

ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBAの開発(11): 防振系開発

高野哲, 下田智文, 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の開発を行っている
- これまでプロトタイプを製作し、感度を制限しうる雑音源の特定と低減に向けた研究を行ってきた
- 現在、さらなる感度の向上に向けた新しいプロトタイプの開発を行っている
- 本講演では、その中でも特に防振系の開発を述べる

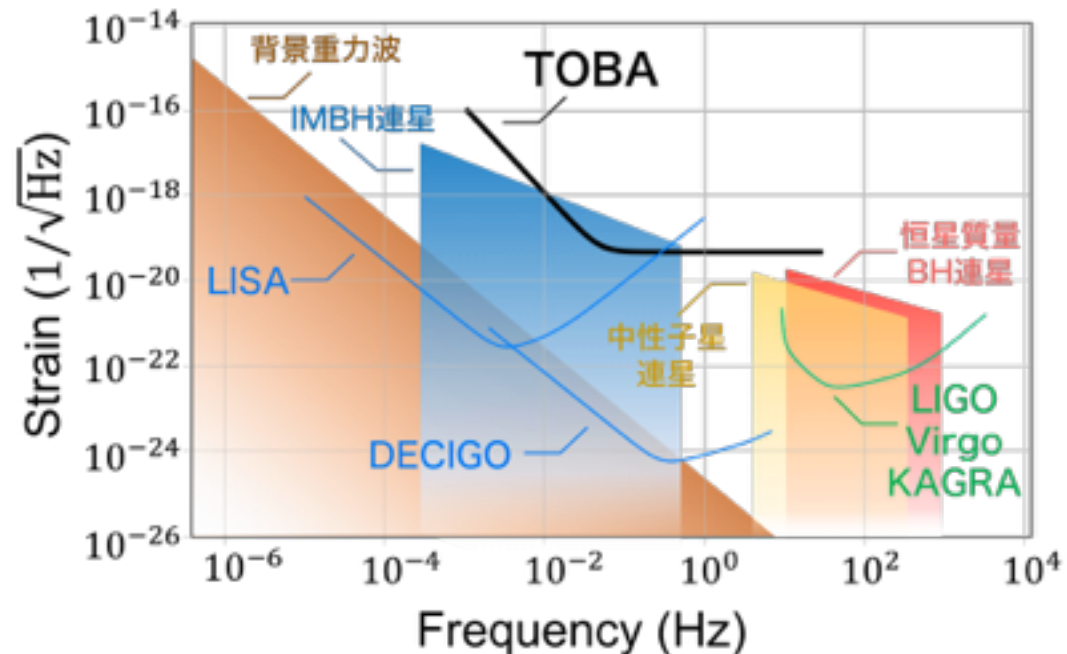
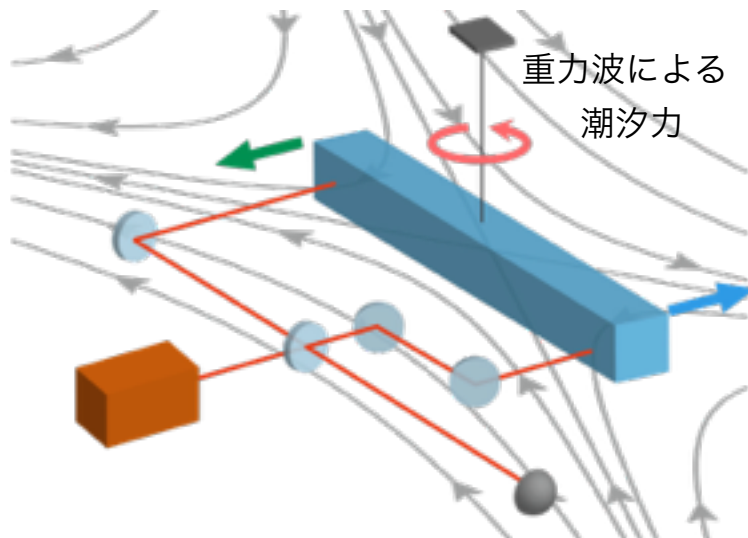
Contents

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

TOBA (TOrsion Bar Antenna)

ねじれ振り子型重力波望遠鏡TOBA

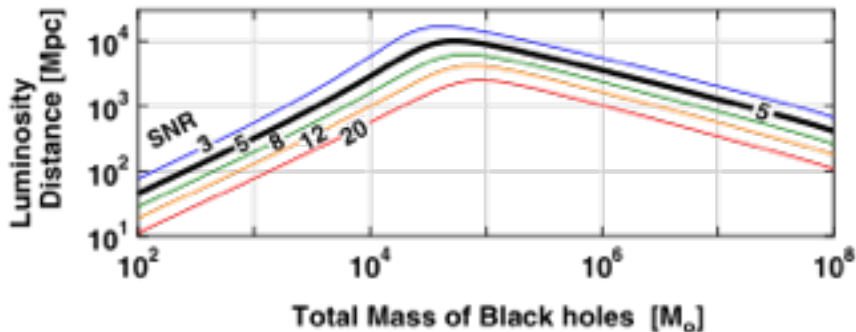
- 水平に懸架した棒状マスのねじれ回転を検出
- 共振周波数~数mHz→0.1-10Hzの低周波重力波の地上観測が可能
- 地上で観測可能(宇宙に打ち上げる必要がない)→低コスト
- 目標: 10mスケールで $h \sim 10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$



TOBAのサイエンス

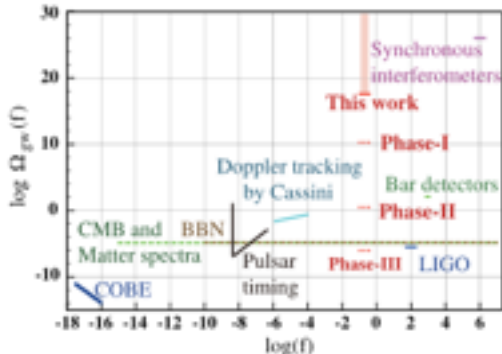
低周波(~0.1 Hz)の重力波

- 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)

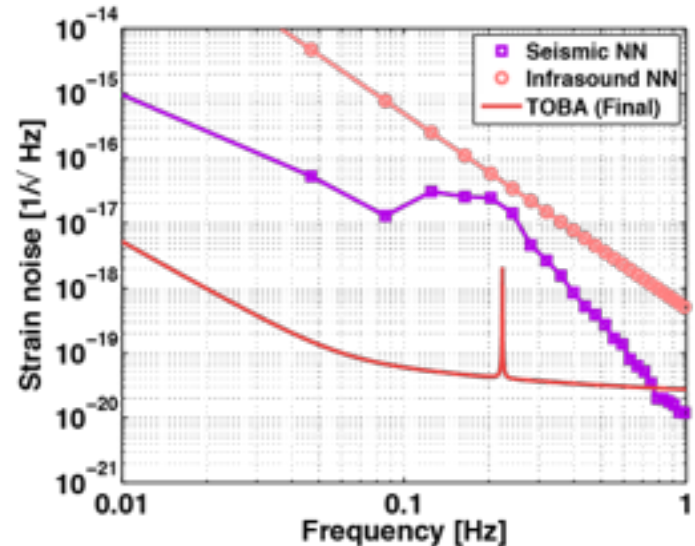
- 背景重力波探査
 - ▶ 初期宇宙の直接探査



K. Ishidoshiro et al., PRL 106, 161101 (2011)

重力偏差計としての活用

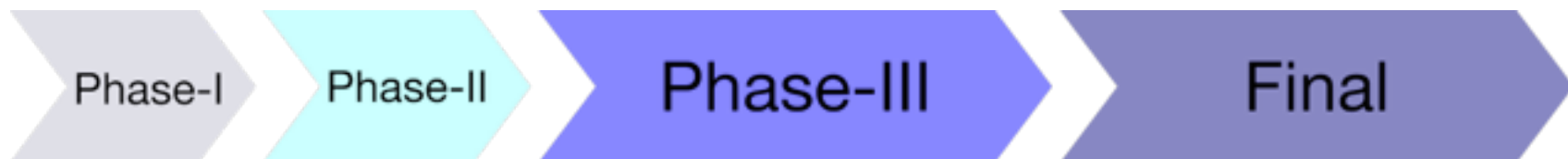
- Newtonian Noise
 - ▶ モデル検証,
 - ▶ 第3世代重力波干渉計のR&D



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

- 地震の即時アラート
 - ▶ 社会, 産業への大きな貢献

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} / $\sqrt{\text{Hz}}$

- 40 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)



