

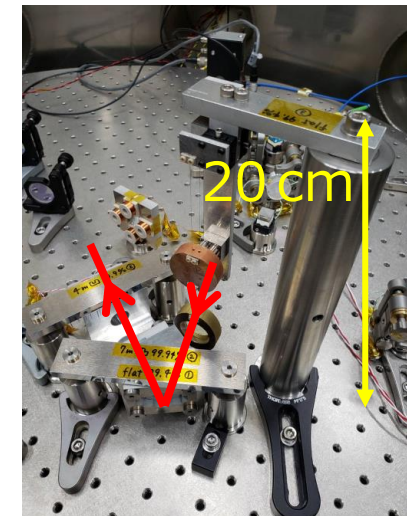
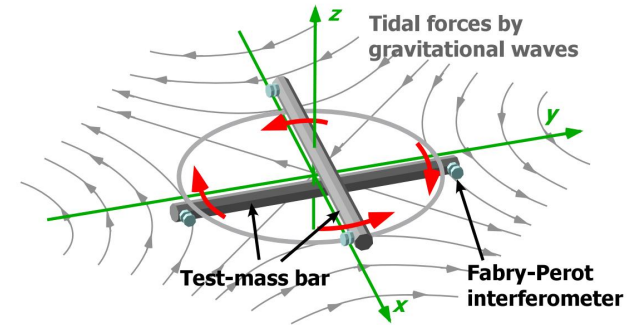
# ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発(37)： ねじれ振り子と読み取り光学系の開発

---

大島 由佳<sup>A</sup>, 高野 哲<sup>A</sup>, Ooi Ching Pin<sup>A</sup>, Choi Minseo<sup>A</sup>,  
Cao Mengdi<sup>B</sup>, 道村 唯太<sup>C,D</sup>, 小森 健太郎<sup>D</sup>, 安東 正樹<sup>A,D</sup>  
東大理<sup>A</sup>, 北京師範大天文<sup>B</sup>, カリフォルニア工科大学<sup>C</sup>, 東大ビッグバン<sup>D</sup>

# 概要

- ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA で 0.1 Hz 帯の重力波観測を目指している
- TOBA の角度センサとして 結合光共振器を用いた wavefront sensor (Coupled WFS) が考案された
  - 角度信号が大きい
  - ビームジッター雑音が小さい
- 本研究では Coupled WFS の 原理実証実験を行った
  - 制御手法の考案
  - 角度信号増幅の定量的な評価
  - テストマスを懸架するセットアップへの改良



# 目次

---

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA
  - 原理とサイエンス
  - プロトタイプ Phase-III TOBA
  
- 結合光共振器を用いた wavefront sensor (Coupled WFS)
  - 原理
  - 共振器の設計
  - 結果と考察
  - セットアップの改良

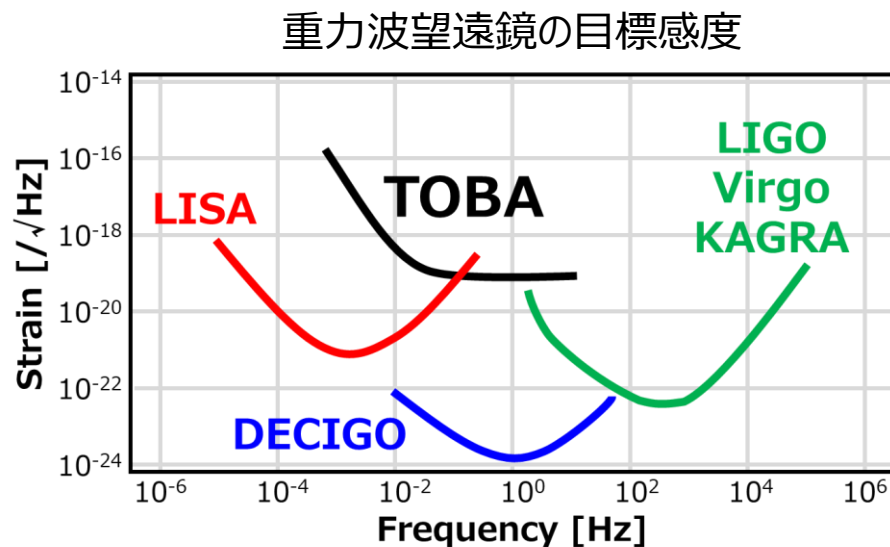
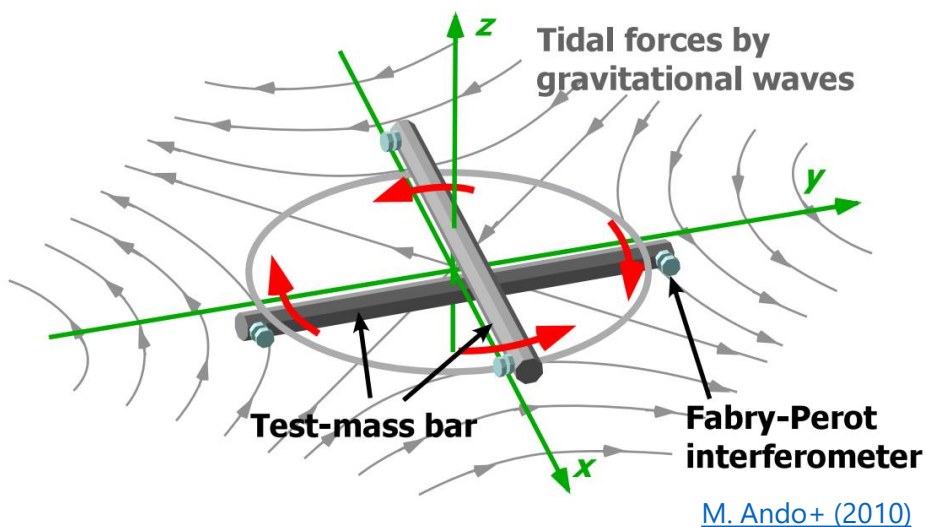
# 目次

---

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA
  - 原理とサイエンス
  - プロトタイプ Phase-III TOBA
  
- 結合光共振器を用いた wavefront sensor (Coupled WFS)
  - 原理
  - 共振器の設計
  - 結果と考察
  - セットアップの改良

# ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA

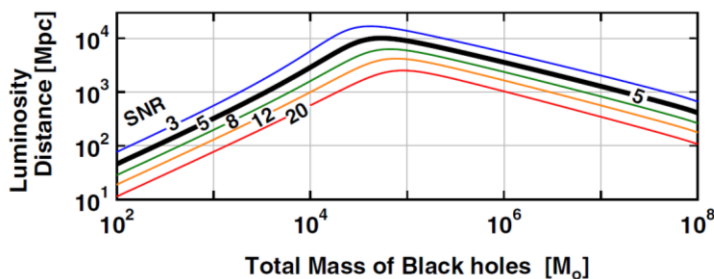
- TOBA: TOrsion-Bar Antenna
- 水平に懸架した2本の棒状マスで潮汐力によるねじれ回転を検出
- ねじれ振りの共振周波数は低い ( $\sim 1$  mHz)
  - 地上で低周波数に高感度
- 宇宙に打ち上げないためコストを抑えられる
- 地上のためメンテナンスが簡単
- 地球物理のサイエンス



# 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  
~1 Mpc 以内 (Phase-III)  
~10 Gpc 以内 (Final)  
→ 大質量ブラックホール  
形成過程の解明

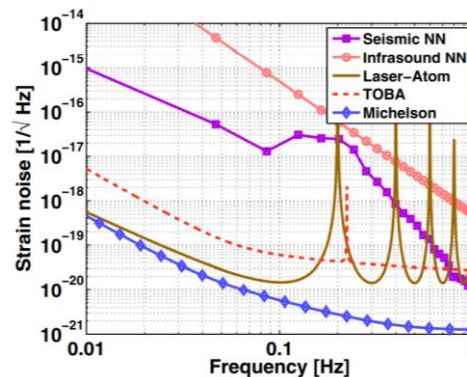


[M. Ando+ \(2010\)](#)

- 背景重力波  
 $\Omega_{GW} \sim 10^{-7}$  (Final)  
→ 初期宇宙の直接探査

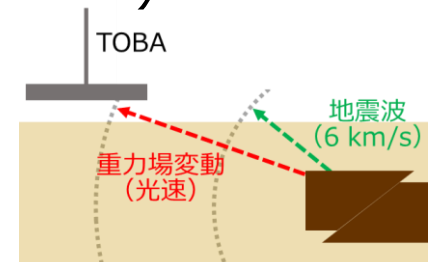
## 地球物理

- 重力勾配雑音  
モデル検証・非定常雑音  
→ 第3世代検出器の雑音低減



[J. Harms+ \(2013\)](#)

- より早い地震速報  
100 km 先の M7 の地震を  
10 秒以内 (Phase-III)  
→ 社会への貢献



# TOBA 開発の流れ

Phase-I

Phase-II

現在

Phase-III

Final

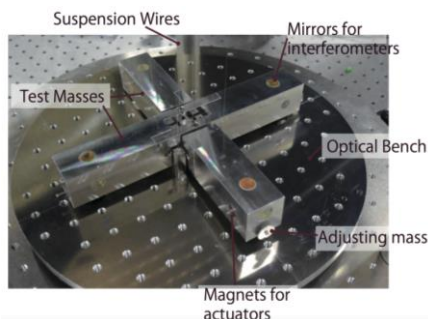
原理実証

要素開発・雑音低減  
地球物理の観測

本観測

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

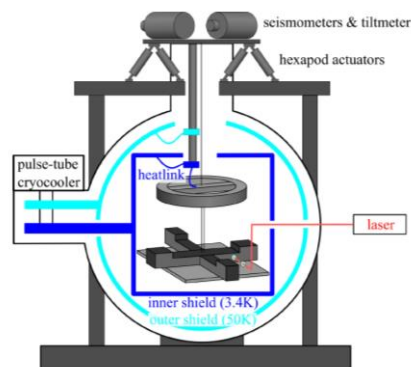
20 cm 試験マス  
室温



[K. Ishidoshiro+ \(2011\)](#)  
[A. Shoda+ \(2017\)](#)

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

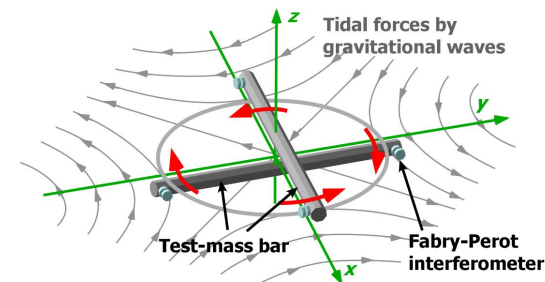
35 cm 試験マス  
低温 (4 K)



[T. Shimoda+ \(2020\)](#)

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

10 m 試験マス  
低温 (4 K)

