

宇宙重力波検出器用レーザー光源の 光ファイバーを用いた安定化

高橋 走, 安東 正樹, 坪野 公夫
東京大学 理学系研究科 物理学専攻

概要

目的: DECIGO用光源の安定化方法をテストする

● DECIGOの光源に求められる性能は

● 強度ノイズ
 $1 \times 10^{-8} / \text{Hz}^{1/2}$

● 周波数ノイズ
 $1 \text{ Hz} / \text{Hz}^{1/2}$

共に1Hz帯

● 地上干渉計で使われている空間光での制御は難しい帯域
➡ 光ファイバーを用いた制御を行った

制御結果

● 強度ノイズ
 $3 \times 10^{-7} / \text{Hz}^{1/2}$

● 周波数ノイズ
 $20 \text{ Hz} / \text{Hz}^{1/2}$

目標値には届いていないが、どちらも期待の持てる値
ベストは、 $4 \times 10^{-8} / \text{Hz}^{1/2}$ @1kHz(強度)、 $5 \text{ Hz} / \text{Hz}^{1/2}$ @80Hz(周波数)

1. イントロダクション

1.1 DECIGO

1.2 光源のノイズと干渉計

1.3 自由空間と光ファイバー

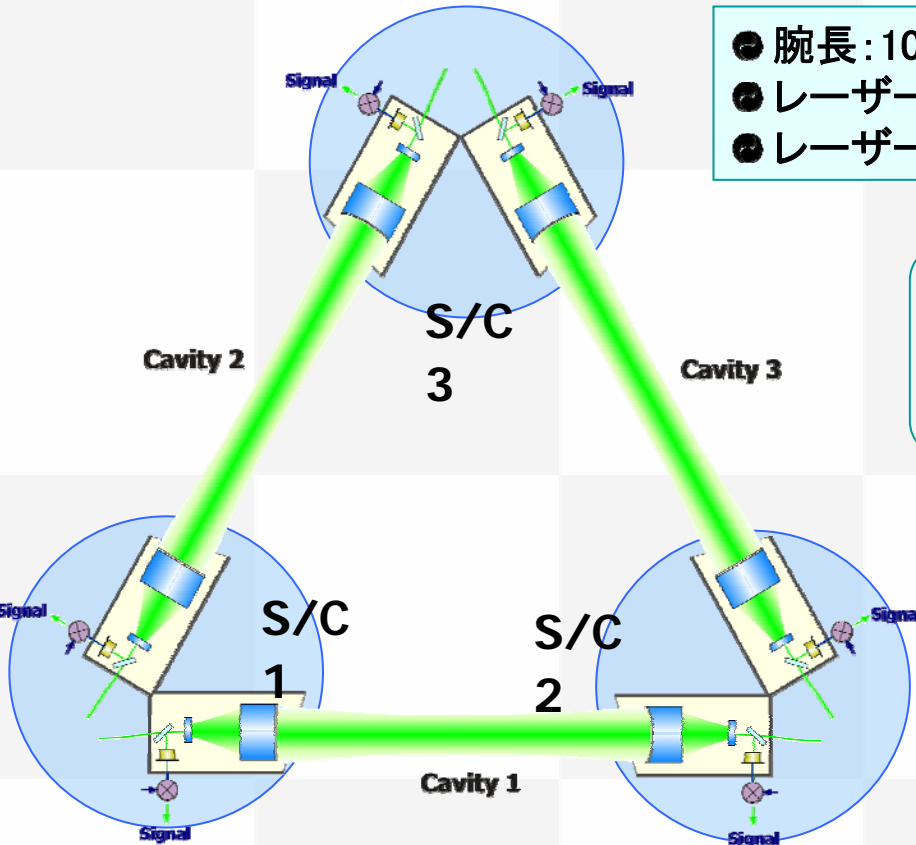
2. 装置

3. 結果

4. まとめ・課題

1.1 DECIGO

Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory



- 腕長: 1000 km
- レーザー出力: 10 W
- レーザー波長: 532 nm
- 鏡直径: 1 m
- 鏡質量: 100 kg
- フィネス: 10

- 0.1Hz~1Hzの重力波をターゲットとする (LISAと地上検出器の狭間の周波数帯)
- 中間質量BHからの重力波などが波源

地上での重力波検出(100Hz~)とは全く異なる周波数帯域



DECIGOの帯域にあわせた新しい技術の必要性

1.2 光源のノイズと干渉計

光源のノイズは理想的な干渉計では問題にならない

強度ノイズ

干渉計が完全にダークフリンジ条件に保たれていれば影響はない

FP共振器の鏡の
残留変位ノイズによってずれる

$$\delta h_{\text{int}} = \delta P/P \times \delta l/l$$

周波数ノイズ

2つのFP共振器の特性が完全に同じであれば影響はない

基線長の非対称性、フィネスの非対称性で乱される

$$\delta h_{\text{phase}} = \epsilon_{\text{CMRR}} \times \delta \nu/\nu$$

参考:TAMAの設計値は

$$\delta l = 5 \times 10^{-12} [\text{m/Hz}]$$

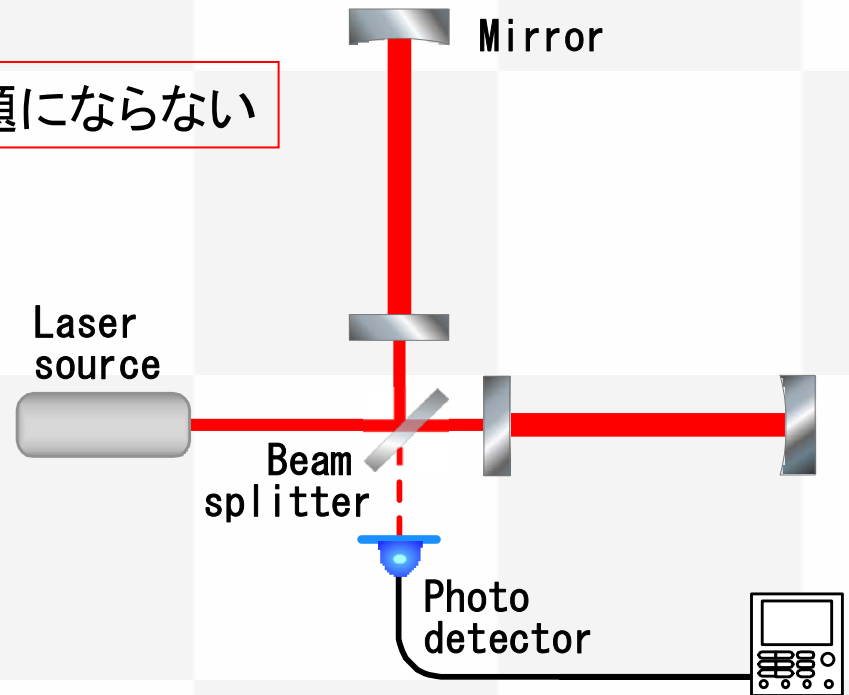
$$\epsilon_{\text{CMRR}} = 40\text{dB}$$

2007年12月7日



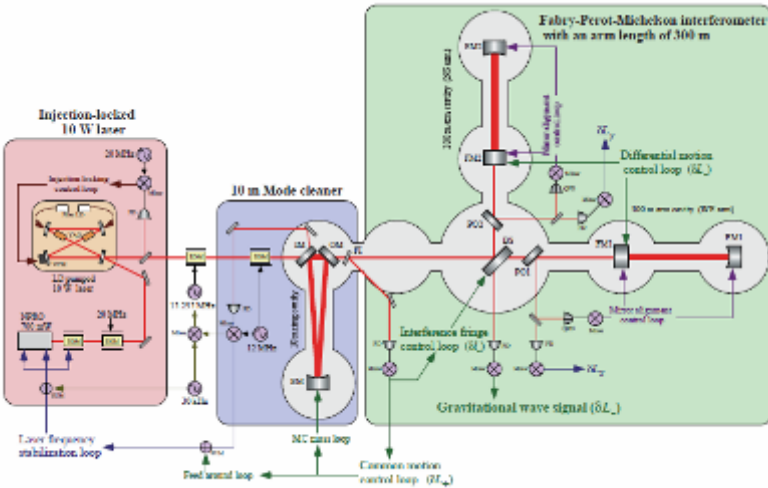
$$\delta P/P < 10^{-8}$$

$$\delta \nu/\nu < 10^{-19} \quad (\delta \nu = 10^{-5} \text{Hz/Hz}^{1/2})$$



1.3 自由空間と光ファイバー

- 安定化に用いる光学素子の振動のため低周波帯域では制御が難しい
- レーザー光源の安定化に用いる光学系をファイバーとそれにカップルした光学素子のみを用いて構成すればこの問題を回避できる