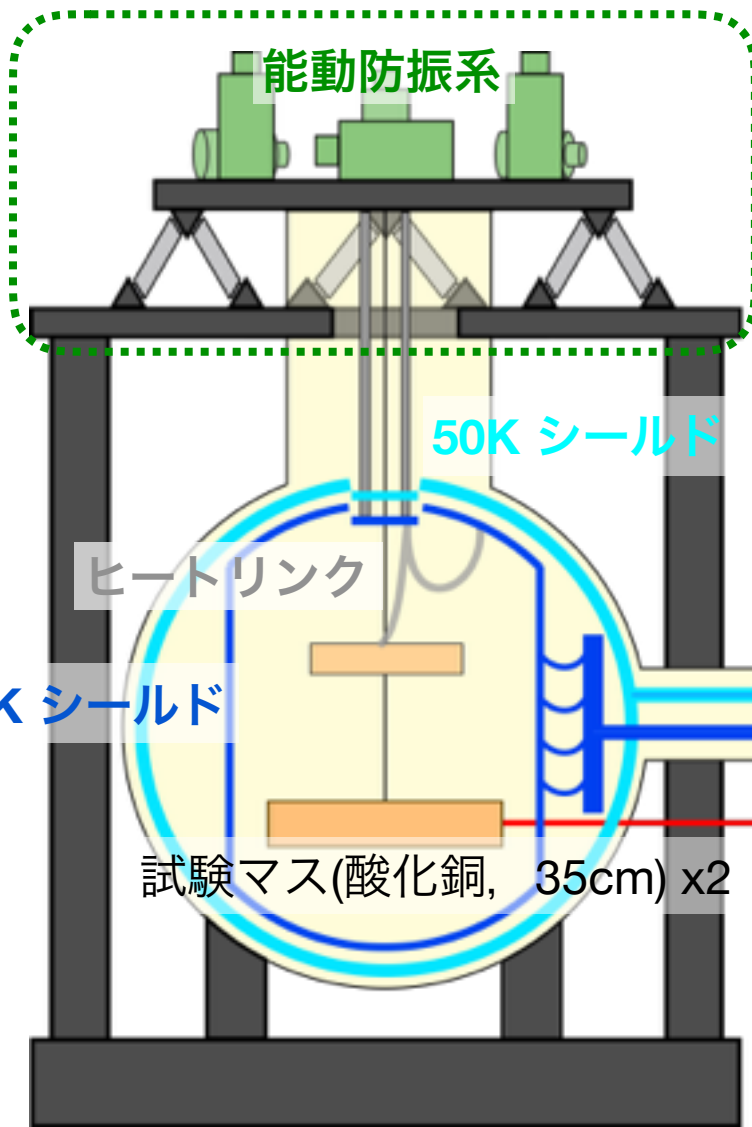
これまで:

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

Phase-III TOBA

- 目標: $10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$
 - ▶ Final TOBAへの足がかり
 - ▶ 低温系でのねじれ振り子の実証
- 対象:
 - ▶ 中間質量BH連星合体からの重力波
 $10^5 M_{\odot}$, 1 Mpc以内のイベント
 - ▶ 地震速報
マグニチュード7.0の地震を100 km先で10秒以内に検出
 - ▶ Newtonian noise
モデルの検証, 低減の実証

Phase-III TOBAの構成

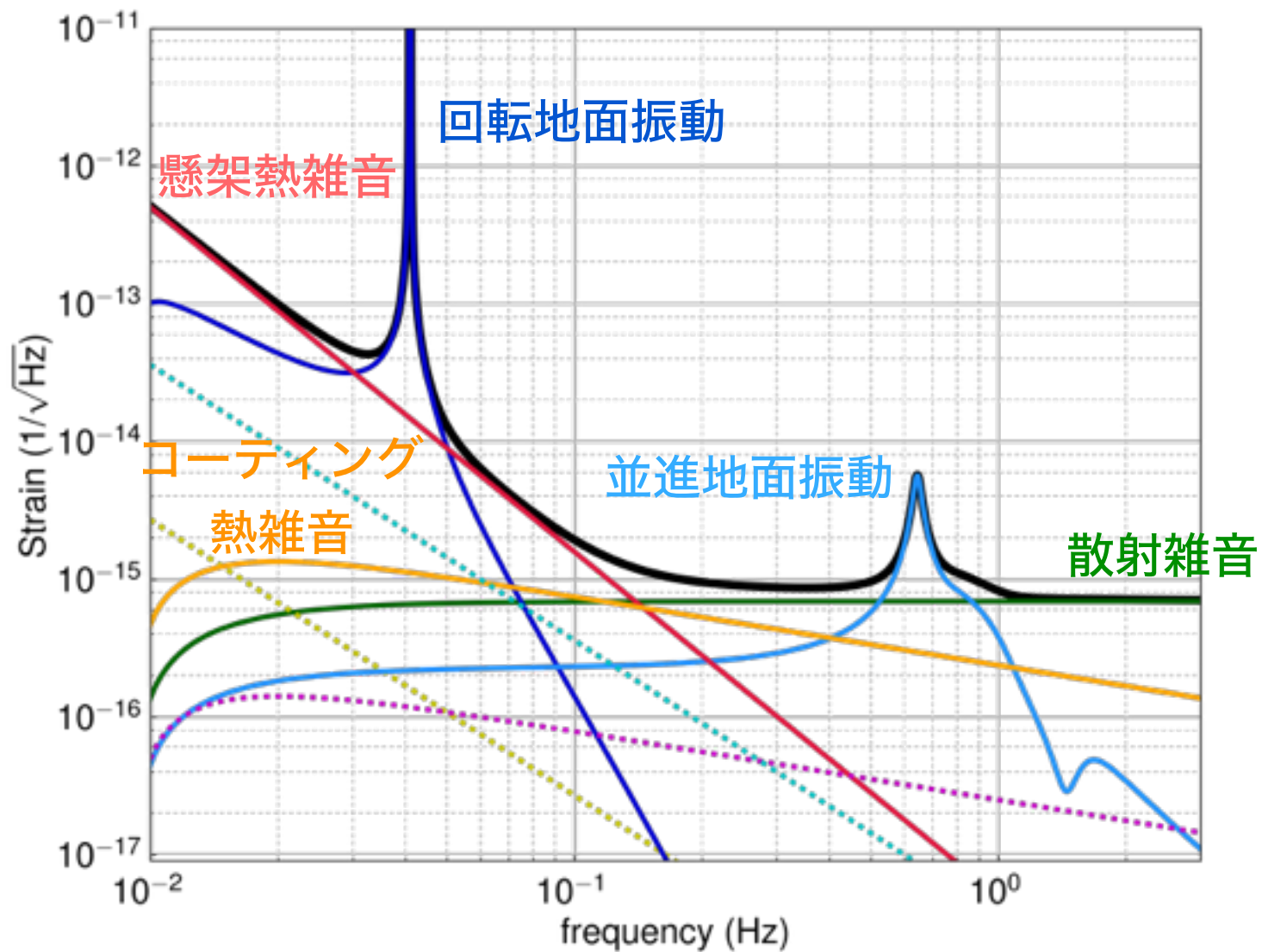


低温系でのねじれ振り子の実証

- 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: ワイヤーを4Kまで冷却
 - ▶ Q値: 4 Kで $Q = 10^8$
- 防振系
 - ▶ 並進とのカップリング: 10^{-9} rad/m @ 0.1 Hz
 - ▶ 回転地面振動: 防振比 $< 10^{-6}$ @ 0.1 Hz
 - ▶ 並進地面振動: 10^{-7} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
- 光学系
 - ▶ wave front sensorを応用した読み取り系

目標感度までの課題

- 低温懸架系

- ▶ 冷却: ワイヤーを4Kまで冷却 → 数値シミュレーションで確認済み

- ▶ Q値: 4 Kで $Q = 10^8$ 次の次の講演

- 防振系

- ▶ 並進とのカップリング: 10^{-9} rad/m @ 0.1 Hz → 低減手法の開発

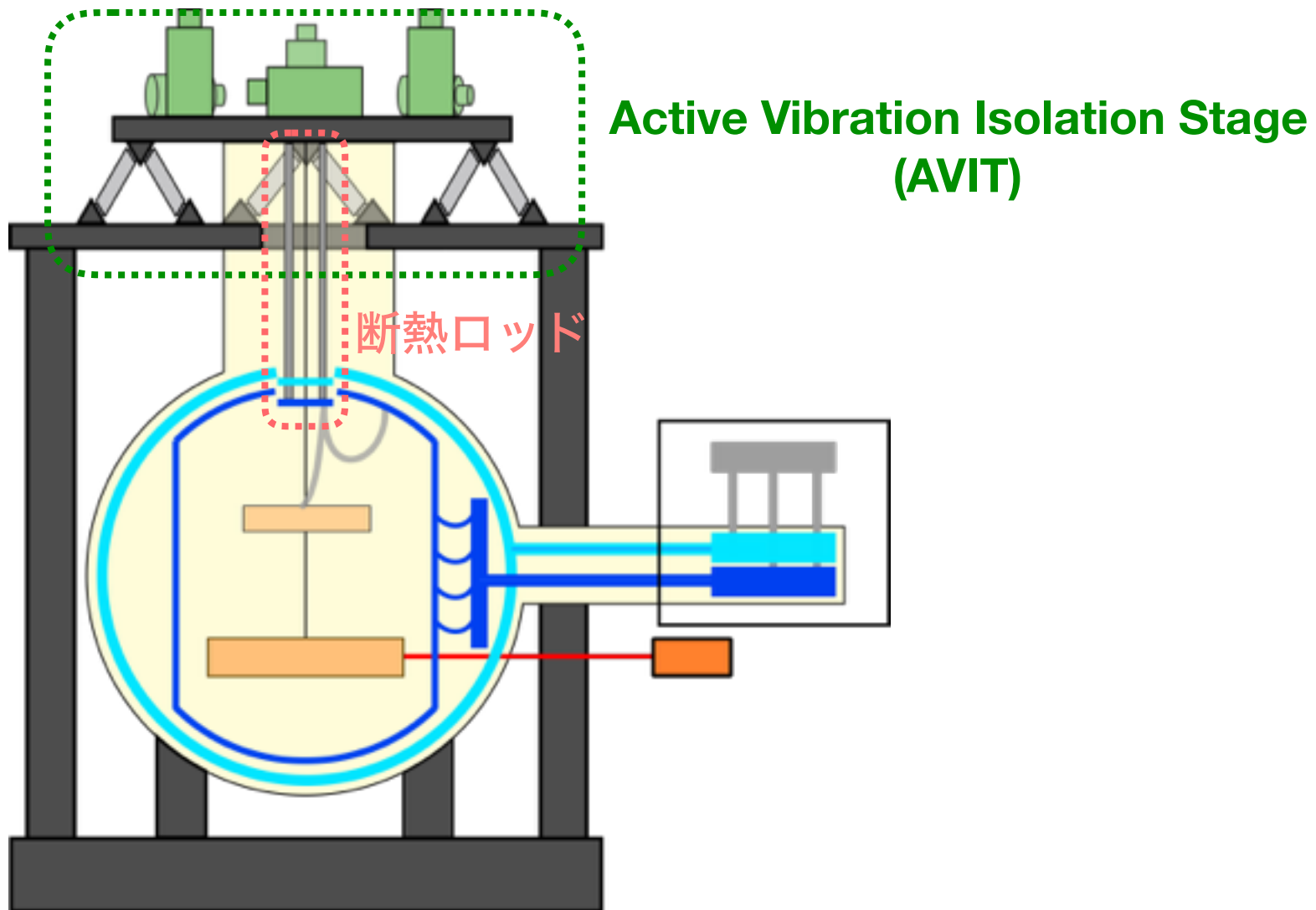
- ▶ 回転地面振動: 防振比 $< 10^{-6}$ @ 0.1 Hz → 2段振り子+同相雑音除去

