

重力波検出器KAGRAのための 量子雑音低減法の開発(4)

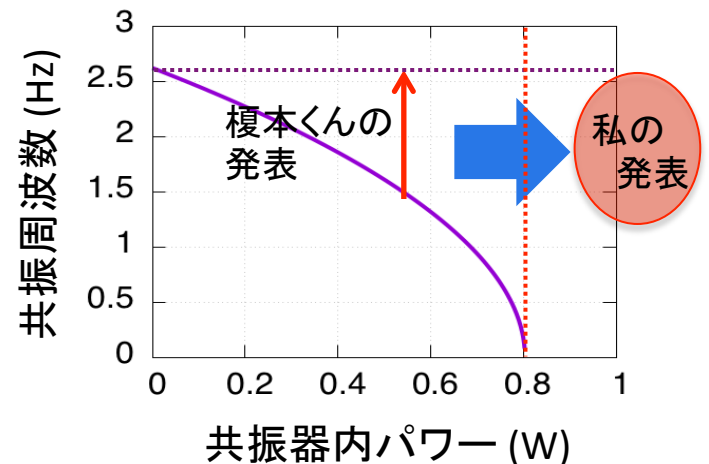
東大宇宙線研, 東大工^A

長野晃士、榎本雄太郎、中野雅之、
古澤明^A、川村静児



イントロダクション

- 我々は、ポンデロモーティブスキューニングとホモダイン検波を利用した輻射圧雑音低減技術の実証に向けて、輻射圧雑音に制限された観測の実現を目指している。
- これまでに、共振器が不安定にならないような低パワーにおいて、共振周波数を測定するという方法で、共振器の角度不安定性が回転方向制御によって低減させることを確かめた。(榎本くんの発表)
- さらに、共振器が角度方向に不安定になるような高いパワーにおいても、共振器を安定に動作させられることを直接確かめることは、依然として非常に重要である。



実験系

参照 榎本他[21pCE-10]

Mar 21 2016, JPS meeting @東北学院大

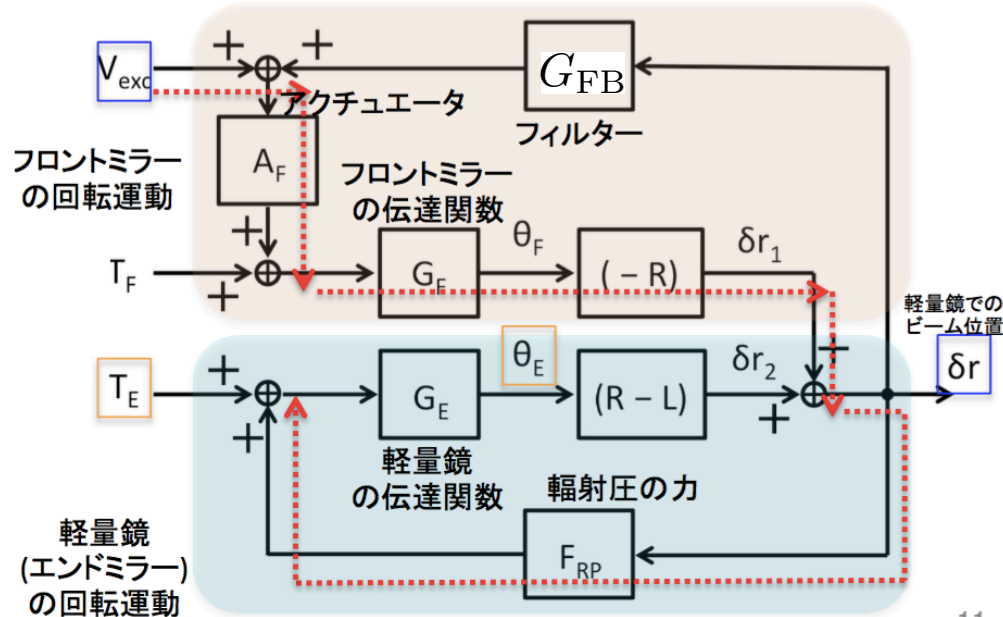
回転の制御と伝達関数測定法

-- 制御により、反バネトルク T_{RP} が

$$T_{\text{RP}} = (R - L)F_{\text{RP}}\theta_{\text{E}} \rightarrow T_{\text{RP}} = \frac{1}{1 + H}(R - L)F_{\text{RP}}\theta_{\text{E}}$$

のように変化。 $(H = G_{\text{FB}} A_{\text{F}} G_{\text{F}} R; \text{上のループのループゲイン})$

=> 反バネトルクが $1 + H$ 倍だけ抑えられる!!



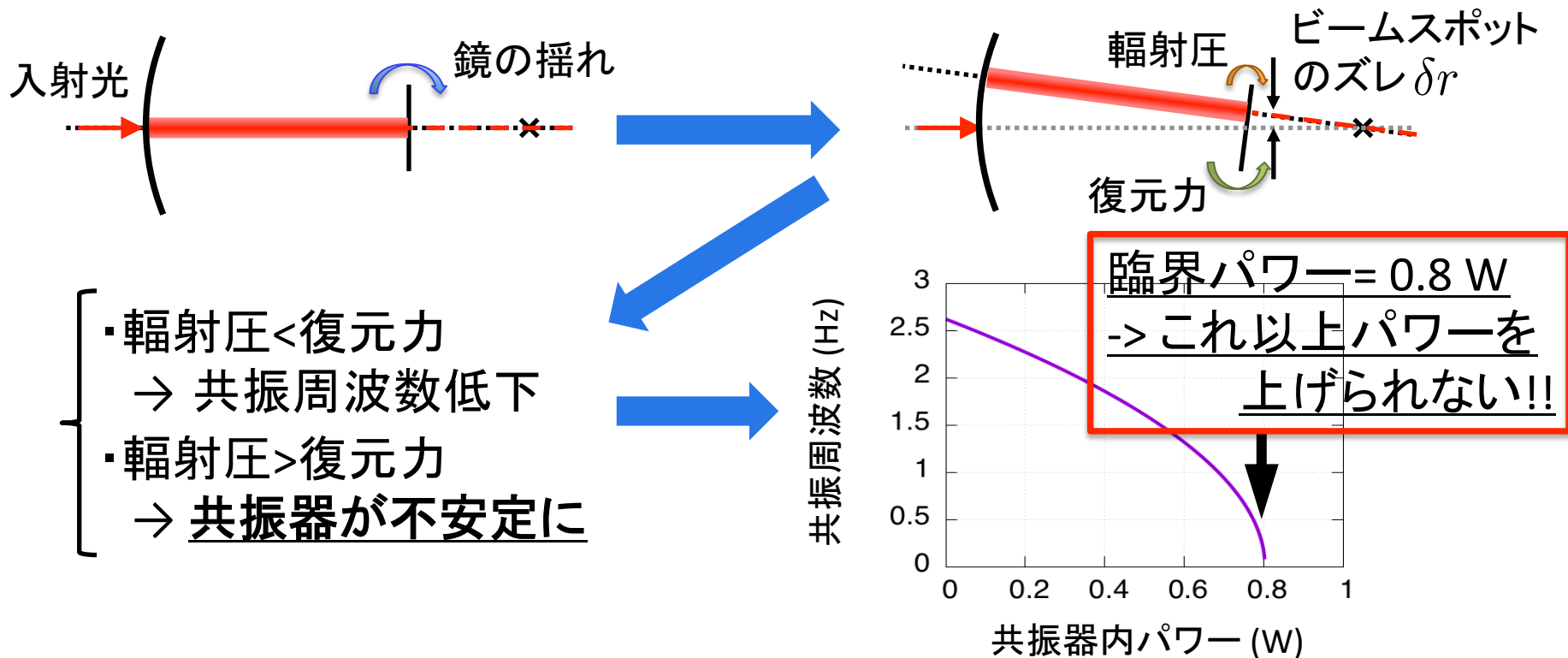
11

共振器の回転方向不安定性

- 共振器が角度方向に不安定になるような高いパワーにおいても、共振器を安定に動作させられることを確かめたい。
- そもそも、なぜ共振器が不安定になるのかを、フィードバックという観点からもう一度確認する。