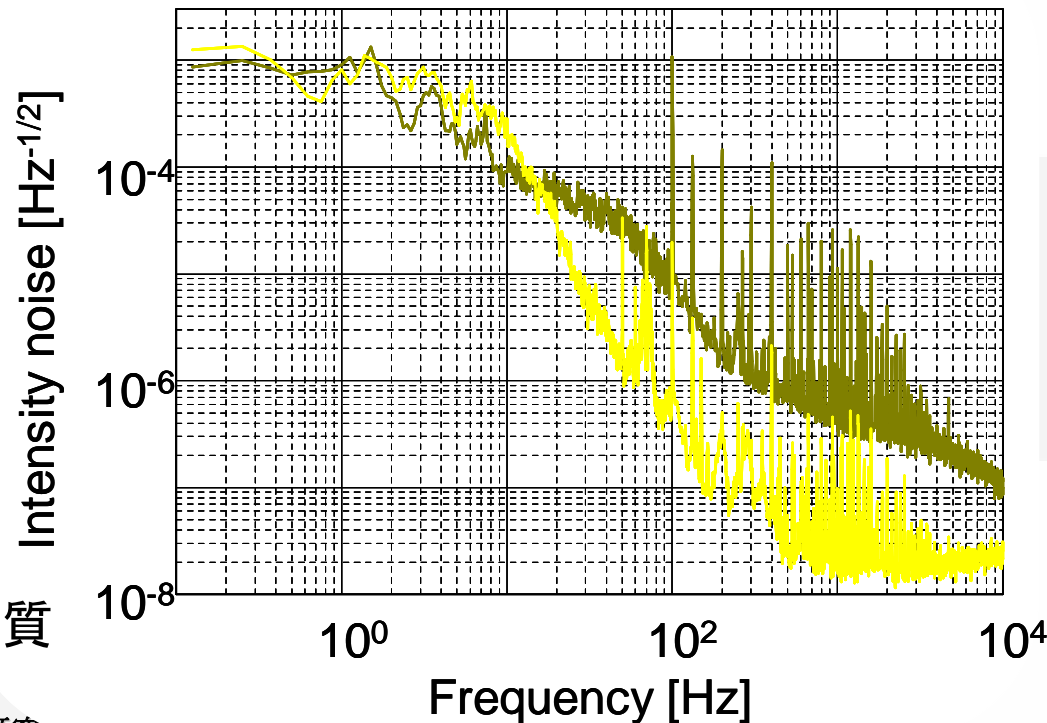
ファイバー光学系の特徴

- 低周波の安定化が容易
- 耐衝撃性が高い
- 省スペース性が高い

これらは宇宙重力波検出器に必要な性質

もちろん地上での検出器でも便利な性質

TAMA強度ノイズ データ提供:新井宏二氏



1. イントロダクション

2. 装置

- 2.1 強度安定化
- 2.2 周波数安定化
- 2.3 安定度の評価
- 2.4 光学系の構成

- 2.5 マッチングジェル(屈折率整合材)
- 2.6 非対称Michelson干渉計
- 2.7 サスペンション
- 2.8 装置全体写真

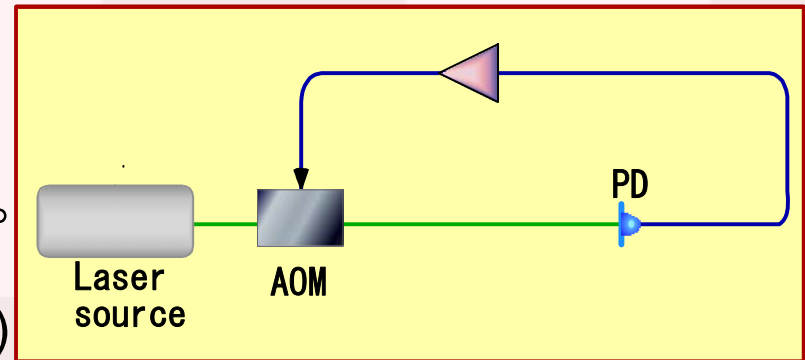
3. 実験結果

4. まとめ・課題

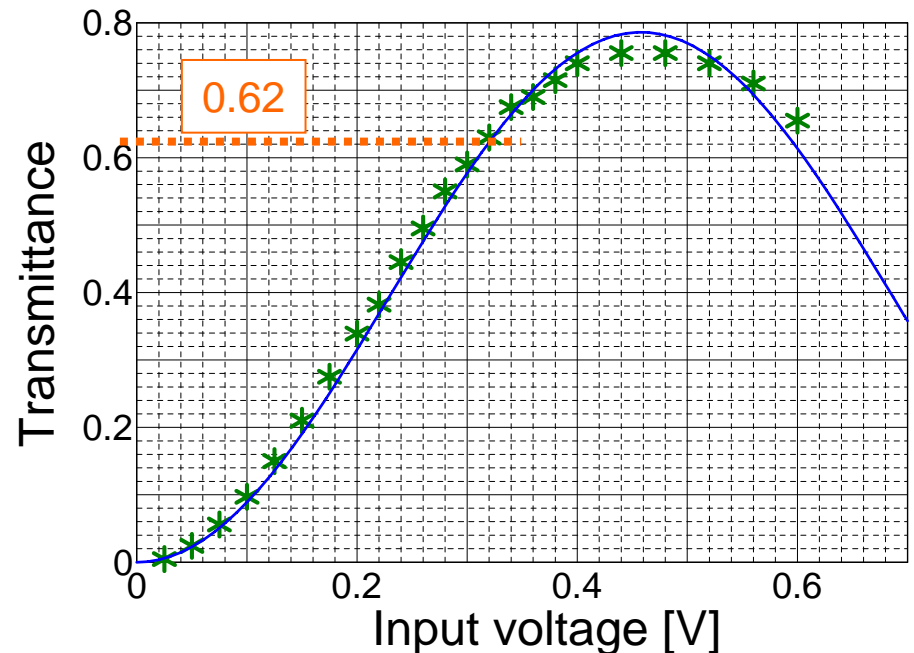
2.1 強度安定化

● 強度安定化

- PDで強度ノイズを検出
- AOM(音響光学素子)にフィードバック。
強度ノイズを透過率変化で補償
- PD出力電圧をレファレンスIC(AD587)
にロック



- AOMにおける光のロスと
制御特性の良さを考慮に入れて、
透過率0.62の位置にロック
- ショットノイズレベル:
 $3.7 \times 10^{-8}/\text{Hz}^{1/2}$



2.2 周波数安定化

- 非対称Michelson干渉計で周波数ノイズを検出

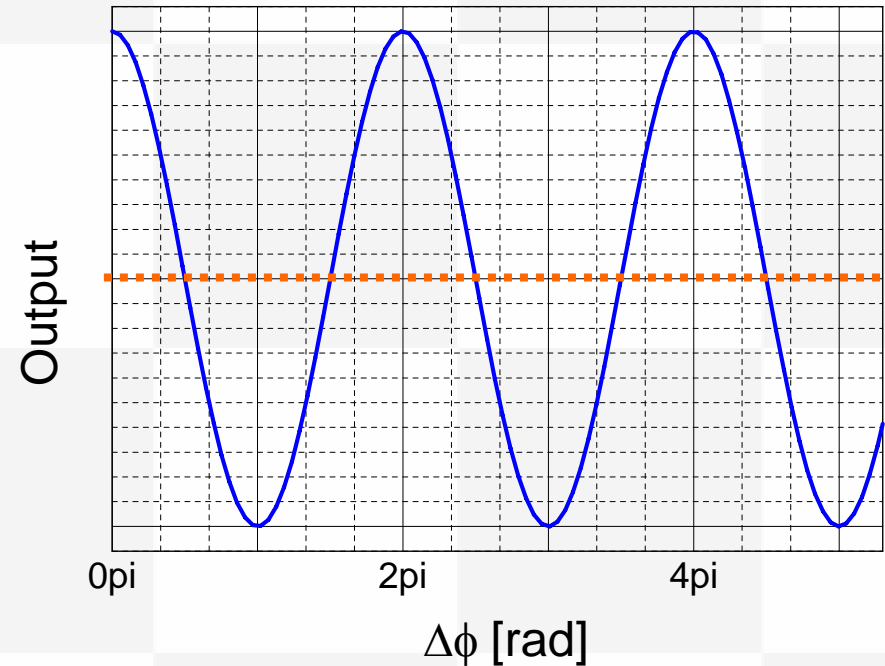
- 非対称Michelson干渉計の応答は

$$E_{in} = E_0 e^{i(\Omega t + \phi(t))}$$

$$\rightarrow P_A + P_B + P \cos \Delta \phi$$

- 干渉計をミッドフリンジにロックすると

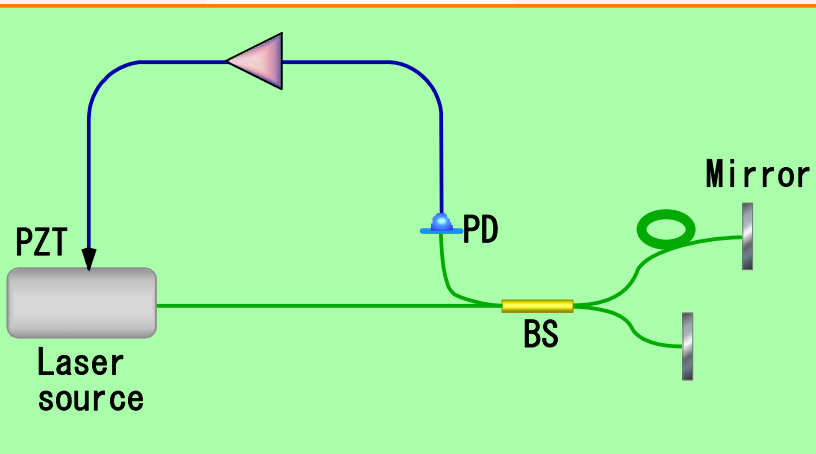
$$|P_{sig}(\omega)| = 2\pi P \frac{2\Delta l}{c} |\nu(\omega)|$$



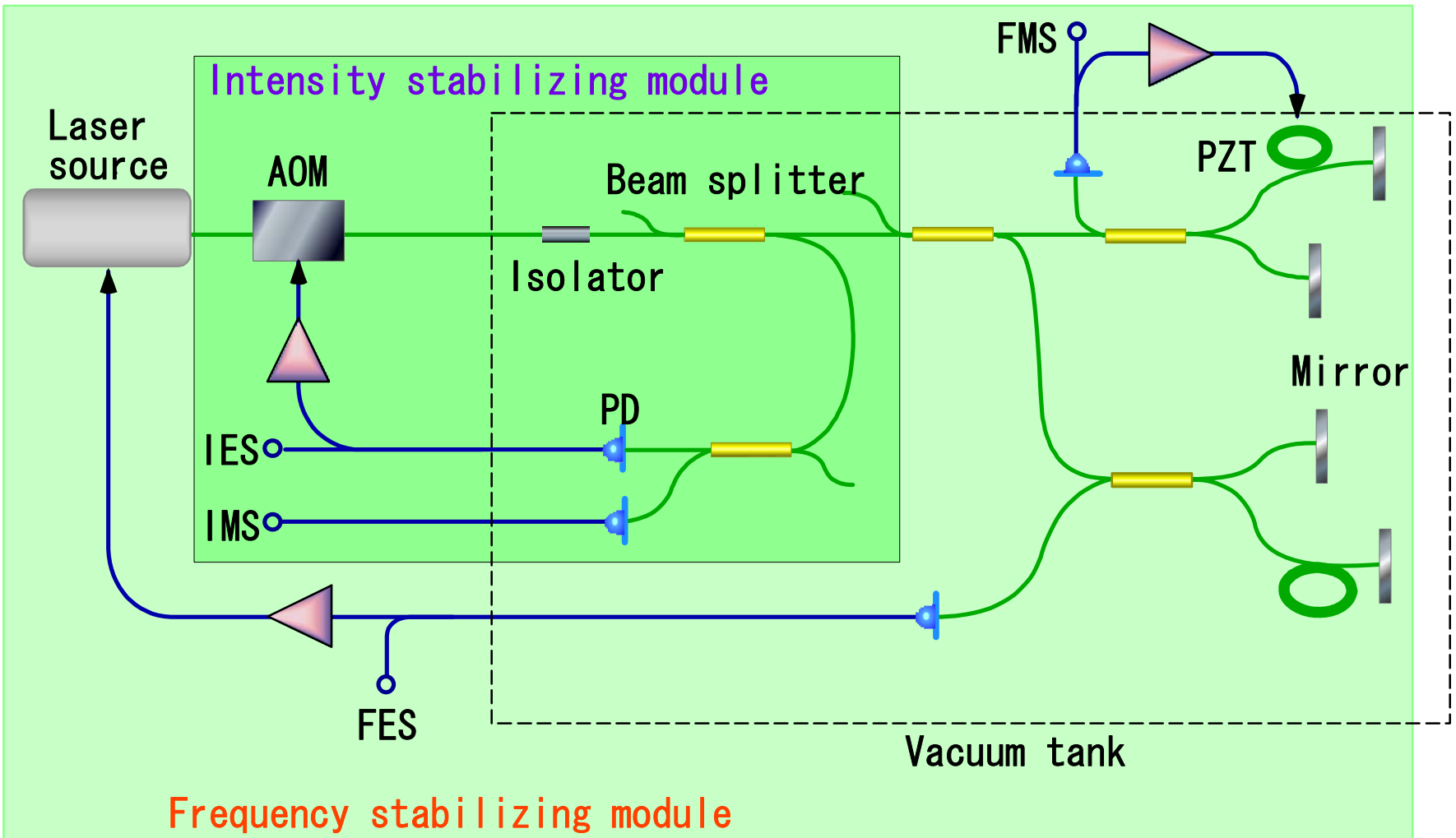
- $\Delta l = 110 \times 1.46$ [m]

- Δl は感度とダイナミックレンジのトレードオフで決まる

- レーザー内のキャビティにフィードバック



2.4 光学系の構成



Laser power, 10mW; Shot noise limit of IMS, $3.7 \times 10^{-8}/\text{Hz}^{1/2}$

2.5 マッチングジェル(屈折率整合材)