- ▶ 並進地面振動: 10^{-7} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz → 能動防振 → 本講演

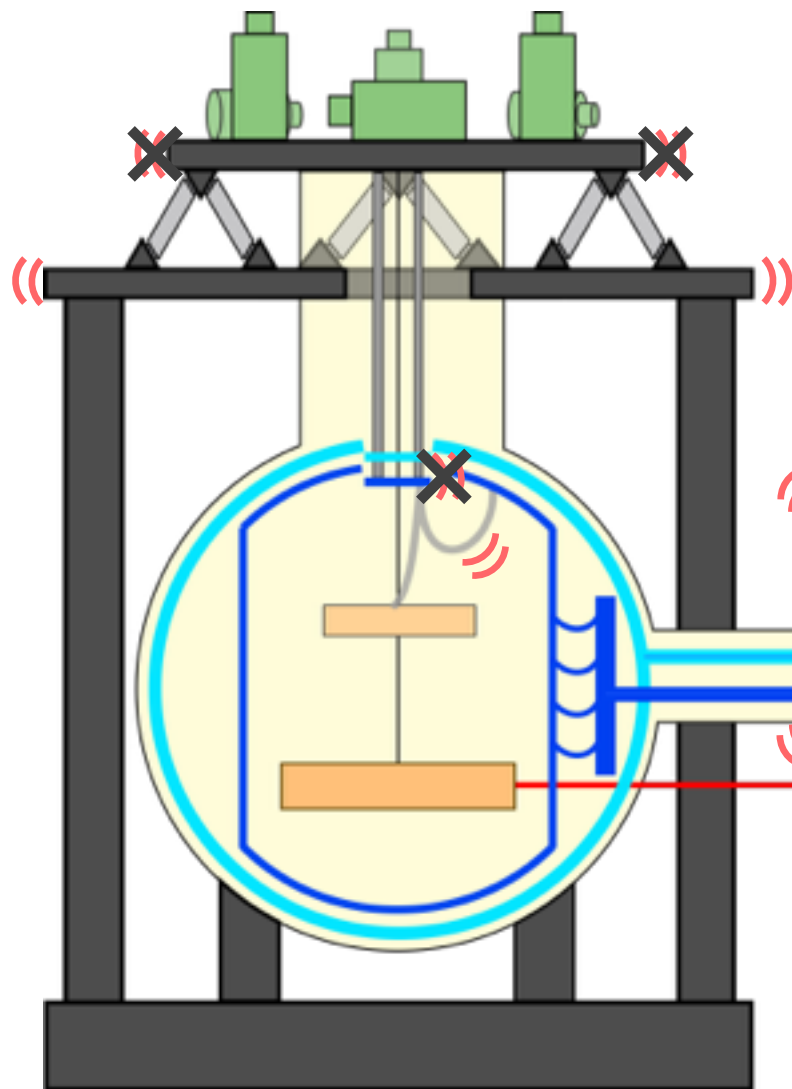
- 光学系

- ▶ wave front sensorを応用した読み取り系 次の講演

能動防振系の構成



能動防振系の機能



- 懸架点の防振
 - ▶ 要求値: 10^{-7} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1Hz
- 冷凍機から導入される振動の低減

冷凍機が振動

- ▶ ヒートリンクに揺れが伝達
- ▶ 能動防振系に繋ぎ、揺れを低減

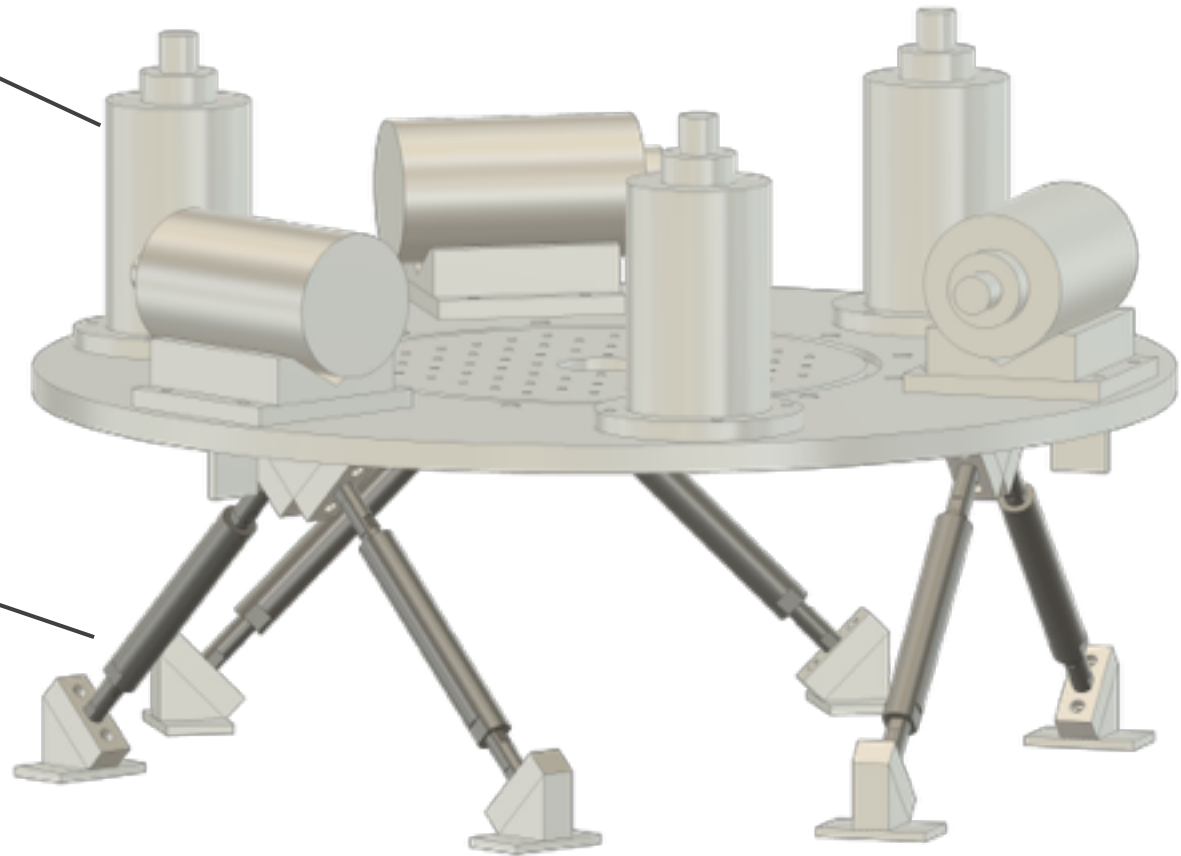
AVIT (Active Vibration Isolation Table)

懸架テーブル: AVIT (Active Vibration Isolation Table)