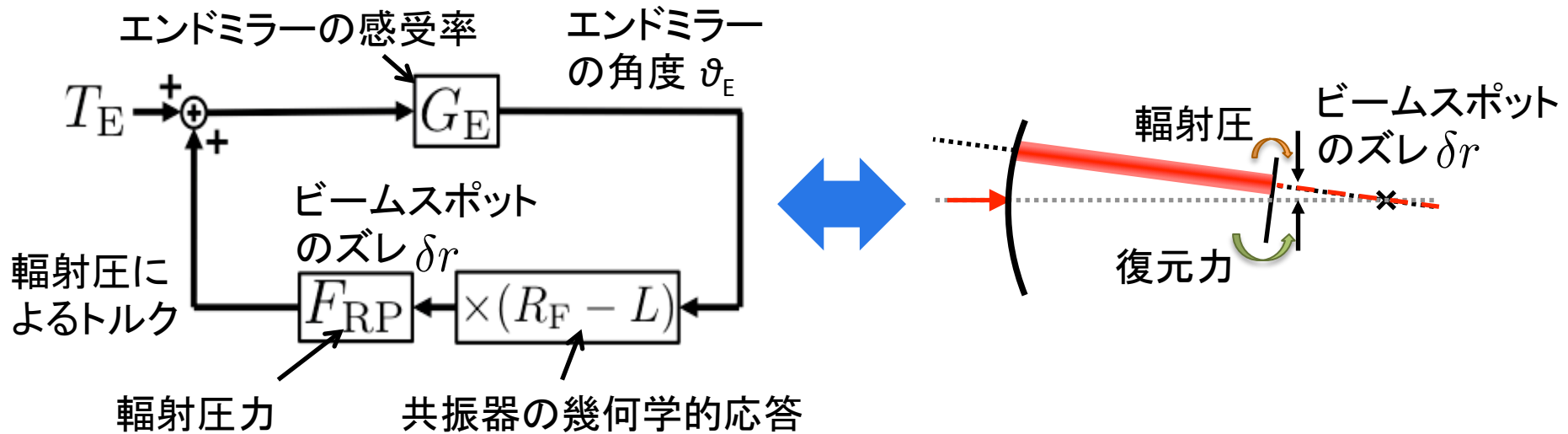
共振器の回転方向不安定性

- 共振器内パワーが上昇すると、回転方向の実効的なバネ定数が低下し、バネ定数が負になってしまうと、共振器が不安定になる。



共振器の回転方向不安定性

- エンドミラーループのループ伝達関数



- ループ伝達関数は、

$$G_{EML} = \ominus G_E (R_F - L) F_{RP}$$

ポジティブフィードバックであるため、通常と符号が異なる。

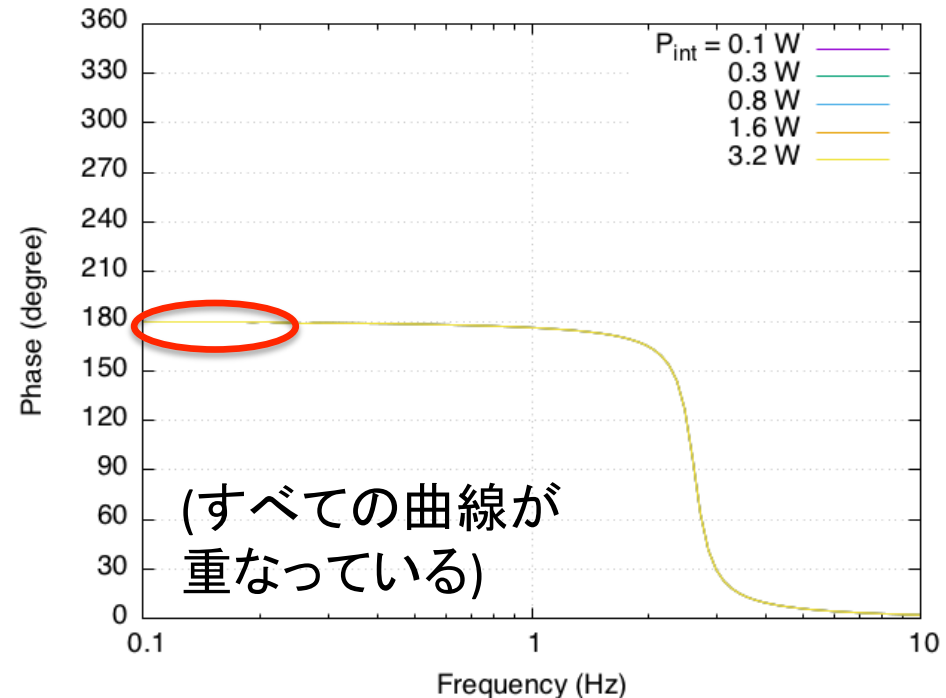
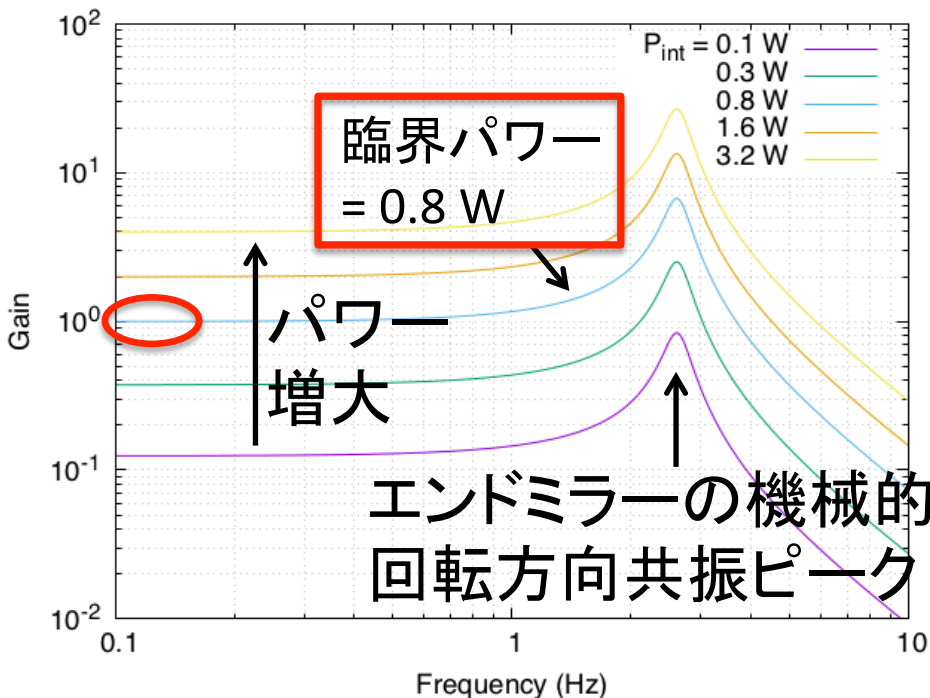
放射圧の効果

