

ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発(47): ねじれ振り子と読み取り光学系の開発

大島 由佳^A, 高野 哲^B, 杉本 良介^A, 亀 伸樹^C,
綿田 辰吾^C, 横澤 孝章^D, 三代木 伸二^D, 鷺見 貴生^E,
宗宮 健太郎^B, 道村 唯太^F, 小森 健太郎^F, 安東 正樹^{A,F}

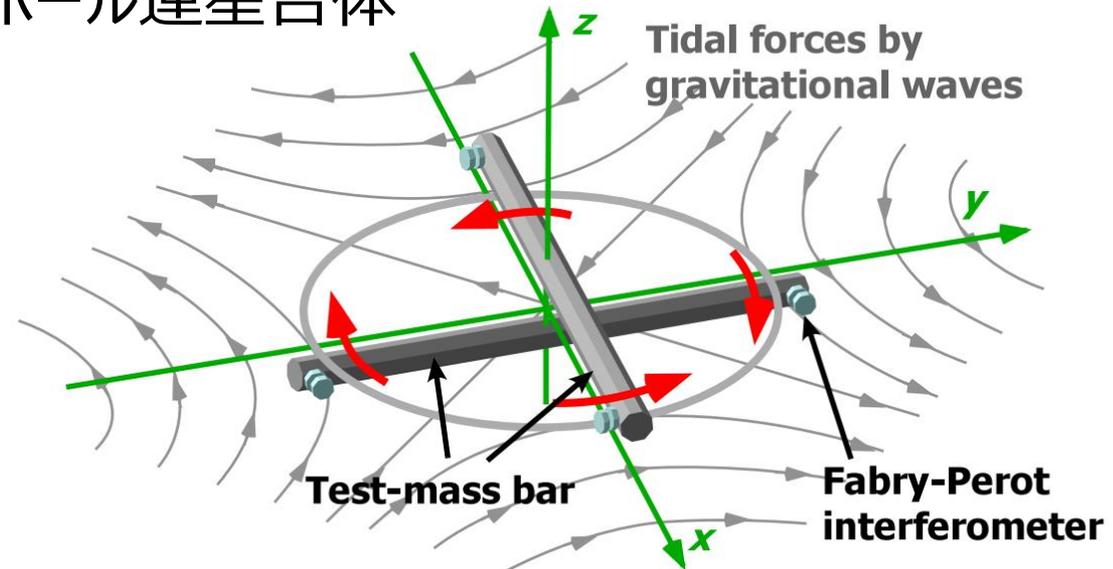
東大理^A, 東工大理^B, 東大地震研^C,
東大宇宙線研^D, 国立天文台^E, 東大ビッグバン^F

概要

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡TOBAで
0.1 Hz帯の重力波観測を目指している
- プロトタイプ検出器Phase-III TOBAを開発中
 - 目標感度: $1 \times 10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
- 懸架系と読み取り光学系の開発を進めている
 - 設計感度: $1 \times 10^{-11} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
 - 縦防振のためのモリシックGASフィルターを開発し
共振周波数3 Hz程度を実現した
 - 懸架系と光学系の組み立て・真空槽へのインストール
 - 共振器の評価・光でこの信号取得を行った

ねじれ振り子型重力波望遠鏡TOBA

- TOBA: TOrsion-Bar Antenna
- 水平に懸架した2本の棒状マスで潮汐力によるねじれ回転を検出
- ねじれ振り子の共振周波数は低い (~ 1 mHz)
→ 地上で低周波数に高感度
- 低周波の重力波観測
 - 中間質量ブラックホール連星合体
 - 背景重力波
- 地球物理の観測
 - 重力勾配雑音
 - 地震速報



[M. Ando+ \(2010\)](#)

TOBA開発の流れ

Phase-I

Phase-II

現在

Phase-III

Final

原理実証

$10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ @0.1 Hz
(達成)

20 cmテストマス・常温

要素開発・雑音低減
地球物理の観測

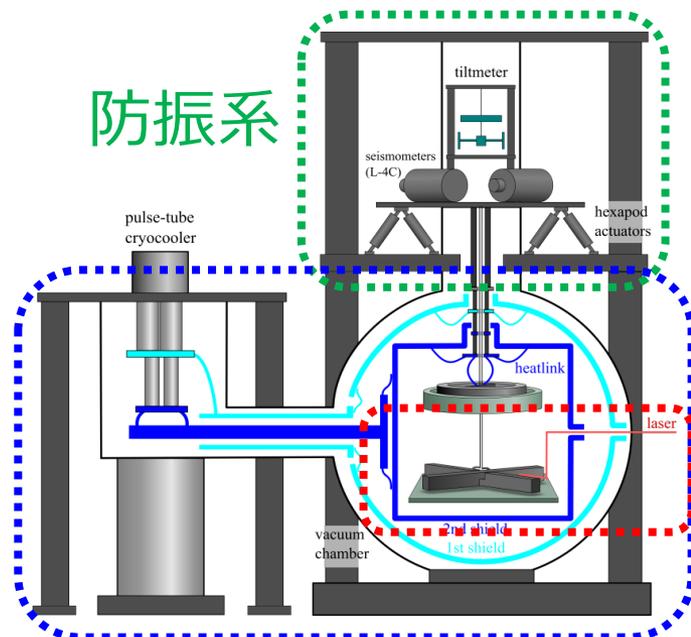
$10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ @0.1 Hz
(目標)

30 cmテストマス・低温

重力波観測

$10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}}$ @0.1 Hz
(目標)