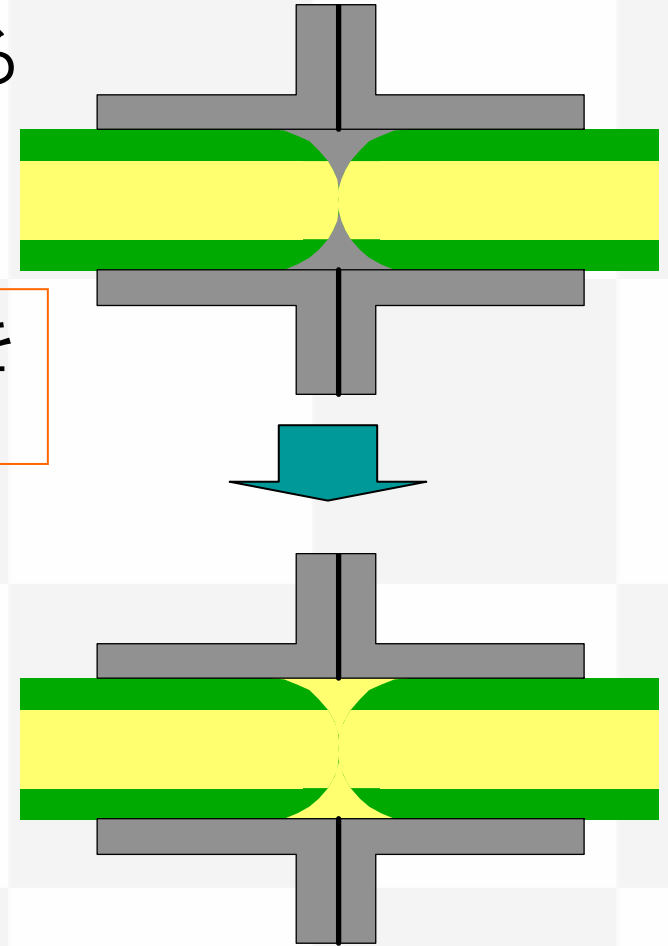
- ファイバーのコネクタ部での反射がある



光ファイバーと同じ屈折率をもったジェルを
ファイバーの接続部に充填する

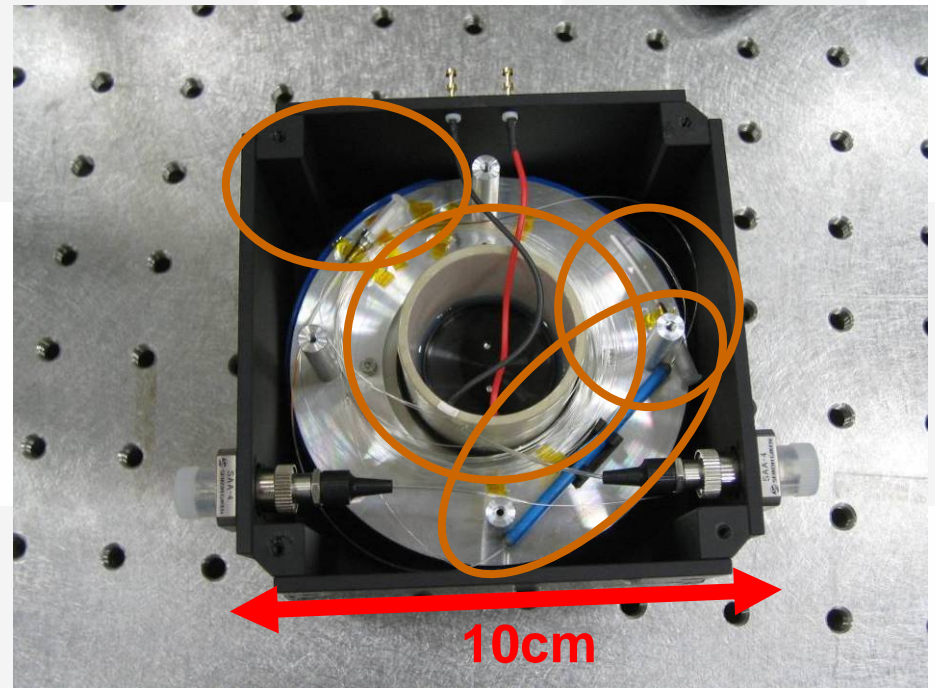
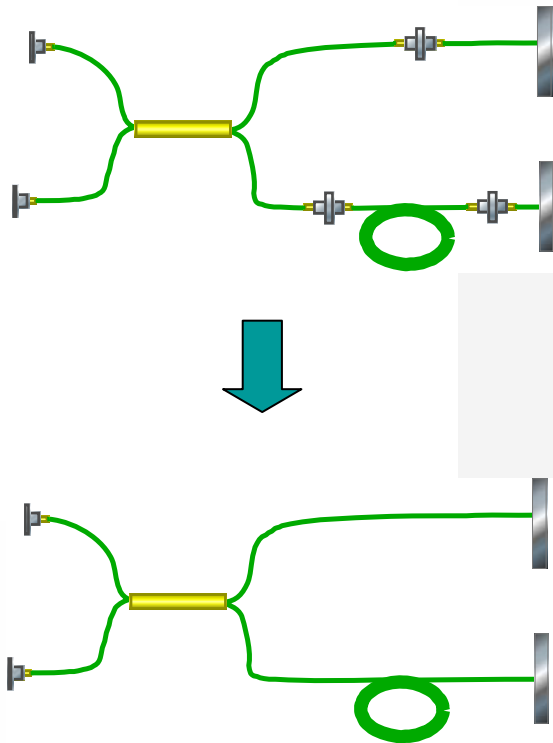
- 透過率の上昇
- 散乱によるノイズの減少
- 振動の影響の除去

などが期待される



2.6 非対称Michelson干渉計

- 光学素子間のコネクタを無くし、全て接着剤で固定
- 鏡もファイバーに直接接着
- ファイバーはアルミのボビンに巻いてある

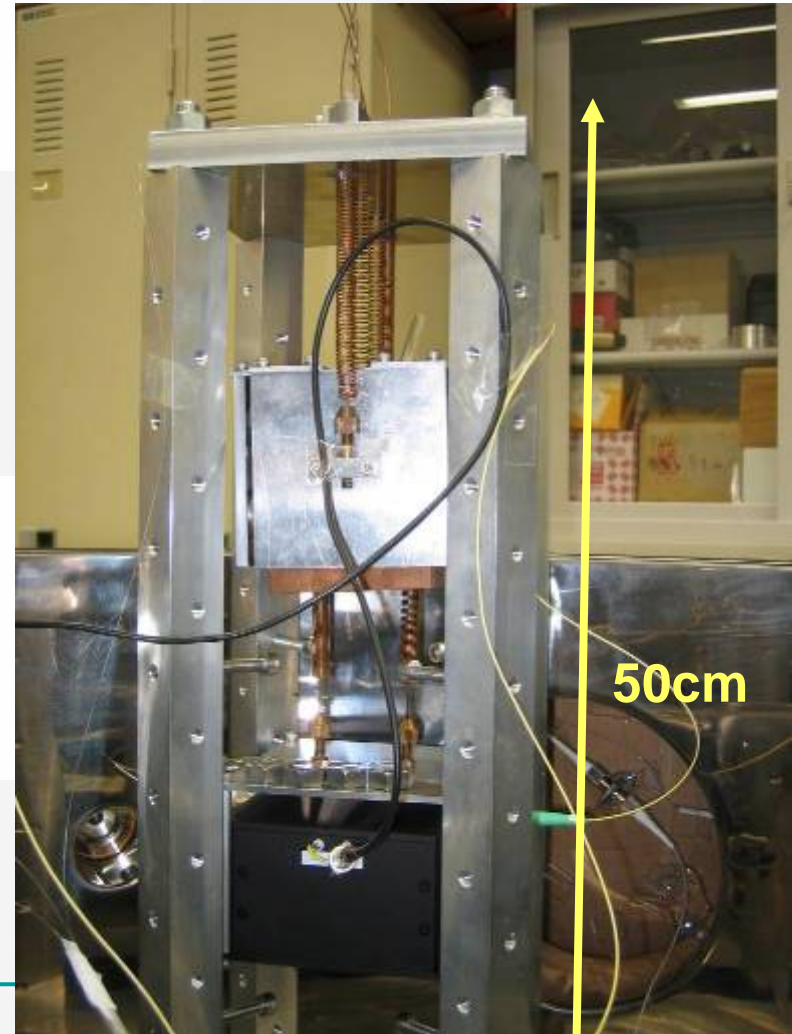
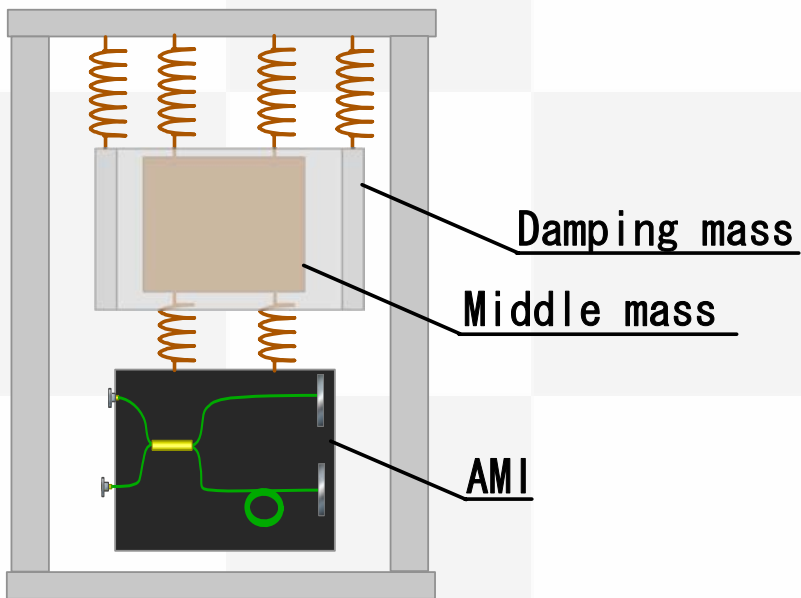


2.7 サスペンション

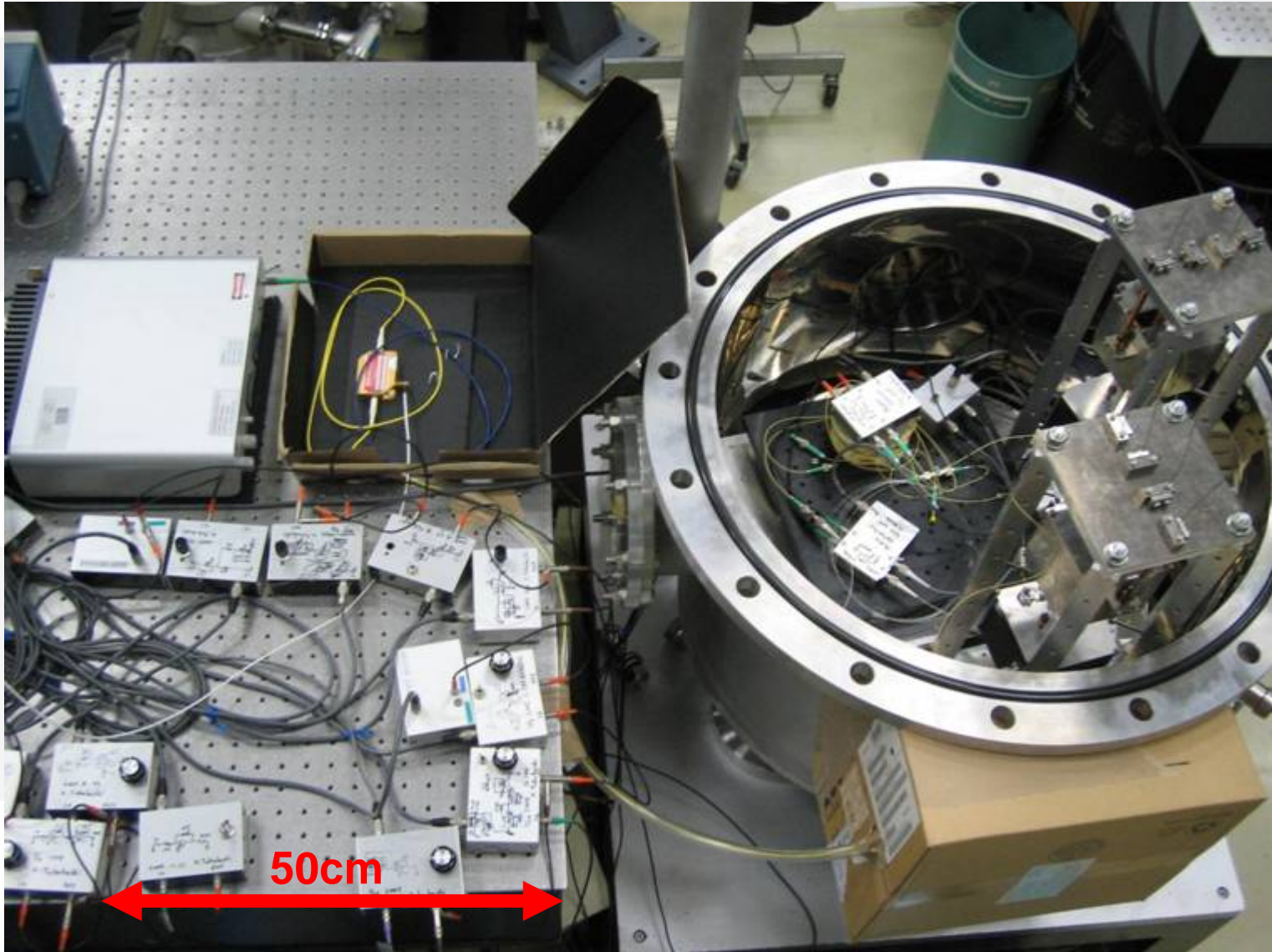
非対称Michelson干渉計を安定にロックする必要がある



- サスペンション
 - 2段振り子
 - Eddy current damping
- 全体を真空槽に($\sim 10\text{Pa}$)



