

# KAGRA用防振装置の開発XVIII (制御系)

日本物理学会年次大会 @東北学院大学  
2016.03.21

発表者：  
総合研究大学院大学 博士1年  
奥富 弘基

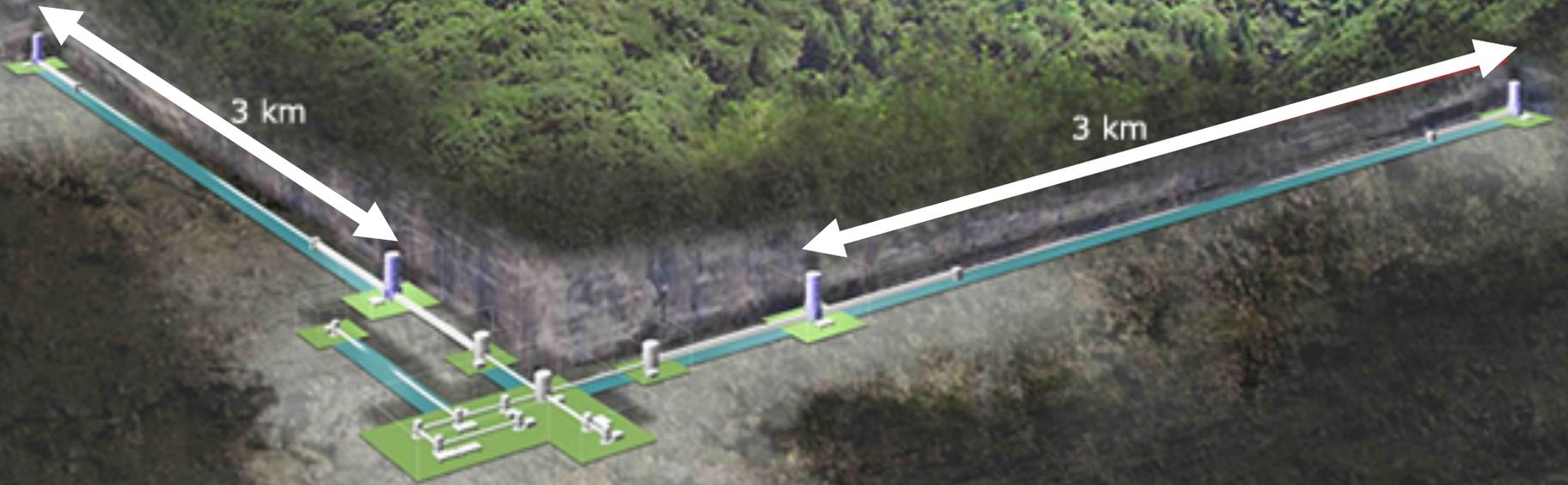
# Contents

- PR3鏡防振装置：Type-Bp' SAS
  - 制御の目的
  - センサ・アクチュエータ
- ダンピング制御

# Contents

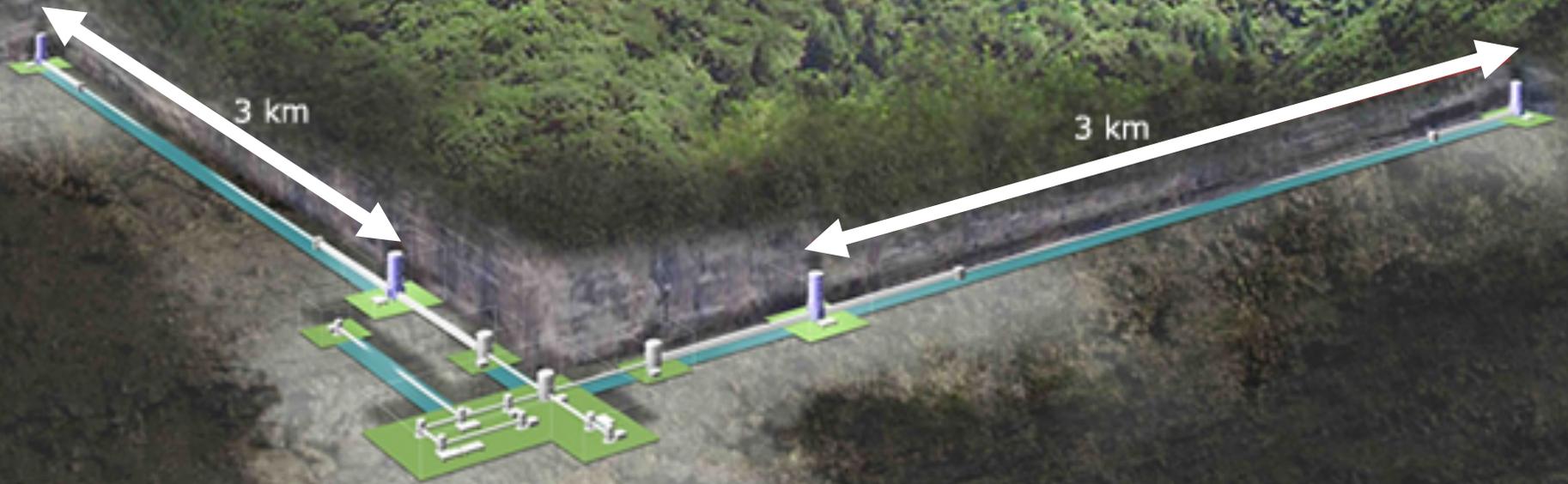
- PR3鏡防振装置：Type-Bp' SAS
  - 制御の目的
  - センサ・アクチュエータ
- ダンピング制御

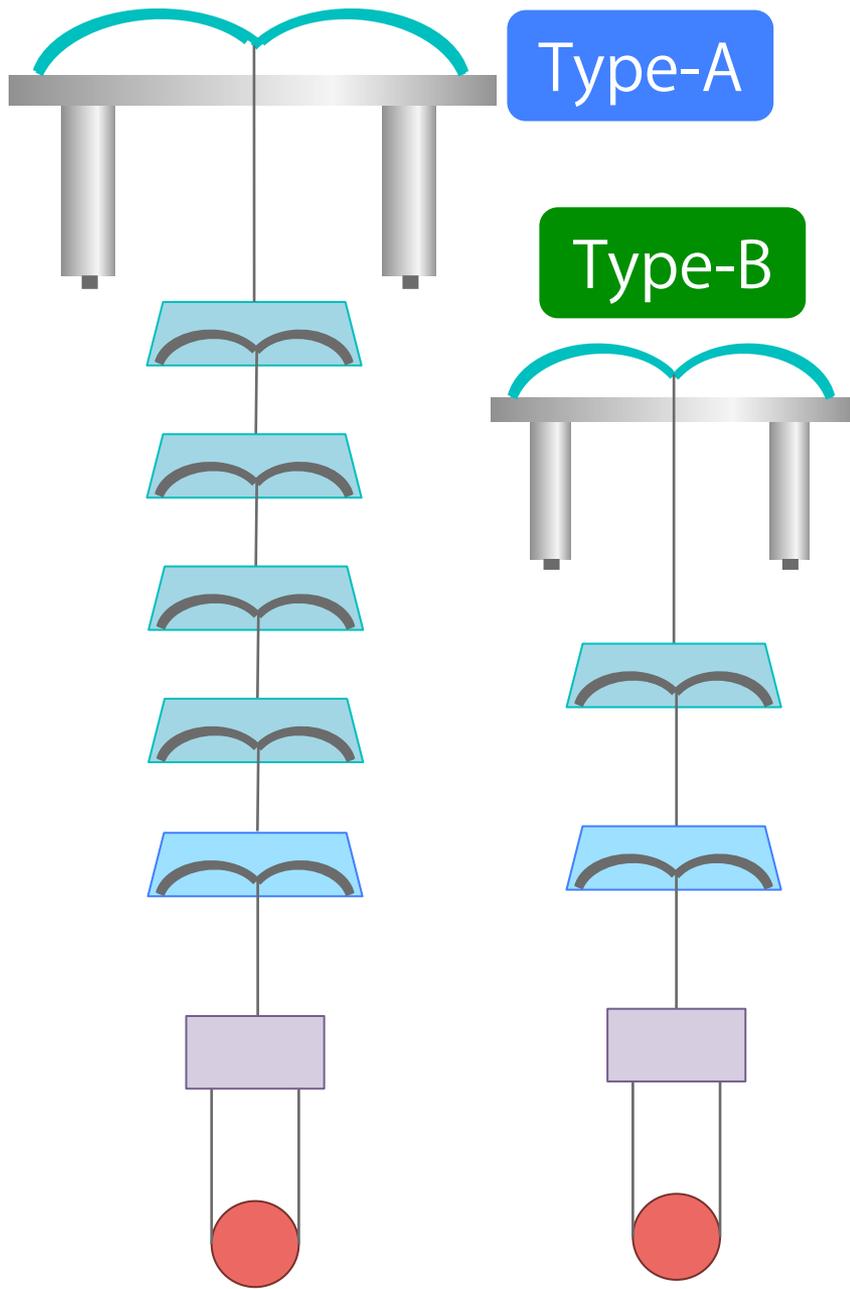
# KAERA



# KAGRA

- Fabry-Perot Michelson型のレーザー干渉計
- 神岡鉱山の地下に建設
- 2015年度内に試運転を開始(iKAGRA)

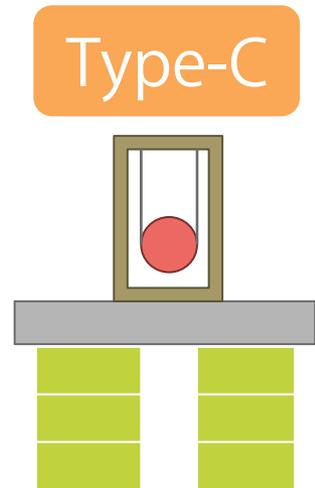
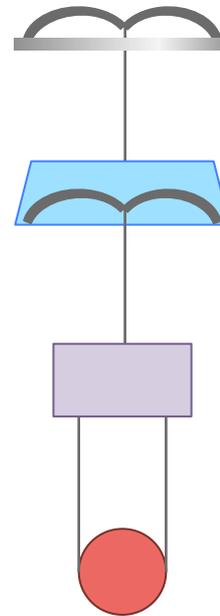