- 6つの地震計と6つのアクチュエータからなる

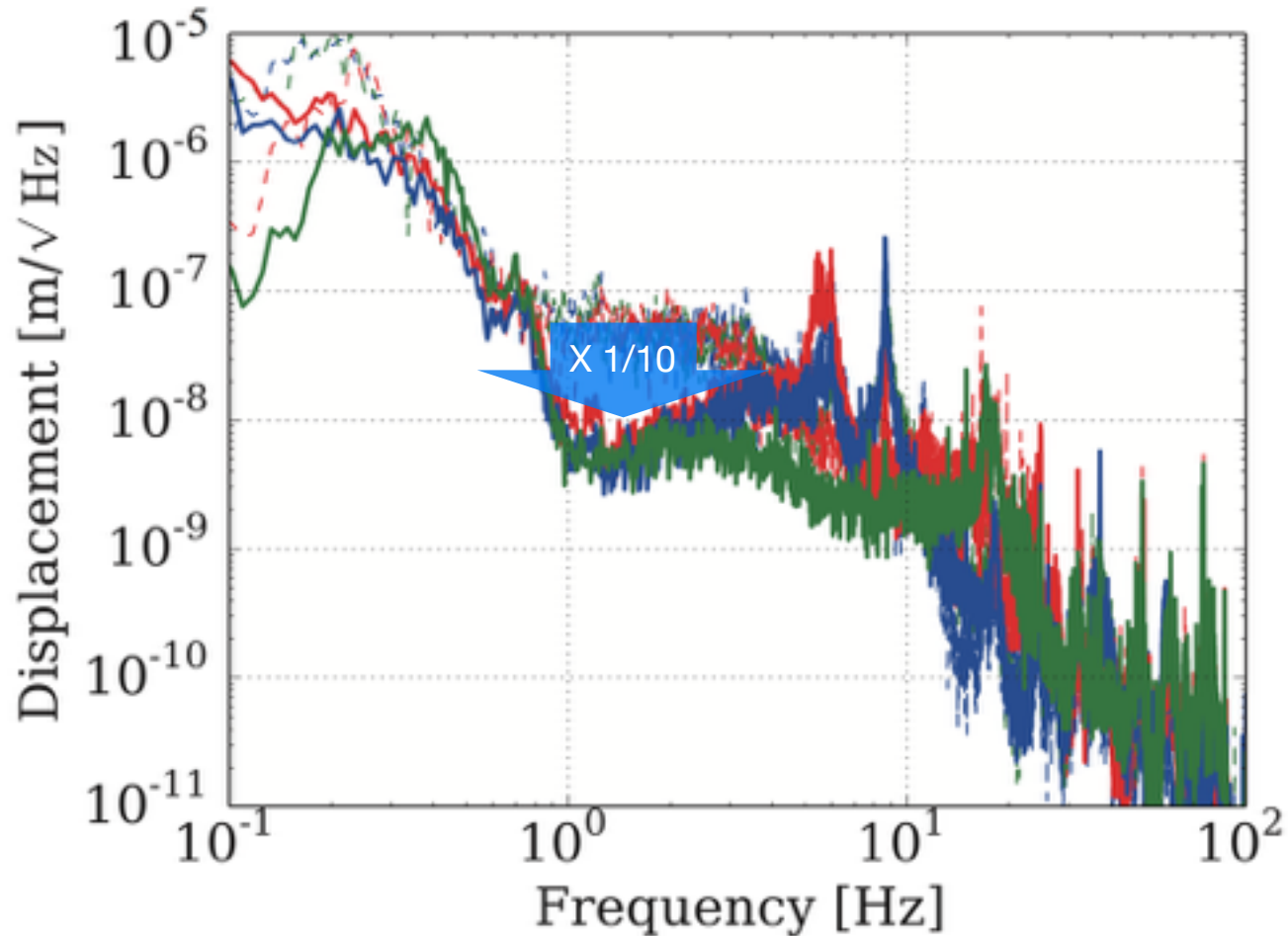
地震計: AVITの全6自由度
(x, y, z, roll, pitch, yaw)
の動きを測定

ピエゾアクチュエータ:
AVITの全6自由度
(x, y, z, roll, pitch, yaw)
にフィードバック

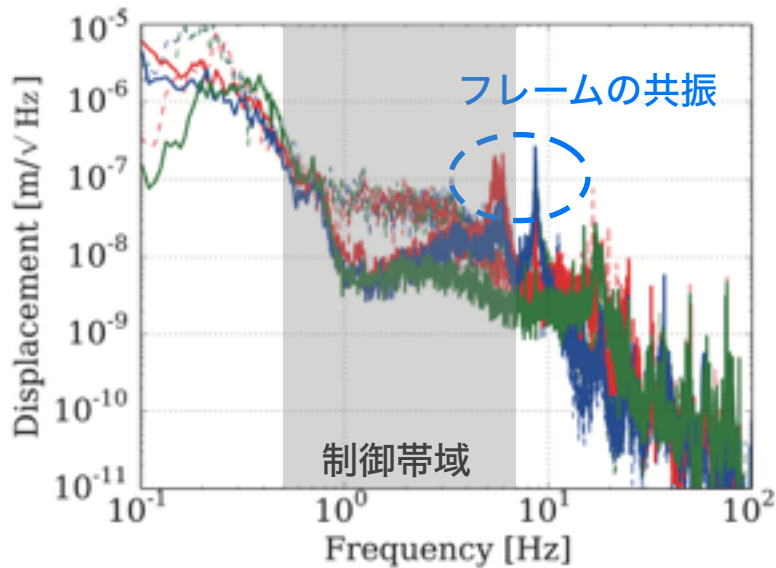


先行研究

- 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

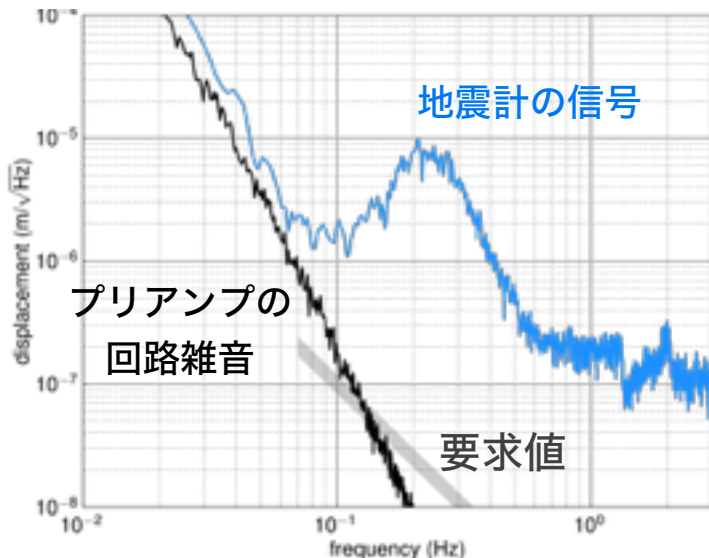
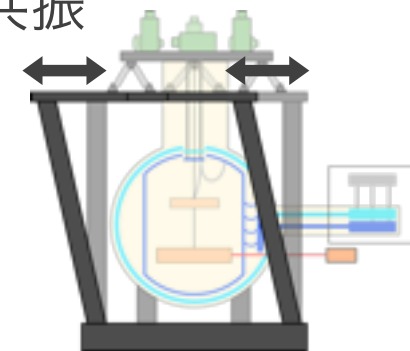