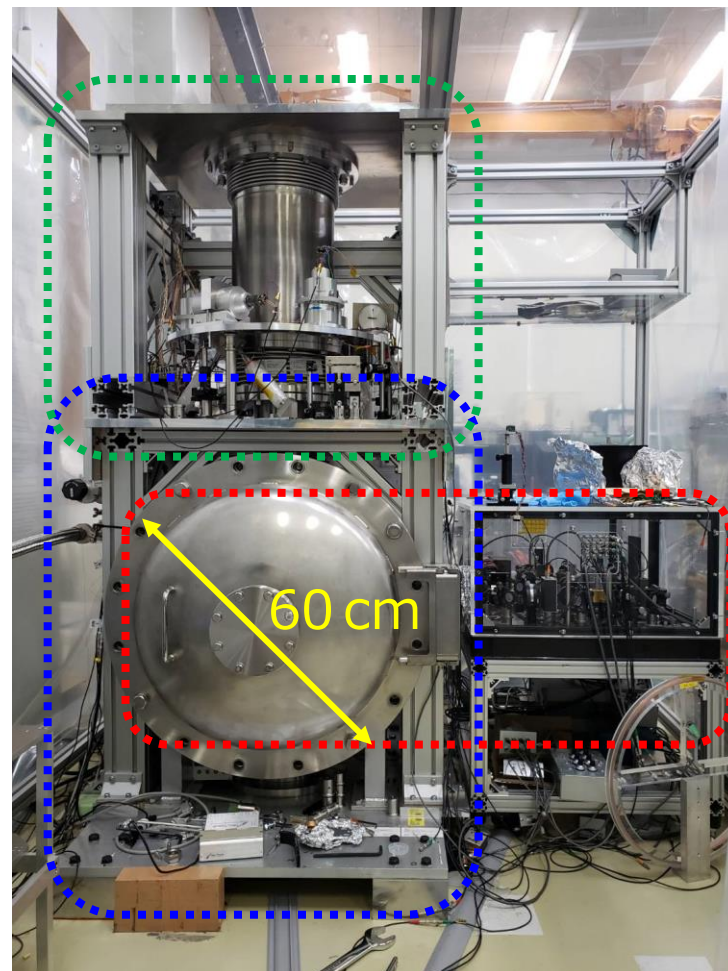
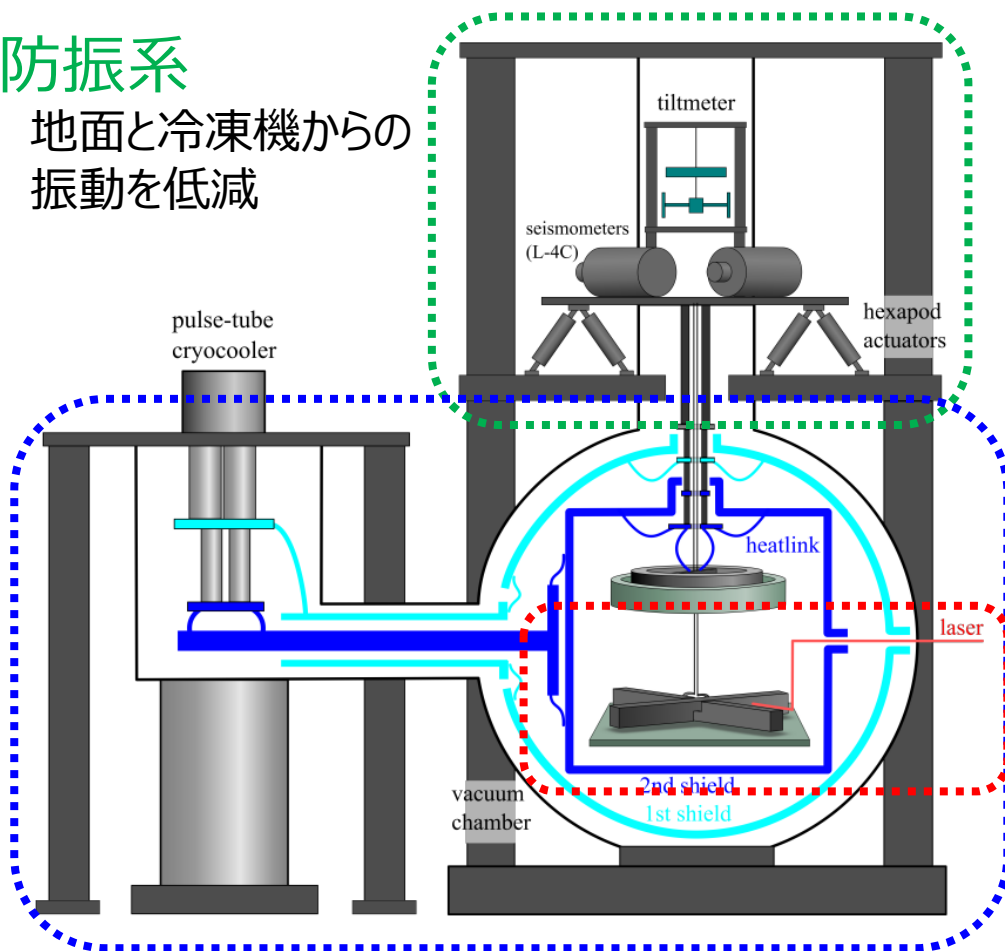


# Phase-III TOBAの構成

下田智文 博士論文 (2019)

## 防振系

地面と冷凍機からの振動を低減



## 低温懸架系

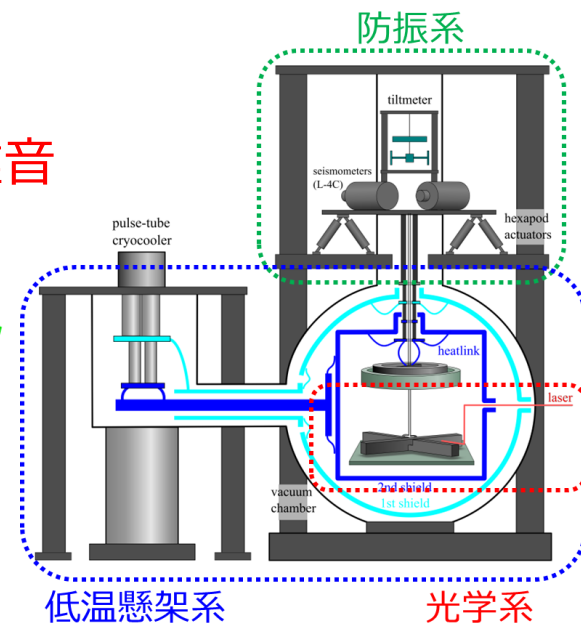
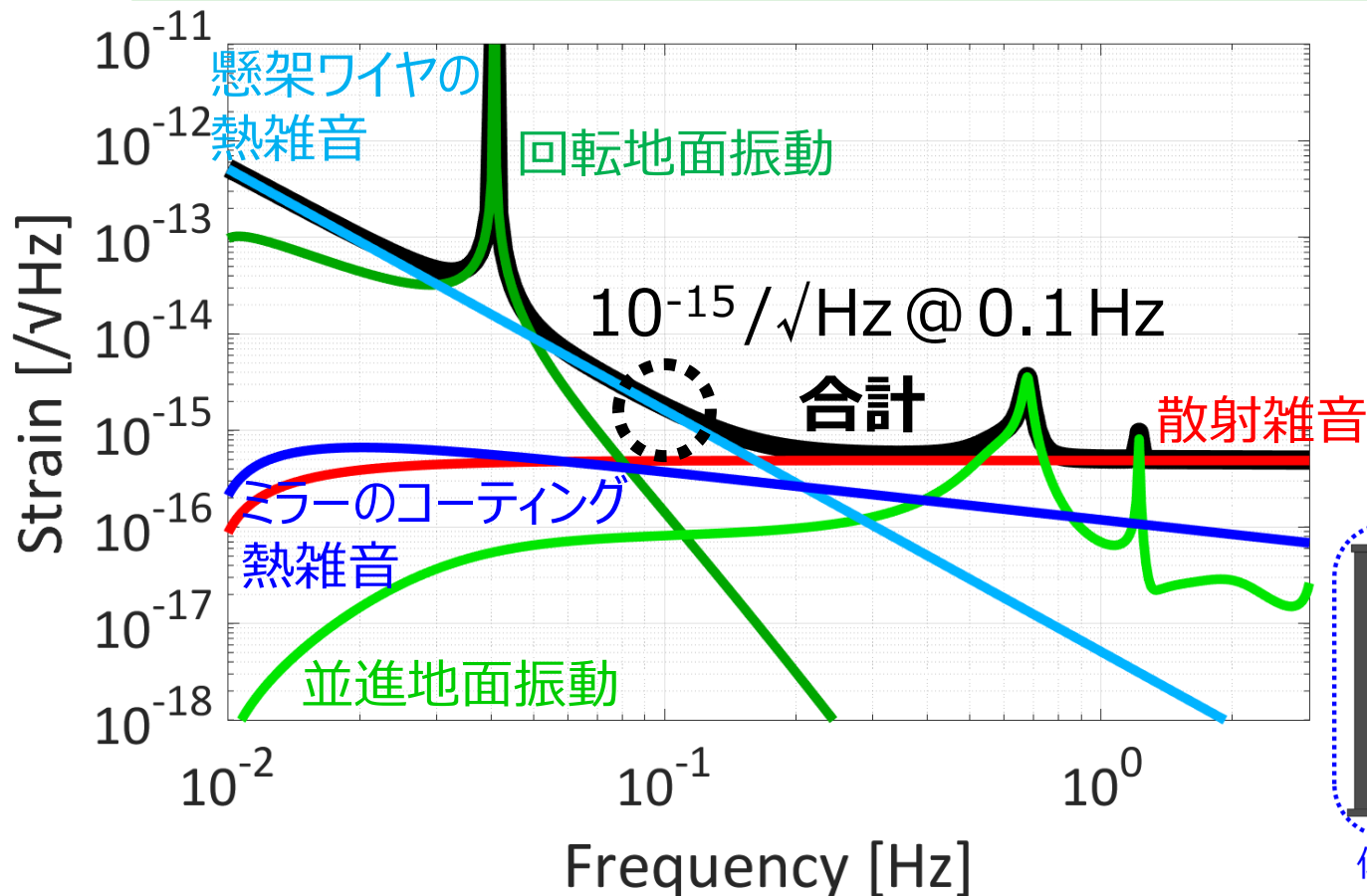
冷却されたねじれ振り子

## 光学系

ねじれ振り子の回転を読み取る



# Phase-III TOBA の目標感度・開発項目



- **光学系**：高感度な角度センサ (Coupled WFS) → ① 本講演
- **低温 + 防振 + 光学系**：低温モノリシック光学系 → ② 高野さんの講演
- **低温懸架系**：低温で高いQ値をもつ懸架ワイヤ → ③ Ooiさんの講演
- **防振系**：能動防振のための傾斜計 → ④ Caoさんの講演

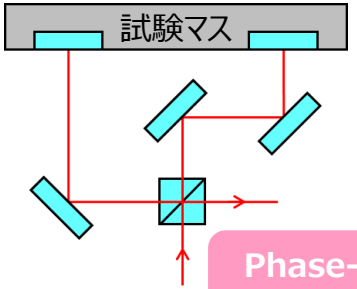
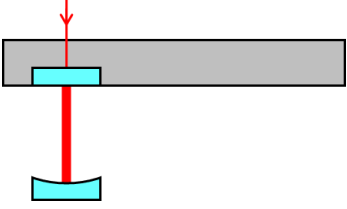
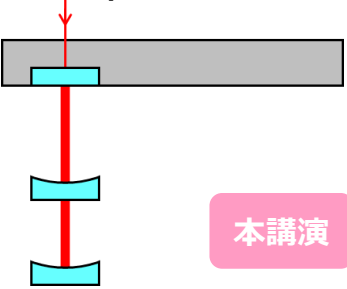
# 目次