# KAGRA 鏡防振装置

## Seismic Attenuation System

Type-Bp



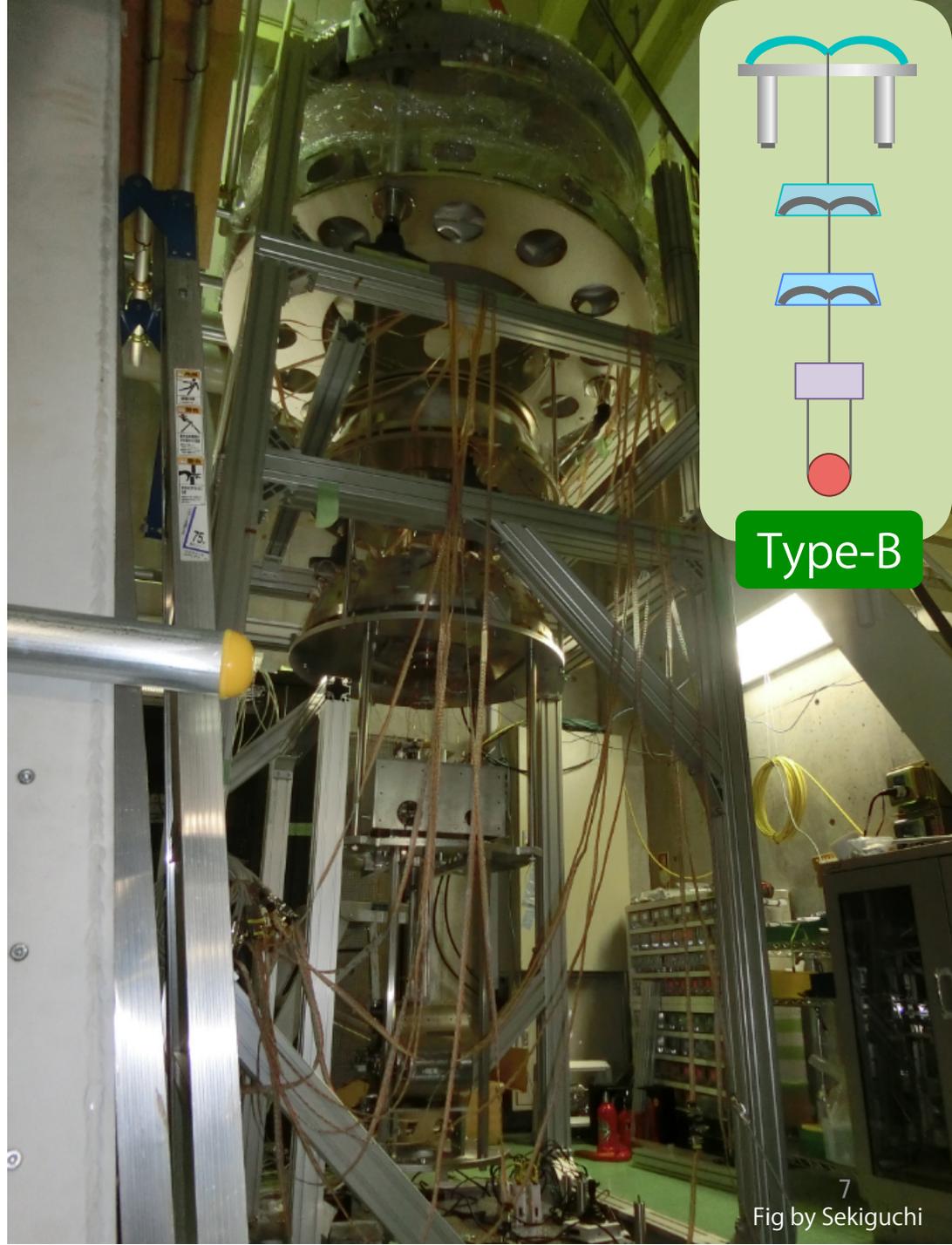
# 防振装置の試験

- ☑ Type-B SAS 単体での試験終了 (-2015.06)



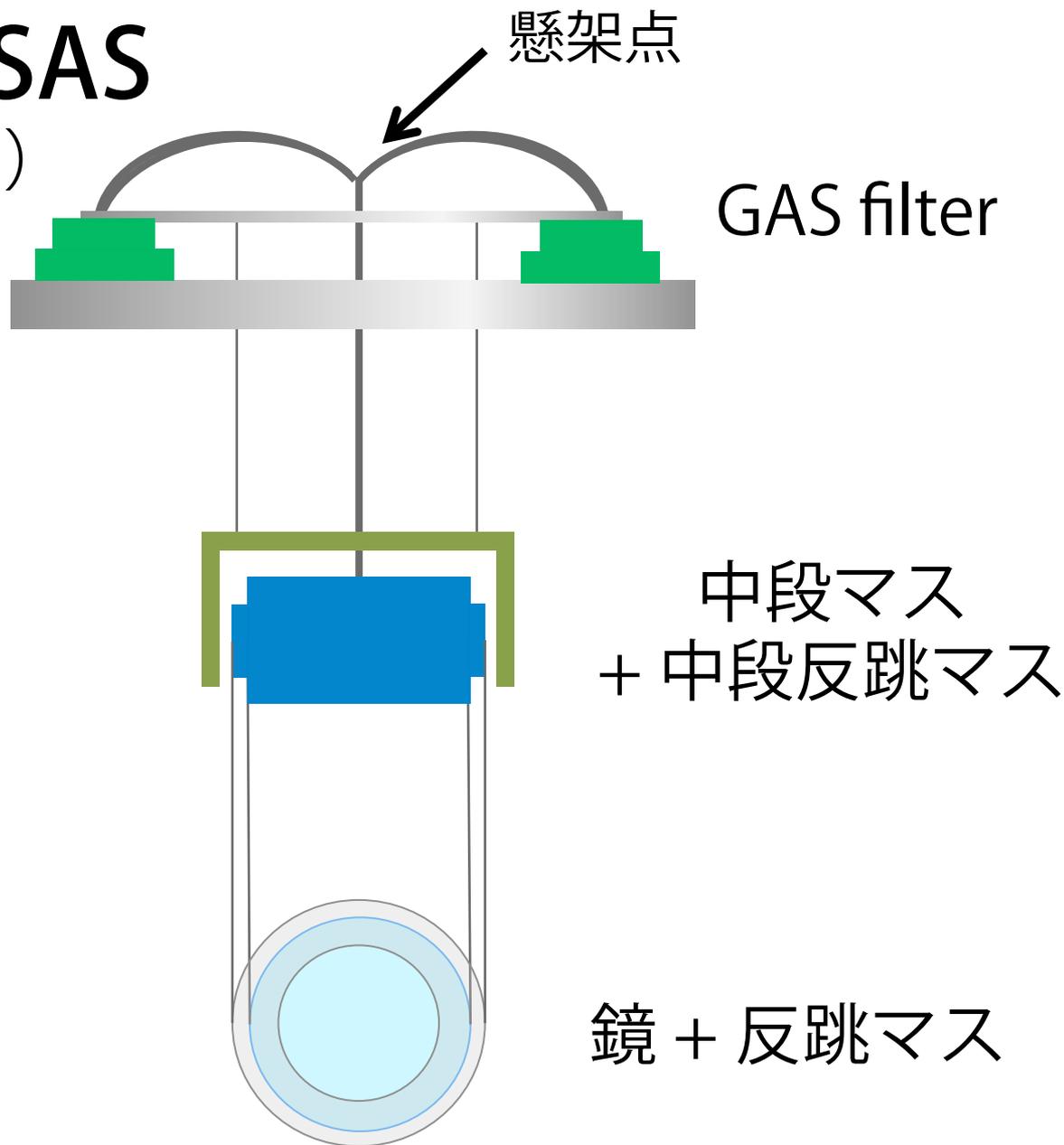
Next step:

- 防振装置を干渉計に組み込んだ試験

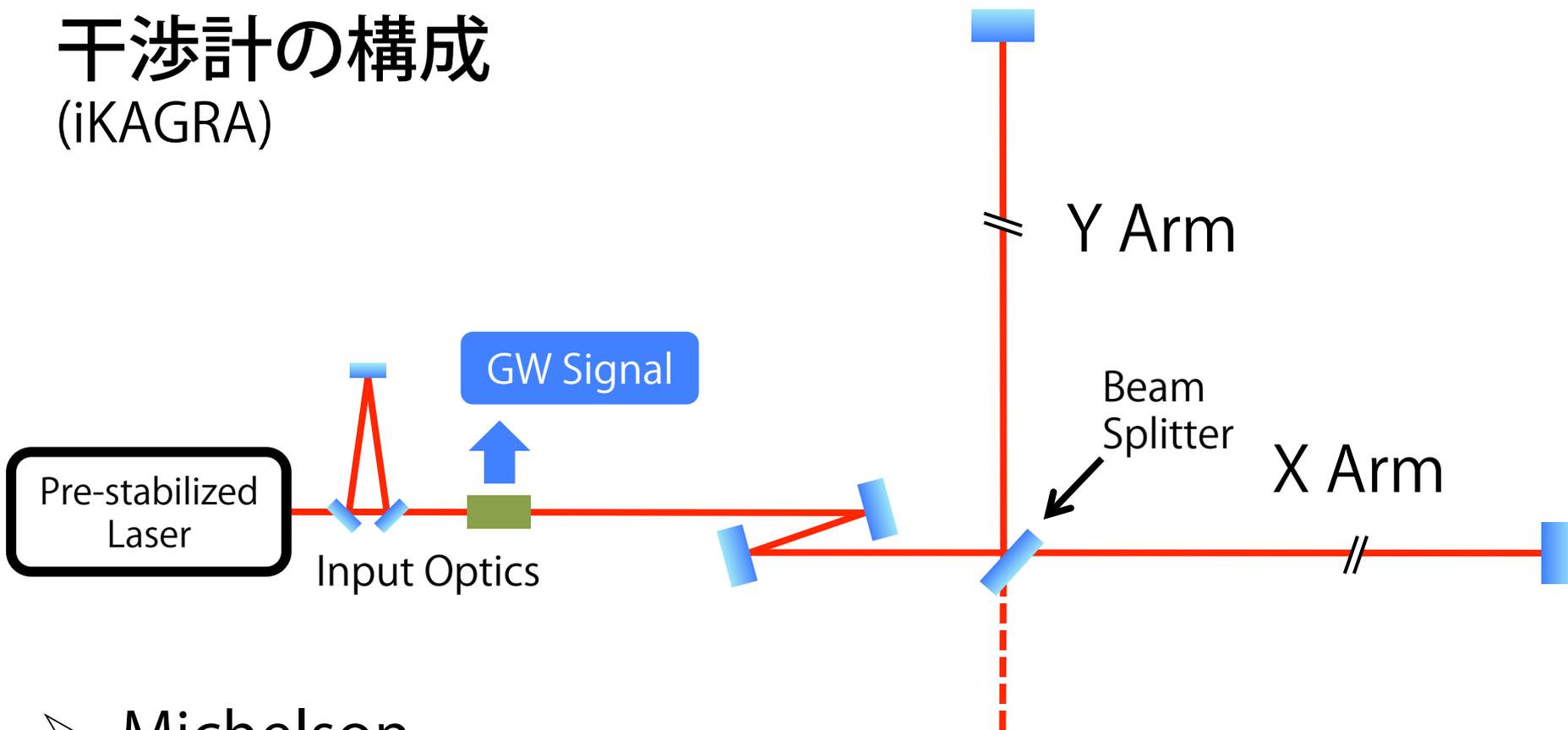


# Type-Bp' SAS

(iKAGRA PR3)

