

ねじれ振り子を用いた 光学浮上の安定性検証

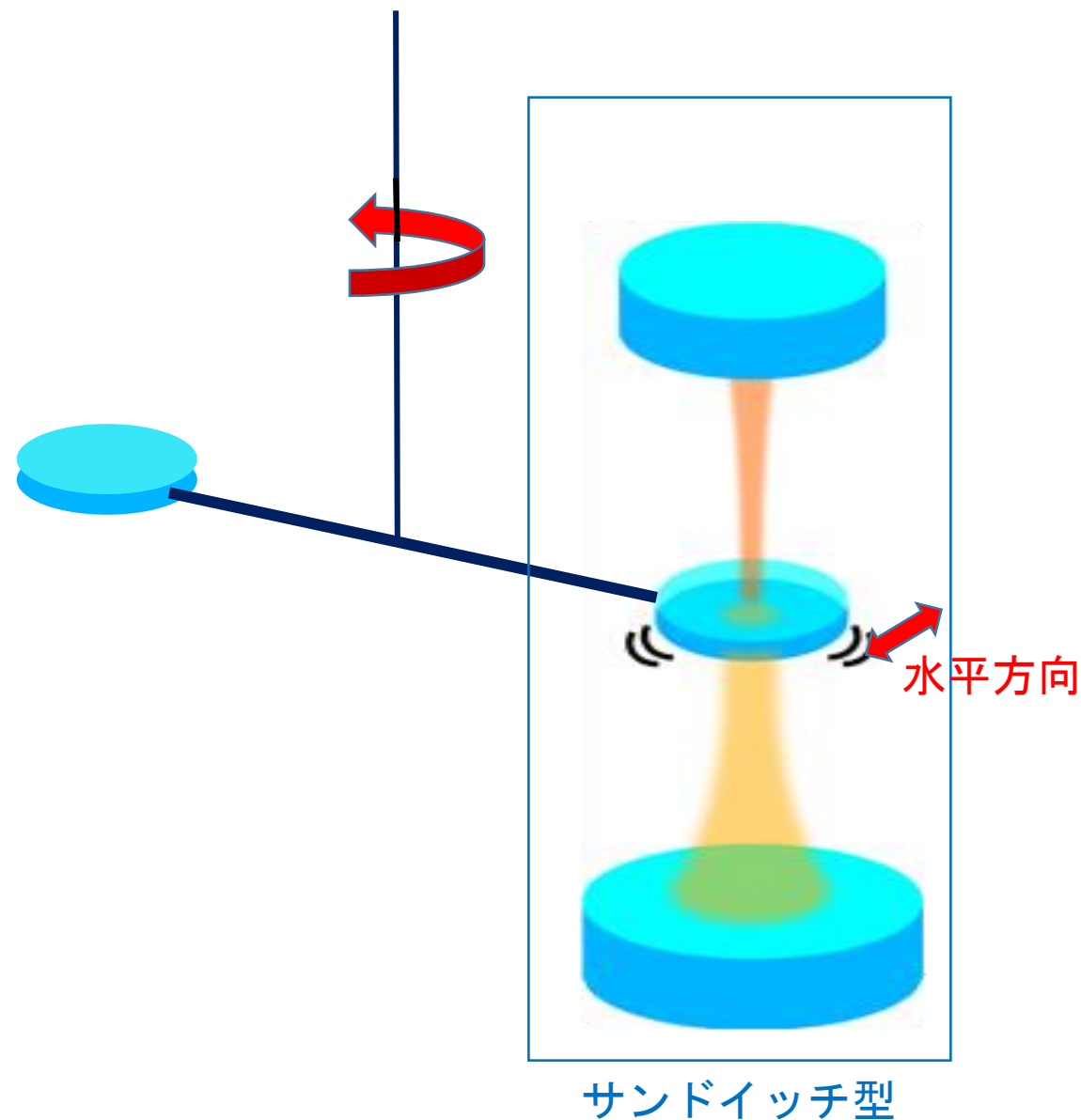
東京大学理学系研究科 物理学専攻

安東研究室

和田祥太郎、道村唯太、桑原祐也、牛場崇文、松本伸之、安東正樹

今回の発表の概要

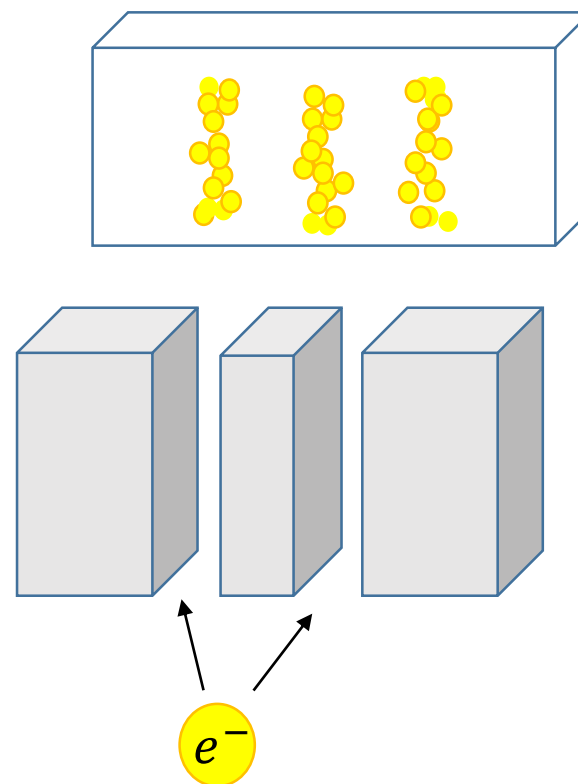
- ・ mgスケールでの量子力学の検証のために光学浮上の実現を目指す
- ・ サンドイッチ型の水平方向の安定性検証のためにねじれ振り子を用いる
- ・ 今回ねじれ振り子の揺れをおさえるために制御を行った



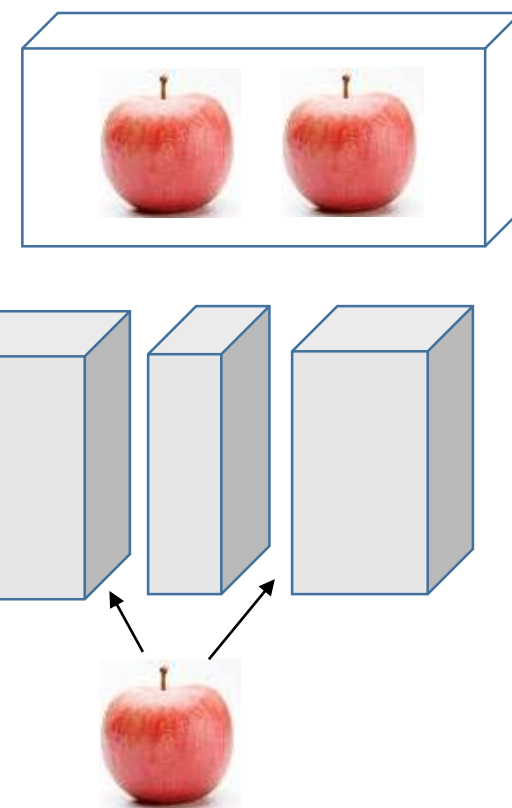
背景

量子力学で未だに解決されていない問題

→マクロな系で位置の重ね合わせ状態がみられるかどうか



電子はミクロ
→位置の重ね合わせ状態は
観測済み



りんごはマクロ
→位置の重ね合わせ状態は
未観測

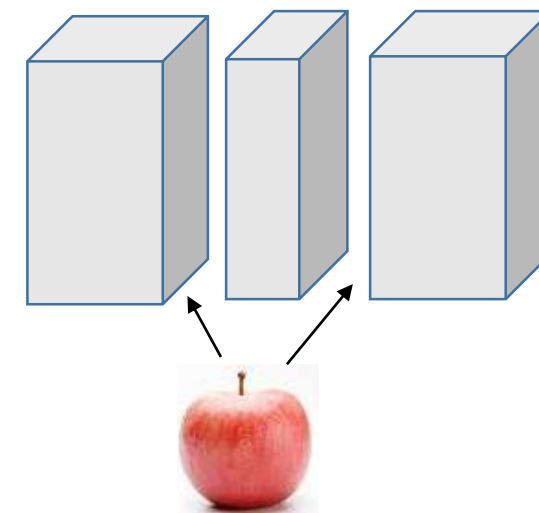
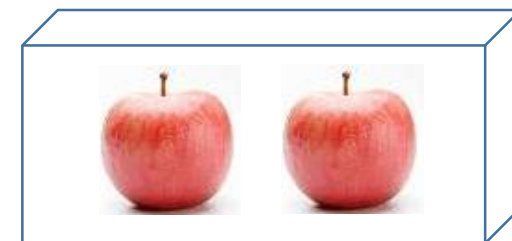
観測されない理由