10 mテストマス・低温

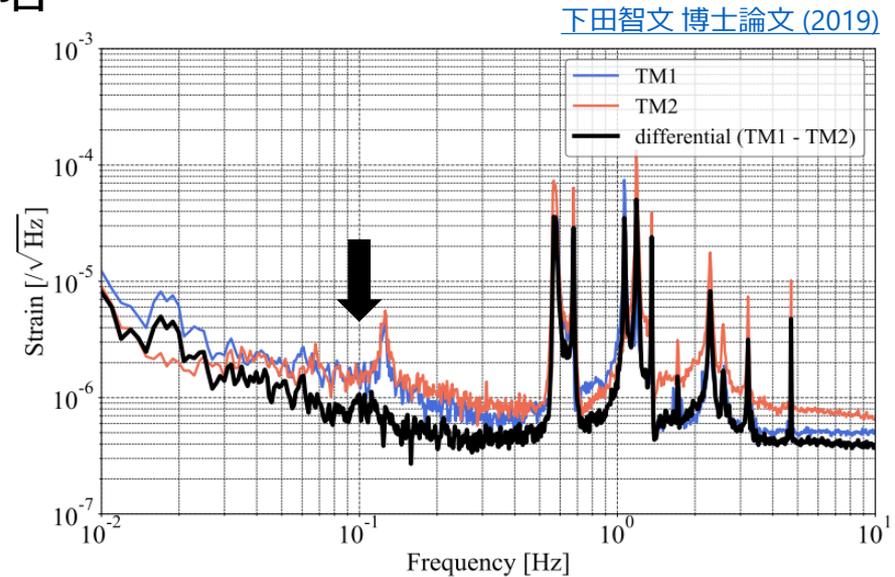
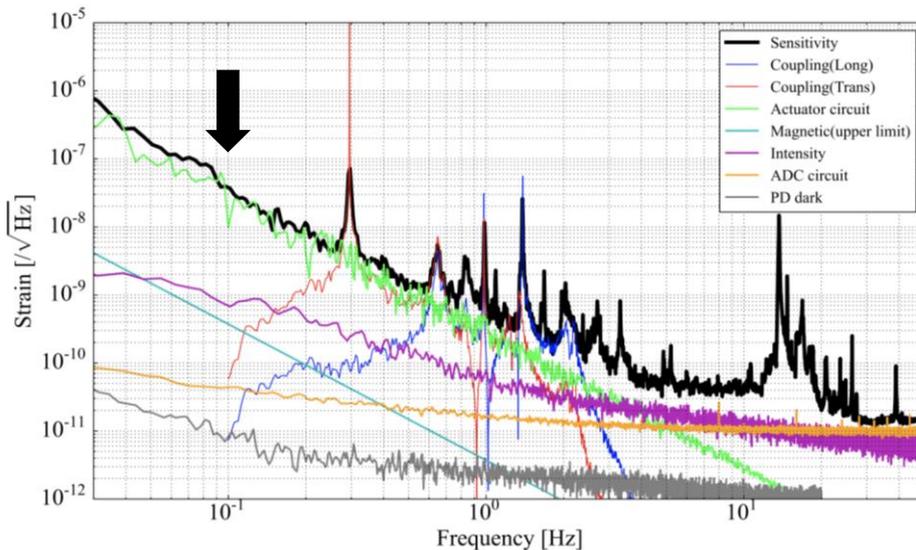


→ 本研究では
懸架系と光学系の
開発を行う

Phase-III TOBAの達成感度と課題

- 常温での達成感度: $4 \times 10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
 - カウンターウェイトによるテストマスの傾き調整
 - 読み取り光学系はマイケルソン干渉計
 - アクチュエータ雑音・並進地面振動からのカップリング雑音で感度が制限
- 低温での達成感度: $7 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
 - 6 Kまでの冷却に成功
 - 読み取り光学系は光てこ
 - ビームジッター雑音で感度が制限

→ 構成を改良し感度を追求する段階



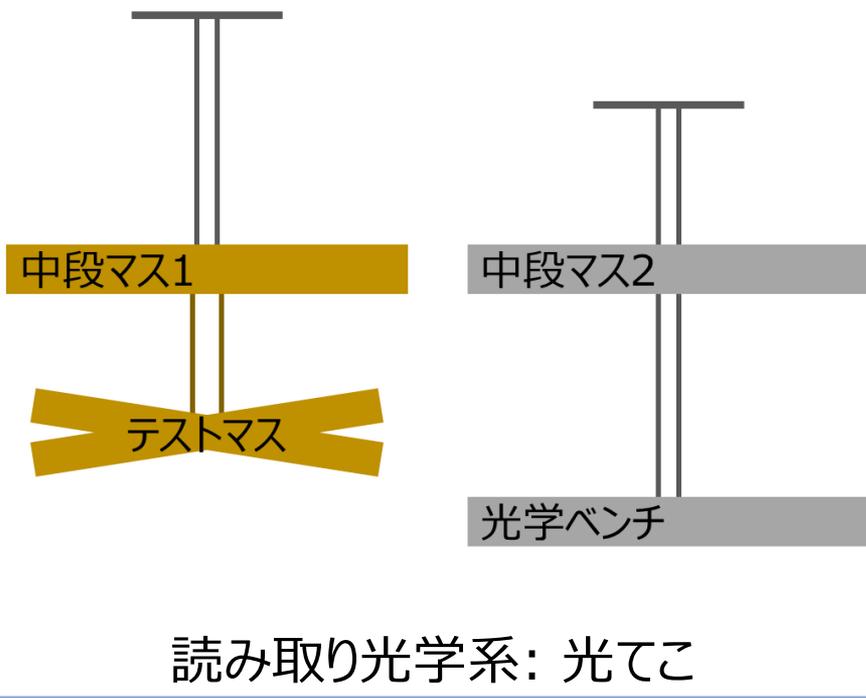
本実験の目標

- 構成を改良し現在の状況で可能な最高感度を達成する
 - $1 \times 10^{-11} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz (熱雑音で制限)
 - 低温で低損失の懸架ワイヤは開発中

過去の実験 (低温で $7 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$)