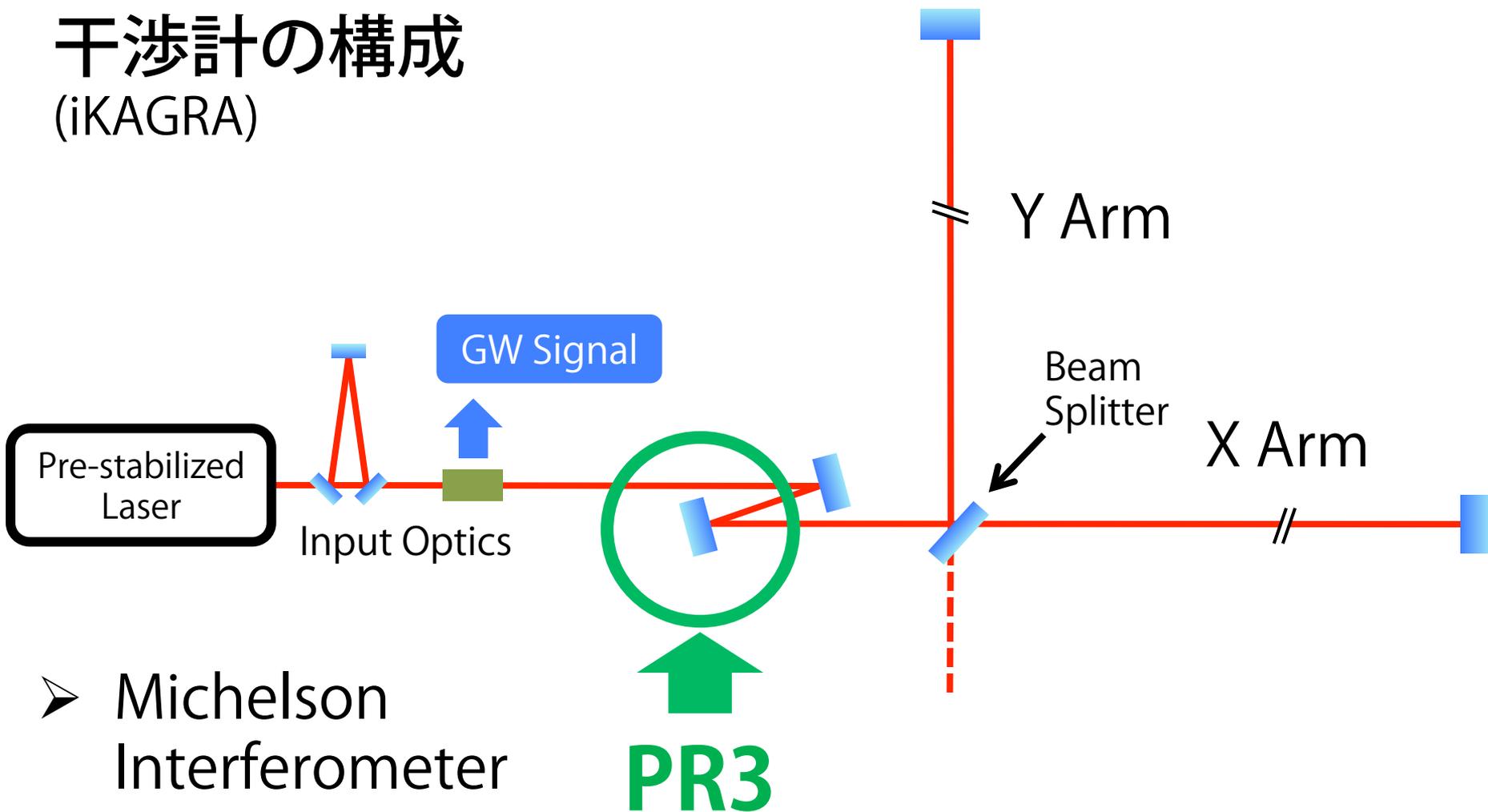


# 干渉計の構成 (iKAGRA)



- Michelson Interferometer

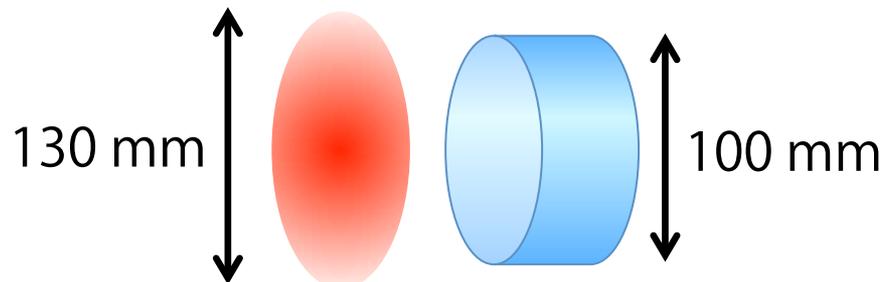
# 干渉計の構成 (iKAGRA)



➤ Michelson Interferometer

たとえば…

PR3鏡が  $10 \mu\text{rad}$  程度  
揺れていると、3 km 先の  
ビームスポットは  $30 \text{ mm}$  も  
動いてしまう

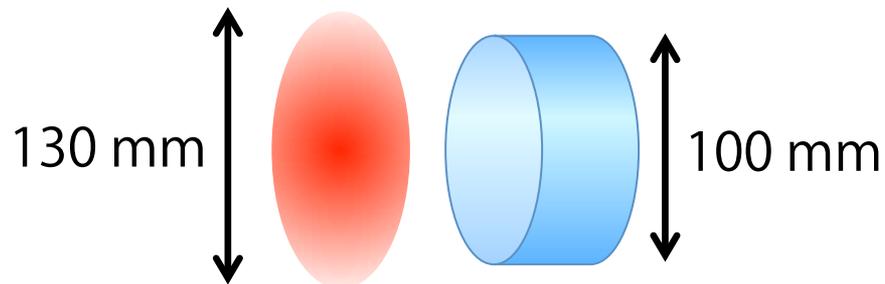


3 km先での  
ビームスポット  $\leq 1 \text{ mm}$  の揺れ  $\iff$  PR3 鏡の  
角度揺れ  $\leq 0.3 \mu\text{rad}$

iKAGRA における干渉計からの要求

たとえば…

PR3鏡が  $10 \mu\text{rad}$  程度  
揺れていると、3 km 先の  
ビームスポットは  $30 \text{ mm}$  も  
動いてしまう



3 km先での  
ビームスポット  $\leq 1 \text{ mm}$   
の揺れ

制御への要求

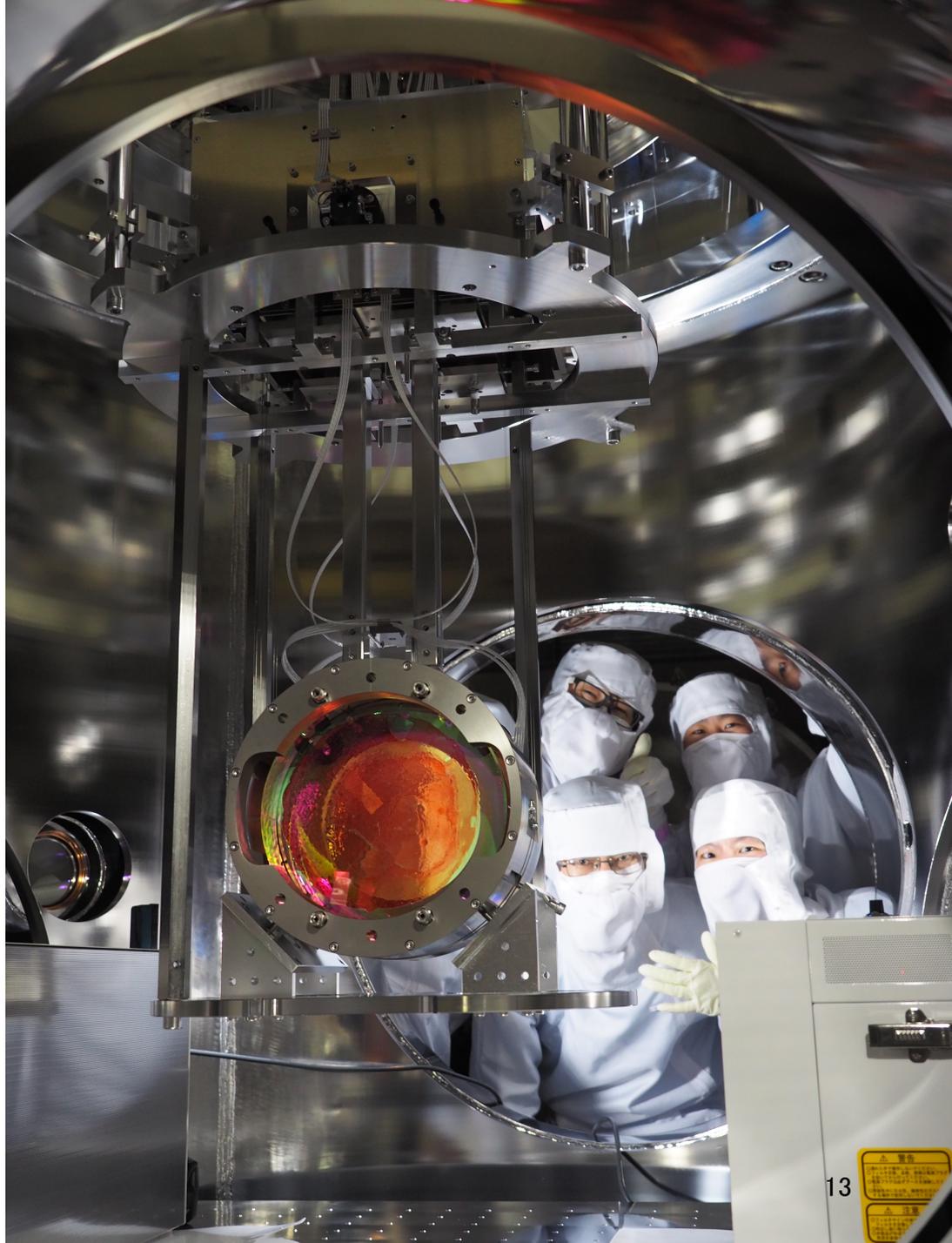
PR3 鏡の  
角度揺れ  $\leq 0.3 \mu\text{rad}$

ikAGRA における干渉計からの要求

# Type-Bp' SAS Installation

2016.02.25

真空槽内への  
インストール完了

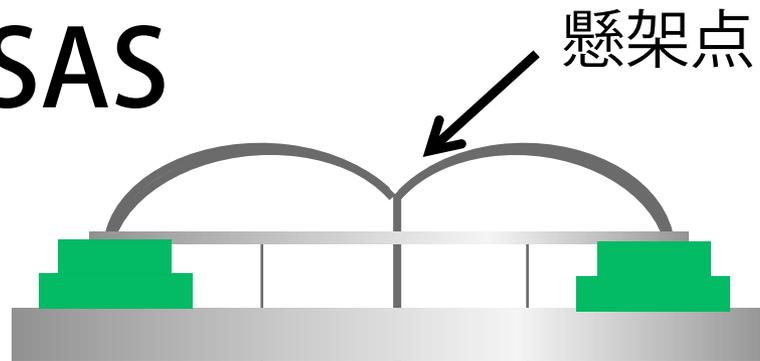


# Contents

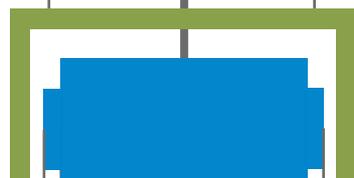
- PR3鏡防振装置：Type-Bp' SAS
  - 制御の目的
  - センサ・アクチュエータ
- ダンピング制御