- ・ 重い物体にも位置の重ね合わせ状態が見られる
→単純に古典雑音が大きい？
- ・ 重い物体には位置の重ね合わせ状態がそもそも存在しない
→量子力学と古典力学の境界線が存在？

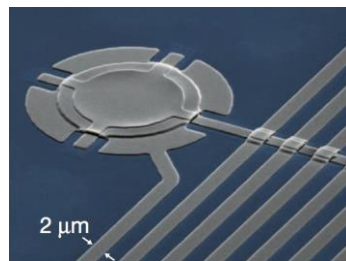


様々な質量スケールで実験することが必要

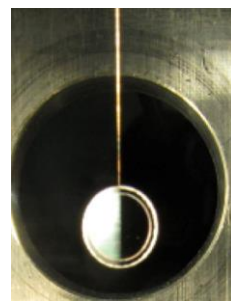
機械光学系実験（光を振動子に当てることによる位置測定）がよく用いられる



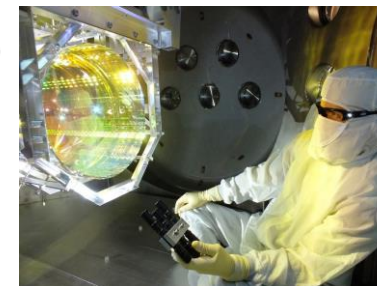
機械光学系を用いた先行研究



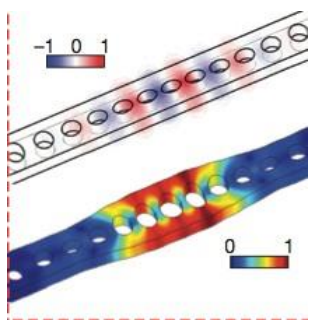
membrane,
48 pg
Teufel+(2011)



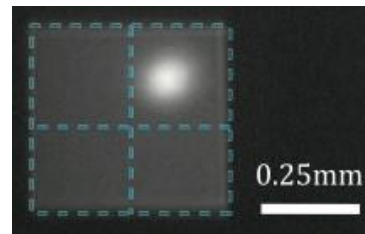
suspended mirror,
5 mg
Matsumoto+(2014)



suspended mirror,
40 kg
GW detector (LIGO,
VIRGO, KAGRA)



nanomechanical
oscillator,
311 fg
Chan+(2011)



membrane,
7 ng
Peterson+(2016)



Suspended mirror,
1 g
Neben+(2012)

fg

pg

ng

ug

mg

g

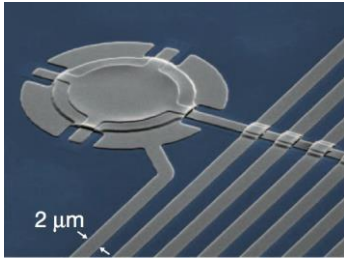
kg

質量スケール

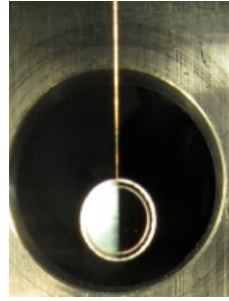
巨視的量子力学の検証のための必要条件

 古典雑音がSQLを下回ることが必要条件

標準量子限界 (SQL Standard Quantum Limit) とは？
量子力学の不確定性原理から生じる測定限界のこと

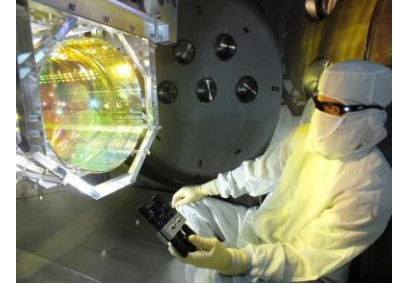


membrane, 48 pg **SQL到達**



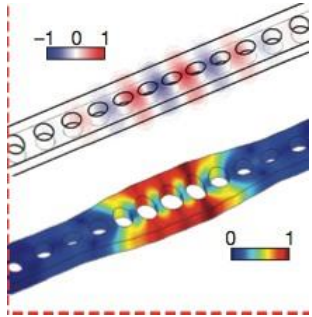
suspended mirror,
5 mg
Matsumoto+ (2014)

未到達

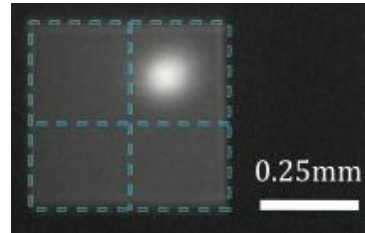


suspended mirror,
40 kg
GW detector (LIGO,
VIRGO, KAGRA)

ほぼSQL到達



nanomechanical
oscillator,
311 fg
Chan+ (2011) **SQL到達**



membrane,
7 ng
Peterson+ (2016)

SQL到達



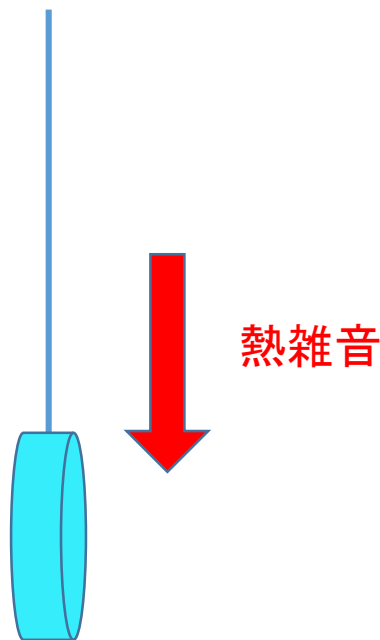
suspended mirror,
1 g
Neben+ (2012)