テストマスチェーン

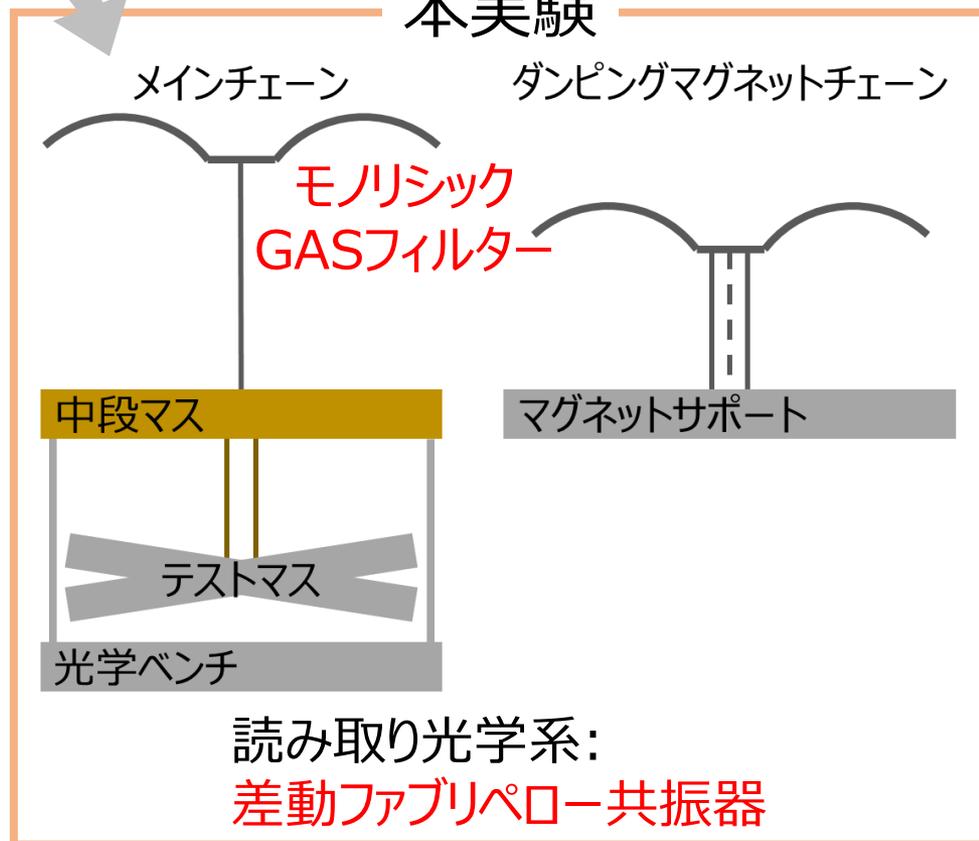
光学ベンチチェーン



本実験

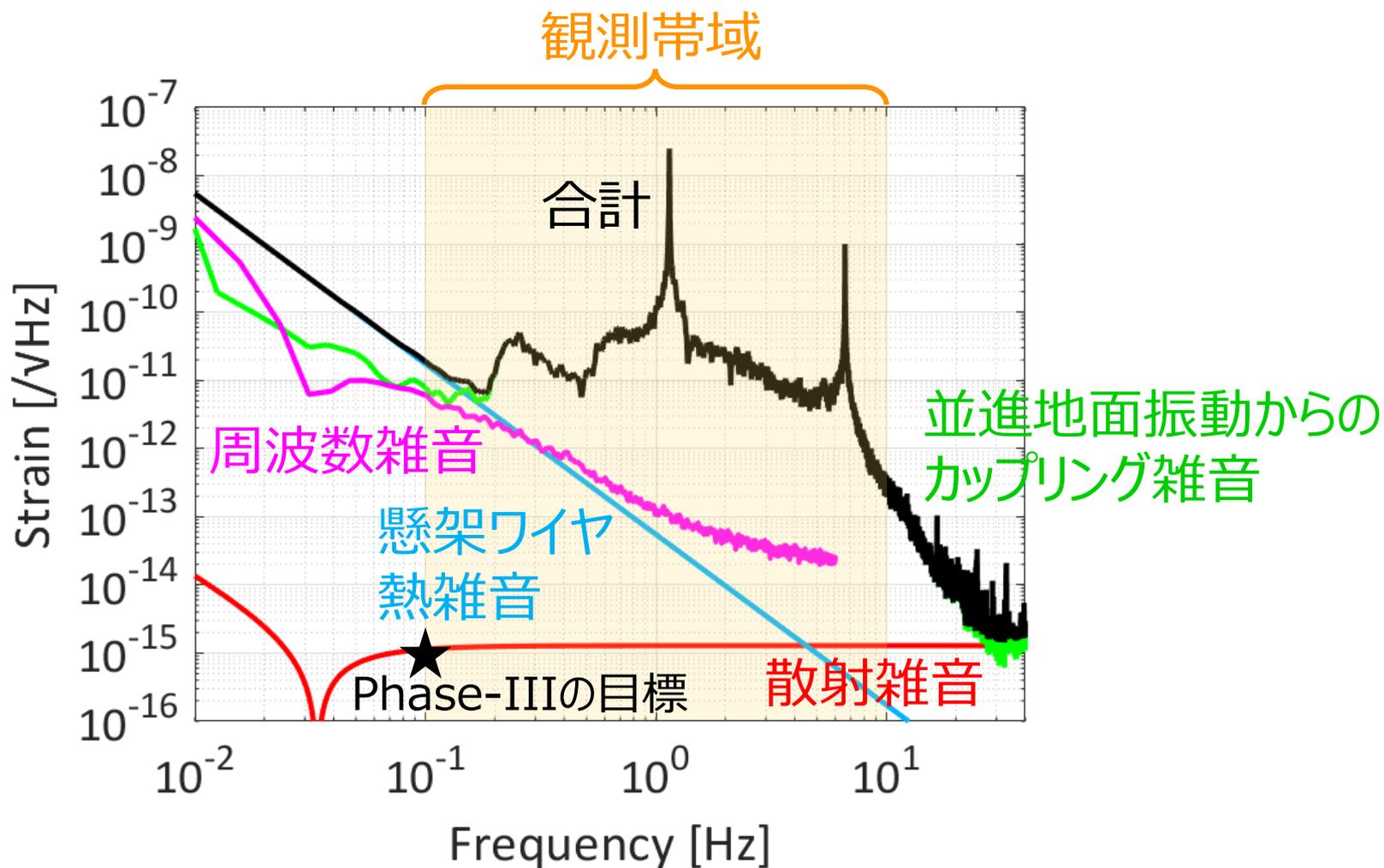
メインチェーン

ダンピングマグネットチェーン



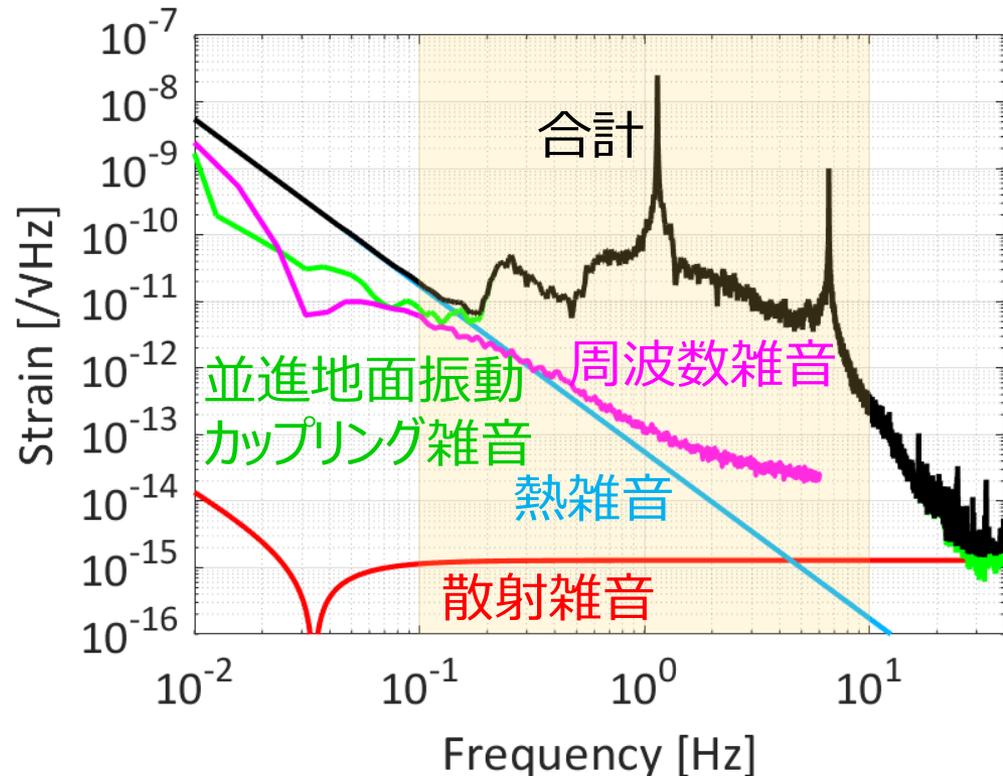
本実験の設計感度

- $1 \times 10^{-11} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
 - 熱雑音・並進地面振動カップリング雑音で制限



本実験の設計値

- ねじれの共振周波数 < 0.1 Hz
 - テストマスの慣性モーメント 0.0083 kg m^2
 - 懸架ワイヤ ベリリウム銅, 直径 0.3 mm , 長さ 12 cm , Q値 3000
→ ねじれの共振周波数 34 mHz
- 並進地面振動からのカップリング雑音 $<$ 熱雑音
 - テストマス傾き 10^{-5} rad
- 散射雑音 $<$ 熱雑音
 - 差動ファブリペロー共振器
フィネス 400 ,
入射パワー 1 mW
- 周波数雑音 $<$ 熱雑音
 - 2つの共振器の
同相雑音除去比 $1/50$