# Type-Bp' SAS

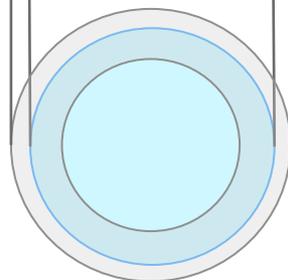
(Mass stage)



GAS filter



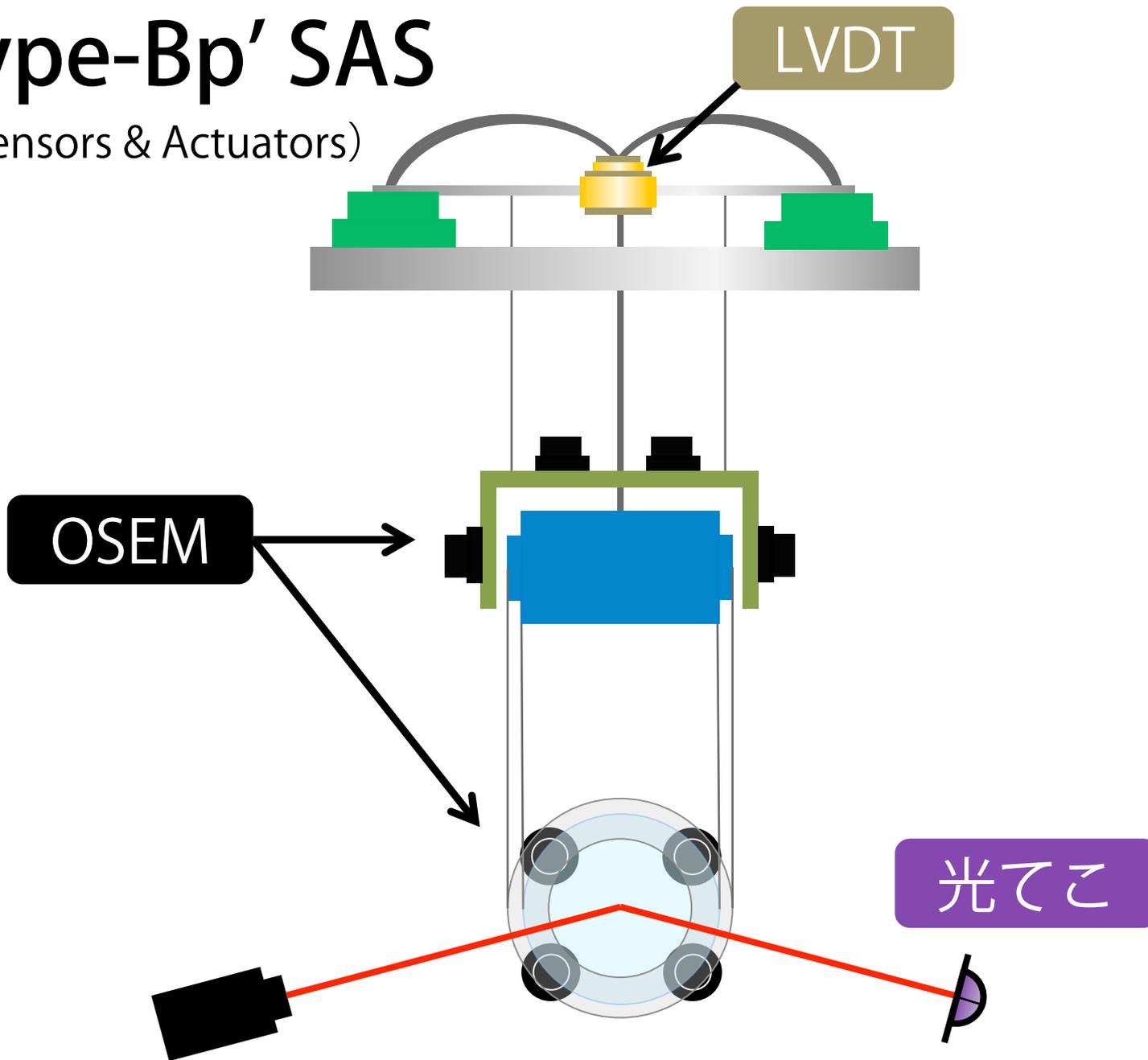
中段マス  
+ 中段反跳マス



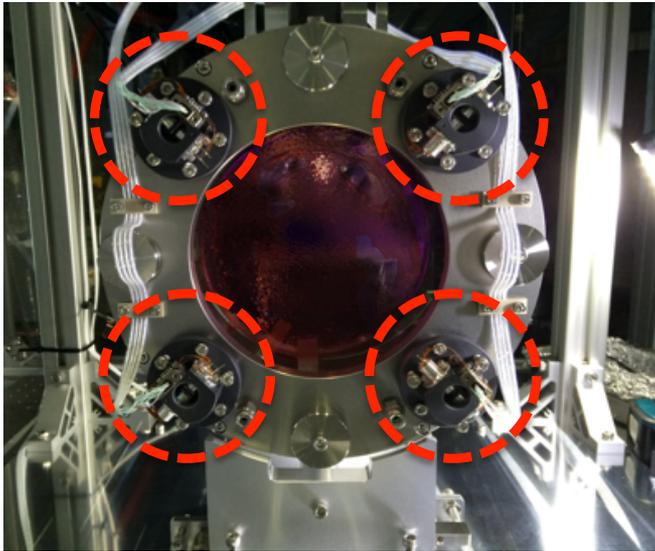
鏡 + 反跳マス

# Type-Bp' SAS

(Sensors & Actuators)