問題点



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
- ▶ (2) 高周波→フレームの共振

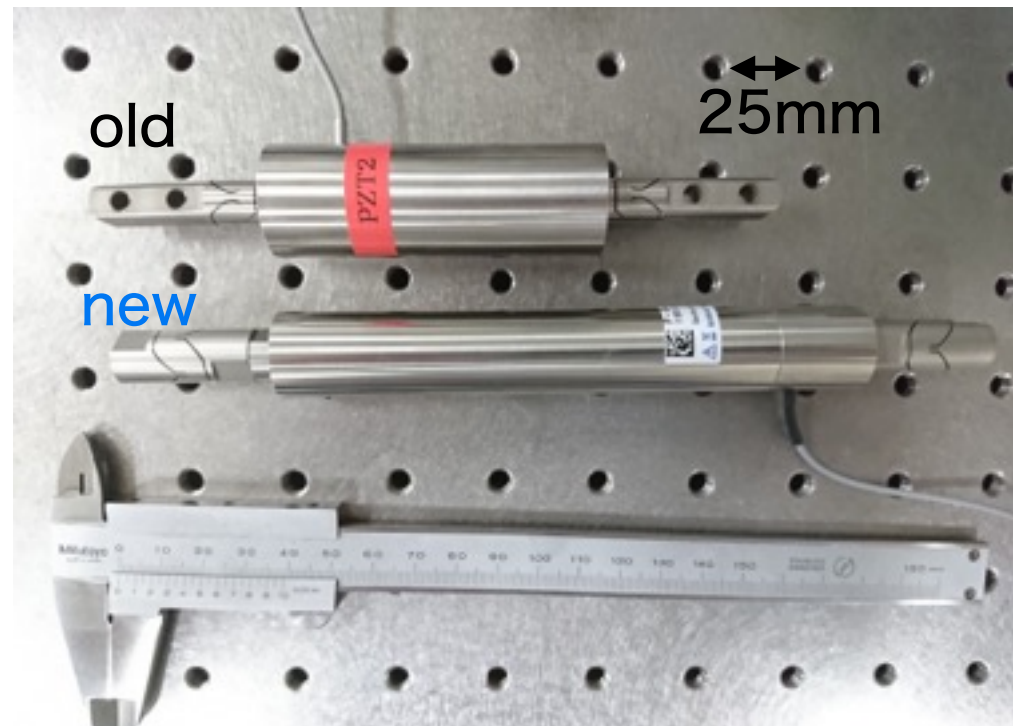


地震計の感度

- ▶ (3) 0.1 Hz以下はプリアンプの雑音で制限
- ▶ (4) 傾き変動が地震計とカップル

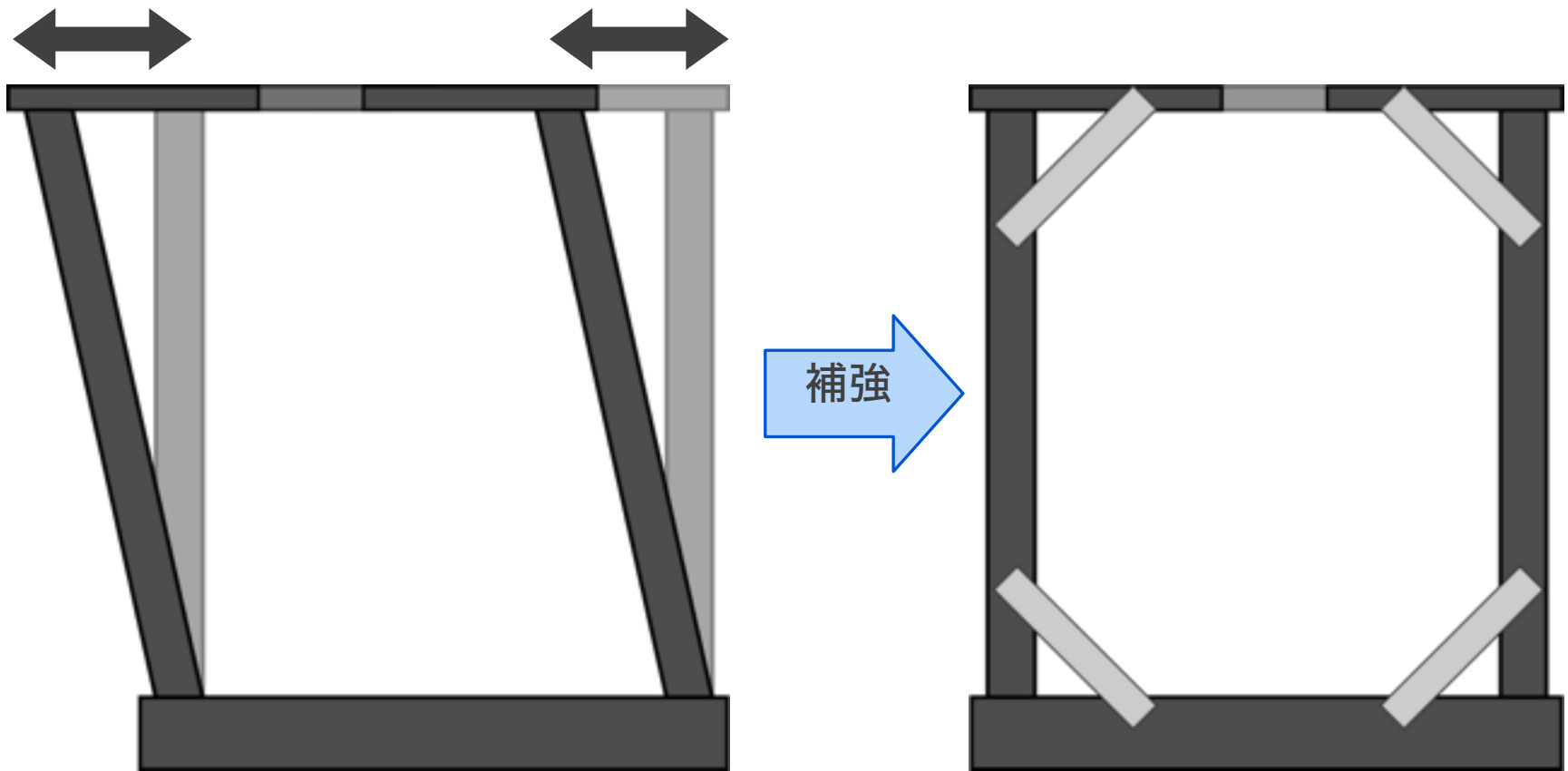
(1) アクチュエータのレンジ

- 地面振動: peak to peakで~ 18 μm
 - ▶ 3軸を同時に制御しようとする、~ 30 μm 必要
- 一方アクチュエータのレンジは~ 30 μm
 - ▶ レンジが足りない
- レンジの長いピエゾに交換
 - ▶ 30 μm →60 μm



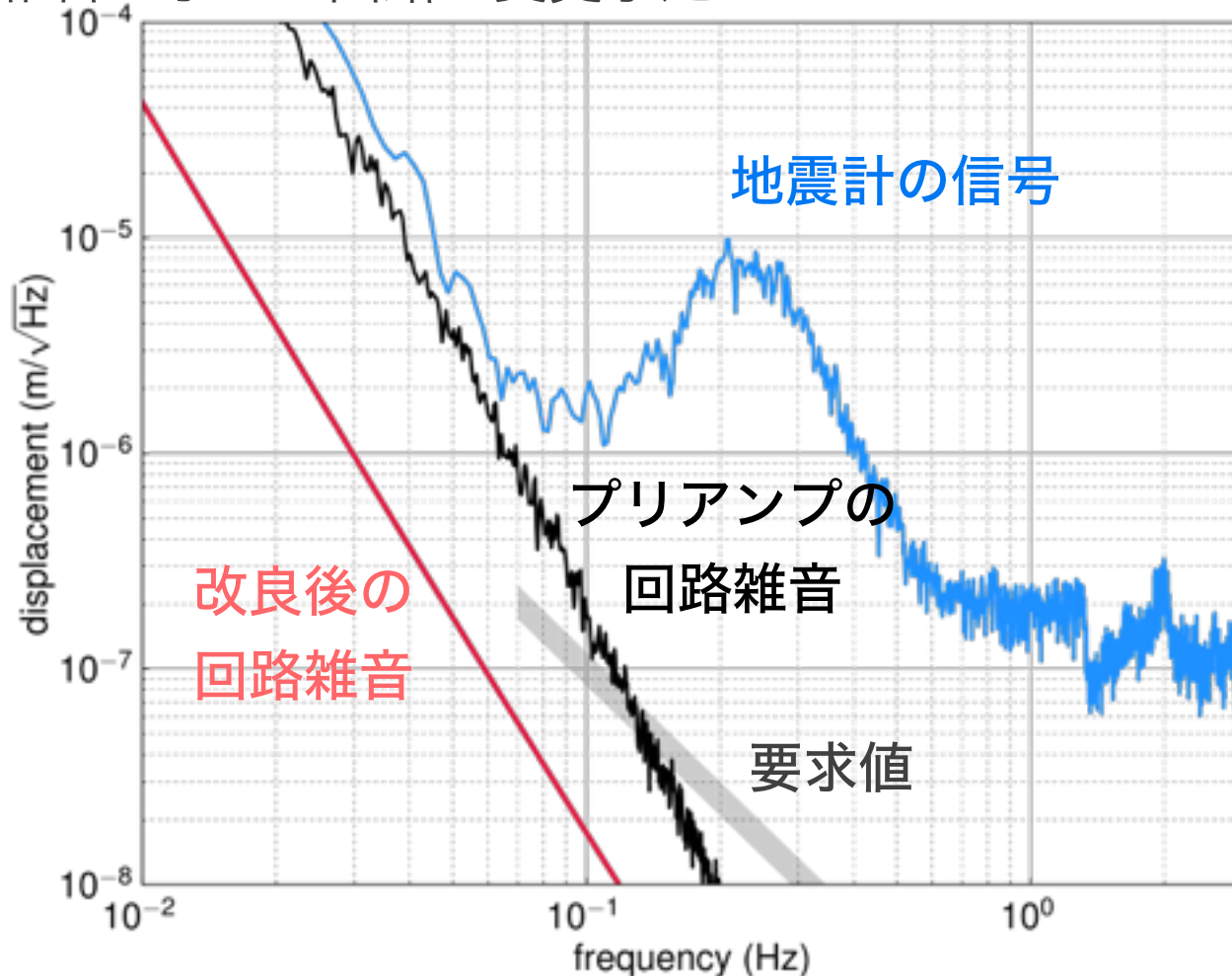
(2) フレームの共振

- AVITを乗せたフレームが並進方向に歪むモードの共振
 - ▶ フレームに斜めに梁をつけることで共振周波数を高くする



(3) プリアンプの回路雑音

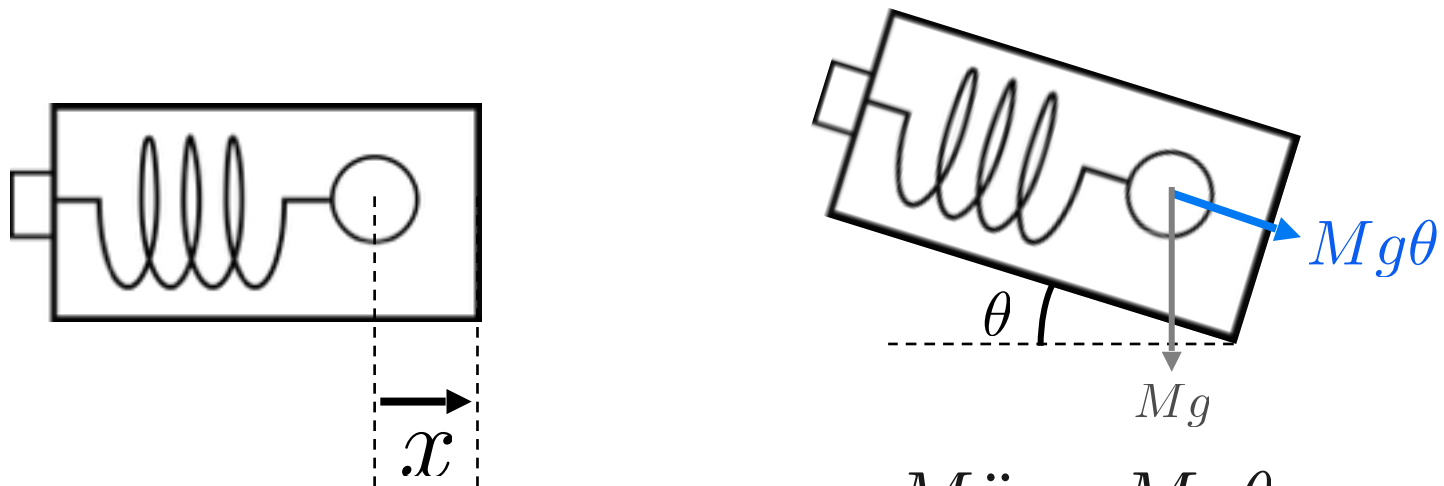
- プリアンプの回路の雑音が低周波の感度を制限
 - ▶ より雑音の小さい回路に変更予定