共振器の回転方向不安定性

- ボード線図

$$G_{\text{EML}} = -G_{\text{E}}(R_{\text{F}} - L)F_{\text{RP}}$$

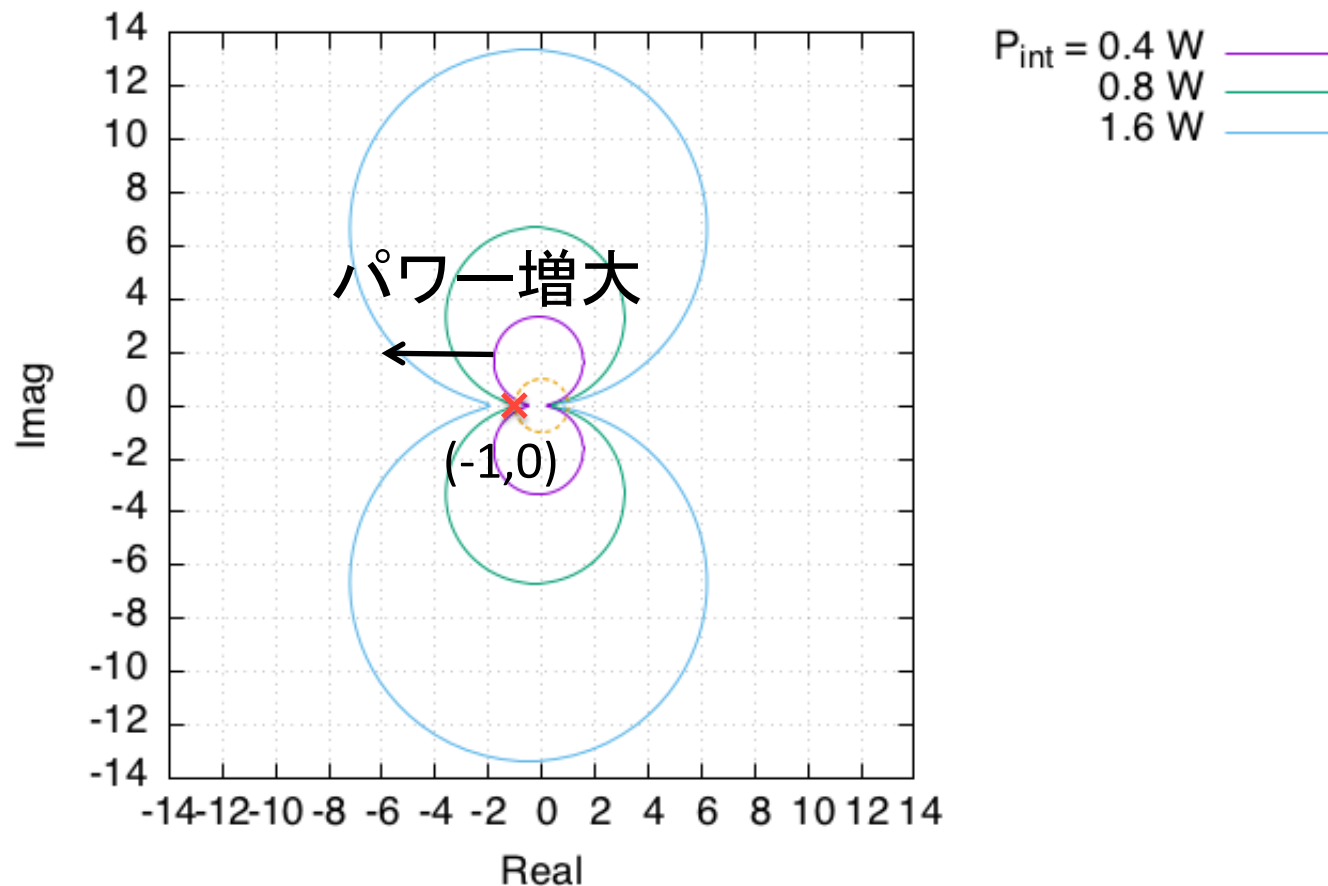
- 臨界パワー(0.8 W)では、DCでゲインが1、位相が180°になっている。
→これが不安定になる要因?



共振器の回転方向不安定性

- ナイキスト線図

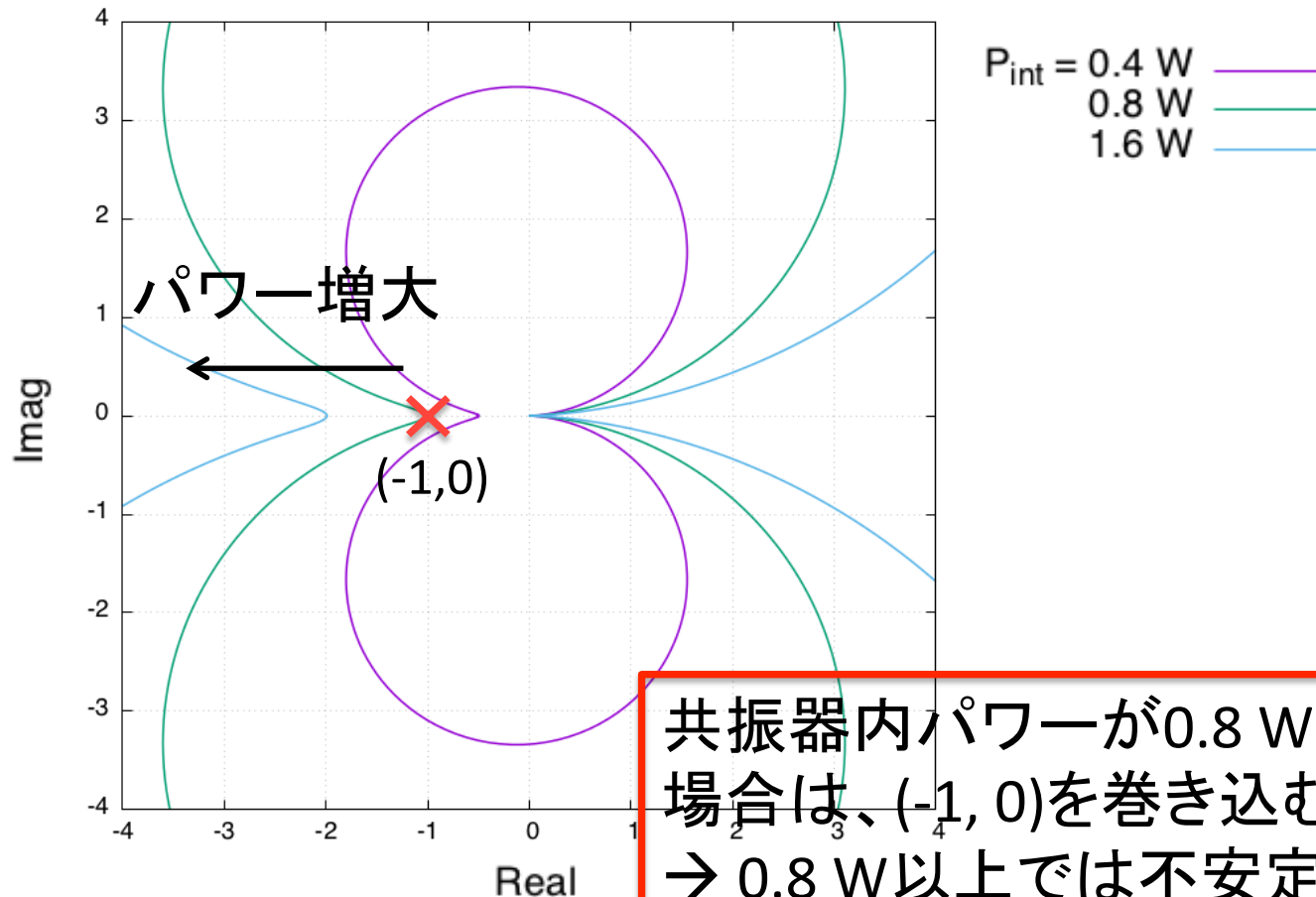
$$G_{\text{EML}} = -G_{\text{E}}(R_{\text{F}} - L)F_{\text{RP}}$$



