

重力波検出器KAGRAのための 量子雑音低減法の開発(6)

東大宇宙線研, 東大工^A

長野晃士、榎本雄太郎、酒井譲、

中野雅之、古澤明^A、川村静児

Core-to-Core Program



イントロダクション

- 我々は、世界初の広い帯域で輻射圧雑音に制限された観測と、ポンデロモーティブスクイーミングとホモダイン検波を用いたその低減技術の実証を目指した実験を行っている。
- 輻射圧雑音に制限された測定を実現するためには、高フィネスの共振器を使って実効的に非常に大きなレーザー強度を得る必要がある。
- 我々は、23 mgという軽量な懸架鏡を使って、輻射圧雑音をさらに増幅することで、輻射圧雑音の観測を目指している。

イントロダクション

阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。

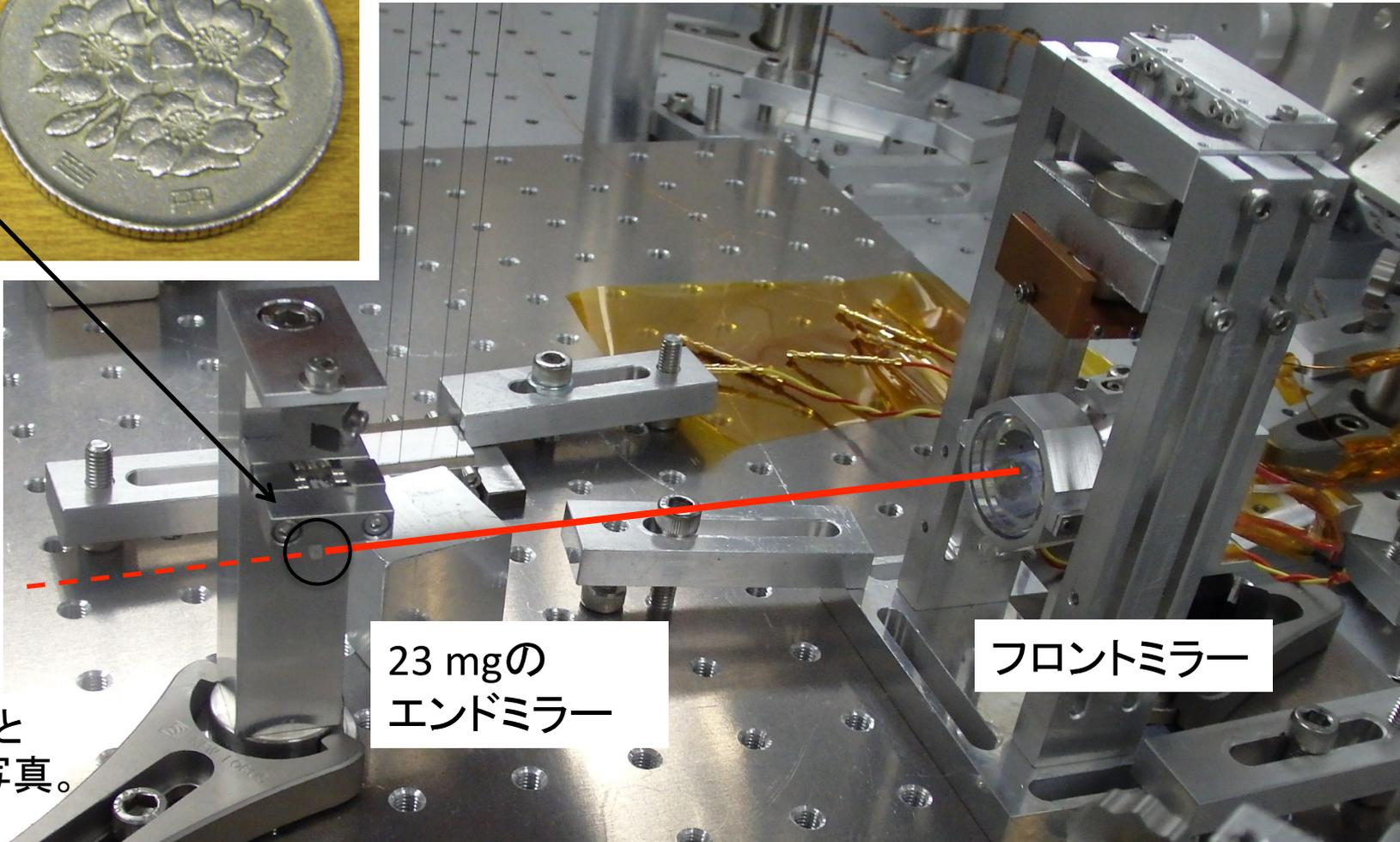


図: 共振器と
軽量鏡の写真。

イントロダクション

輻射圧雑音の観測、及びその低減のための課題

- 共振器内パワーの増幅 (=輻射圧雑音の増幅)
 - 共振器の高フィネス化
 - 共振器内パワーの増幅に伴う回転方向不安定性の回避
- その他の雑音の低減
 - 地面振動雑音
 - レーザー強度雑音
 - 古典輻射圧雑音
 - レーザー周波数雑音
 - 熱雑音
 - その他の雑音
- 輻射圧雑音の低減
 - 実験系の光学損失の低減
 - ホモダイン検出器の導入

イントロダクション

輻射圧雑音の観測、及びその低減のための課題

- 共振器内パワーの増幅 (=輻射圧雑音の増幅)

- 共振器の高フィネス化 ◎?

- 共振器内パワーの増幅に伴う回転方向不安定性の回避 ◎

- その他の雑音の低減

- 地面振動雑音 ◎

- レーザー強度雑音) ← 酒井くんの発表 [22pSR-13]

- 古典輻射圧雑音)

- **レーザー周波数雑音 ← 私の発表**

- 熱雑音 △

- その他の雑音 △

- 輻射圧雑音の低減

- 実験系の光学損失の低減 ×

- ホモダイン検出器の導入 ×

cf) K. Nagano *et al.* Submitted
to Physics Letters A
JGW-P1605264-v1

イントロダクション

- これまでの共振器の感度はターゲット周波数帯 (~300 Hz) でレーザー周波数雑音によって支配されていた。
→周波数安定化が必要。
(要求値: 5×10^{-3} Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 300 Hz)