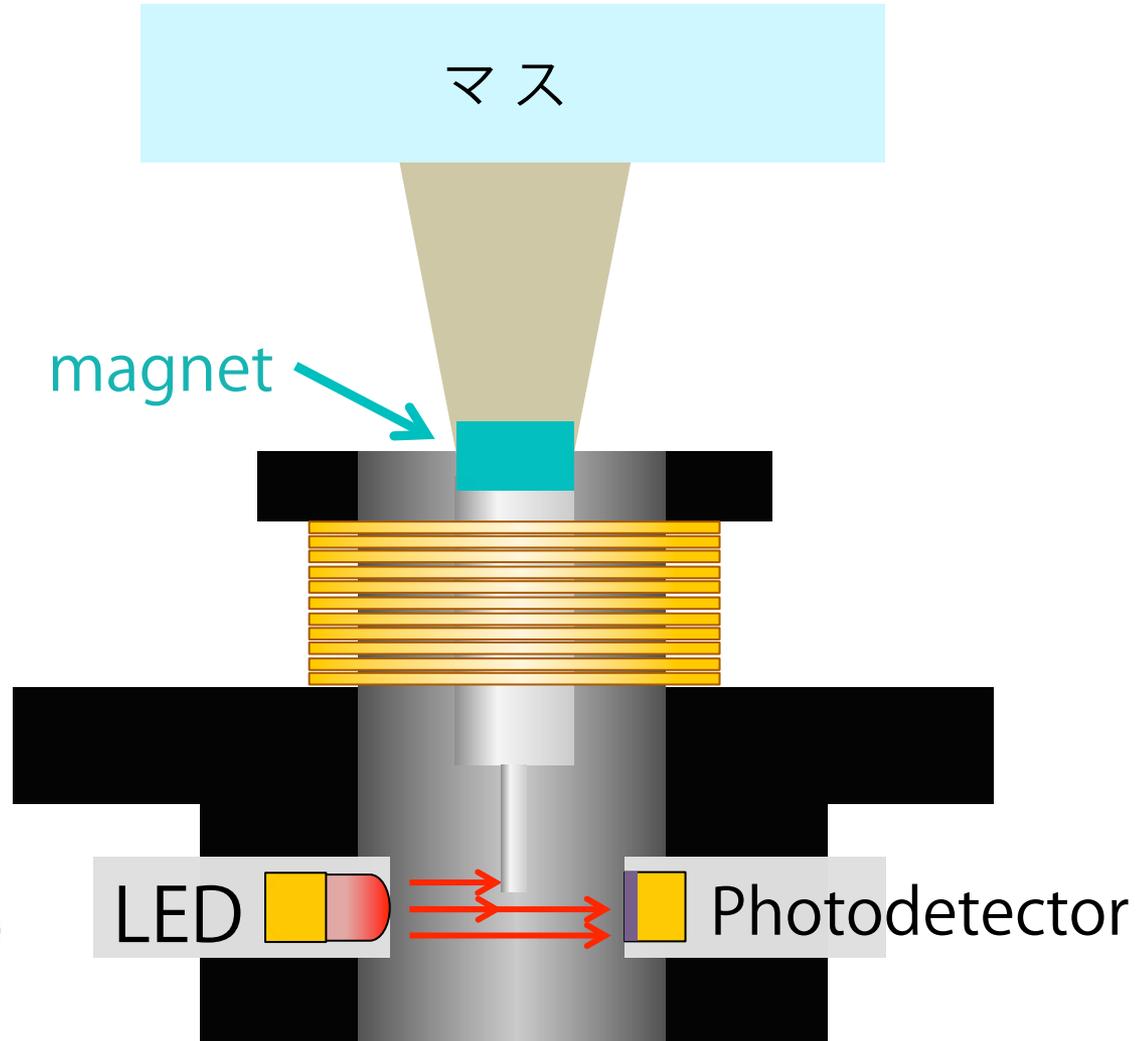


# Optical Sensor and ElectroMagnet



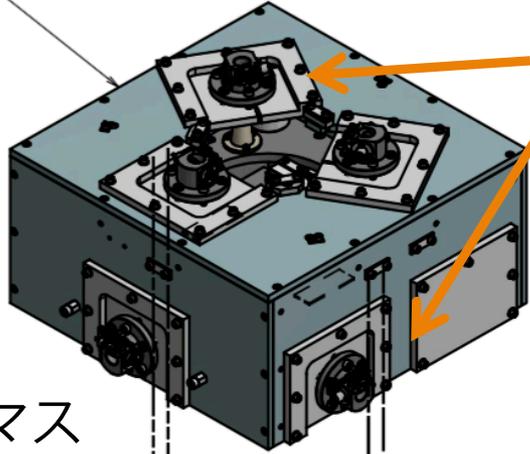
シャドー変位センサ  
+  
電磁力アクチュエータ

- マスー反跳マス間の  
相対位置を制御

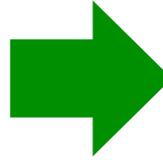


# OSEMの配置

中段反跳マス



OSEM x6  
- Vertical x3  
- Horizontal x3

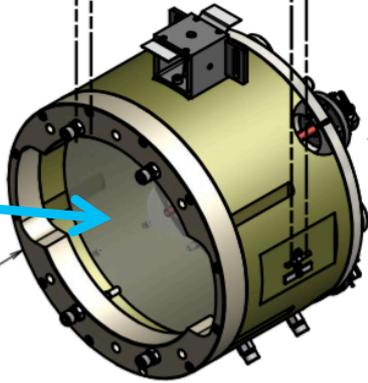


中段マス—中段反跳マス 間  
6自由度

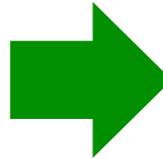
中段マス

鏡

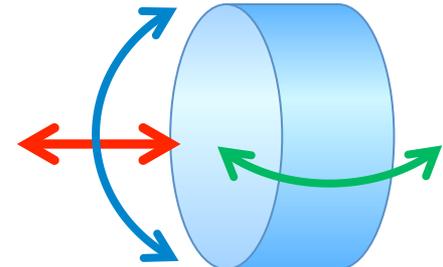
反跳マス



OSEM x4  
(backside)

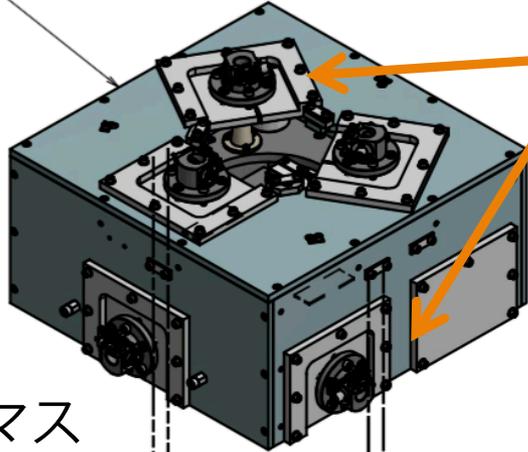


鏡—反跳マス 間  
3自由度

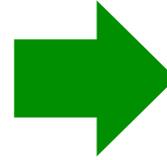


# OSEMの配置

中段反跳マス

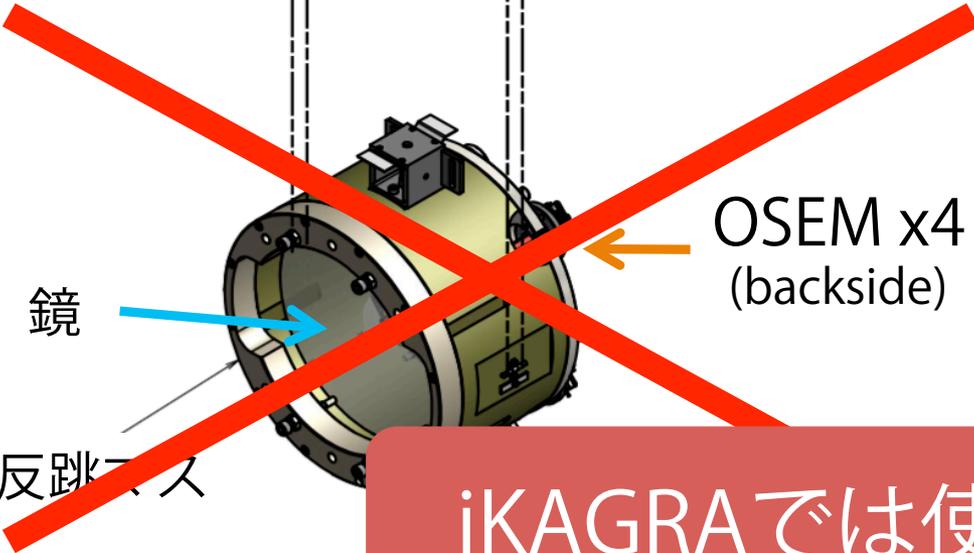


OSEM x6  
- Vertical x3  
- Horizontal x3

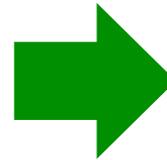


中段マス—中段反跳マス 間  
6自由度

中段マス

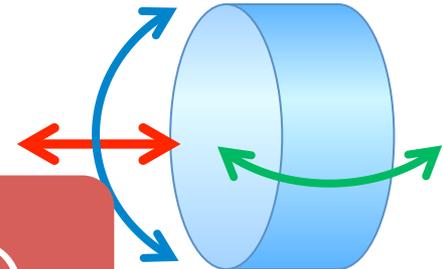


OSEM x4  
(backside)



鏡—反跳マス 間

**固定**



iKAGRAでは使わない

# Type-Bp' SAS

(Sensors & Actuators)