共振器の回転方向不安定性

- ナイキスト線図

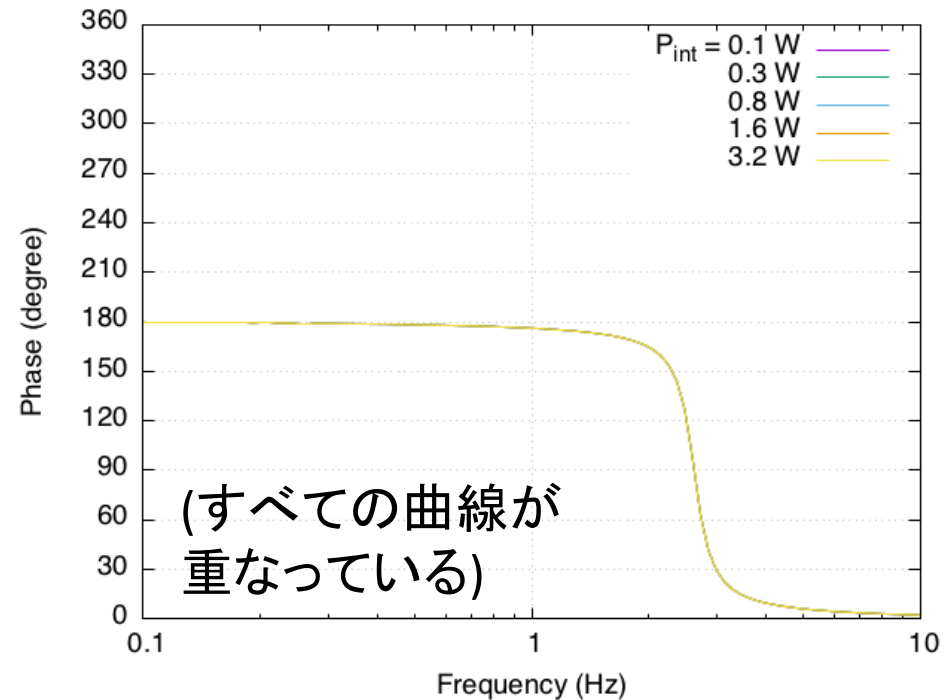
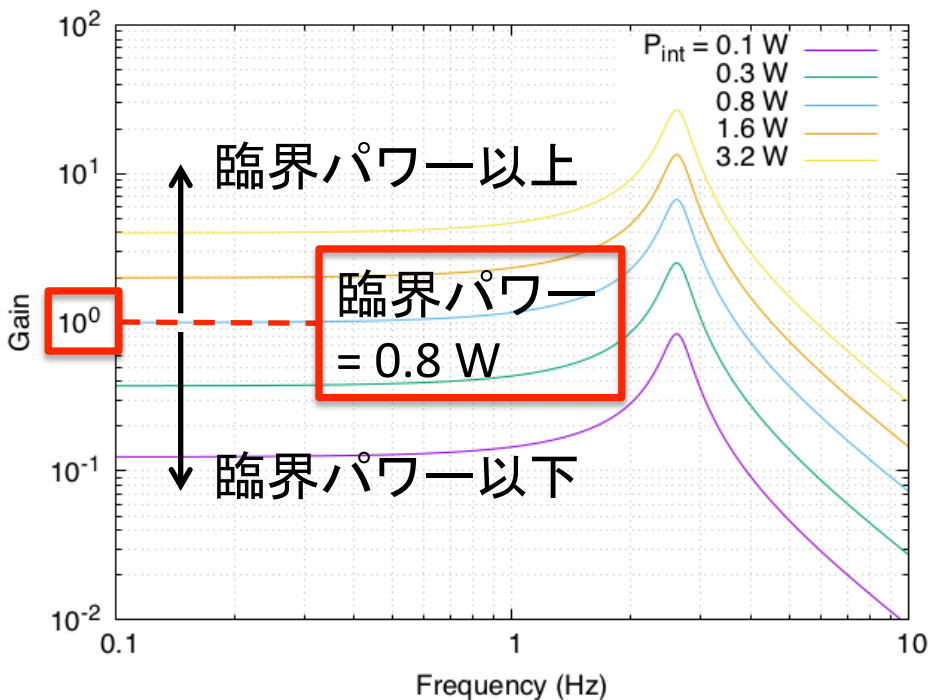
$$G_{\text{EML}} = -G_{\text{E}}(R_{\text{F}} - L)F_{\text{RP}}$$



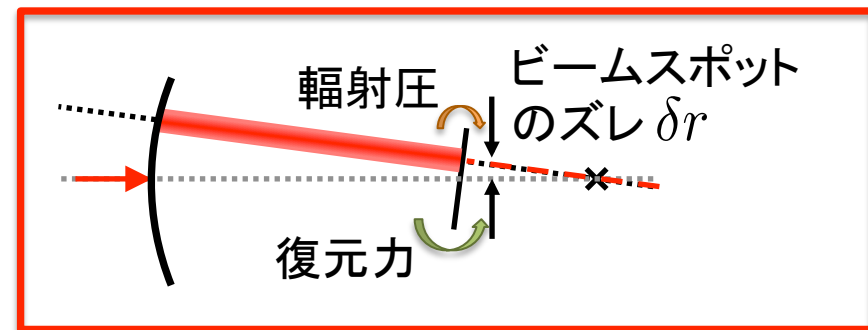
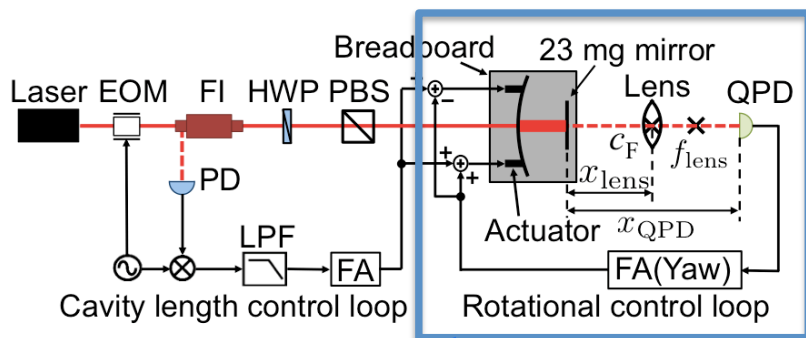
共振器の回転方向不安定性