---

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA
  - 原理とサイエンス
  - プロトタイプ Phase-III TOBA
  
- 結合光共振器を用いた wavefront sensor (Coupled WFS)
  - 原理
  - 共振器の設計
  - 結果と考察
  - セットアップの改良

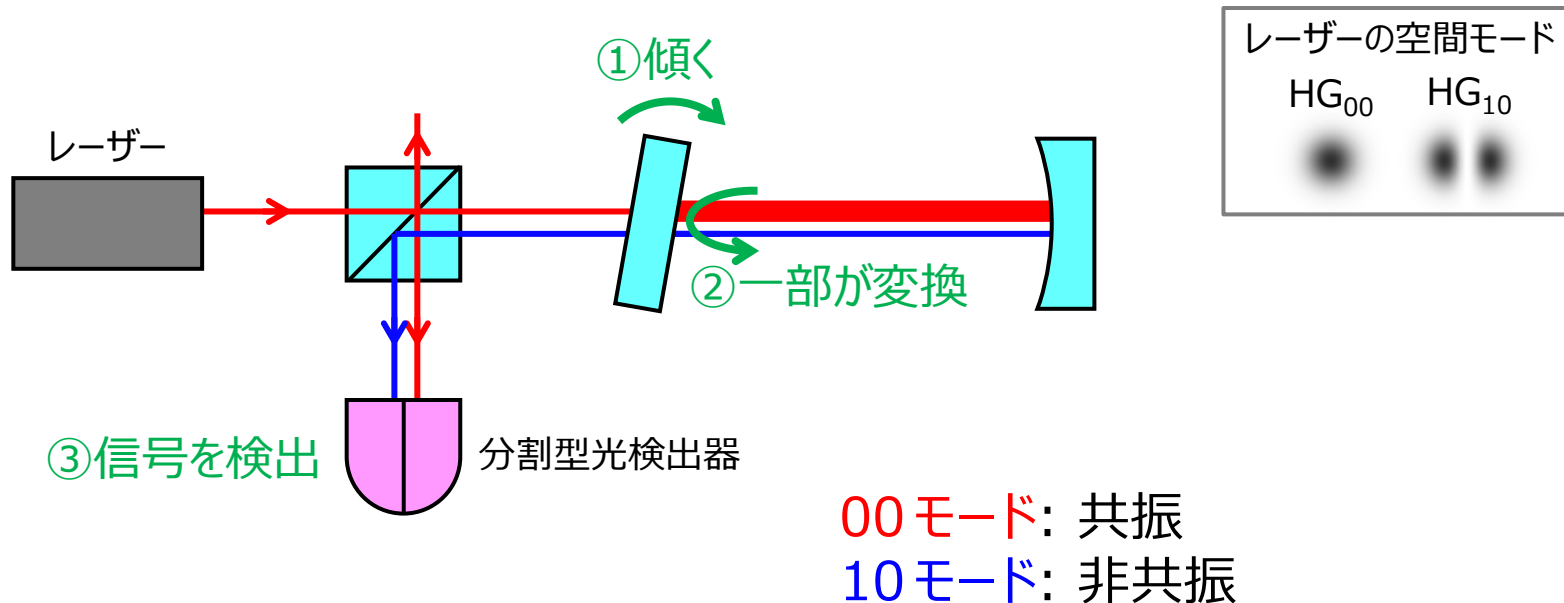
# 角度センサの比較

- ねじれ振り子の回転を高感度に読み取る角度センサが必要
- Phase-III TOBAの散射雑音の要求値 (角度換算):  $5 \times 10^{-16} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$

	マイケルソン干渉計 試験マス  Phase-I Phase-II	Wavefront sensor 	Coupled WFS  本講演
散射雑音	😊	😞 角度信号が 増幅されない	😊 角度信号が 増幅される
周波数雑音	😞 2つの光路の 非対称性による	😊	😊
並進カップリング	😞 2つの鏡を平行に 付けるのが難しい	😊	😊
ビームジッター雑音	😞 2つの鏡を平行に 付けるのが難しい	😞	😊 ビームジッターは 増幅しない
線形レンジ	😊	😊	😞 角度信号と トレードオフ

# Wavefront sensorの原理

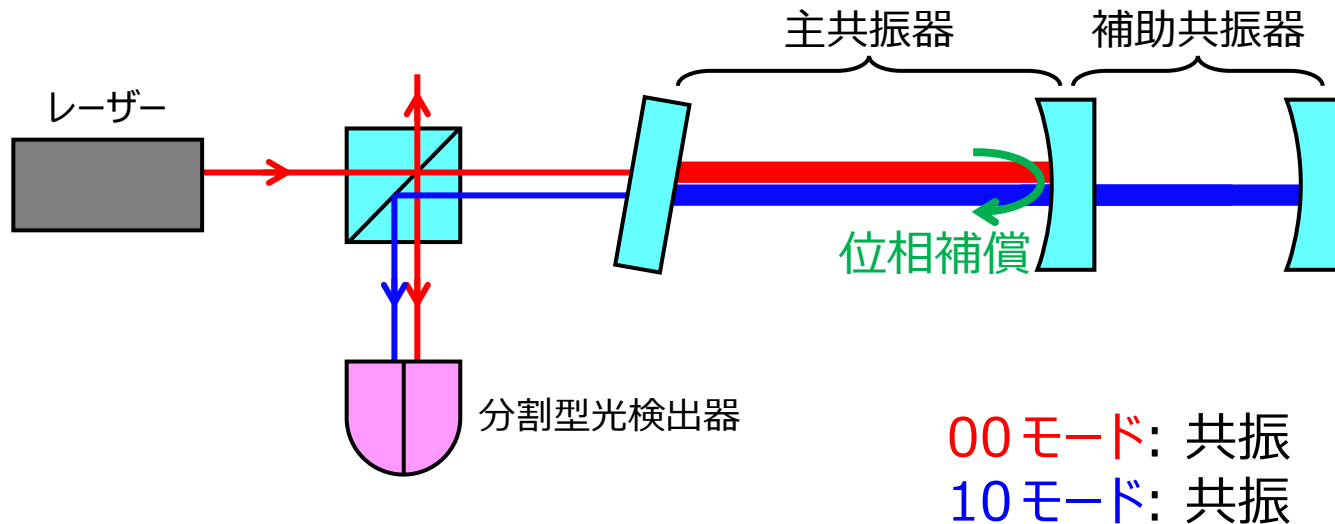
- WaveFront Sensor (WFS): 光共振器を用いた角度センサ
- ミラーの傾きで 10モードが生まれる
- 00モードと 10モードの干渉を検出
- 左右の信号の差をとる → 傾き量に比例した WFS 信号



- Gouy 位相により 00モードと 10モードが同時に共振しない  
→ 共振器内で 10モードが増幅されない

# Coupled wavefront sensorの原理

- Coupled WFS:  
結合光共振器 (coupled cavity) を用いた WFS

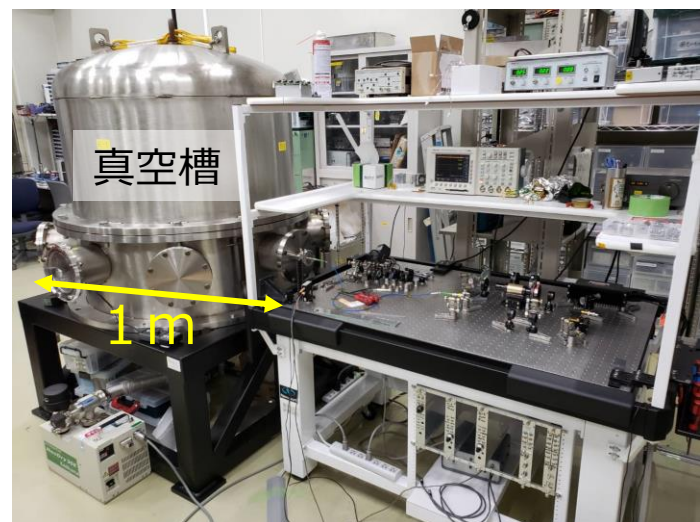
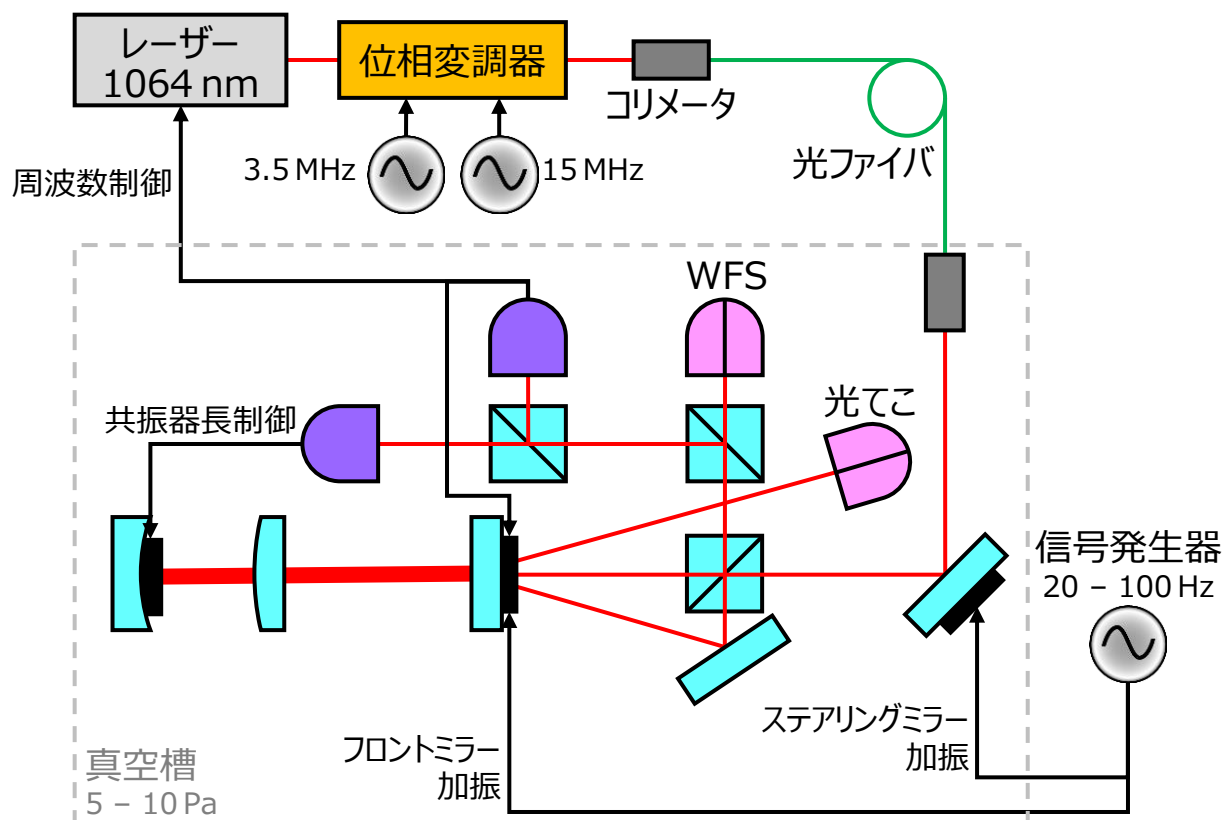


- 補助共振器による位相補償で主共振器の Gouy 位相を打ち消し  
00モードと10モードを同時に共振させる  
→ 主共振器内で10モードが増幅される  
→ WFSより大きな信号
- ビームジッターは増幅されない  
→ ビームジッター雑音に対して信号雑音比が良い

