

# 広帯域制御のためのフォトメカニカル アクチュエータの開発とその応用

東京大学  
新領域創成科学研究科 物質系専攻  
三尾研究室  
M2 町田 幸介

重力波研究交流会 (2009 2/6)



# 発表の流れ

- 実験の背景

- 広帯域制御のためのアクチュエータ

- 実験の目的

- 実験

- 電磁アクチュエータの作製
- 電磁アクチュエータの評価
- 電磁アクチュエータの応用  
(位相雑音補償と共振器長制御)

- まとめ



# 広帯域制御のためのアクチュエータ

## ■ 要求

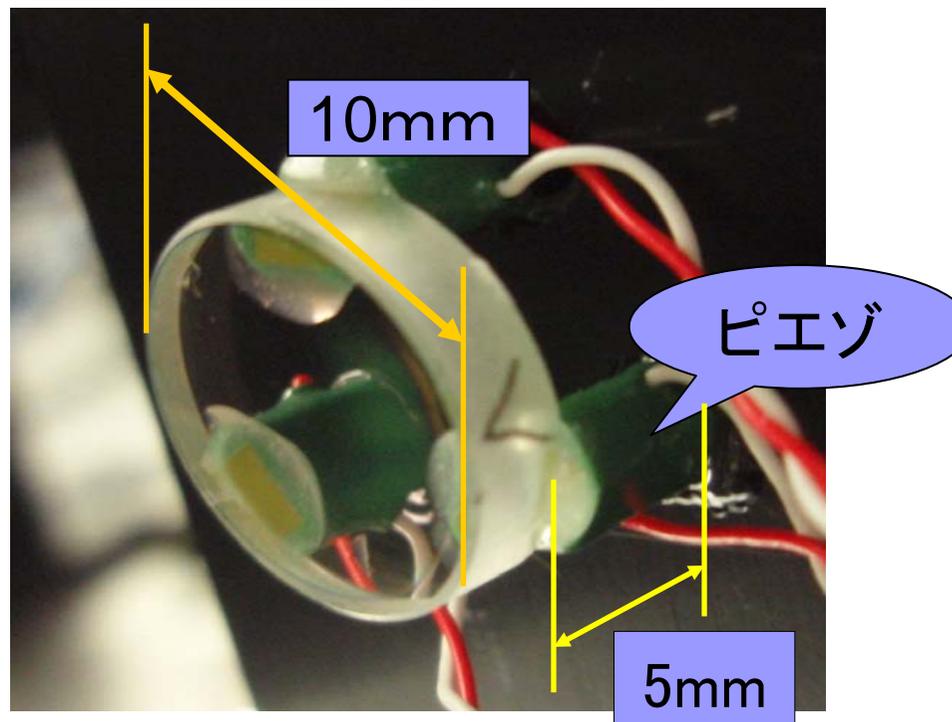
- 1 $\mu$ m以上の広いダイナミックレンジ
- 10kHzを越える制御帯域
  - 高周波数帯域(10k-100kHz)に共振がない

## ■ 例

- ピエゾアクチュエータ
- 電磁アクチュエータ
  - ボイスコイルモータ
- 静電アクチュエータ

# ピエゾアクチュエータ

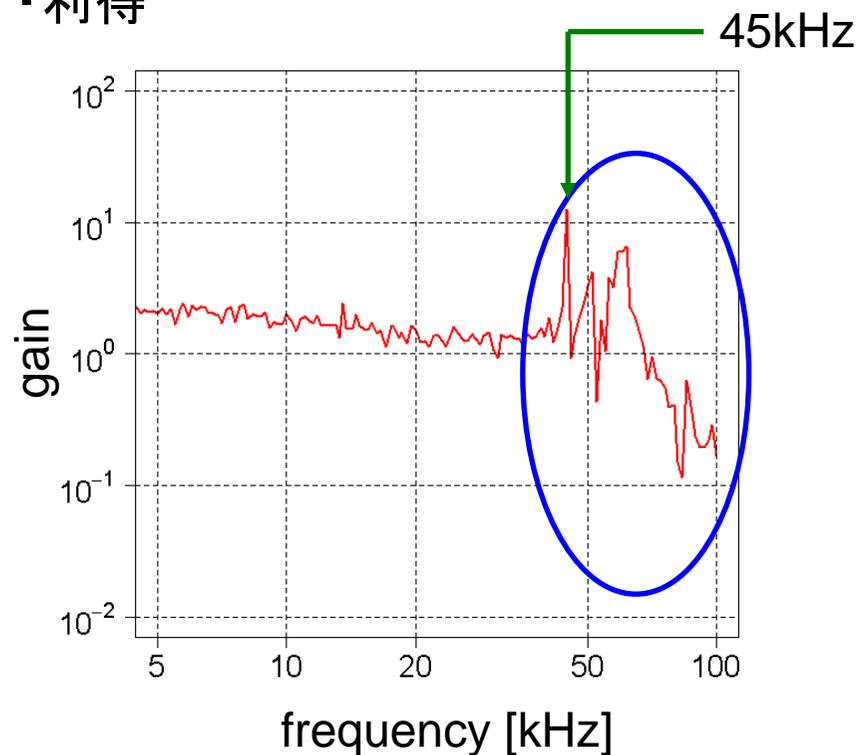
- 直径10mmの1064nm用高反射ミラーに接着
- 大きなダイナミックレンジを持つピエゾの中では高速  
(最大変位:5 $\mu$ m @150V)



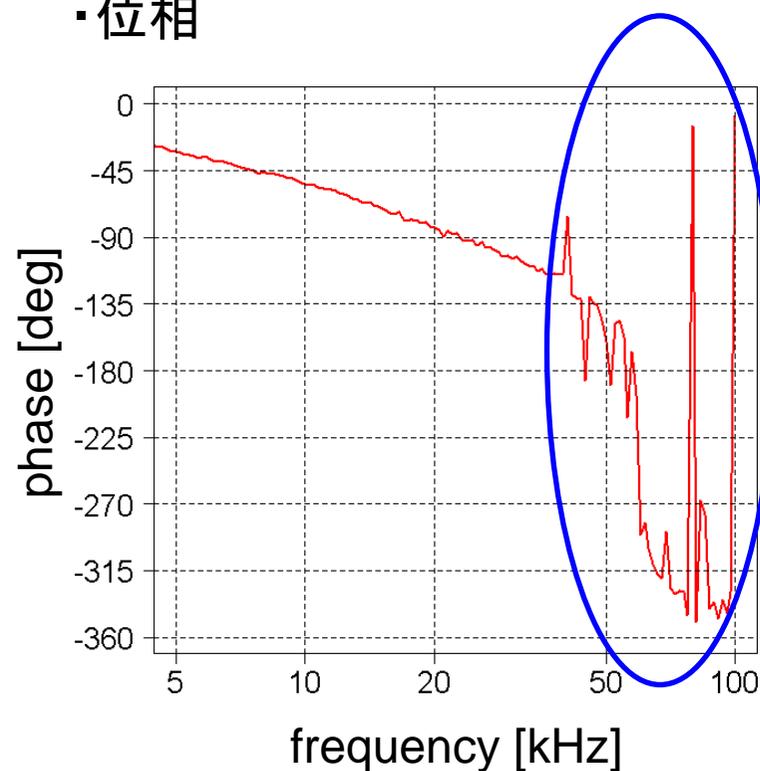
# ピエゾアクチュエータの評価

## ■ ピエゾアクチュエータの周波数応答関数

・利得



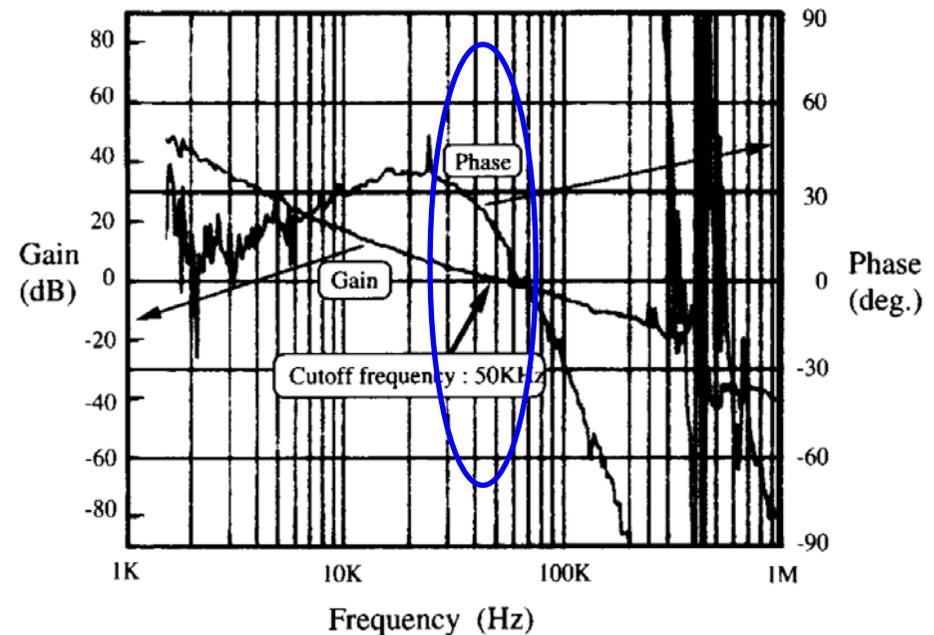
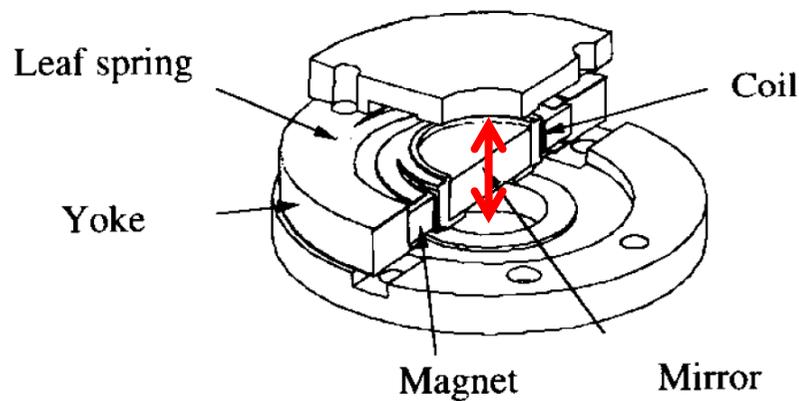
・位相



最大制御帯域が10kHz以下

# ボイスコイルモータ

- 素晴らしい特性を持つ特別なボイスコイルモータが存在するが、とても複雑な構造をしている



M. Oka, L.Y. Liu, W. Wiechmann, N. Eguchi, and S. Kubota, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS VOL. 1, NO. 3, SEPTEMBER 1995



# ピエゾアクチュエータとボイスコイルモータ

## ■ ピエゾアクチュエータ

○広いダイナミックレンジ(1 $\mu$ m以上)

×最大制御帯域が10kHz以下(数10kHzに共振)

## ■ 高速ピエゾアクチュエータ

○高周波数帯域に共振無し

×狭いダイナミックレンジ(1nm以下)

## ■ ボイスコイルモータ

○広いダイナミックレンジ

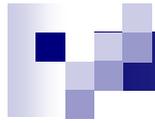
○高周波数帯域に共振無し(10k-100kHz)