2.8 装置全体写真



1. イントロダクション

2. 装置

3. 実験結果

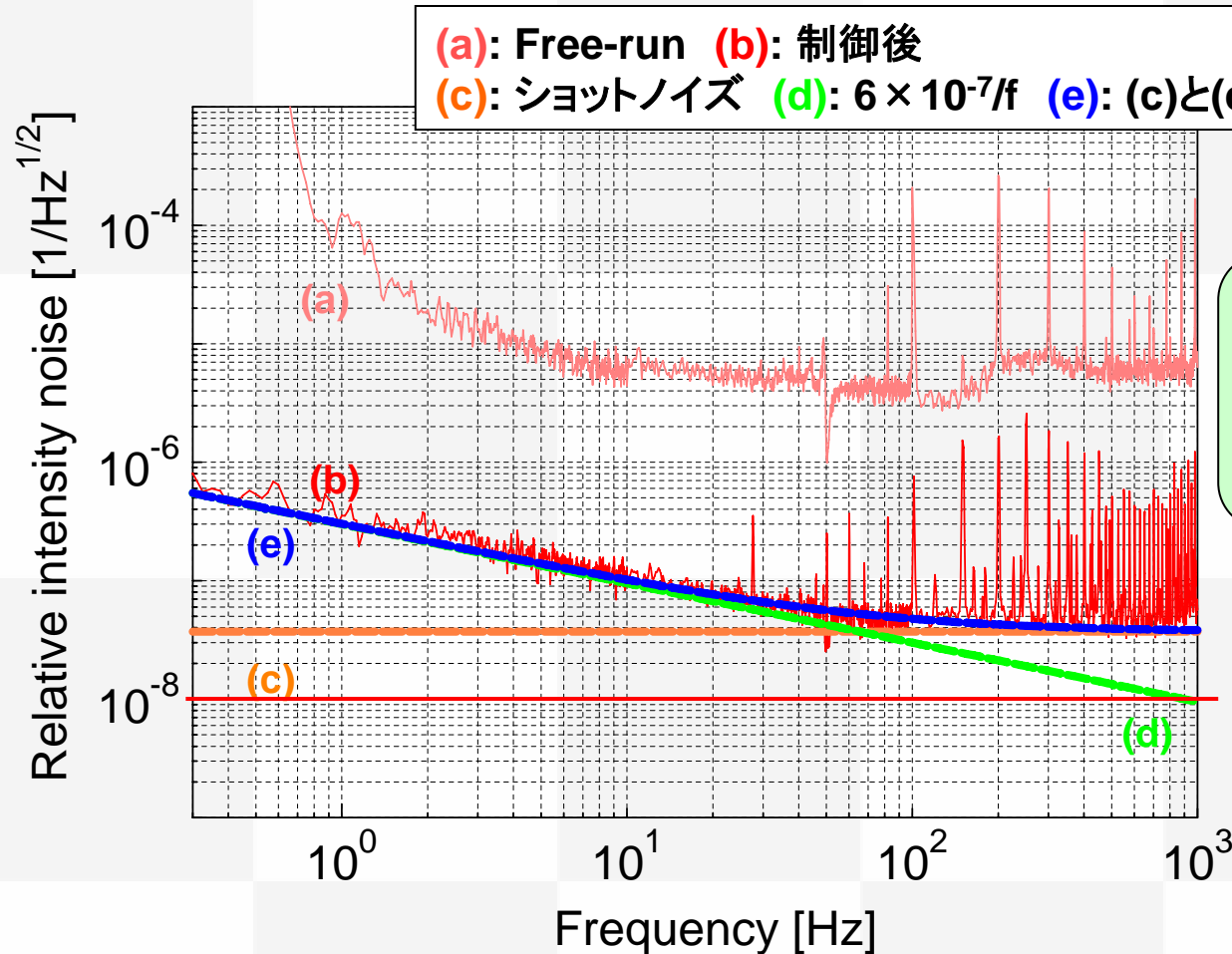
3.1 強度安定化結果

3.2 強度安定化結果

3.3 ノイズ

4. まとめ・課題

3.1 強度安定化結果



制御結果

- 性能: $3 \times 10^{-7}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 1Hz
- ショットノイズと $3 \times 10^{-7}/f^{1/2}$ のラインの和に一致
($3 \times 10^{-7}/f^{1/2}$ の由来は不明)

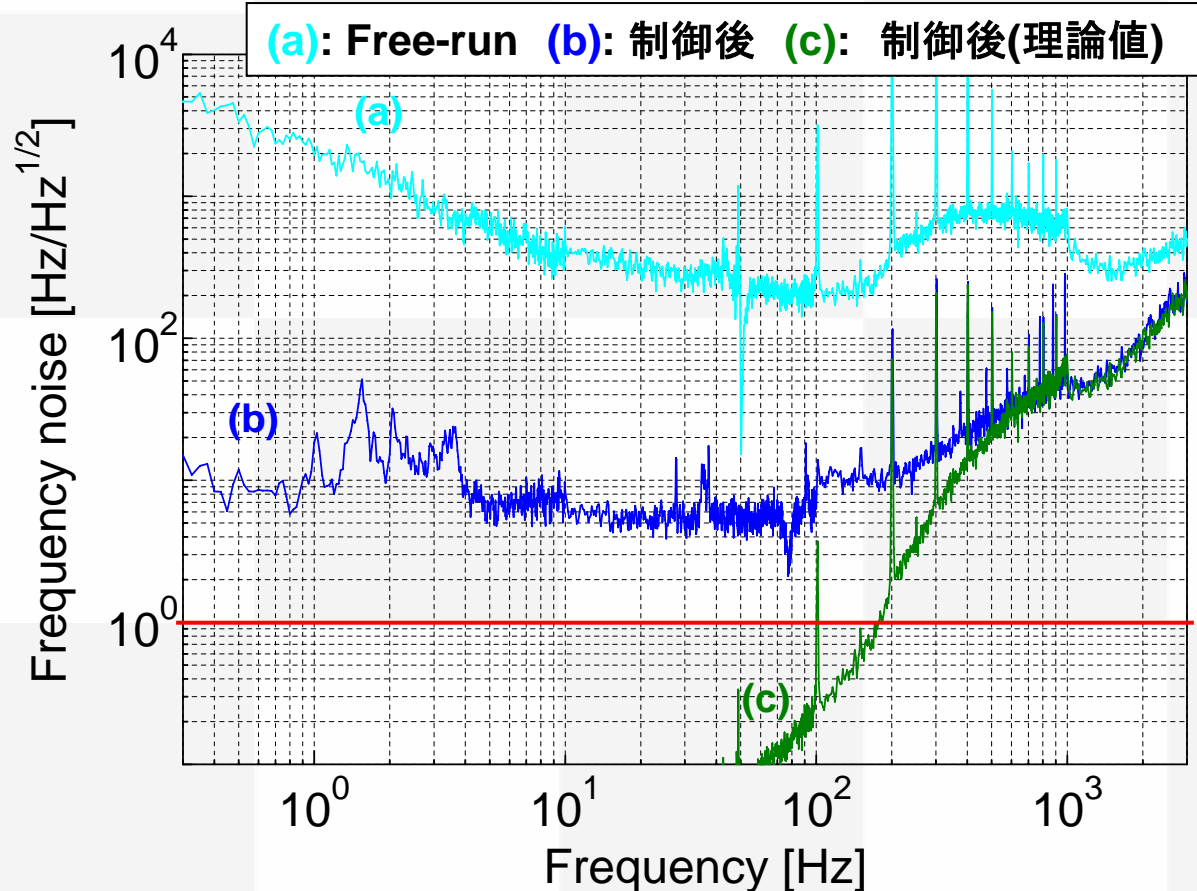
- 形から電気系由来に見える
- おそらくAOM driverのノイズ



他の電気系ノイズはもっと小さい

1Hzで50dBの制御に成功(目標値には到達していない)

3.2 周波数安定化結果



制御結果

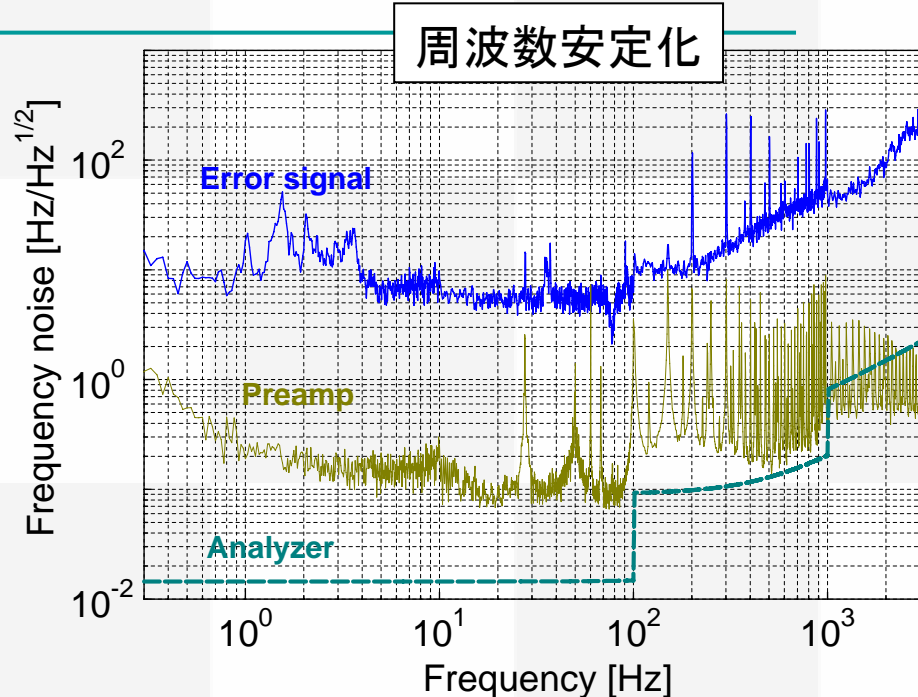
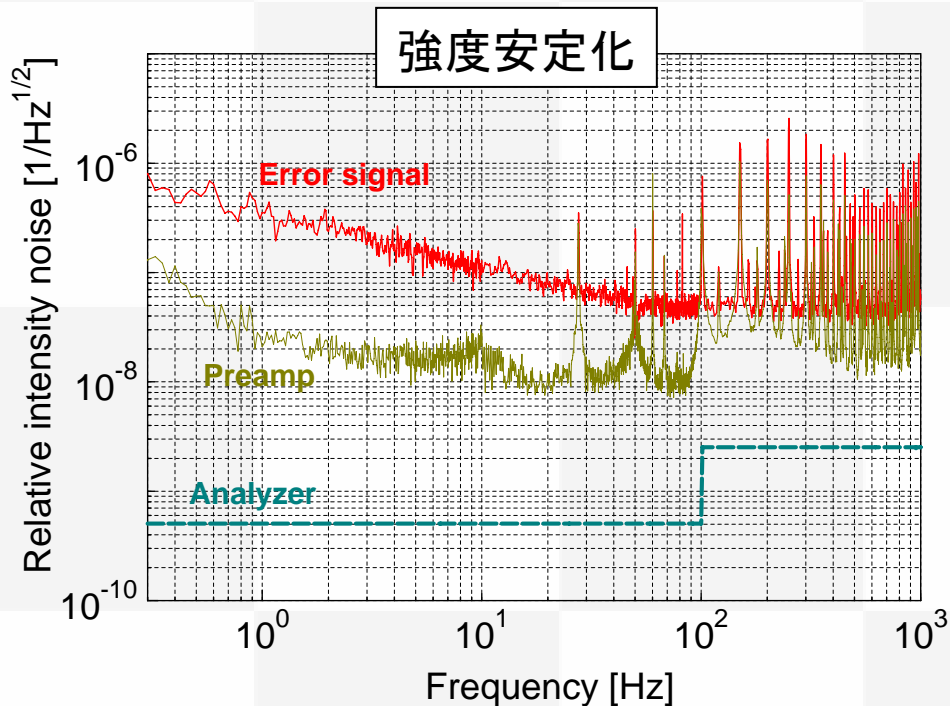
- 性能: $20\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 1Hz
- 最高で $5\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$
- 200Hz～の領域では理論通り制御できている
- 低周波帯では性能が完全ではない
- 1～10Hzでサスペンションの共振が見えている
 - やはり振動の影響は避けられない。
 - 1Hz以下の帯域では地面振動の影響でリミットされている可能性がある。

