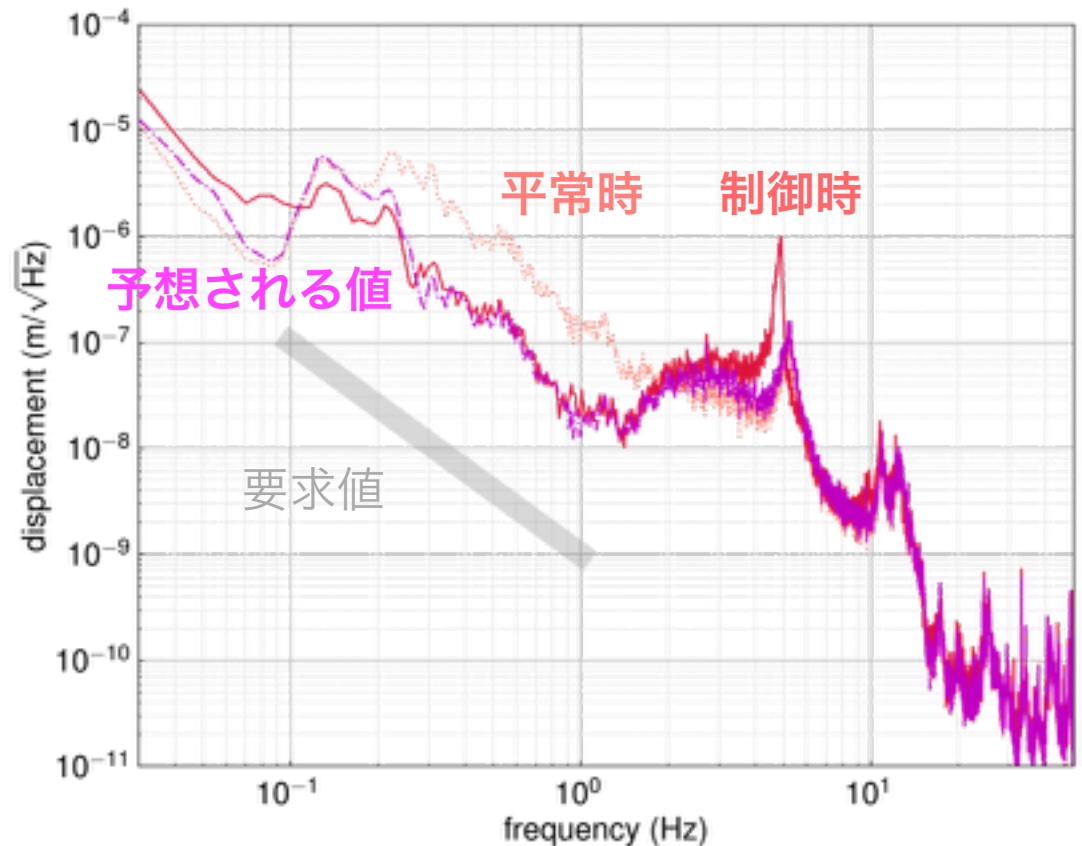
- **0.1 Hz-3 Hz**の帯域で制御に成功
 - ▶ 先行研究(Phase-II)よりも、より低周波数側に制御帯域を拡大
- 防振性能は概ね設計値通り
 - ▶ 最大で**1/100**程度まで低減
 - ▶ 0.5 - 1 Hzで要求値の約**2倍**のレベル



x軸の制御

x軸(水平方向)の制御

- **0.2 Hz-2 Hz**の帯域で制御に成功
 - ▶ z軸同様, 低周波数帯に制御帯域を拡大
- 防振比は概ね設計通り
 - ▶ 0.5 - 1 Hzで**1/10**
- 防振比が十分でない
 - ▶ フレームの共振(5 Hz)のため



y軸の制御

y軸(水平方向)の制御

- 制御が不安定(短時間でしか保てない)

