

Torsion Pendulum with Interferometric Readout for Low-Frequency Gravity Gradient Observation

低周波重力勾配観測のための高感度ねじれ振り子の開発

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 安東研究室

大島 由佳 (Yuka Oshima)

概要

- 低周波重力波などの観測を目指している
- 35 cmスケールのねじれ振り子型重力勾配計
Phase-III TOBAを開発中である
- 光学系と懸架系を組み合わせた設計・開発を行った
 - 差動ファブリペロー共振器(TOBA初)・光てこ
 - 低温シリコン仕様・アルミニウム製のねじれ振り子
 - 縦防振のためのGASフィルタ(TOBA初)
- 装置を製作し動作に成功して性能評価を行った
- 光てこによる回転計測・同相雑音除去の解析を行った
- TOBAの光学系と懸架系の構成を確立した

目次

- 研究背景 … 第1章
- ねじれ振り子型重力勾配計TOBA … 第2章
- 実験セットアップ … 第3章
- 結果・考察 … 第4章
- 結論 … 第5章

目次

- 研究背景
 - 低周波重力波
 - ニュートニアン雑音
 - 重力勾配を用いた地震速報
 - 提案・開発されている重力勾配計
- ねじれ振り子型重力勾配計TOBA
- 実験セットアップ
- 結果・考察
- 結論

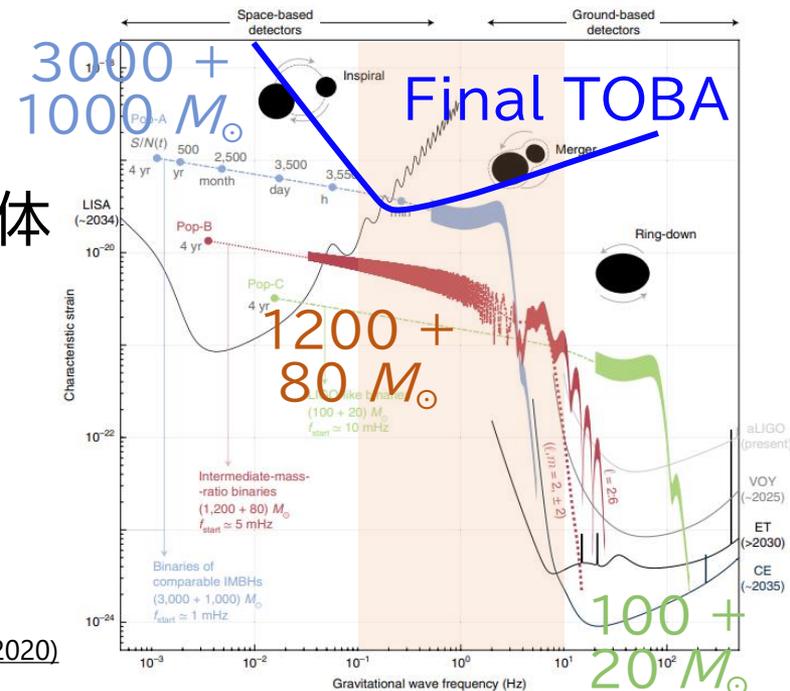
低周波重力勾配変動観測

- 観測対象
 - 低周波重力波
 - ニュートニアン雑音
 - 重力勾配を用いた地震検出
- 重力勾配[$/s^2$] = 重力歪み [無次元] の時間の2階微分
$$G(\mathbf{x}, t) = \frac{d^2}{dt^2} h(\mathbf{x}, t)$$
 - 重力勾配計 = 重力波望遠鏡
- 低周波数: ここでは0.1 Hz-10 Hz

低周波重力波

- 重力波: 時空の歪みが波として光速で伝播する現象
 - 電磁波では観測が難しい天体現象を観測できる
- 重力波観測の現状
 - レーザー干渉計型重力波望遠鏡LIGO・Virgo・KAGRAが稼働中
 - 10 Hz-1 kHzの感度が良い
 - 恒星質量ブラックホールや中性子星の連星合体を約90イベント検出 (2023年時点)

- 低周波数帯を観測することが重要
 - 中間質量ブラックホール連星合体
 - 超巨大ブラックホール
形成過程の解明
 - 背景重力波
 - 初期宇宙の直接探査

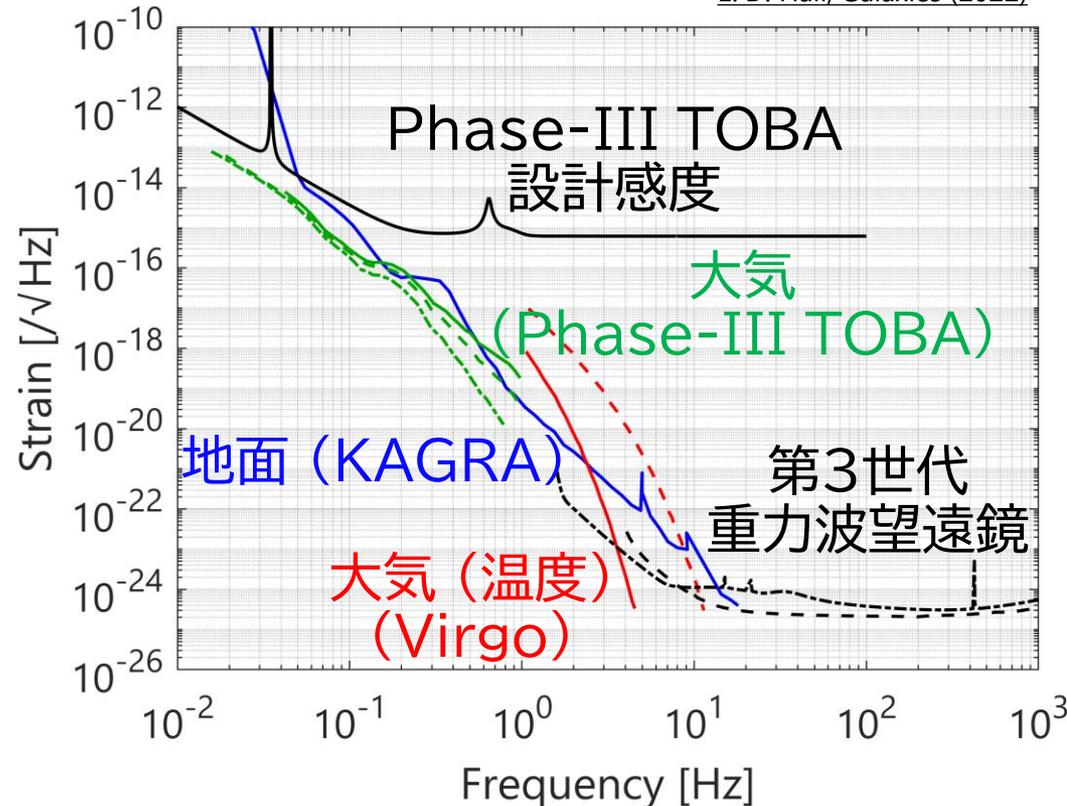
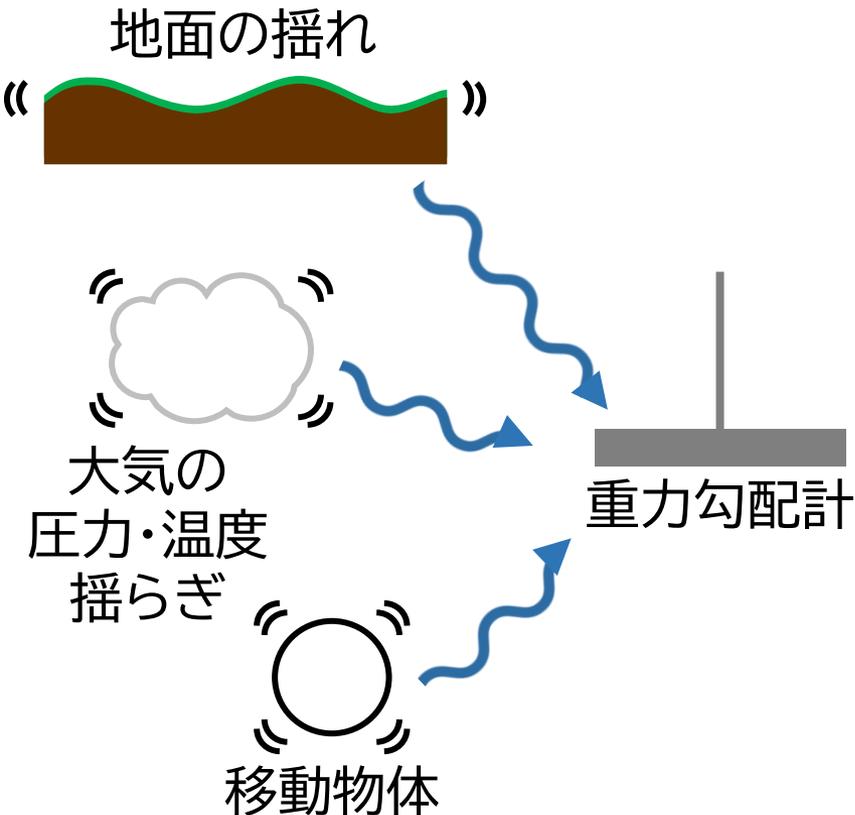


K. Jani+, Nature Astronomy (2020)

ニュートニアン雑音

- ニュートニアン雑音: 大気や地面の揺らぎによる重力勾配の変動
 - 第3世代重力波望遠鏡の主要な雑音となる見込み
 - 低周波ほど振幅が大きいという理論予測
- 直接検出によるモデル化・低減方法の確立

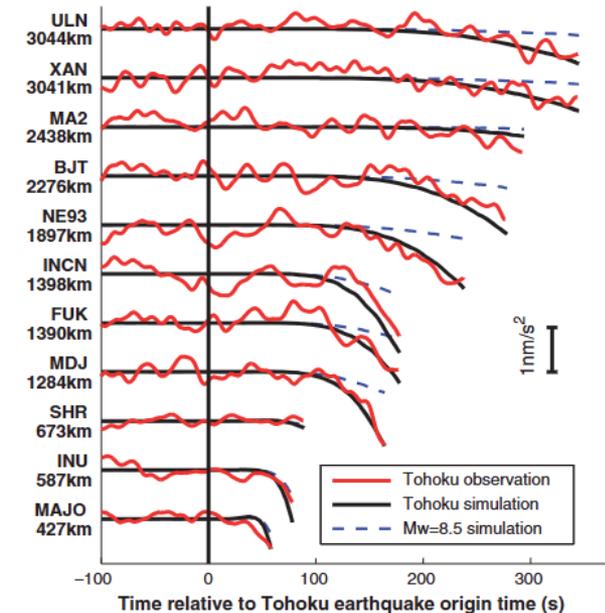
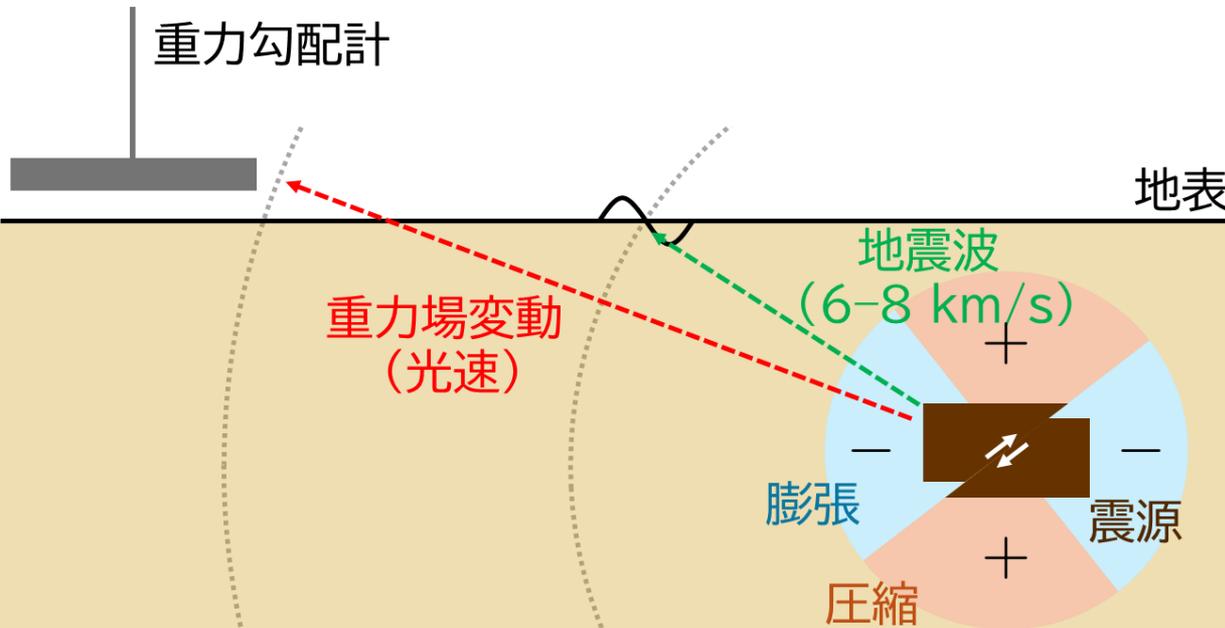
K. Somiya+, CQG (2012)
 L. Trozzo+, Galaxies (2022)
 D. Fiorucci+, PRD (2018)
 S. Hild+, CQG (2011)
 E. D. Hall, Galaxies (2022)



重力勾配を用いた地震検出

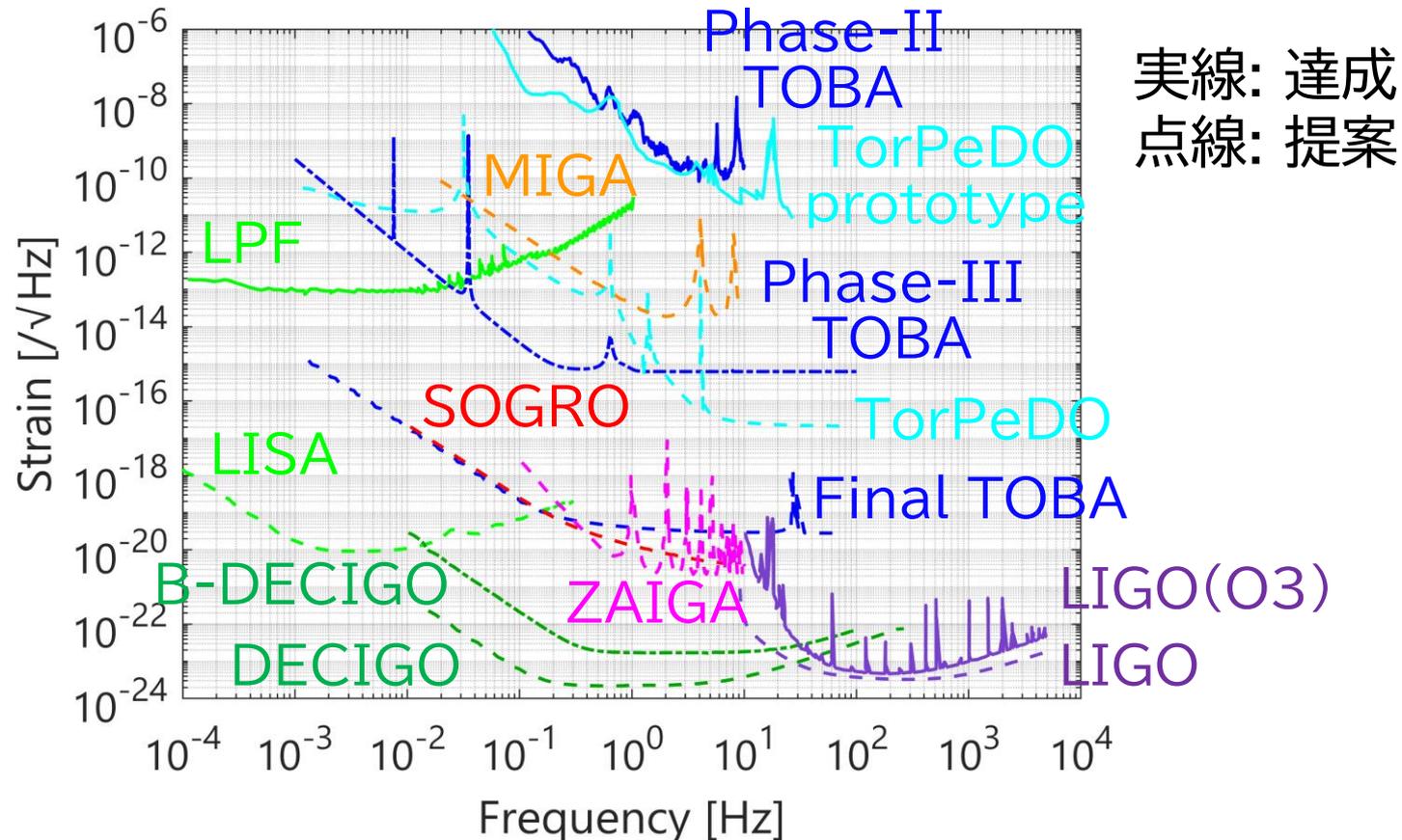
- 地震の断層破壊で生じる重力場変動を用いた地震検出
 - 地震波を用いる従来の手法と独立な地震検出手法
 - 地震波を用いる従来の手法より素早い検出・速報
 - マグニチュード推定精度の向上
- 事後解析で重力場変動が確認された
 - より高い精度・リアルタイムの地震検出を目指す

M. Vallée+, Science (2017)



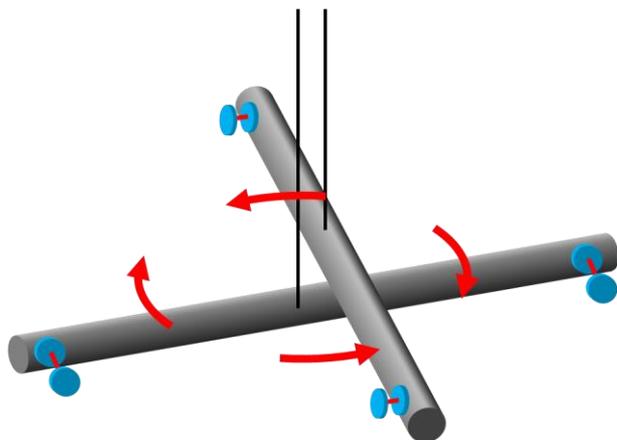
提案・開発されている重力勾配計

- ねじれ振り子型: TOBA(本研究)・TorPeDO M. Ando+, PRL (2010)
D. J. McManus+, CQG (2017)
- 超伝導型: SOGRO H. J. Paik+, IJMPD (2020)
- 原子干渉計型: MIGA・ZAIGA B. Canuel+, Scientific Reports (2018)
M.-S. Zhan+, IJMPD (2020)
- 宇宙重力波望遠鏡: LISA・DECIGO K. Danzmann+, CQG (1996)
S. Kawamura+, JPCS (2008)