- 1Hzで40dBの制御に成功
- 宇宙では低周波側に地面振動のような大きなノイズはないのでそれほど問題にならない(かも)

因みに、LISAの要求値は $30\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 1mHz～1Hz

3.3 ノイズ源

- AOMドライバー以外の回路の入力換算雑音はPreampと同程度かそれ以下
- スペアナのノイズも十分小さい



- 電気回路、スペアナのノイズは十分小さい
- サスペンションの共振は
 - 1.1Hz(水平方向)
 - 1.6Hz(z方向)
 - 3.5、3.6Hz(Yaw、Pitch方向)
 - 他多数
- ファイバーの熱雑音は $10^{-2}\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 以下

1. イントロダクション

2. 装置

3. 実験結果

4. まとめ・課題

4.1 まとめ・課題

- 光ファイバーを用いたレーザーの安定化を行った
- 制御の結果

● 強度ノイズ

$3 \times 10^{-7} / \text{Hz}^{1/2}$

● 周波数ノイズ

$20 \text{ Hz} / \text{Hz}^{1/2}$

@ 1Hz

- 残留ノイズの原因候補は

強度:

AOMドライバの電圧雑音

周波数:

サスペンションの共振

最終的には地面振動でリミットされている可能性が高い

- 課題

- AOMドライバのノイズ実測
- 非対称Michelsonの作り方次第で、より振動に鈍感な装置ができるはず
- より静かな環境での測定
- 温度安定化が必要か？

終

2.3 構成要素(1)

光源

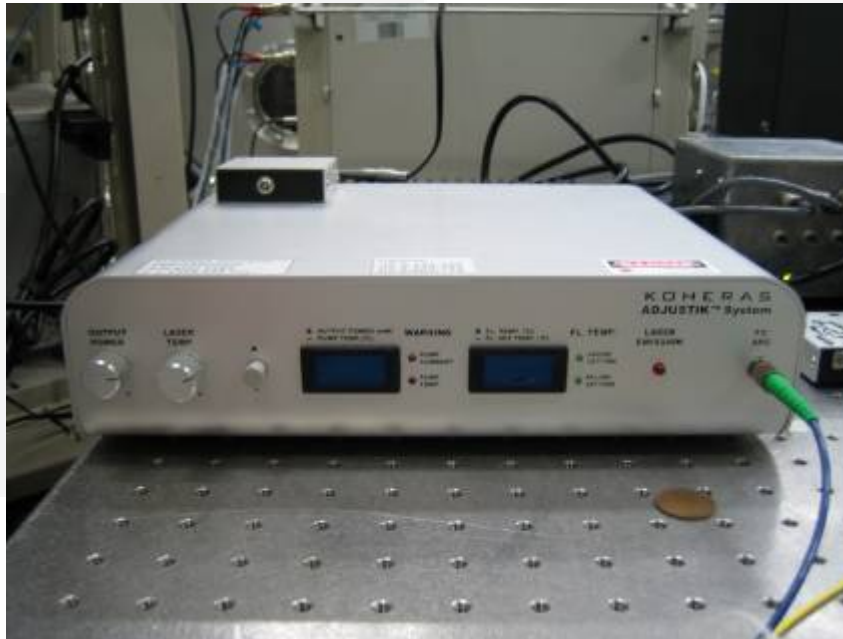
DFBファイバーレーザー (KOHERAS社)

出力 : 10mW

波長 : 1550nm, 線幅: <23kHz

波長可変幅 : 30pm (PZTへ入力)

温度依存性 : 13pm/K



強度変調器 (AOM)

ファイバーカップルタイプ (BRIMROSE社)

RF周波数 : 55MHz

1次光を使用

回折効率: 80% (スペック値)

最大透過率 : 70% (実測値)

構成要素(2)

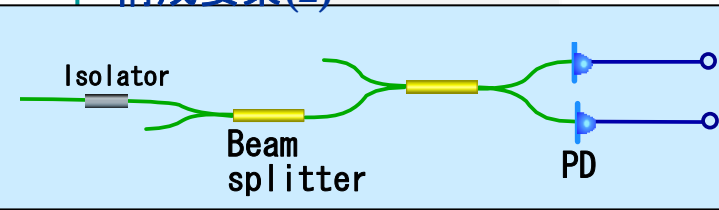
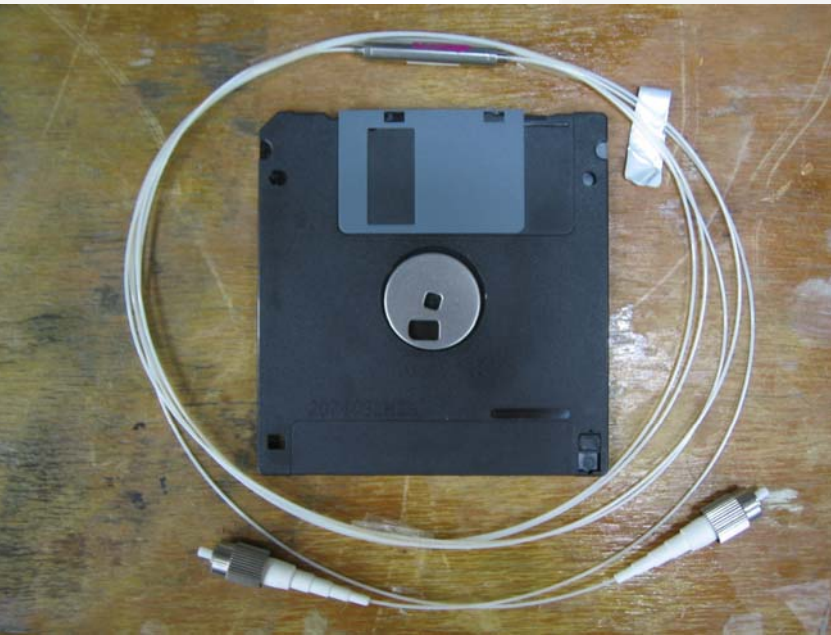
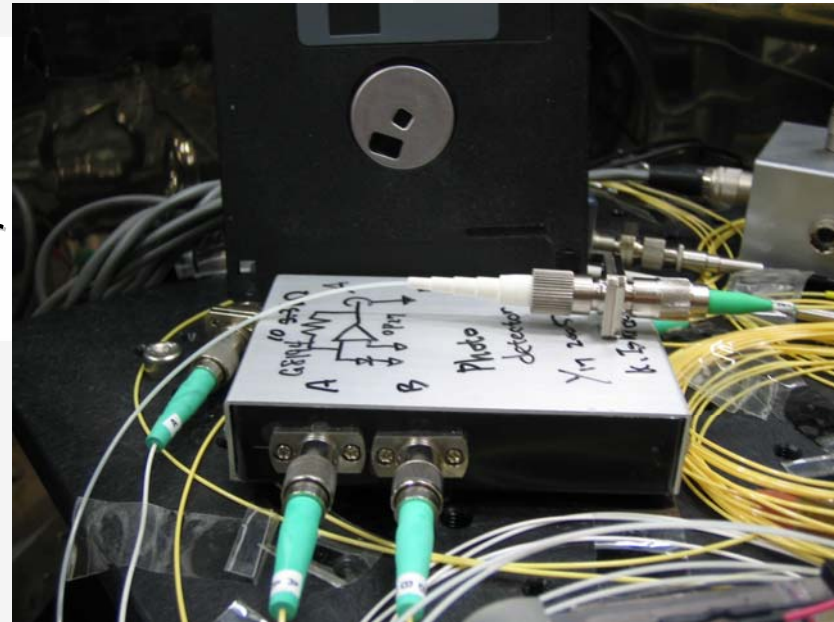
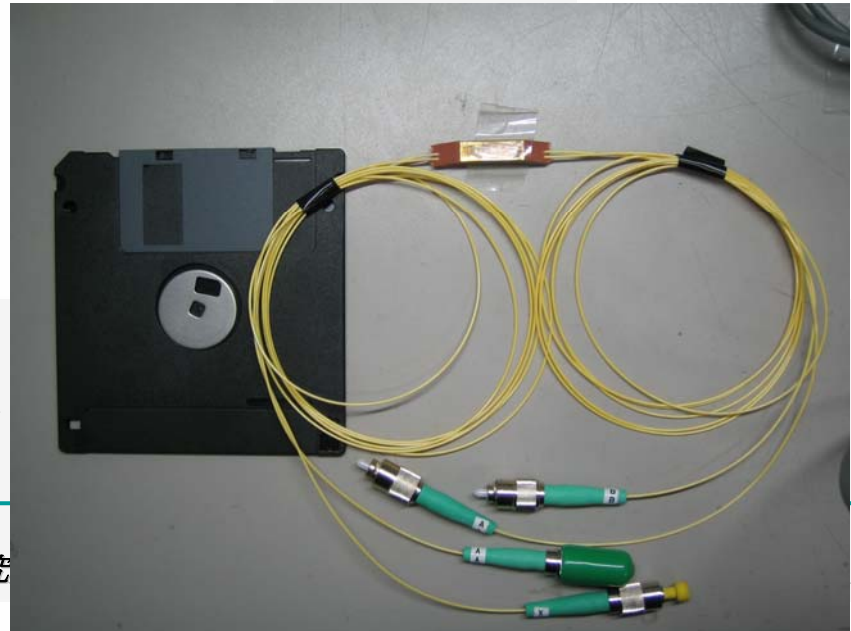