# 原理実証実験

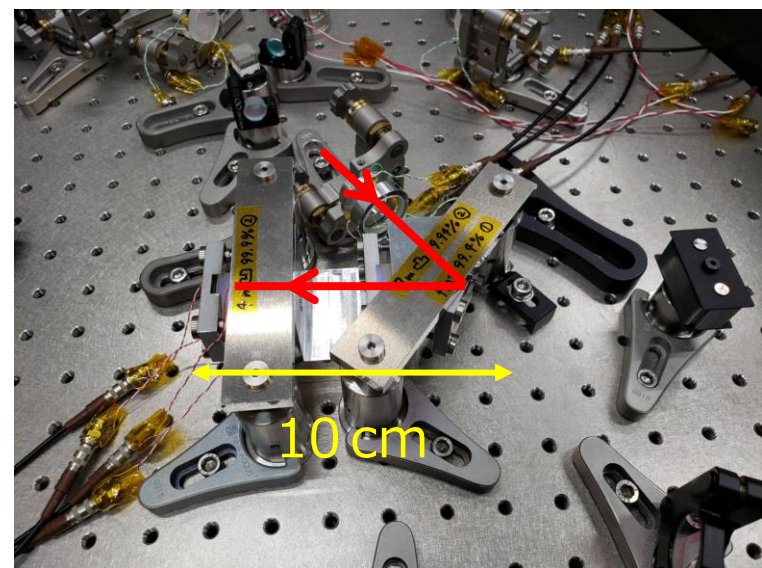
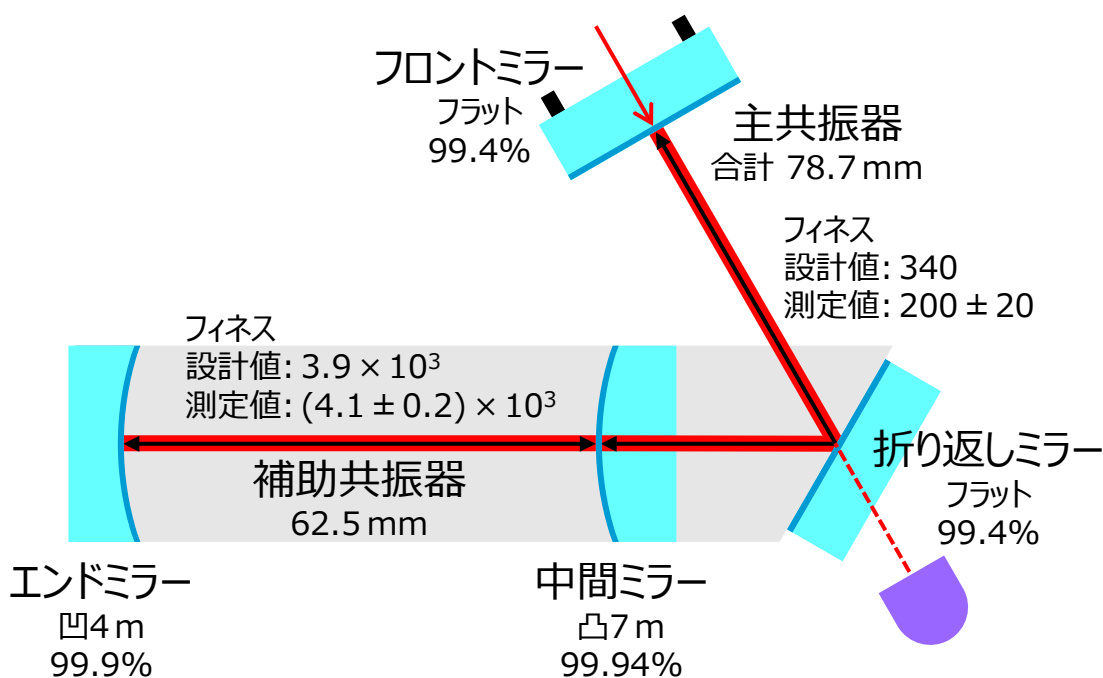
## 目的

- 信号増幅の定量的な評価
  - Coupled WFS 信号が WFS 信号より大きいことを実証
- 制御手法の確立
  - 主共振器・補助共振器ともに PDH 法で共振点に制御



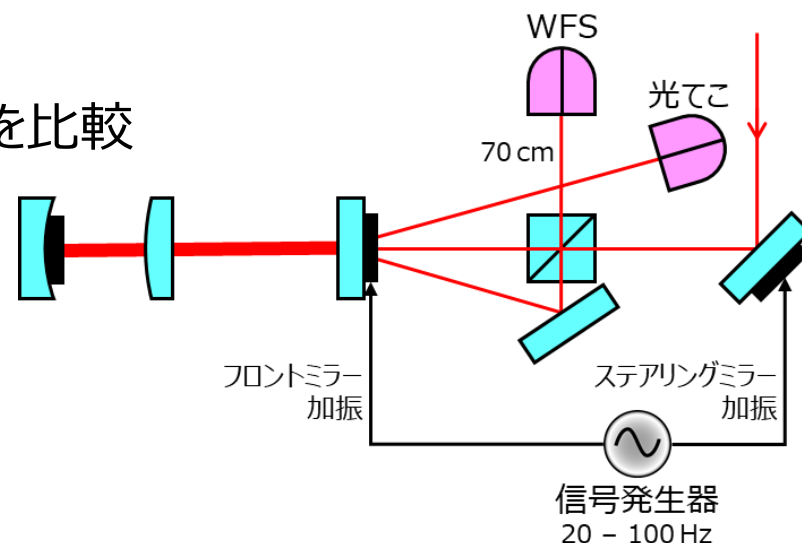
# 共振器の製作

- 主共振器の透過光をモニタできるように折り返す
- アライメント安定化のためフロントミラー以外はスペーサーに固定
- フロントミラーはミラーマウントに固定
  - ピエゾ素子で角度方向に加振して WFS 信号を得る