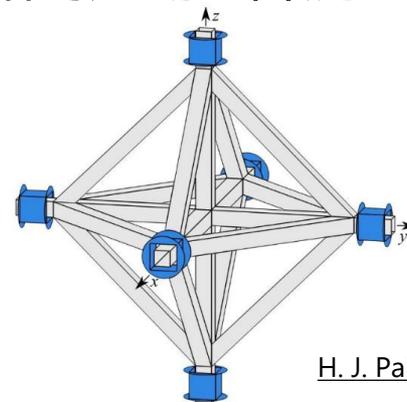


提案・開発されている重力勾配計

- ねじれ振り子型
 - ねじれ振り子の回転を計測

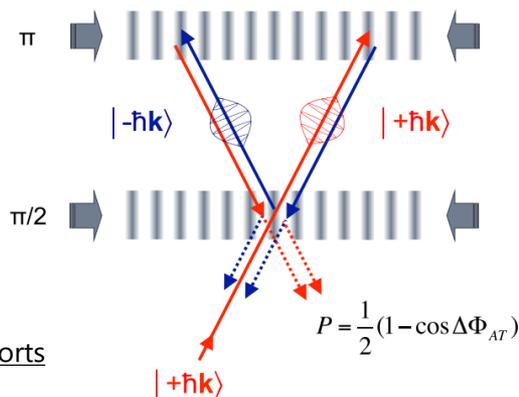


- 超伝導型:
 - 超伝導浮上した複数のマスの相対運動を計測



H. J. Paik+, IJMPD (2020)

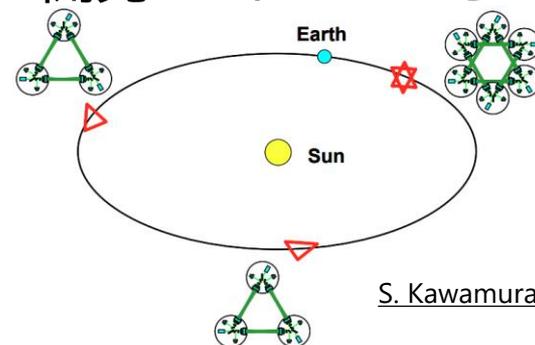
- 原子干渉計型:
 - 自由落下する原子の物質波干渉を利用



B. Canuel+,
Scientific Reports
(2018)

$$P = \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\Phi_{AR})$$

- 宇宙重力波望遠鏡
 - 衛星間レーザー干渉計
 - 地上検出器より良い感度
 - 開発コストがかかる



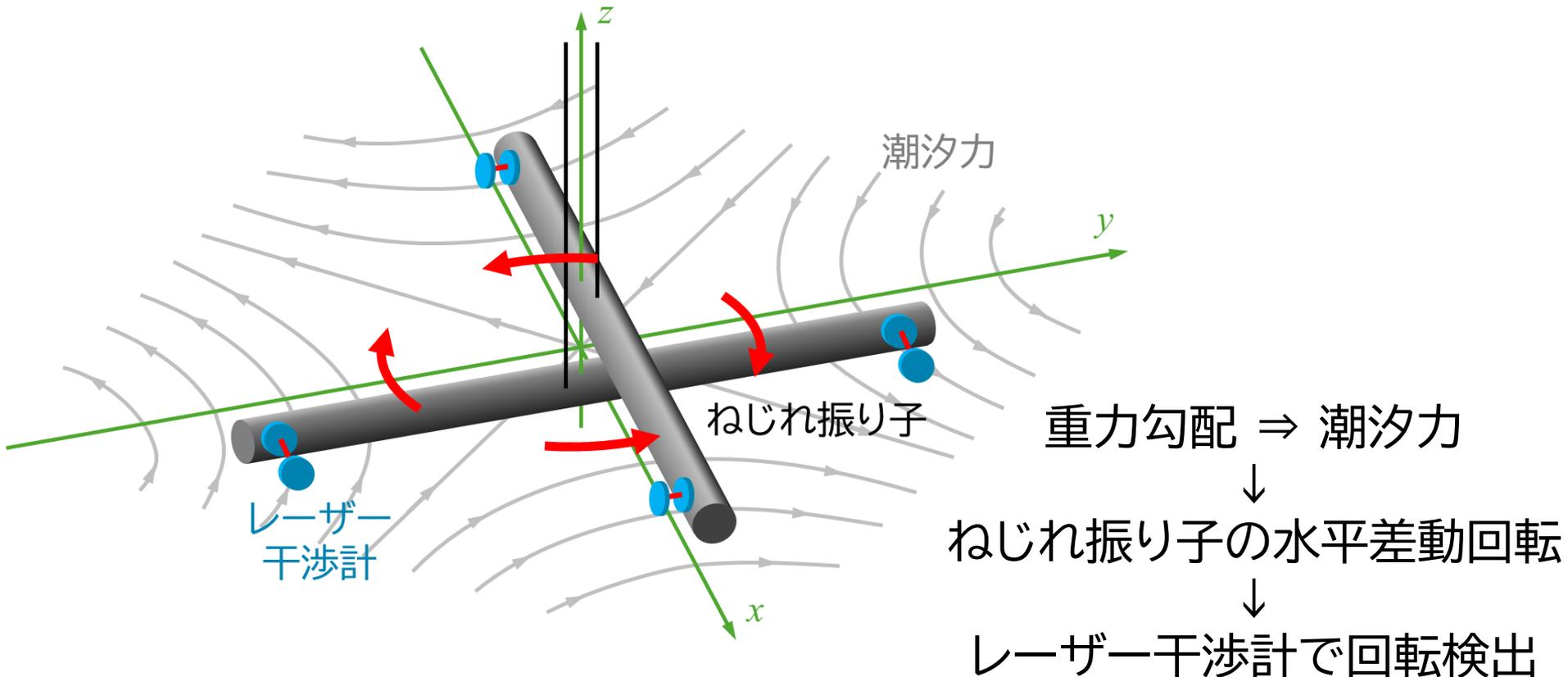
S. Kawamura+, JPCS (2008)

目次

- 研究背景
- ねじれ振り子型重力勾配計TOBA
 - TOBAの原理・サイエンス
 - 開発ロードマップ
 - Phase-III TOBAの構成・目標感度
 - Phase-III TOBAの先行研究
- 実験セットアップ
- 結果・考察
- 結論

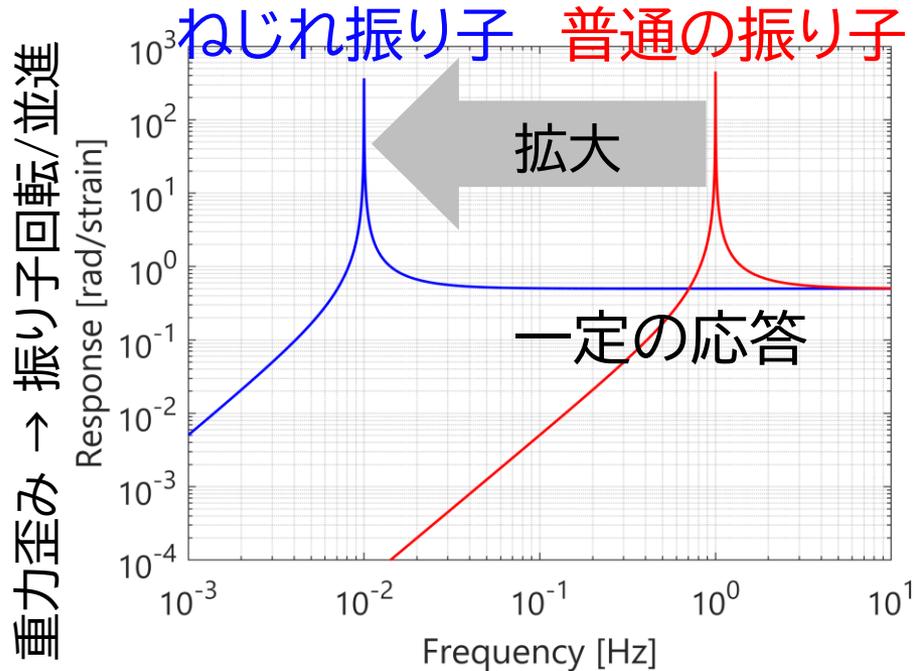
ねじれ振り子型重力勾配計TOBA

- TOBA: Torsion-Bar Antenna
- 水平に懸架した2本の棒状マスでねじれ回転を検出
- ねじれ振り子の共振周波数は低い (~ 1 mHz)
→ 地上で0.1 Hz-10 Hzの重力勾配変動が観測可能

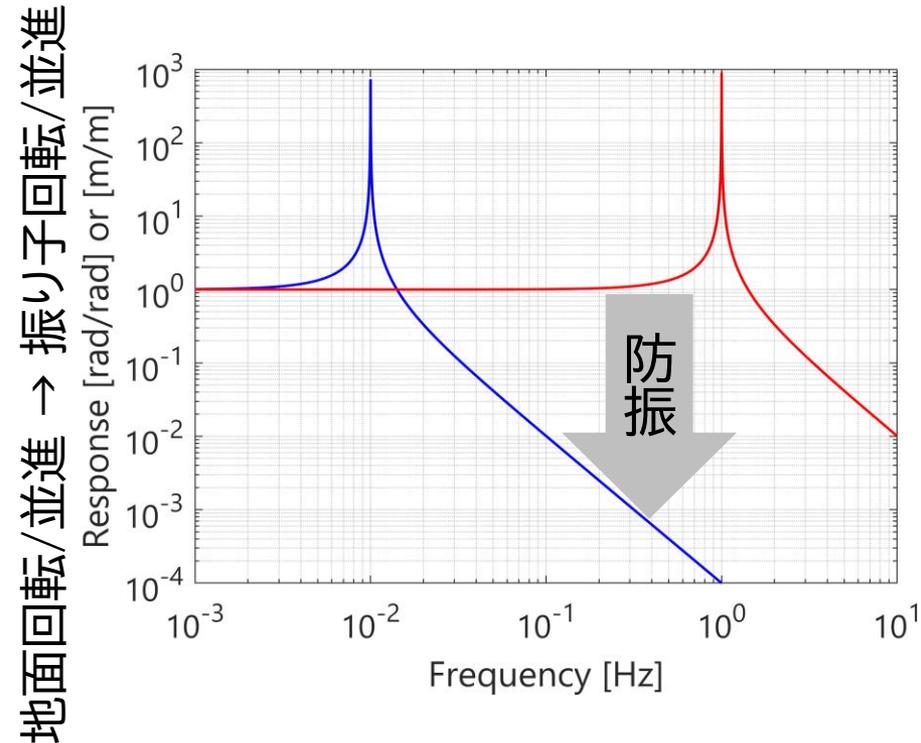


ねじれ振りの応答

- 共振周波数より高い周波数では自由質点のように重力勾配変動に応答する
→ 観測帯域の拡大



- 共振周波数より高い周波数では地面振動を受動防振できる
→ 地面振動雑音の低減



TOBAで得られるサイエンス

- 低周波重力波
 - 中間質量ブラックホール連星合体の観測
 - 背景重力波への制限
- ニュートニアン雑音の初検出
- 重力勾配を用いた従来よりも早い地震速報

観測対象	Phase-III TOBA (35 cmスケール)	Final TOBA (10 mスケール)
中間質量ブラックホール	1 Mpc以内の観測	10 Gpc以内の観測
背景重力波	$\Omega_{\text{GW}} < 10$ @ 0.1 Hz の制限	$\Omega_{\text{GW}} < 10^{-7}$ @ 0.1 Hz の制限
ニュートニアン雑音	初の直接検出	SNR 10^4 - 10^5 での検出
地震速報	120 km先のM7の 地震を10秒以内に検出	M5の地震を検出

TOBA開発のロードマップ

Phase-I TOBA
(2009-2011)

Phase-II TOBA
(2012-2014)

原理実証

10^{-8} / $\sqrt{\text{Hz}}$ (達成)
20 cmテストマス
常温



Phase-III TOBA
(2018-現在)

雑音低減技術の確立
ニュートニアン雑音検出
地震速報

10^{-15} / $\sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
35 cmテストマス
低温



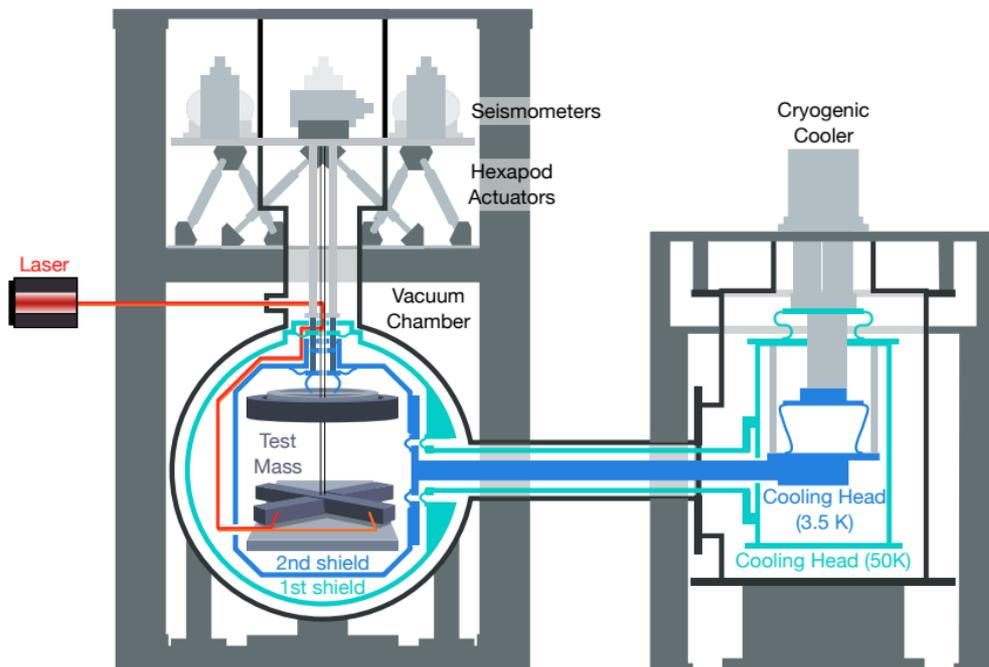
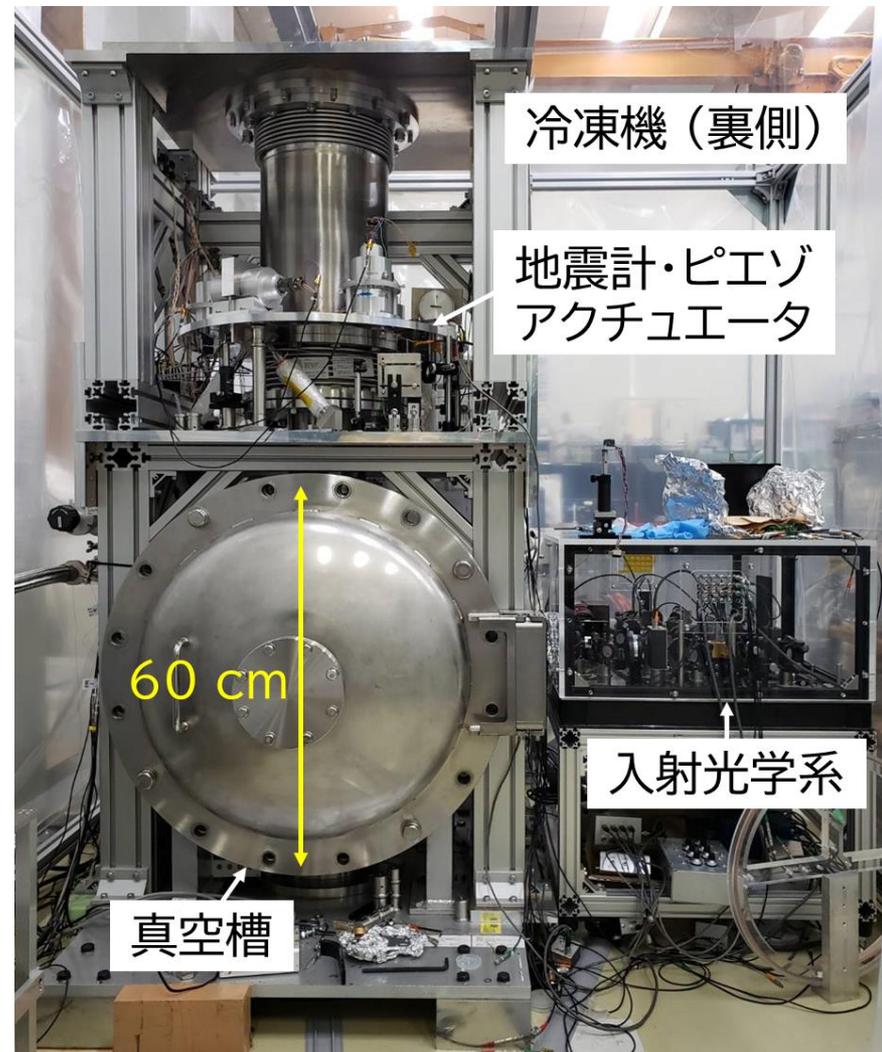
Final TOBA
(将来計画)

重力波観測

10^{-19} / $\sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
10 mテストマス
低温

Phase-III TOBAの構成

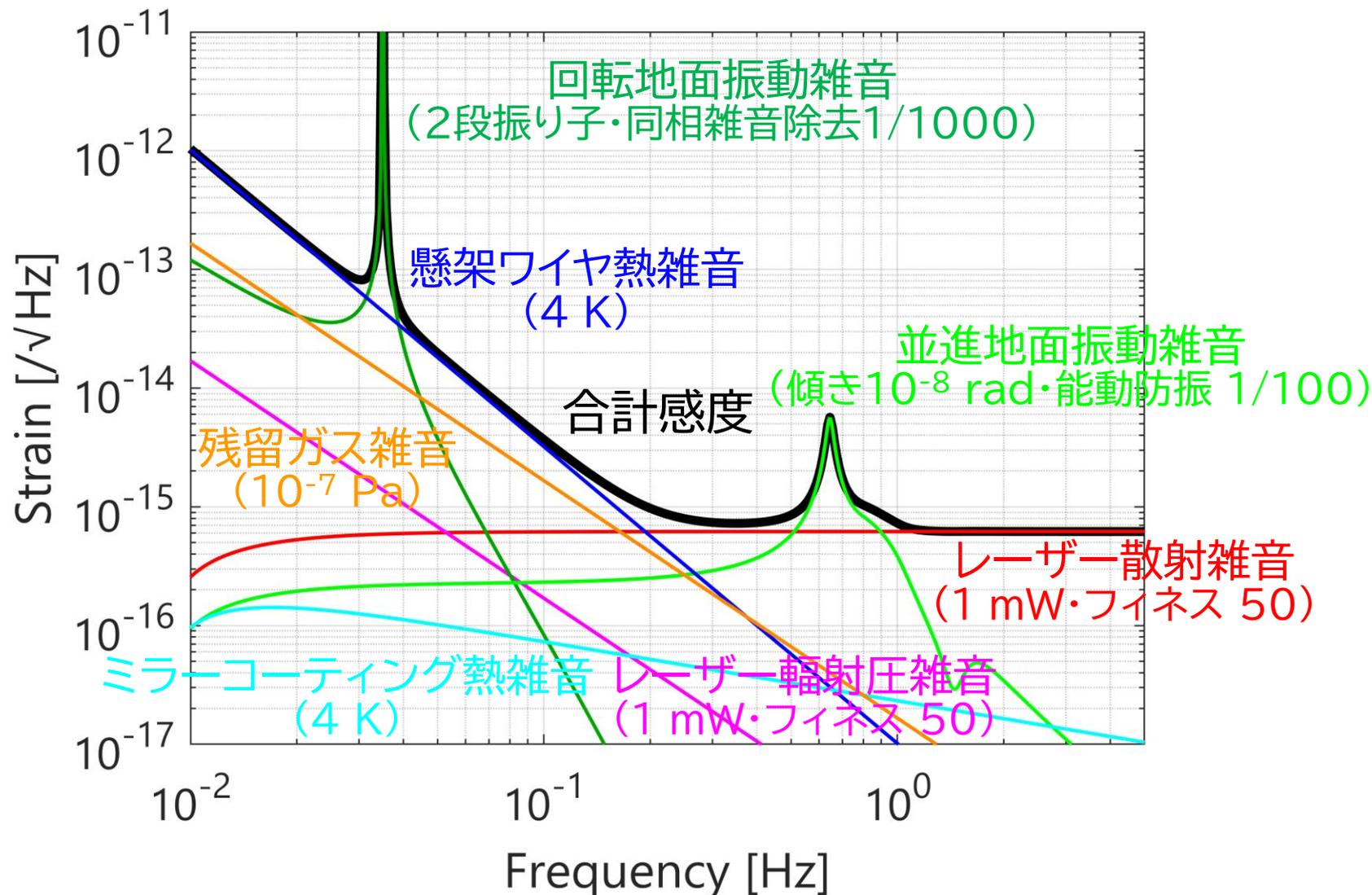
- 光学系: ねじれ回転検出
- 懸架系: ねじれ振り子
- 冷却系: 振り子を低温化
- 防振系: 懸架点を能動防振