×複雑な構造



# 実験の目的

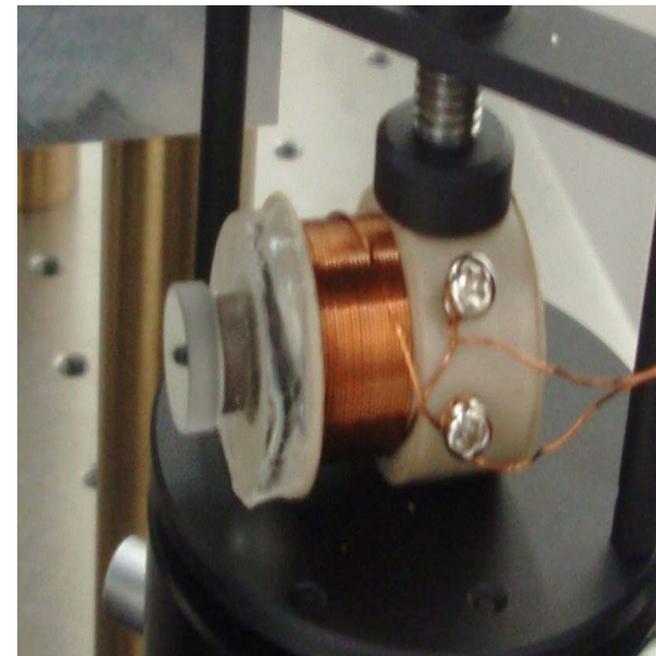
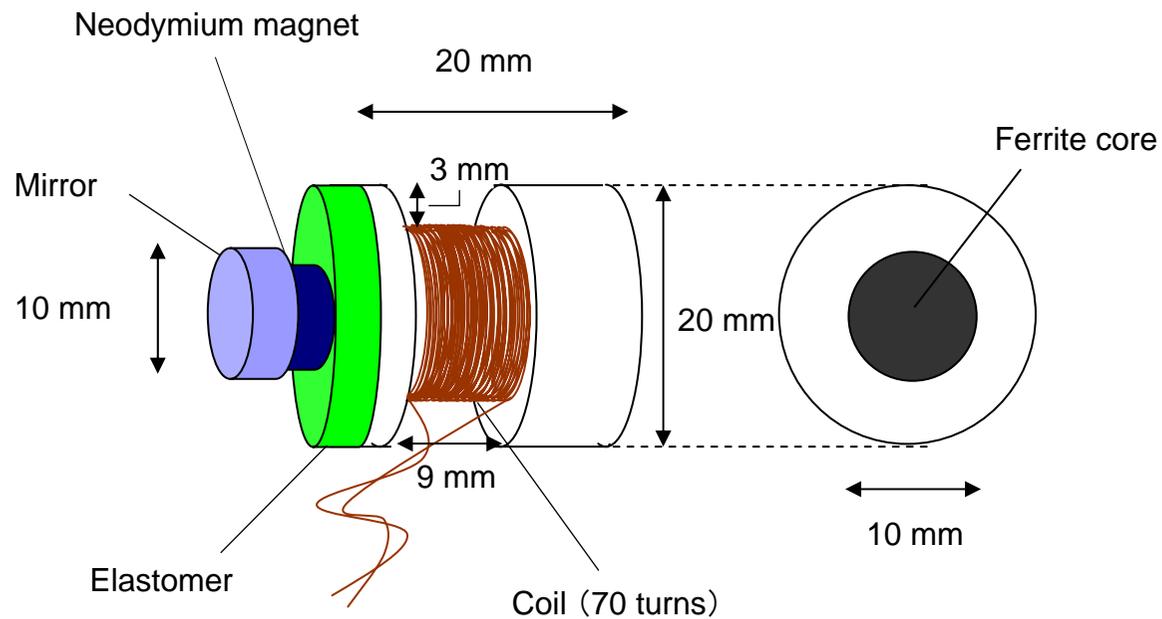
- 高速に駆動するフォトメカニカルアクチュエータの作製
  - シンプルな構造
  - 広いダイナミックレンジ(1 $\mu$ m以上)
  - 高周波数帯域に共振無し(10k-100kHz)
  
- ・電磁アクチュエータの作製
- ・作製したアクチュエータの特性の評価
- ・作製したアクチュエータの応用  
(位相雑音補償と共振器長制御)



# 電磁アクチュエータの 作製・評価

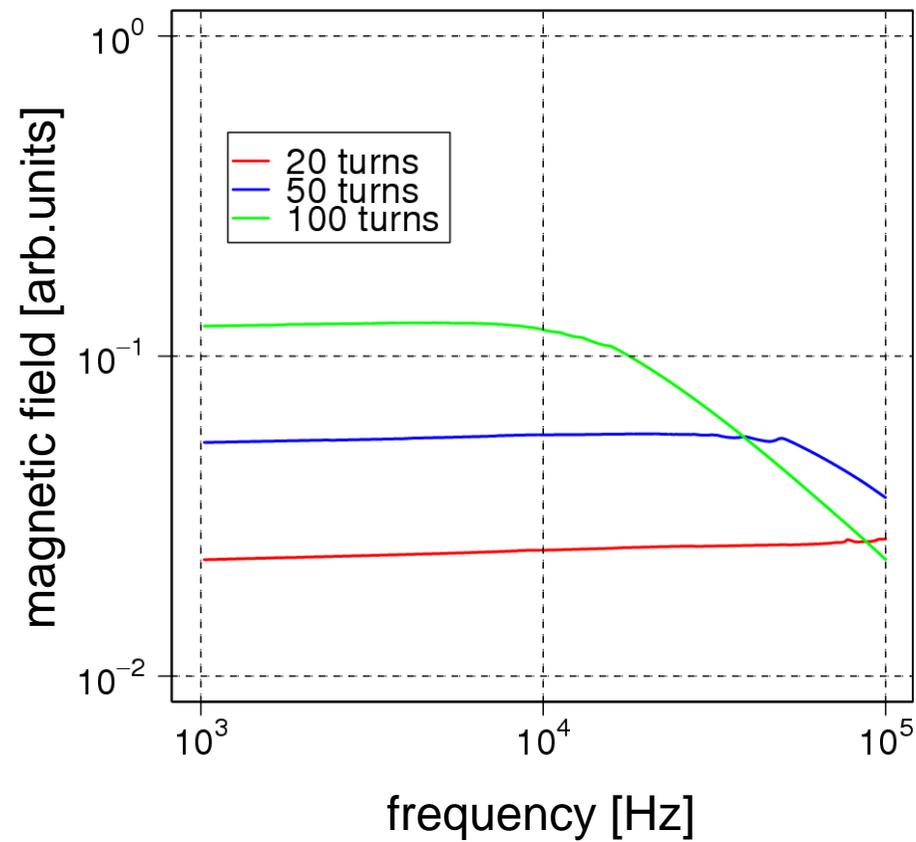
# 電磁アクチュエータ

## ■ 可動磁石型アクチュエータ



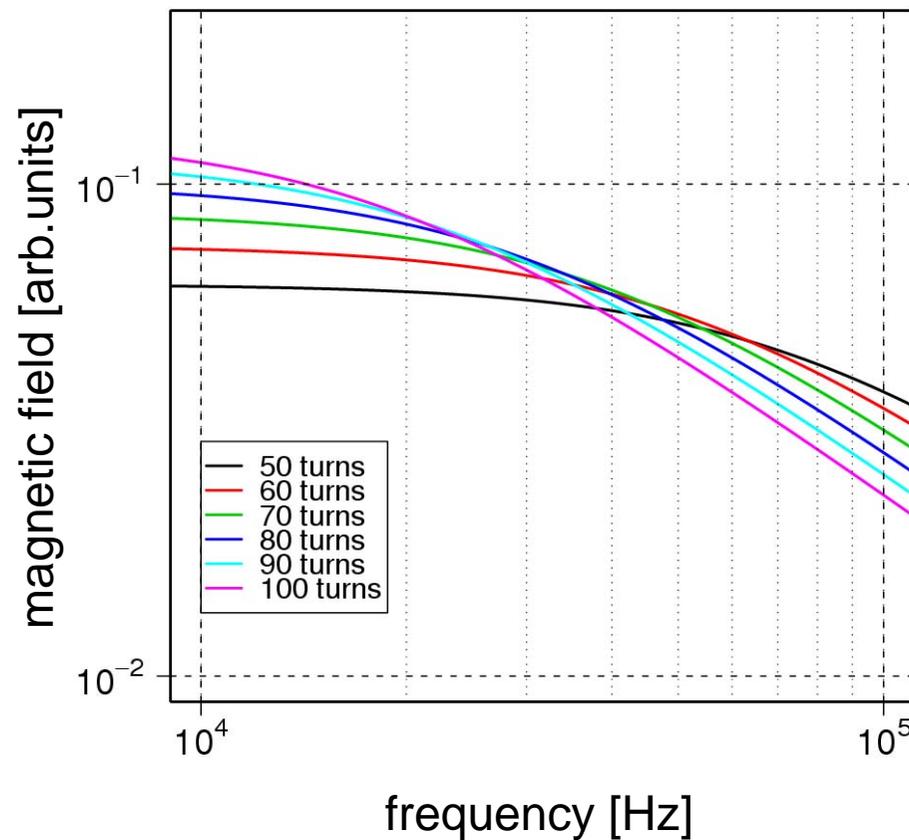
# コイルの作る磁場の大きさ

- 各周波数に対する最大磁場



# コイルの作る磁場の大きさ

- 各周波数に対する最大磁場のフィッティング



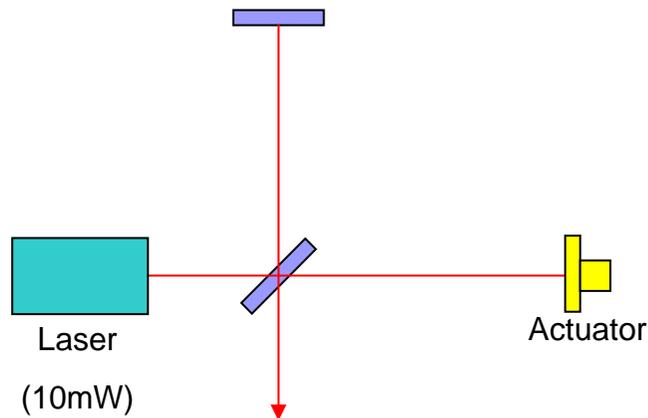
$$H_{fit} = \left| aN \frac{1}{1 + ifN^2 / b} \right|$$