実験の構成：懸架系

メインチェーン

ダンピングマグネットチェーン

モリシックGASフィルター

タングステン
Φ 0.4 mm
1本

タングステン
Φ 0.1 mm
3本

銅 2.5 kg

SUS 2.9 kg

中段マス

マグネットサポート

ベリリウム銅
Φ 0.3 mm
各1本

アルミニウム
Φ 7 mm
4本

テストマス

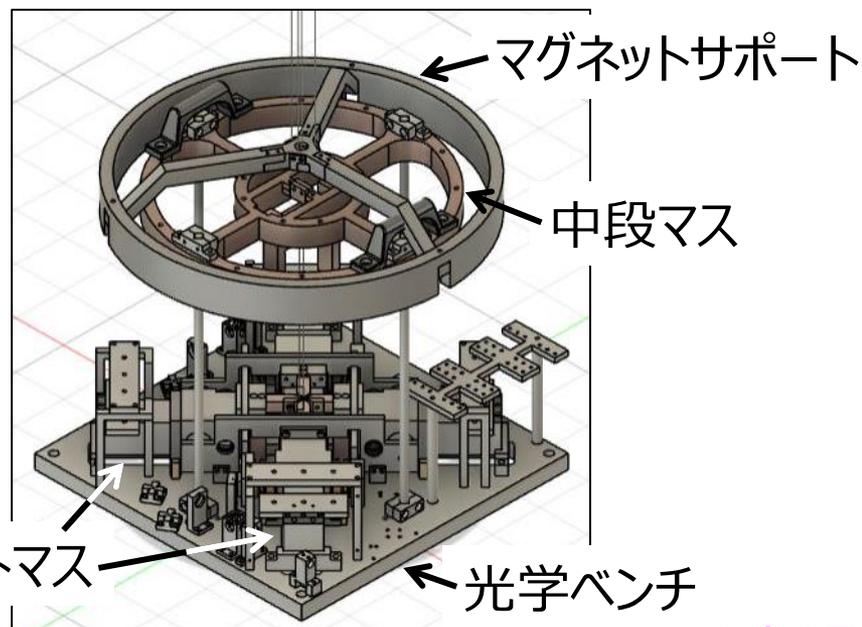
アルミニウム 各0.6 kg

光学ベンチ

アルミニウム 2.4 kg

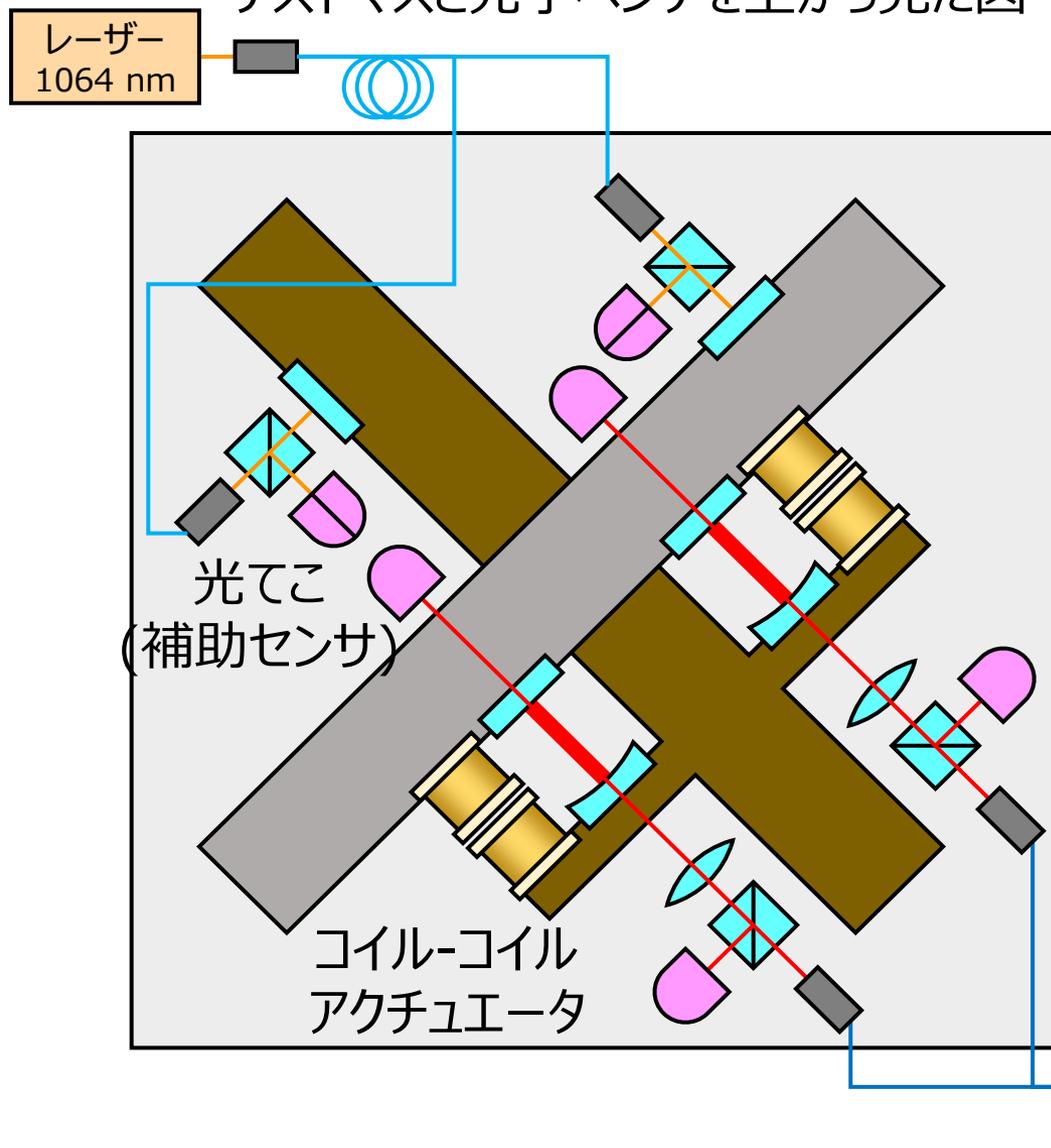
30 cm

30 cm



実験の構成：光学系

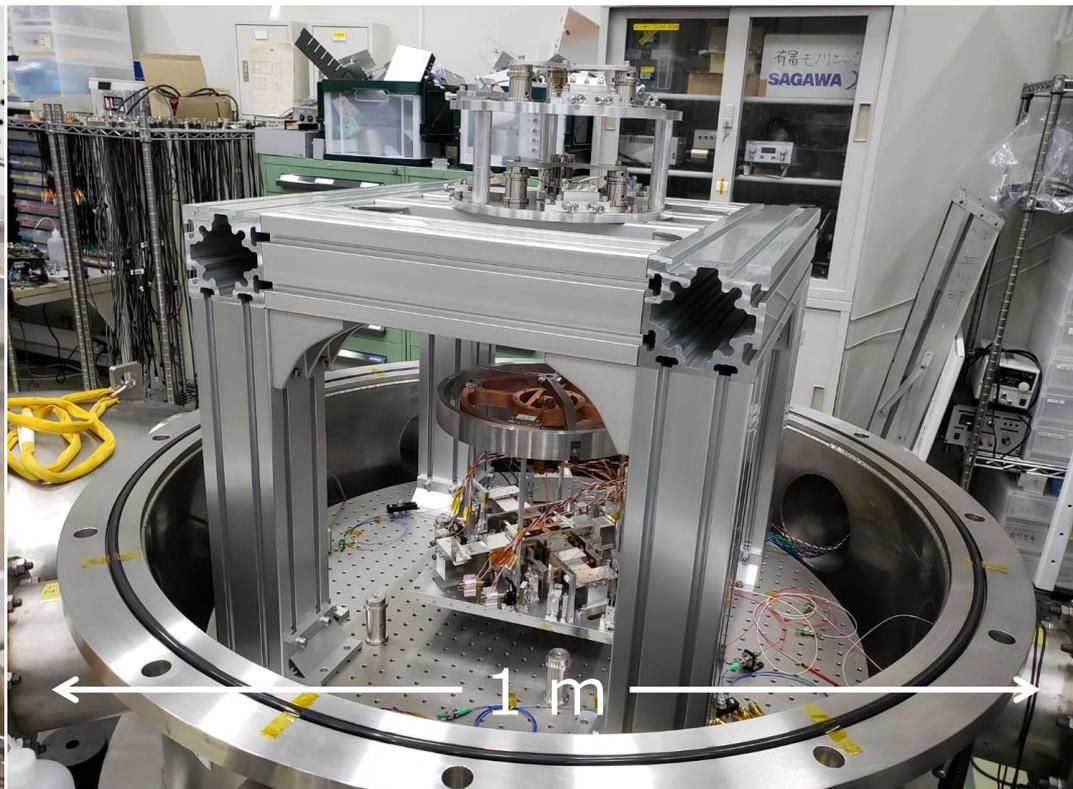
テストマスと光学ベンチを上から見た図



- テストマス間で共振器を構築
← 光学ベンチの揺れが雑音
とならない
- PDH信号の差から回転を
読み取る
- 共振器の制御
 - 同相信号はレーザー周波数
 - 差動信号はテストマスに付けた
コイル-コイルアクチュエータ