S. Takano, T. Shimoda, YO+, Galaxies (2024)

Phase-III TOBAの目標感度・雑音源

- $3.7 \times 10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz



Phase-III TOBAの先行研究

- 光学系
 - 固定したテストマスのねじれ回転を 高野哲, 博士論文 (2024)
低温モノリシック差動ファブリペロー共振器で検出した
→ 鉛直地面振動雑音低減のための縦防振が必要
- 懸架系
 - 低温でQ値の高い懸架ワイヤを開発中 Ooi Ching Pin, 修士論文 (2018)
 - 常温ねじれ振り子を用いて 下田智文, 修士論文 (2016)
並進地面振動雑音の伝達経路を特定し低減した
→ テストマスの傾き調整が必要
- 冷却系
 - ねじれ振り子を6.1 Kまで冷却し 下田智文, 博士論文 (2019)
光てこでねじれ回転を計測した (10^{-6} / $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz)
→ ビームジッター雑音低減のために
光ファイバでの入射・光学ベンチの振動低減が必要
- 防振系
 - 3自由度制御で振動雑音を約100倍低減した 高野哲, 修士論文 (2018)

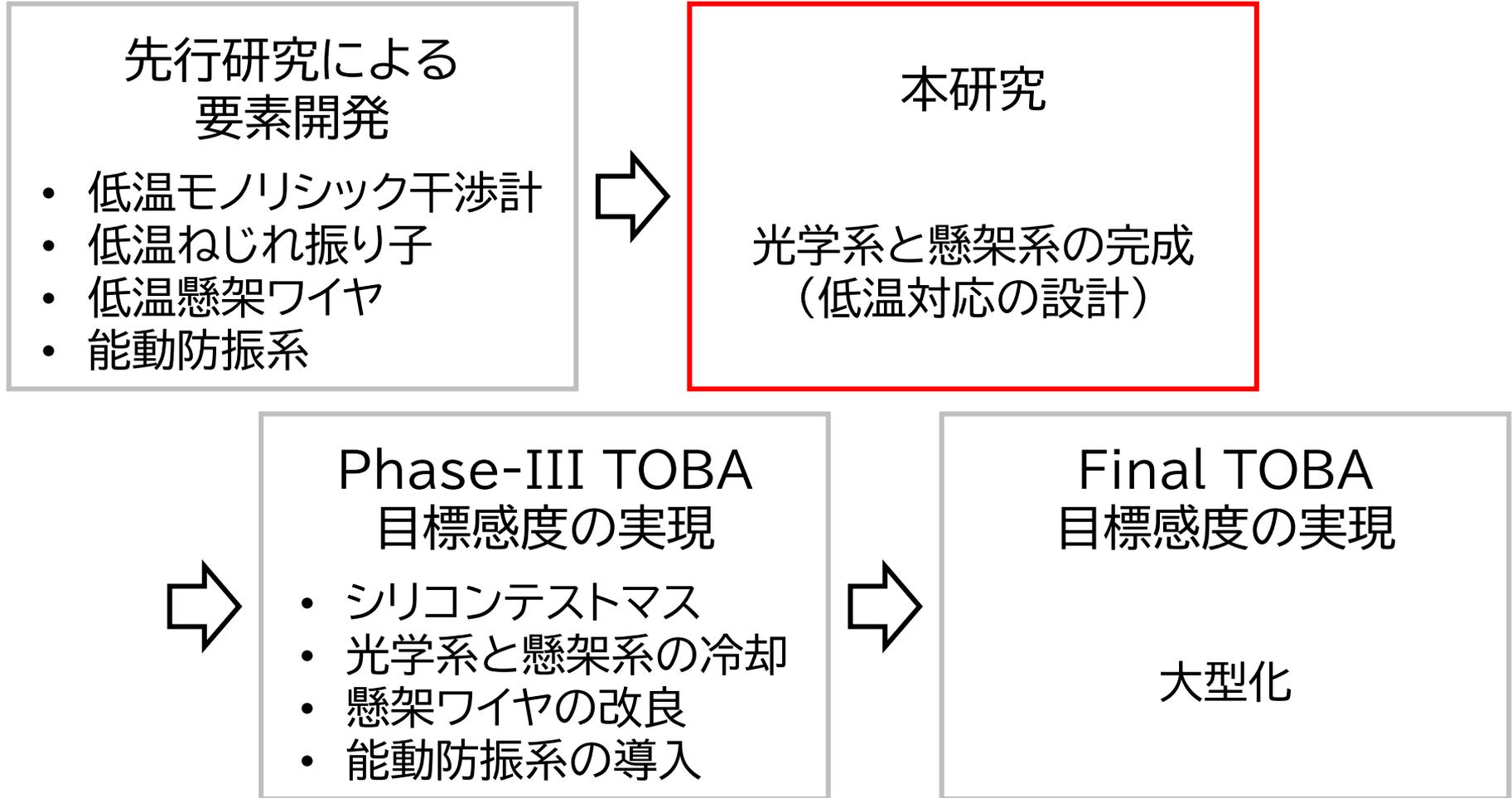
→ 要素開発で明らかになった課題をもとに
本研究で光学系と懸架系を組み合わせた実験系を完成させる

目次

- 研究背景
- ねじれ振り子型重力勾配計TOBA
- 実験セットアップ
 - 本研究の目的
 - 設計思想・設計感度
 - 光学系の詳細設計
 - 懸架系の詳細設計
 - センサ・アクチュエータ
- 結果・考察
- 結論

本研究の目的

● TOBAの光学系と懸架系の完成



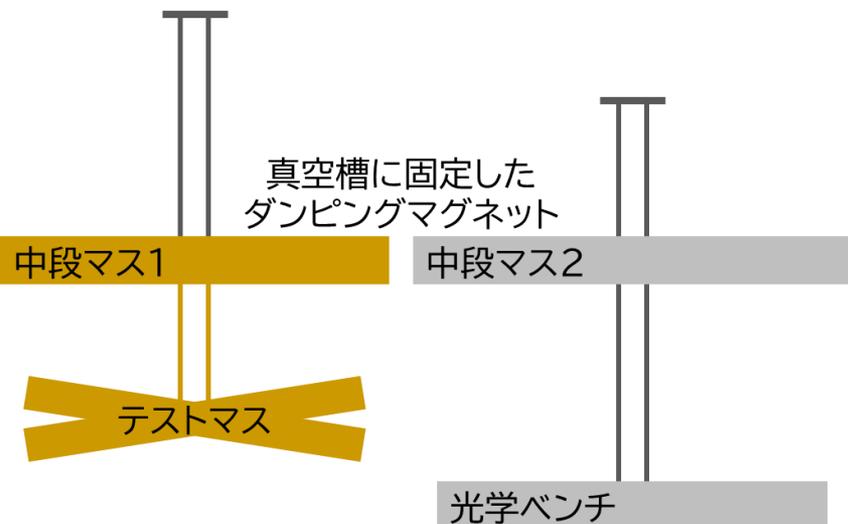
設計思想

- 低温で特性の良いシリコン製のテストマス・冷却で割れない設計
- 差動ファブリペロー共振器でのねじれ回転計測
- 並進地面振動からのカップリング雑音の低減
 - ・ 光学ベンチの振動が雑音にならない構成
 - ・ 縦防振の導入 / ダンピングマグネットの懸架

低温ねじれ振り子

下田智文, 博士論文 (2019)

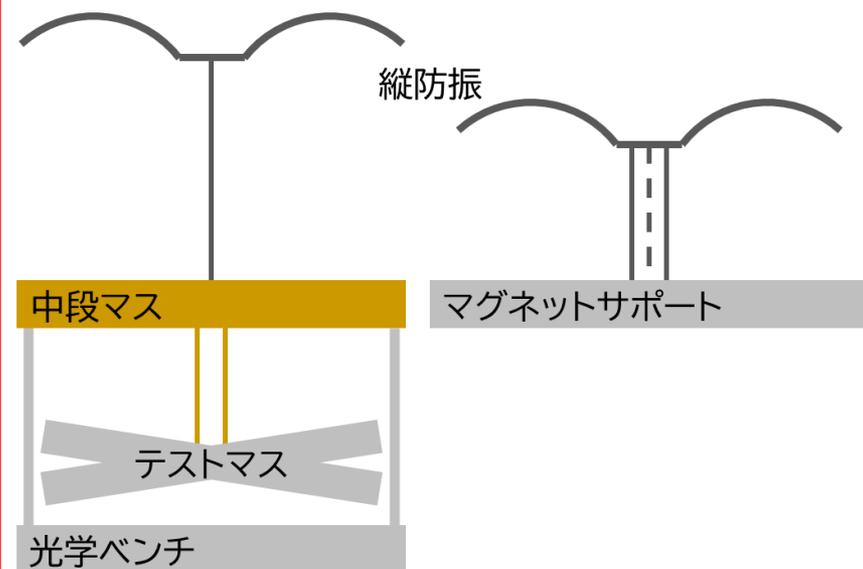
テストマスチェーン 光学ベンチチェーン



テストマス: 銅
光学系: 光てこ

本研究

メインチェーン ダンピングマグネットチェーン



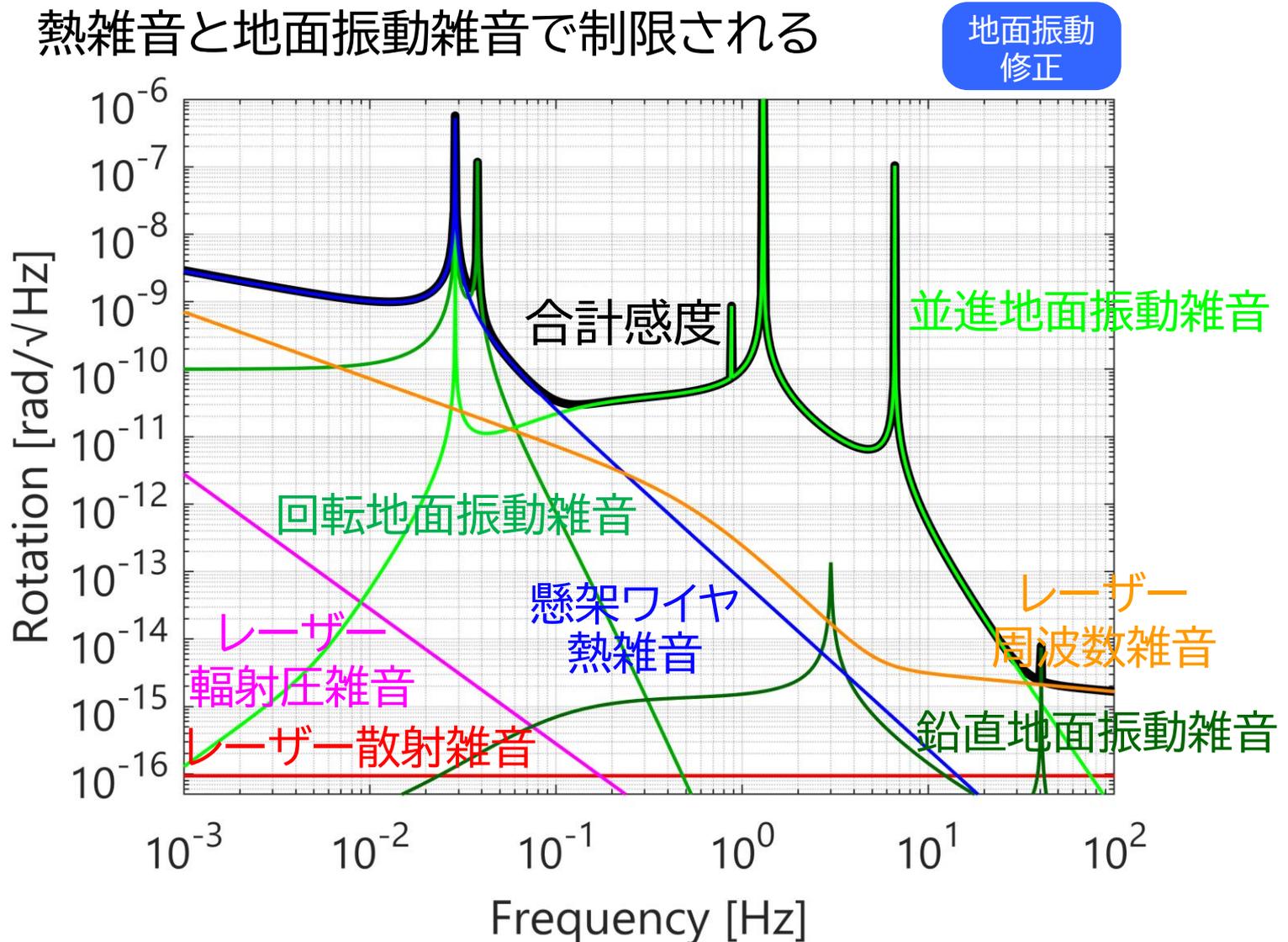
テストマス: アルミニウム (低温シリコン仕様)
光学系: 差動ファブリペロー共振器・光てこ

本研究の位置づけ

		Phase-III TOBA		
		低温ねじれ振り子 <small>下田智文, 博士論文 (2019)</small>	本研究	目標
光学系	光てこ	✓	✓	✓
	差動 ファブリペロー共振器	なし	✓	✓
懸架系	テストマス	銅製	アルミニウム製 (低温シリコン仕様)	シリコン
	懸架ワイヤ	ベリリウム銅 (Q値 10^3)	ベリリウム銅 (Q値 10^3)	シリコン (Q値 10^8)
	光学ベンチ	テストマスと別の チェーンで懸架	テストマスと同じ チェーンで懸架	同じ チェーン
	ダンピングマグネット	固定	懸架	懸架
	縦防振	なし	✓ (GASフィルタ)	✓
冷却系		✓ (6 K)	常温	✓ (4 K)
能動防振系		なし	なし	✓

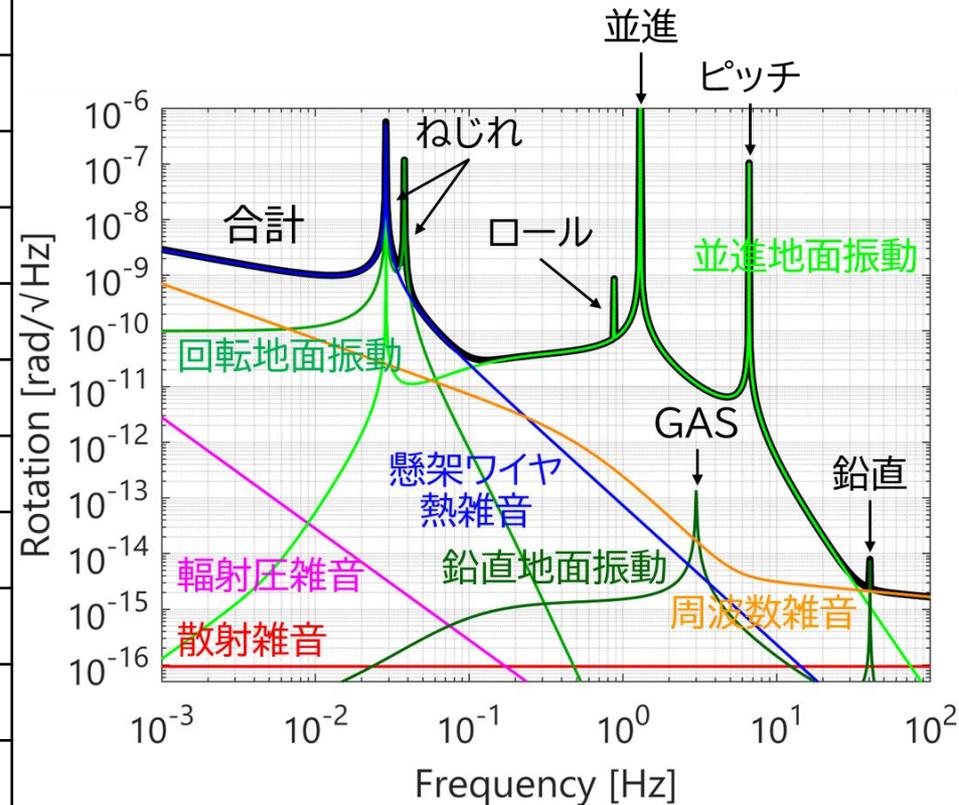
設計感度

- 3.4×10^{-11} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
- 熱雑音と地面振動雑音で制限される



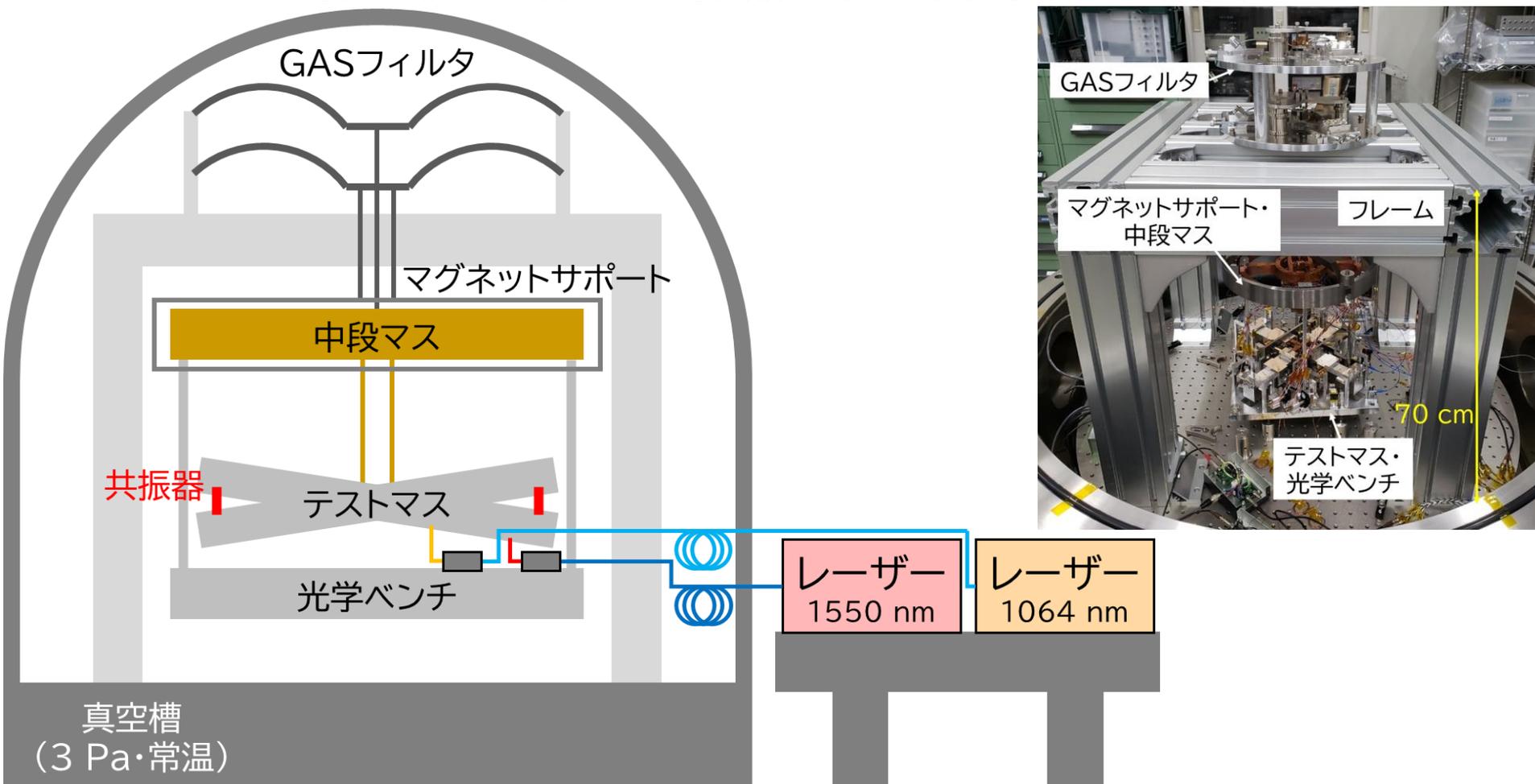
設計値

光学系	波長	1550 nm
	パワー	1 mW
	フィネス	300
	共振器長	23 mm
	共振器間距離	110 mm
	同相雑音除去	1/50
懸架系	慣性モーメント	0.010 kg m ²
	ワイヤ長	122 mm
	ワイヤ直径	0.3 mm
	ねじれ共振周波数	28.7 mHz
	ワイヤQ値	10 ³
	テストマス傾き	10 ⁻⁴ rad
	共振器鏡傾き	10 ⁻⁴ rad
	同相雑音除去	1/50
	GAS共振周波数	3 Hz
	温度	300 K