未到達



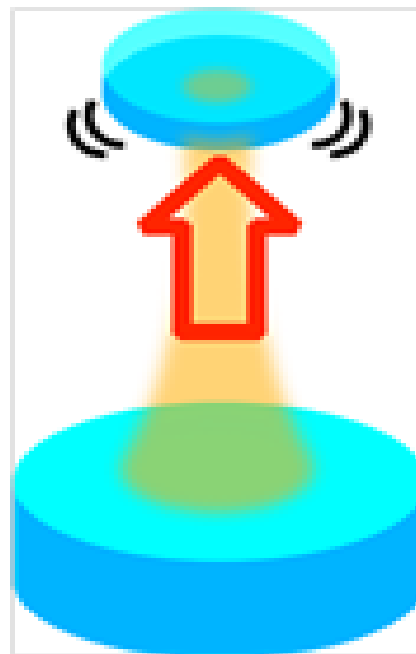
今回はmgスケールのSQL到達を目指す

mgスケールでのSQL到達への障壁～熱雑音～



振り子

→懸架による熱雑音が生じSQL到達が困難



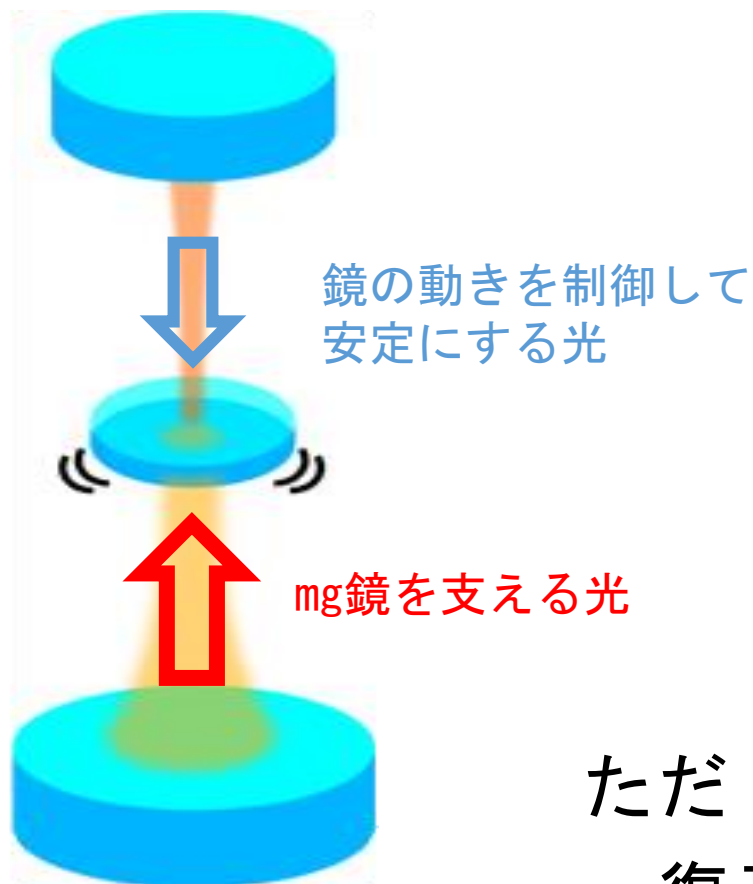
光学浮上とは？

高パワーのレーザー
光の輻射圧を使って
鏡を浮かせること

光学浮上

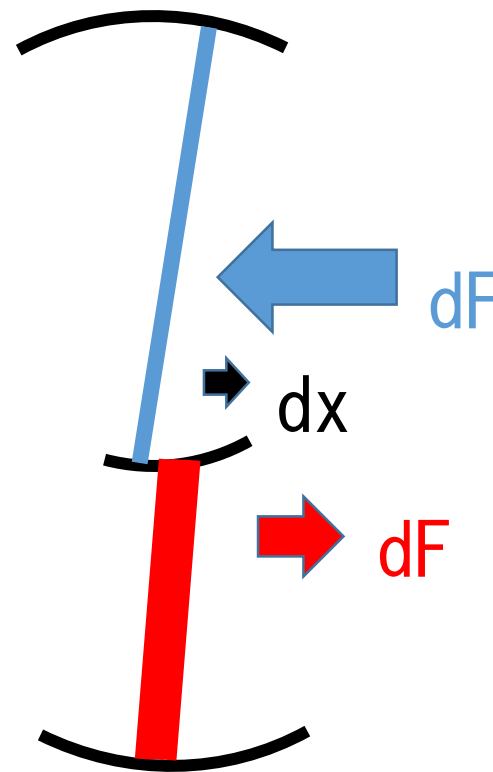
→SQL到達への最大の障壁である鏡の支持による熱雑音が生じない

光学浮上の安定性



サンドイッチ型

模式図



光軸のずれによる復元力が働く

理論的には安定

ただ

- ・ 復元力は実際に実現可能か
- ・ 実際の浮上に至る手順 → 確認する必要あり

水平方向の安定性検証

サンドイッチ型の水平方向の安定性を実験で検証したい

→ねじれ振りをを用いる