(4) 地震計と傾き変動のカップリング

地震計は内部のマスと地震計の容器との相対変位を読み取る

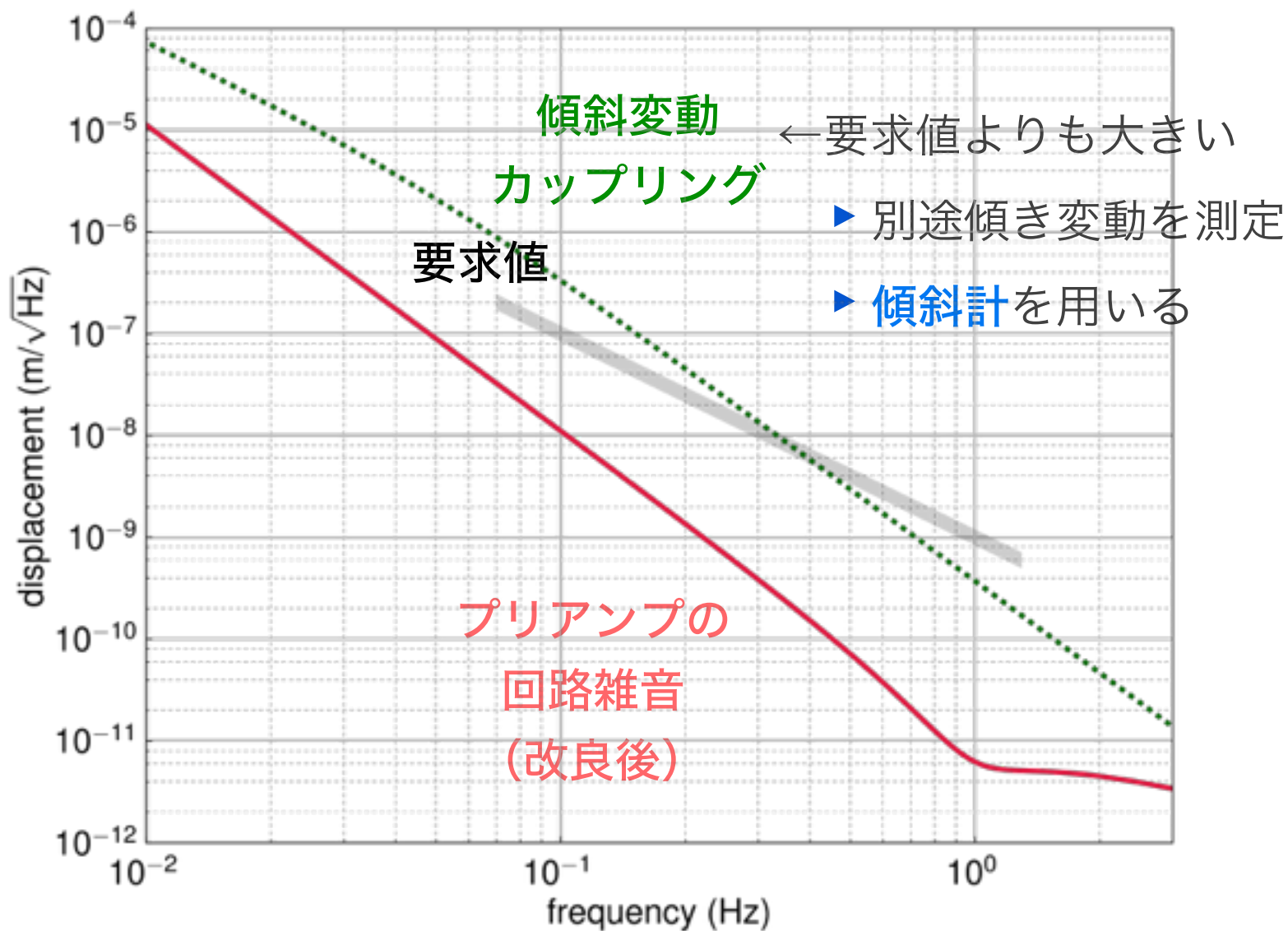
- ▶ 地震計が傾いていると、傾きに比例して重力がマスに働く
- ▶ 傾きが変動するとマスにかかる重力も変動し、マスが余計に揺らされる