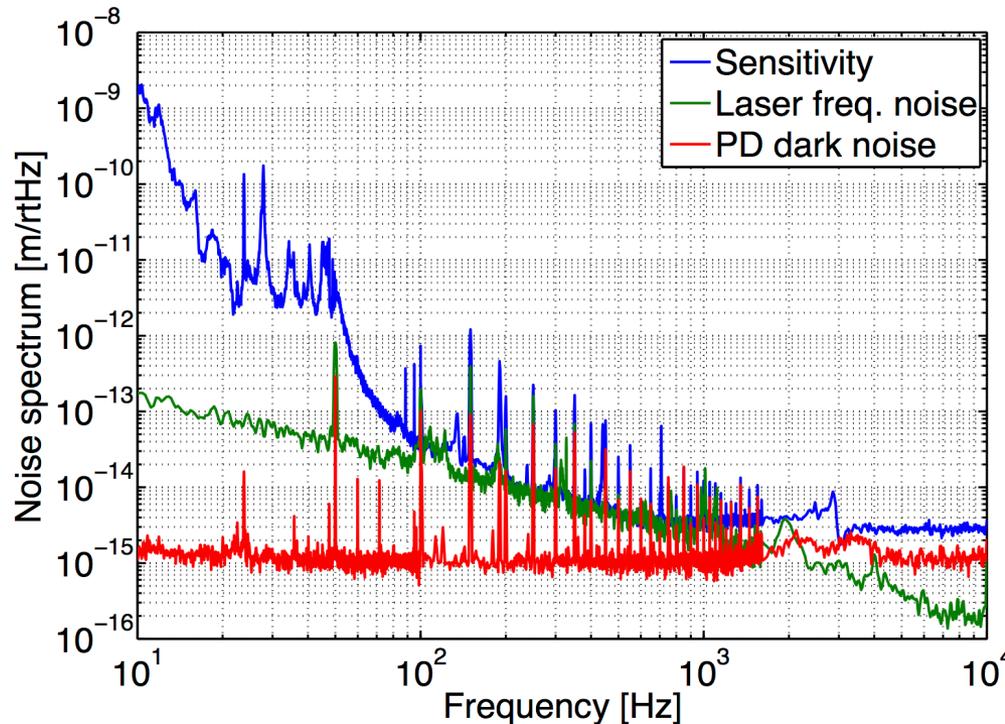


図:これまでの共振器の感度。

周波数安定化

- レーザー共振器より安定な参照共振器に対してレーザー周波数を追従させることで安定化する。
- 制御には、
 - レーザー光源のピエゾ素子 (PZT)
 - 電気光学変調器 (EOM)
 - (レーザー光源の温度制御 (Thermal control))
をアクチュエータとして用いる。

周波数安定化

- レーザー共振器より安定な参照共振器に対してレーザー周波数を追従させることで安定化する。
- 制御には、
 - レーザー光源のピエゾ素子 (PZT) ← 1 Hz – 10kHz
 - 電気光学変調器 (EOM) ← 10k – 数100k Hz
 - (レーザー光源の温度制御 (Thermal control)) ← 1 Hz
をアクチュエータとして用いる。 以下

参照共振器の特性

スペーサー

- 材質: 溶融石英
- 共振器長: 27 cm
- 直径: 7 cm

鏡

- 材質: 溶融石英
- 厚さ: 6.5 mm
- 直径: 20 mm
- フィネス: 30000 (測定値)
- 曲率半径: (フロント) ∞ 、(エンド) 1 m

その他

- 圧力: 1 Pa以下 (現在は大気圧)
- 温度: 300 K
- 防振: 共振周波数1 Hzの振り子 (現在は定盤に直接設置)