Photo detector



Isolator

Beam splitter



2.7 マイケルソン干渉計の改良

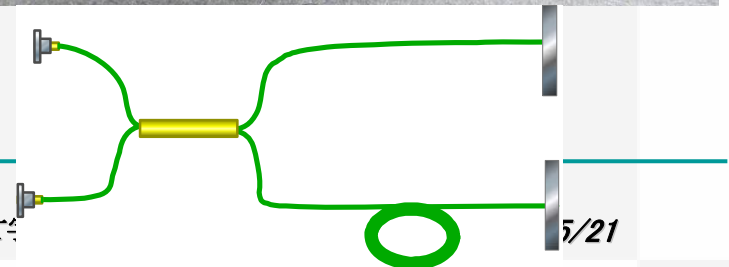
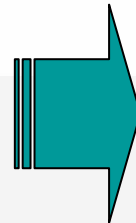
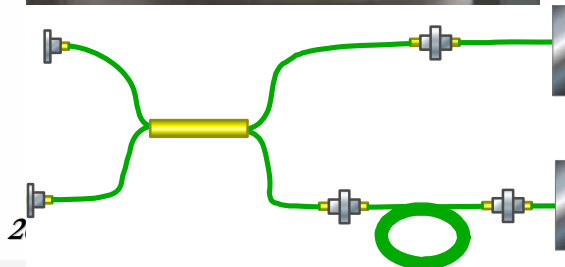
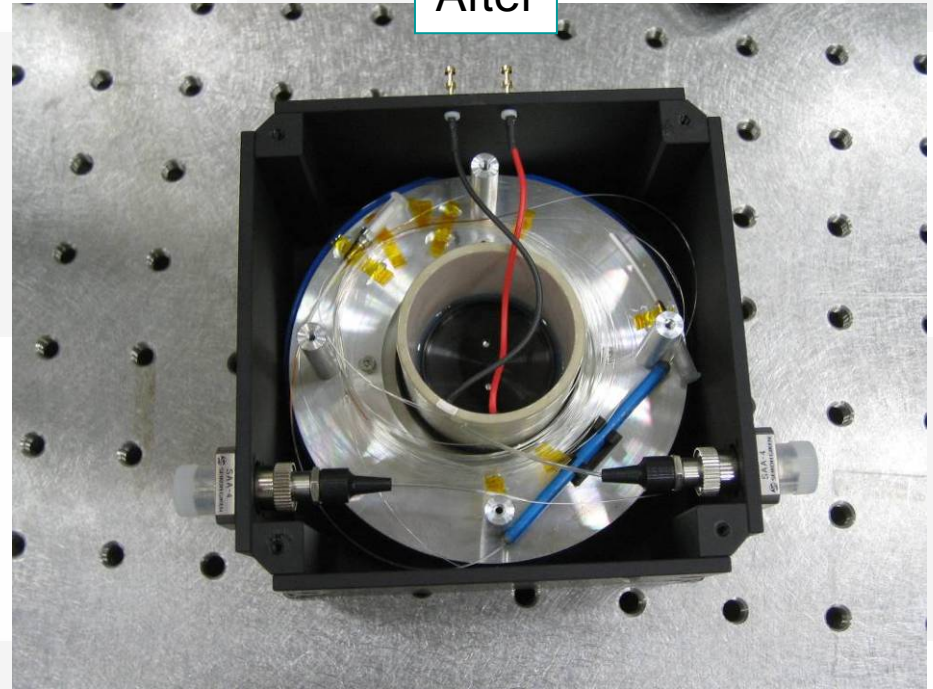
- 各回路素子をつなぐコネクタを無くし、接着剤で固定
- 手巻だったファイバーコイルを外注に

- 自由保持だった100mファイバを固定

Before



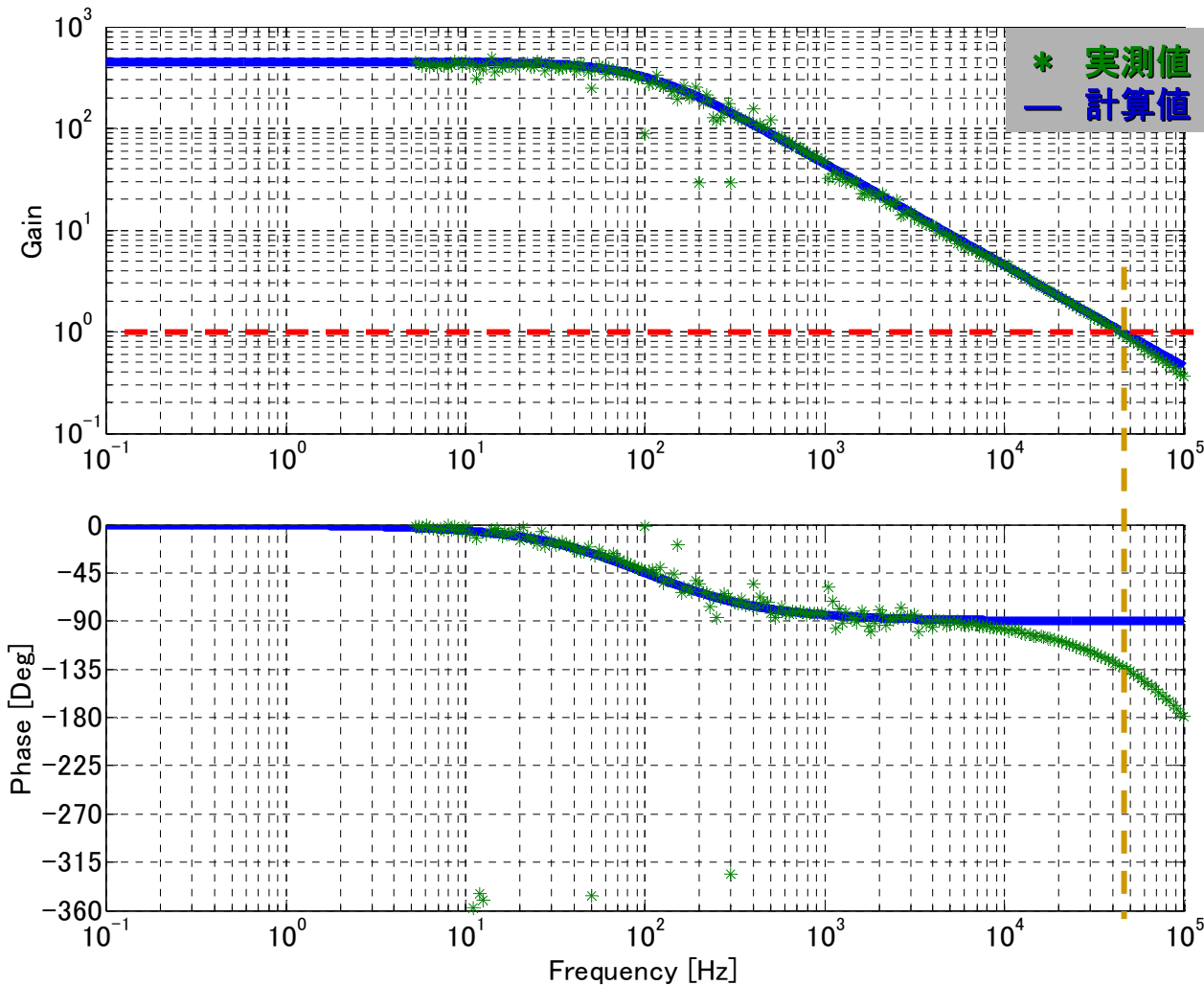
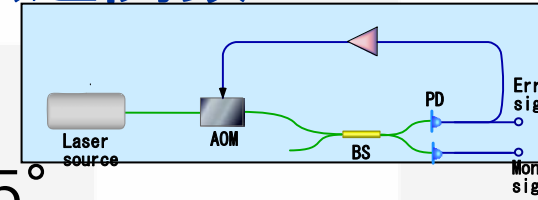
After



2.7 強度安定化servoのオープンループ伝達関数

1次ローパスフィルタ,

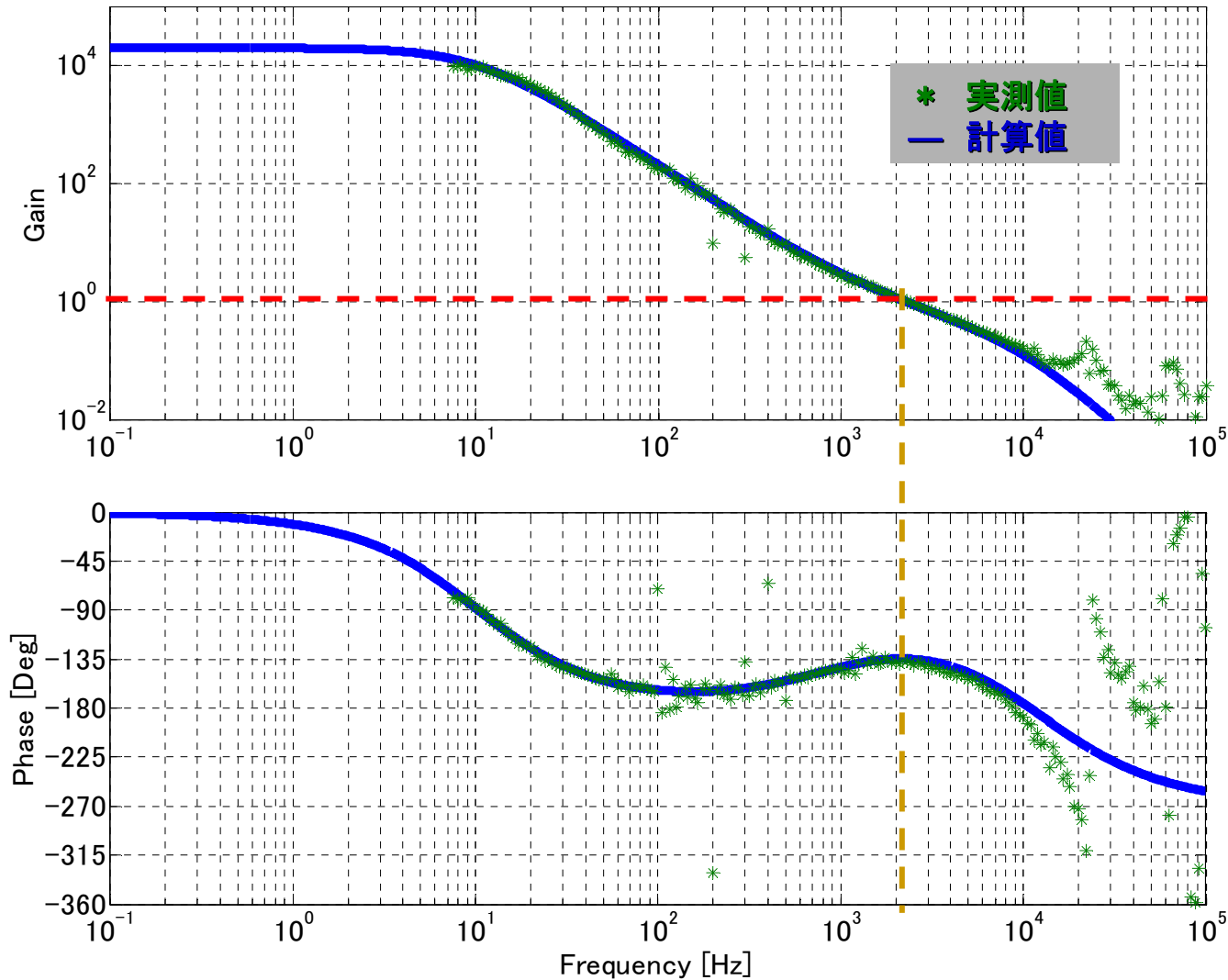
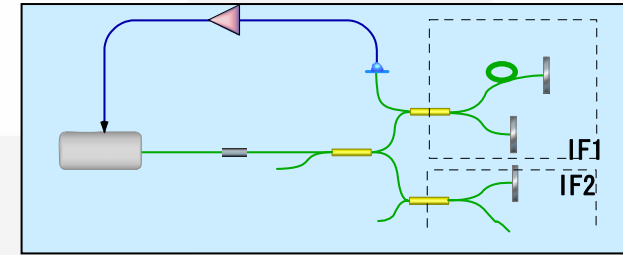
DC gain: 55dB, UGF: 40kHz, 位相余裕: 45°