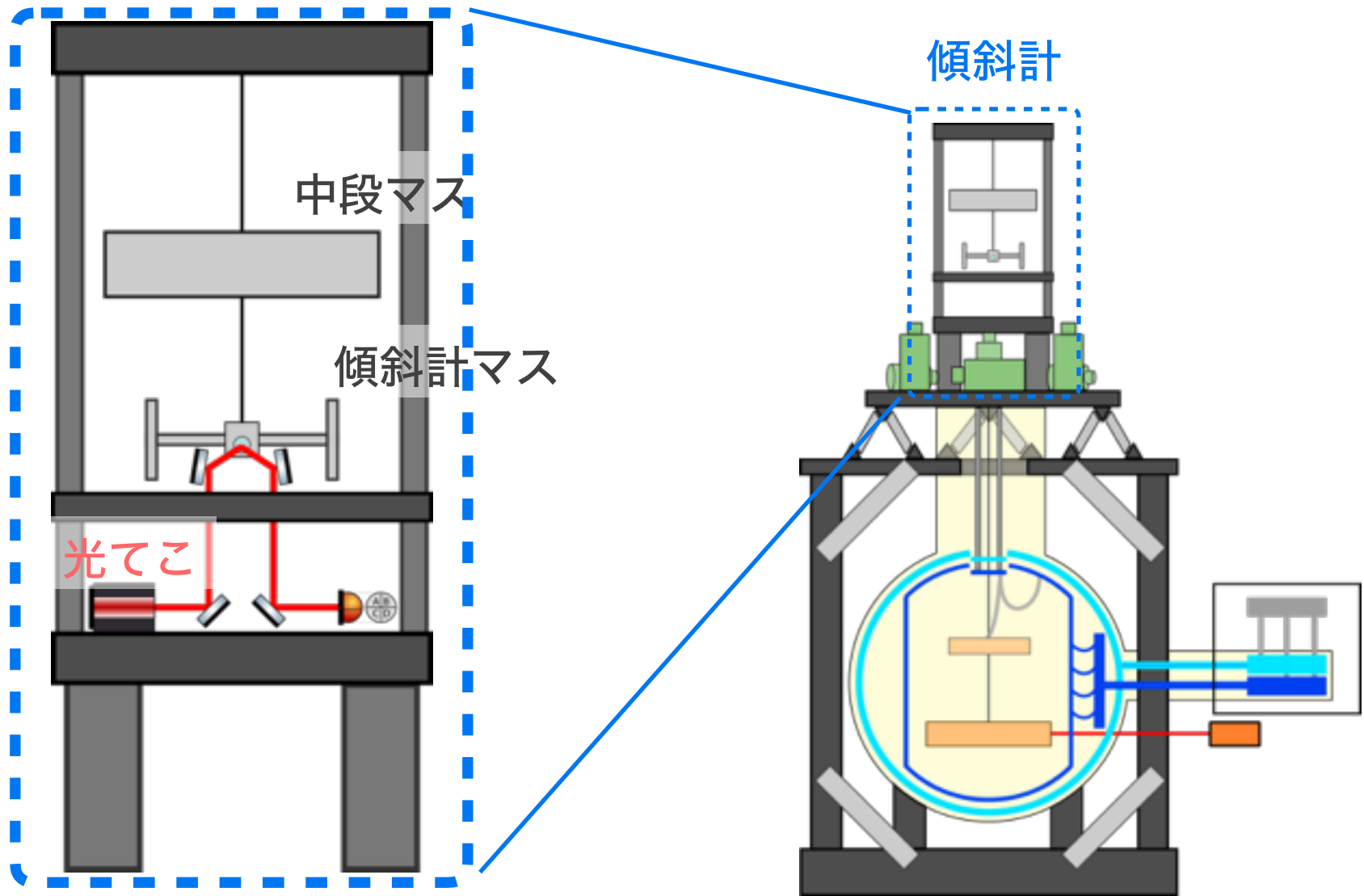
$$M\ddot{x} = Mg\theta$$

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

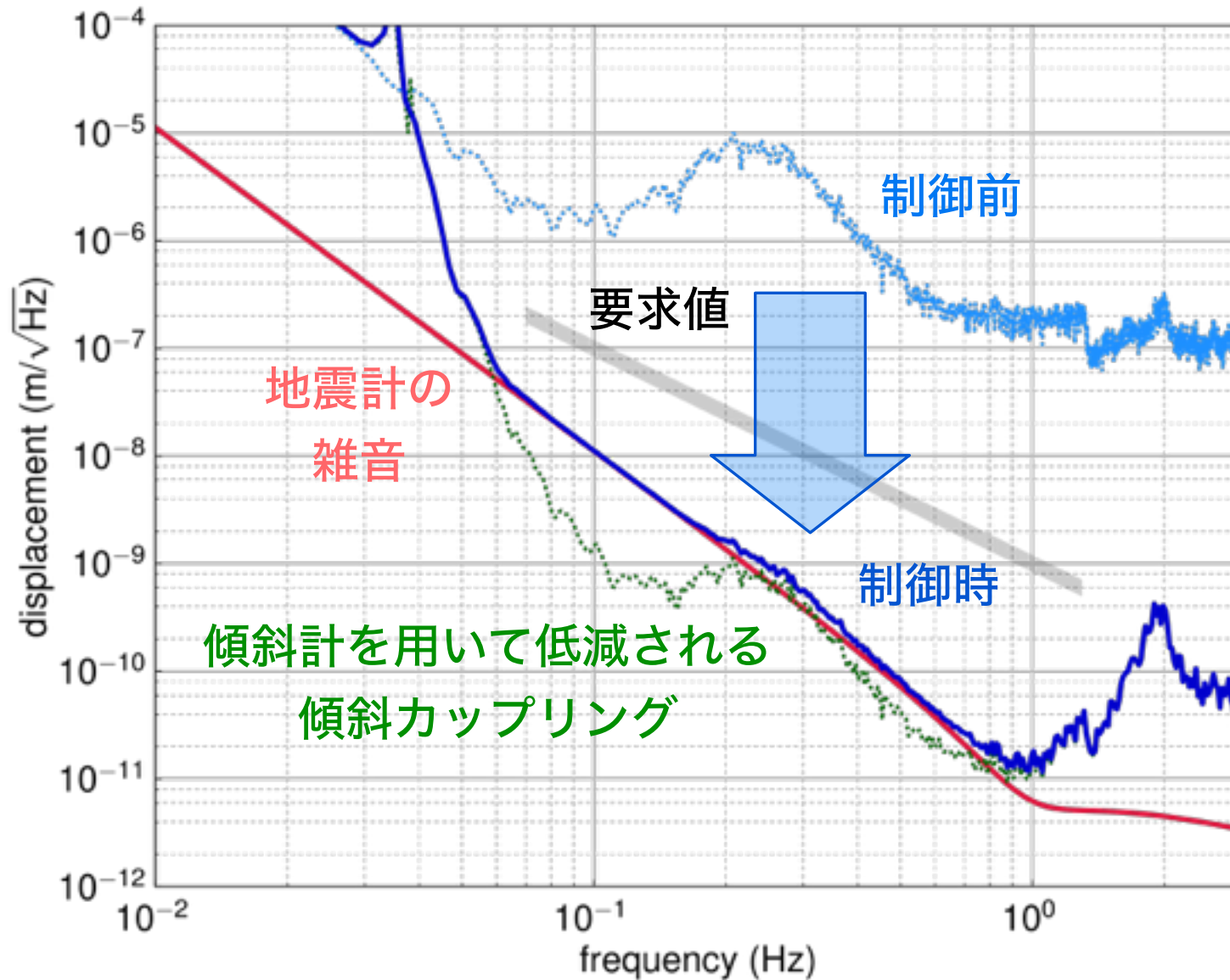
傾斜変動カップリング



能動防振系の改良案



設計性能



Conclusion

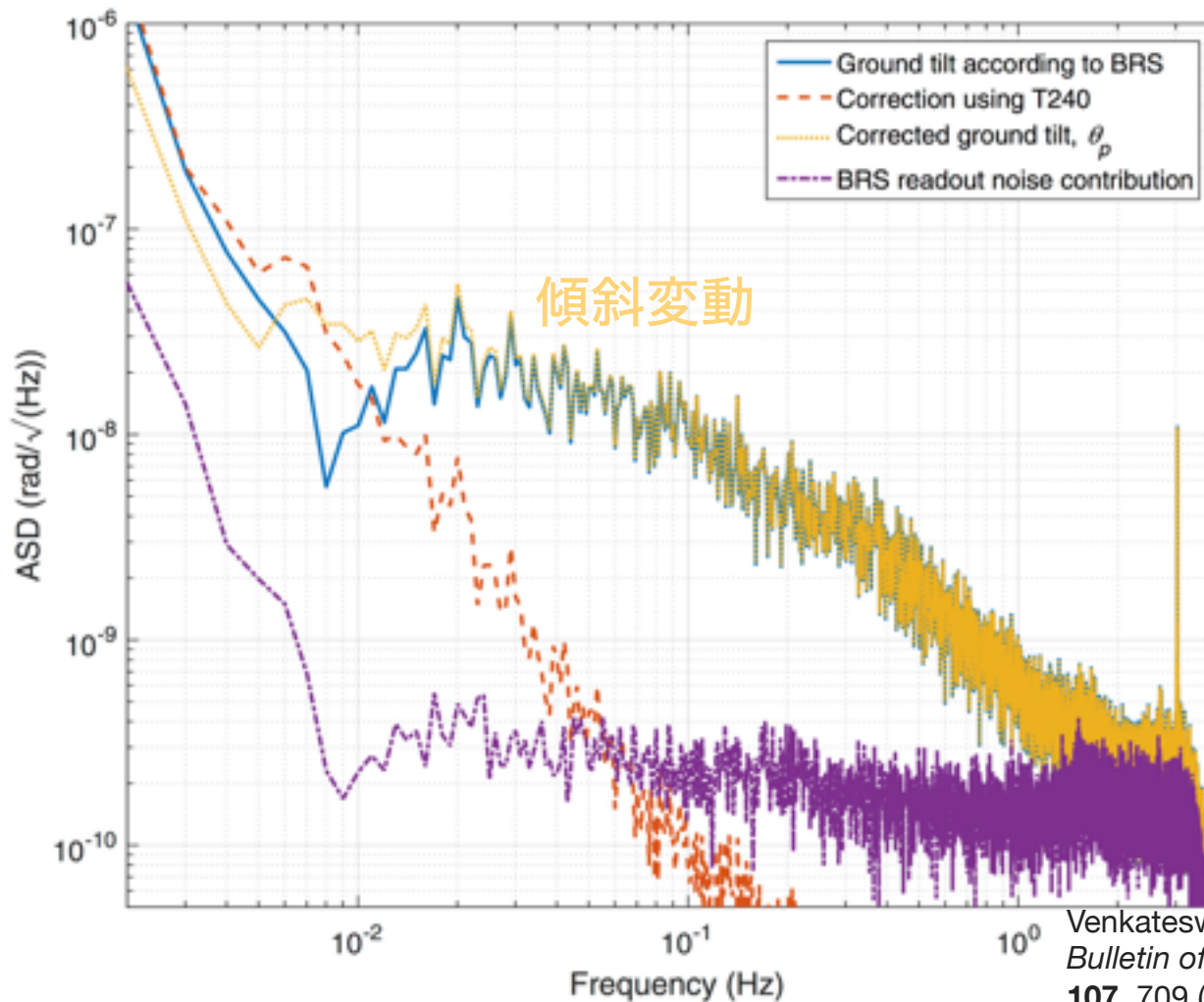
- Phase-III TOBAに向けた能動防振系の設計を行った
 - ▶ より長いレンジをもつピエゾアクチュエータ
 - ▶ フレームの補強
 - ▶ プリアンプ回路の改良
 - ▶ 傾斜計の利用
- 今後はこれらを組み上げ、要求値 10^{-7} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz達成に向けて性能向上を行う