- ボード線図
 - 何が起きているか直観的に理解しやすい
- ボード線図を用いると、共振器内パワーが臨界パワーを超えているのかどうかを、DCゲインが1を超えているのかどうかを見ることが判断することができる。

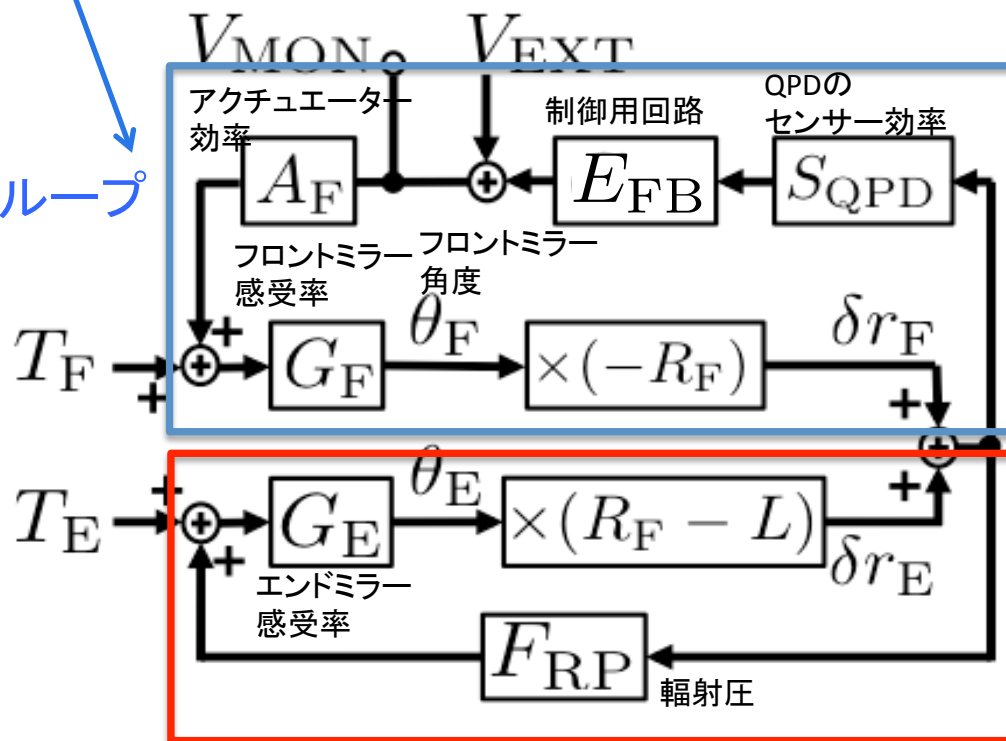
$$G_{\text{EML}} = -G_{\text{E}}(R_{\text{F}} - L)F_{\text{RP}}$$



輻射圧を用いた回転方向制御



フロントミラーループ

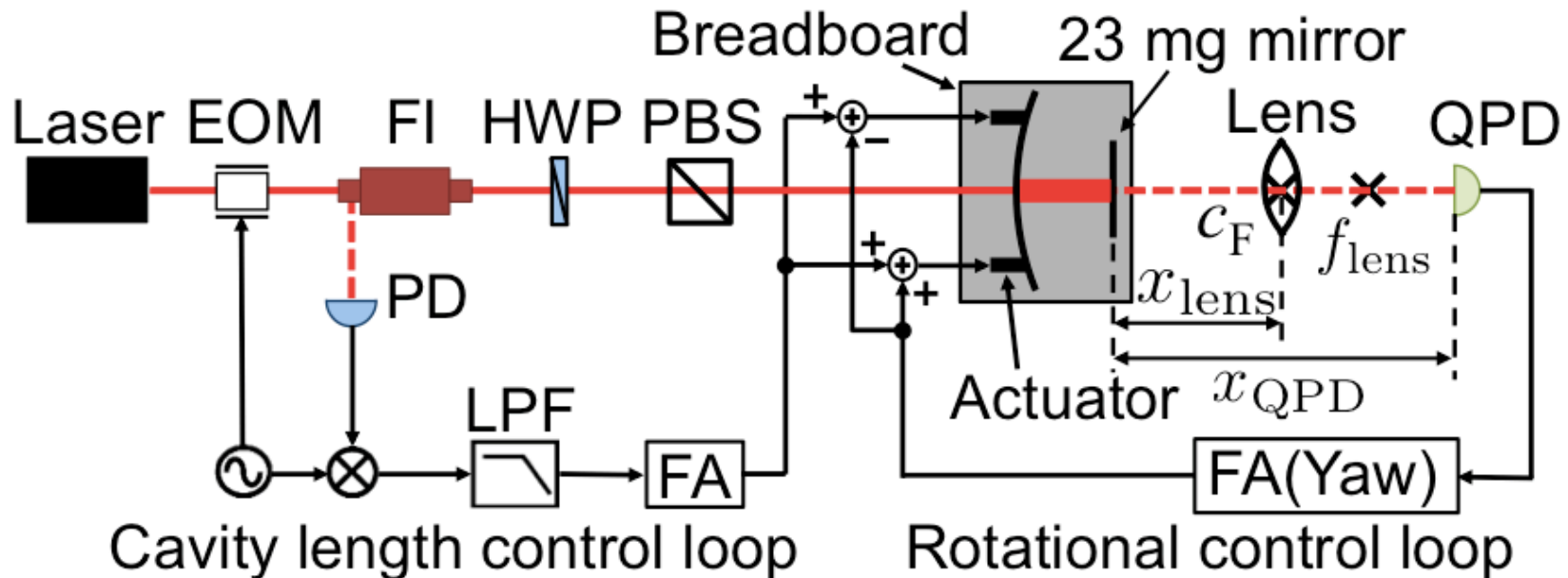


エンドミラーループ

新しい制御系の有効性の確認

- 共振器内に、共振器が回転方向に不安定となるような臨界パワー(0.8 W)以上のパワーが溜まっていることを確かめたい。
- 何が測定できればよい？
 1. 制御がある場合とない場合の共振器内パワーの時系列データ
 - あるパワー以上では制御なしでは共振器長が制御できなければ、制御の有効性が確かめられる。
 2. エンドミラーループのオープンループ伝達関数
 - 共振器内パワーに依存している。

新しい制御系の有効性の確認



1. 共振器内パワーの時系列データ
 - 透過光パワーを測定する。
2. エンドミラーループのループ伝達関数
 - フロントミラーループのループ伝達関数から換算する。