$$a = 1.3 \times 10^{-3}$$

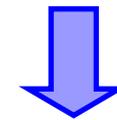
$$b = 1.9 \times 10^8$$

# 電磁アクチュエータの評価

## ■ 光学系(マイケルソン干渉計)



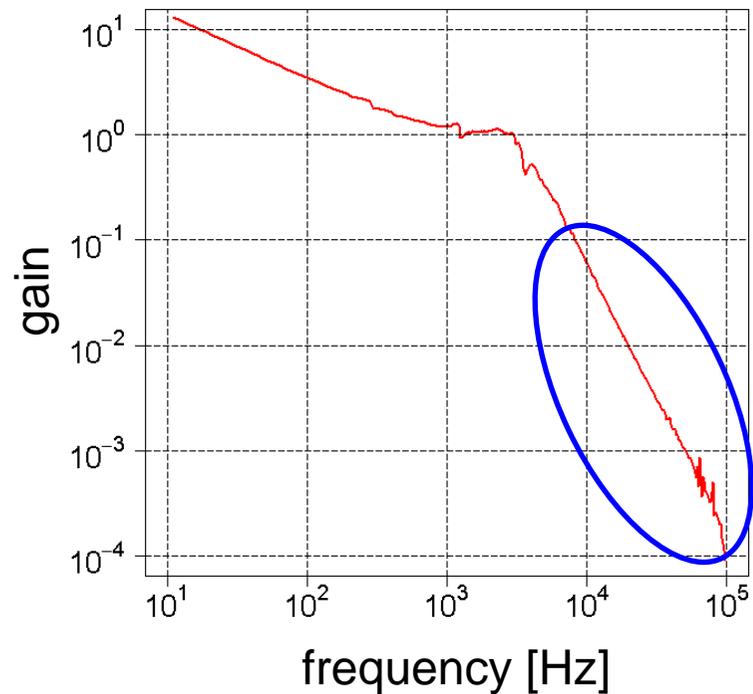
アクチュエータで干渉計を  
ミッドフリンジにロック



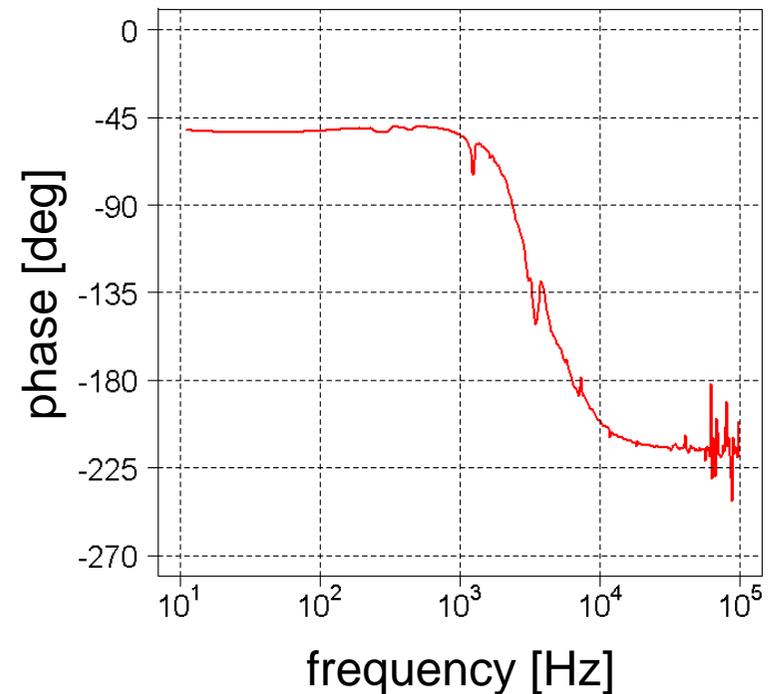
コイルに流れる電流の変化に対  
する干渉計の変位信号の変化を  
調べることによってアクチュエータ  
の周波数特性を測定