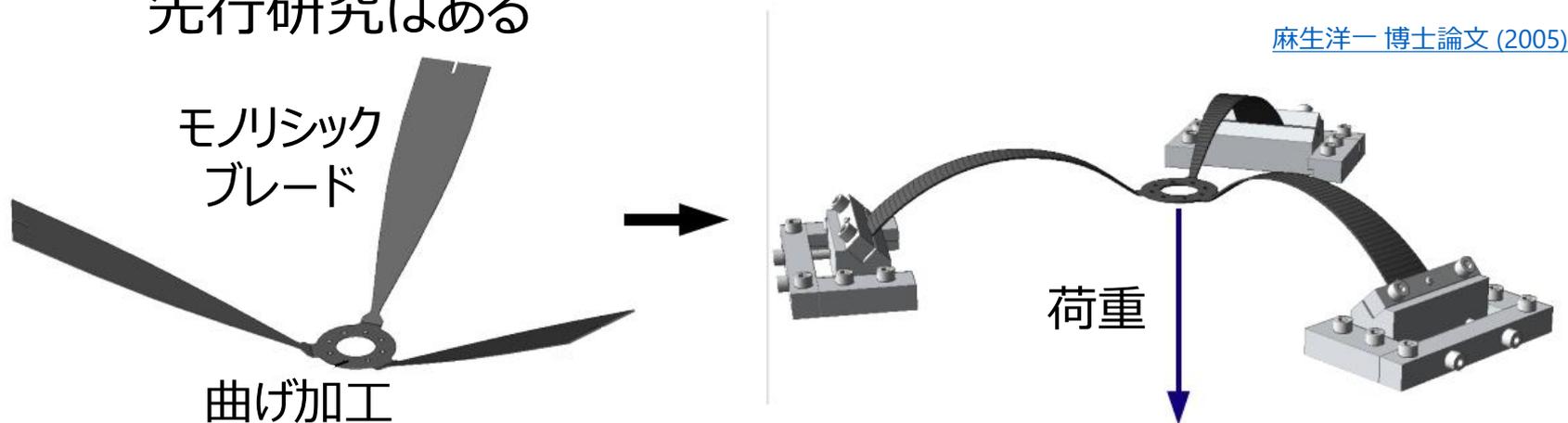
今回行った実験

- 縦防振のためのモリシックGASフィルターの開発
- 懸架系と光学系の組み立て・真空槽へのインストール
- 共振器のフィネスの測定
- 光でこの信号取得



モノリシックGASフィルターの開発

- モノリシック Geometric Anti-Spring フィルター
 - 反ばね効果を利用して低周波の縦防振を実現する装置
 - マルエージング鋼を用いたTOBAより大きな実験系での先行研究はある

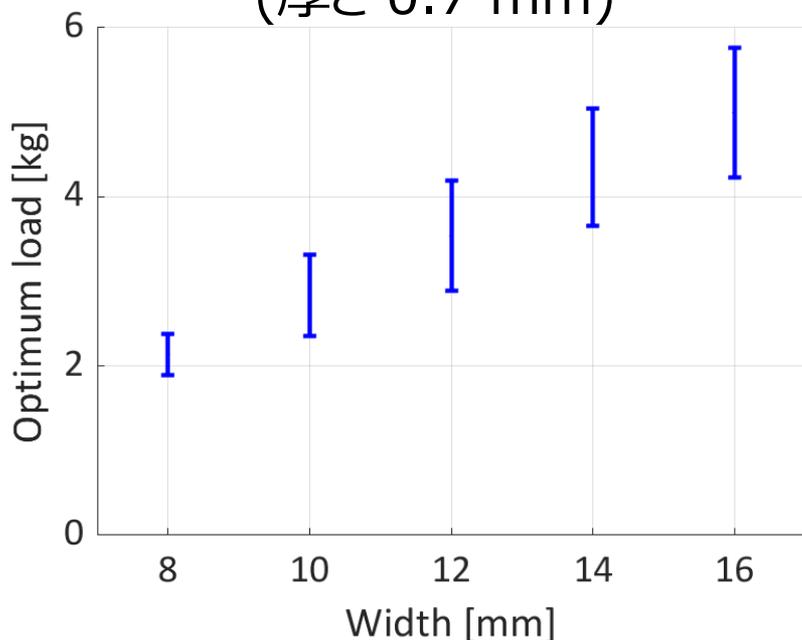


- TOBAにモノリシックGASフィルターを導入する
 - 10 Hz以上の縦方向の地面振動からのカップリング雑音を低減するため
 - 入手容易で安価なSUS304ばね材を用いる
 - 荷重は1-10 kg