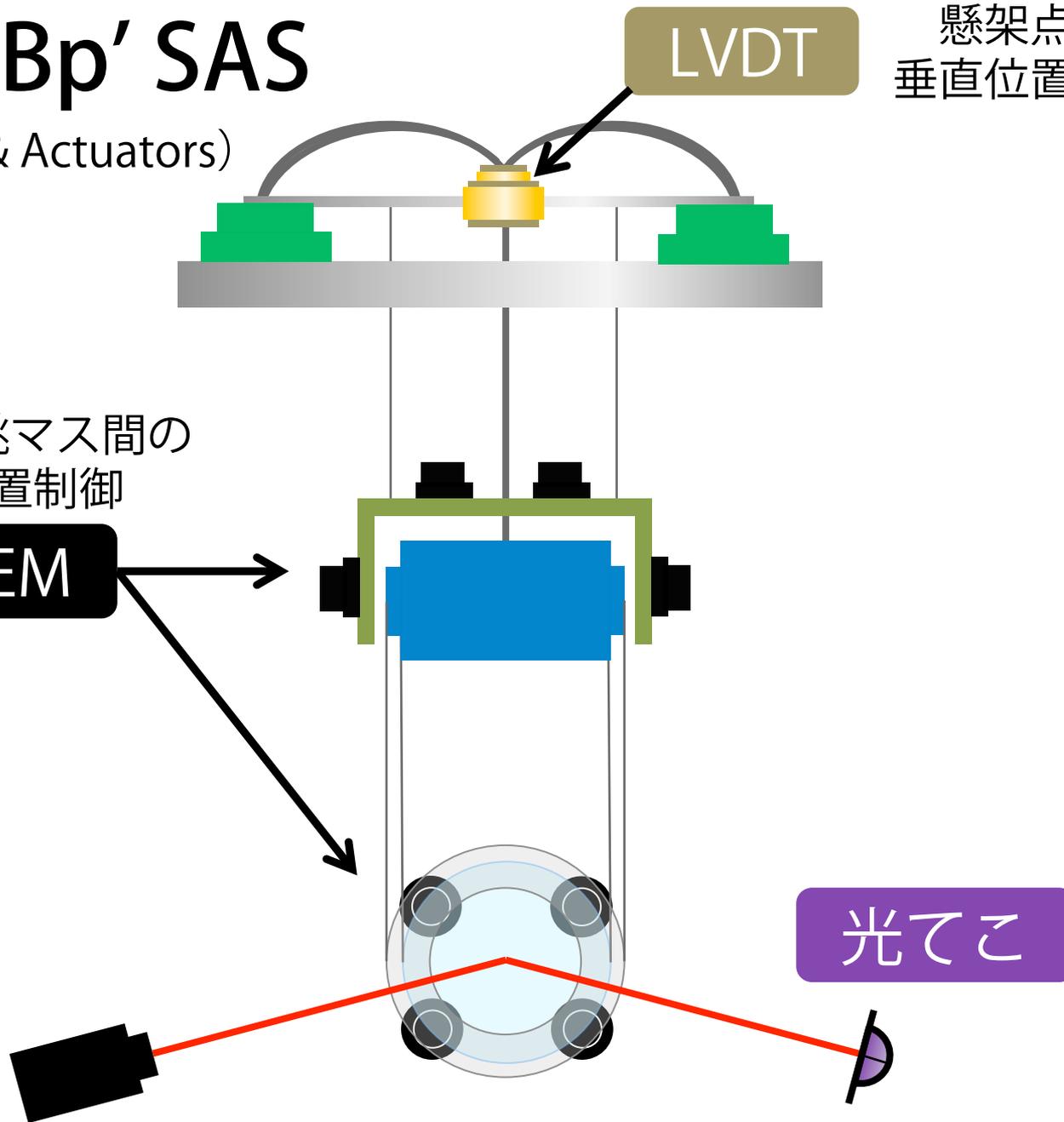
LVDT

懸架点の  
垂直位置制御

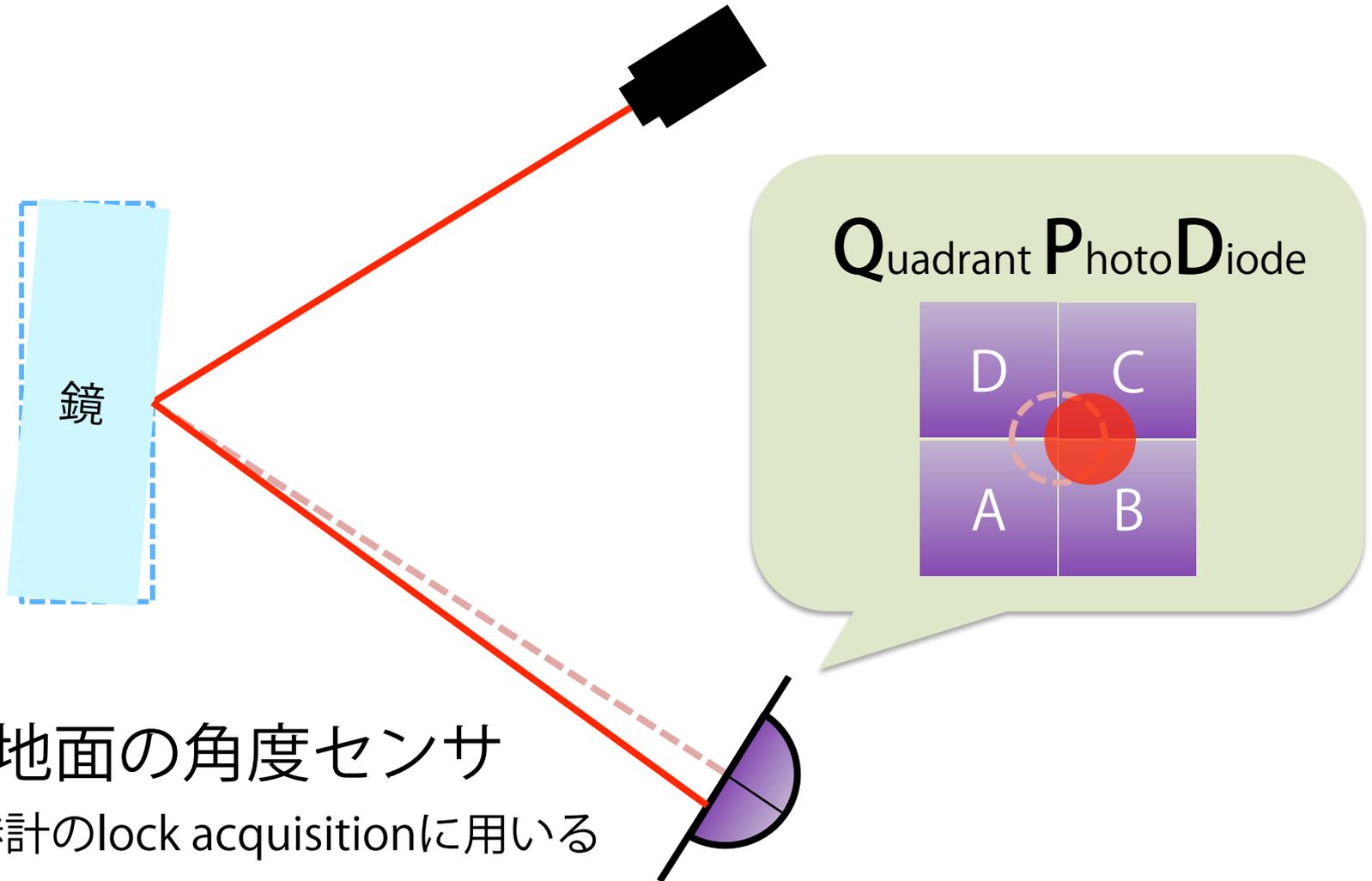
マスー反跳マス間の  
相対位置制御

OSEM

光てこ



# 光てこ (Optical Lever)

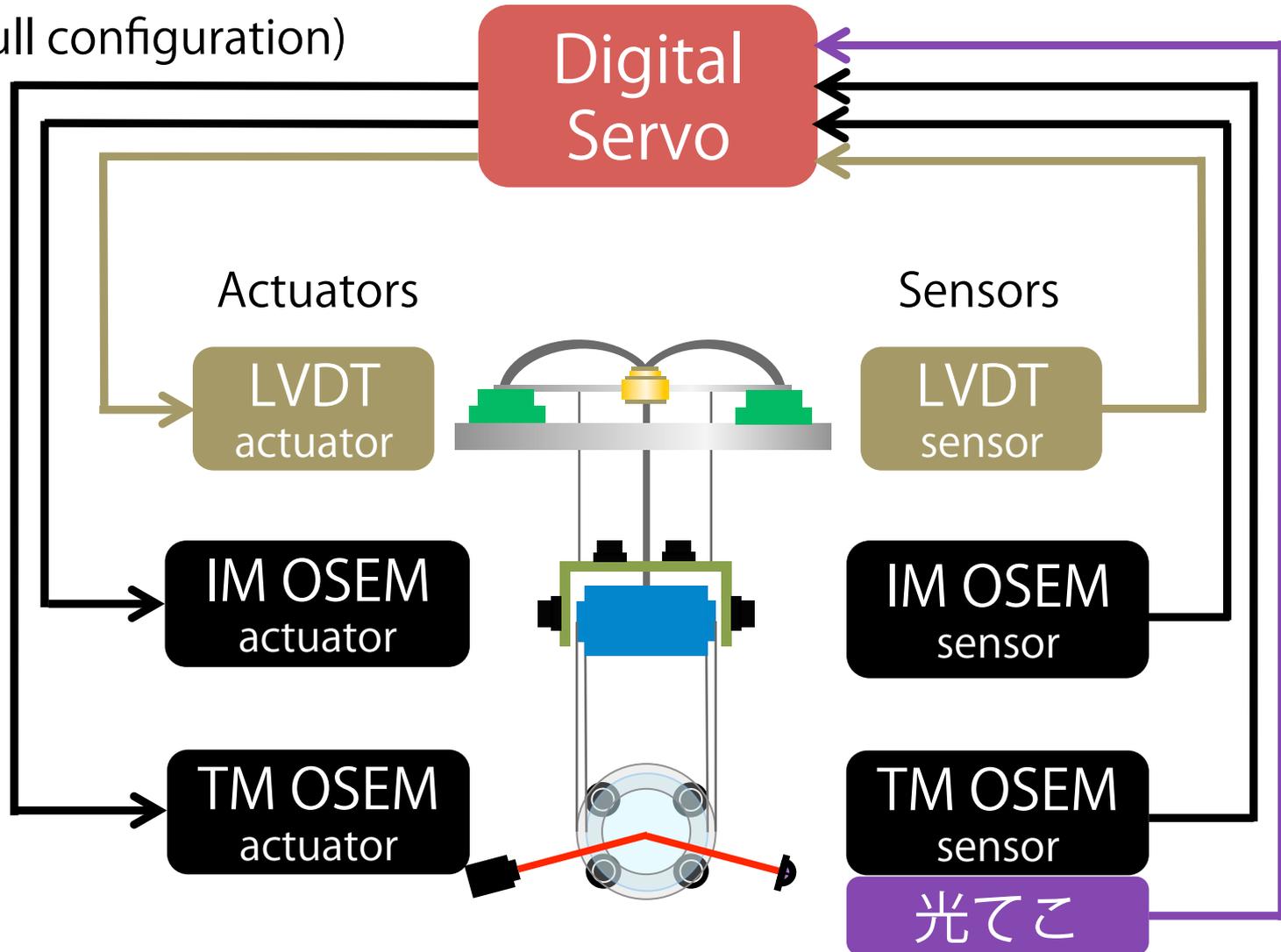


鏡 — 地面の角度センサ

- 干渉計のlock acquisitionに用いる

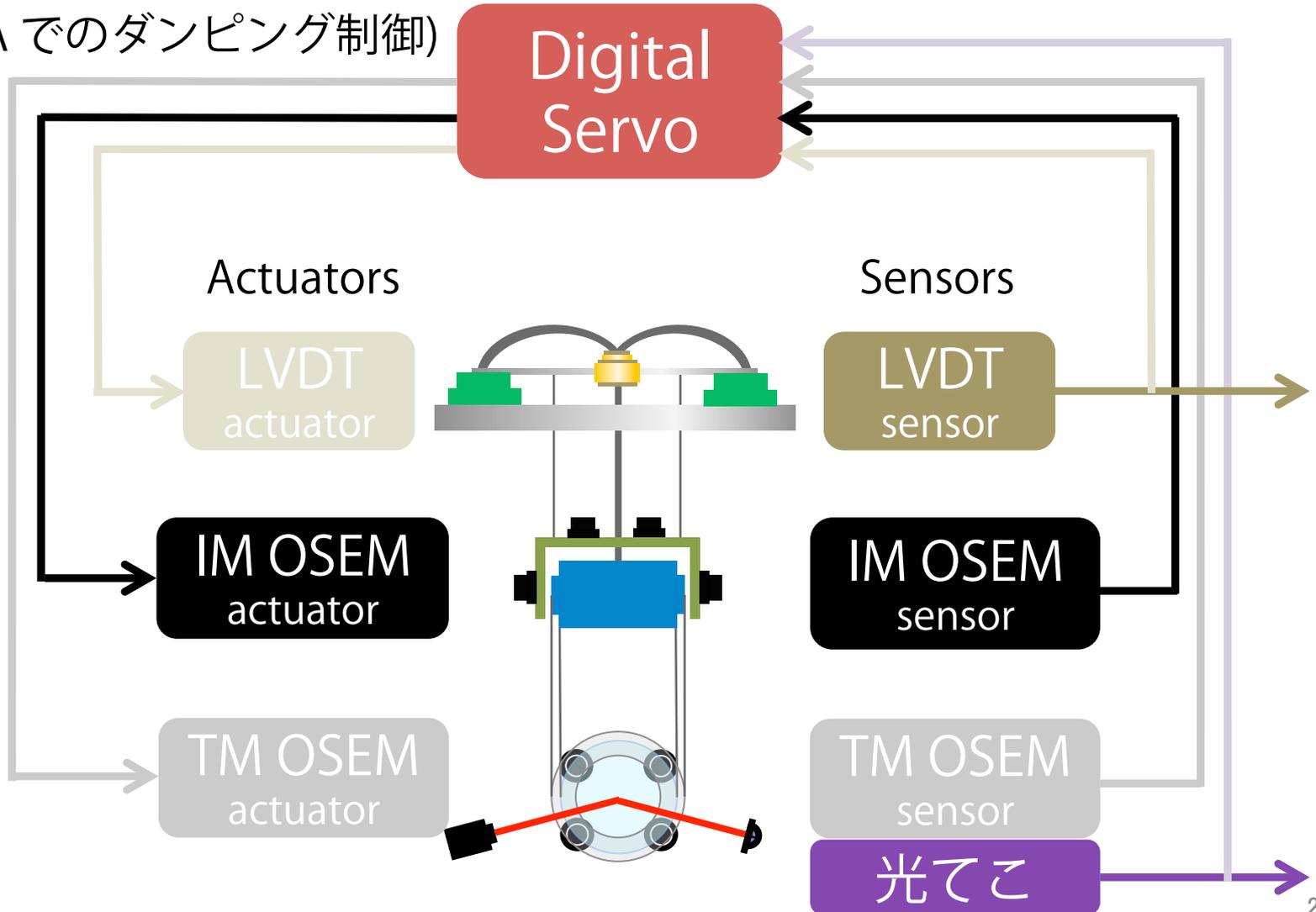
# ローカル制御ループ

(Full configuration)