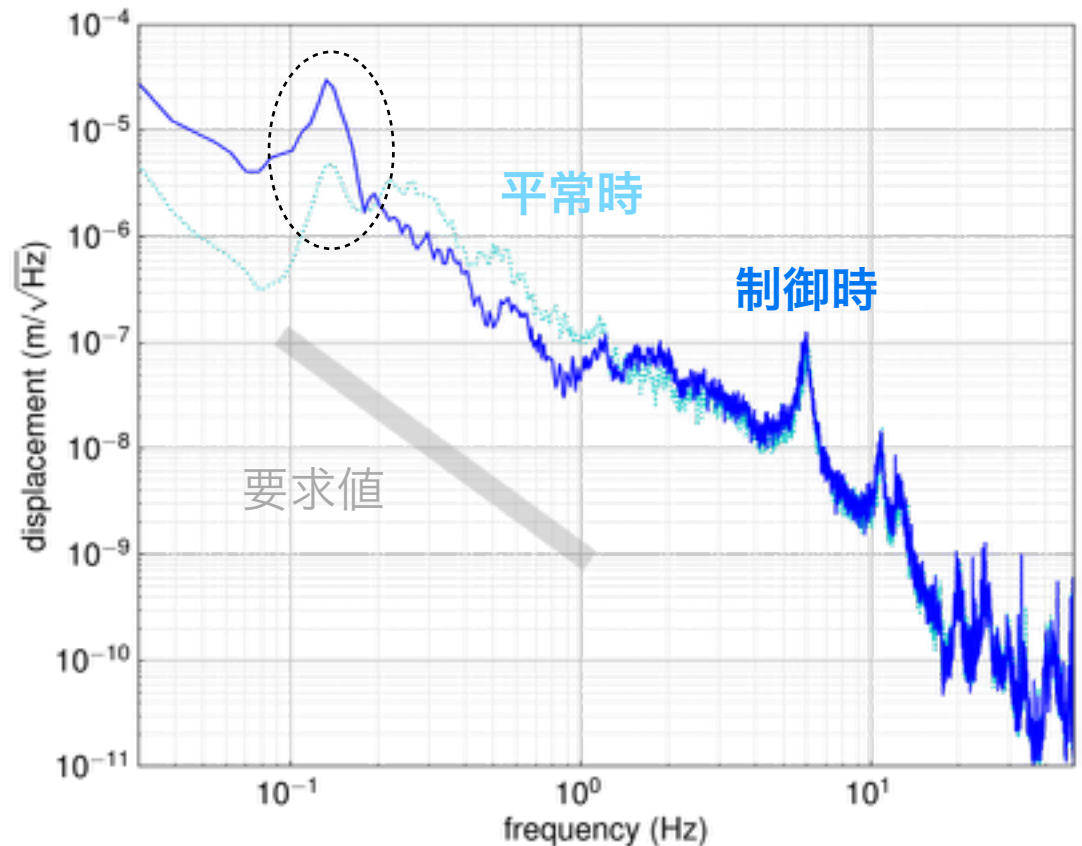
- **0.2 Hz-1 Hz**の帯域で制御

▶0.3 - 1 Hzで約**1/2**

- 制御の不安定性

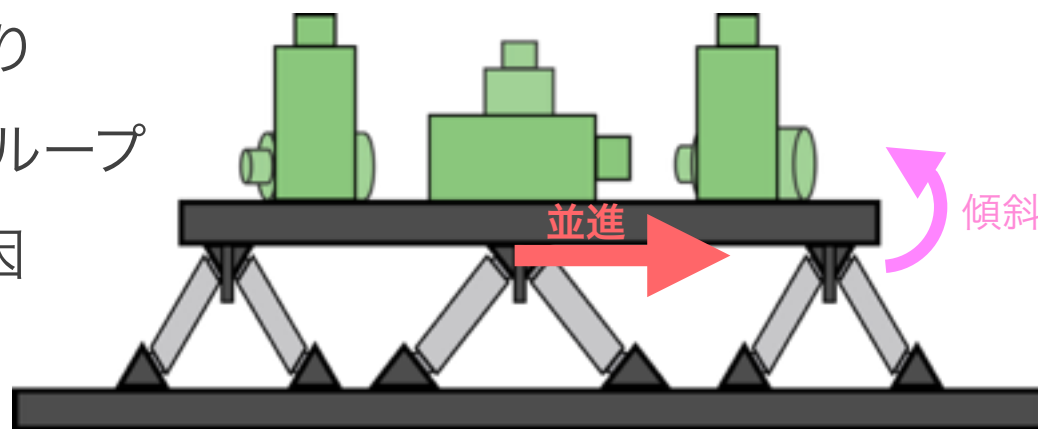
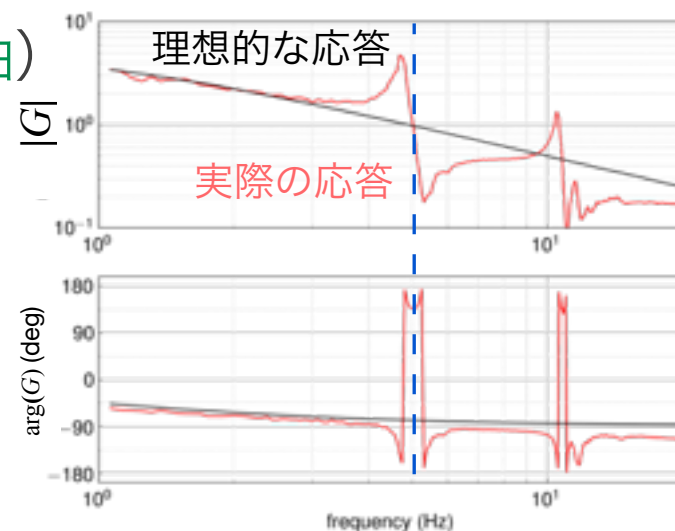
→0.15 Hz付近のピーク