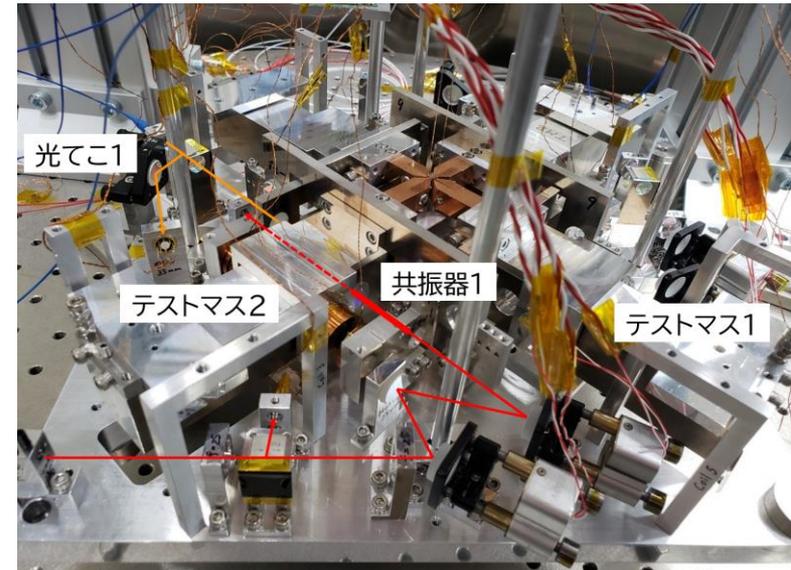
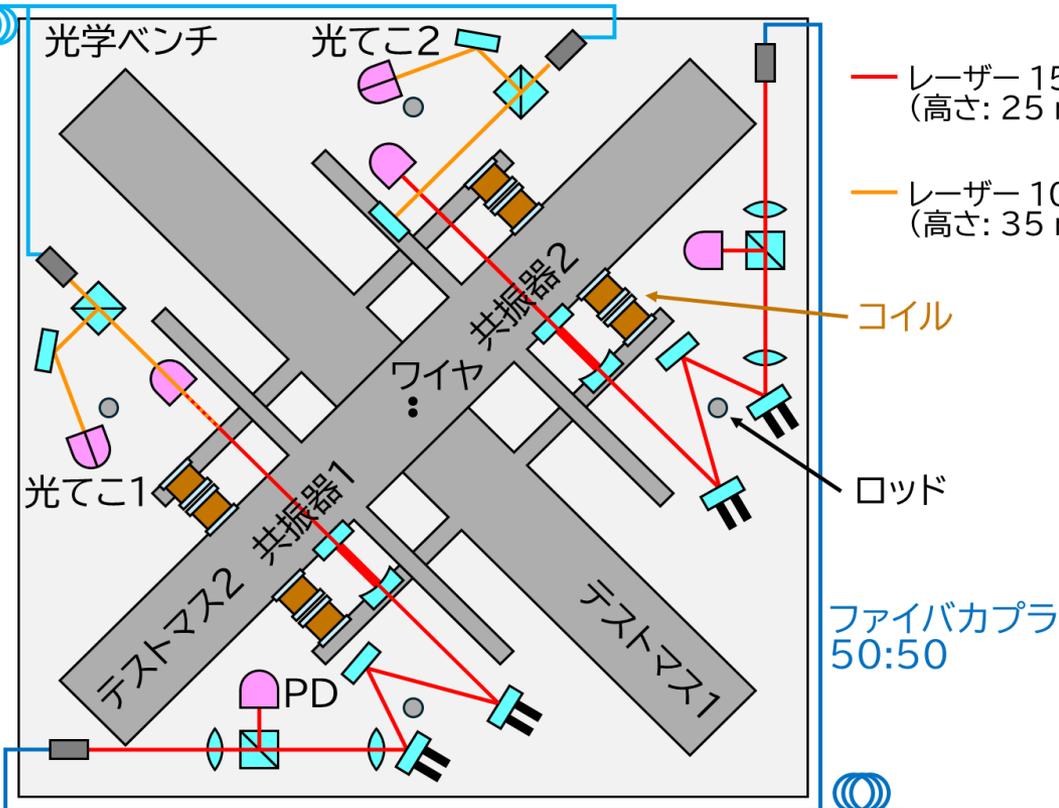
実験セットアップ全体の構成

- 真空槽内に懸架系・真空槽外にレーザー光源
- 光ファイバで光学ベンチにレーザーを導入
- ねじれ振りの回転を共振器の長さ変動として検出



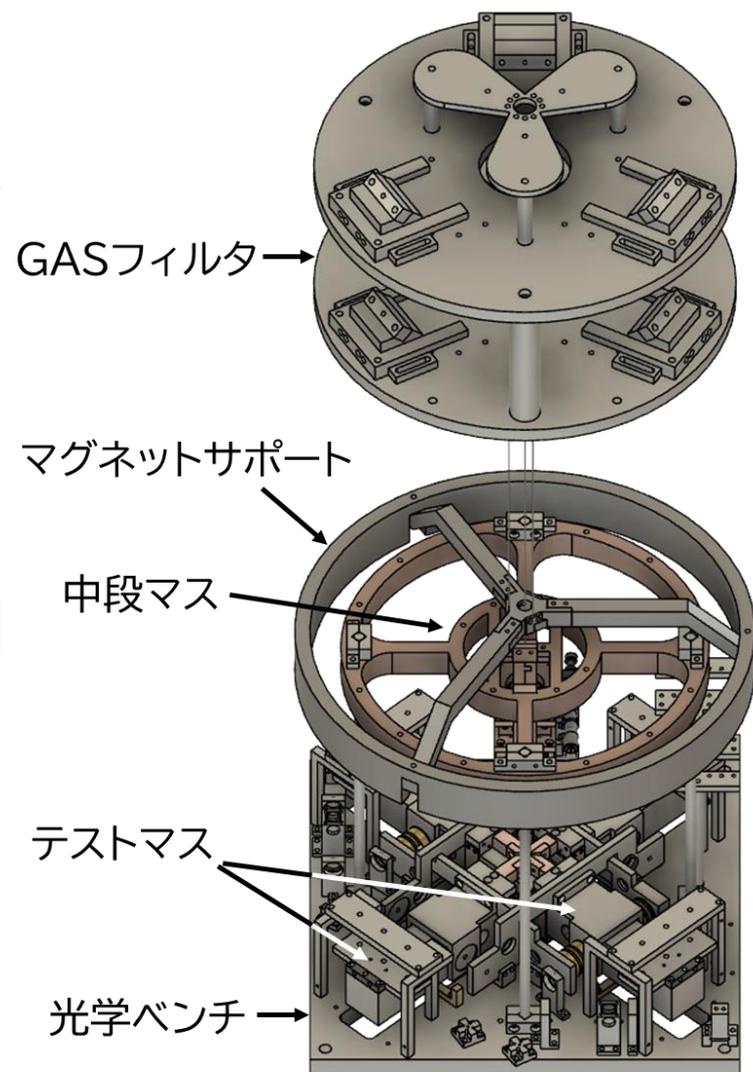
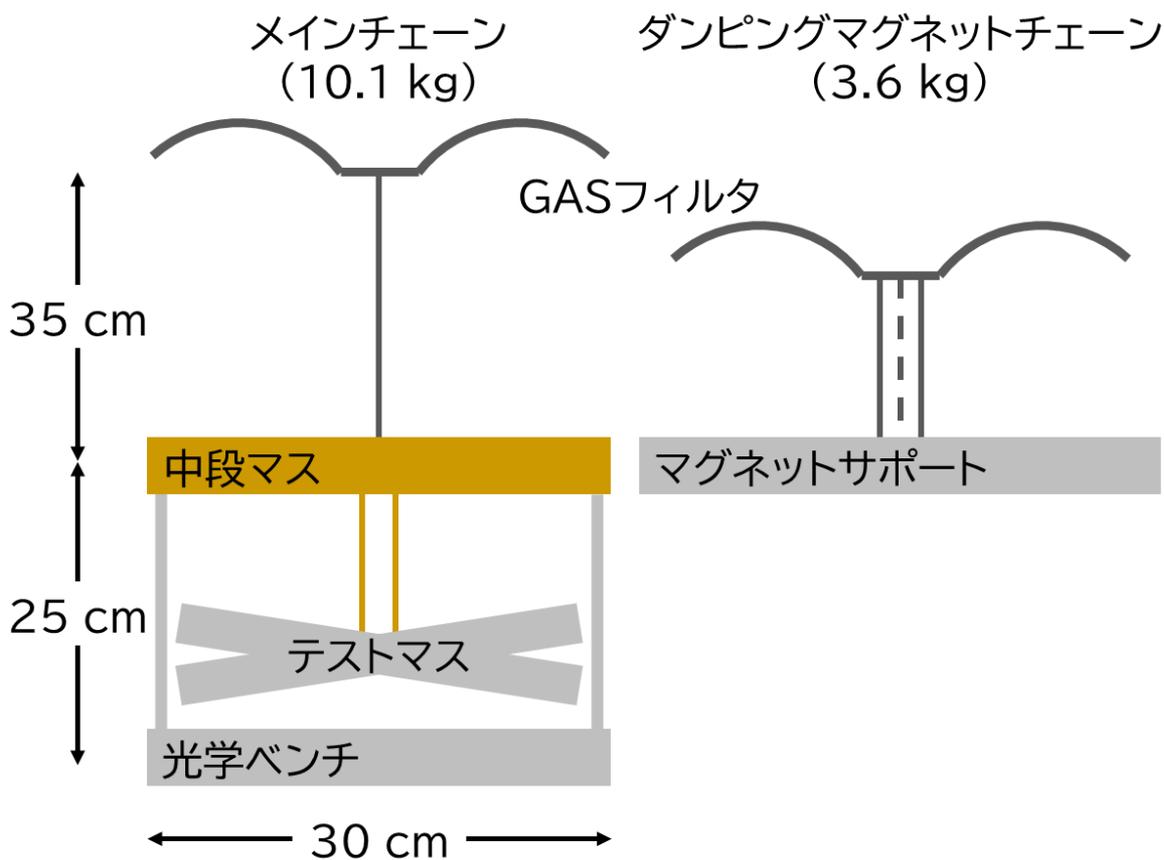
光学系の設計

- 2つのテストマス間で差動ファブリペロー共振器を構成
 - ねじれ回転を共振器の長さ変動の差として検出
 - コイル-コイルアクチュエータによるフィードバック制御でファブリペロー共振器の共振状態を保つ
 - 光学ベンチの振動が雑音とならない構成
- 補助センサとして光てこも設置



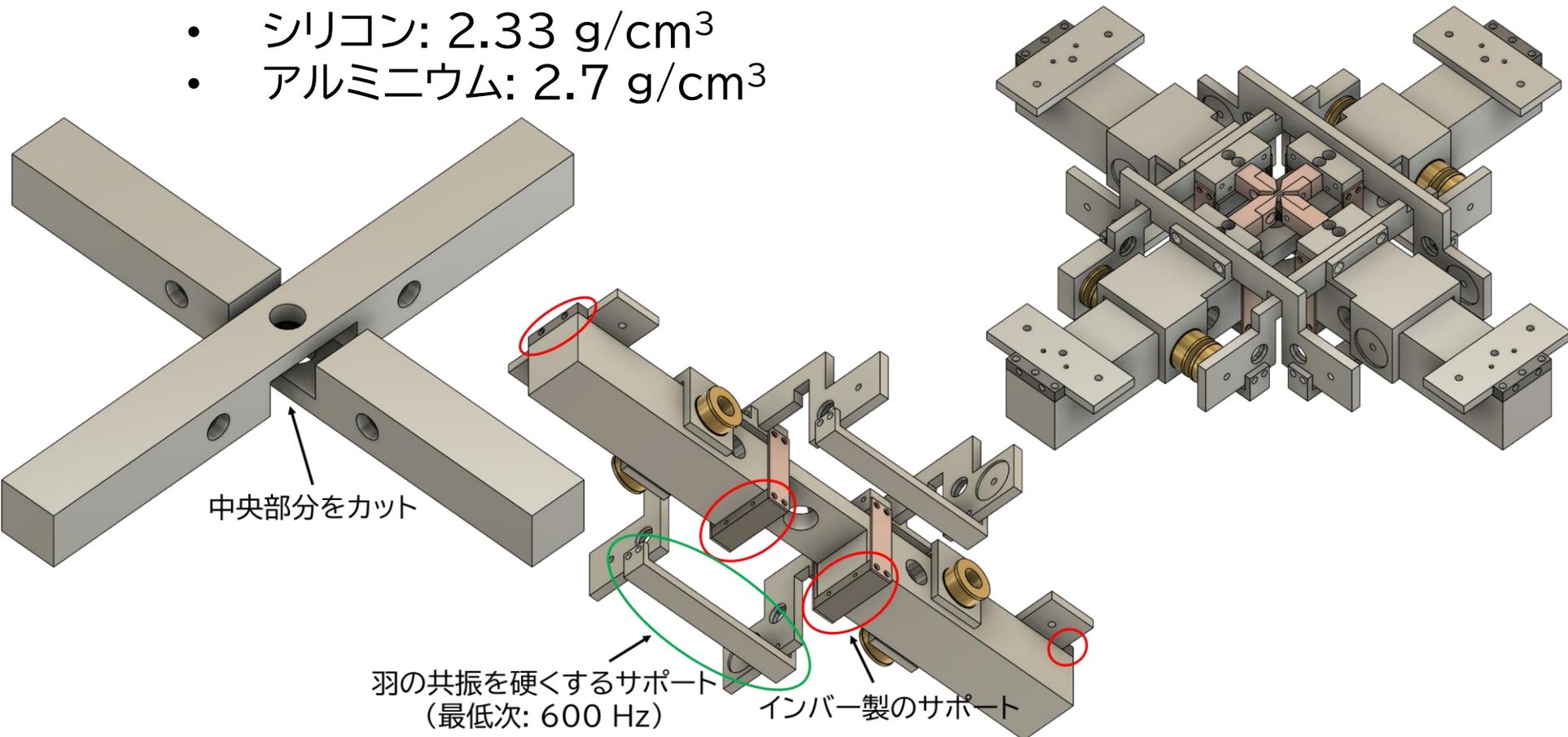
懸架系の設計: 全体

- 中段マスからテストマスと光学ベンチを懸架
- ダンピングマグネットも懸架
- GASフィルタの導入



懸架系の設計: テストマス

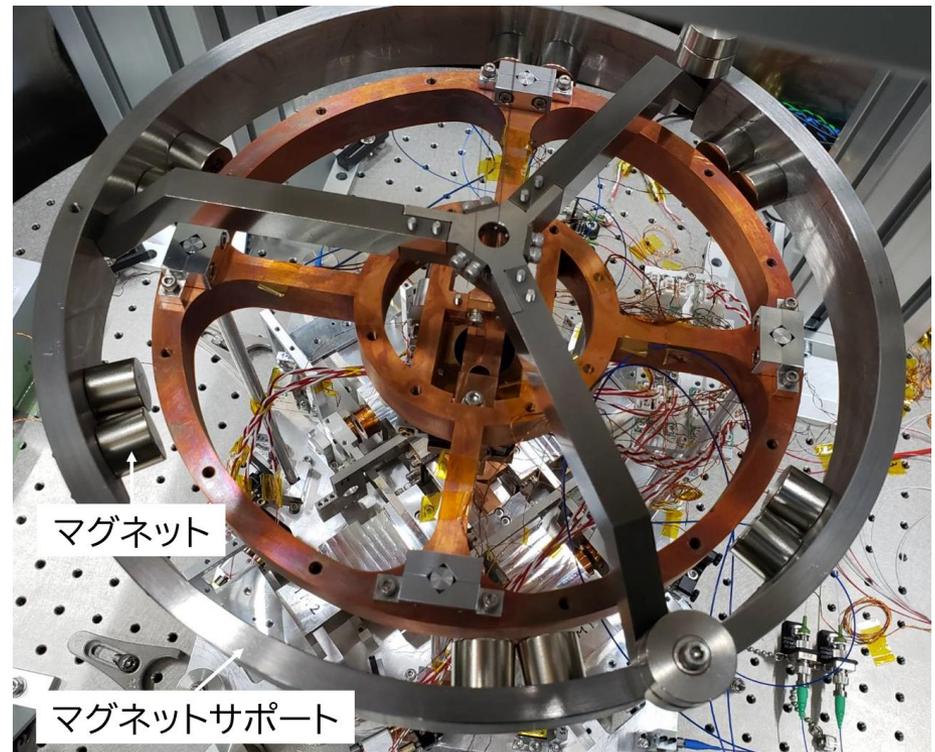
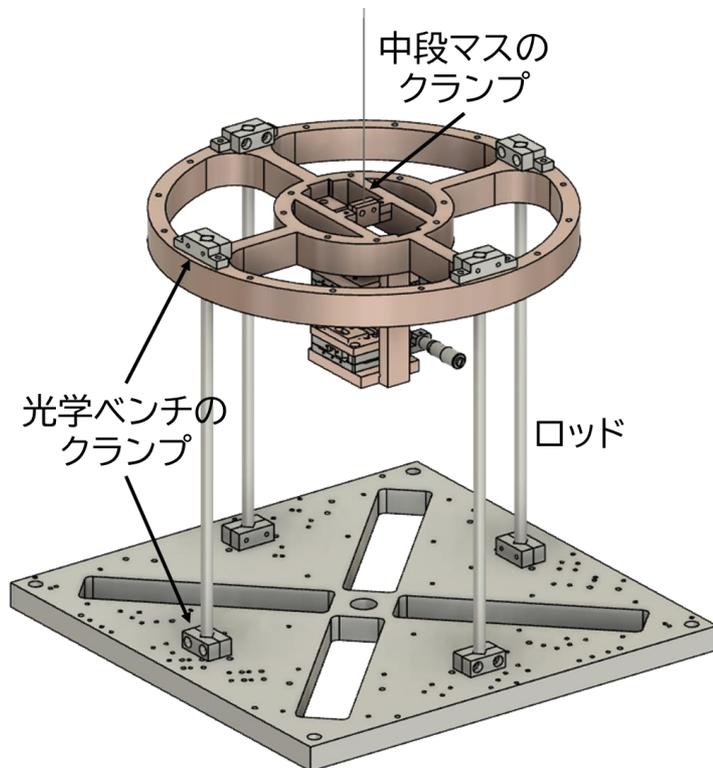
- 振動雑音低減のために2つのテストマスの高さをそろえる
- 冷却時にシリコンが割れないようパーツをねじ止めせずインバーを接着
- 本実験ではシリコンの代わりにアルミニウムを使用
 - シリコン: 2.33 g/cm^3
 - アルミニウム: 2.7 g/cm^3