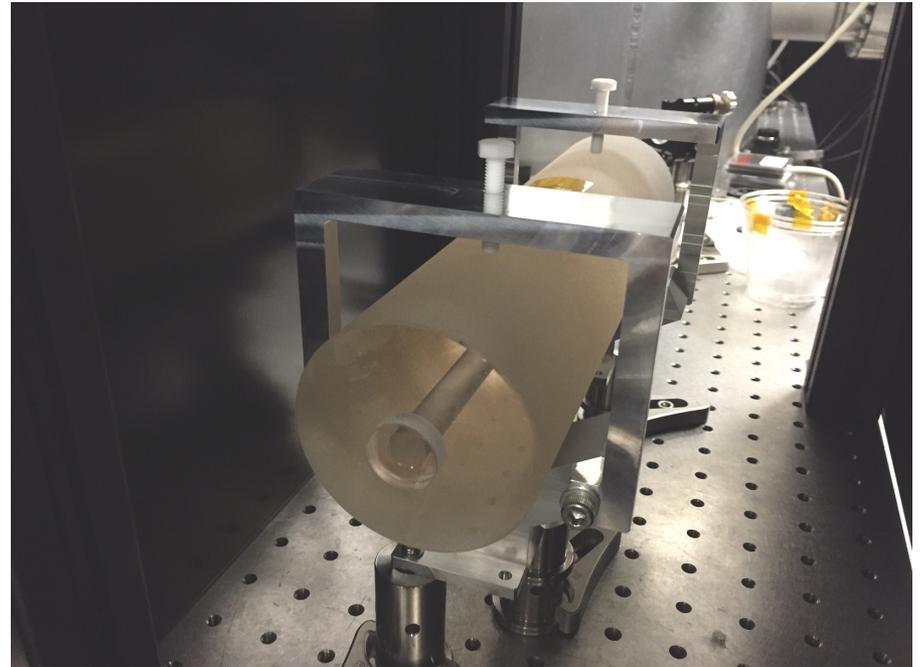


図: 参照共振器の写真。

最終セットアップでの参照共振器の雑音

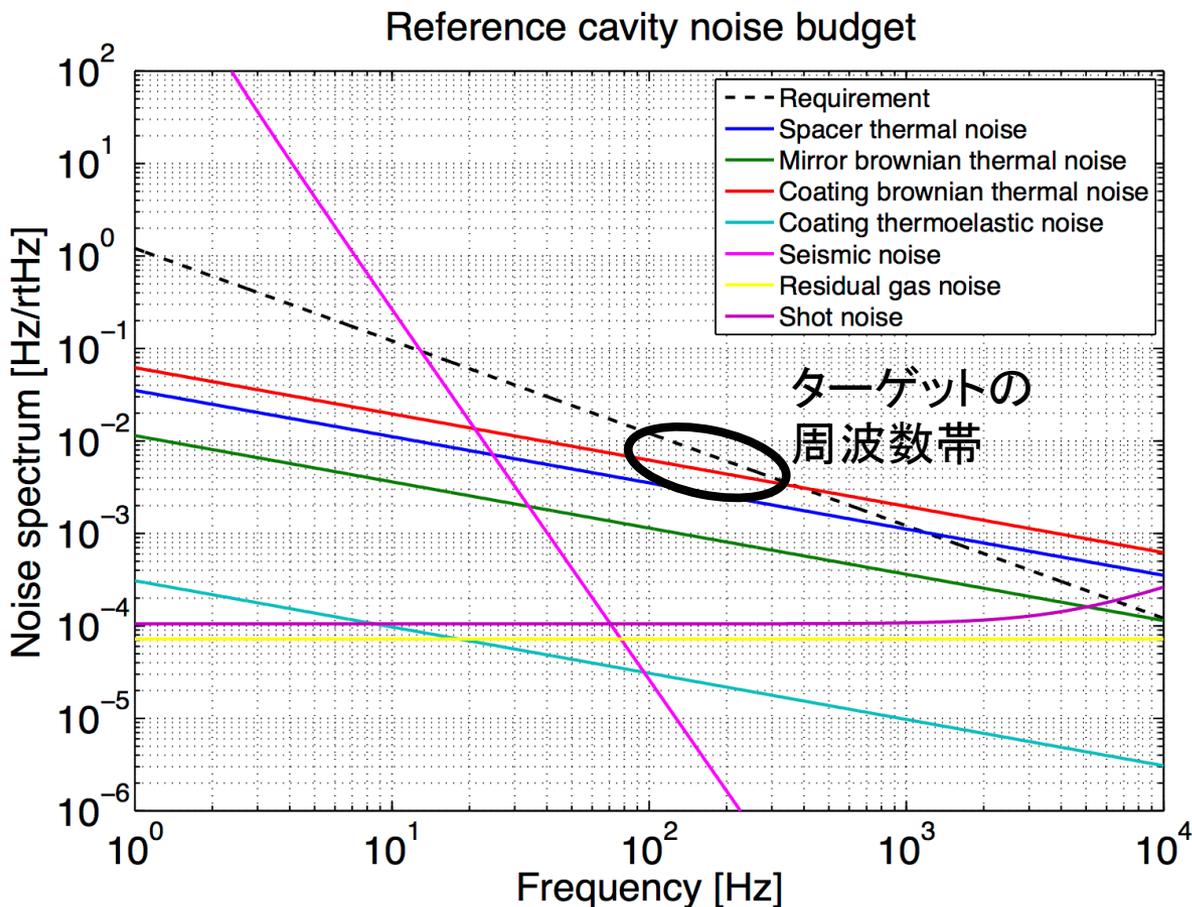


図: 前頁のパラメータを用いて計算した参照共振器の設計感度。

- 100--300 Hzにおいて要求値を満たしている。

実験系

• 実験セットアップ

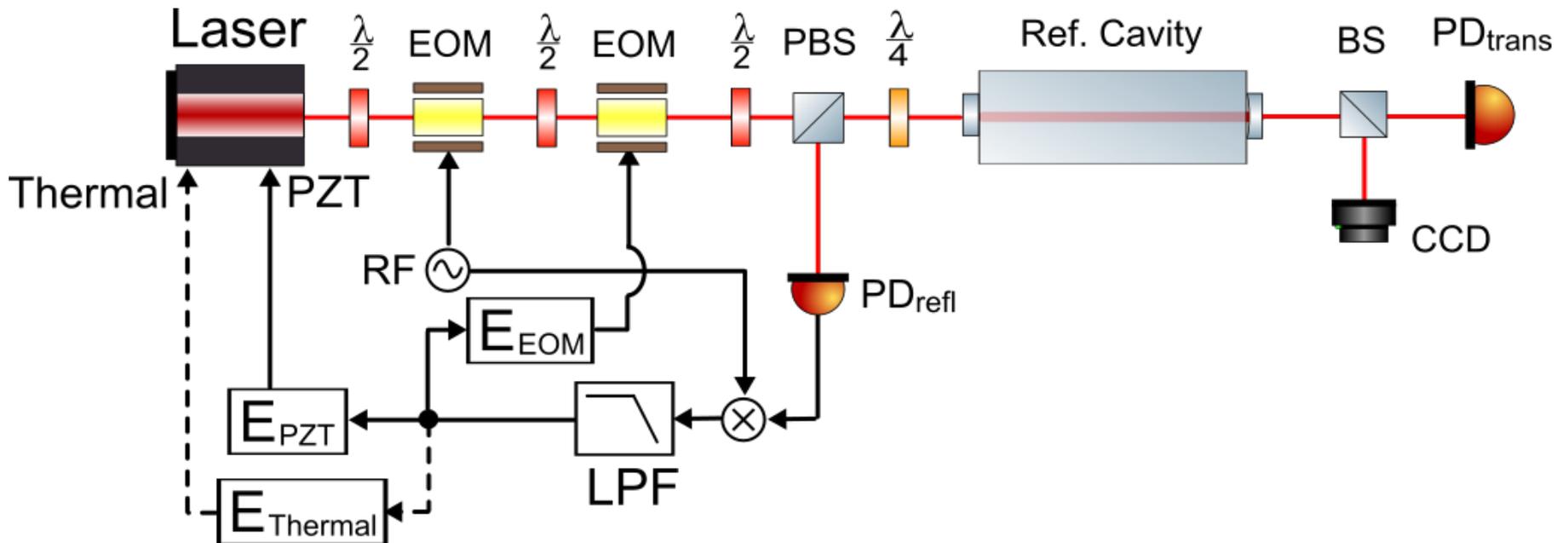
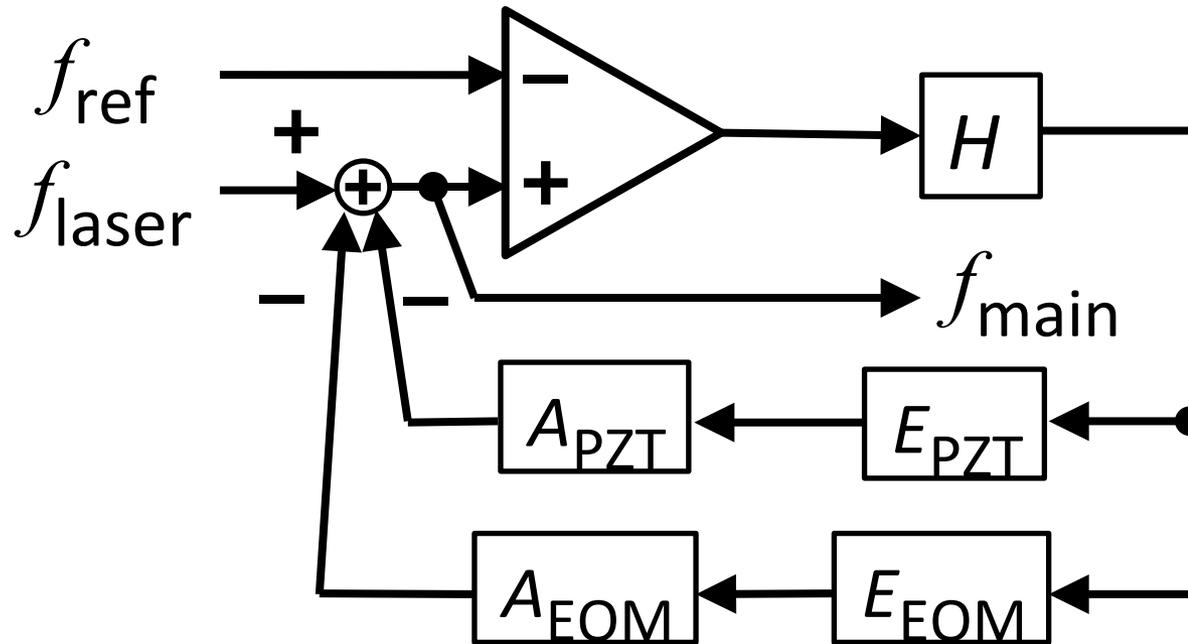


図: 今回の実験で用いたセットアップ。

実験系

• ブロック図



(f_{ref} :参照共振器の周波数、 f_{laser} :元のレーザー周波数、 f_{main} :メイン共振器に入射するレーザー周波数、 H :オプティカルゲイン、 E_x 、 A_x :PZTループとEOMループのフィルターとアクチュエータ効率)

図: 今回の実験で用いたセットアップのブロック図。

実験系

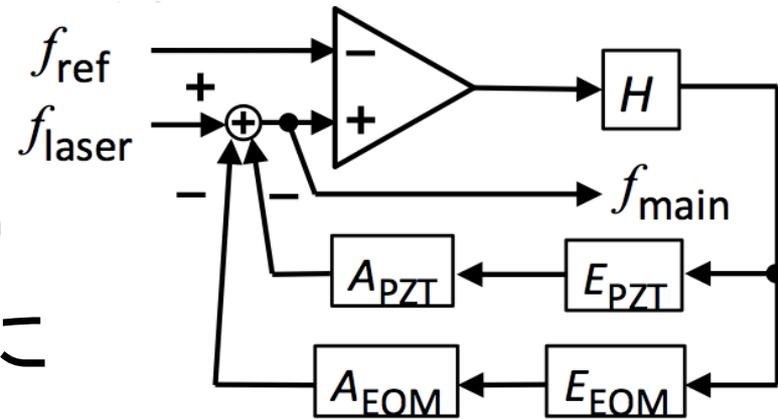
- オープンループゲインを、

$$G \equiv H(E_{\text{PZT}}A_{\text{PZT}} + E_{\text{EOM}}A_{\text{EOM}})$$

と定義すると、メイン共振器に入射するレーザー周波数は、

$$f_{\text{main}} = \frac{1}{1+G}(f_{\text{laser}} + Gf_{\text{ref}}) \rightarrow f_{\text{ref}} \quad (|G| \gg 1)$$