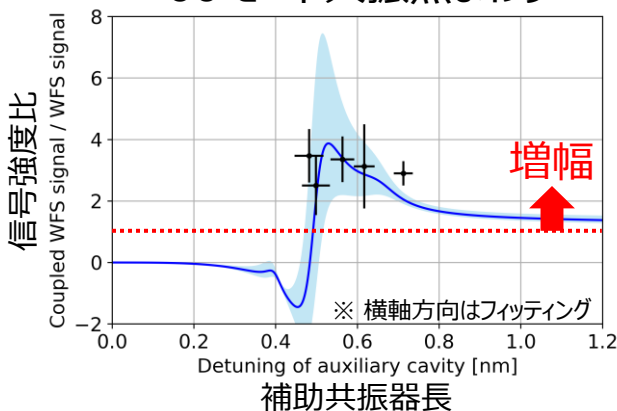
# 結果1: 角度信号・ビームジッター応答

- 光てこ信号を使って校正  
→ WFSとCoupled WFSの信号強度を比較
- 補助共振器の透過光量から  
Coupled WFSの制御点を校正

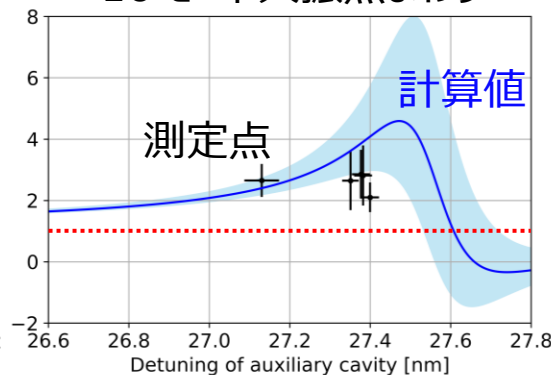


- フロントミラーを角度方向に揺らす  
→ WFSに比べて信号増幅

00モード共振点まわり

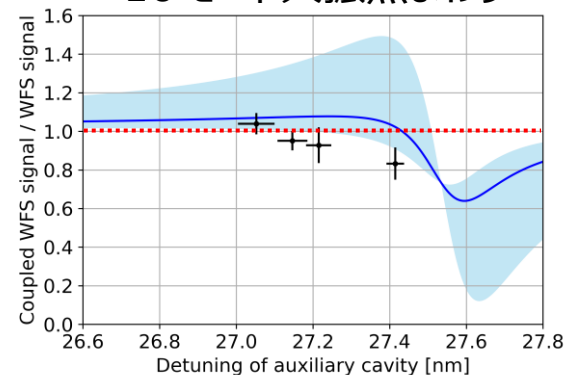


10モード共振点まわり



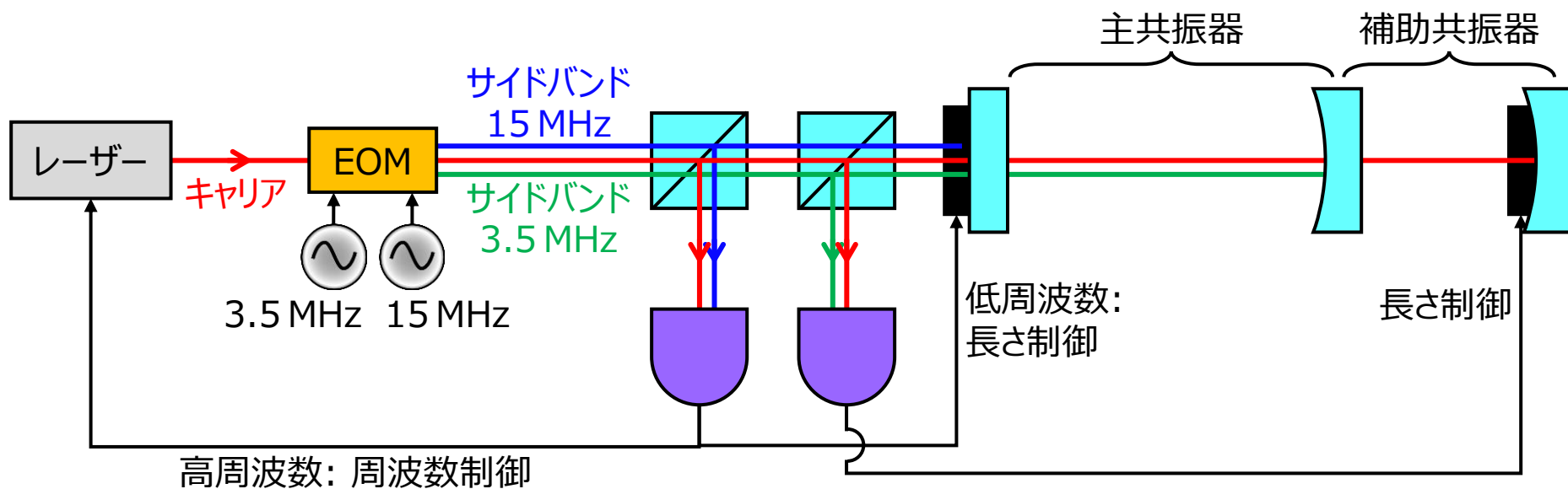
- 入射光にビームジッターを混ぜる  
→ ビームジッターは増幅しない

10モード共振点まわり

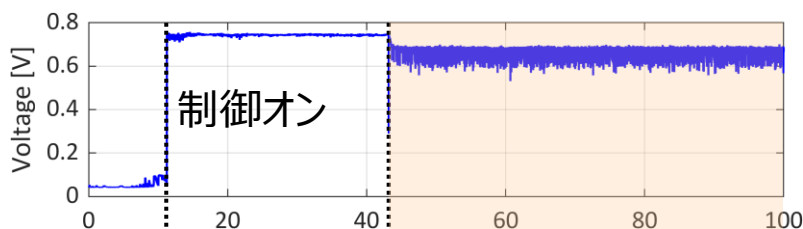




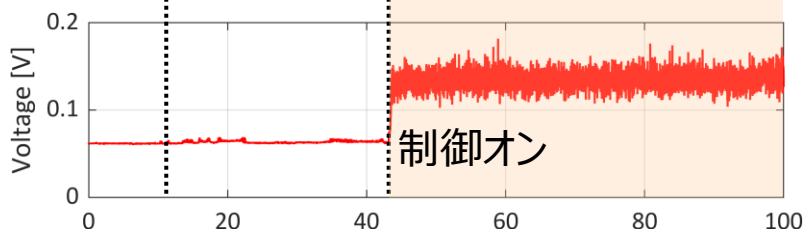
# 結果2: 共振器制御



主共振器  
透過光



補助共振器  
透過光



- 2つの変調周波数を用いてPDH法で制御
- 主共振器は階層制御
- 2つの共振器制御をオンにすると透過光量が乱れる

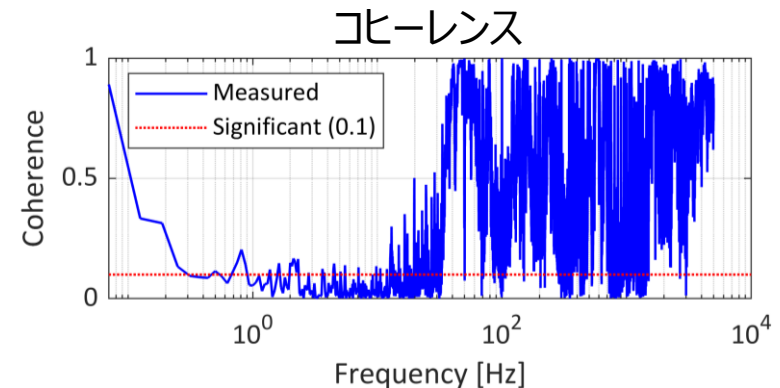
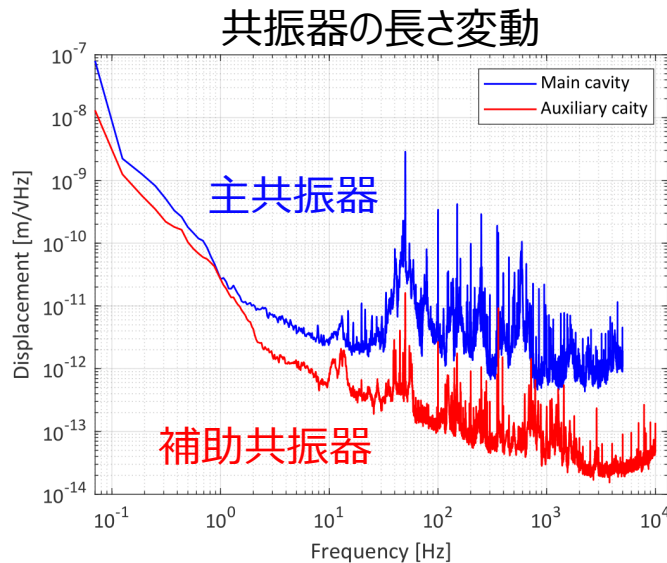
# 考察：共振器制御の安定性

## ● 現在の問題点

- 主共振器の長さ変動が周波数制御を介して補助共振器に伝わる  
→ 2つの共振器のPDH信号が40 Hz以上で有意な相関をもつ  
→ 高周波数帯までフィードバック信号を返せず制御が不安定

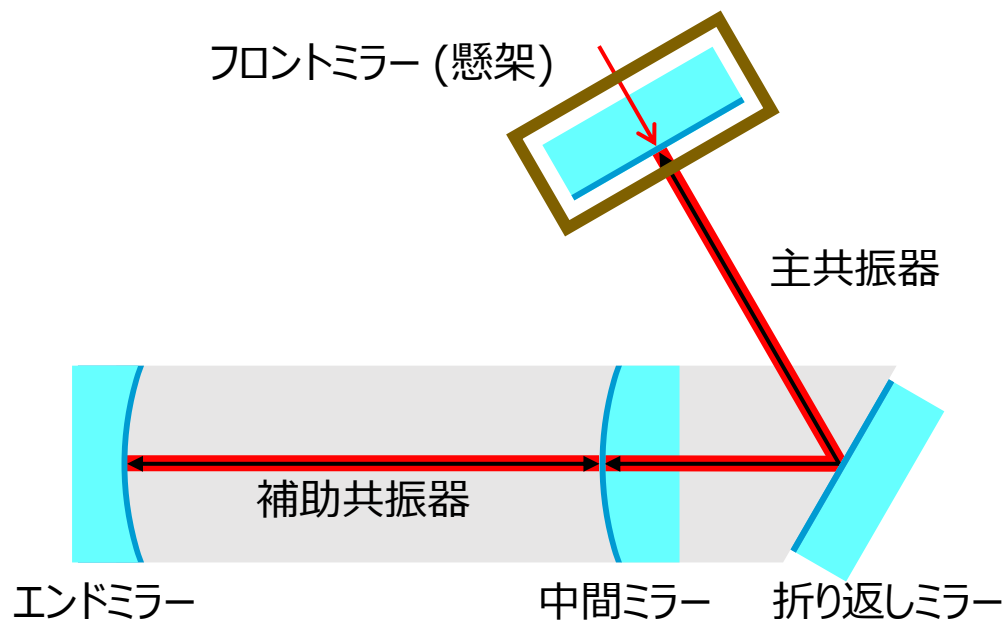
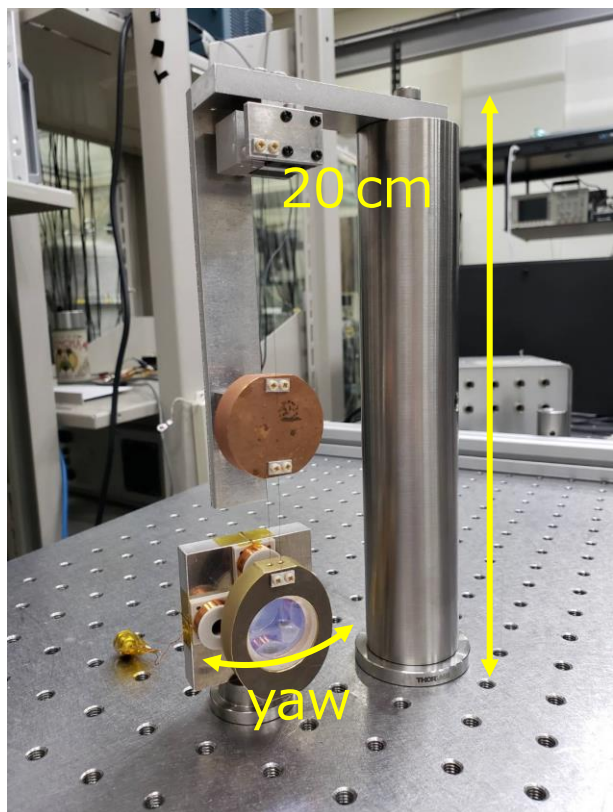
## ● 解決方法

- フロントミラーを振り子で懸架し主共振器の外乱を小さくする
- 主共振器のフィードバック信号をフロントミラーに返しPDH信号の相関を小さくする



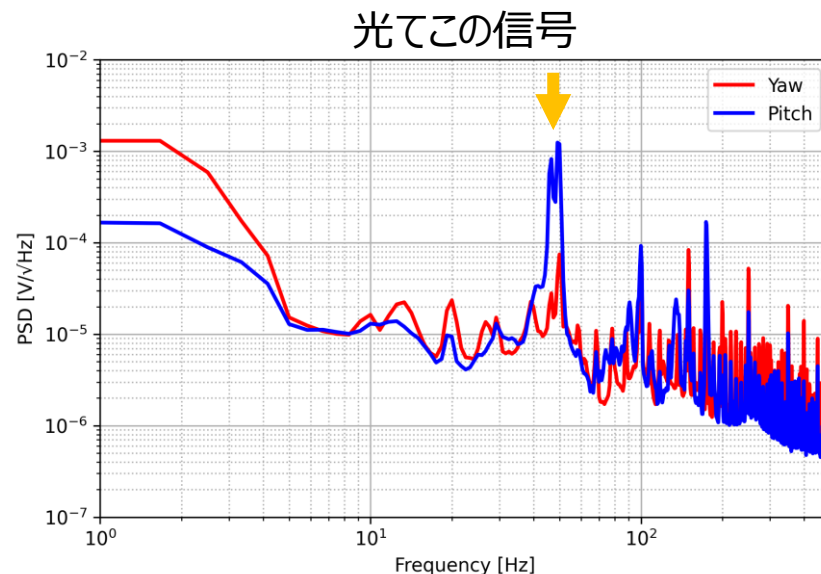
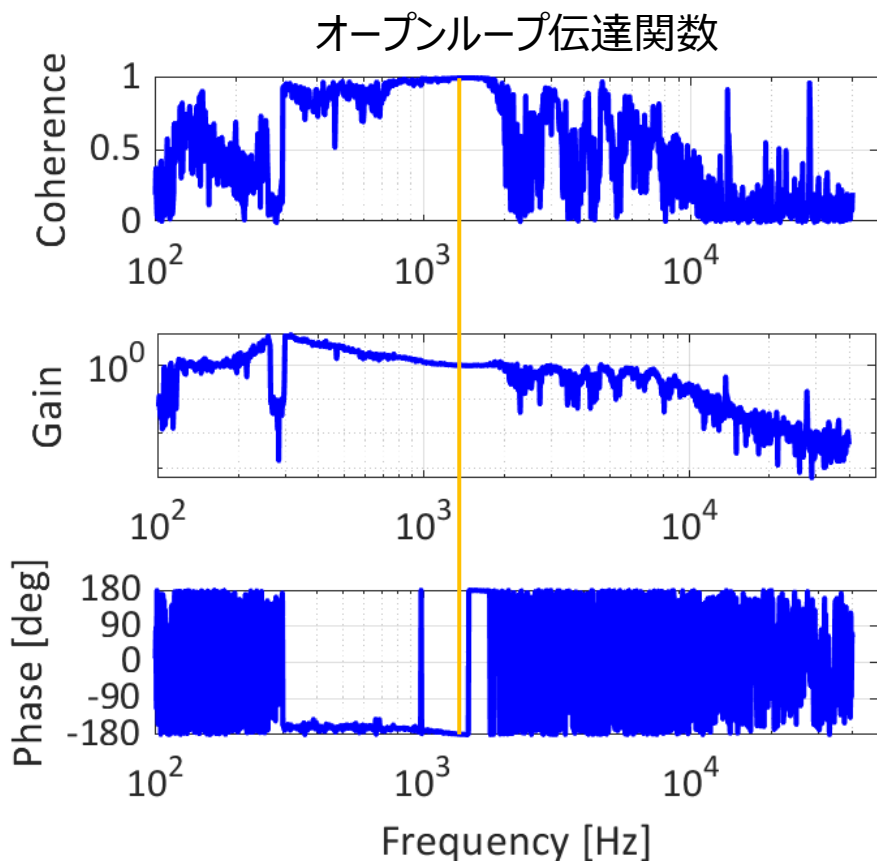
# セットアップの改良