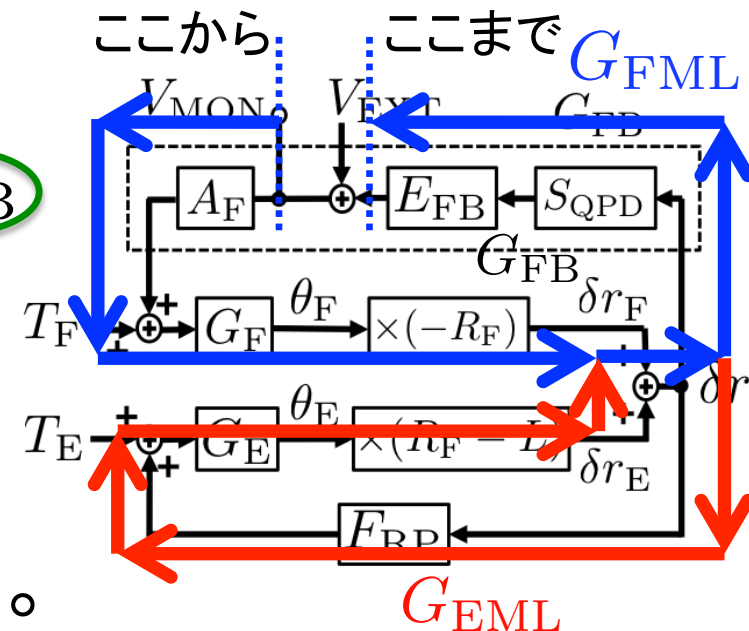
新しい制御系の有効性の確認

- どうやってエンドミラーループのオープンループ伝達関数 G_{EML} を測定するか。
 --> フロントミラーループ制御のオープンループ伝達関数 G_{FML} から換算する。