となり、十分ゲインが大きければ、参照共振器の雑音レベルにまで安定化される。



図：セットアップのブロック図。

測定結果

- オープンループゲイン (PZT + EOM)
 - UGF: ~ 100 kHz、位相余裕: ~ 20 度

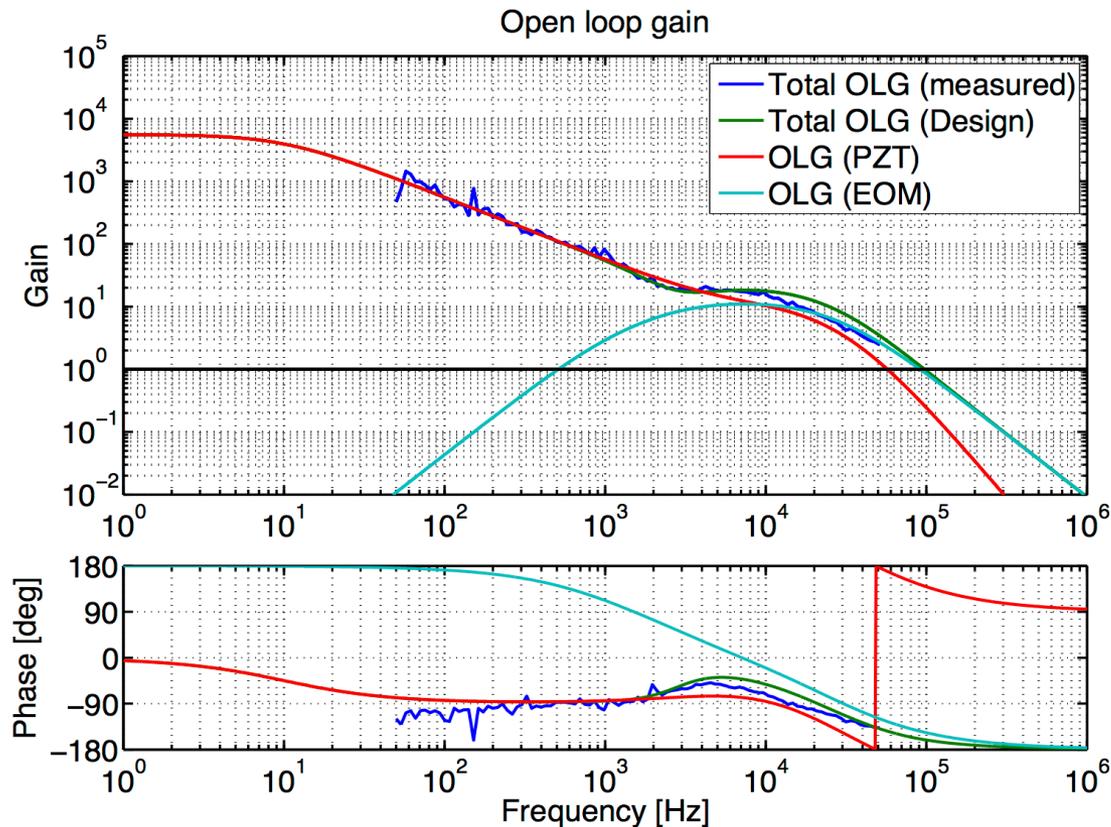
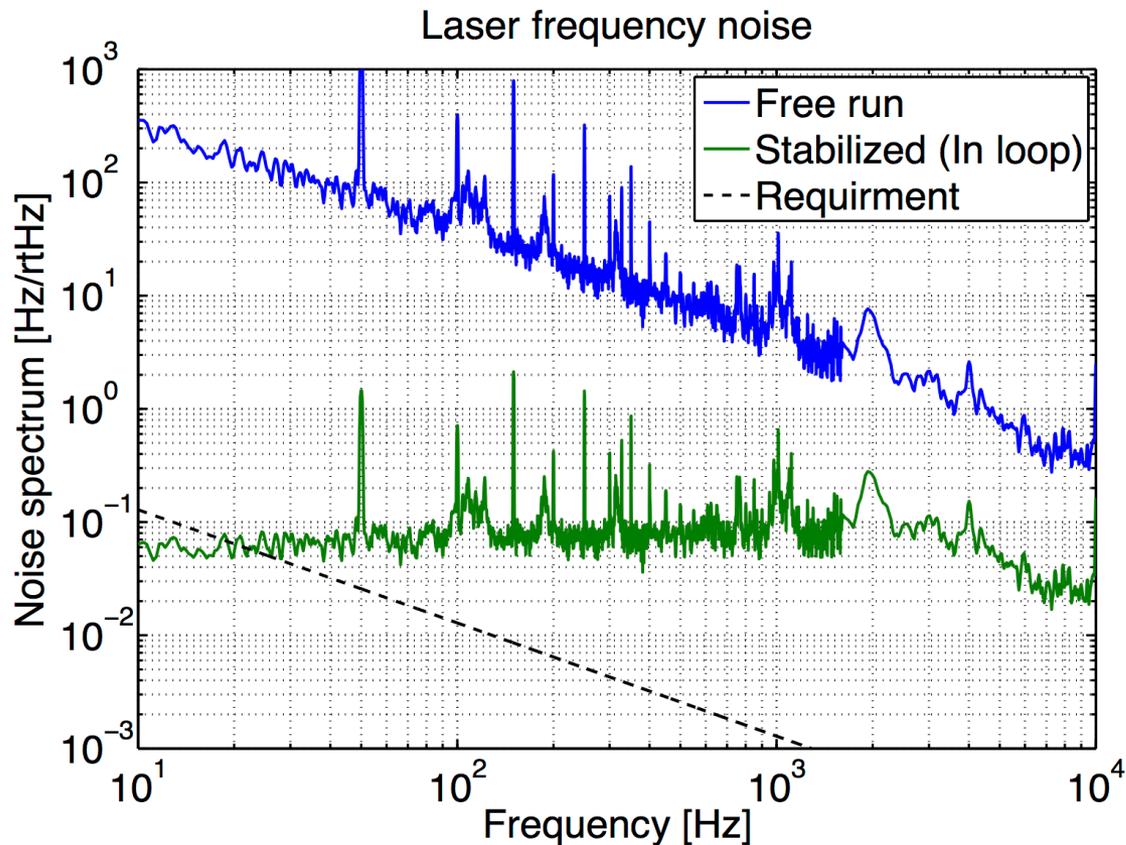