ねじれ振りをを用いる利点

→回転方向のわずかな力を検知できる

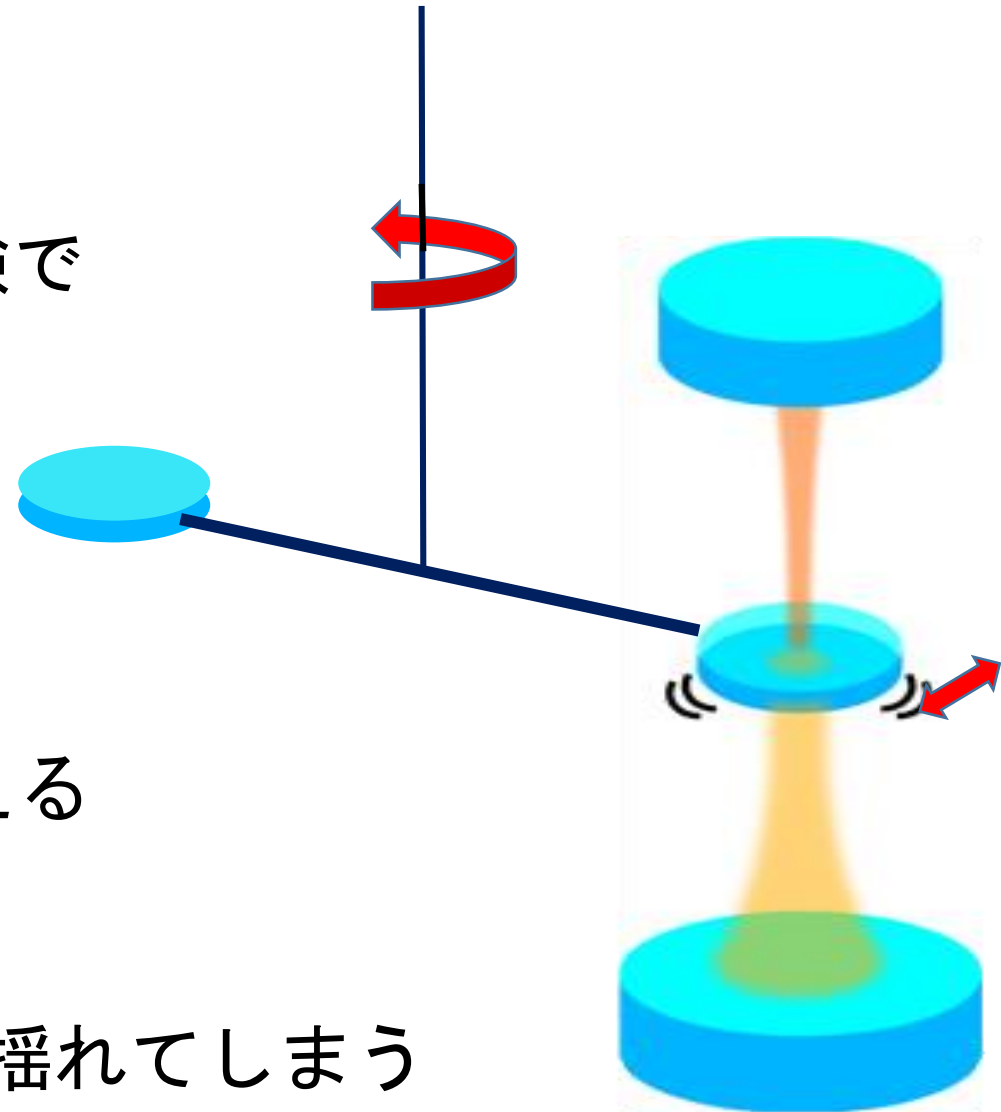
→比較的扱いやすいg程度の鏡を使える

ねじれ振りをを用いる欠点

→地面振動などにより必要以上に鏡が揺れてしまう



ねじれ振りをを制御することが必要



今回行ったこと

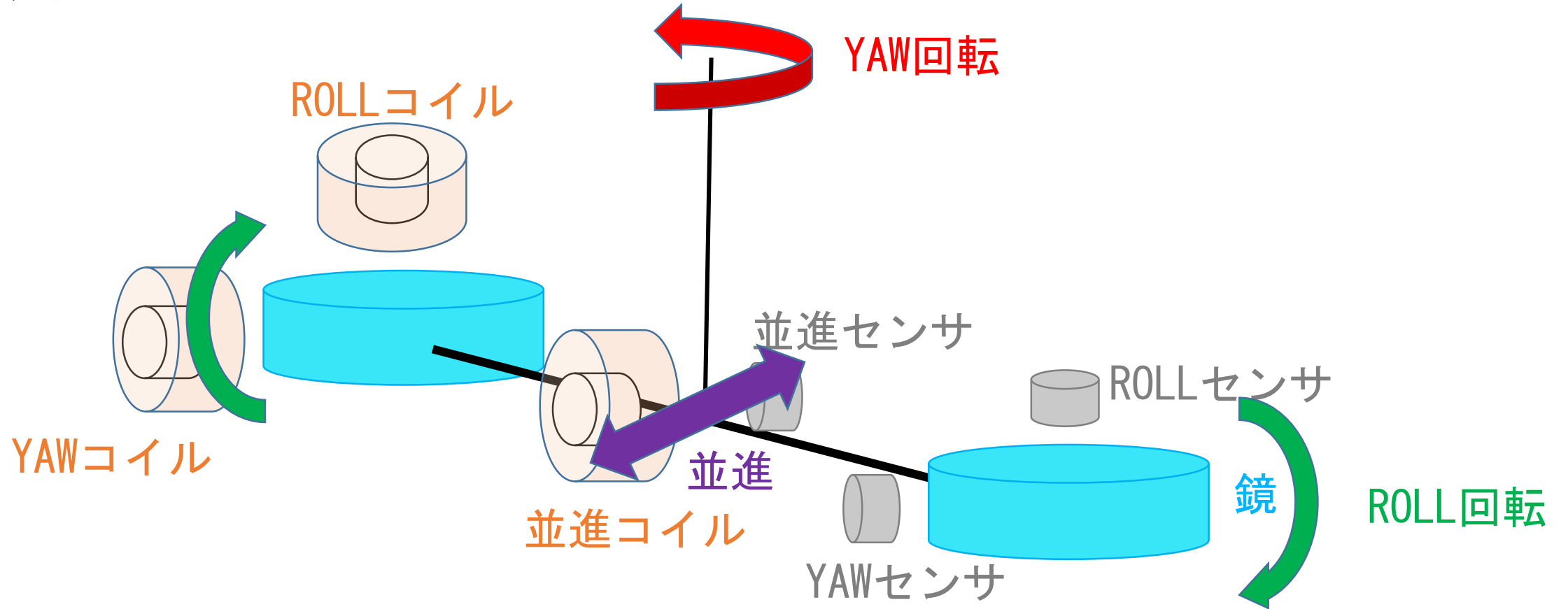
- ・ねじれ振り子の位置制御

RMSの要求値

YAW方向 $10\mu m$ (ビーム径 $\times 0.1$)

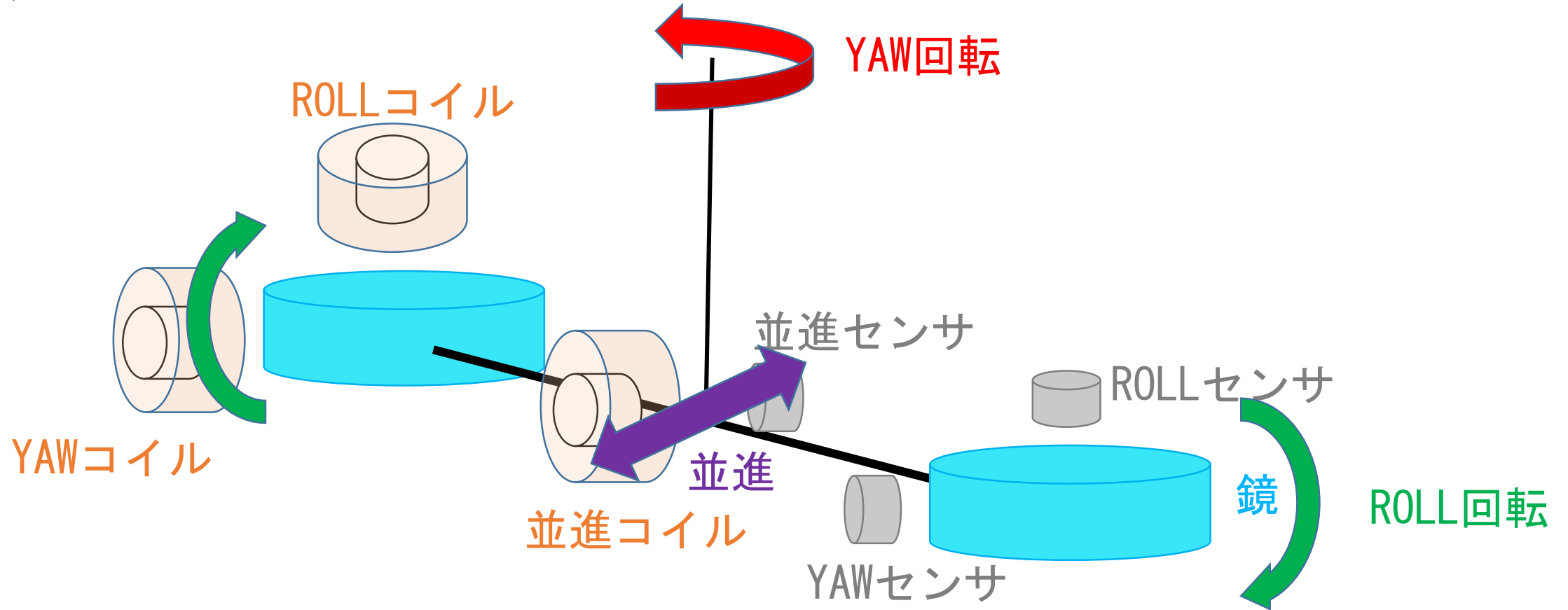
ROLL方向 $9\mu m$ (ピエゾのレンジ)

今回のセットアップ



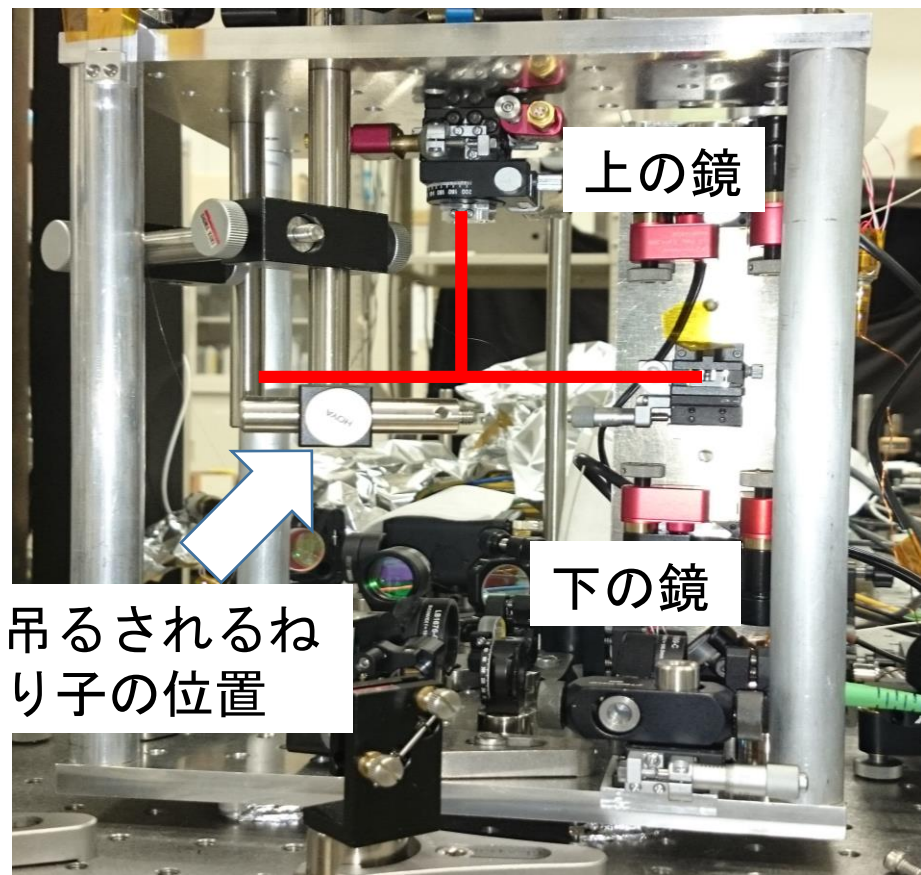
YAW, ROLL制御だけだとYAWと並進でカップリング
→YAW, ROLL, 並進方向の3方向で制御