ピークのために制御信号が
アクチュエータのレンジを
超えてしまう



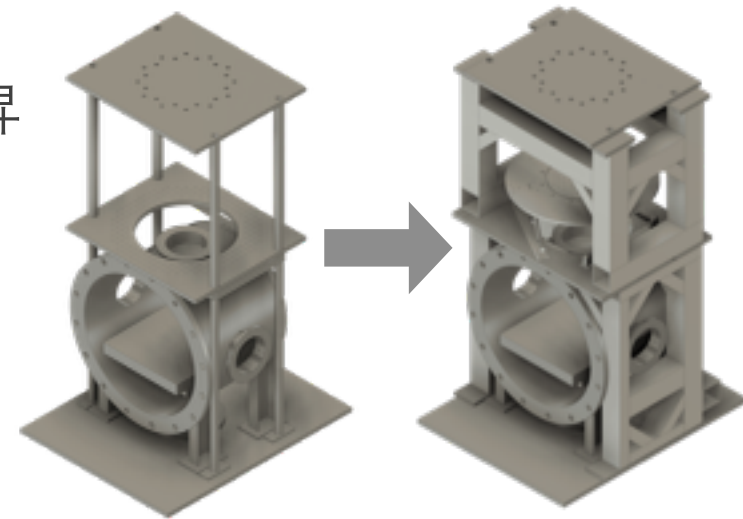
考察

- 防振性能が不十分
 - ▶ 制御のゲインを上げられない (x軸, z軸)
 - フレームの共振
 - y軸も制御が改善すれば同様の問題
- y軸の制御が不安定
 - ▶ アクチュエータ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
 - 傾斜カップリングにより
並進方向に余計な制御ループ
 - 0.15 Hzでのピークの原因