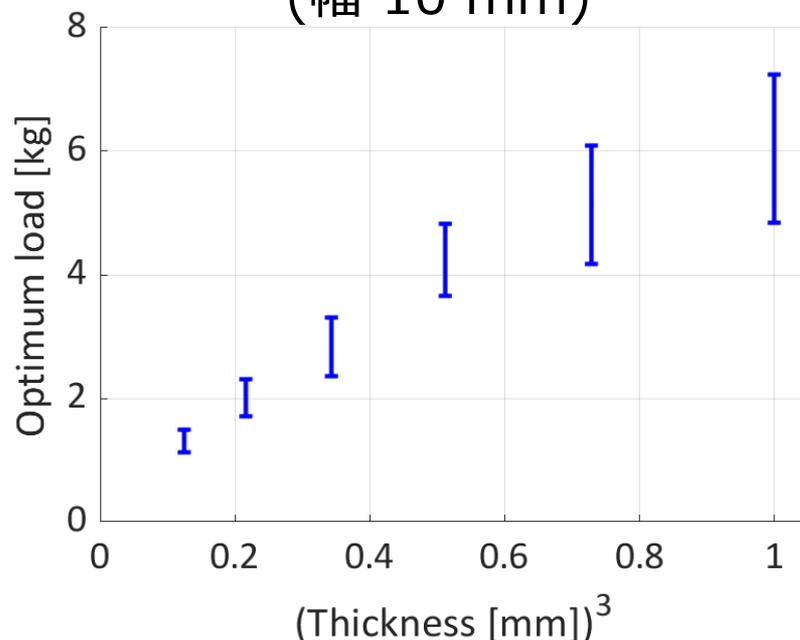
モリシックGASフィルターの開発

- 最適な荷重はブレードの幅に比例, 厚みの3乗に比例する
- 複数のブレードを製作し最適荷重を計測した
 - 材質: SUS304ばね材 CSP-3/4H
 - 幅: 8-16 mm
 - 厚さ: 0.5-1.0 mm

ブレードの幅を変えて計測
(厚さ 0.7 mm)

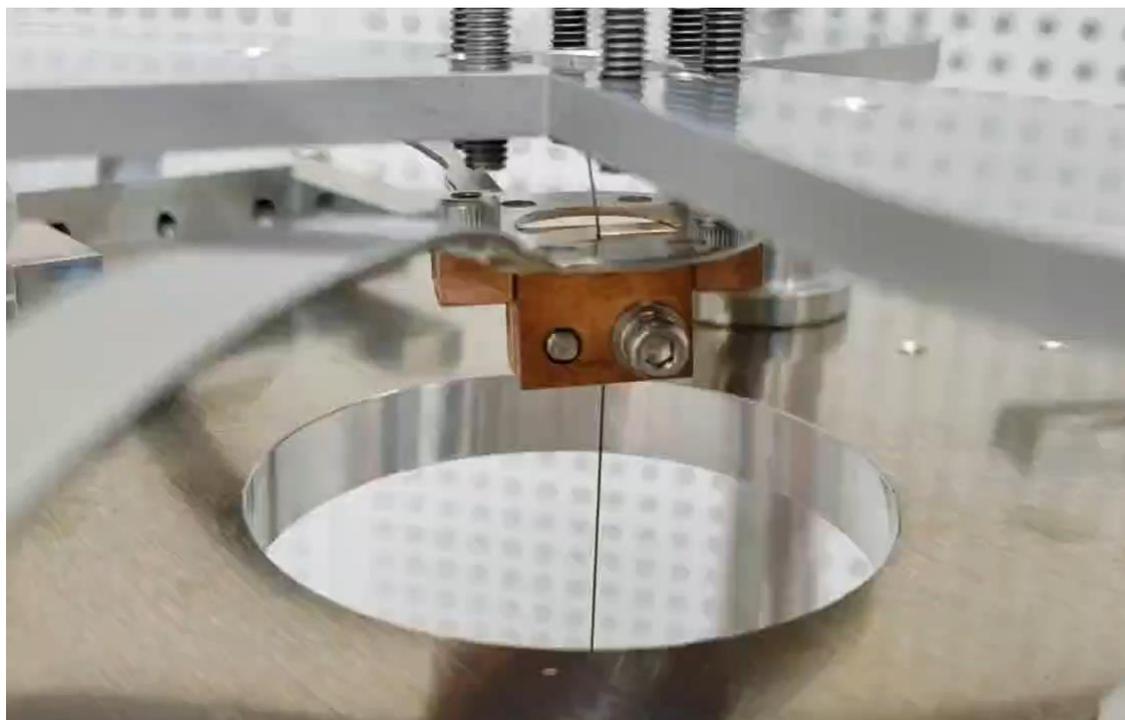
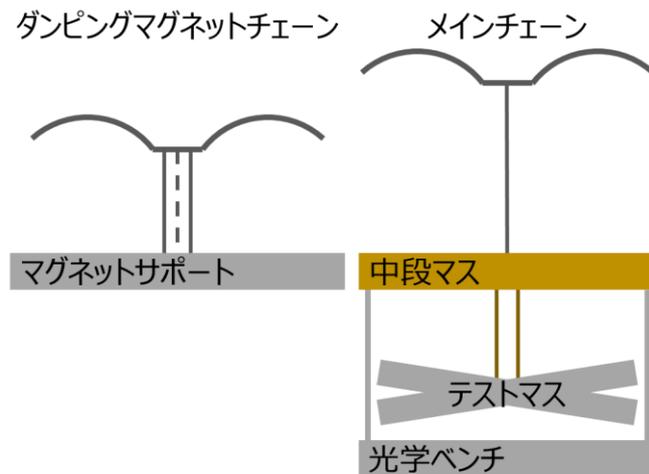


ブレードの厚さを変えて計測
(幅 10 mm)