今回のセットアップ

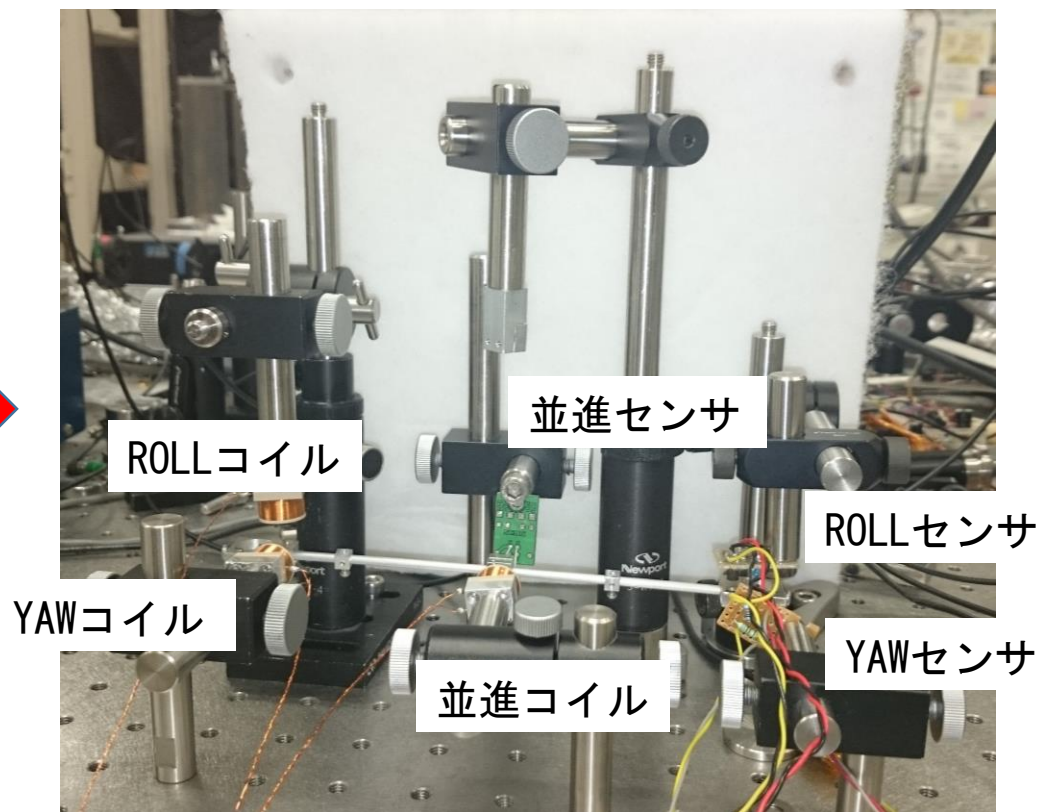
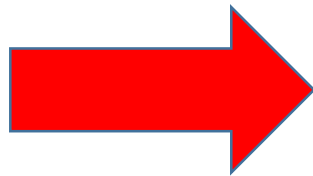


YAW, ROLL制御だけだとYAWと並進でカップリング
→YAW, ROLL, 並進方向の3方向で制御

実験セットアップ



全体のセットアップ



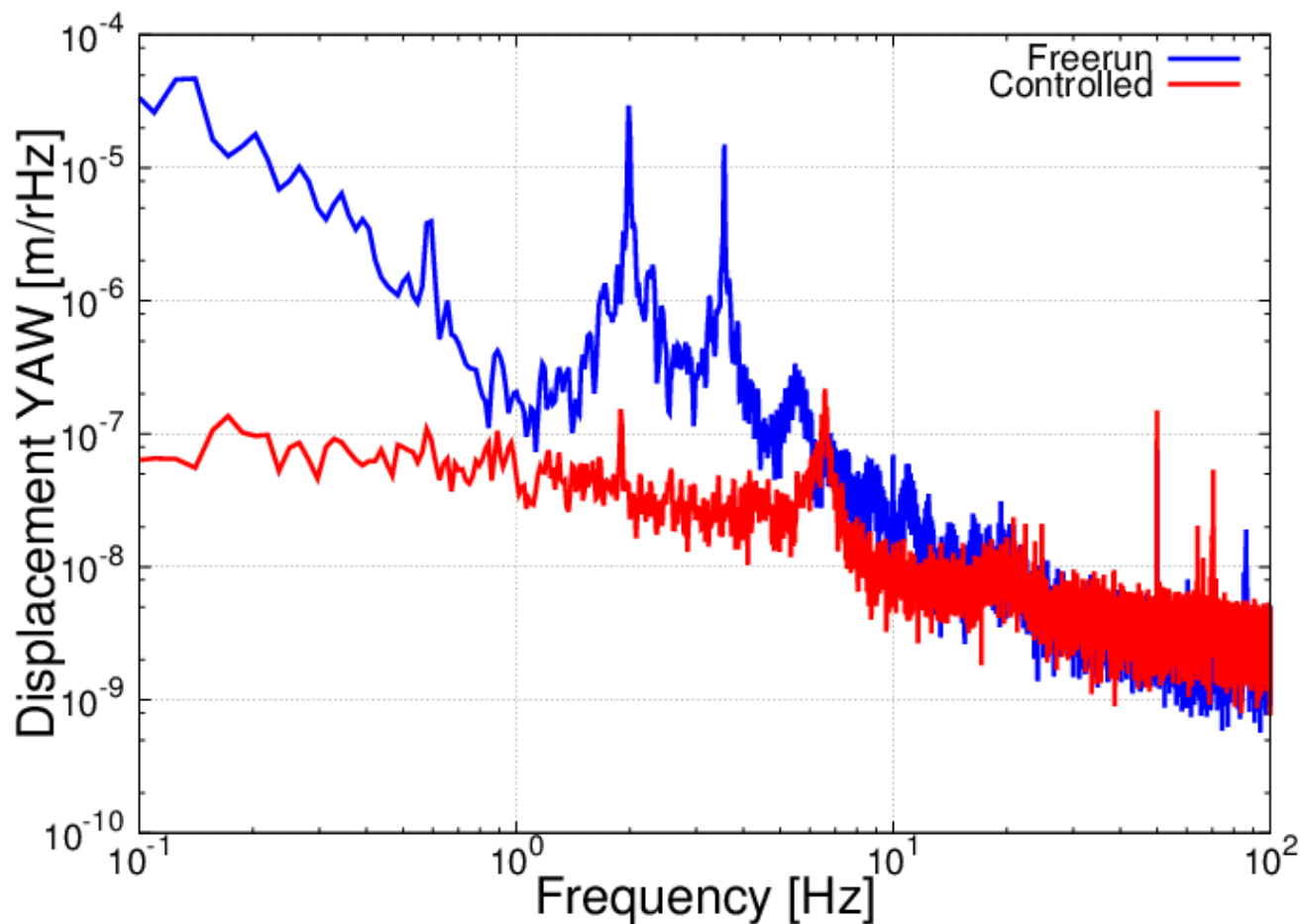
実際のセットアップから制御に必要な部分のみを抜き出して実験を行った

結果

YAW方向、ROLL方向、並進方向のそれぞれの

- ・ パワースペクトル
 - ・ オープンループ伝達関数
- を測定

結果 (YAWセンサで見たパワースペクトル)