- フロントミラーを2段振り子で懸架
  - 高周波数帯での外乱を小さくする
  - 前後2本吊り → yaw 方向にだけ柔らかく他の信号が出にくい



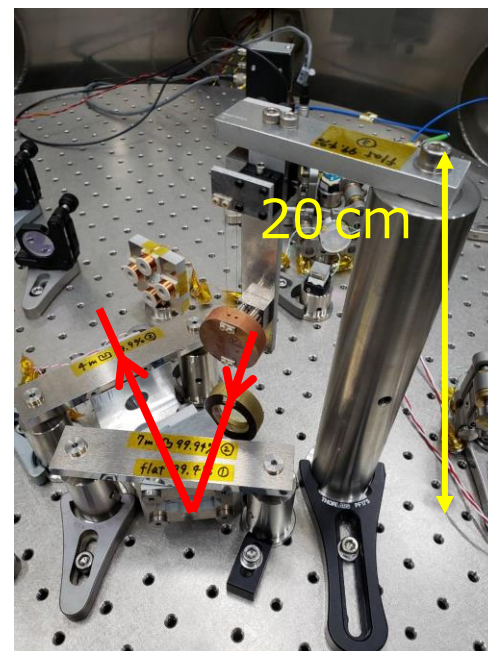
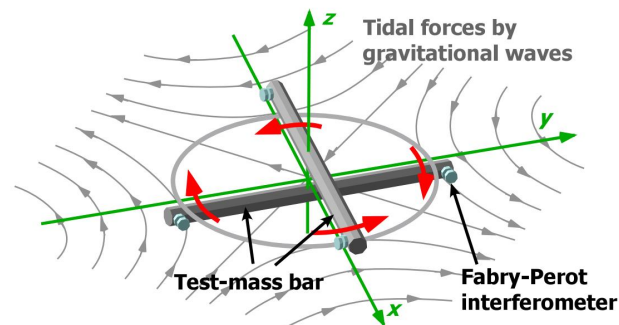
# 振り子共振器の制御

- 制御できたがUGF ( $\sim 1.3$  kHz)での位相余裕が3 degしかなく不安定
  - 48 Hzの共振構造により低周波でのゲインを下げるできない
  - カンチレバー部分にゴムを挟むも除去できず  
→ 共振構造の原因特定・除去が必要



# まとめ・今後の展望

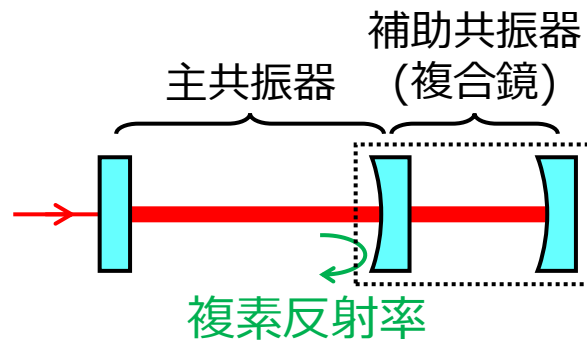
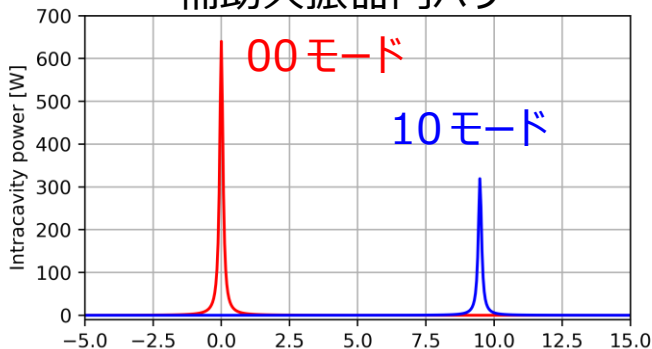
- ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA で  
0.1 Hz 帯の重力波観測を目指している
  - 現在は Phase-III TOBA を開発中
- Coupled WFS の原理実証実験
  - 角度信号増幅とビームジッターへの応答を定量的に評価した
  - PDH 法による制御の安定性に課題
    - テストマスを懸架する構成へ改良中
    - 安定な共振器制御を実現した後  
再び WFS 信号を取得する予定



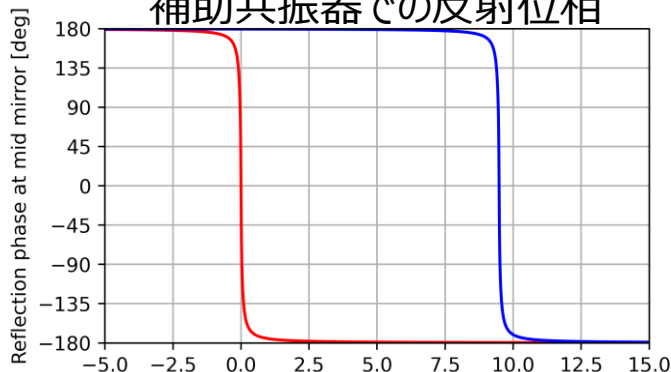
# 予備スライド

# 補助共振器による位相補償

補助共振器内パワー

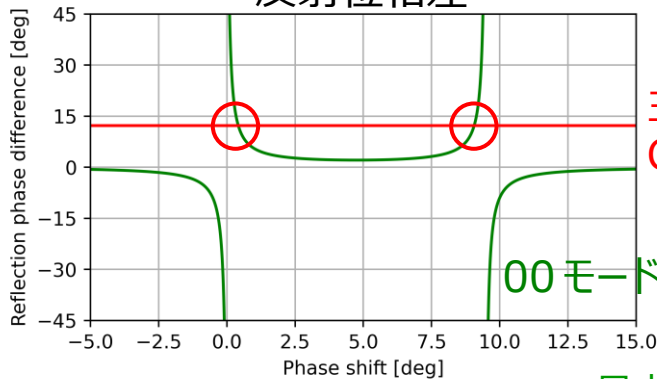


補助共振器での反射位相

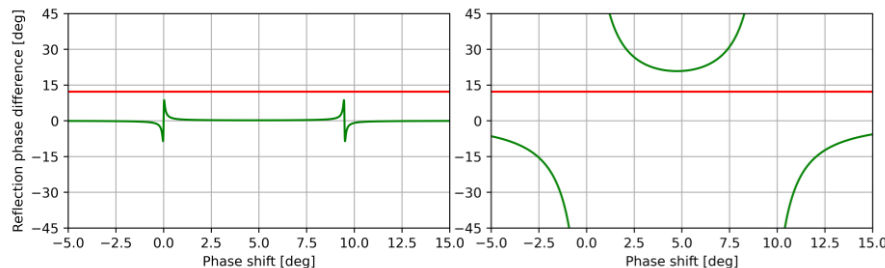


- 補助共振器で反射するときに  
00モードと10モードは異なる位相を受け取る  
→ 主共振器のGouy位相を打ち消せる

反射位相差

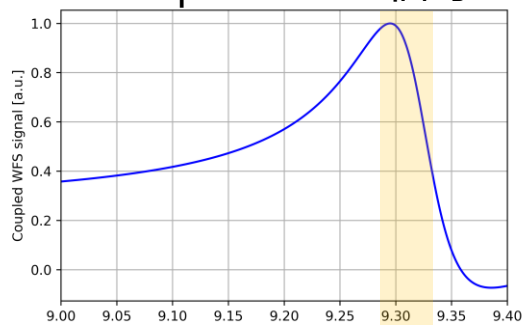


設計によっては位相補償できない

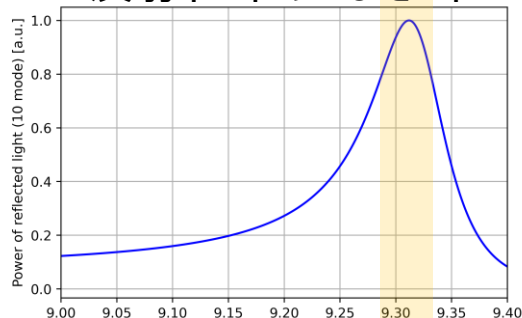


# 補助共振器の制御点

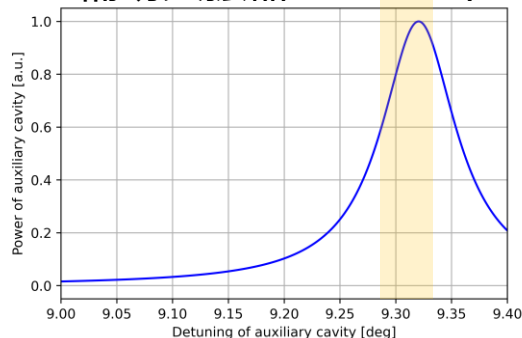
Coupled WFS 信号



反射ポートの10モード



補助共振器の10モード

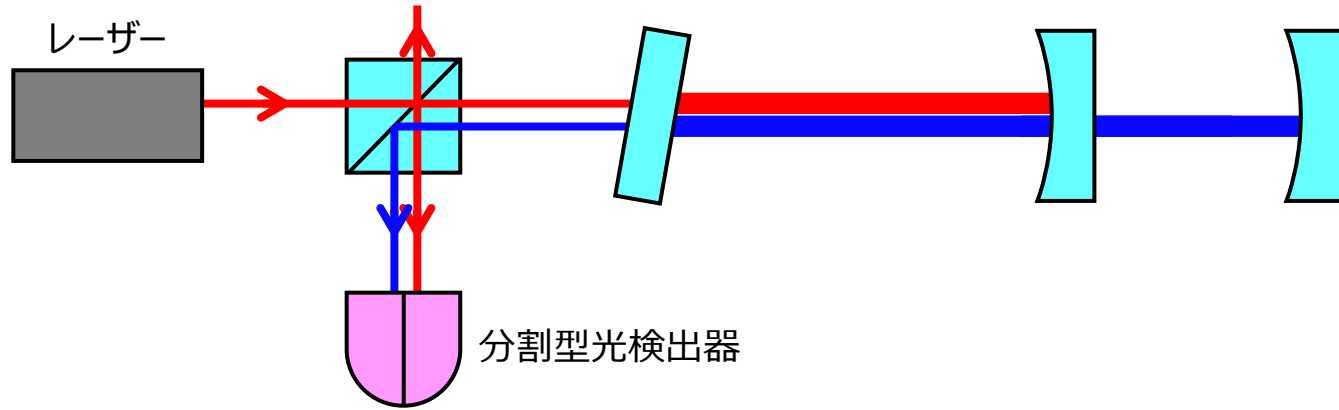


- Coupled WFSの信号増幅が最大になるとき  
反射ポートの10モードも最大  
← 10モードが増幅されている
- Coupled WFSの信号増幅が最大になるとき  
補助共振器の10モードもほぼ最大  
← 共振器のフィネスが大きいため  
位相補償点と共振点がほぼ一致
- 補助共振器は10モード共振点に制御してよい  
← 共振点だと光量がふらつかず安定に動作できる