図: 今回の実験の
ループゲイン。

測定結果

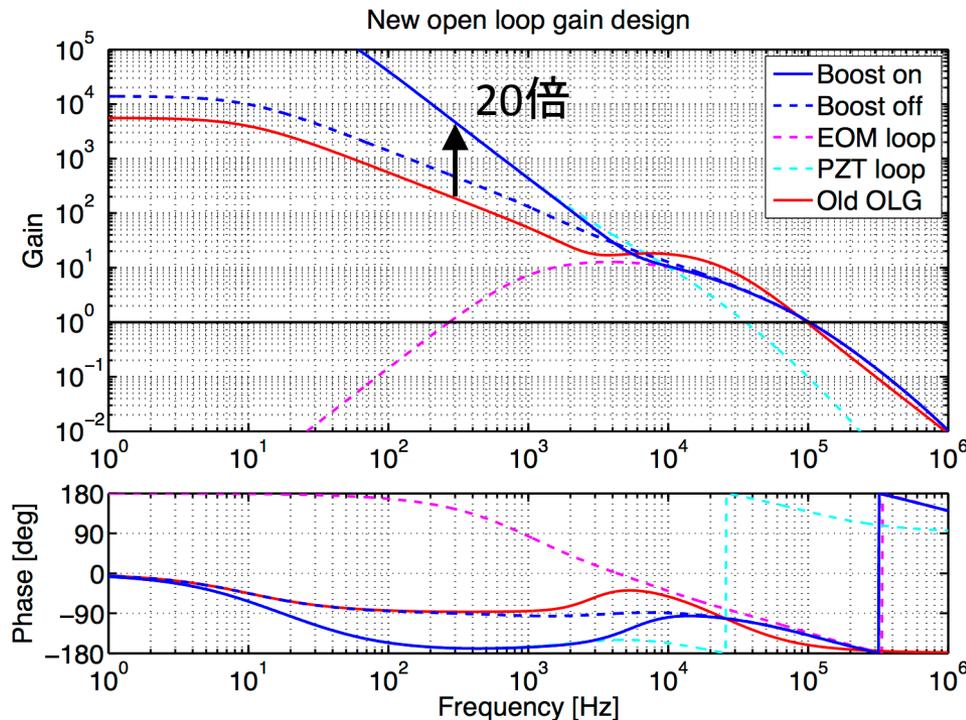
- レーザー周波数雑音スペクトル
 - In-loop評価でも要求値を満たさない。



図：測定されたレーザー周波数雑音とin loopの安定度評価。

考察

- 要求値を満たすためには、300 Hzにおけるゲインをおよそ20倍にする必要がある。
- PZTフィルターにブーストを入れると達成できる。
- 合わせて制御系全体も改良し効率よくゲインを上げる。