$$G_{FML} = G_F R_F \frac{1}{1 + G_{EML}} G_{FB}$$

G_{FML} は測定する。
 G_{FB} は既知。
 G_{EML} は求める。

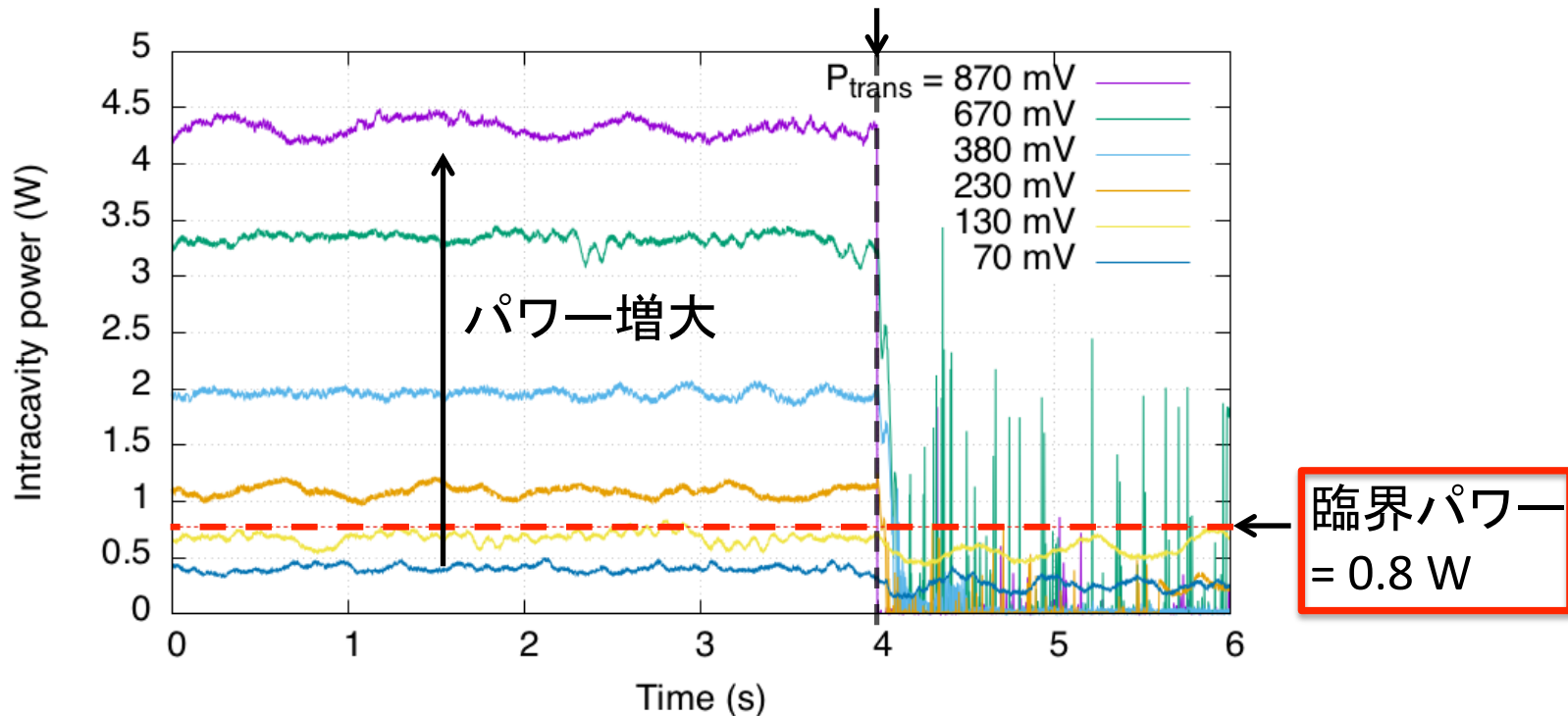
ここからエンドミラーループの
 ループ伝達関数を求められる。



結果

- 共振器内パワーの時系列データ

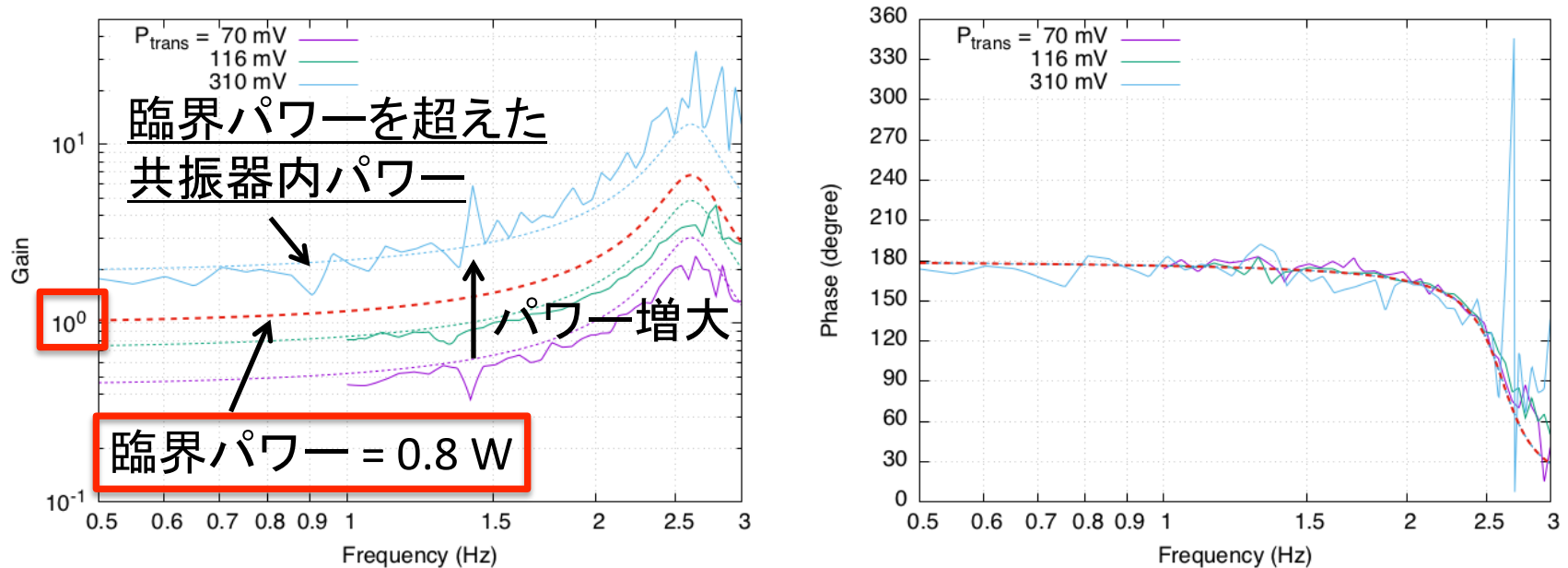
ここで角度制御を切っている



- 臨界パワー以上では制御を切ると共振器長の制御が落ちている。

結果

- エンドミラーループの伝達関数



- 臨界パワーを超えた不安定になるはずのエンドミラーループの伝達関数が測定されている。
→ 制御によって共振器が安定になっている。

結論

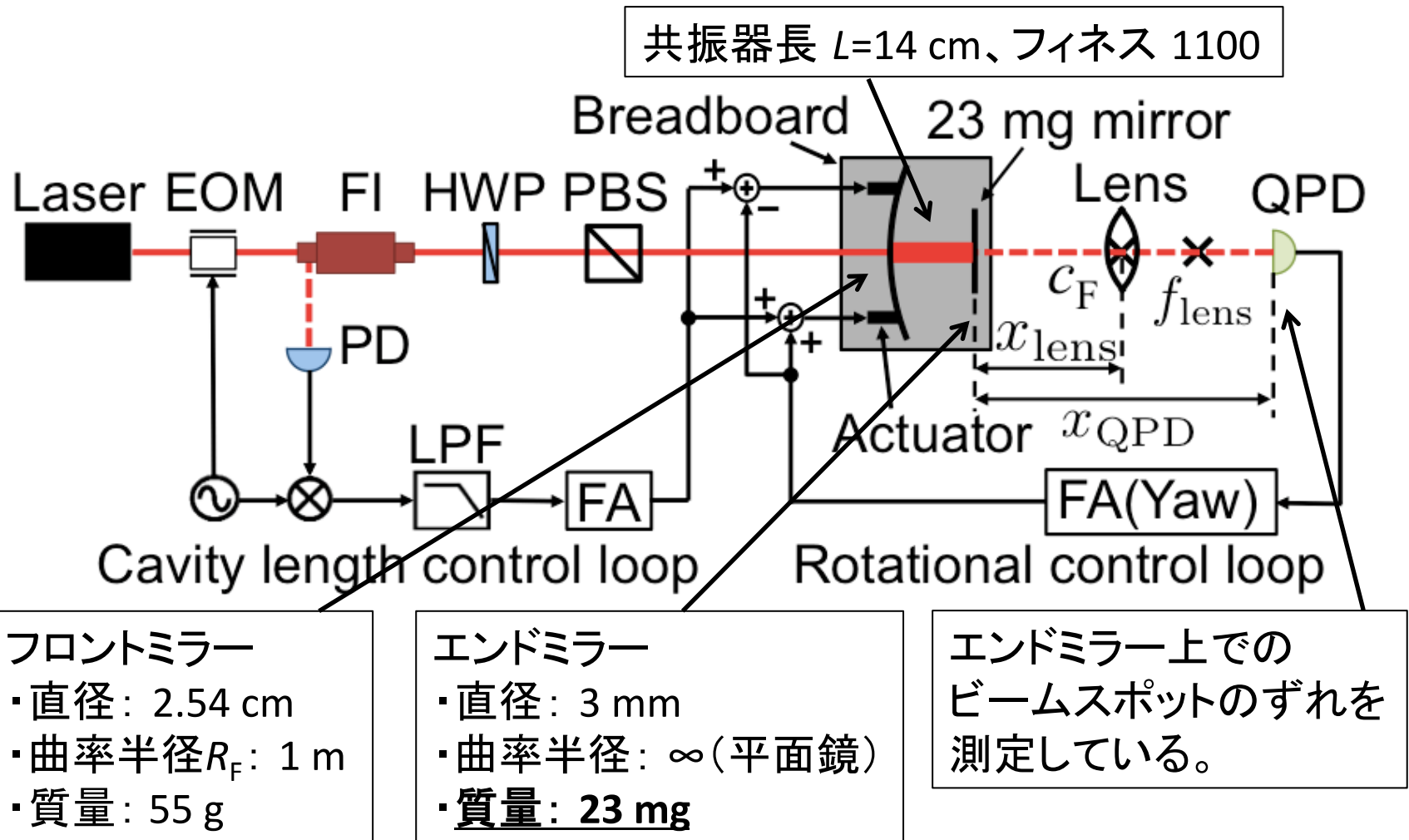
- 一方の鏡に直接アクチュエーターが取り付けられていない共振器を輻射圧を使って制御する新しい制御系が、共振器が回転方向に不安定になるような臨界パワー以上においても有効であることを初めて確かめた。
- この輻射圧を使った新しい制御は、スペースの問題や非常に高いQ値が必要であるために直接アクチュエーターを取り付けることが出来ない実験系に応用可能である。