懸架系の設計: 中段マス・光学ベンチ・ダンピングマグネット

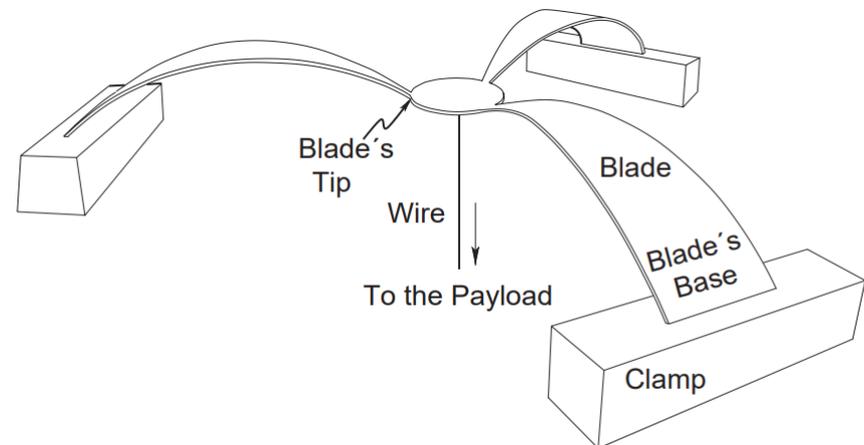
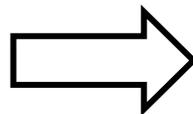
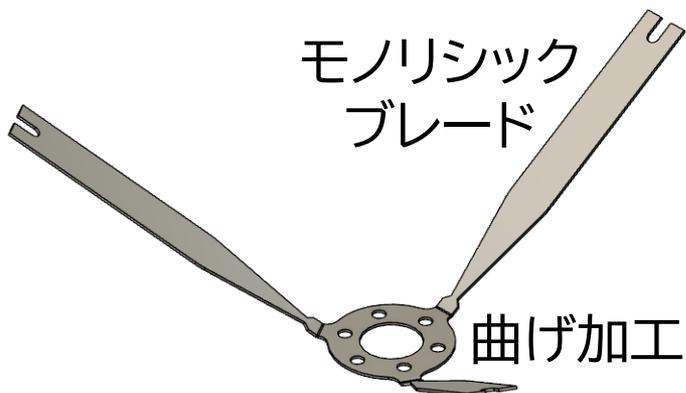
- 光学ベンチの振動雑音が問題とならないよう
テストマスと同じ中段マスからロッドで4本吊り
- ダンピングマグネットで中段マスを覆い変位のRMSを抑制

- ねじれ: 13 Hz
- 並進: 68 Hz



懸架系の設計: GASフィルタ

- Geometric Anti-Spring フィルタ
 - 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 (KAGRAなど)

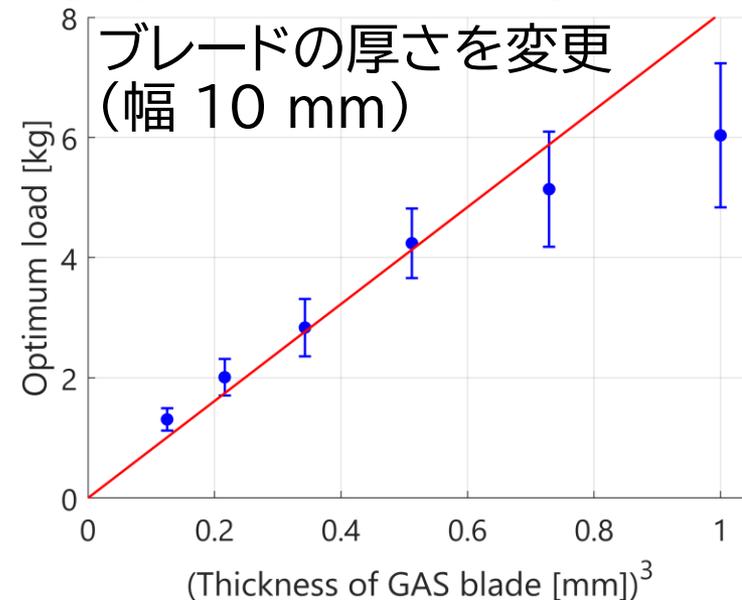
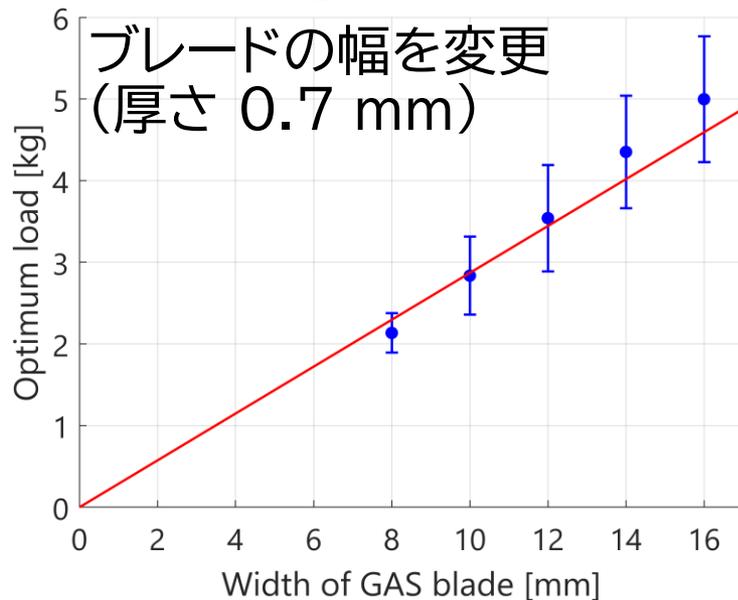


G. Cella+, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. (2002)

- TOBAにGASフィルタを初めて導入する
 - 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 (先行研究なし)
 - 荷重は1-10 kg

懸架系の設計: GASフィルタ

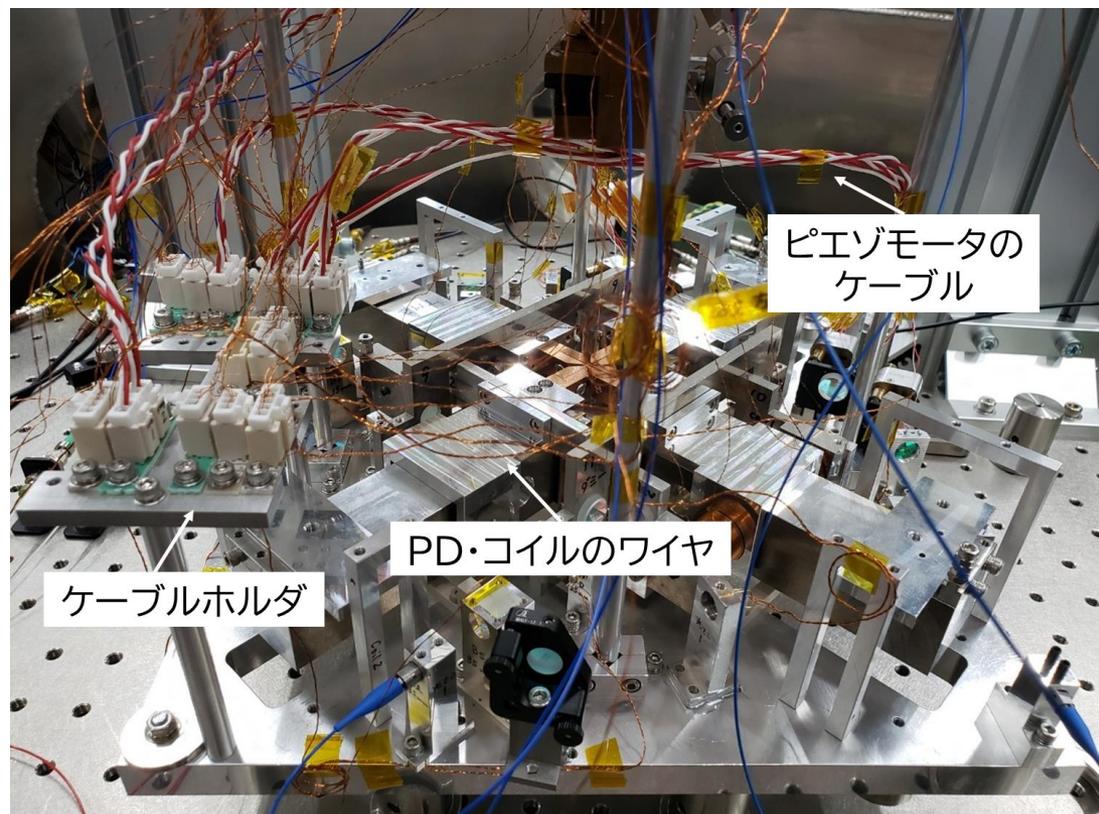
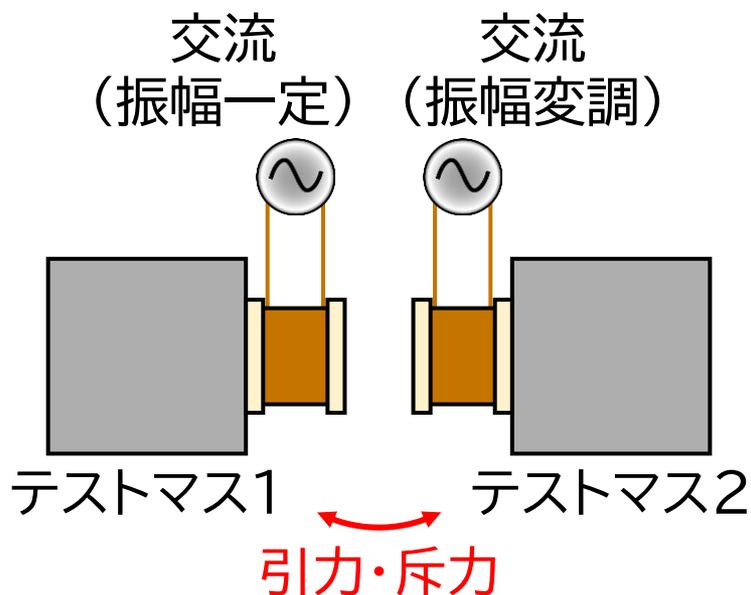
- SUS304ばね材の先行研究がないため複数のブレードを製作して選定した
- 最適な荷重はブレードの幅に比例・厚みの3乗に比例する



	メインチェーン (10.1 kg)	ダンピングマグネットチェーン (3.6 kg)
材質	SUS304-CSP H	SUS304-CSP 3/4H
長さ	88 mm	88 mm
幅	12 mm	14 mm
厚み	1.0 mm	0.7 mm

センサ・アクチュエータ

- 光学ベンチ上に共振器・光てこ用のフォトダイオードを設置
- テストマスにコイル-コイルアクチュエータを設置
- ワイヤは中段マスを經由してケーブルホルダから外へ

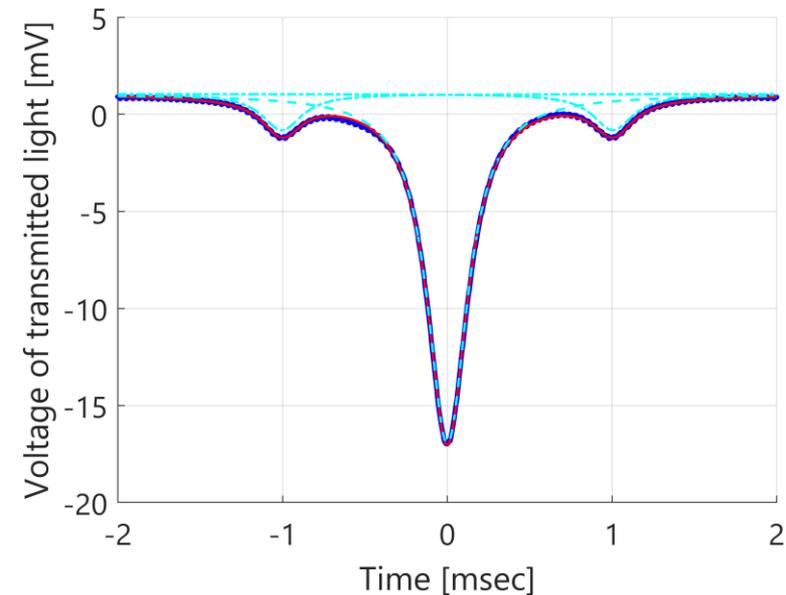


目次

- 研究背景
- ねじれ振り子型重力勾配計TOBA
- 実験セットアップ
- 結果・考察
 - 共振器の評価
 - 振り子の評価
 - コイル-コイルアクチュエータの評価・共振器ロックへの考察
 - 光てこの回転感度
 - 雑音源の考察
- 結論

共振器の評価: フィネス

- フィネス: 共振度合を表す物理量(≒ Q値)
- レーザー周波数をスキャンして共振ピークから測定



	設計値
フロントミラー 反射率	99%
エンドミラー 反射率	99.5%
フィネス設計値	417
フィネス測定値 共振器1	328 ± 27
フィネス測定値 共振器2	257 ± 19

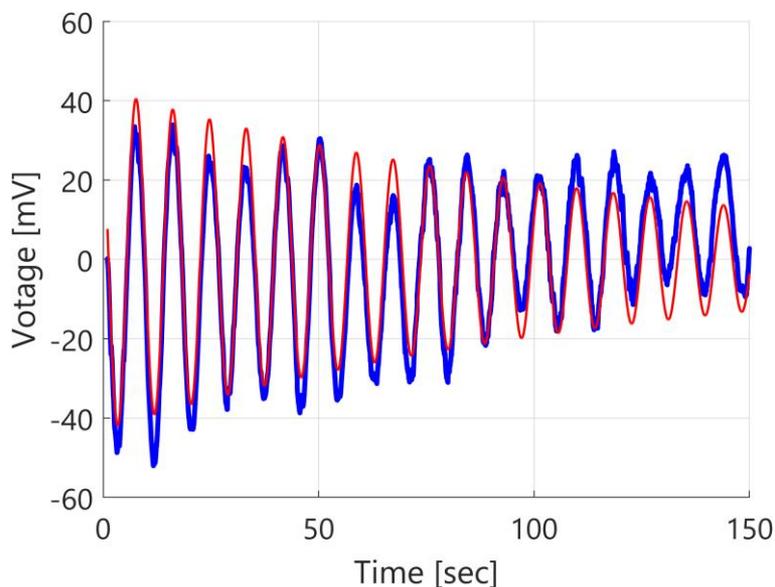
→ 光のロス 0.4%

→ 光のロス 0.9%

→ 有意に小さいが散射雑音に問題なし

振り子の評価: ねじれ共振周波数・Q値

- コイル-コイルアクチュエータでねじれモードを励起し
励起を止めた後の減衰振動を用いて測定 (リングダウン法)
- 大気圧下と真空下で測定



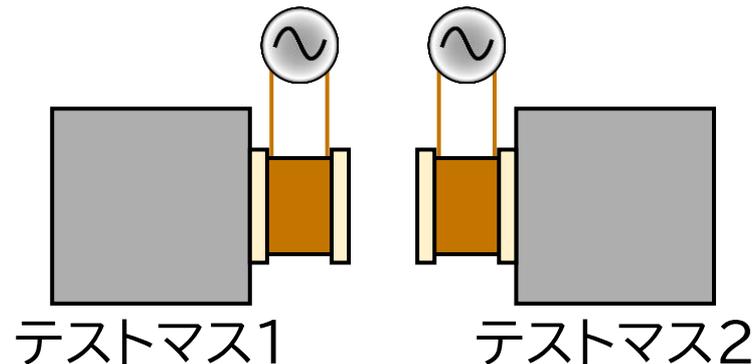
	設計値	テストマス1	テストマス2
共振周波数 [mHz]	28.7	117.9±0.1 (大気圧)	117.9±0.1 (大気圧)
		117.1±0.1 (3.5 Pa)	117.3±0.1 (3.5 Pa)
Q値	1000	55.2±0.4 (大気圧)	39.8±0.2 (大気圧)
		66.8±1.5 (3.5 Pa)	46.5±0.3 (3.5 Pa)

→ 共振周波数が約4倍大きくなった
→ 低減が必要

→ Q値は大気圧下と真空下ともに約50
→ 原因によっては改善が必要

ねじれ共振周波数・Q値の考察

- ねじれ共振周波数が約4倍大きくなった
 - 観測帯域拡大・受動防振のために低減が必要
 - ← コイルのワイヤによりねじれの復元力が大きくなったため
 - より細いワイヤの使用 / 非接触での電流供給 / コイル-コイルアクチュエータを使わない共振器制御



- Q値が大気圧下・真空下ともに約50
 - 中段マスのダンピングによって変位のRMSを抑制できている (ガスダンピングによるQ値: $\sim 6 \times 10^6$)
 - コイルのワイヤによるQ値の低下の場合は改善が必要

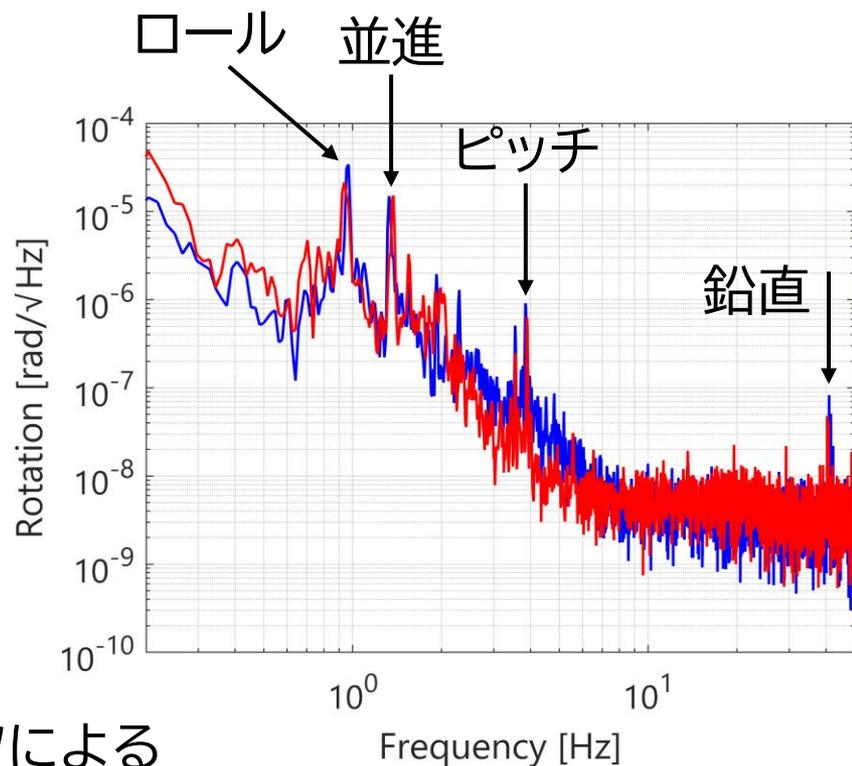
振り子の評価: その他のモードの共振周波数

- 光てこのスペクトルから測定

修正・追加

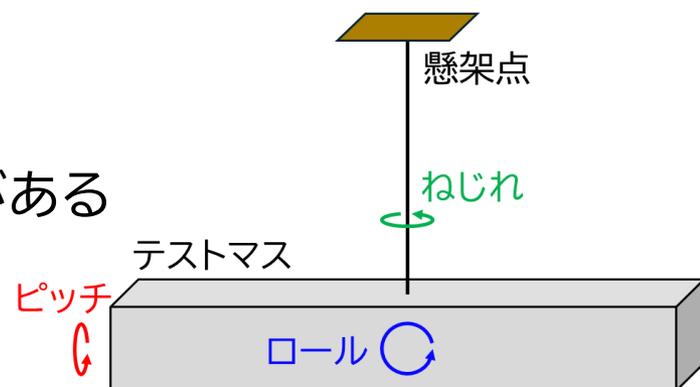
単位: [Hz]