# 周波数応答関数

・利得

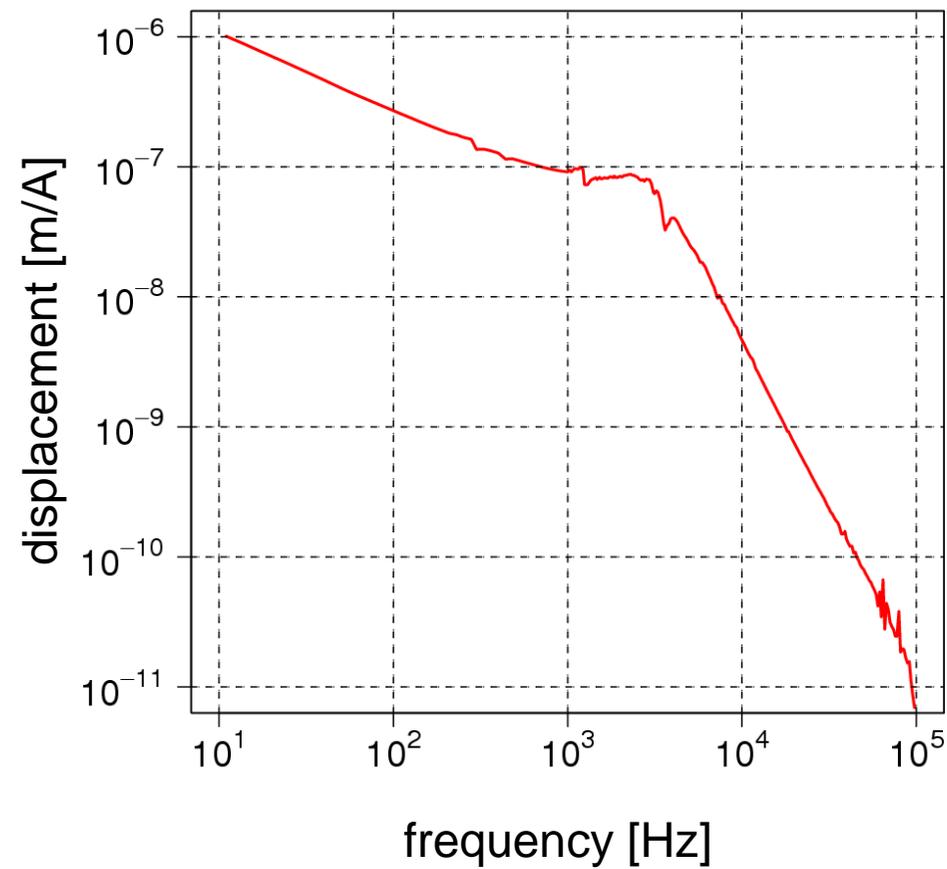


・位相



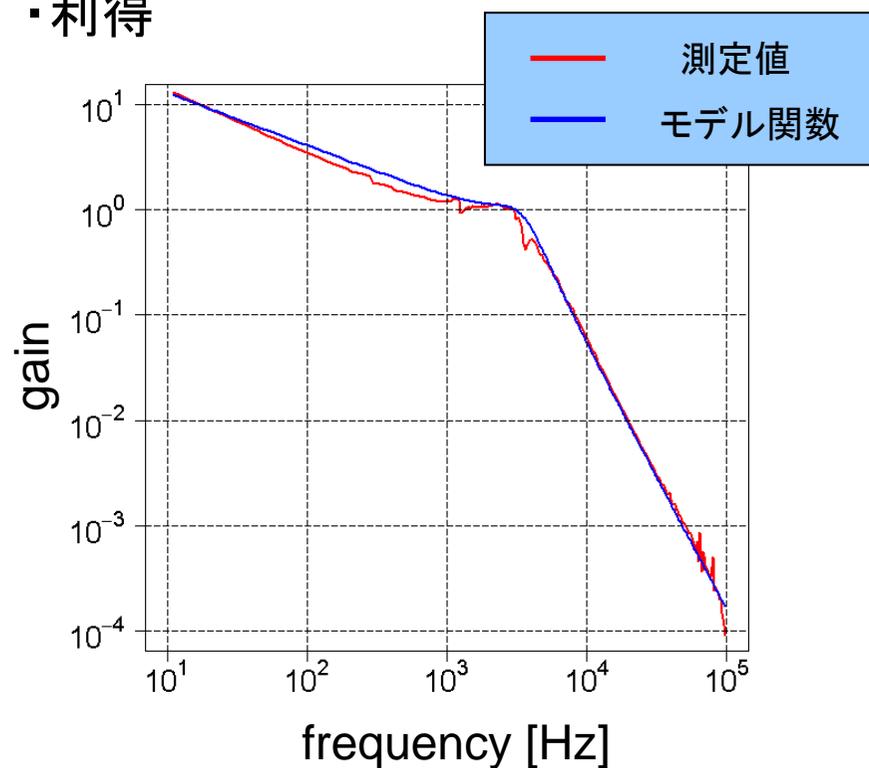
10kHz以上のところにアクチュエータの持つ共振はない

# アクチュエータの動かせる距離

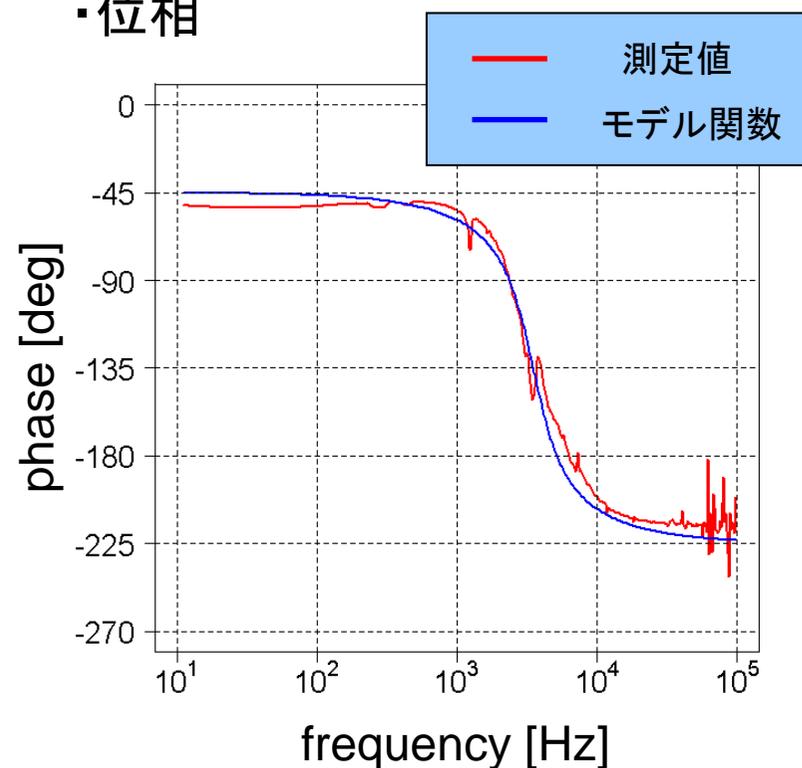


# モデル関数でフィッティング

・利得



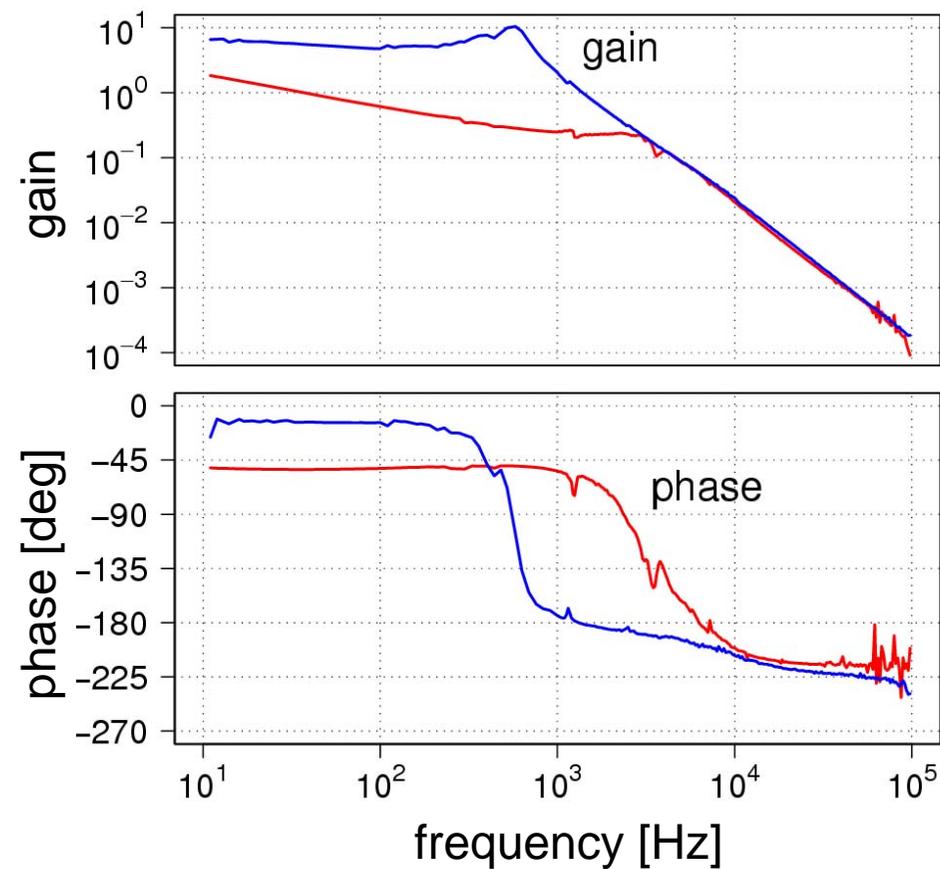
・位相



モデル関数・・・  $\frac{1}{\sqrt{if/f_1}} \times \frac{1}{1-(f/f_2)^2 + if/f_2 Q}$

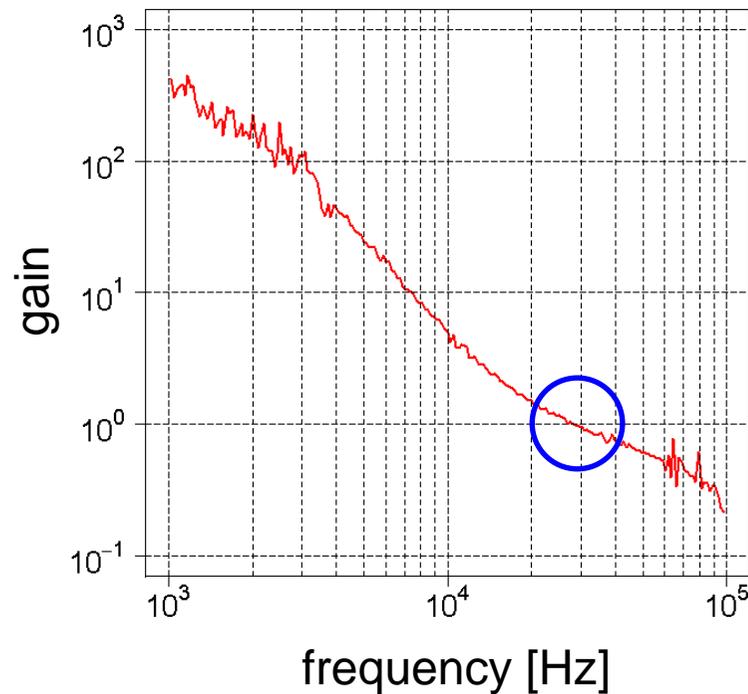
$f_1 \approx 1.7\text{kHz}, f_2 \approx 3.5\text{kHz}$   
 $Q \approx 1.1$