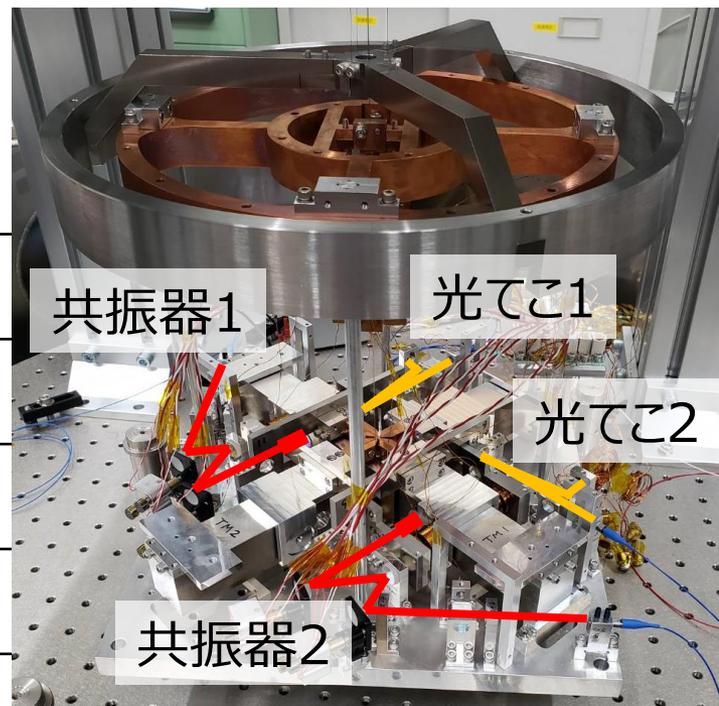
モノリシックGASフィルターの開発

- ダンピングマグネットチェーン (2.9 kg)
 - 材質: SUS304ばね材 CSP-3/4H
 - 幅: 10 mm
 - 厚さ: 0.7 mm
- メインチェーン (10.1 kg)
 - 材質: SUS304ばね材 CSP-H
 - 幅: 10 mm
 - 厚さ: 1.0 mm
- 共振周波数
3 Hz程度を
実現できた
→ 開発が完了



共振器のフィネスの測定

- 懸架系をジグで固定した状態でフィネスの測定を行った



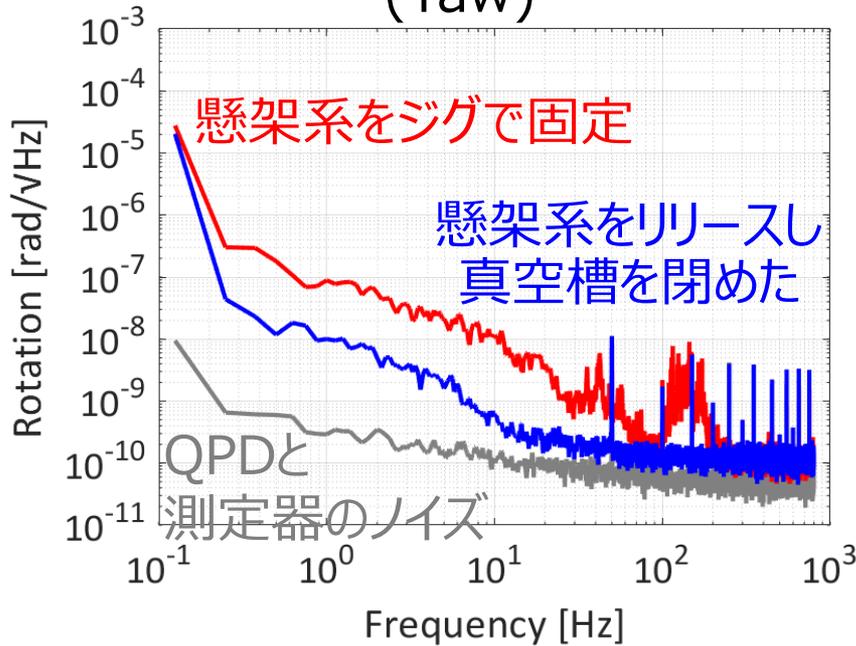
共振器長		23 mm
フロントミラー	曲率	100 mm
	反射率	99%
エンドミラー	曲率	フラット
	反射率	99.5%
フィネス		計算値: 417 共振器1の測定値: 328 ± 27 共振器2の測定値: 257 ± 19

→ 鏡での光のロス: 0.4%
→ 鏡での光のロス: 0.9%

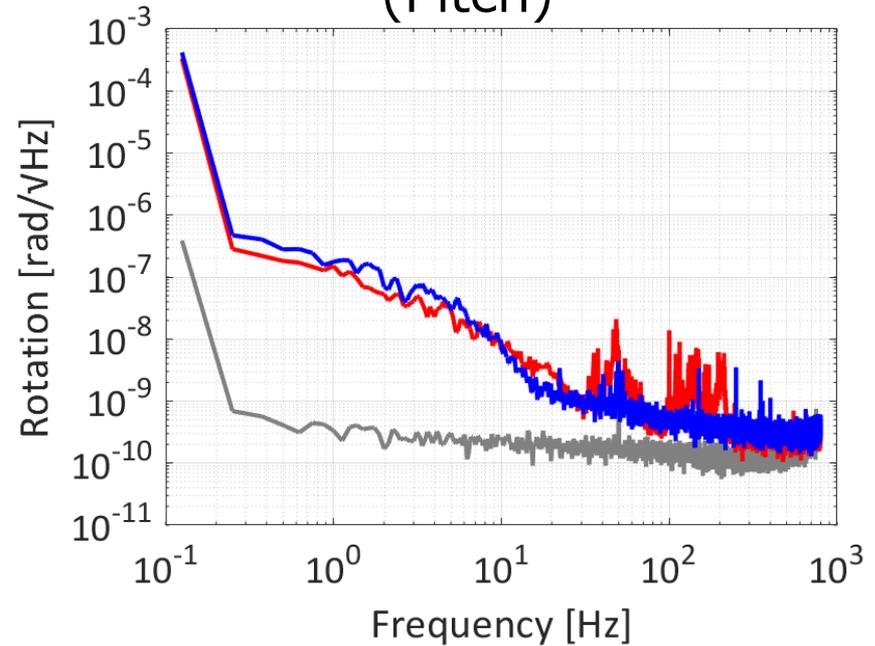
光てこのスペクトル

- 懸架系をリリースして光てこの信号を取得した
→ 光てこを補助センサとして用いて2つの共振器をロックする予定

光てこ2のスペクトル (Yaw)



光てこ2のスペクトル (Pitch)

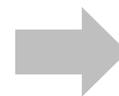


まとめ・今後の展望

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡TOBAで0.1 Hz帯の重力波観測を目指している
- プロトタイプ検出器Phase-III TOBAを開発中
 - 目標感度: 1×10^{-15} / $\sqrt{\text{Hz}}$ @0.1 Hz
- 懸架系・光学系の製作を進めている
 - 設計感度: 1×10^{-11} / $\sqrt{\text{Hz}}$ @0.1 Hz

完了

- モリシックGASフィルターの開発
- 懸架系と光学系の組み立て・インストール
- 共振器の評価
- 光でこの信号取得



今後

- 共振器のロック
- 雑音源の評価
- 観測運転