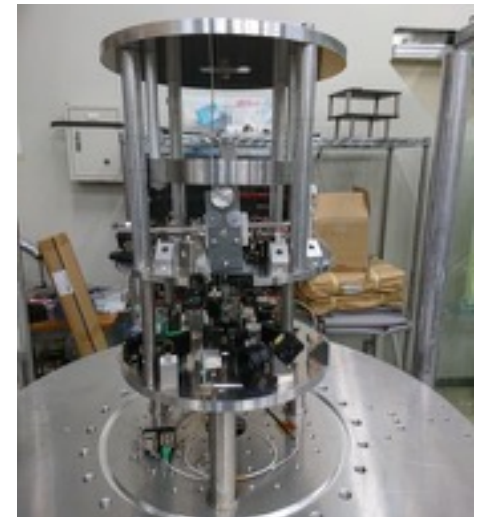


今後の課題

- フレームの補強を導入
 - ▶ 共振周波数を ~ 20 Hz程度にまで上昇
 - ▶ 基本設計は完了， 現在構築中



- 傾斜カップリングの低減
 - ▶ アクチュエータのデカップリングを進める
 - ▶ 傾斜計の構築を進め， 傾斜方向の制御を行う

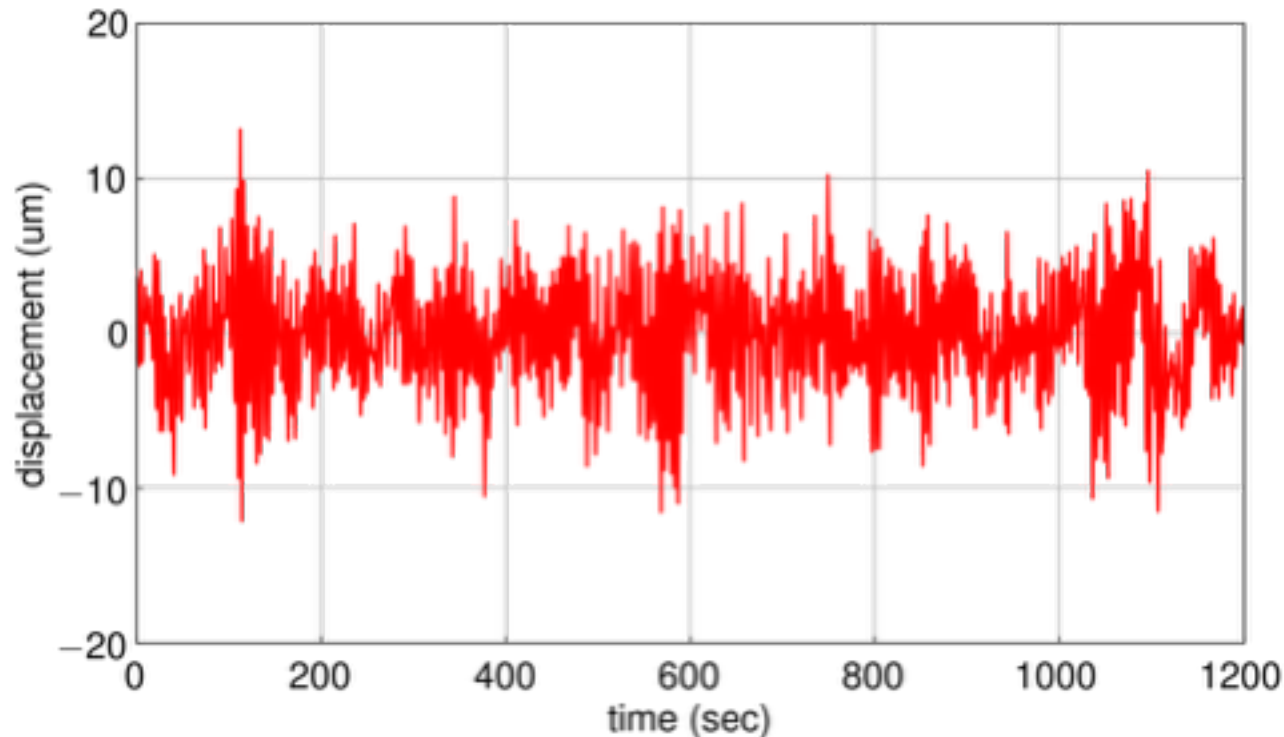


まとめ

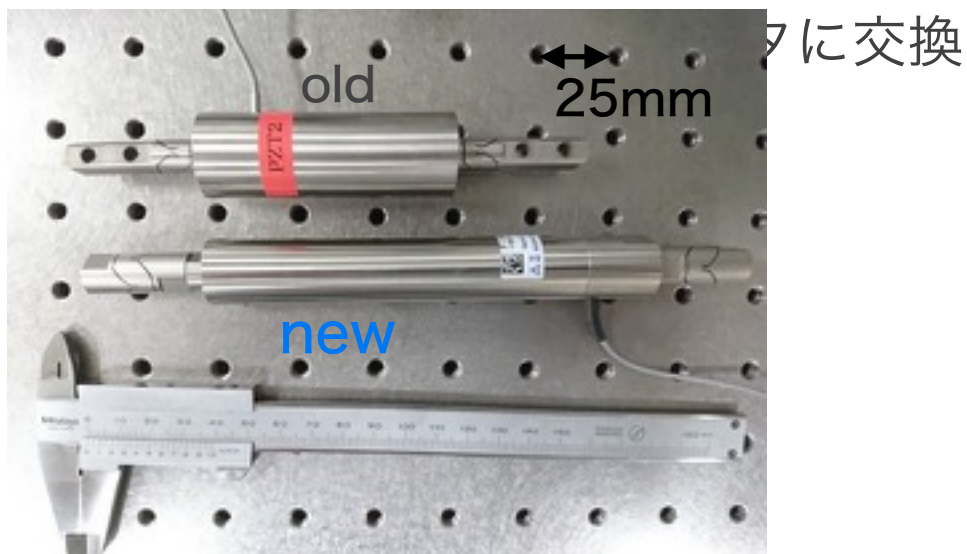
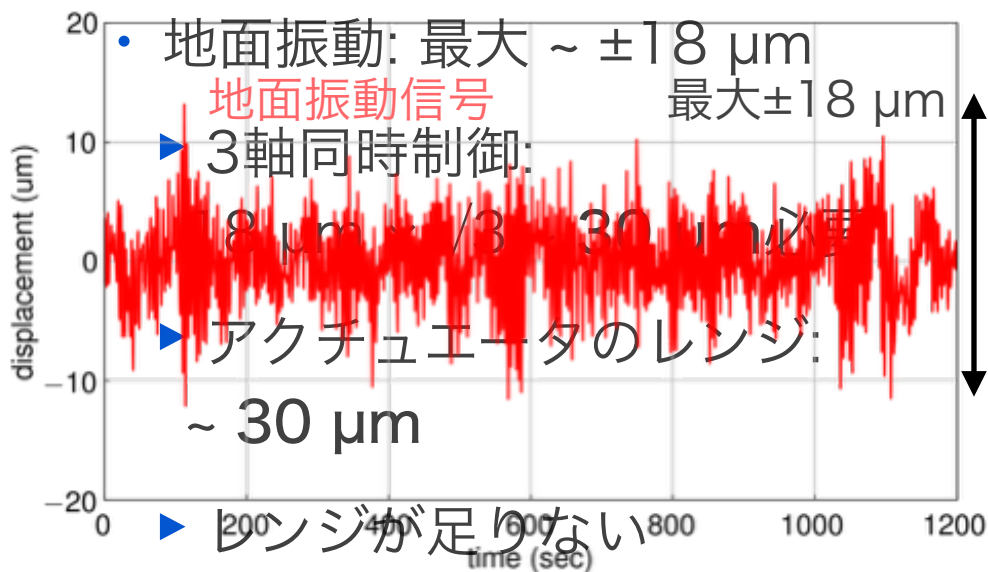
- Phase-III TOBA実現に向けた能動防振系の設計
- 防振系の構築, 性能試験
 - ▶ 制御帯域の下限を0.2 Hzにまで拡大
 - ▶ 最大で防振比~1/100を達成
- 問題点
 - ▶ 防振性能がフレームの共振で制限
 - ▶ アクチュエータの傾斜カップリングの影響
- 今後の展望
 - ▶ フレームの改良により共振周波数を上げる(~ 20 Hz)
 - ▶ 傾斜計をインストール, 傾斜カップリングを低減