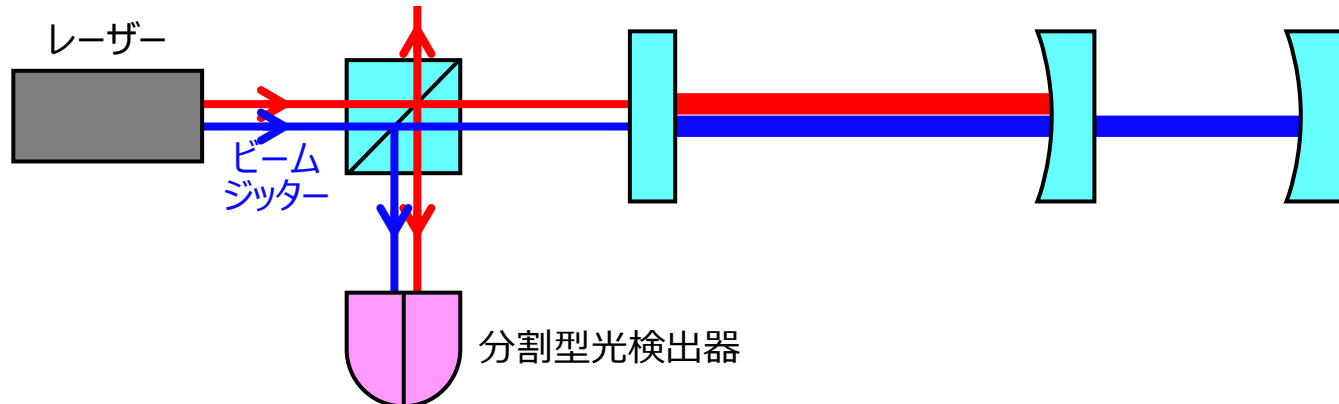


# Coupled WFS のビームジッターへの応答

- 共振器のミスアラインによって内部で生まれた 10 モードは共振器内で増幅されて反射ポートへ出ていく



- ビームジッターに含まれる 10 モードも共振するが  
入射光と反射光に含まれる量は変わらない (増幅されない)  
→ ビームジッター雑音に対して信号雑音比が良い

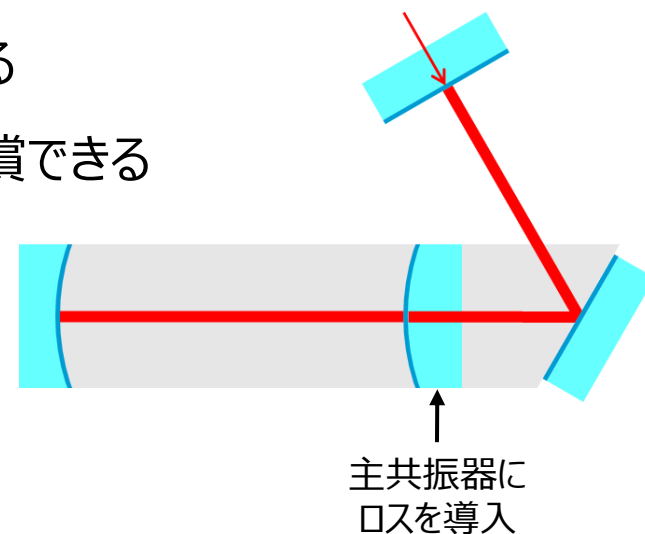


# 共振器の性能評価

	物理量	設計値※	測定値
主共振器	フィネス	225 - 667	200 ± 20
	Gouy 位相 [deg]	12.1 - 12.3	12.1 ± 1.0
	モードマッチ率 [%]	-	87 ± 2
補助共振器	フィネス	$(3.14 - 5.23) \times 10^3$	$(4.1 \pm 0.2) \times 10^3$
	Gouy 位相 [deg]	9.25 - 9.71	9.54 ± 0.04
	モードマッチ率 [%]	-	94 ± 2

※ Layertec 社のスペック値から計算した

- 補助共振器のフィネスが設計値と矛盾しない  
→ 補助共振器内のロスが小さく位相補償できる
- Gouy 位相が設計値と矛盾しない → 位相補償できる
- 主共振器のフィネスが設計値より小さい  
→ AR コーティング・基材のロスが原因
- モードマッチ率は十分大きい

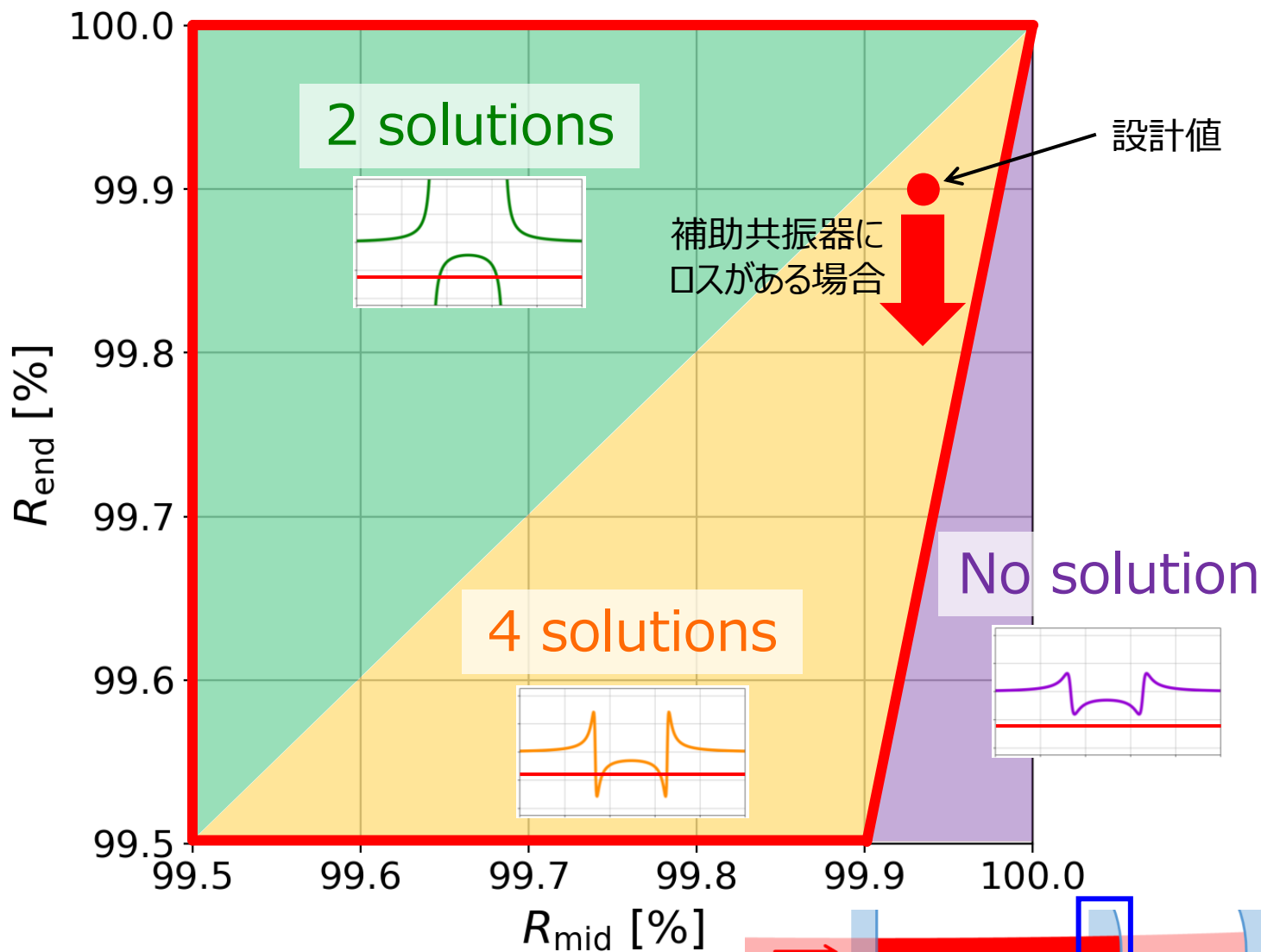


# 位相補償と補助共振器内ロス

ビーム半径: 500  $\mu\text{m}$

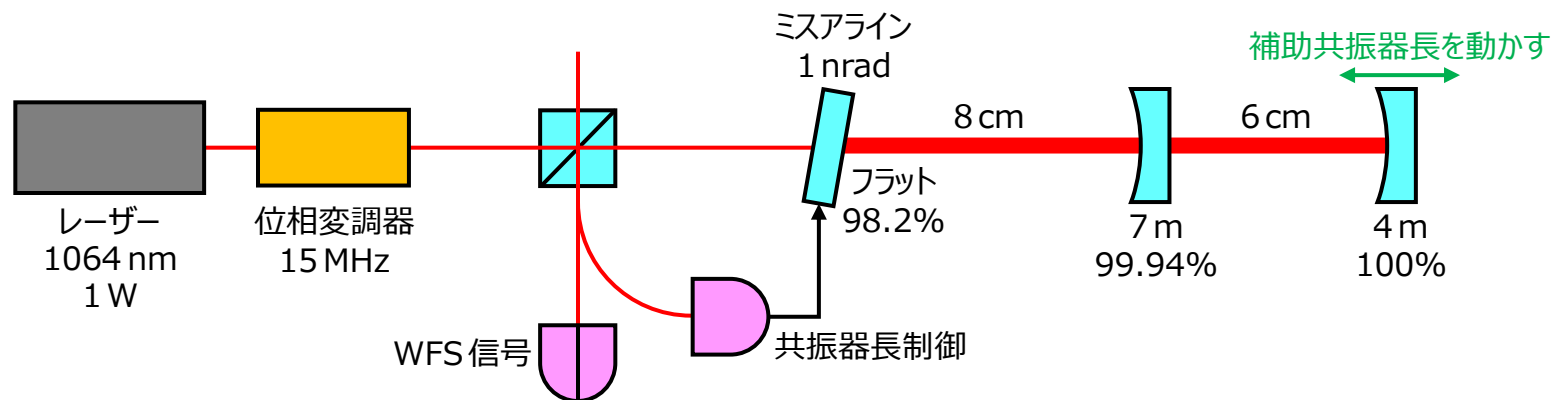
主: 8 cm

補助: 6 cm



# Coupled WFSの信号増幅の計算

- Coupled WFSの構成は複雑 → シミュレーションソフト FINESSE を使用



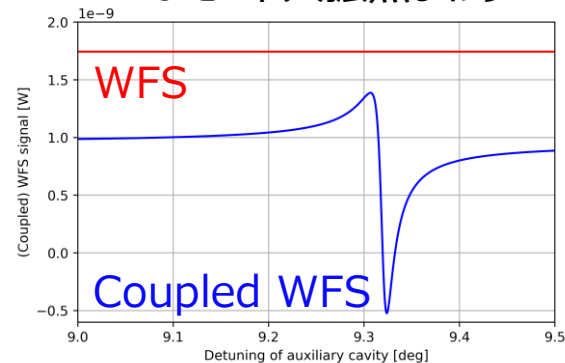
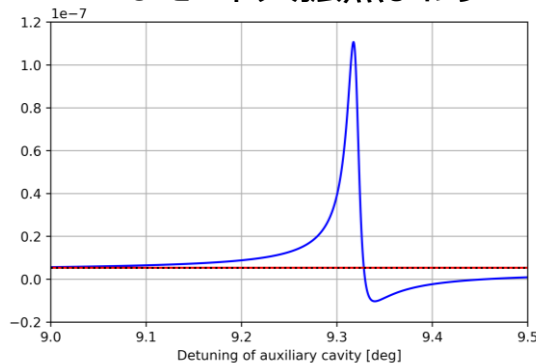
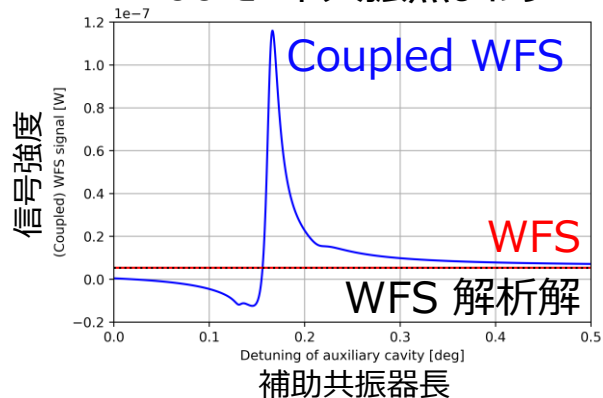
- 補助共振器の00モードと10モードの共振点まわりでWFSに比べて信号増幅