# エラストマーの種類による違い

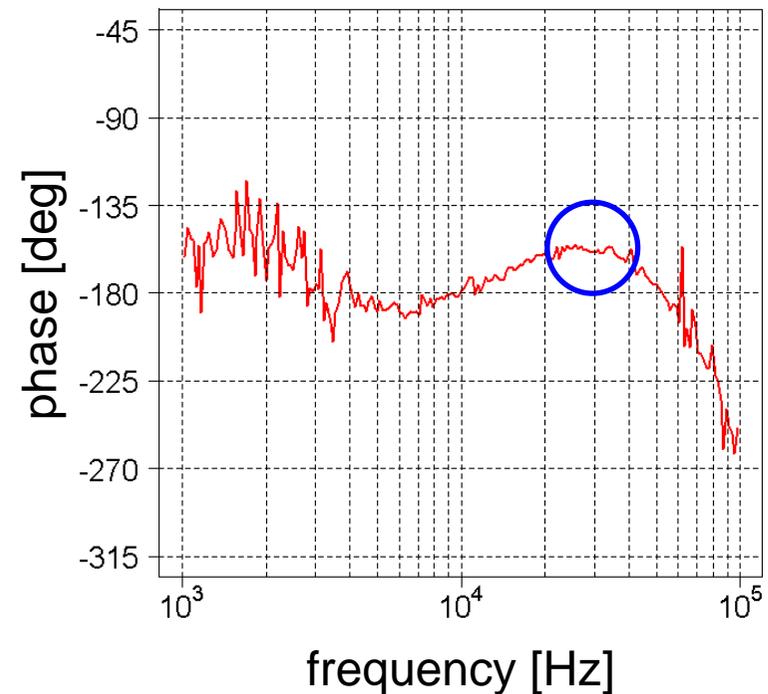


# オープンループ伝達関数

・利得



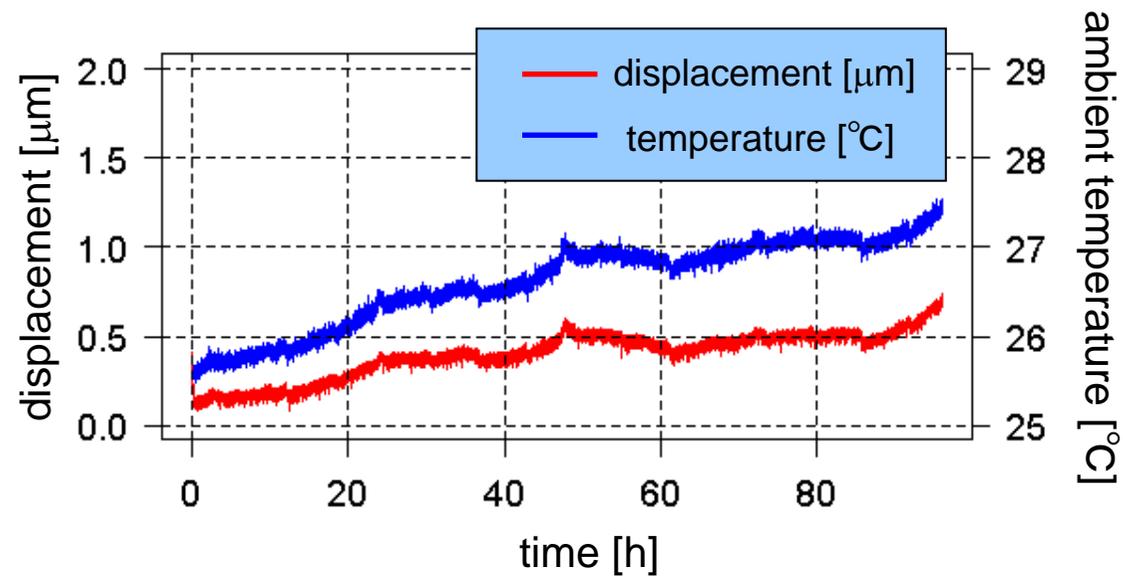
・位相



単位利得周波数:30kHz 位相余裕:22°

# 長期安定度

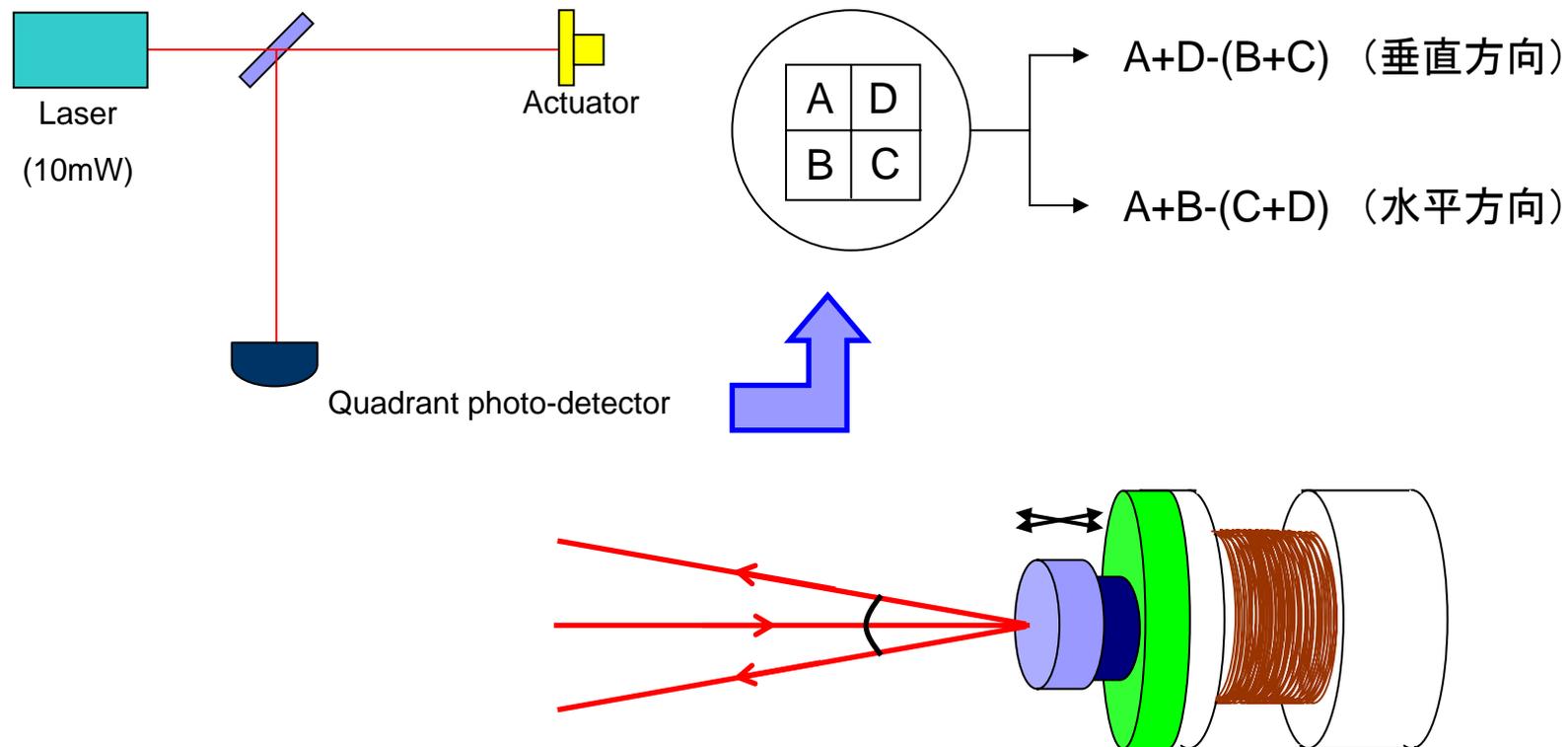
- 安定した長期駆動を達成



周辺温度の変化によってミラーの位置はドリフト

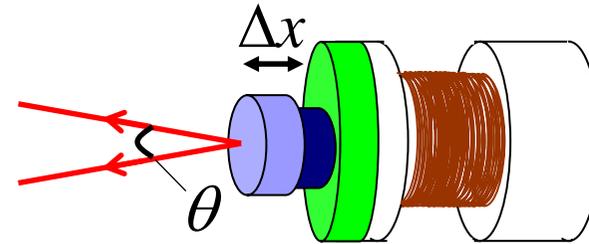
# ミラーの角度揺れ測定

- 4分割フォトディテクタを用いて、ミラーの角度揺れを測定

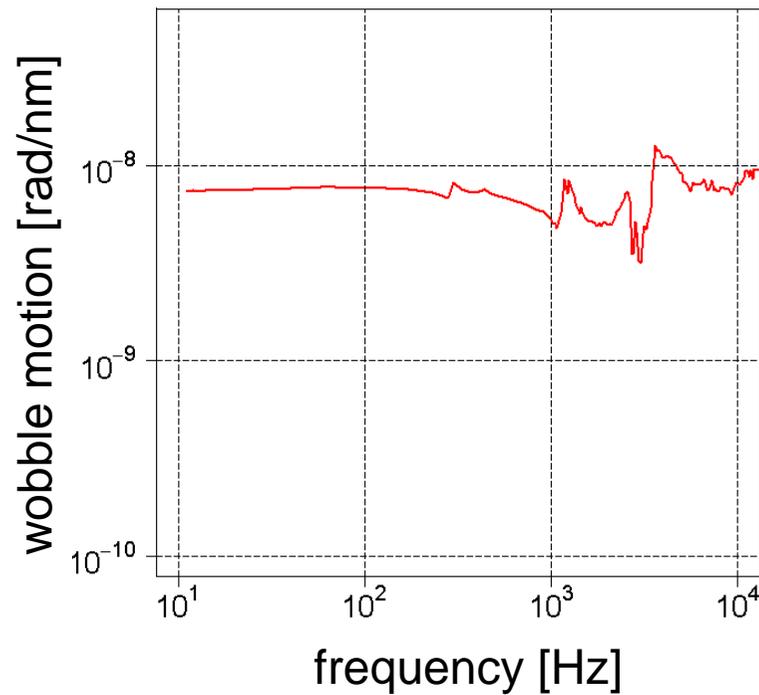


# ミラーの角度揺れ

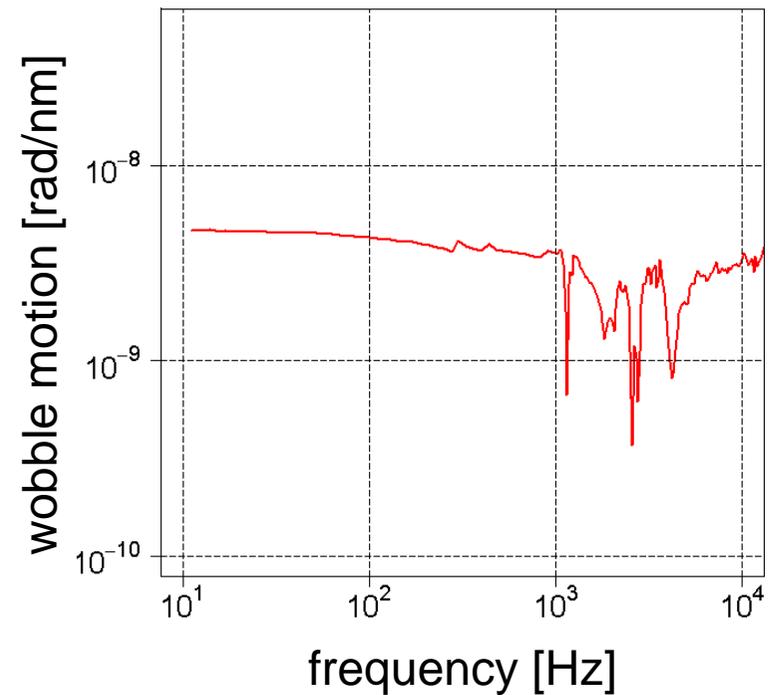
- ミラーの角度揺れ ( $\frac{\theta}{\Delta x}$ )



・垂直方向



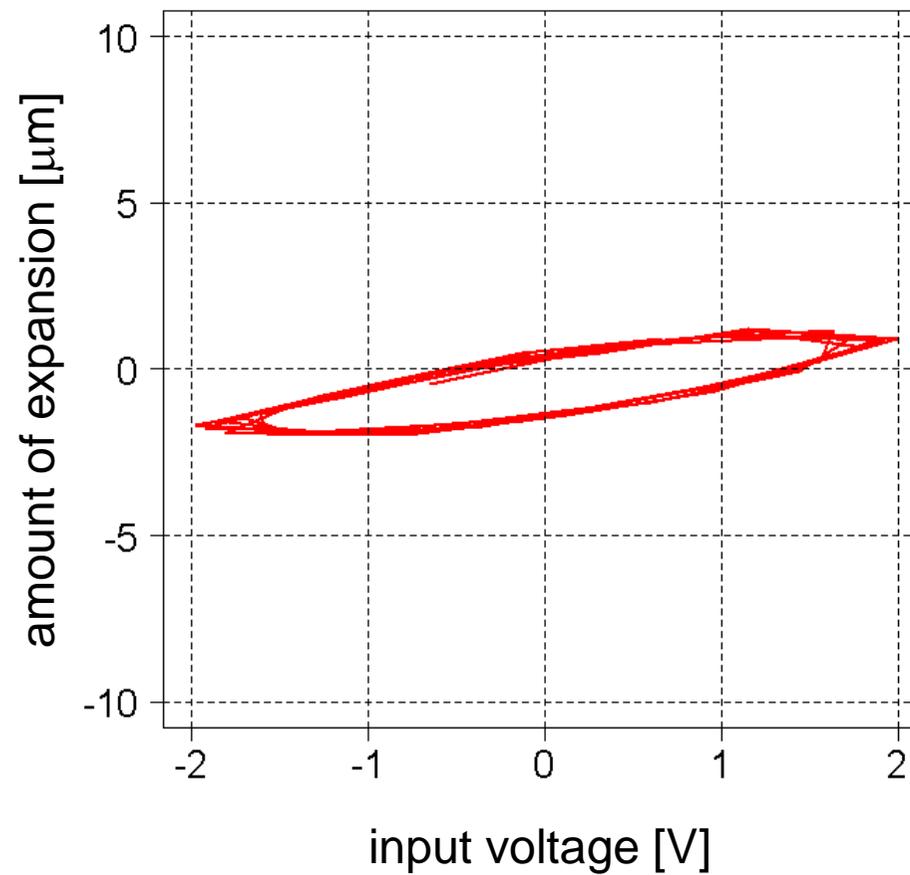
・水平方向



大きな角度揺れ無し

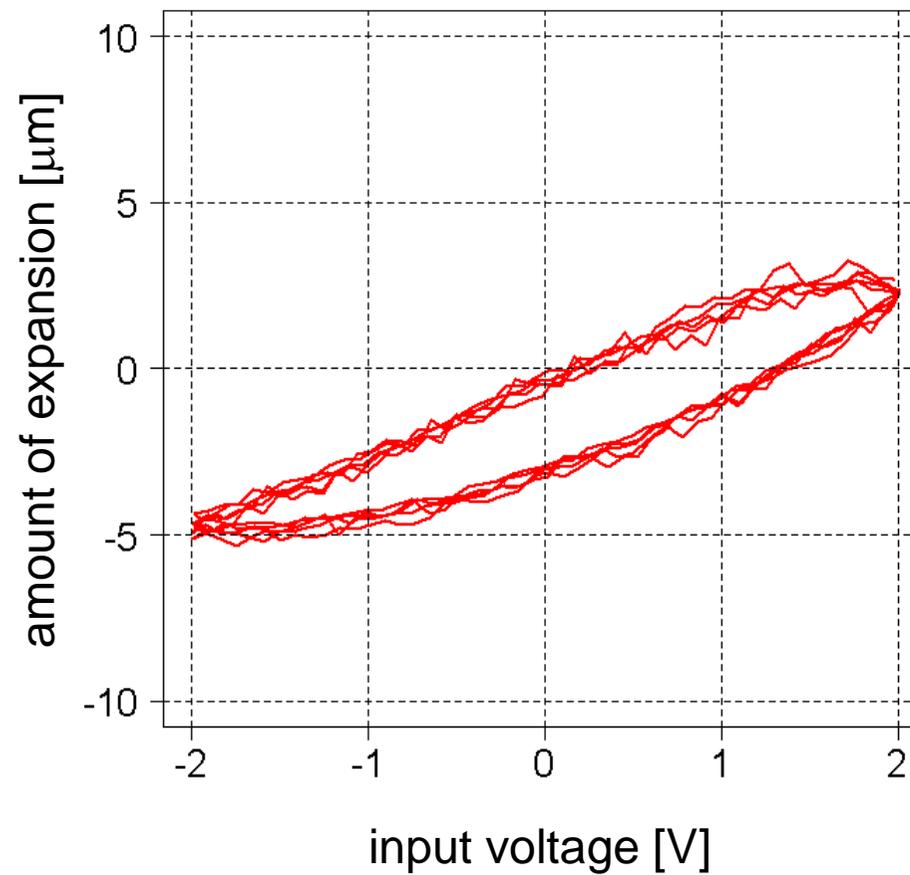
# ヒステリシス

- 0.1Hzで動かしたとき



# ヒステリシス

- 0.01Hzで動かしたとき





# アクチュエータの応用

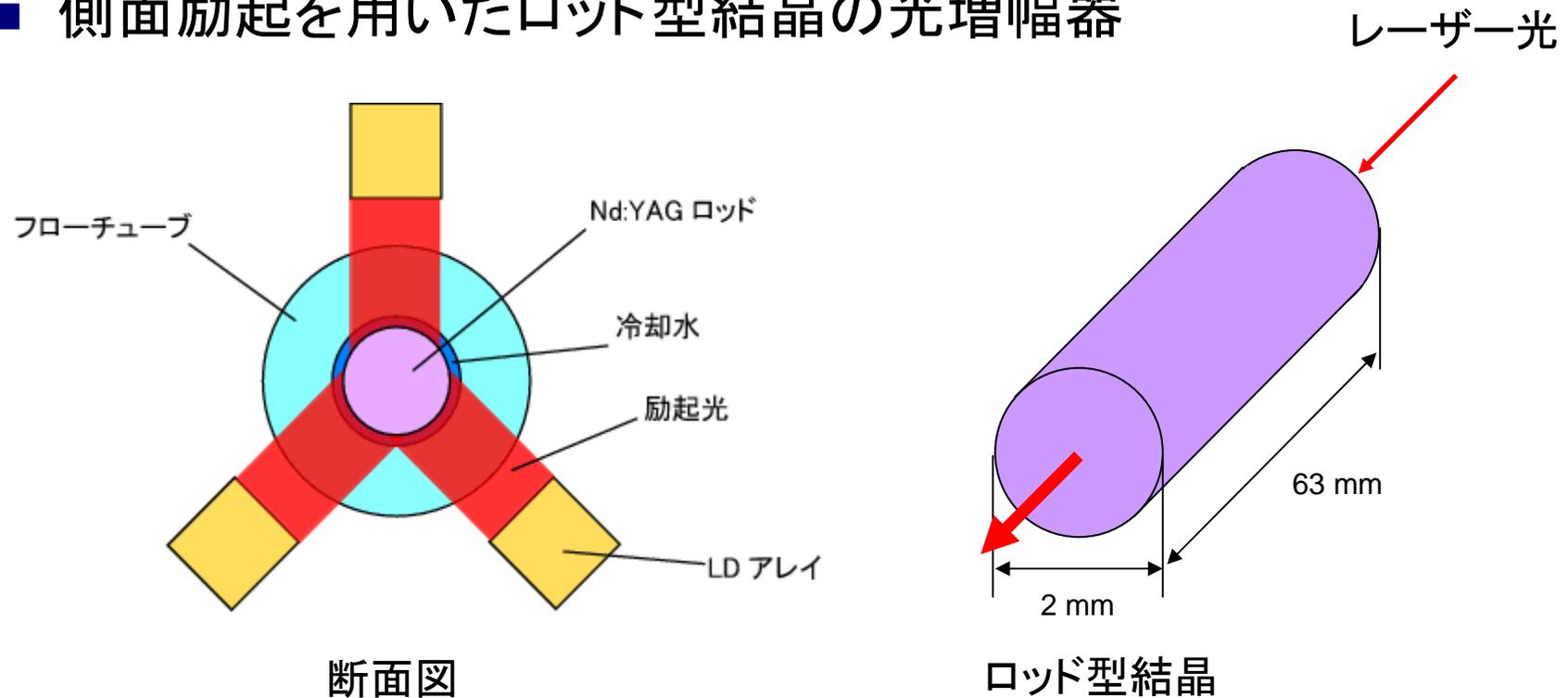
- 作製したアクチュエータが，他の制御に応用出来るかを確認するために実際に二種類の制御を行った
  - 光増幅器によって生まれる位相雑音の補償
  - モードクリーナーの共振器長制御