図：改良された
ループゲイン。

考察

- フィルターを改良した場合の周波数安定度

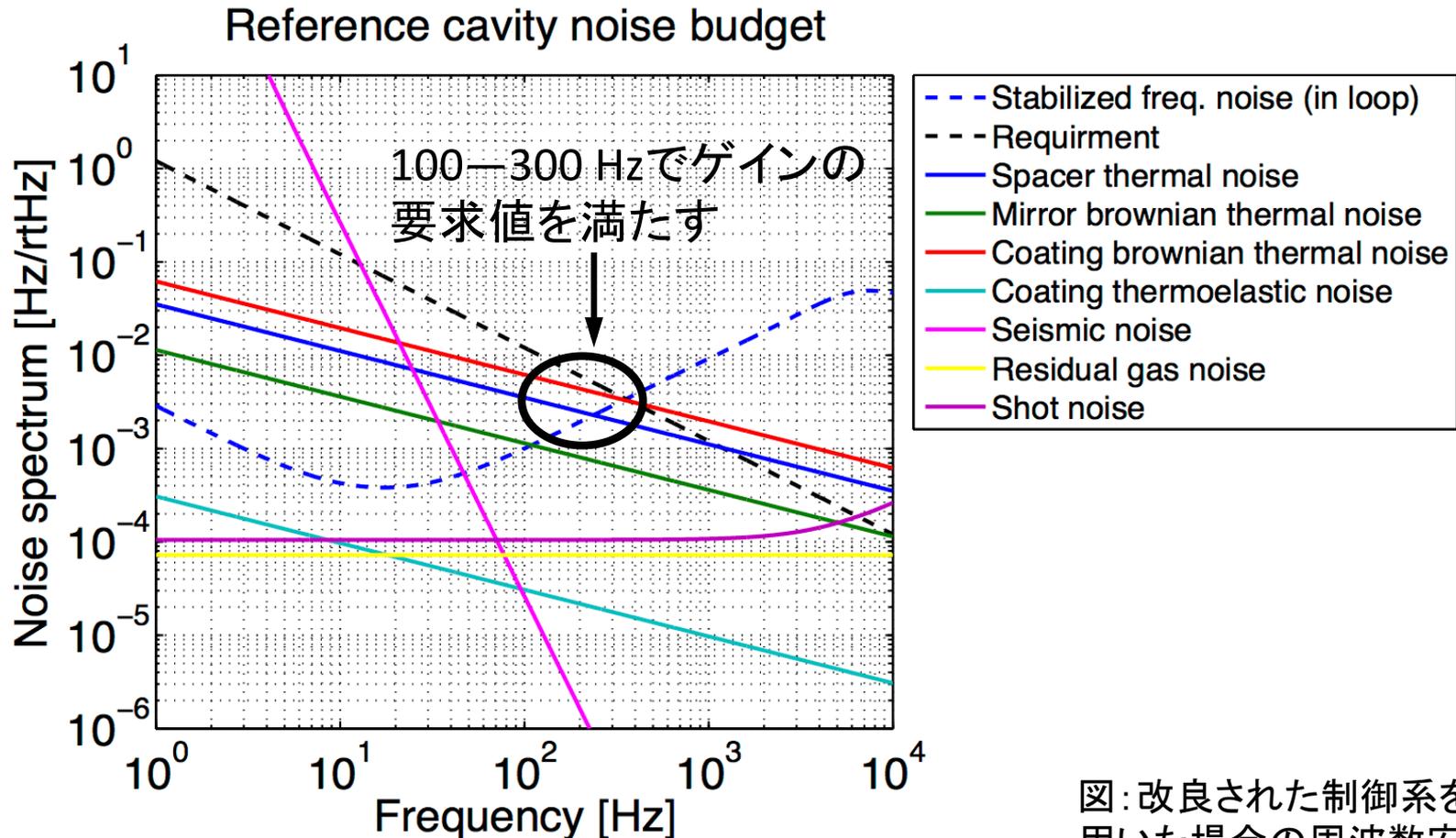


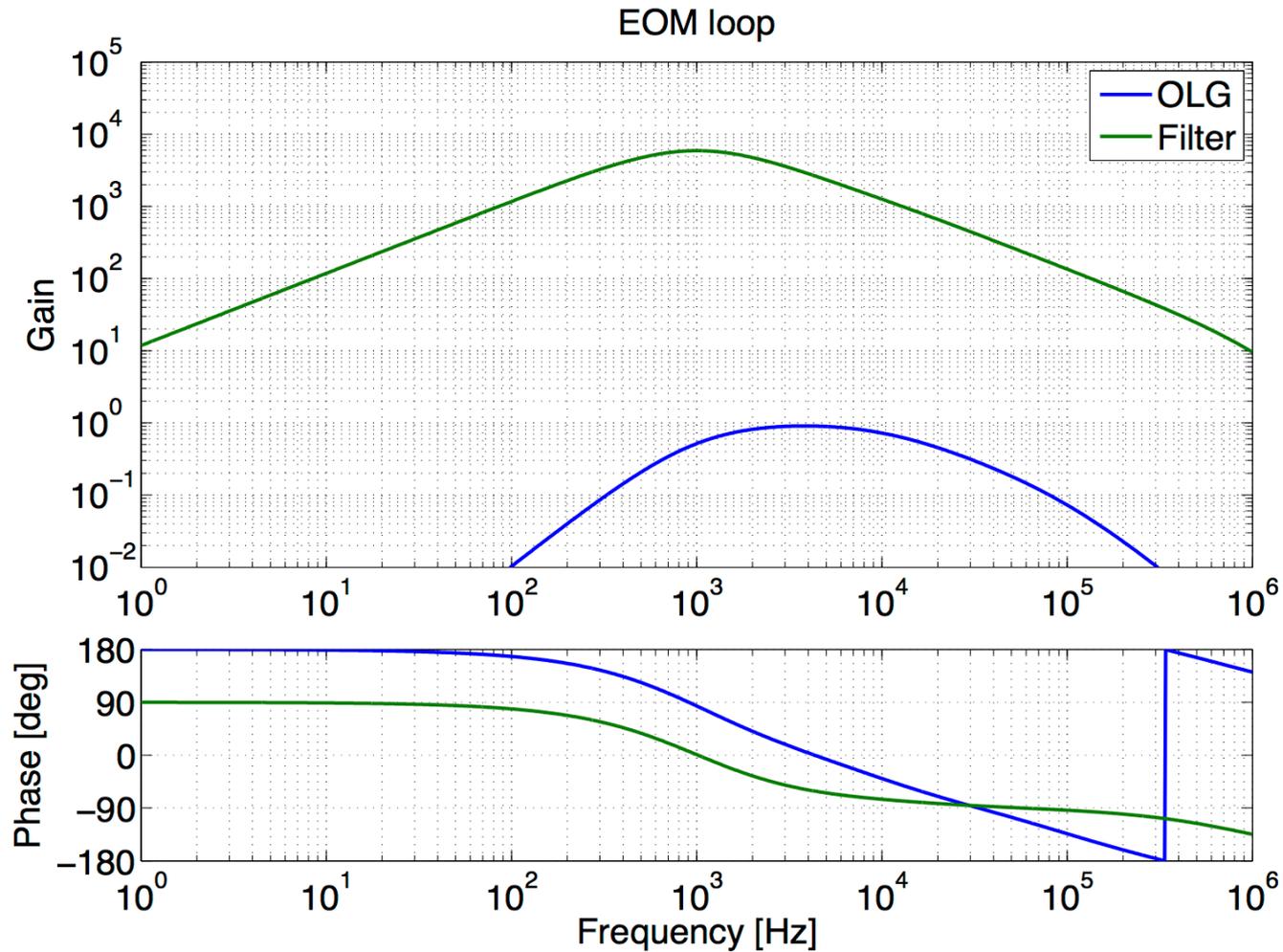
図:改良された制御系を用いた場合の周波数安定度。

今後の展望

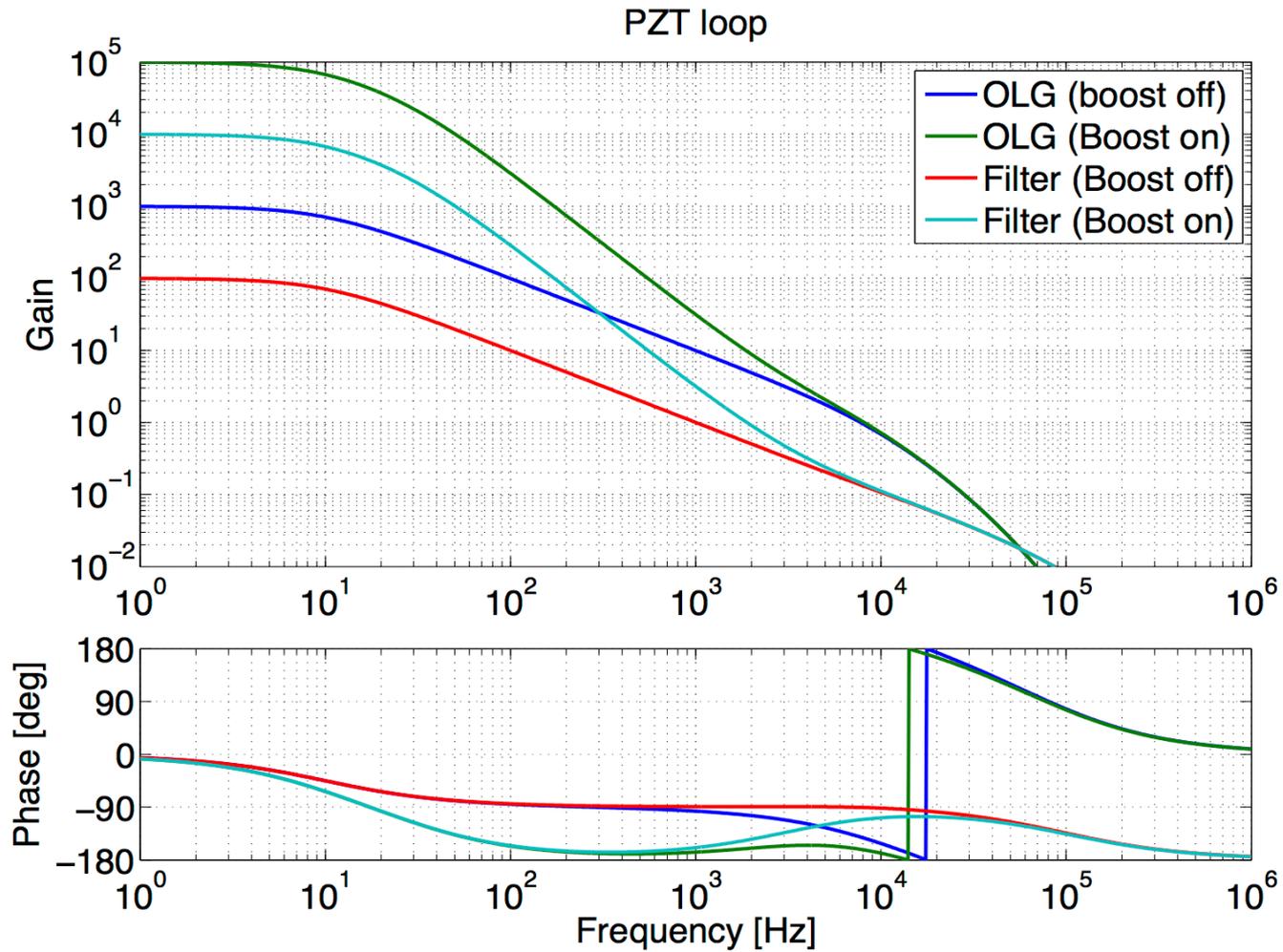
- 真空装置や防振装置を導入し、参照共振器の雑音を低減する。
- フィルターを改良することで制御のゲインを増幅する。
- 合わせてThermal control loopを導入する。
- メイン共振器と同時に運用し、周波数安定度のout of loopの評価を行う。
 - = メイン共振器の周波数雑音を低減する。