	計算値 (一様な質量 分布を仮定)	テストマス 1	テストマス 2
並進	1.29	1.33	1.38
鉛直	40.69	41.0	40.8
ピッチ	6.62	3.91	3.89
ロール	0.878	0.969	0.938



→ 計算値との差はテストマスに付けたパーツによる
重心位置と慣性モーメントの変化や
コイルのワイヤによる復元力が原因

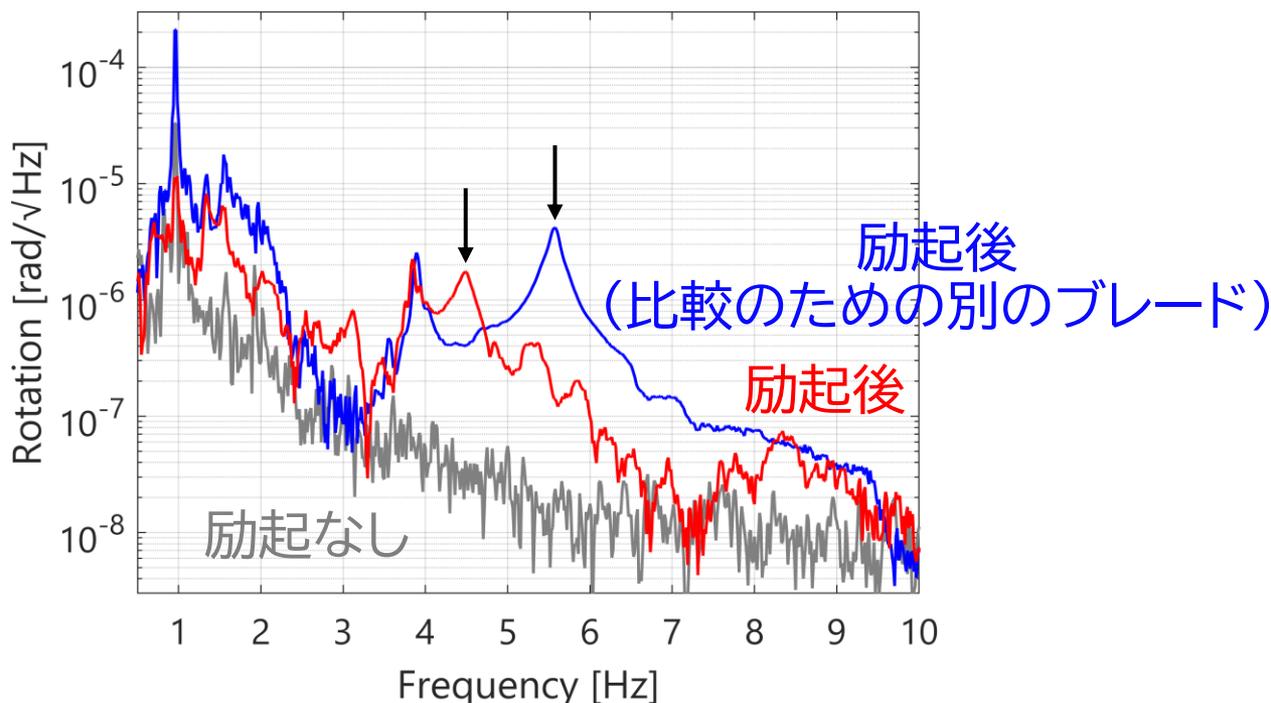
→ 同相雑音除去1/50を満たすには
並進の共振周波数差を0.02 Hzに抑える必要がある



振り子の評価: GASフィルタの共振周波数

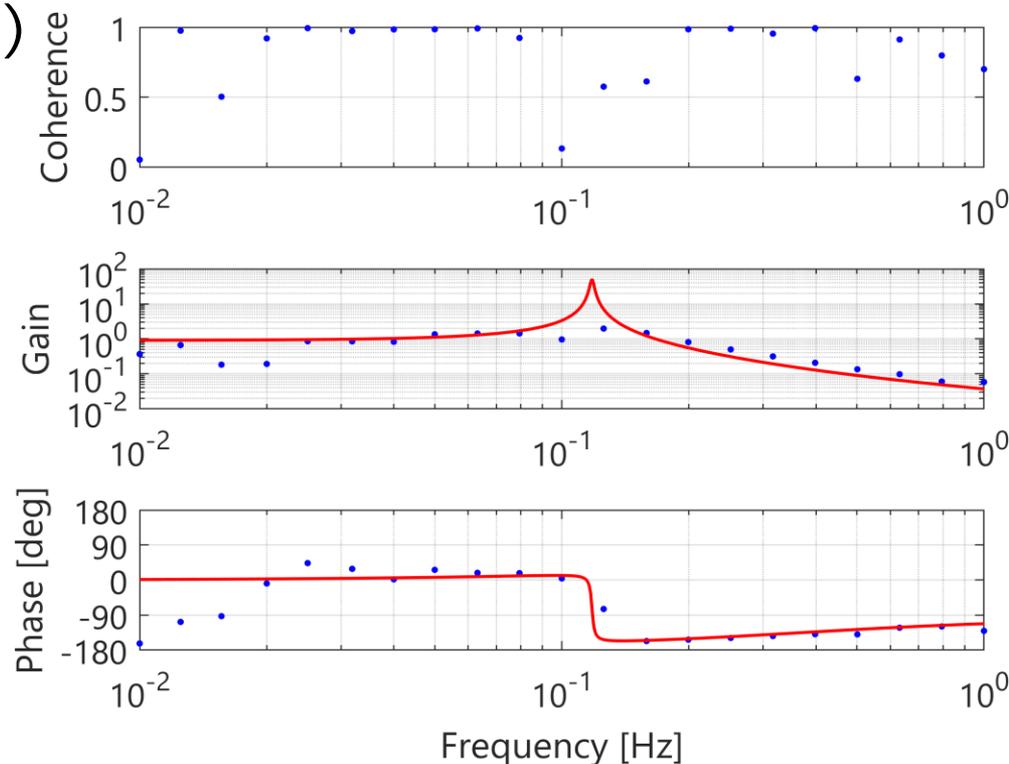
	メインチェーン (10.1 kg)	ダンピングマグネットチェーン (3.6 kg)
共振周波数	4.48 Hz (光てこ)	~3 Hz (目視)

→ さらに共振周波数を下げるには荷重のチューニングが必要
(大きな系では0.2 Hzの実績があるが
このブレードの長さでは1 Hz程度が限界か)



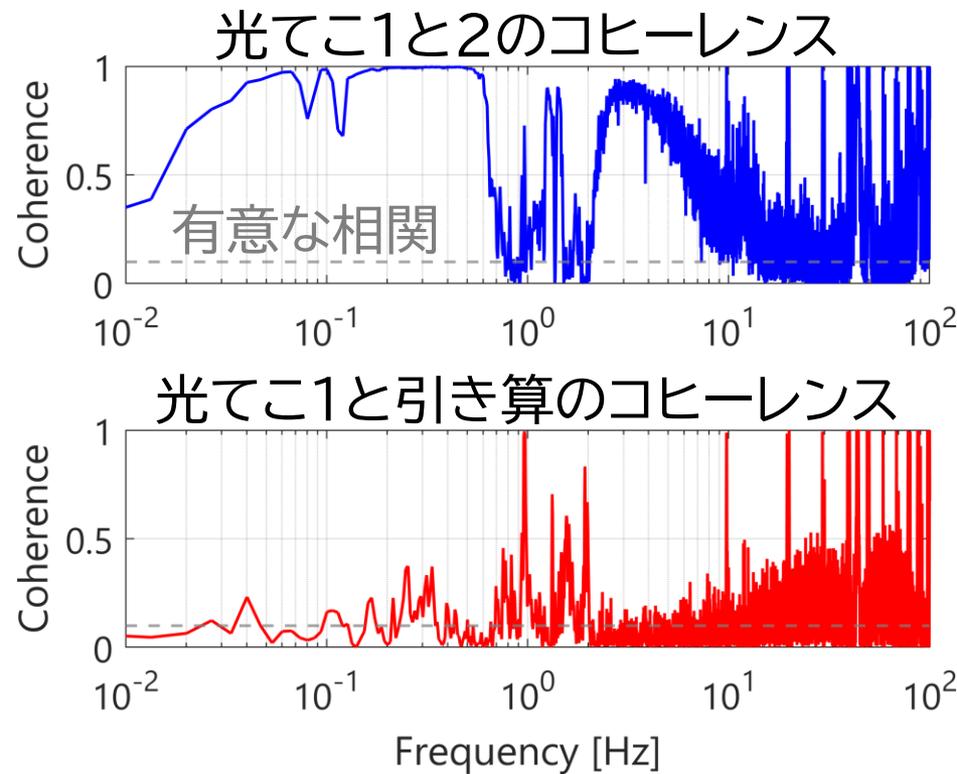
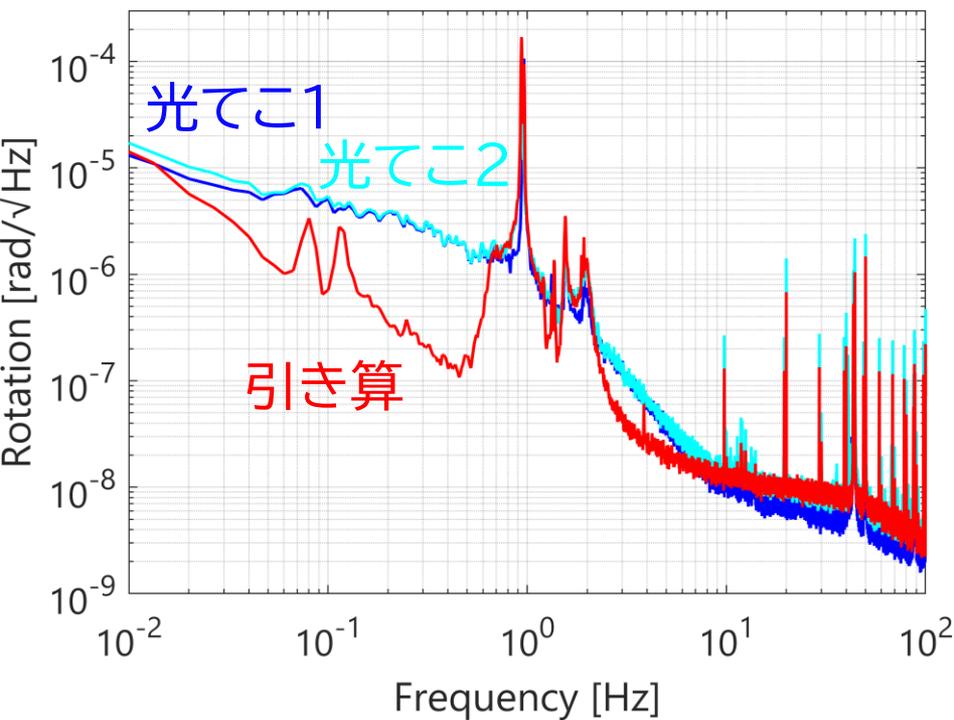
アクチュエータ効率・共振器ロックへの考察

- 光てこ・コイル-コイルアクチュエータを用いてねじれ振り子の回転をフィードバック制御
- オープンループ伝達関数からアクチュエータの効率を測定:
 $3.41 \times 10^{-7} \text{ N/V}$
 - 共振器のロックに向けて効率を1-2桁大きくする必要がある
 - パーツを改良しコイル間の距離を小さくする
(2.9 mm \rightarrow 1.0 mm)



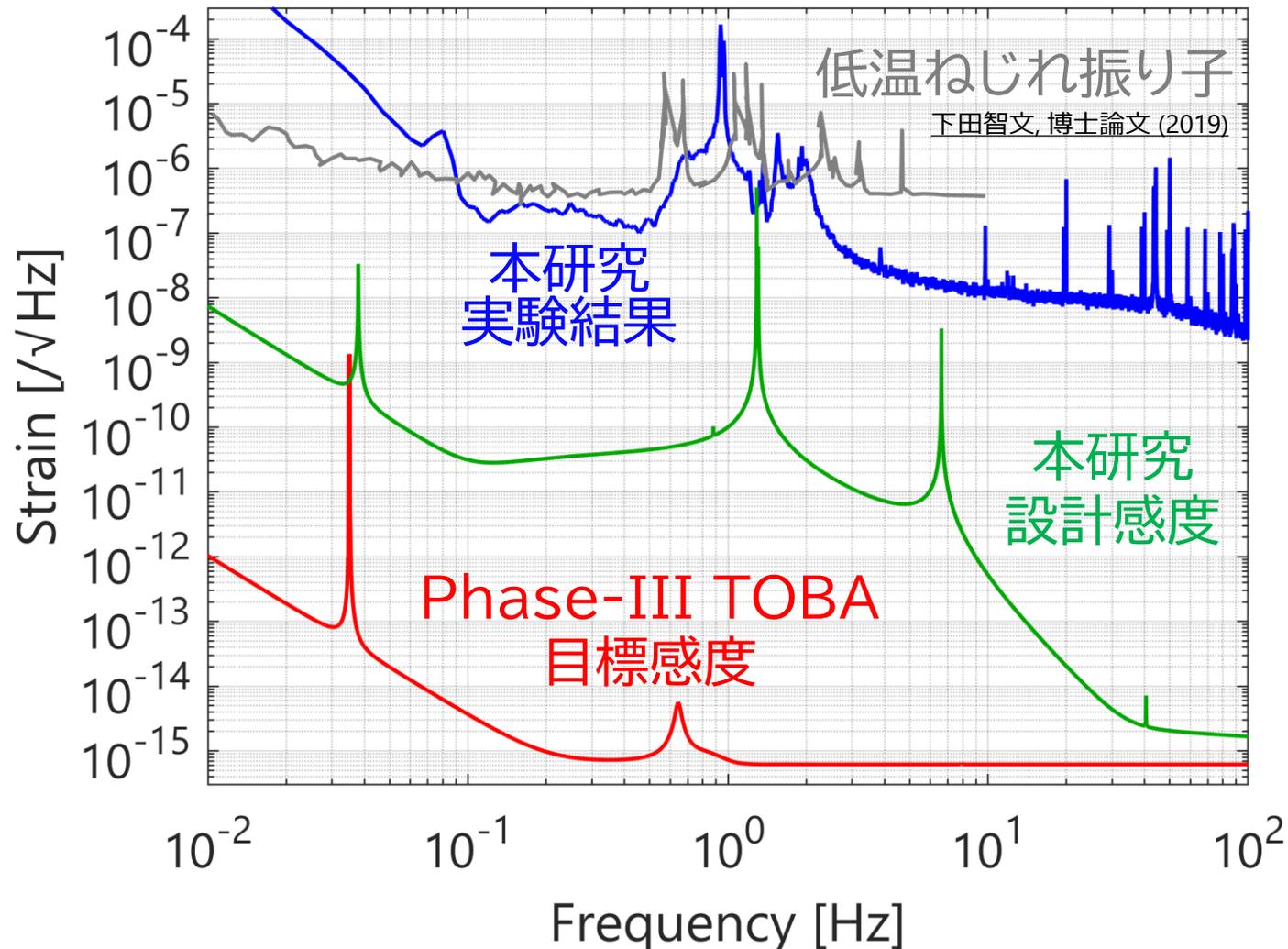
回転感度

- 光てこで回転測定を行った
- 2つのテストマス間で同相雑音除去
- 1.1×10^{-7} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.4 Hz



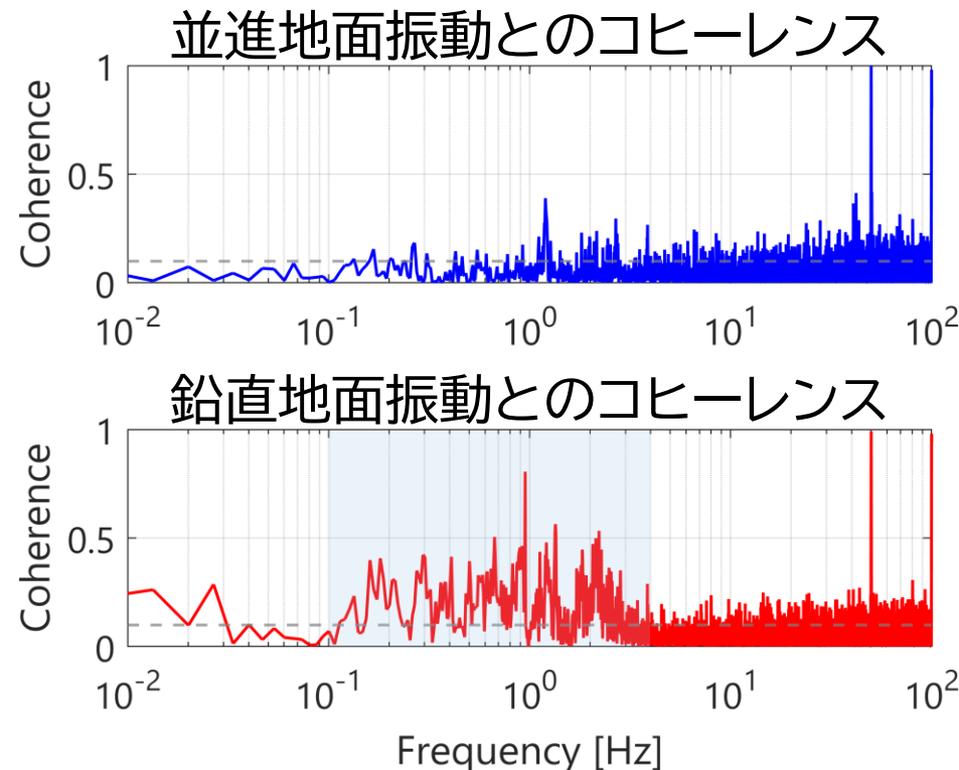
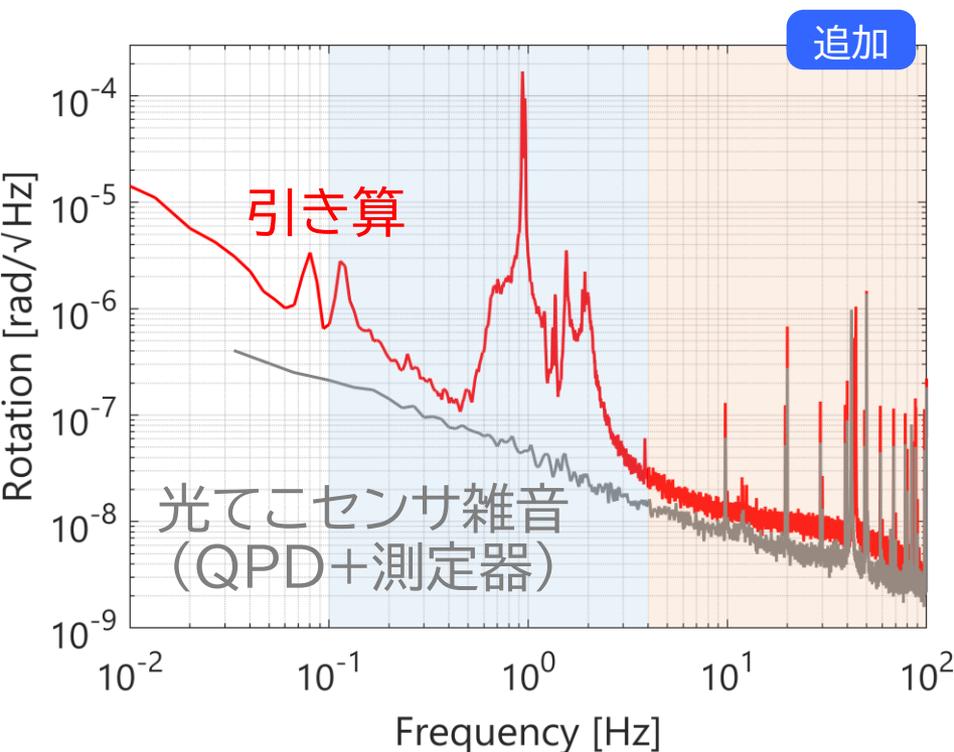
感度の比較