# 光増幅器によって生まれる 位相雑音の補償

# 光増幅器

## ■ 側面励起を用いたロッド型結晶の光増幅器

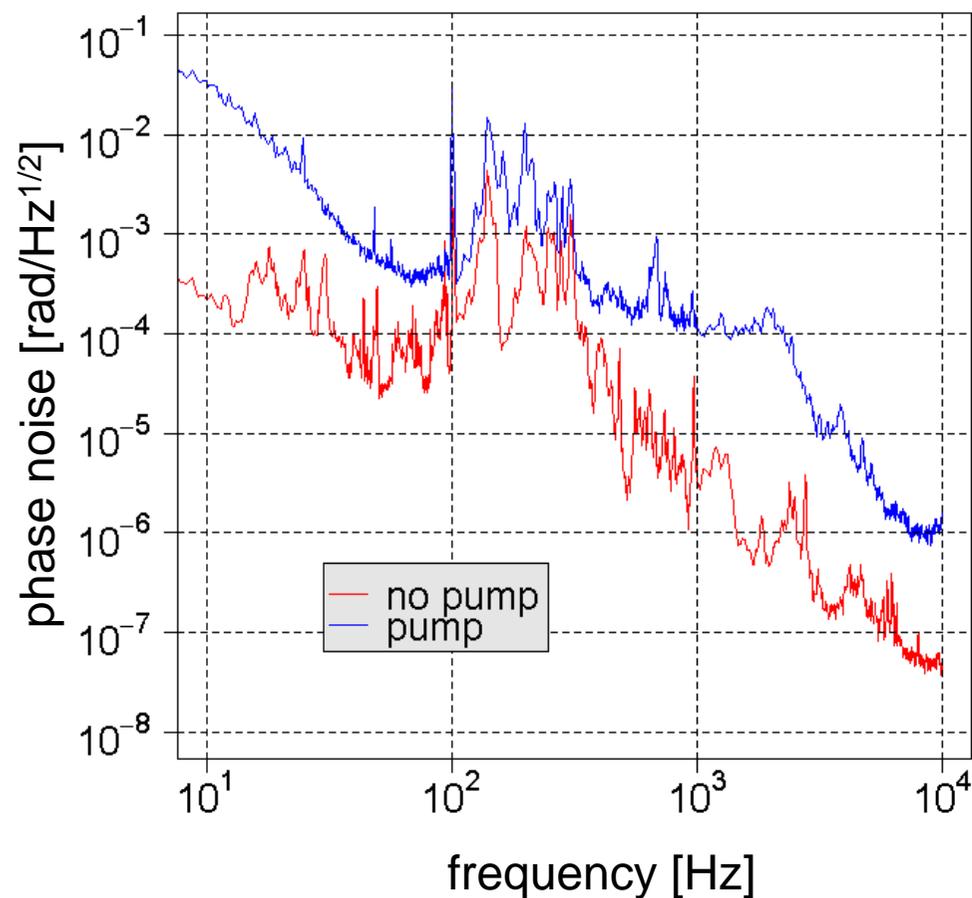


- ・冷却水による振動
- ・励起によるロッド内の屈折率の揺らぎ

➡ 付加的な位相雑音

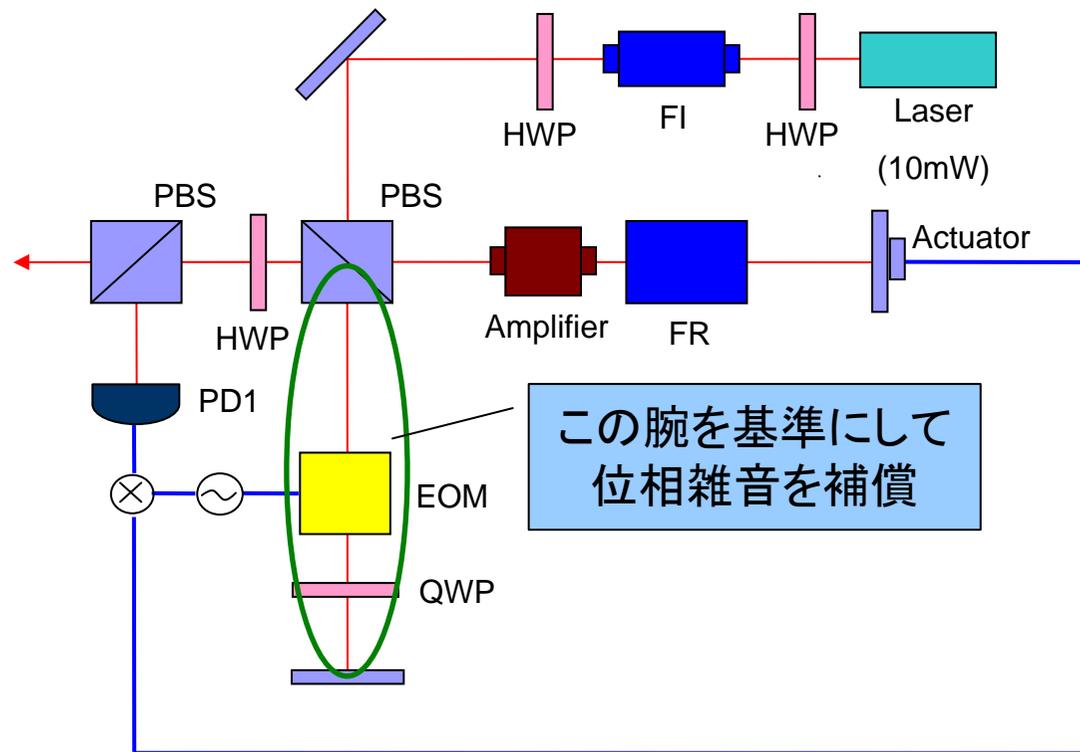
# 光増幅器が生み出す位相雑音

- 光増幅器を励起しているときとしていないときの比較



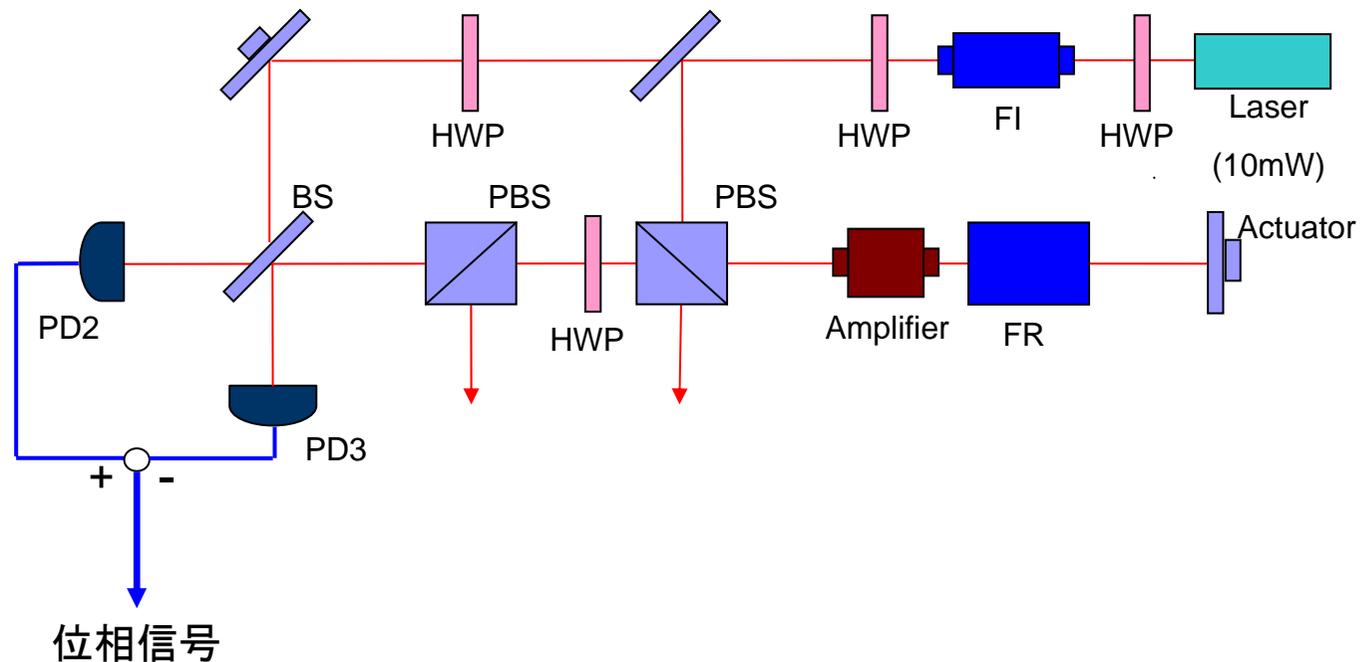
# 位相雑音補償のための実験系

- 電気光学変調器(EOM)を用いて制御

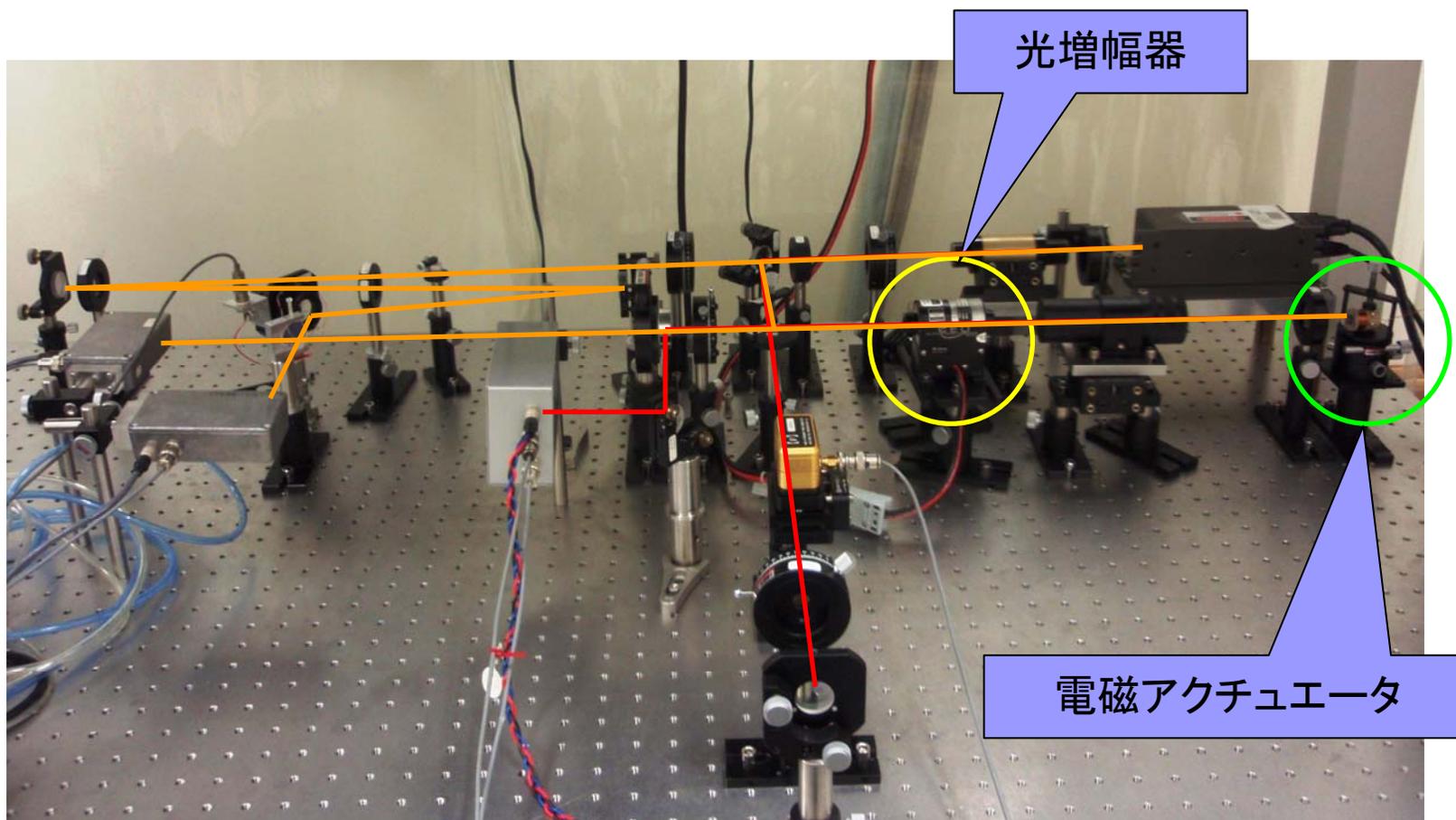


# 位相雑音評価のための実験系

- 位相雑音が補償されているかを確認するための実験系

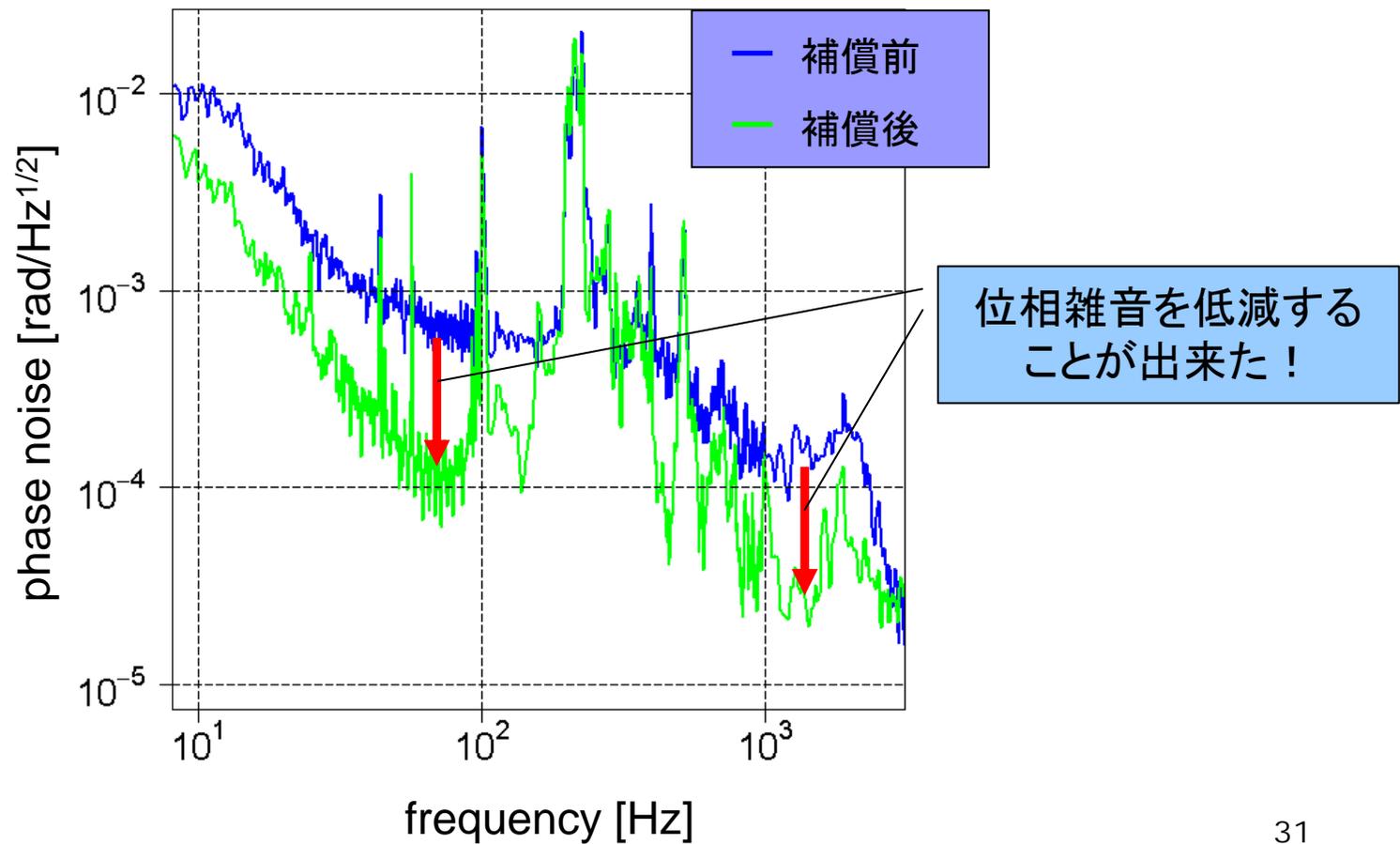


# 位相雑音補償・評価のための実験系



# 位相雑音補償の結果

- 位相雑音を低減出来ることを確認