(1) アクチュエータのレンジ

- 地面振動: peak to peakで $\sim 18 \mu\text{m}$
 - ▶ 3軸同時制御 $\rightarrow 18 \mu\text{m} \times \sqrt{3} \sim 30 \mu\text{m}$ 必要
- 一方アクチュエータのレンジは $\sim 30 \mu\text{m}$
 - ▶ レンジが足りない



(1) アクチュエータのレンジ

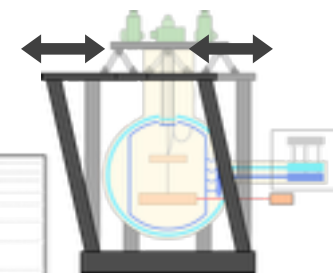


(2) フレームの共振

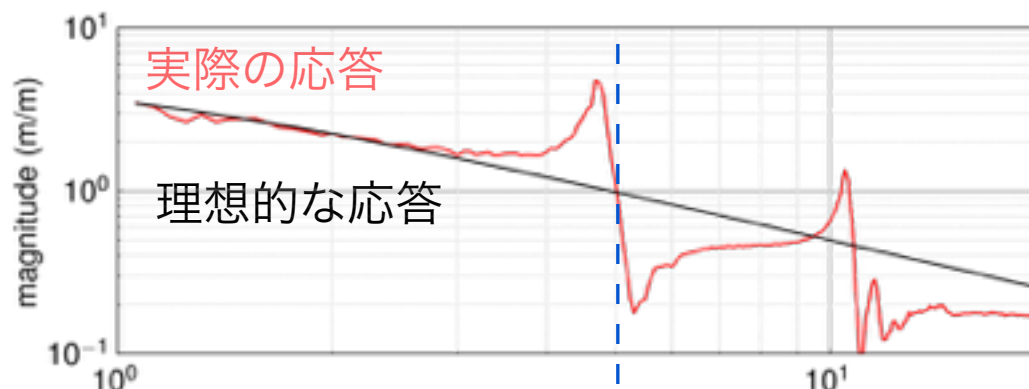
安定な制御：

$$\tilde{x}_{\text{制御後}} = \frac{1}{1 + G} \tilde{x}_0 \quad G = -1 \text{ となると発散}$$