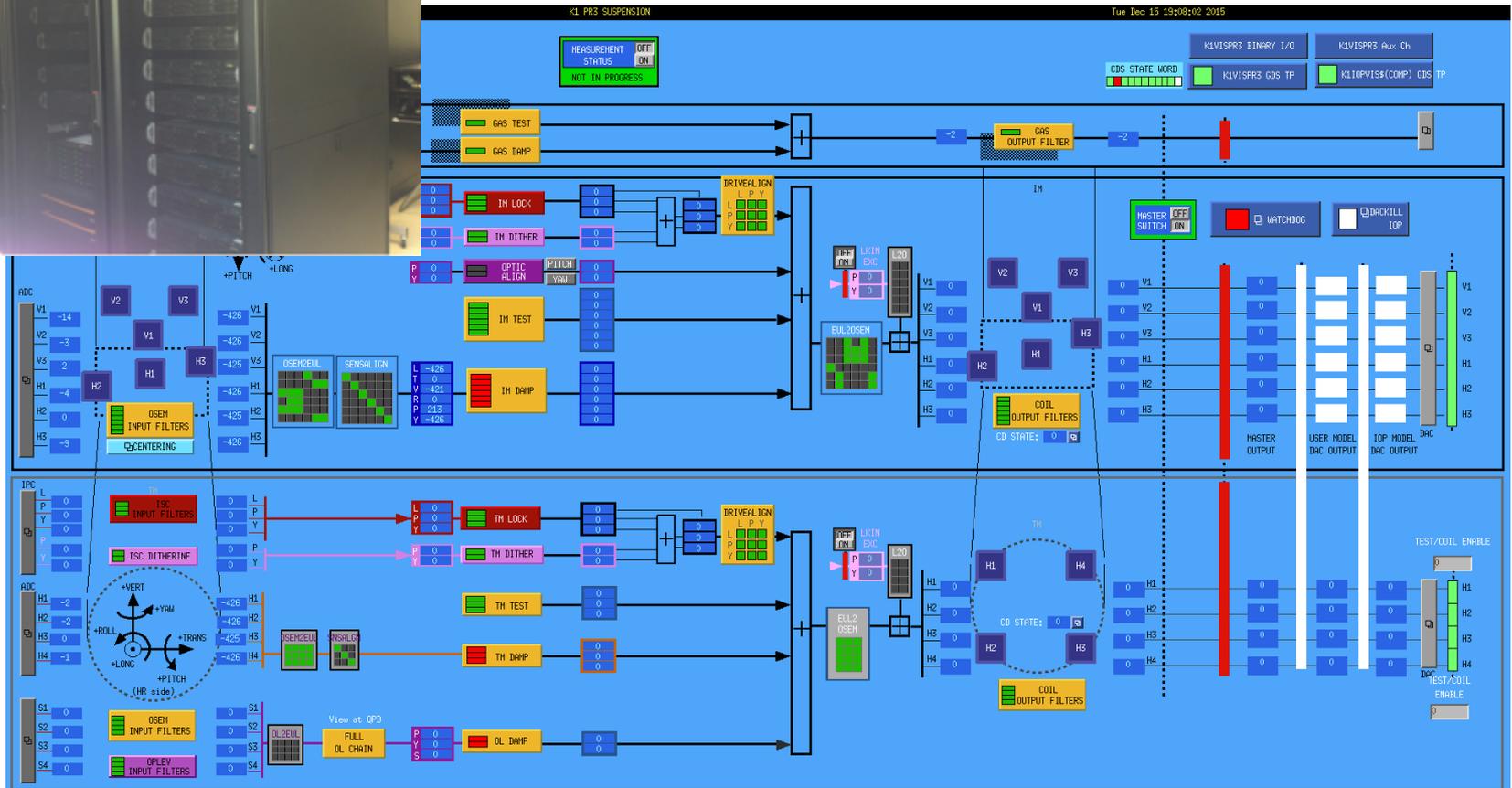
# ローカル制御ループ

(iKAGRA でのダンピング制御)



# Real Time Control System

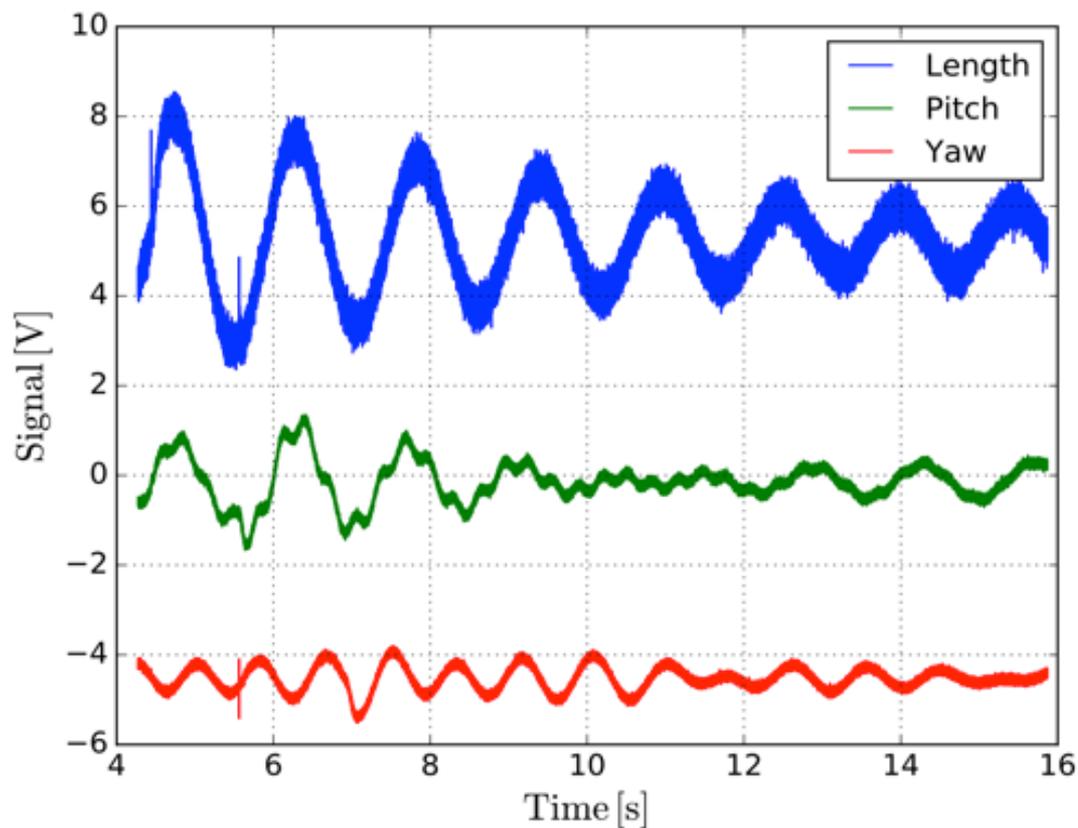
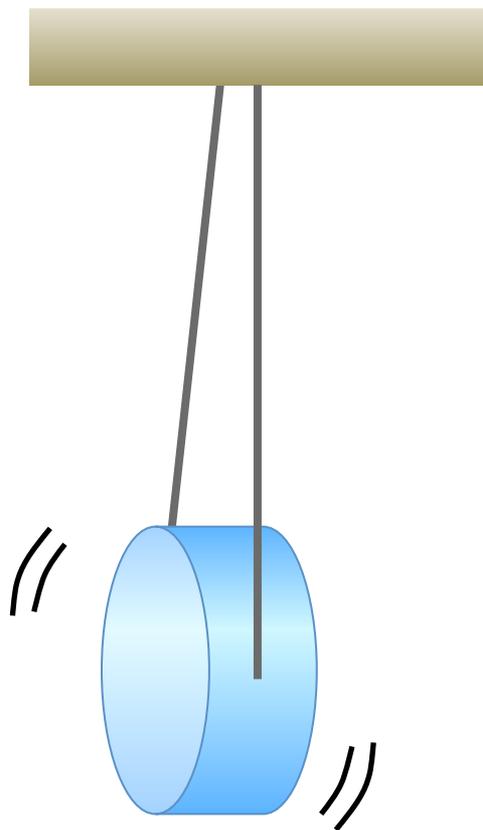
デジタルシステム内でフィルタを実装



# Contents

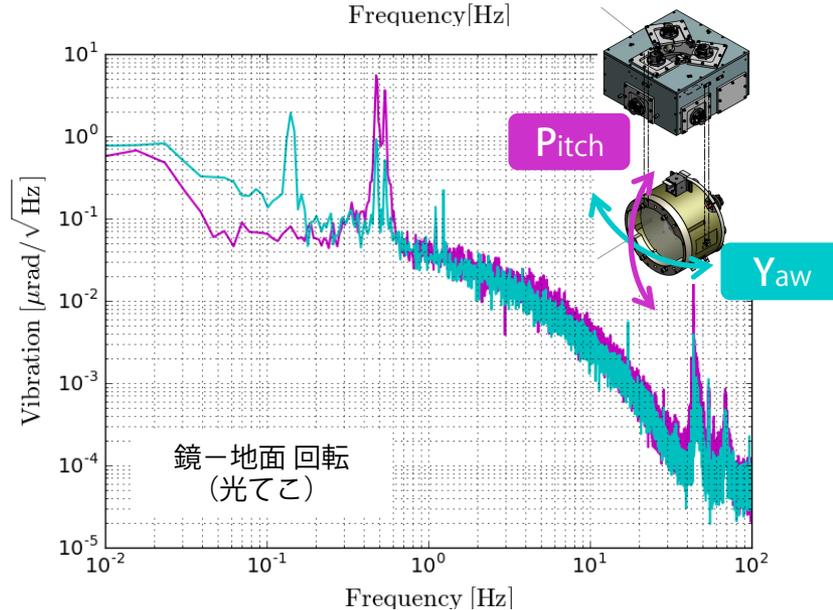
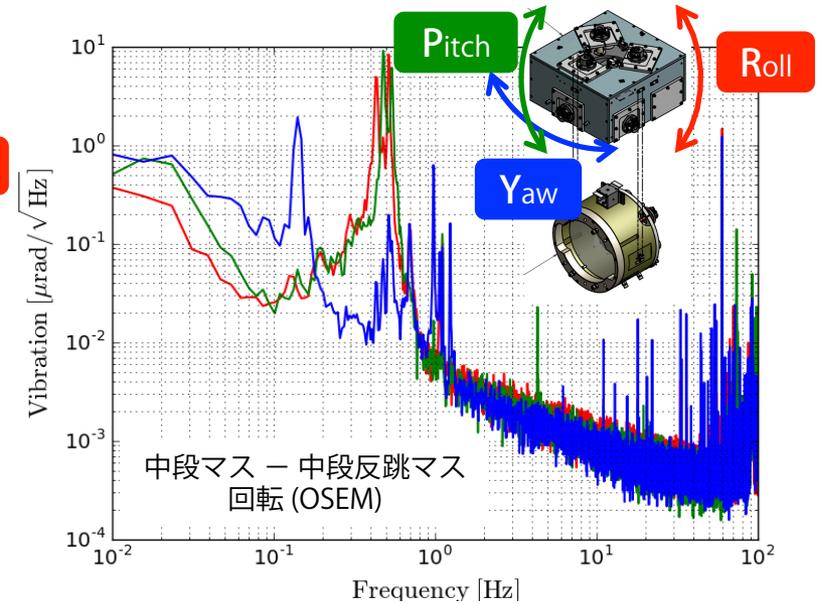
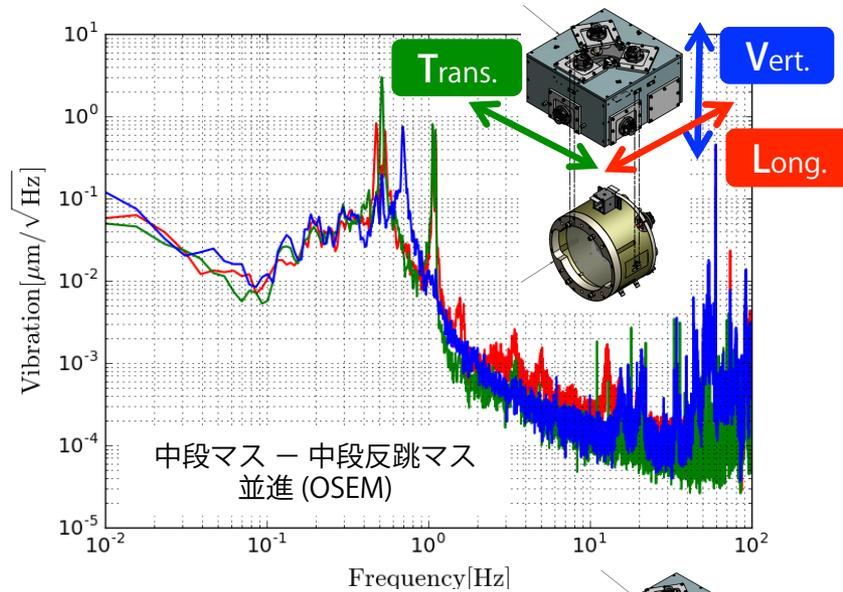
- PR3鏡防振装置：Type-Bp' SAS
  - 制御の目的
  - センサ・アクチュエータ
- **ダンピング制御**