- 設計感度まで3桁・Phase-III TOBA目標感度まで7桁の雑音低減が必要



雑音源・感度向上に向けての考察

- 4 Hz以上は光てこのセンサ雑音が支配的
→ 共振器での検出にすることで感度向上が期待できる
- 0.1 Hz-4 Hzでは鉛直方向の地面振動雑音と有意な相関がある
→ テストマスの傾き低減 / 鏡の傾き低減 /
GASフィルタの共振周波数低減が必要



目次

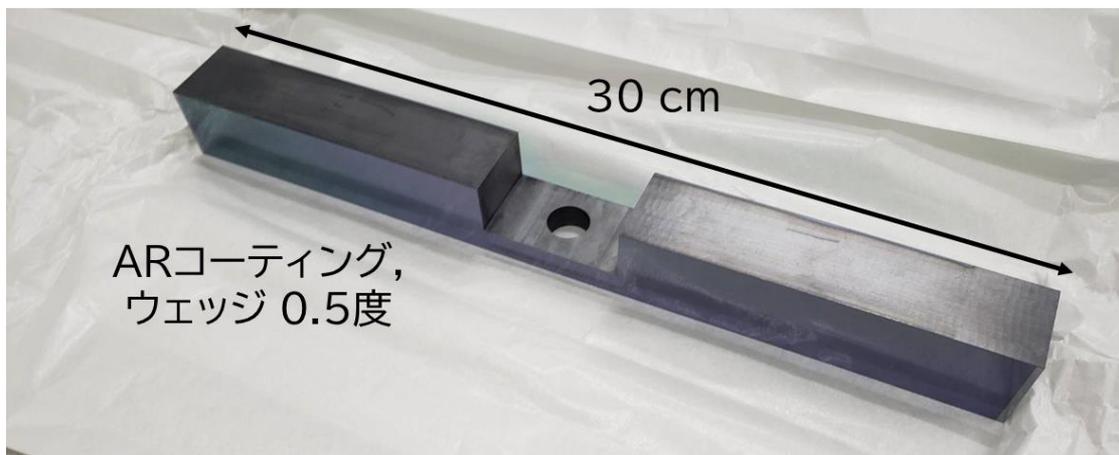
- 研究背景
- ねじれ振り子型重力勾配計TOBA
- 実験セットアップ
- 結果・考察
- 結論
 - 結果のまとめ
 - 今後の展望
 - 結論

結果のまとめ

		本研究の結果	本研究の設計値	Phase-III TOBA 設計値
光学系	光てこ	回転検出	補助センサ	補助センサ
	差動 ファブリペロー 共振器	フィネス ~300 TOBA初の導入 アンロック	フィネス 400 ロックして回転検出	フィネス 50 ロックして回転検出
懸架系	テストマス	アルミニウム製(シリコン仕様) TOBA初の設計		シリコン製
	ねじれ 共振周波数	117 mHz	28.7 mHz	7.7 mHz
	ねじれQ値	~50	10^3	10^8
	テストマス傾き	$\sim 2 \times 10^{-3}$ rad	10^{-4} rad	10^{-8} rad
	GASフィルタ 共振周波数	TOBA初の導入 3-4.5 Hz	3 Hz	3 Hz
冷却系	温度	300 K	300 K	4 K
感度 @ 0.1 Hz		3×10^{-7} / $\sqrt{\text{Hz}}$	3×10^{-11} / $\sqrt{\text{Hz}}$	4×10^{-15} / $\sqrt{\text{Hz}}$

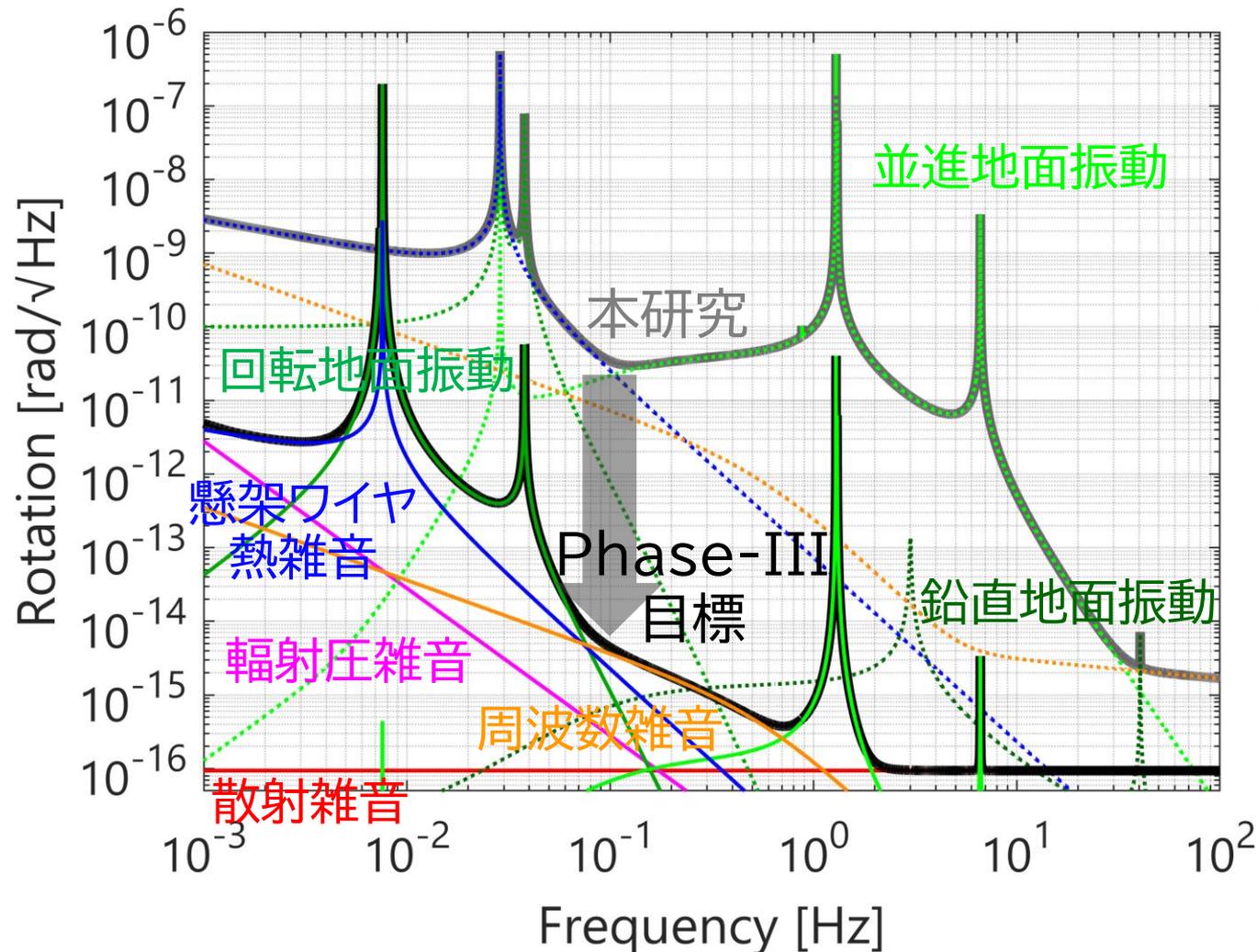
今後の展望

- ファブリペロー共振器をロックしねじれ回転を計測する
- テストマスをシリコンに置き換え冷却
 - 反射コーティングを施したテストマス調達済み



今後の展望

- 懸架ワイヤ熱雑音・地面振動雑音・レーザー周波数雑音の低減
→ Phase-III TOBAの完成へ



● 熱雑音

- 温度: 300 K → 4 K
- ベリリウム銅 → シリコン
- Q値: $10^3 \rightarrow 10^8$

● 地面振動雑音

- 能動防振 1/100
- テストマス傾き:
 $10^{-4} \text{ rad} \rightarrow 10^{-8} \text{ rad}$
- 共振器鏡傾き:
 $10^{-4} \text{ rad} \rightarrow 10^{-6} \text{ rad}$

● 周波数雑音

- 安定化 1/1000

結論

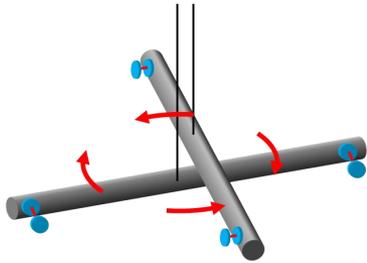
- 低周波重力波などの観測を目指している
- 35 cmスケールのねじれ振り子型重力勾配計
Phase-III TOBAを開発中である
- 光学系と懸架系を組み合わせた設計・開発を行った
 - 差動ファブリペロー共振器(TOBA初)・光てこ
 - 低温シリコン仕様・アルミニウム製のねじれ振り子
 - 縦防振のためのGASフィルタ(TOBA初)
- 装置を製作し動作に成功して性能評価を行った
- 光てこによる回転計測・同相雑音除去の解析を行った
- 本研究はTOBAの光学系と懸架系の構成を確立し
TOBAの目標感度実現に向けた道を拓いた

補助スライド

重力勾配計の比較

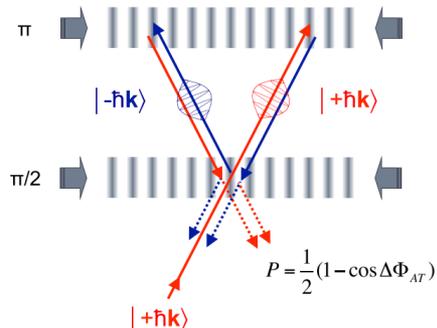
● ねじれ振り子型

- レーザー散乱雑音と熱雑音
- 技術が実証されている
- オフライン雑音除去が可能
- 常温でも運転可能



● 原子干渉計型:

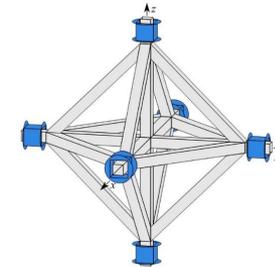
- 原子数による散乱雑音
- 技術実証中
- 数kmスケール



B. Canuel+,
Scientific Reports
(2018)

● 超伝導型:

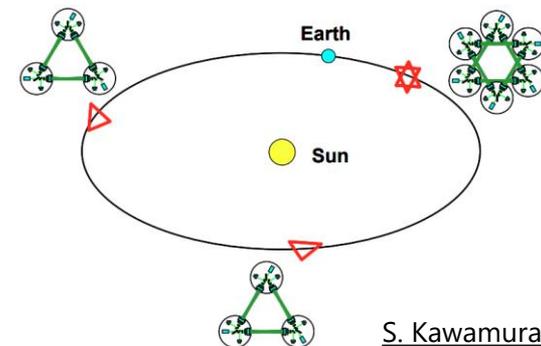
- SQUID散乱雑音と熱雑音
- 技術が実証されている
- 再現性が高く
オフライン雑音除去が容易



H. J. Paik+, IJMPD (2020)

● 宇宙重力波望遠鏡

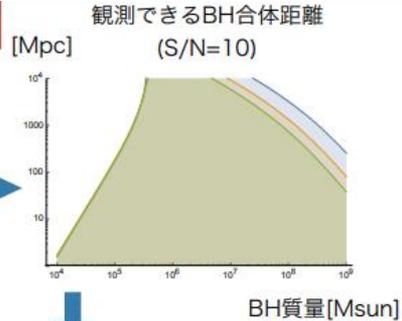
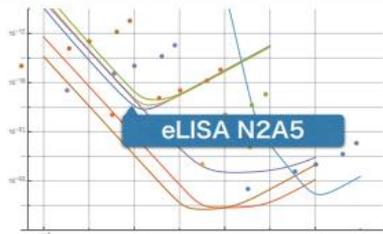
- 地上検出器より良い感度
- 開発コストがかかる



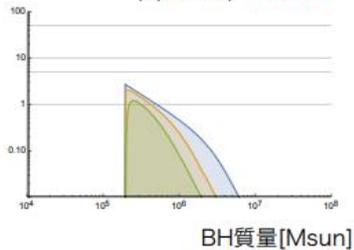
S. Kawamura+, JPCS (2008)

中間質量ブラックホール合体頻度

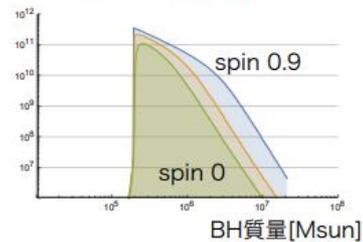
Event Rates at eLISA



1年間で観測できるBH数分布 (S/N=10) **年55個**

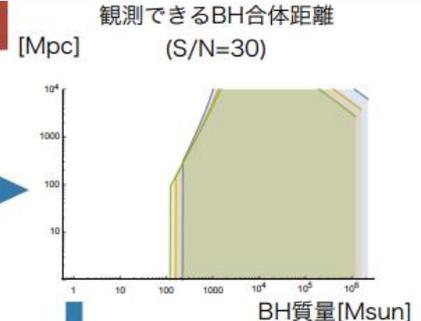
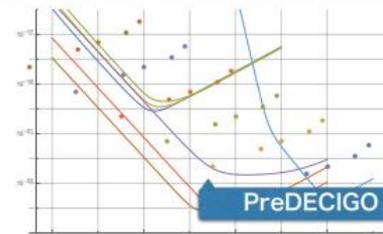


観測できるBH数分布

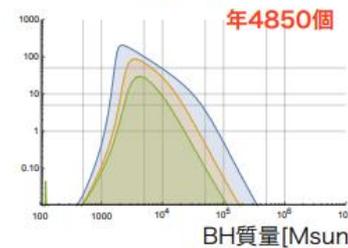


51

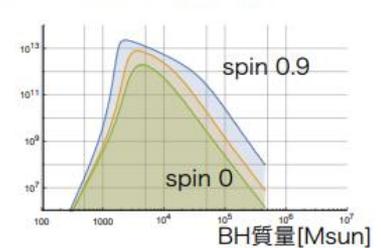
Event Rates at PreDECIGO



1年間で観測できるBH数分布 (S/N=30) **年4850個**



観測できるBH数分布

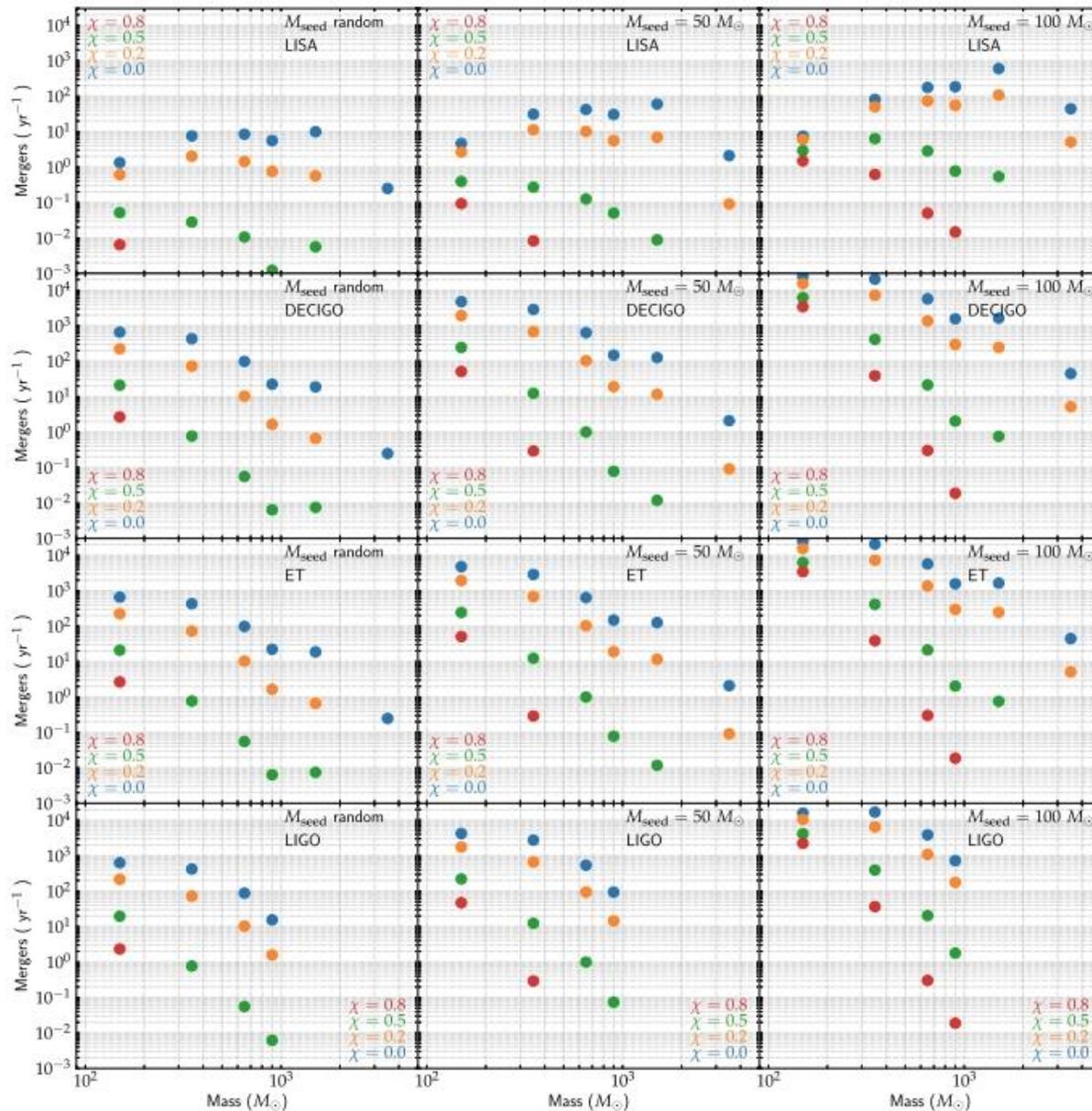


53

真貝寿明, 安東研セミナー (2017)

中間質量ブラックホール合体頻度

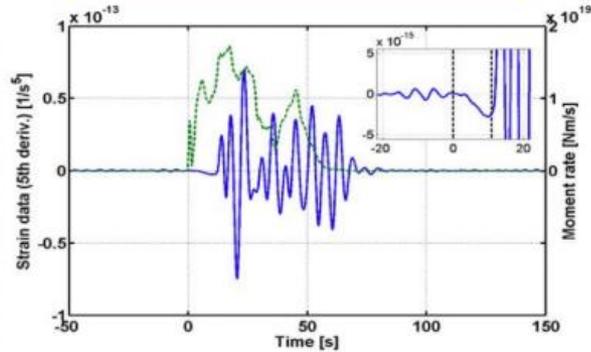
G. Fragione+, ApJ (2022)