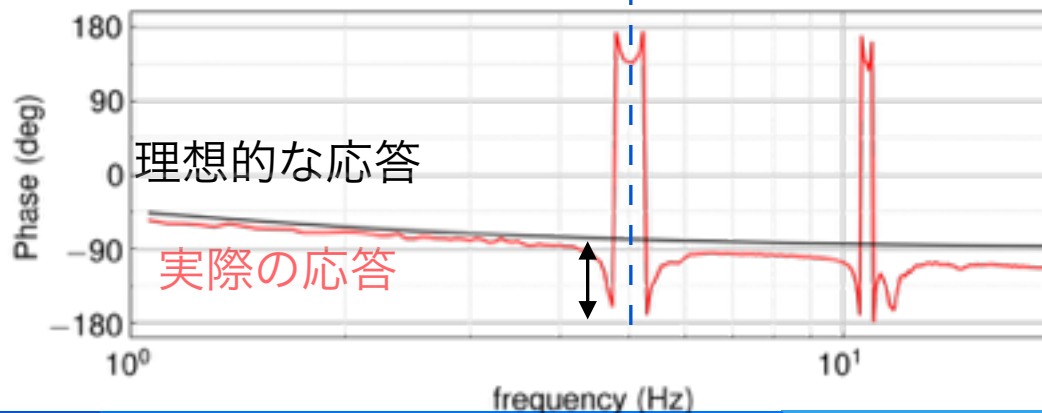
- ▶ フレームの共振のせいで位相が大きく回り，不安定



オープンループ
伝達関数の**振幅**

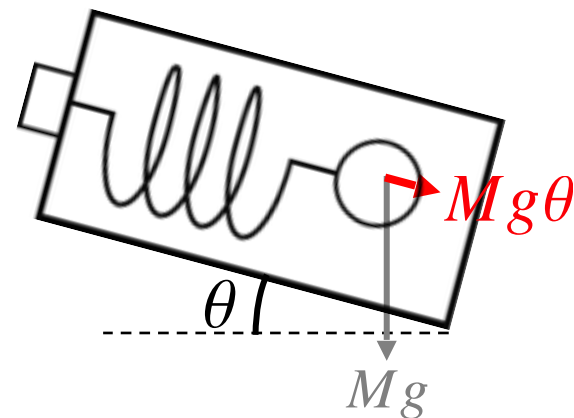
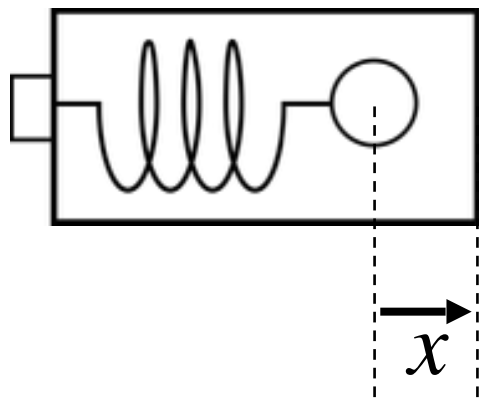


オープンループ
伝達関数の**位相**



(3) 並進と傾き変動のカップリング

- センサーが傾いていると，傾きに比例して重力がマスに働く
 - ▶ 傾きが変動するとマスにかかる重力も変動し，マスが余計に揺らされる
 - ▶ $\propto f^{-2} \rightarrow$ 低周波数ほど問題