予備スライド

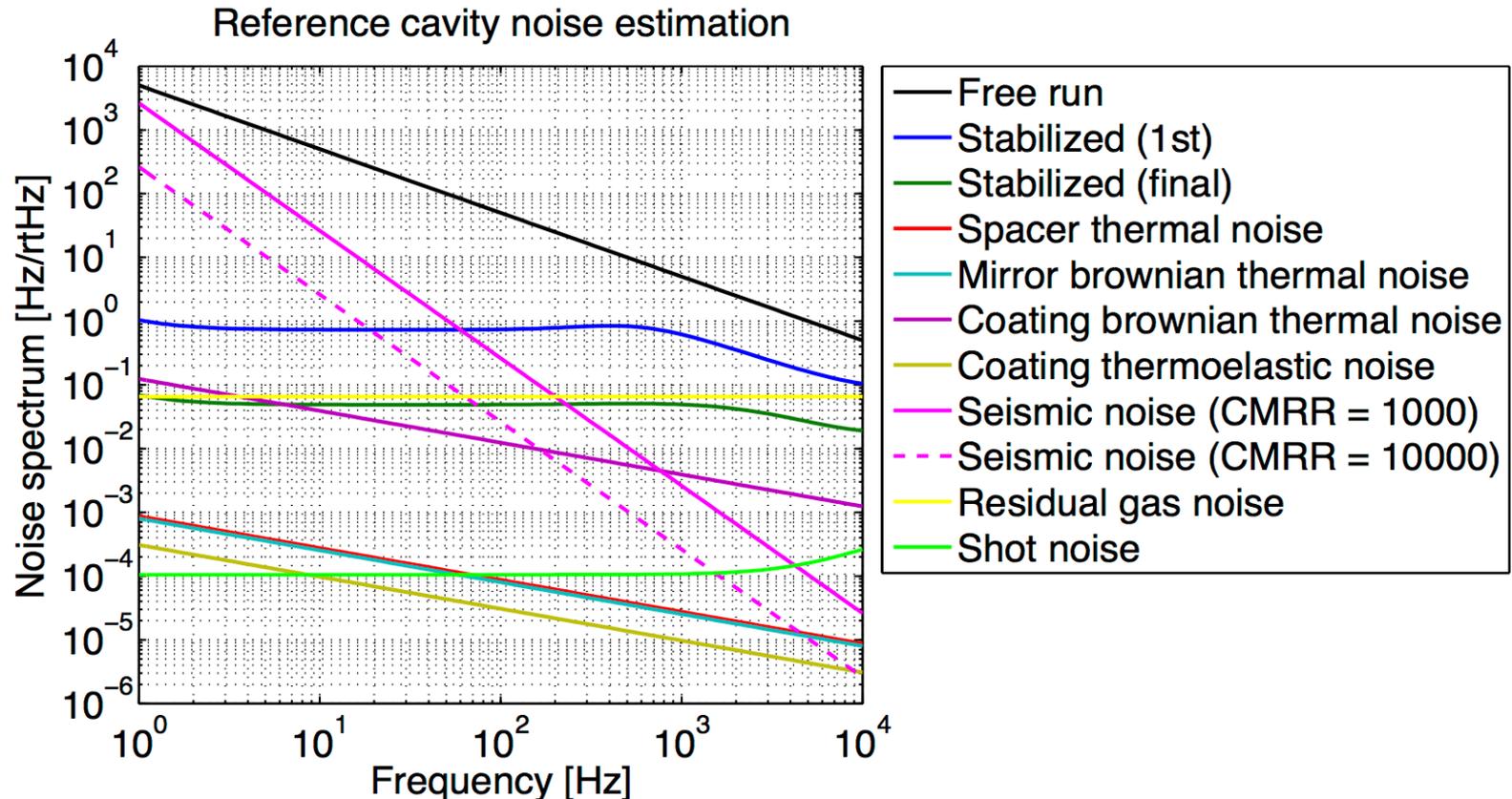
EOMループ



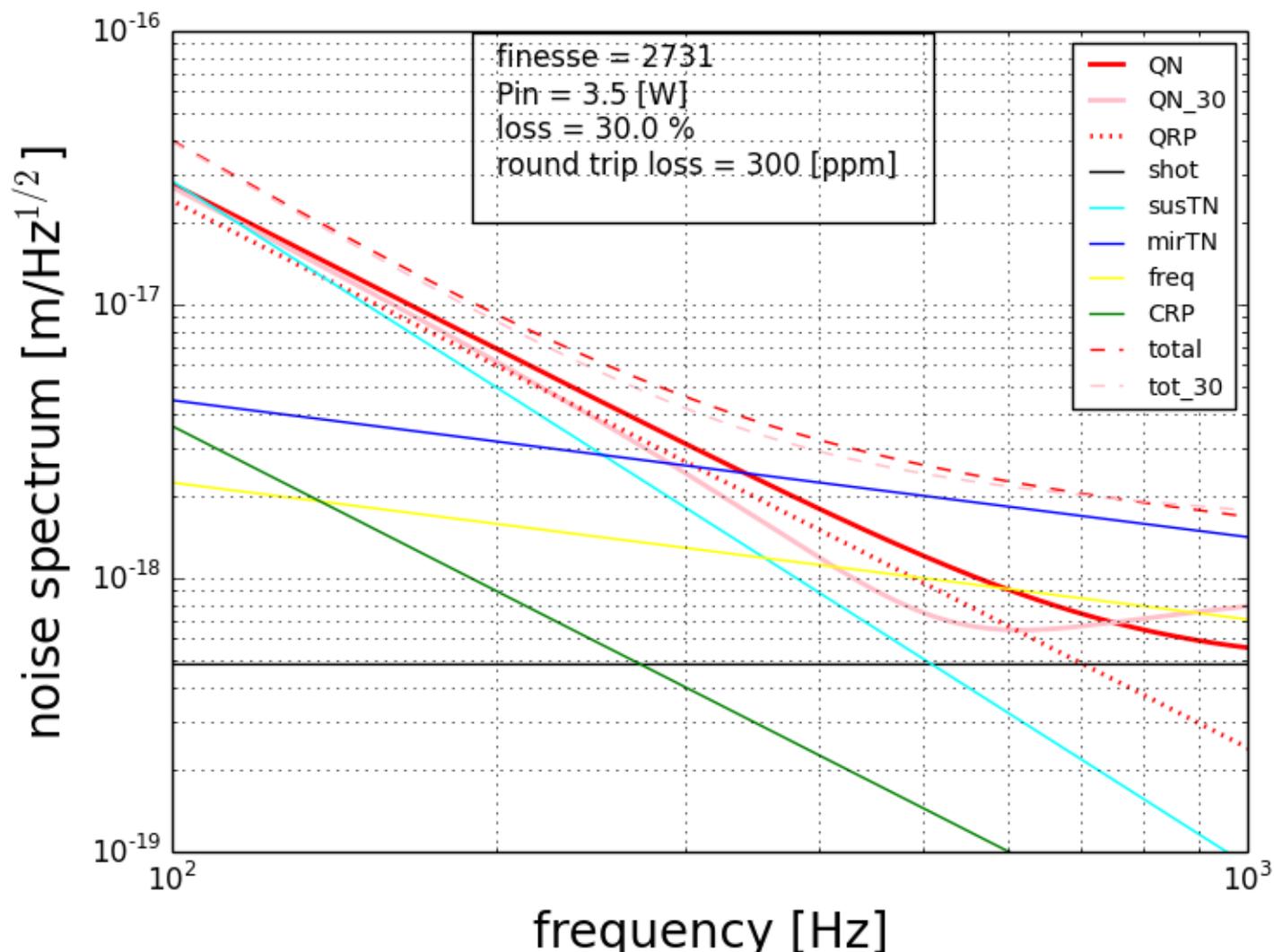
PZTループ



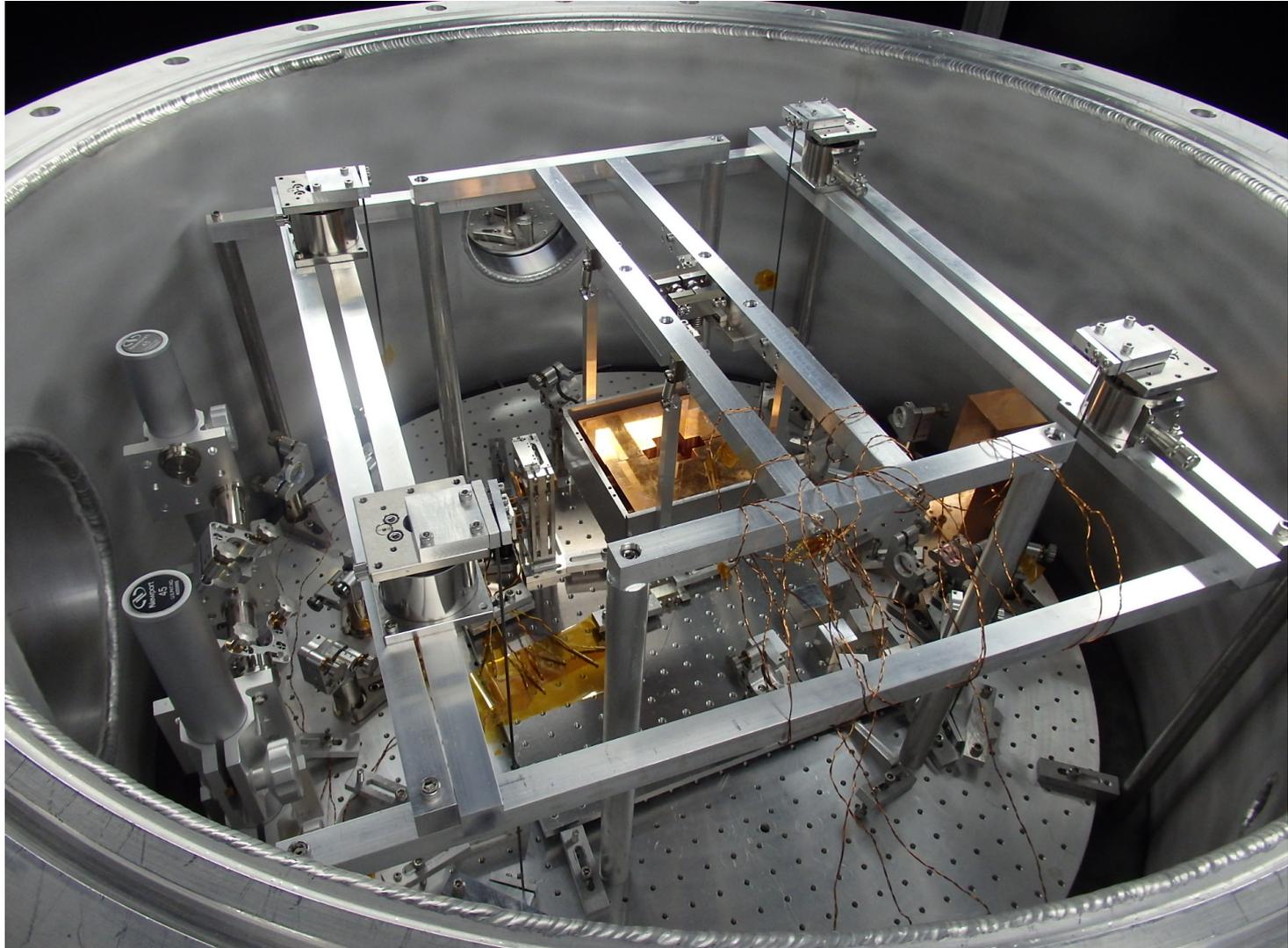
現在のセットアップでの雑音スペクトル