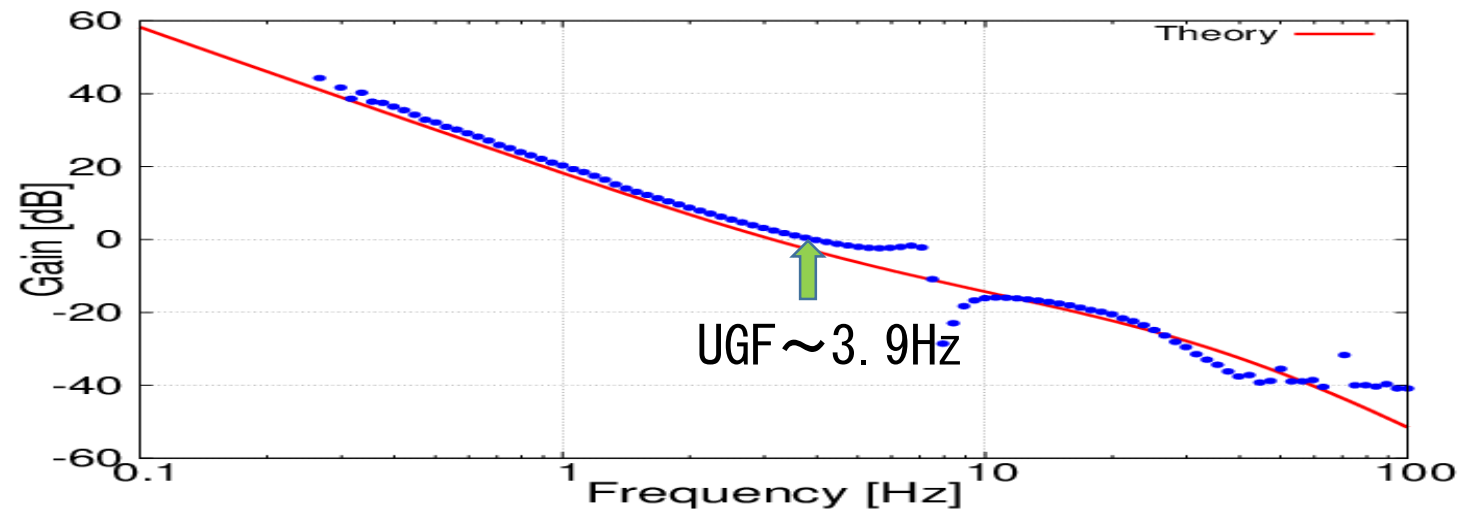
RMS

制御なし $69\mu m > 10\mu m$

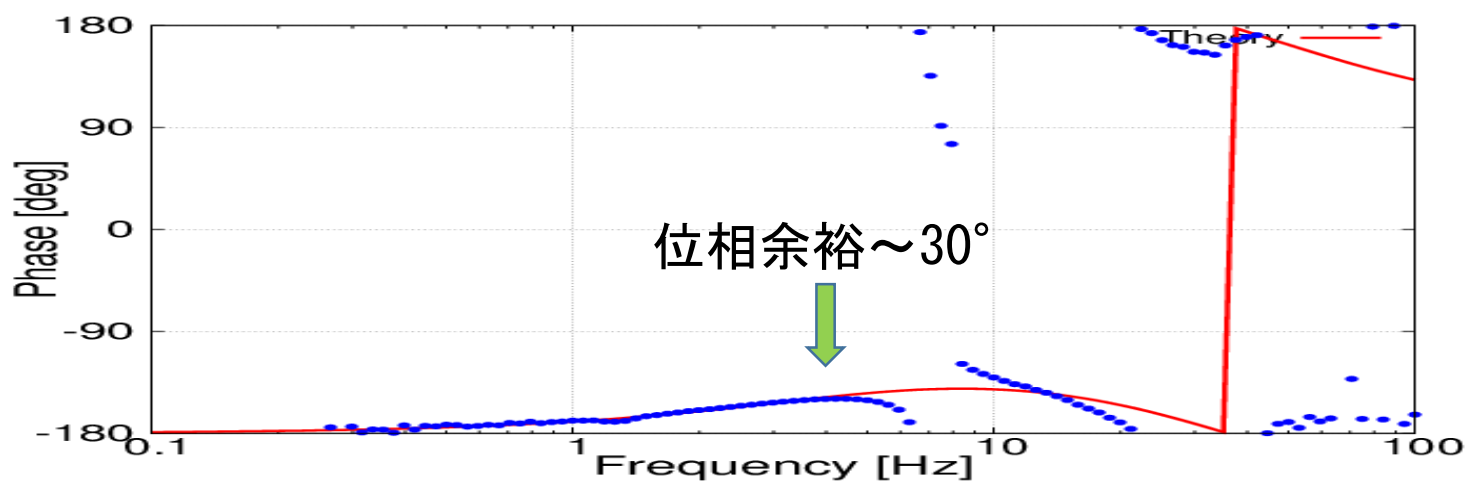
制御あり $0.15\mu m < 10\mu m$

制御後は要求値を満たした。

結果 (YAW方向のオープンループ伝達関数)