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

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

制御系

- 高周波：地震計

- ▶ 慣性系からの変位

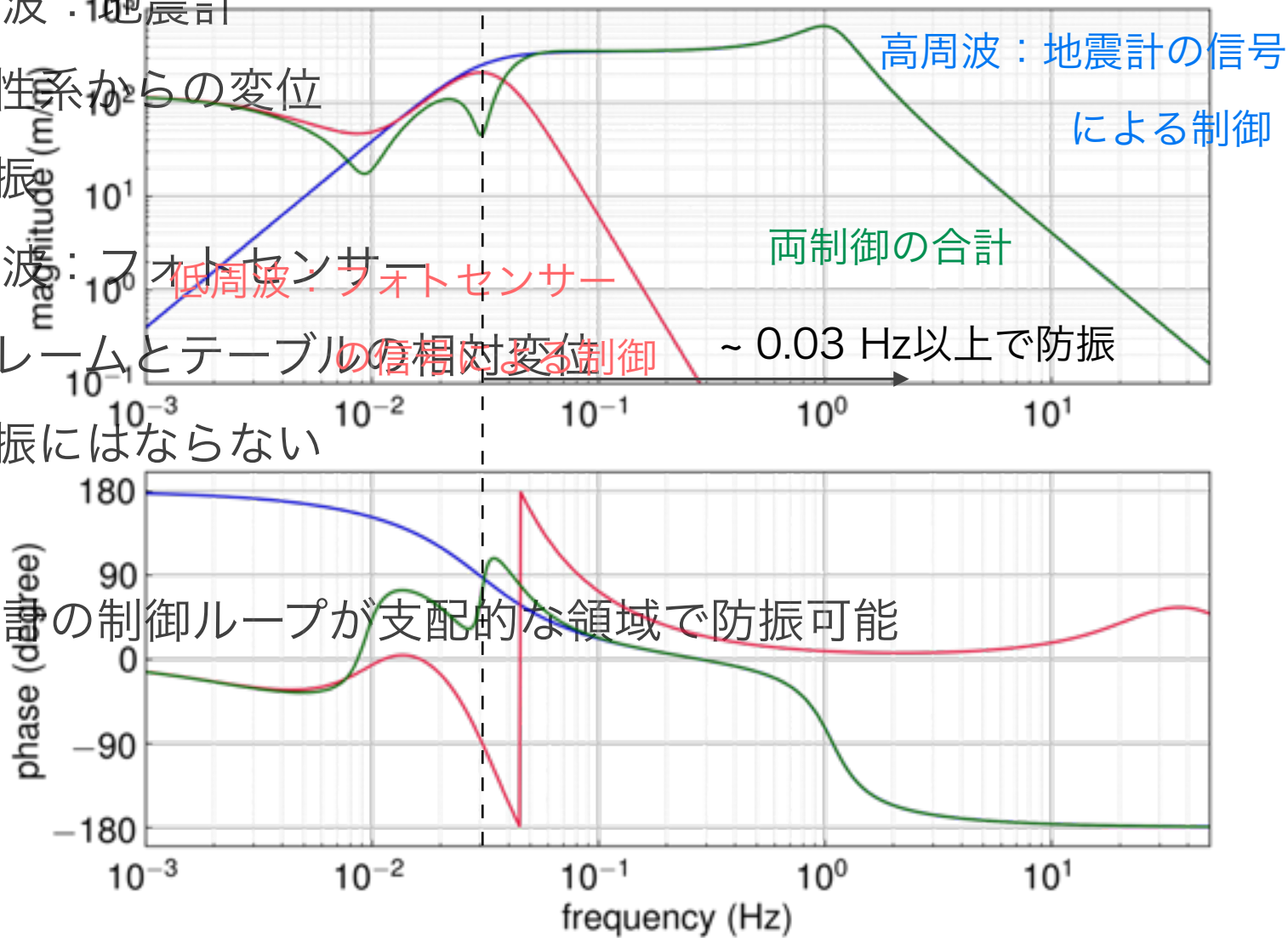
- ▶ 防振

- 低周波：フォトセンサー

- ▶ フレームとテーブルの相対変位制御 ~ 0.03 Hz以上で防振

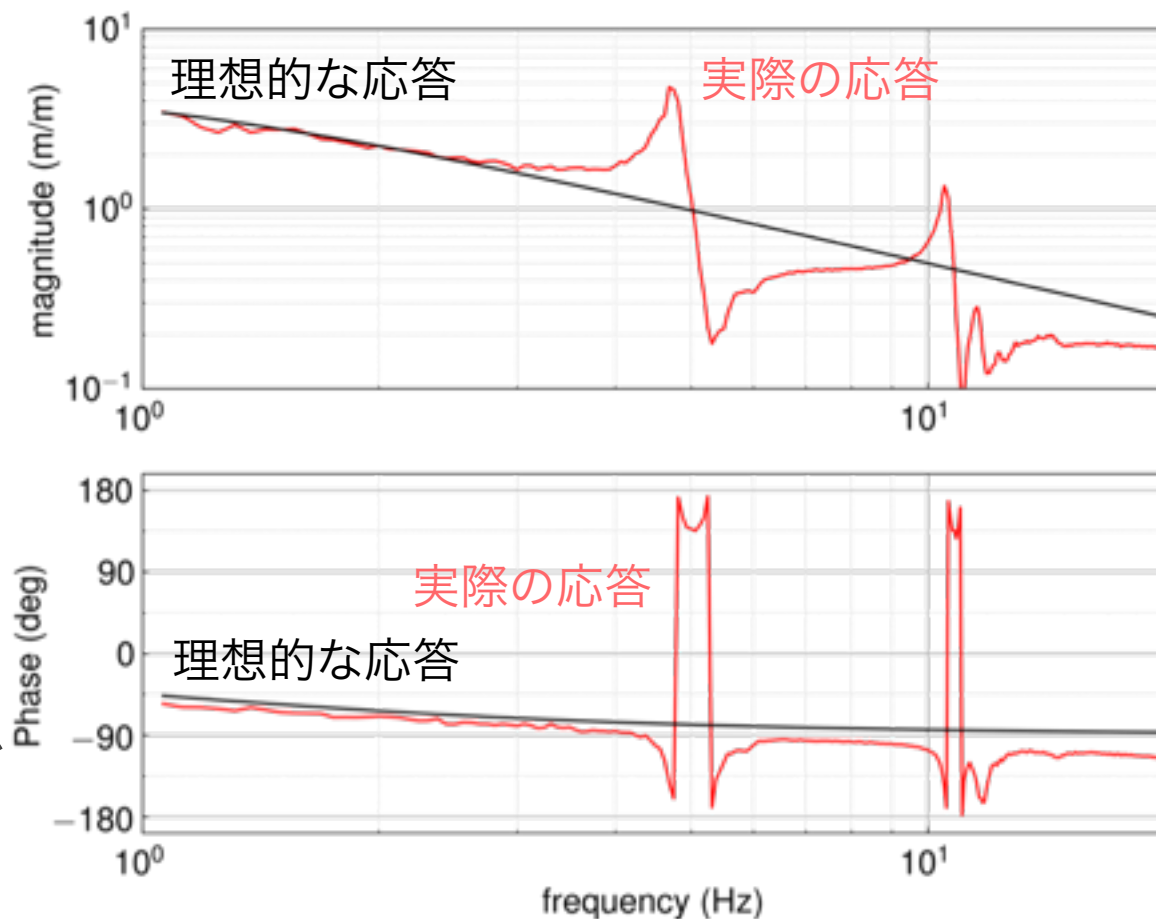
- ▶ 防振にはならない

- 地震計の制御ループが支配的な領域で防振可能



フレームの共振

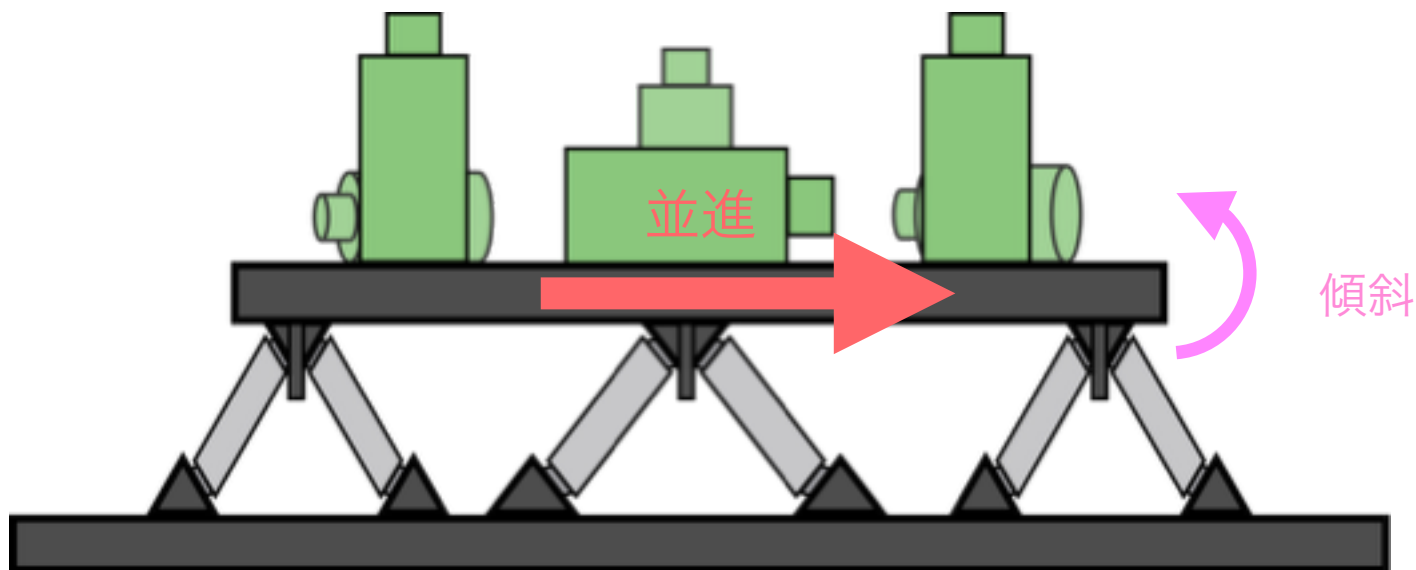
- アクチュエータの伝達関数の位相がフレームの共振周波数で大きく変化
 - ▶ ゲインをこれ以上大きくできない
- 現状x軸とz軸がこれで制限
 - ▶ 制御が安定すればy軸も問題になる
- 補強を入れることで解決できる見込み



↑ x軸制御のオープンループ伝達関数の振幅と位相

アクチュエータの傾斜カップリング

- アクチュエータから地震計への応答が低周波でモデルからズレ
 - ▶ 傾斜カップリングによる影響
 - ▶ x軸(y軸)にアクチュエートしているつもりが、同時に傾斜方向にも揺らしてしまっている
 - ▶ 低周波数ほど大きな影響



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)