2.8 周波数安定化servoの伝達関数

1次と2次を組み合わせたローパス

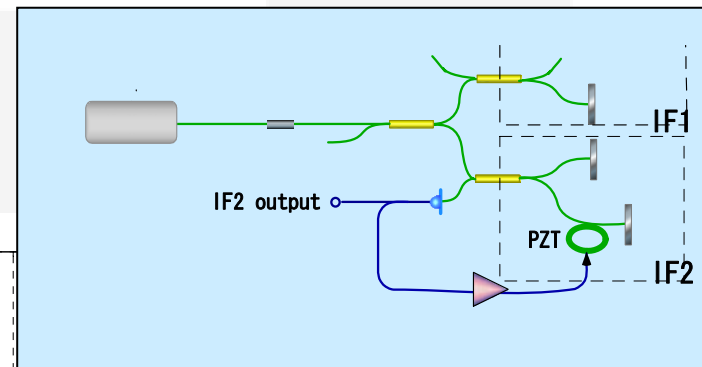
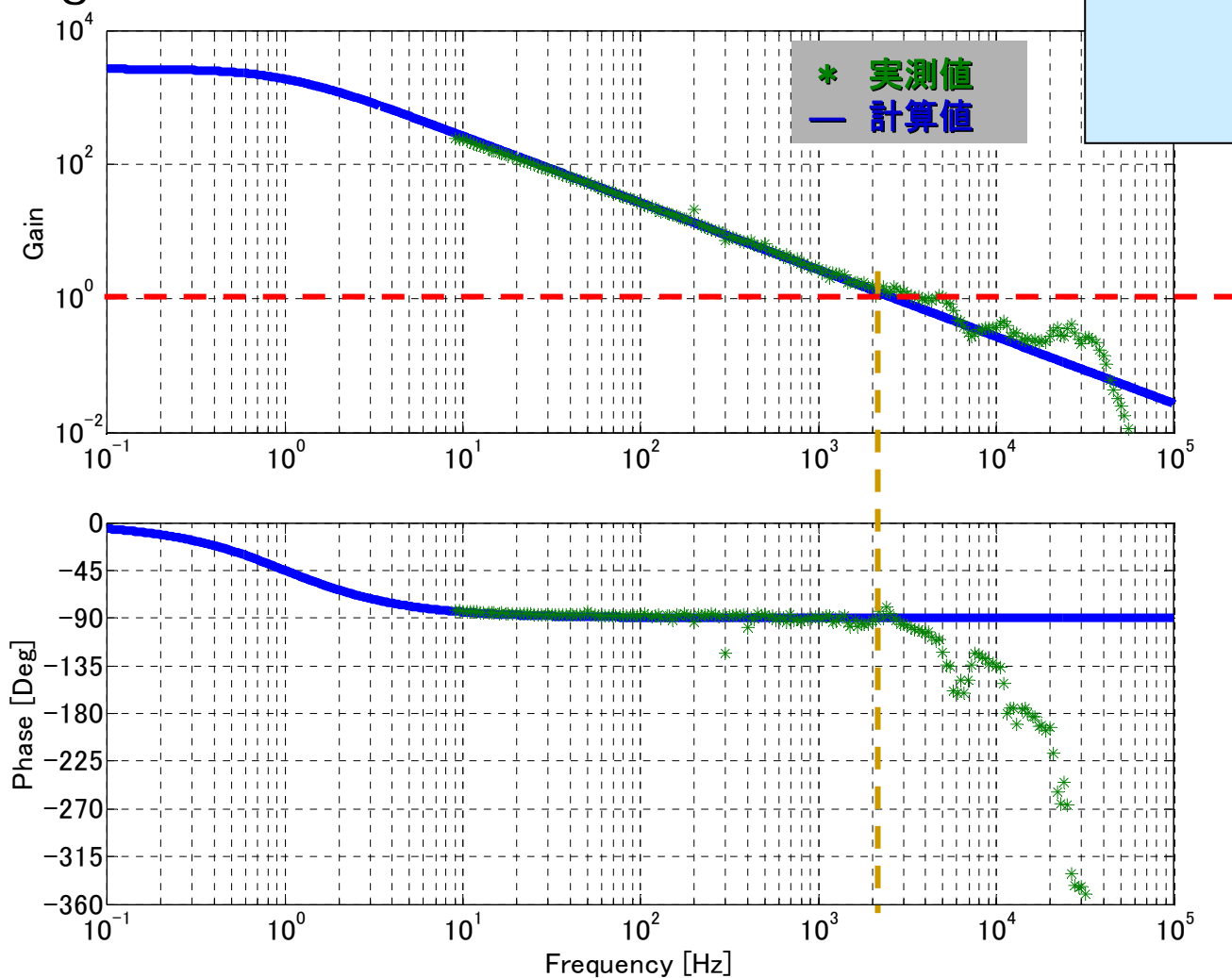
DC gain: 85dB, UGF: 2.3kHz, 位相余裕: 45°