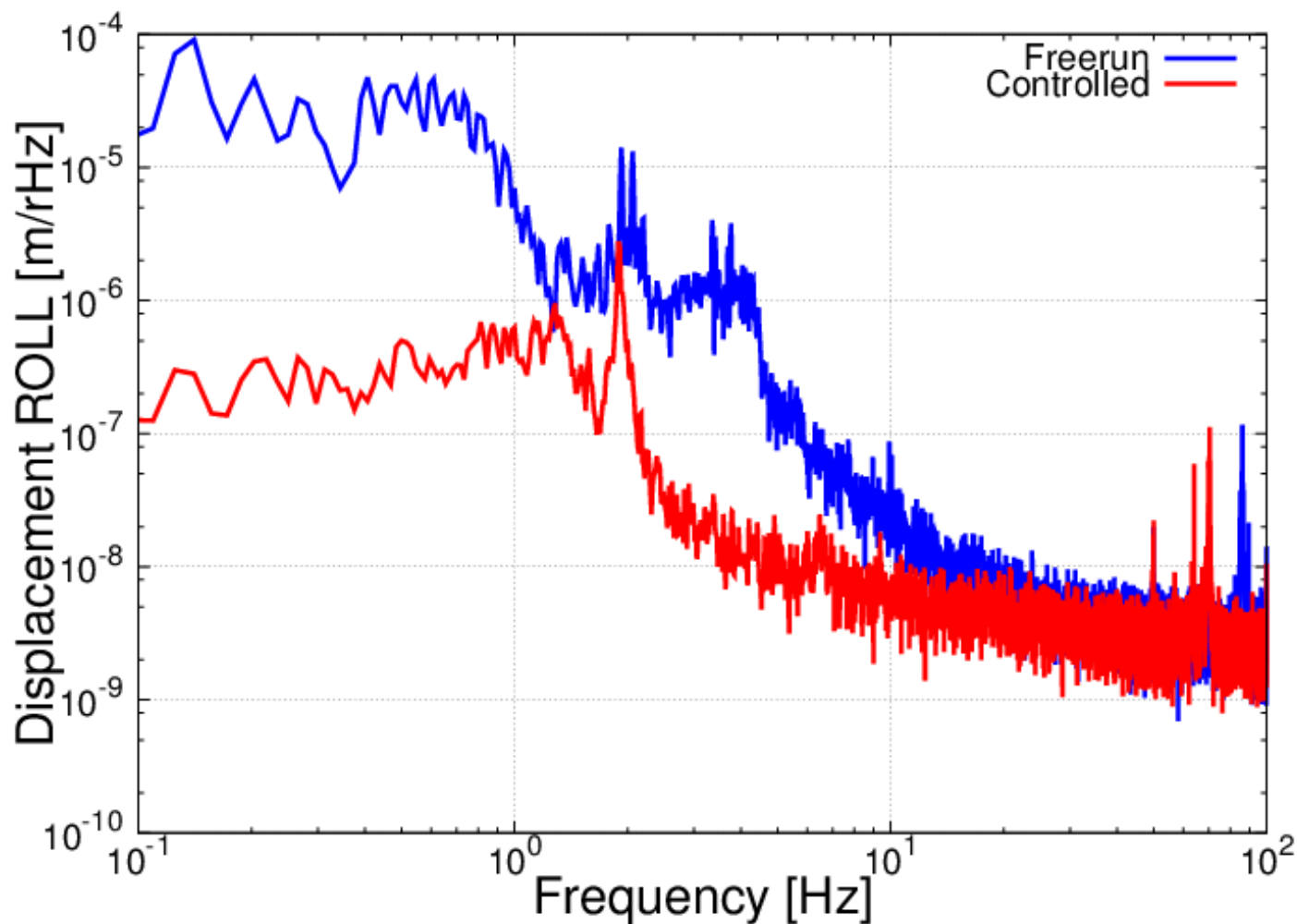


UGF ~ 3.9 Hz
位相余裕 ~ 30°



安定な制御がかかった

結果 (ROLLセンサで見たパワースペクトル)



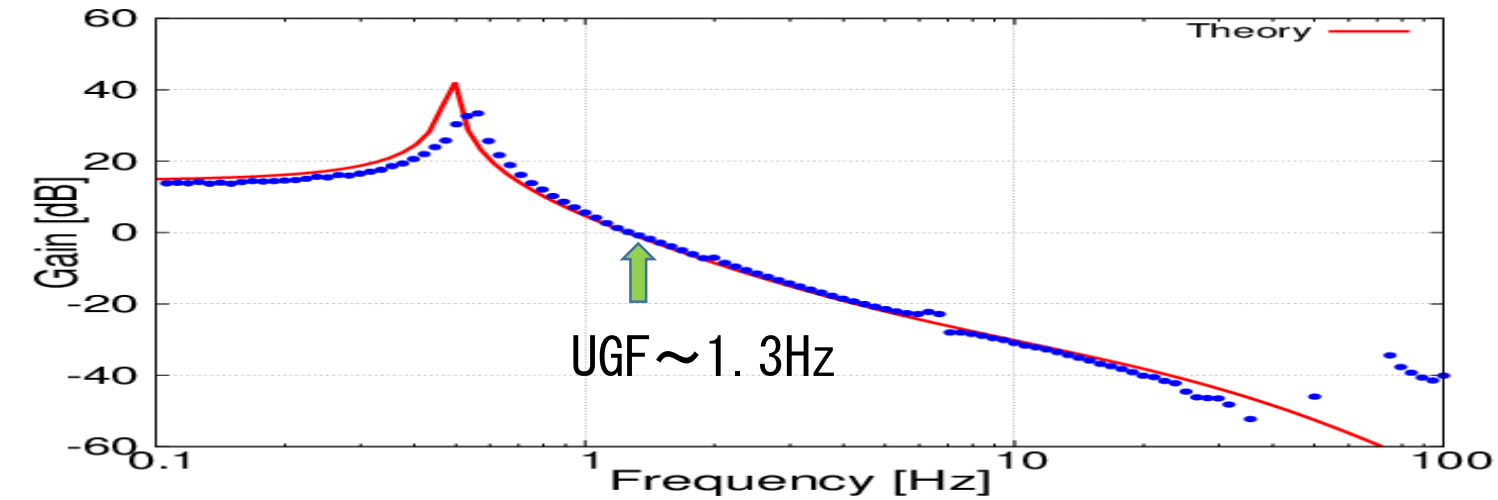
RMS

制御なし $25\mu m > 9\mu m$

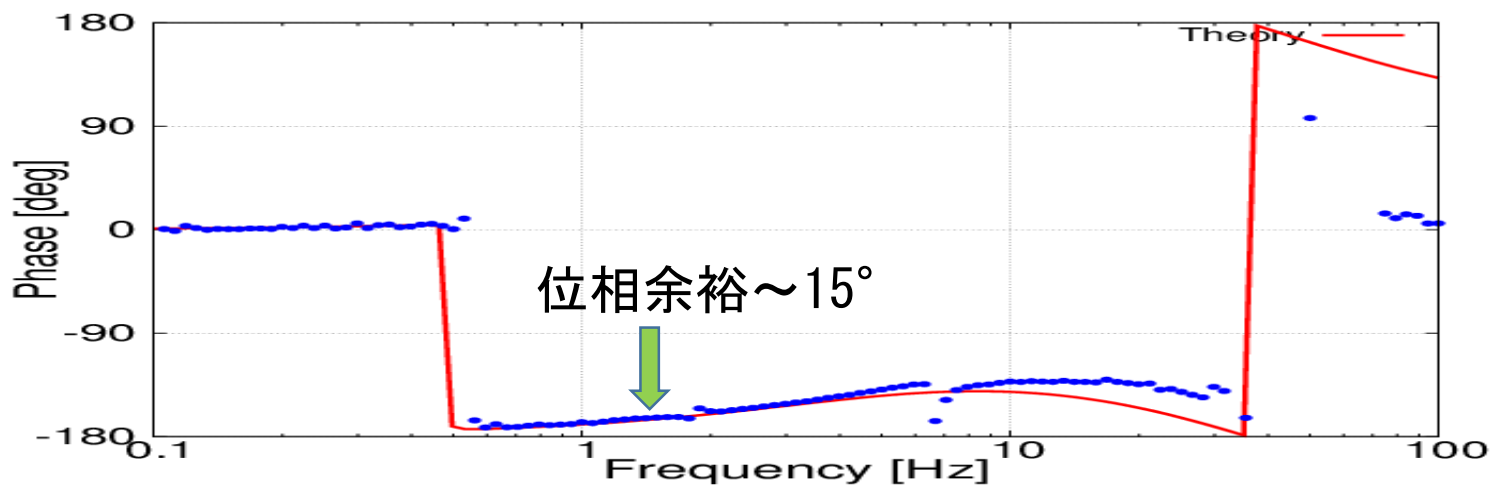
制御あり $0.73\mu m < 9\mu m$

制御後は要求値を満たした。

結果 (ROLL方向のオープンループ伝達関数)