- 入射光にビームジッターを混ぜた → 信号増幅しない

00モード共振点まわり

10モード共振点まわり

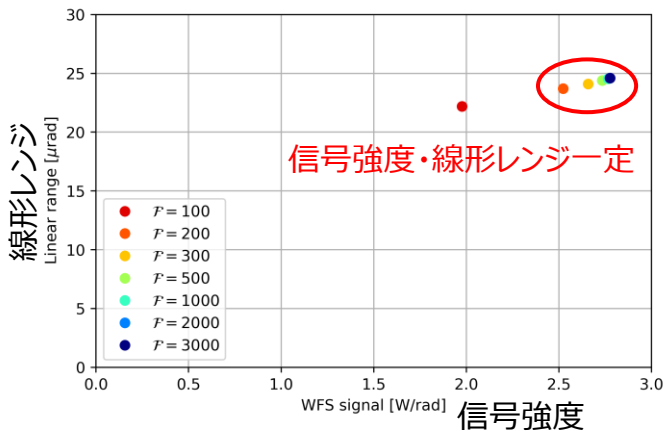
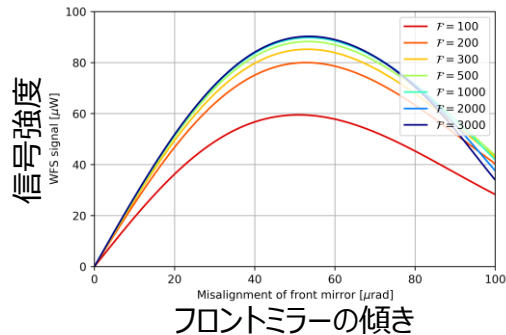
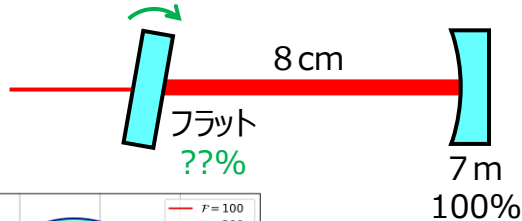
10モード共振点まわり



# WFS・Coupled WFSの線形レンジ

## WFS

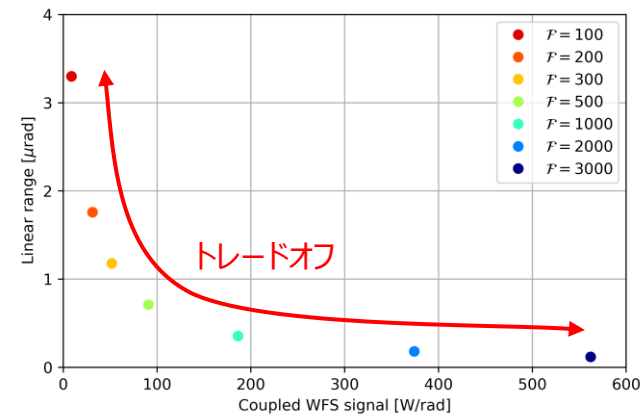
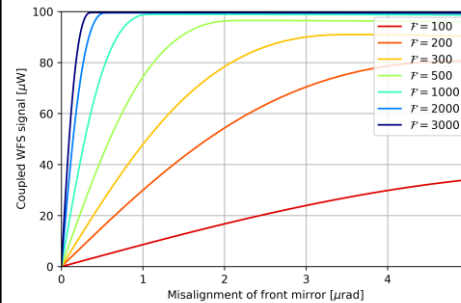
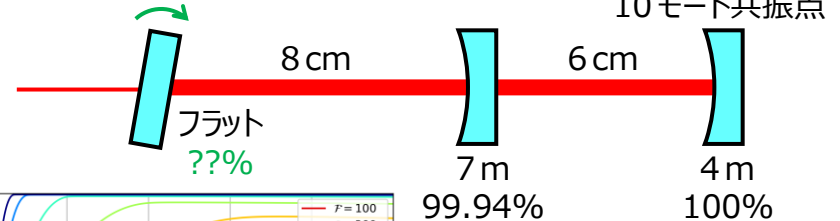
ミスアライン量を増やす



- 信号強度と線形レンジは  
フィネスに依存しない

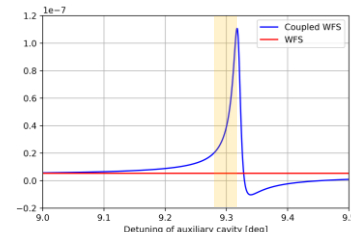
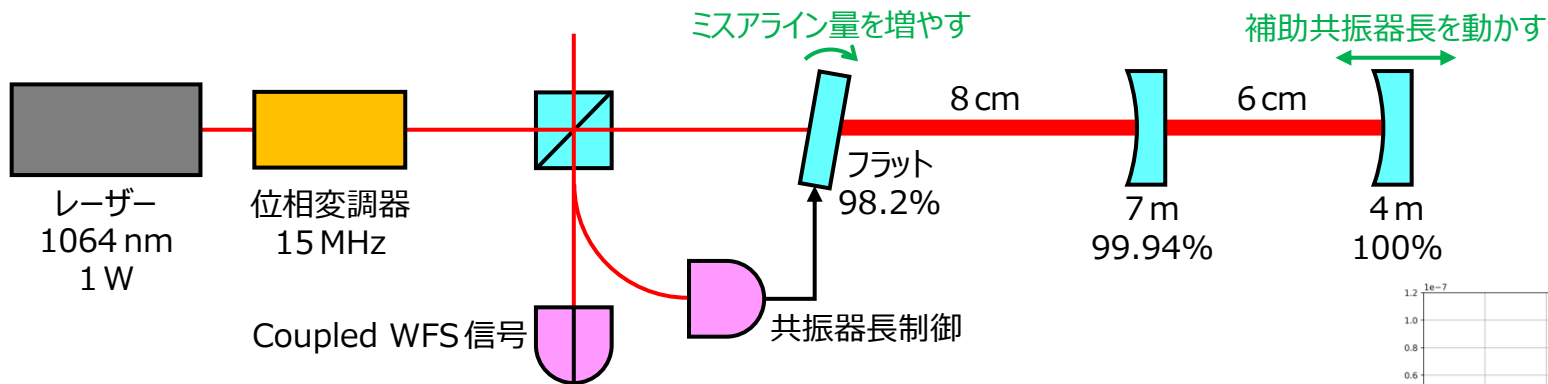
## Coupled WFS

ミスアライン量を増やす

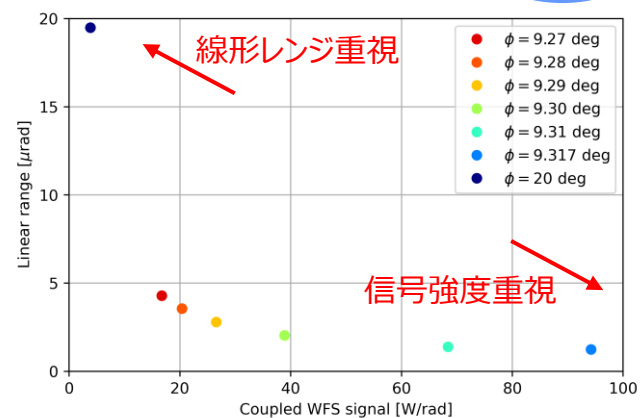
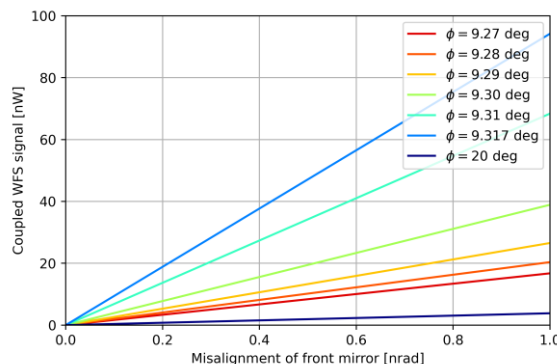
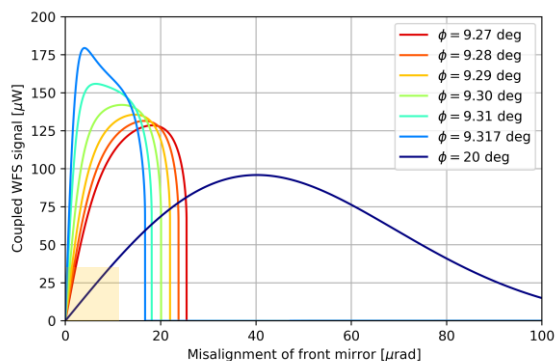


- フィネスが大きいほど信号強度が大きい
- フィネスが大きいほど線形レンジが小さい

# Coupled WFSの制御点



- 補助共振器の制御点を変えることで  
Coupled WFSの信号強度と線形レンジを選ぶことができる  
→ 1つの装置で様々な応答を示すセンサとして便利

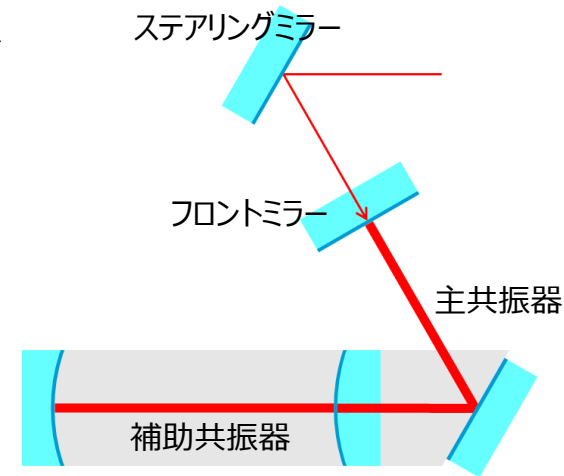


追加

# 考察：共振器の固有モードのカップリング

## ● 現在の問題点

- フロントミラーを置いた後は補助共振器のアラインメントを調整していない
  - 2つの共振器の固有モードのカップリングが悪く  
補助共振器の10モードの光量が多い
  - 主共振器内の光量が減少するため  
補助共振器の共振点に制御できない
  - 共振点から少しずれた点に制御がかかり  
透過光量が1次でふらついている



## ● 解決方法

- ステアリングミラーとフロントミラーのアラインメントを調整して共振器の固有モードのカップリングを改善
  - 補助共振器の10モードの光量を減らす
- ただしPDH信号が小さくなるので制御のゲインを大きくする必要がある