今後の展望

- 輻射圧雑音の測定のために必要な共振器内パワー(1000 W)までパワーを上げられるかどうかを確認する必要がある。

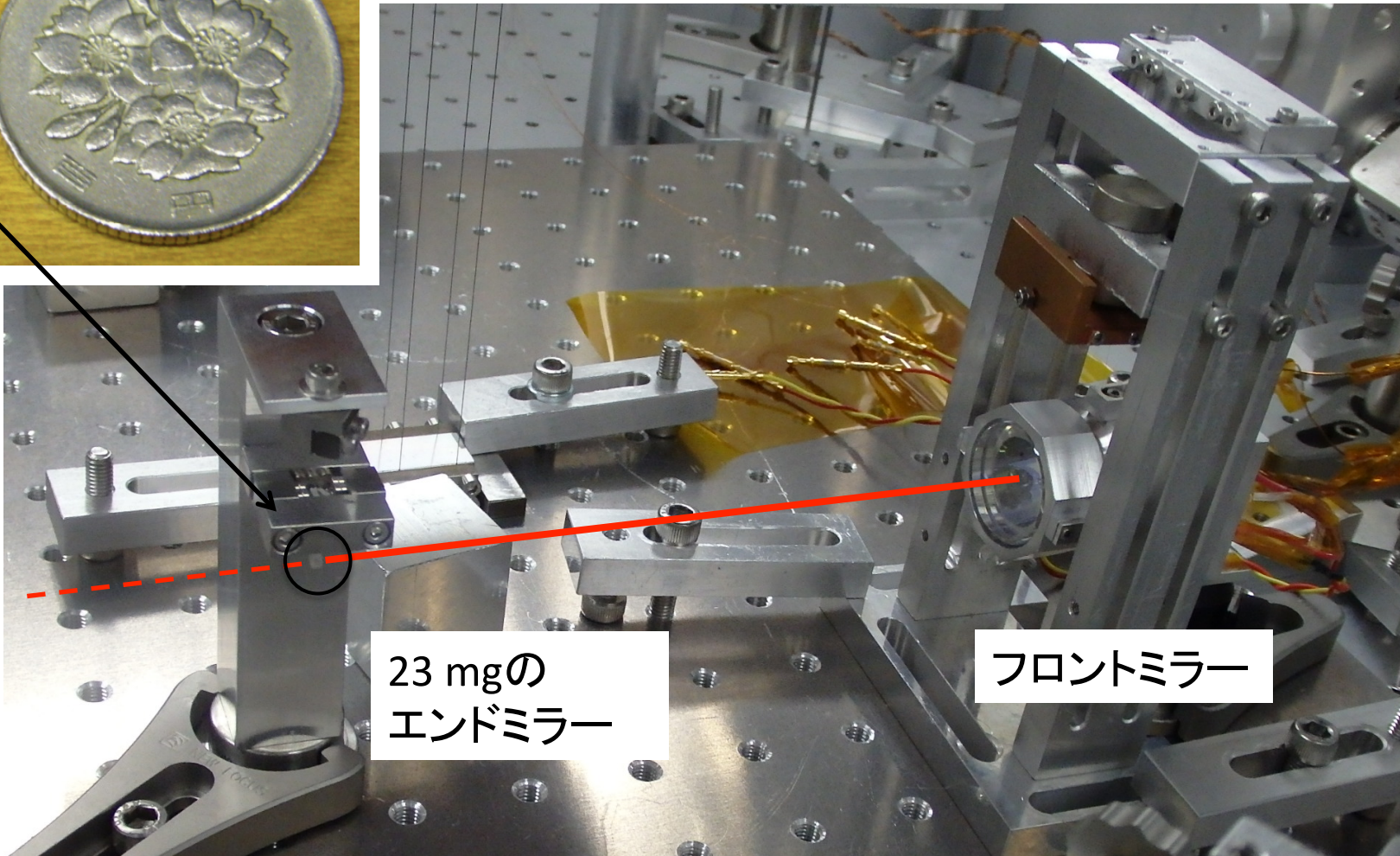
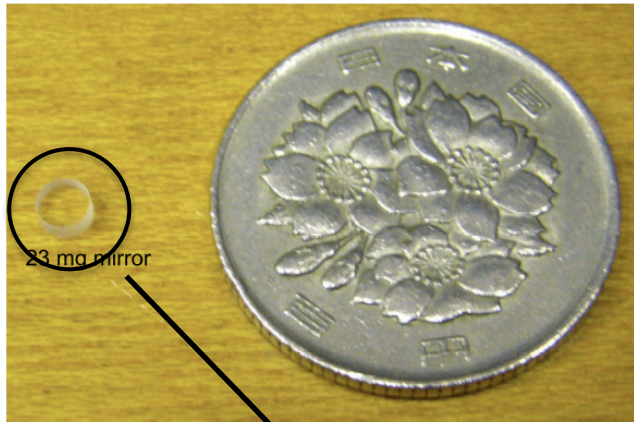
予備

実験系



実験系

阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。

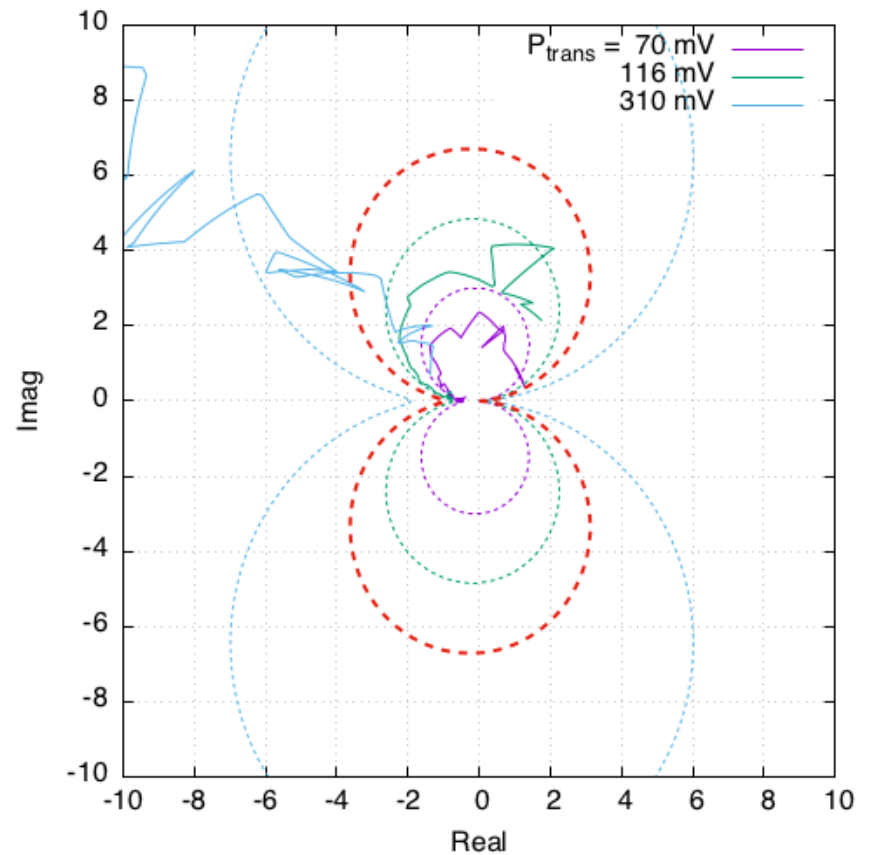
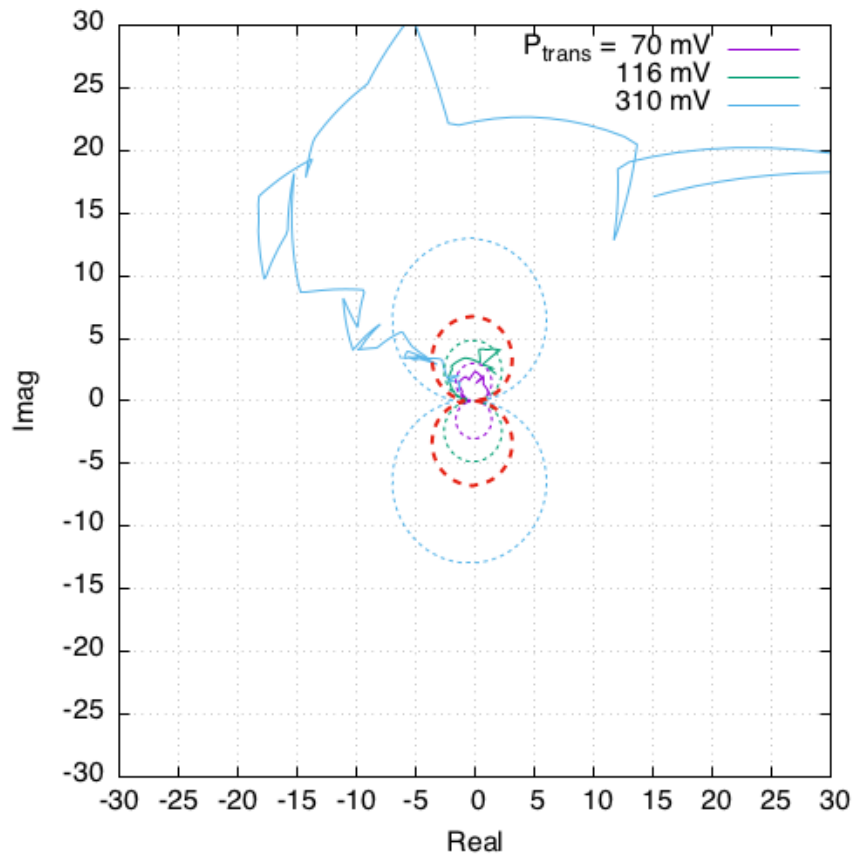


23 mgの
エンドミラー

フロントミラー

結果

- ナイクスト線図



結果