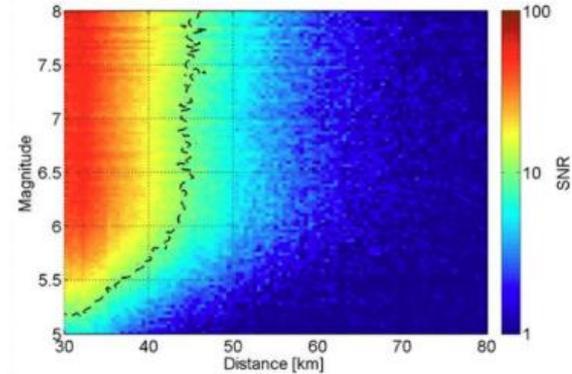
Final TOBAを用いた地震速報

Ampuero *et al.*, Prompt detection of fault rupture for earthquake early warning (preprint)

Gravity signal following a rupture

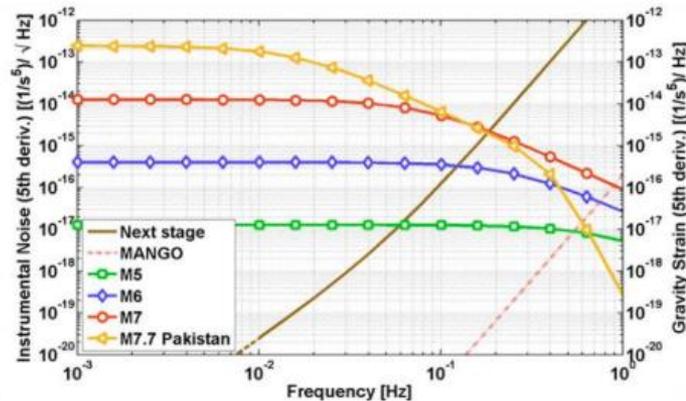


SNR after 5 s

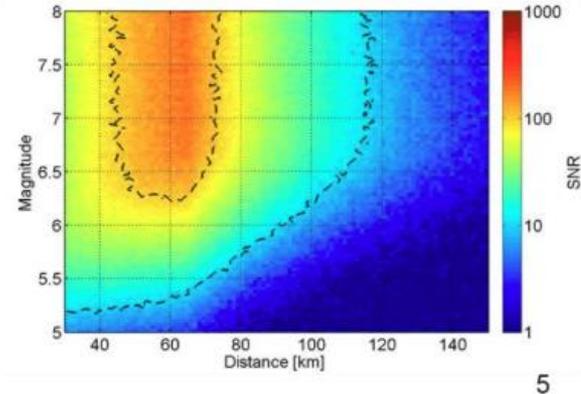


Epicentral distance = 70 km

Next stage: $h = 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$, MANGO: $h = 10^{-20} \text{ Hz}^{-1/2}$

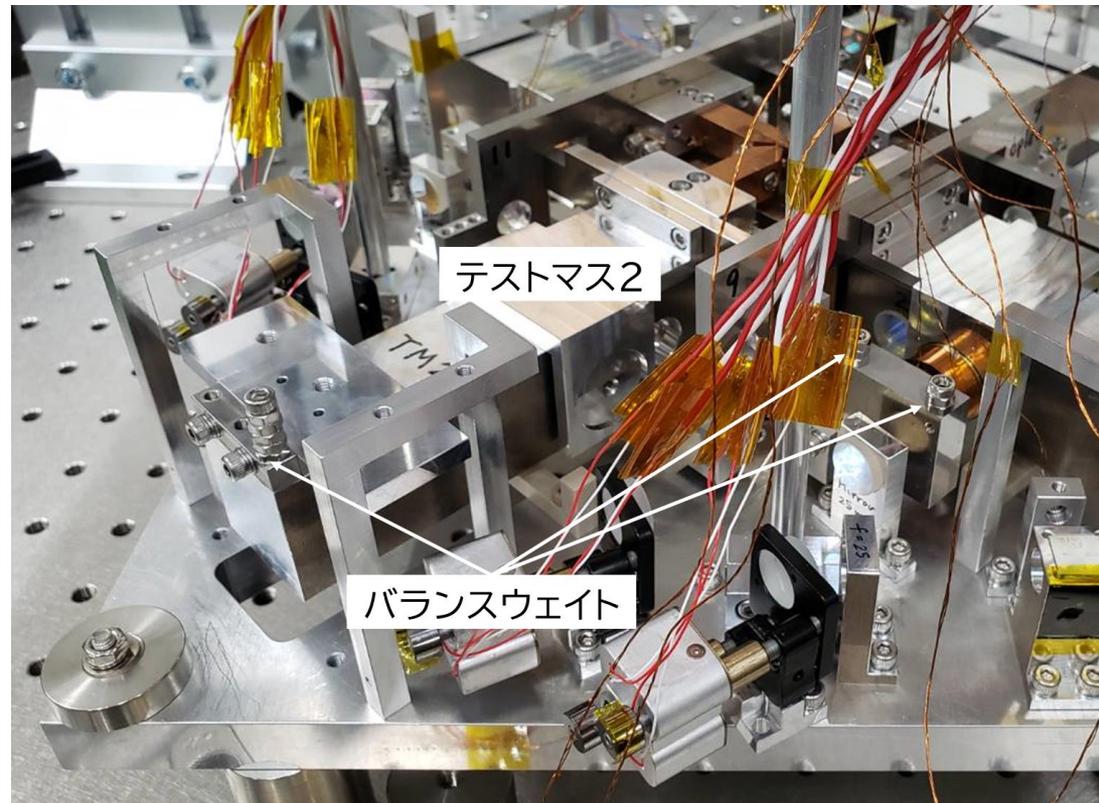
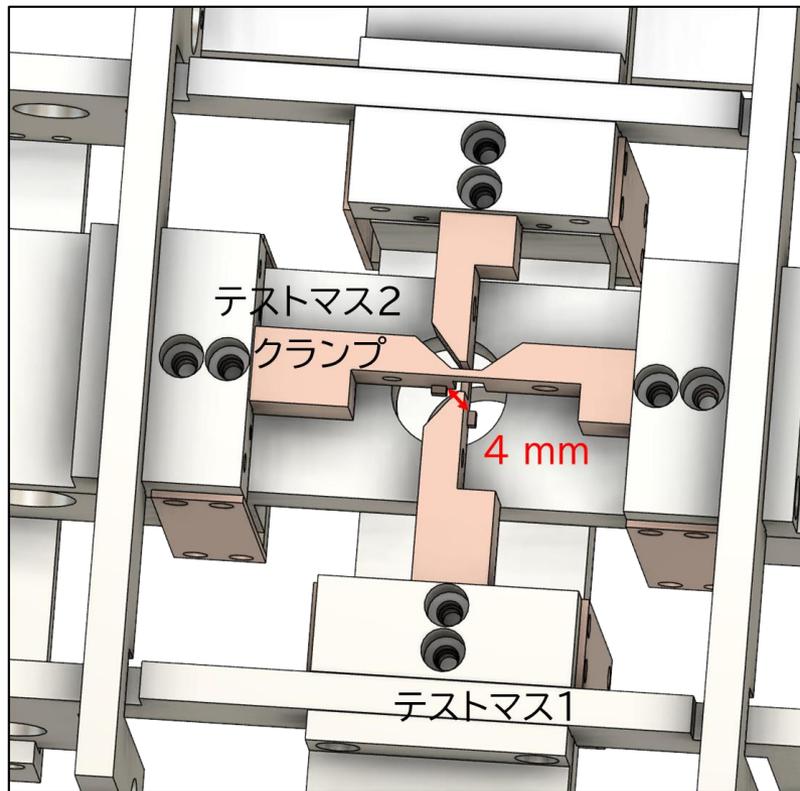


SNR after 10 s



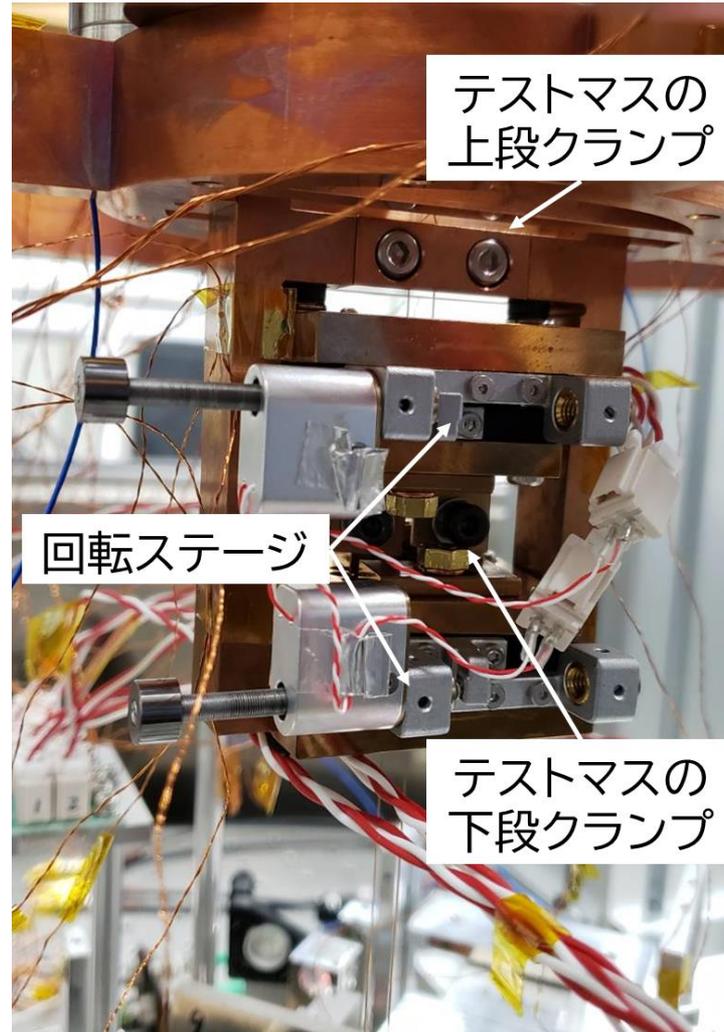
懸架系の設計: テストマス

- 振動雑音低減のために2本のワイヤ間の距離を近づける
- 振動雑音低減のためにバランスウェイトで傾き補正 ($\sim 2 \text{ mrad}$)



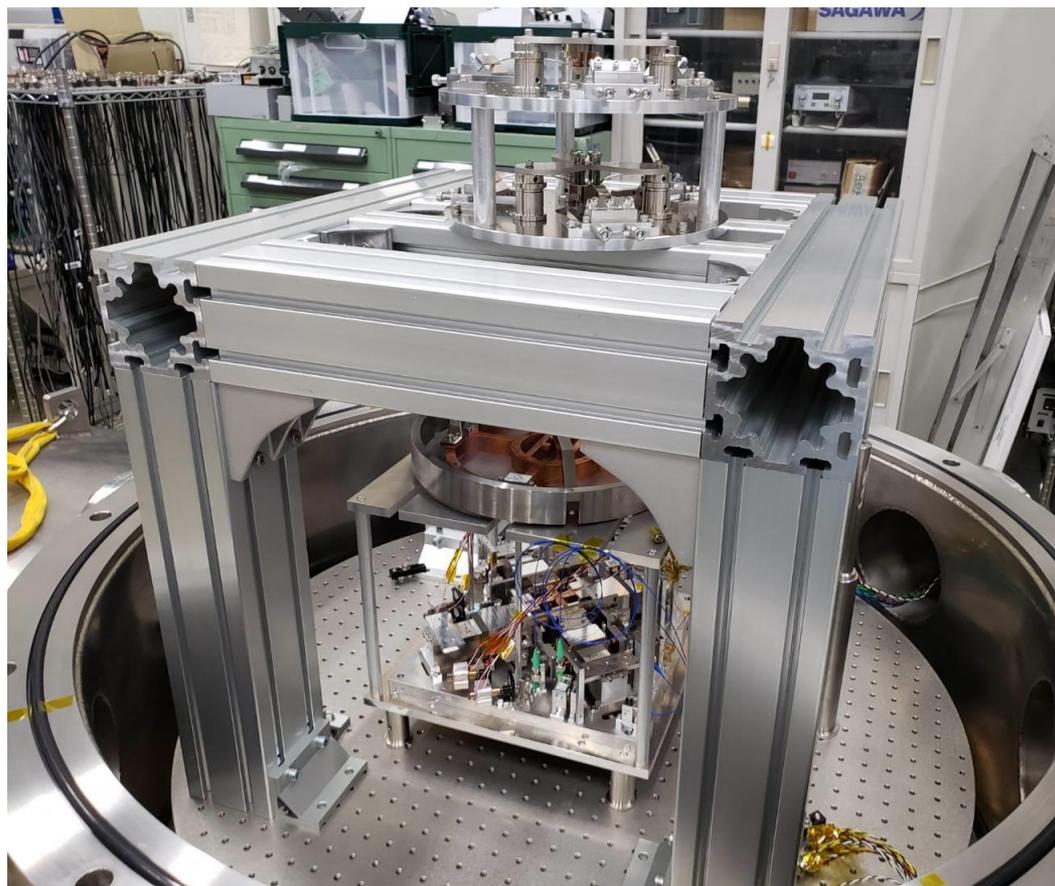
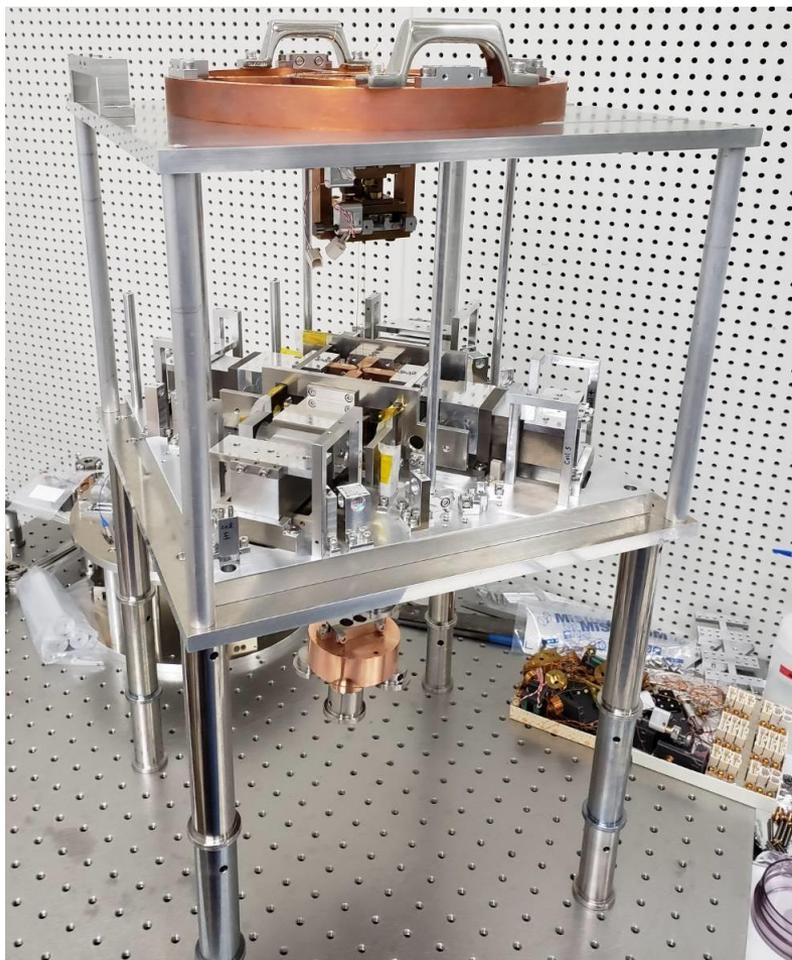
懸架系の設計: 回転ステージ

- 中段マスにテストマスのねじれ回転を補正用のステージを設置



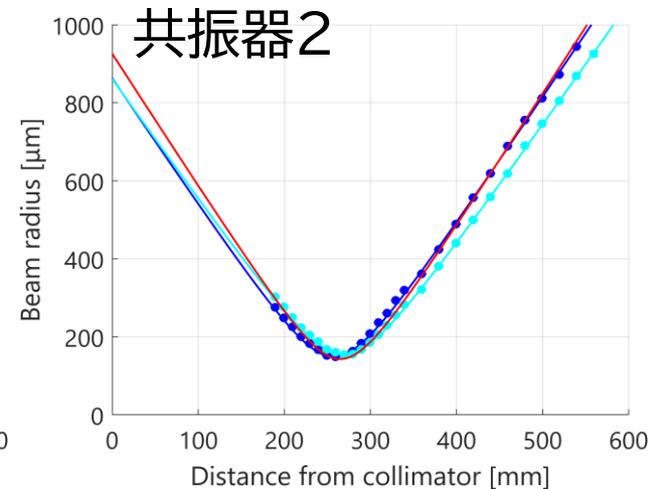
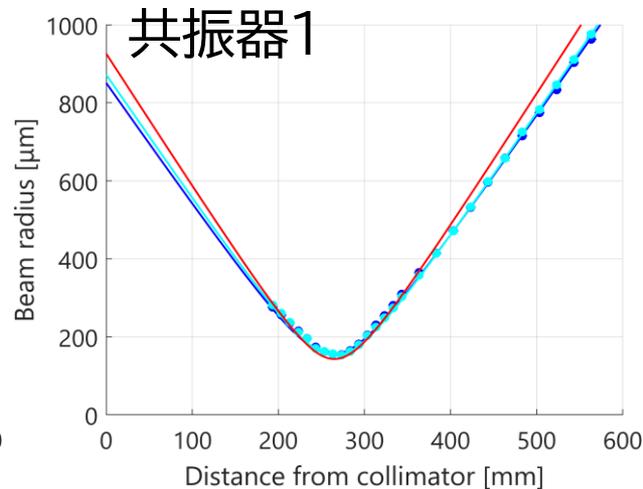
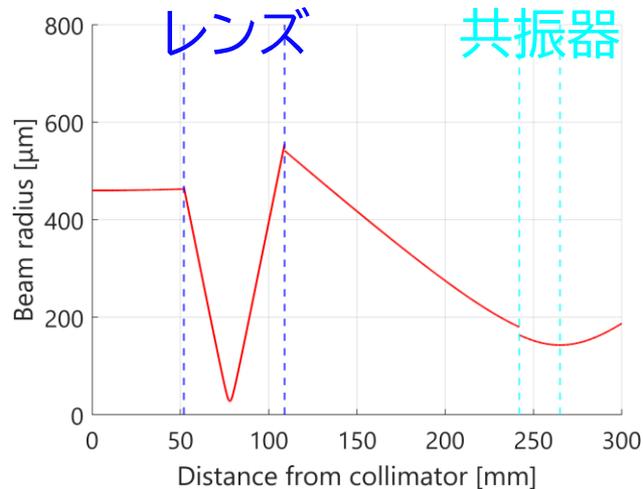
懸架系の設計: 懸架治具

- 懸架・真空槽へのインストールを容易にするための治具
→ 作業性の向上・再現性の向上
- Phase-III TOBAの真空槽・冷却シールドに入る大きさ



共振器の評価: モードマッチ率

- ファブリペロー共振器内では固有のビーム径が共振できる
- モードマッチ率: 入射ビーム径と固有ビーム径の一致割合



	設計値	共振器1	共振器2
ウエスト半径	142.9 μm	x: 155.2 μm	x: 155.2 μm
		z: 155.2 μm	z: 155.2 μm
ウエスト位置	265 mm	x: 263 mm	x: 257 mm
		z: 265 mm	z: 269 mm
モードマッチ率		99.0%	99.4%

→ 十分高い値

光てこセンサ雑音