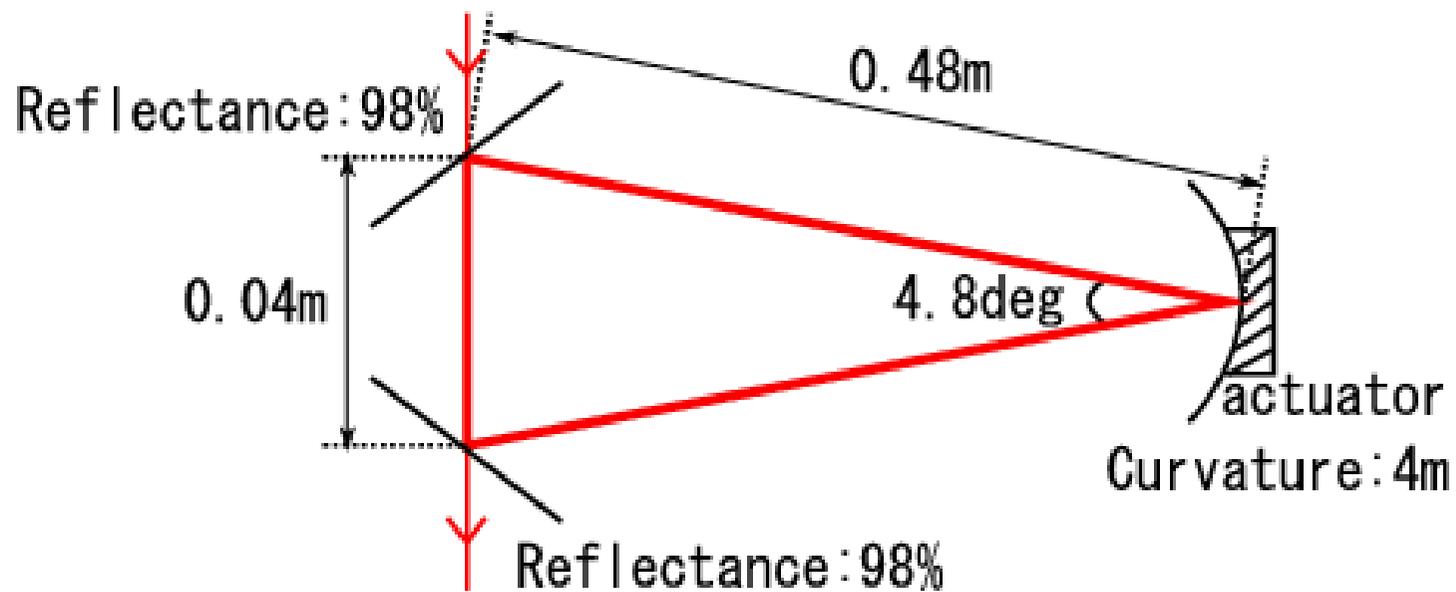




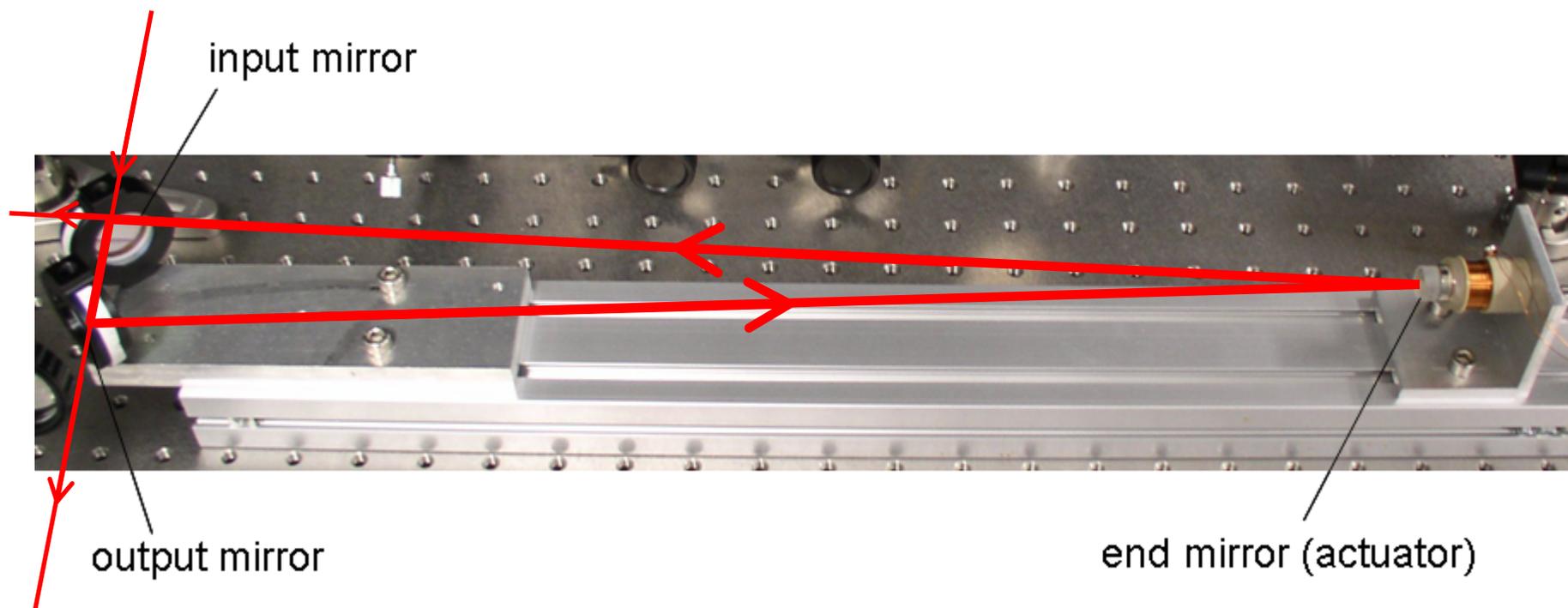
# モードクリーナーの 共振器長制御

# モードクリーナーの設計

- モードクリーナー … 基本モードのビームを透過させ、高次のビームを取り除く共振器
- 高出カレーザー用のモードクリーナーを設計

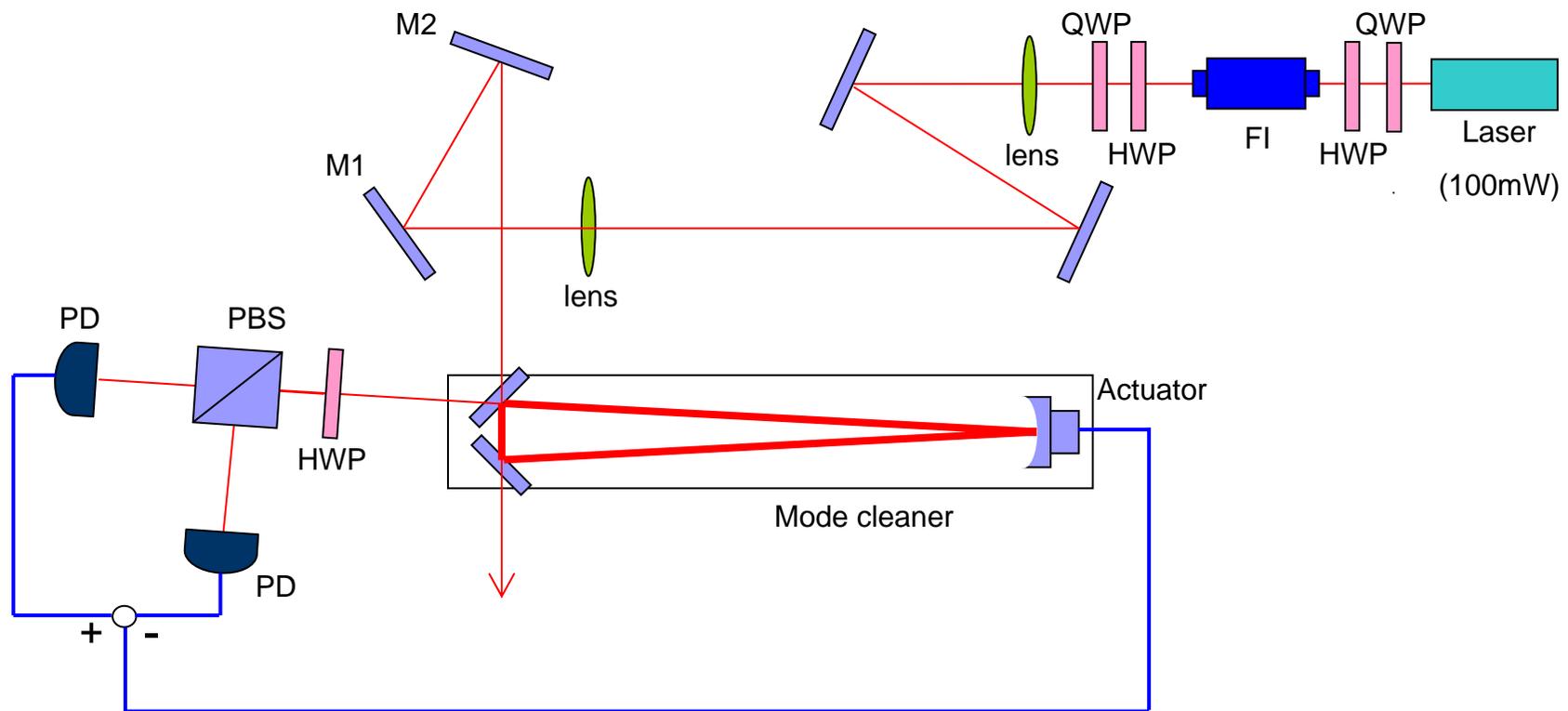


# モードクリーナーの作製

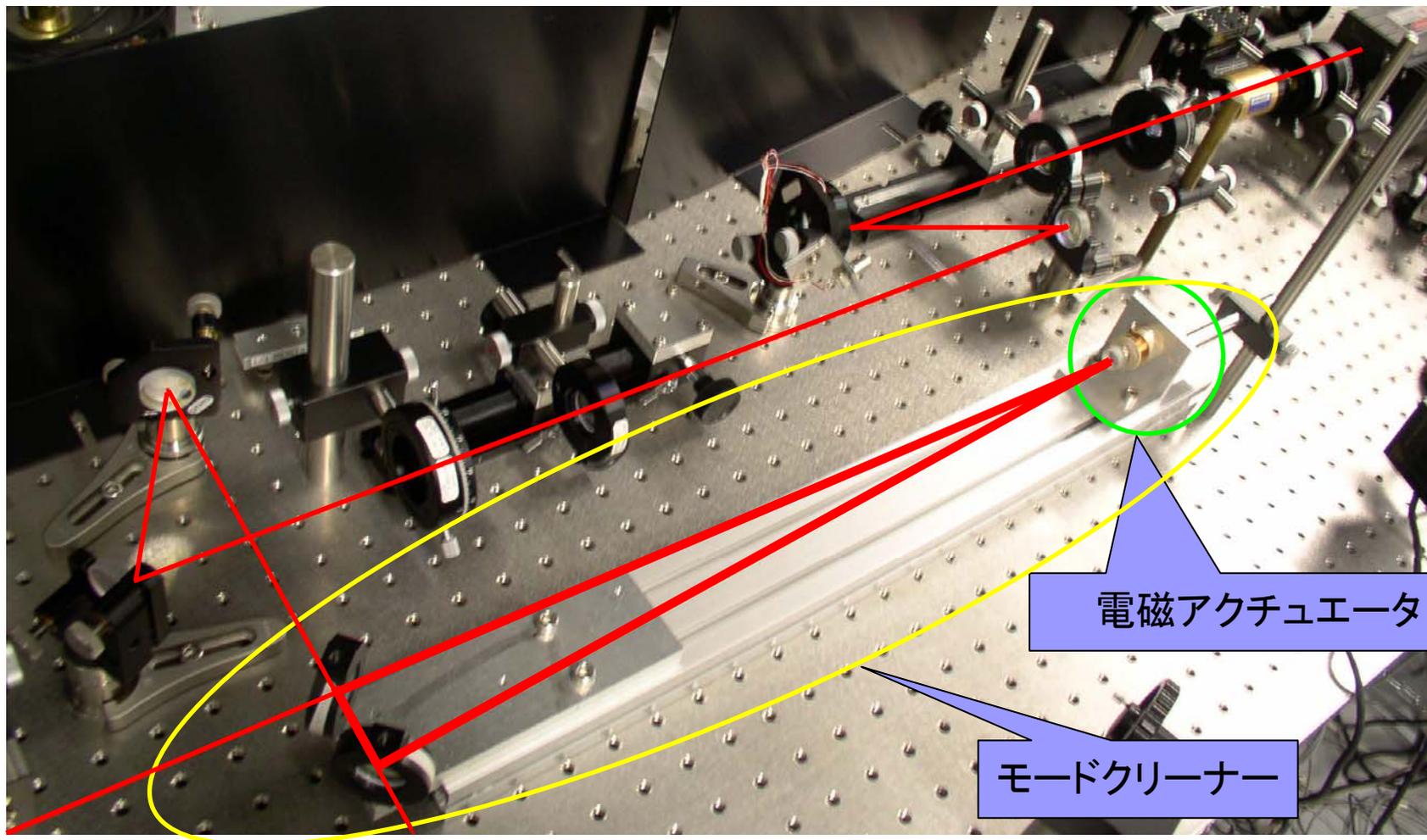


# モードクリーナー制御のための実験系

- この光学系でモードマッチング

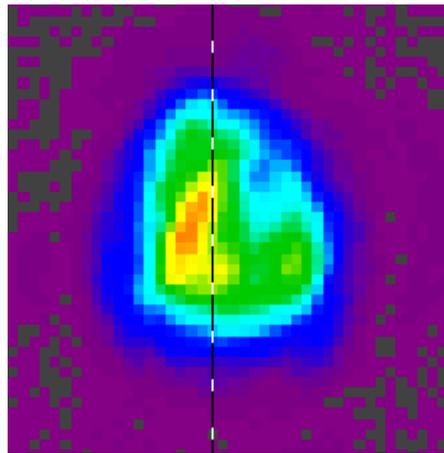


# モードマッチングのための光学系

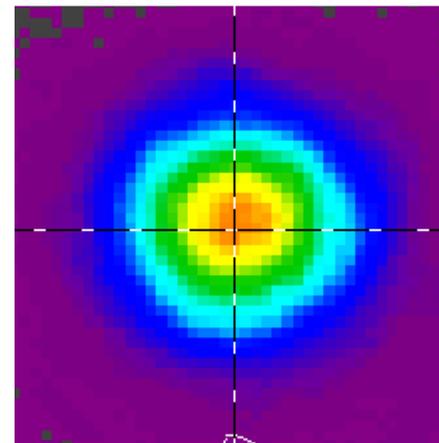