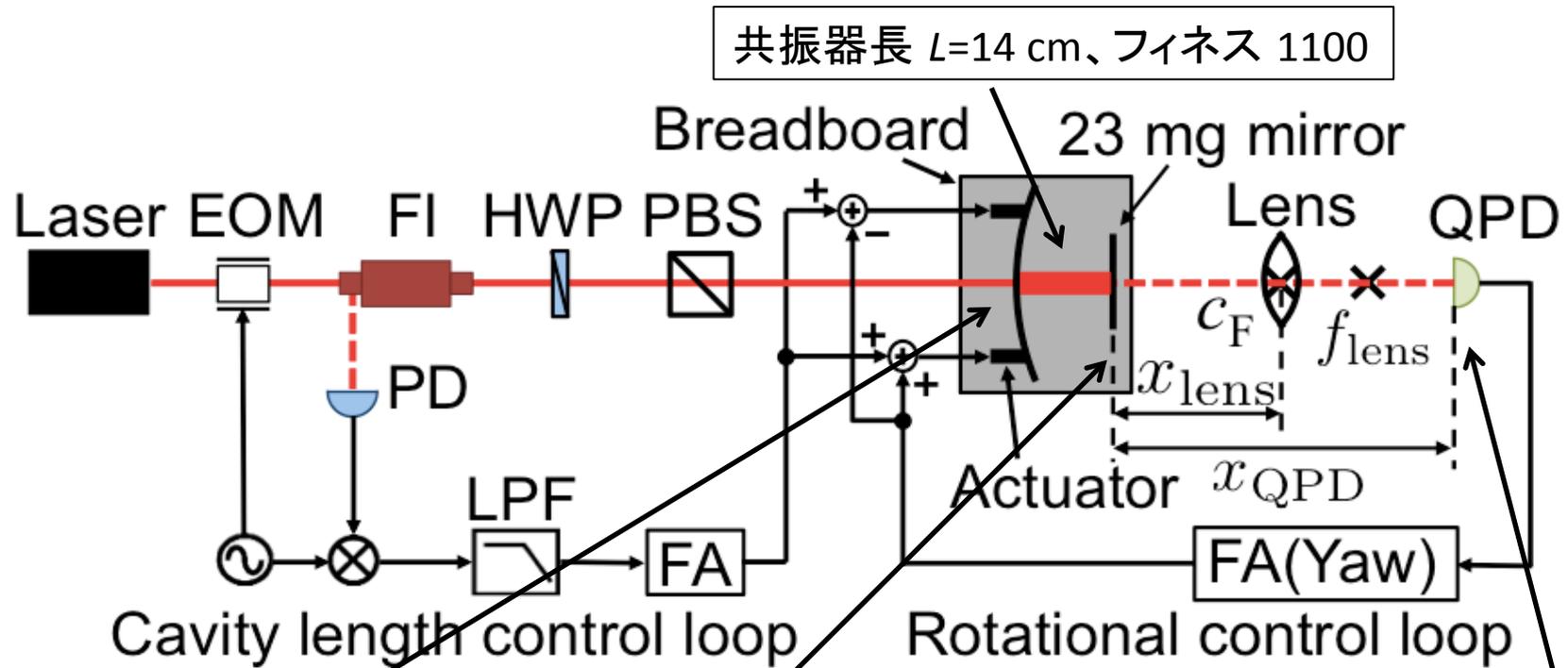
メイン共振器の設計感度



実験系



実験系



フロントミラー

- ・直径: 2.54 cm
- ・曲率半径 R_F : 1 m
- ・質量: 55 g

エンドミラー

- ・直径: 3 mm
- ・曲率半径: ∞ (平面鏡)
- ・質量: **23 mg**

エンドミラー上での
ビームスポットのずれを
測定している。