End

補助スライド

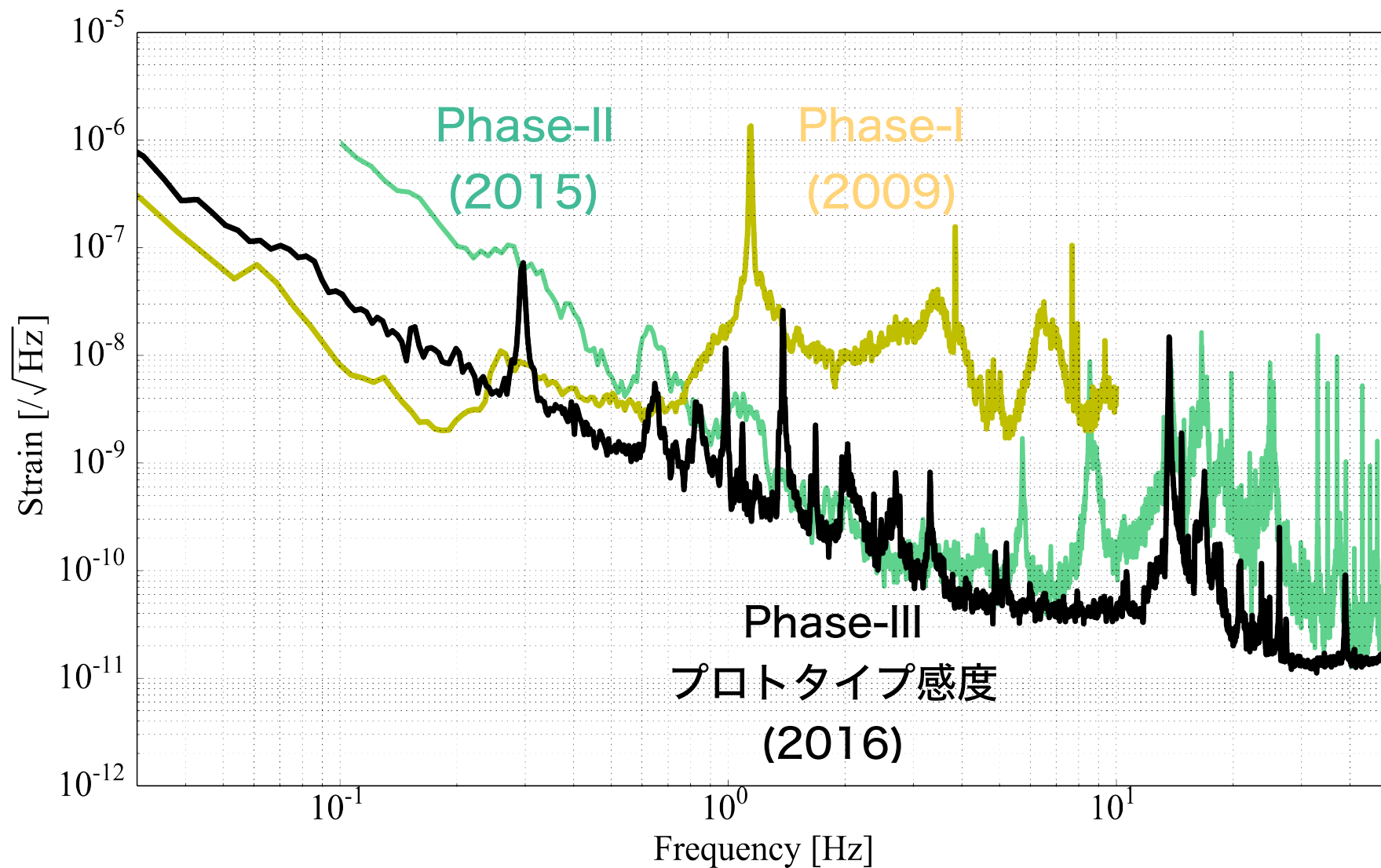
傾斜変動

ワシントン大で測定された傾斜変動

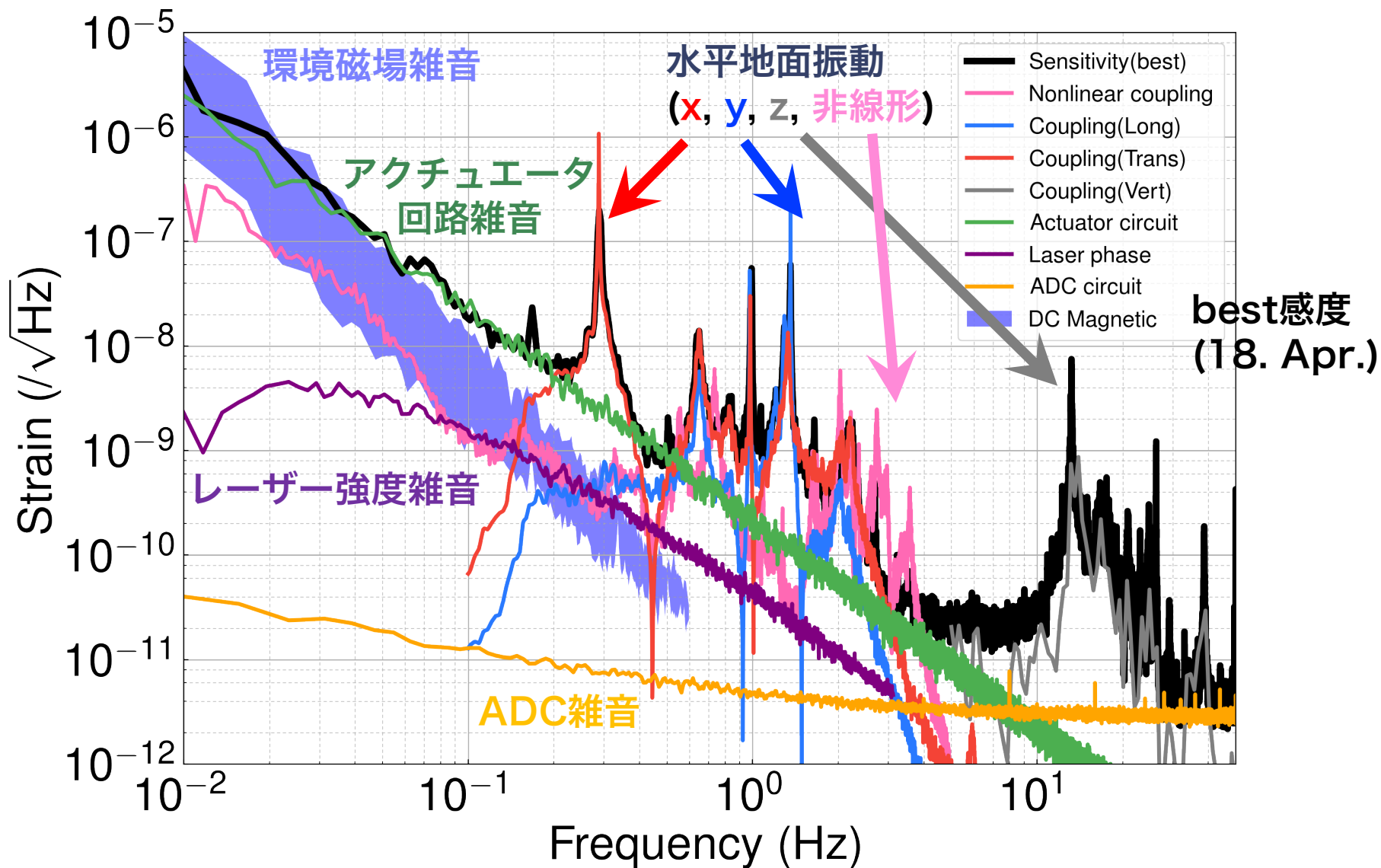


Venkateswara, et al.
Bulletin of the Seismological Society of America
107, 709 (2017)

これまでの感度1

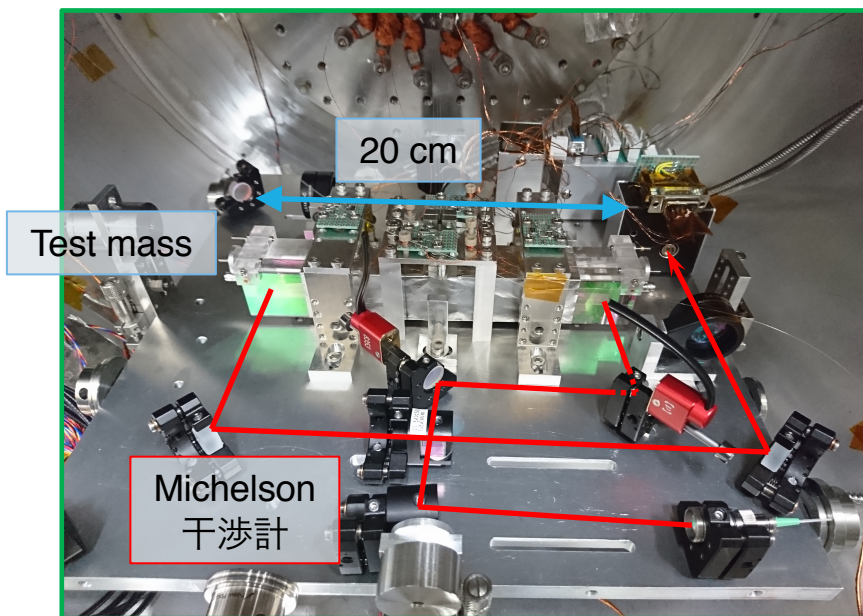


これまでの感度2

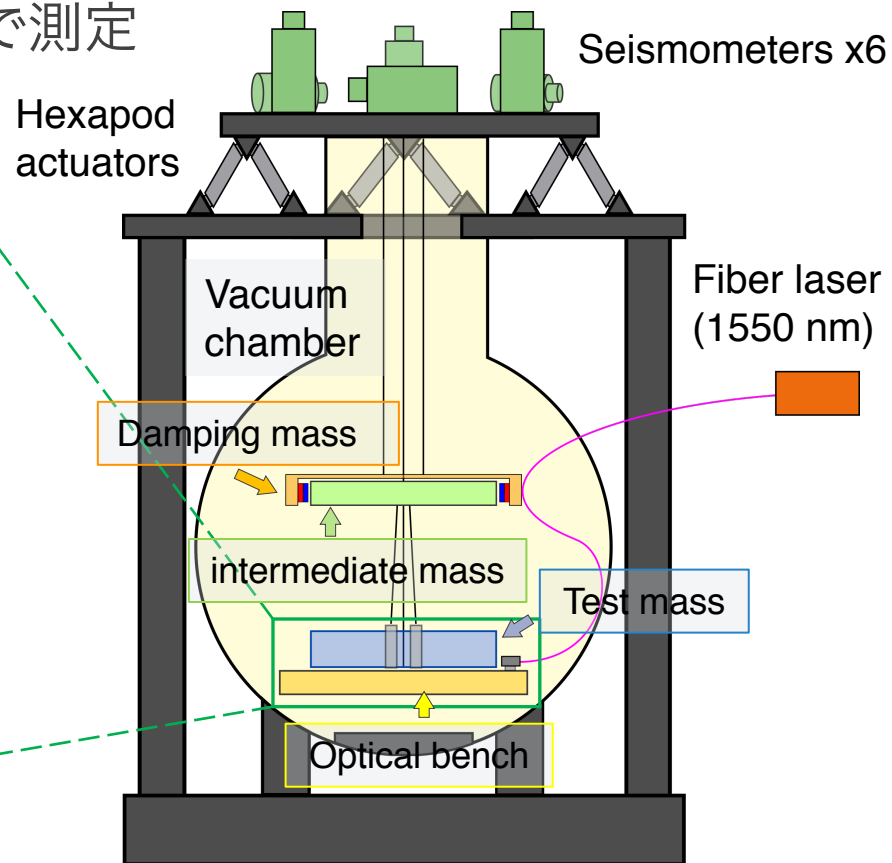


Phase-IIIのプロトタイプ

20cm試験マス， 2段ねじれ振り子懸架系
両腕の差動並進をMichelson干渉計で測定



Readout system



地震計から計測可能な傾斜カップリング