# モードクリーナーによるモード整形

- モードクリーナー透過後は、ビームがきれいになっている



透過前

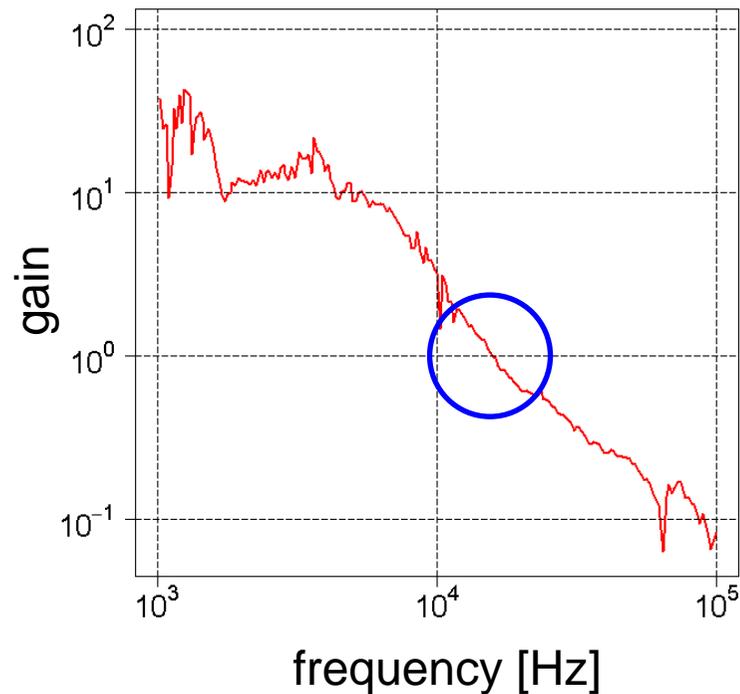


透過後

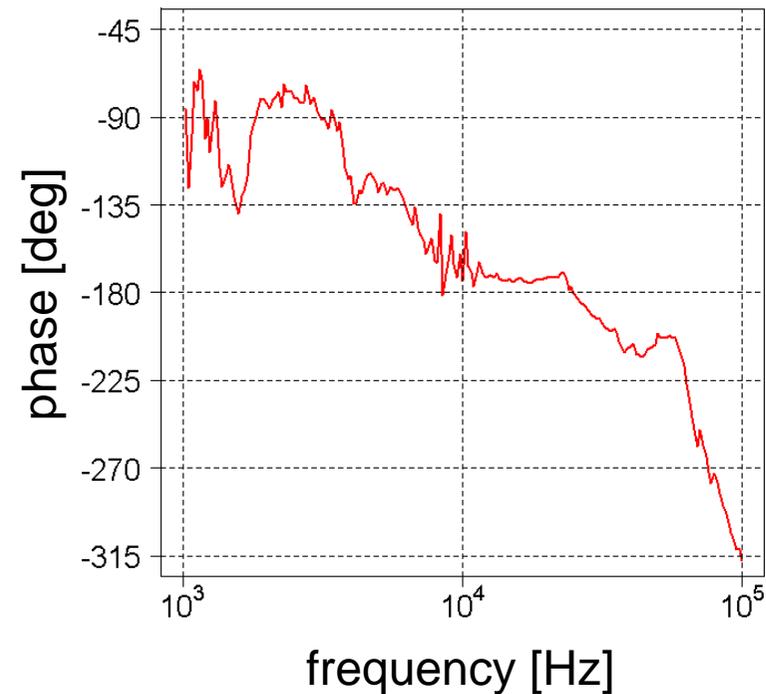
# モードクリーナー制御の制御帯域

## ■ オープンループ伝達関数

・利得



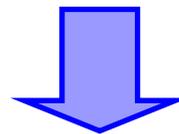
・位相



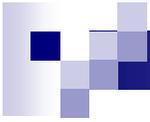
制御帯域:16kHz

# まとめ

- 新しい高速に駆動するアクチュエータを作製した
  - シンプルな構造
  - 広い制御帯域  
(単位利得周波数:30kHz, 位相余裕:22° )
  - 安定した動作  
(長期安定, 大きな角度揺れ無し)
  - 他の制御に応用可能  
(共振器長制御において, ピエゾアクチュエータを越える制御帯域)



多くの光学的応用にこのアクチュエータが利用可能である



**Fin.**