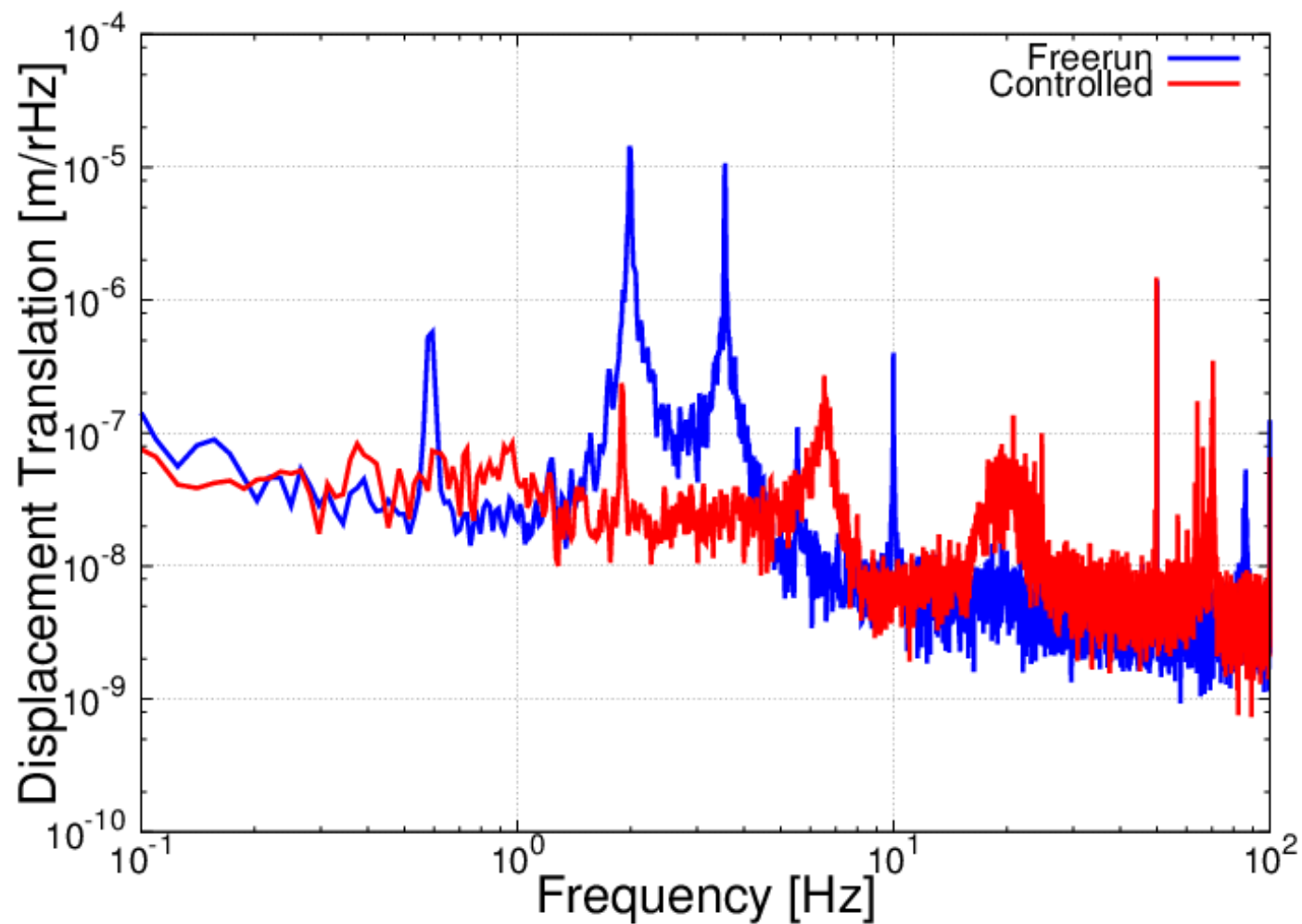


UGF ~ 1.3Hz
位相余裕 ~ 15°



安定した制御になった

結果（並進センサで見たパワースペクトル）



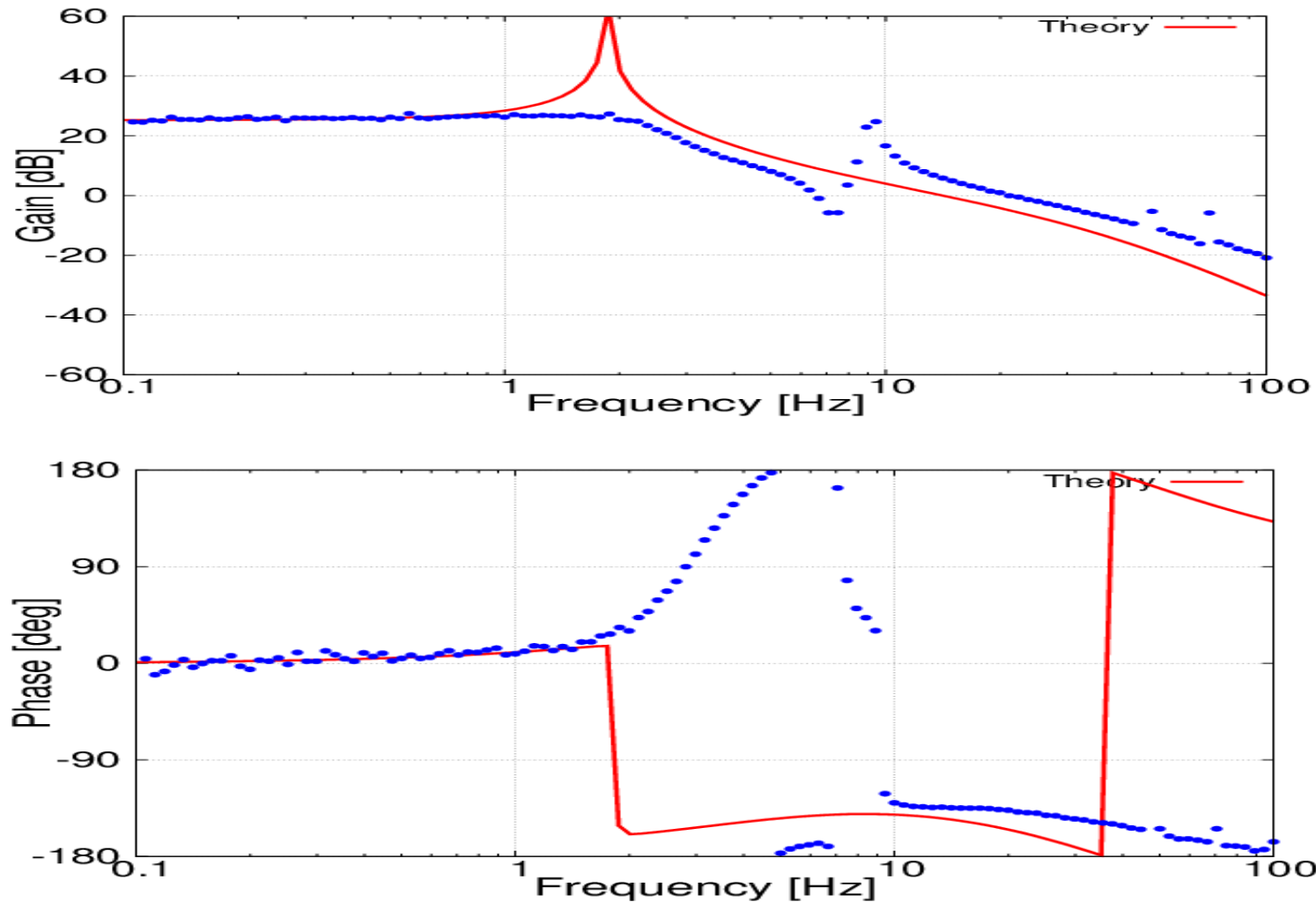
RMS

制御なし $2.8\mu m < 10\mu m$

制御あり $0.38\mu m < 10\mu m$

制御後並進の共振ピークを抑えることに成功した

結果（並進方向のオープンループ伝達関数）



UGFが三か所ありやや不安定

課題

- ・ 並進制御のゲインが10倍以上あげられない

- ・ フォトセンサと被るねじれ振り子の面積が小さく、信号がやや不安定

まとめ

ねじれ振り子の制御を3方向からかけた

YAW方向のRMS $0.15\mu m < 10\mu m$

ROLL方向のRMS $0.73\mu m < 9\mu m$

ともに制御後は要求値を満たした

今後の展望

- ・ 並進方向の制御がやや不安定
 - ゲインをより上げられるセットアップにする
 - ねじれ振りをフォトセンサの光が当たる面積がより大きくなるように改善
- ・ ねじれ振りを制御した状態で共振器をロック
 - 水平方向の安定性を検証

終わり