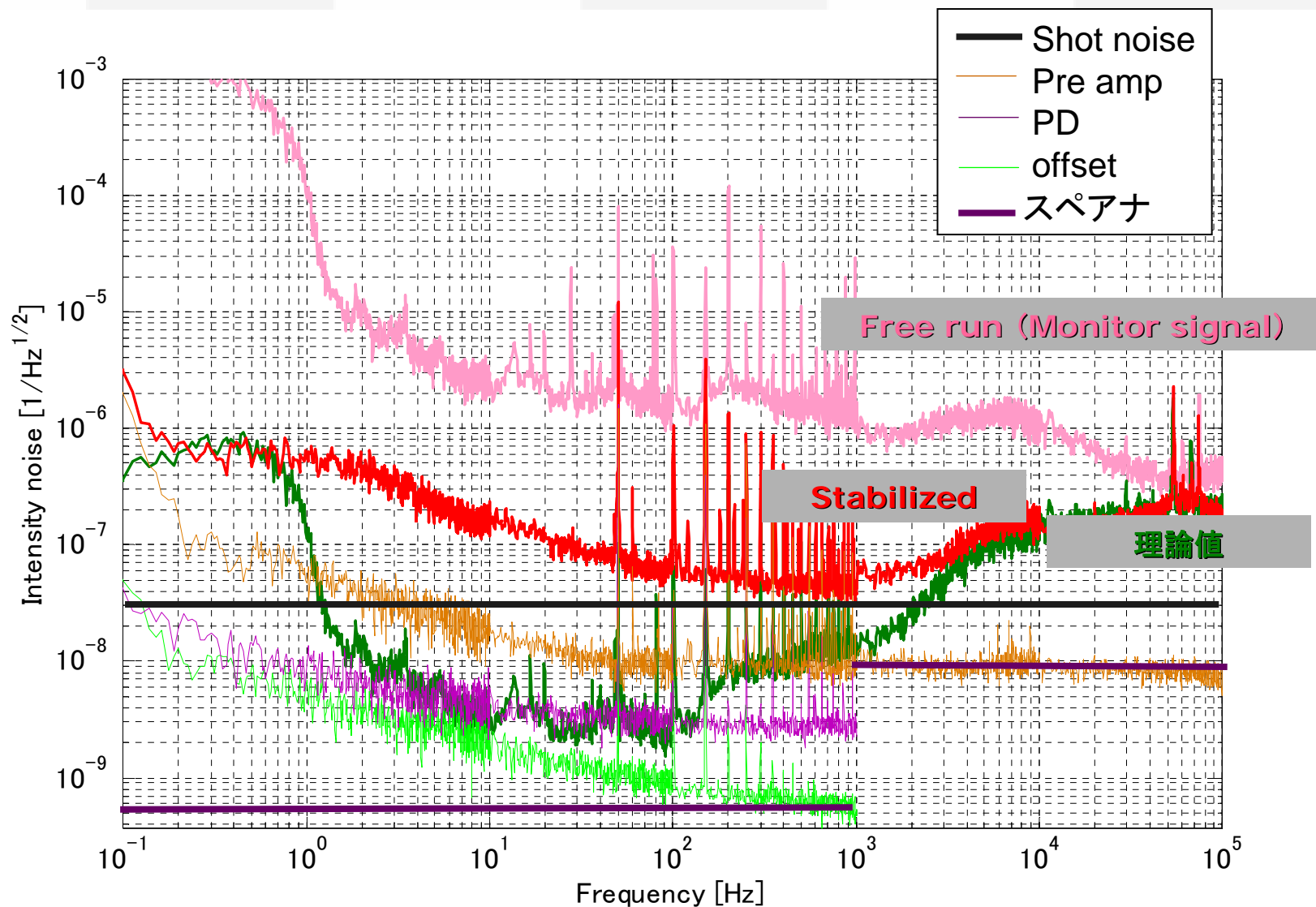
2.9 干渉計ロックservoのオープンループ伝達関数

1次のローパス

DC gain: 70dB, UGF: 2.6kHz, 位相余裕: 90°

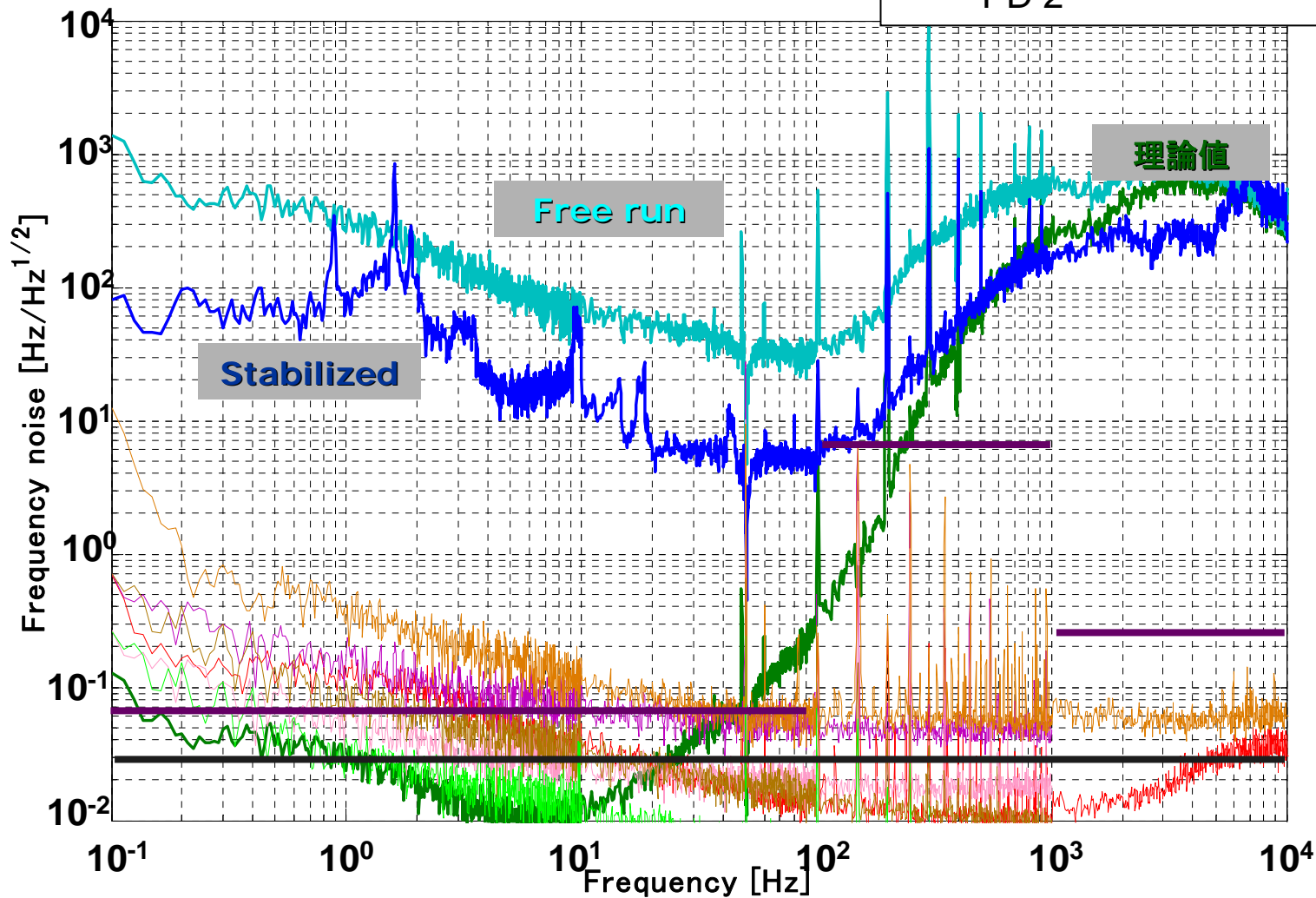


3.2 強度安定化のノイズ



3.5 周波数安定化のノイズ

- Shot noise
- Pre amp
- PD 1
- PD 2
- offset 1
- offset 2
- スペアナ



周波数安定度の履歴

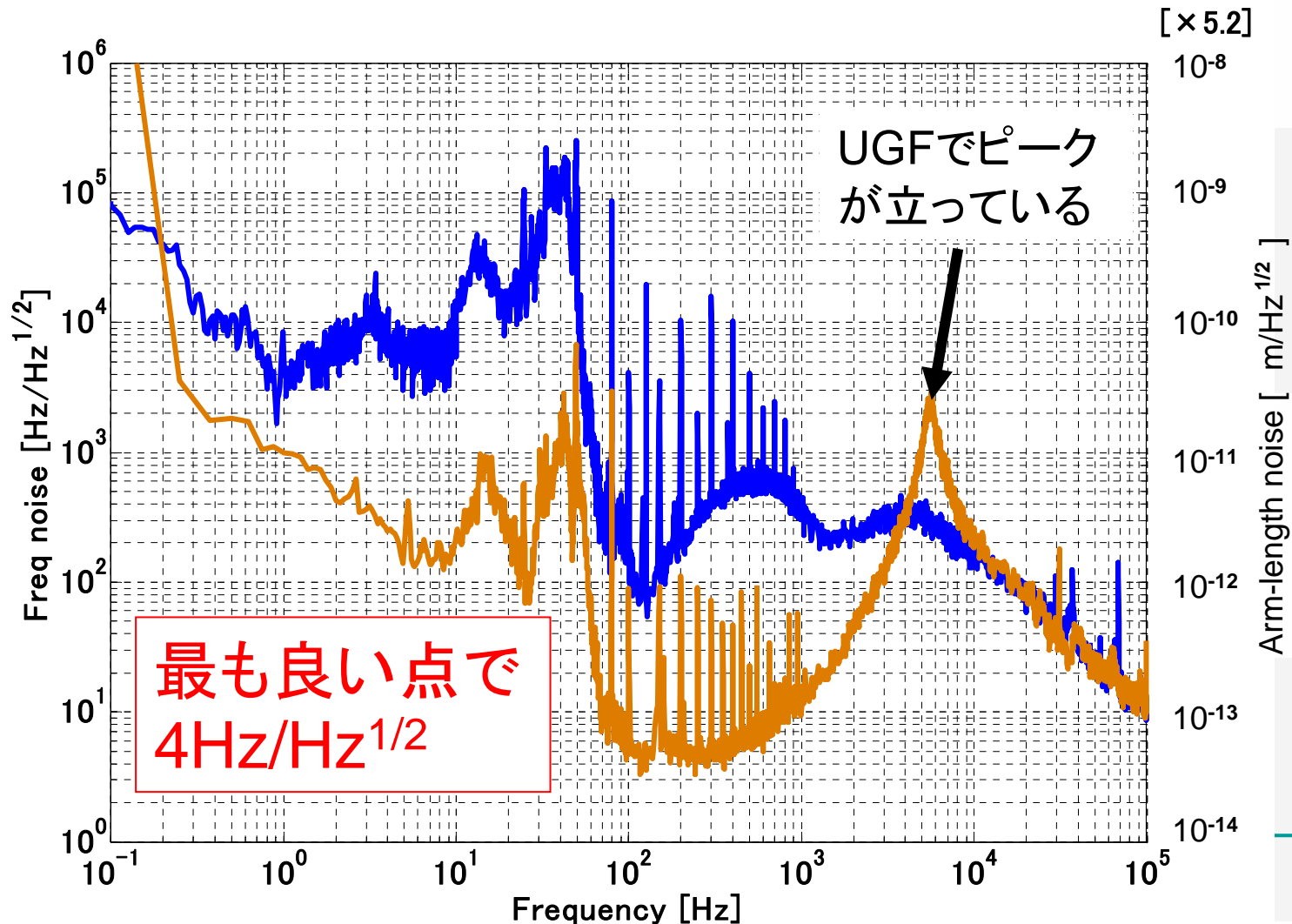
追加要素:

防振ゴム+真空

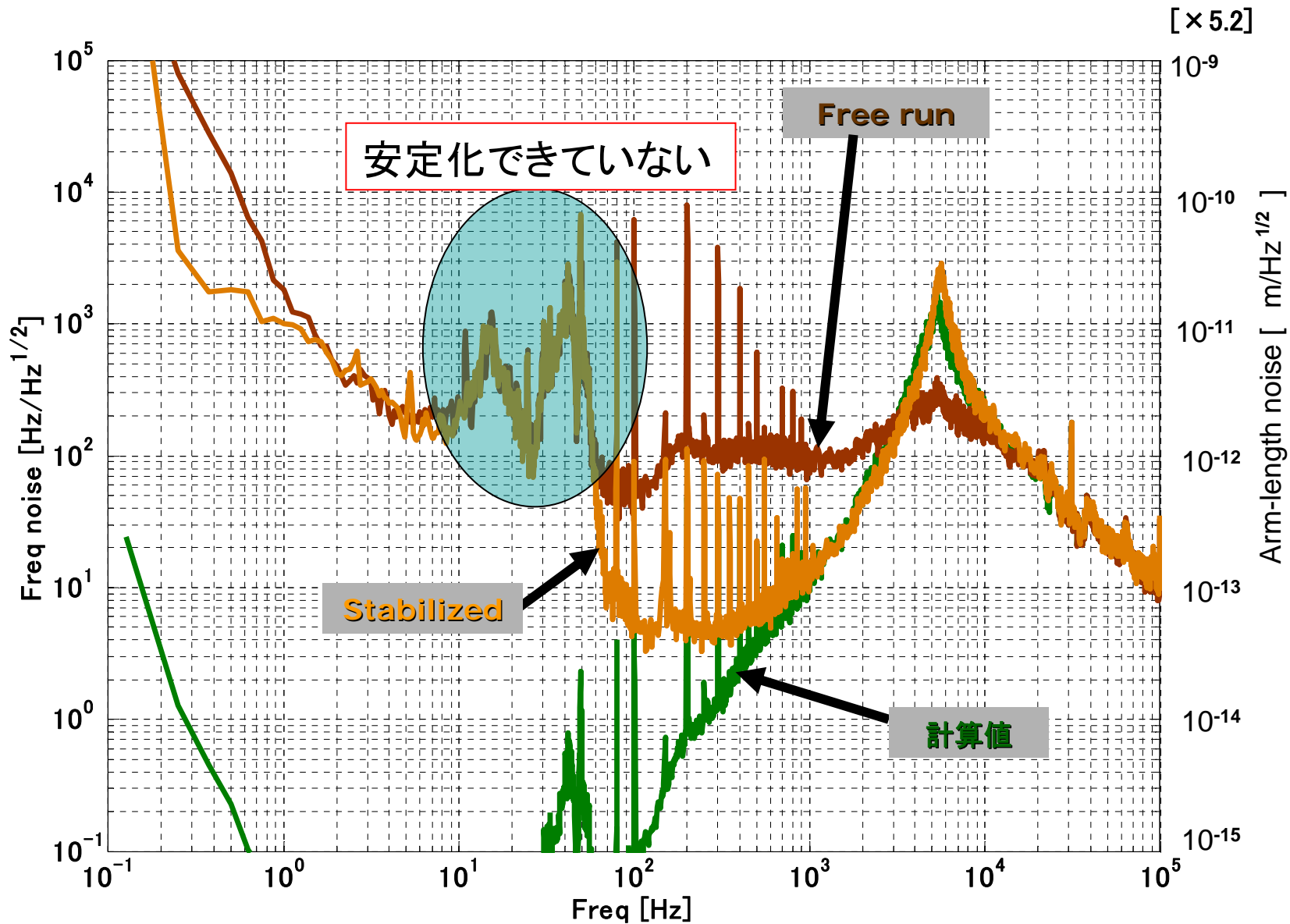
防振ゴム

フィルター調整(+マッキングジェル)

サスペンション(ノイズが悪化)



周波数安定度の履歴

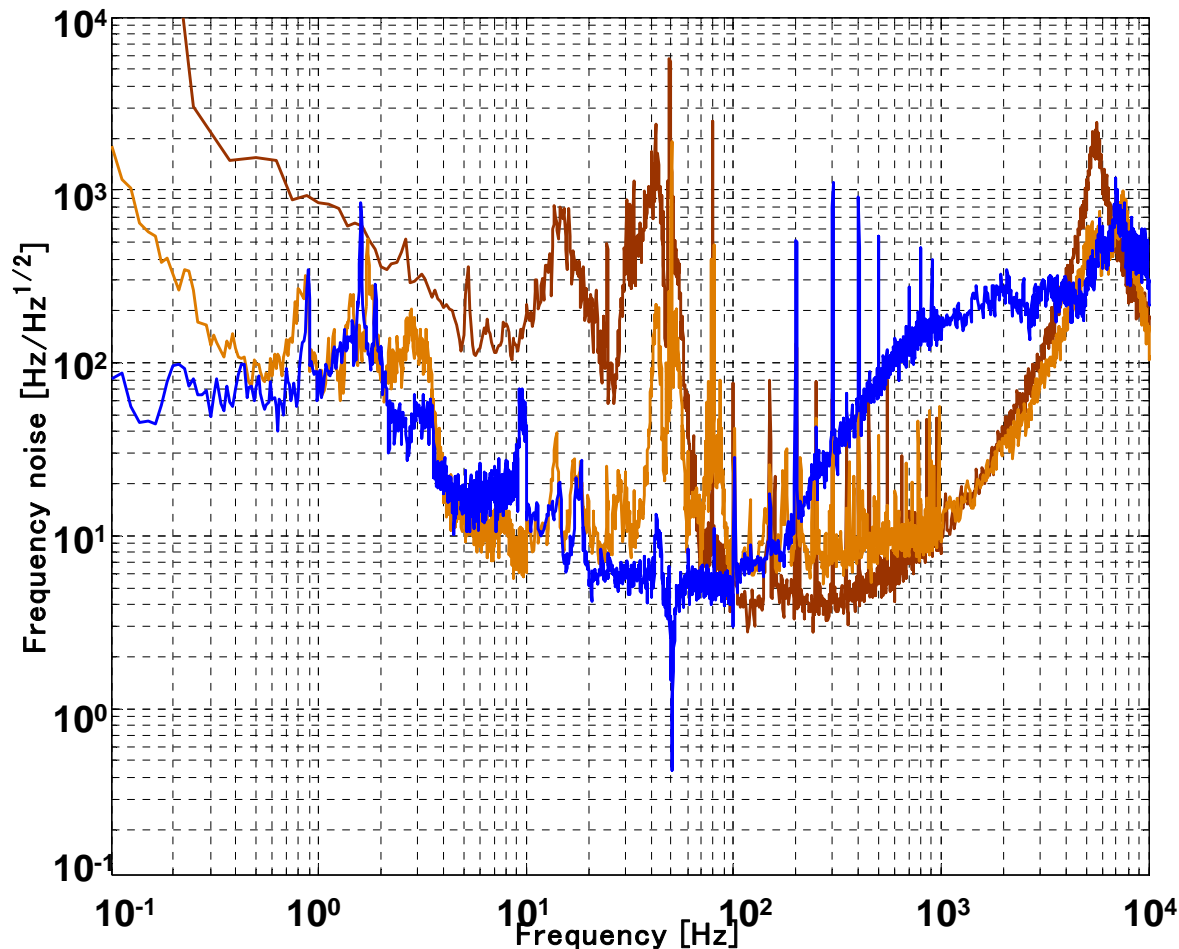


周波数安定度の履歴

追加要素:

サスペンション

110m干涉計



- 10Hz~100Hzにかけての大きなノイズが消えた
- 1Hz周辺に共振とみられるピーク
- 10m→110mでの大きな違いは見られない

3.4 周波数安定化結果(2)