# ダンピング制御



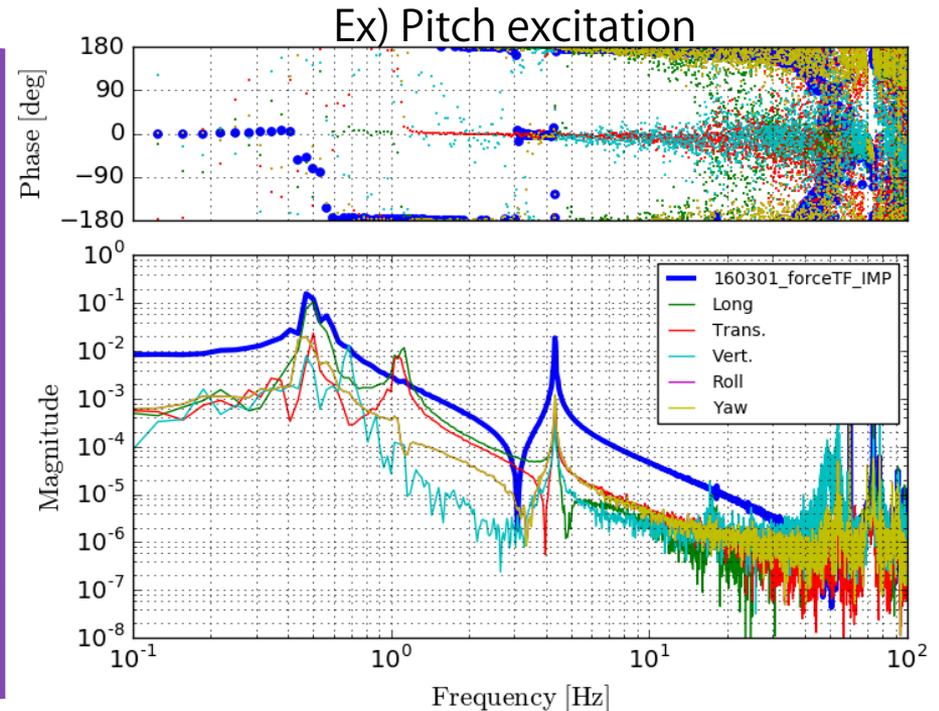
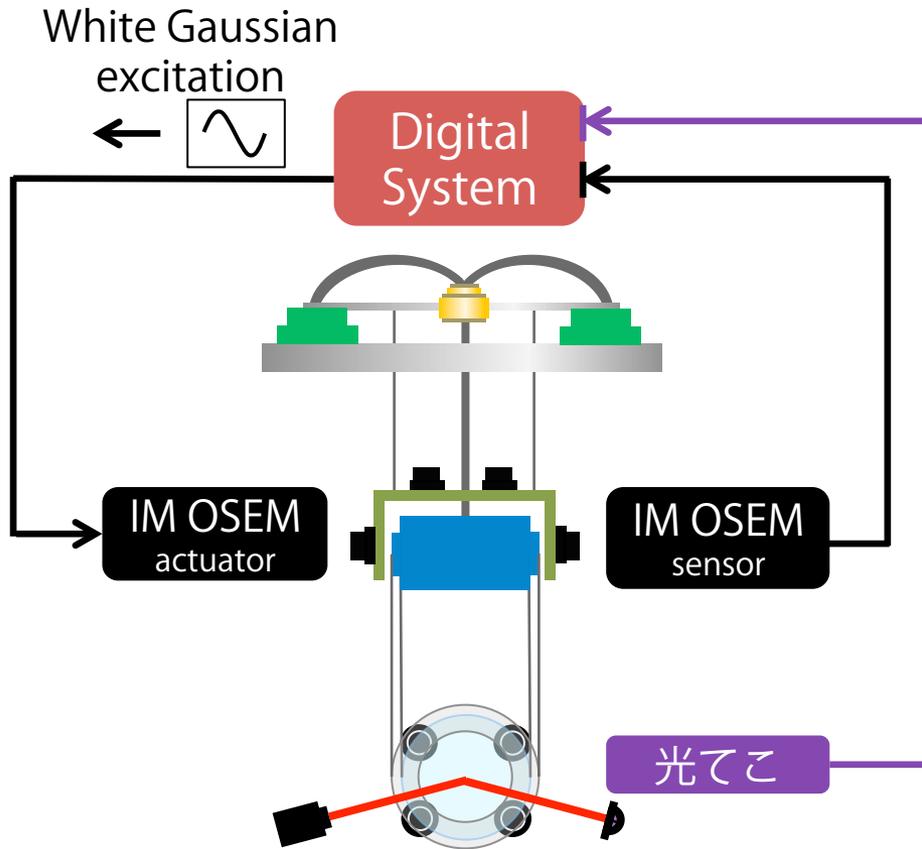
共振周波数での振り子の揺れを抑制する

# 振動スペクトルの測定



ダンピング制御  
||  
共振のピークを潰すこと

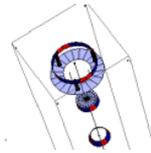
# 力変位伝達関数の測定



カップリングが大きい  
対角化が必要 → 今後の課題

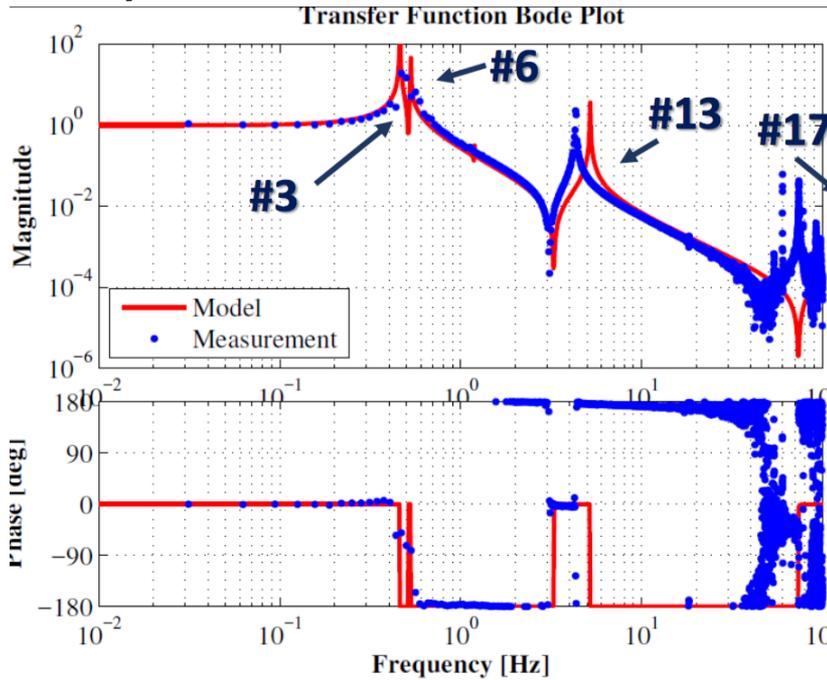
# モデルとの比較

**SUMCON** in *Mathematica*  
 suspension odel structur



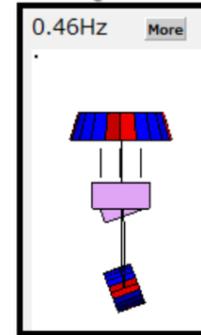
Developed by T. Sekiguchi

## Ex) IM OSEM Pitch / Act. Pitch

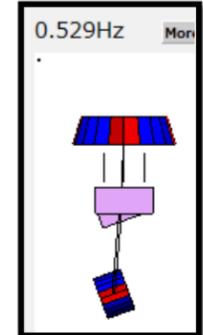


Simulated by Y. Fujii

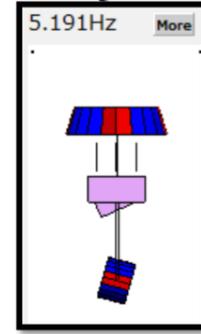
#3 : PIM  
/PRM



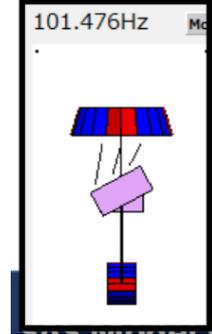
#6 : PIM  
/PRM



#13 : PIM  
/PRM

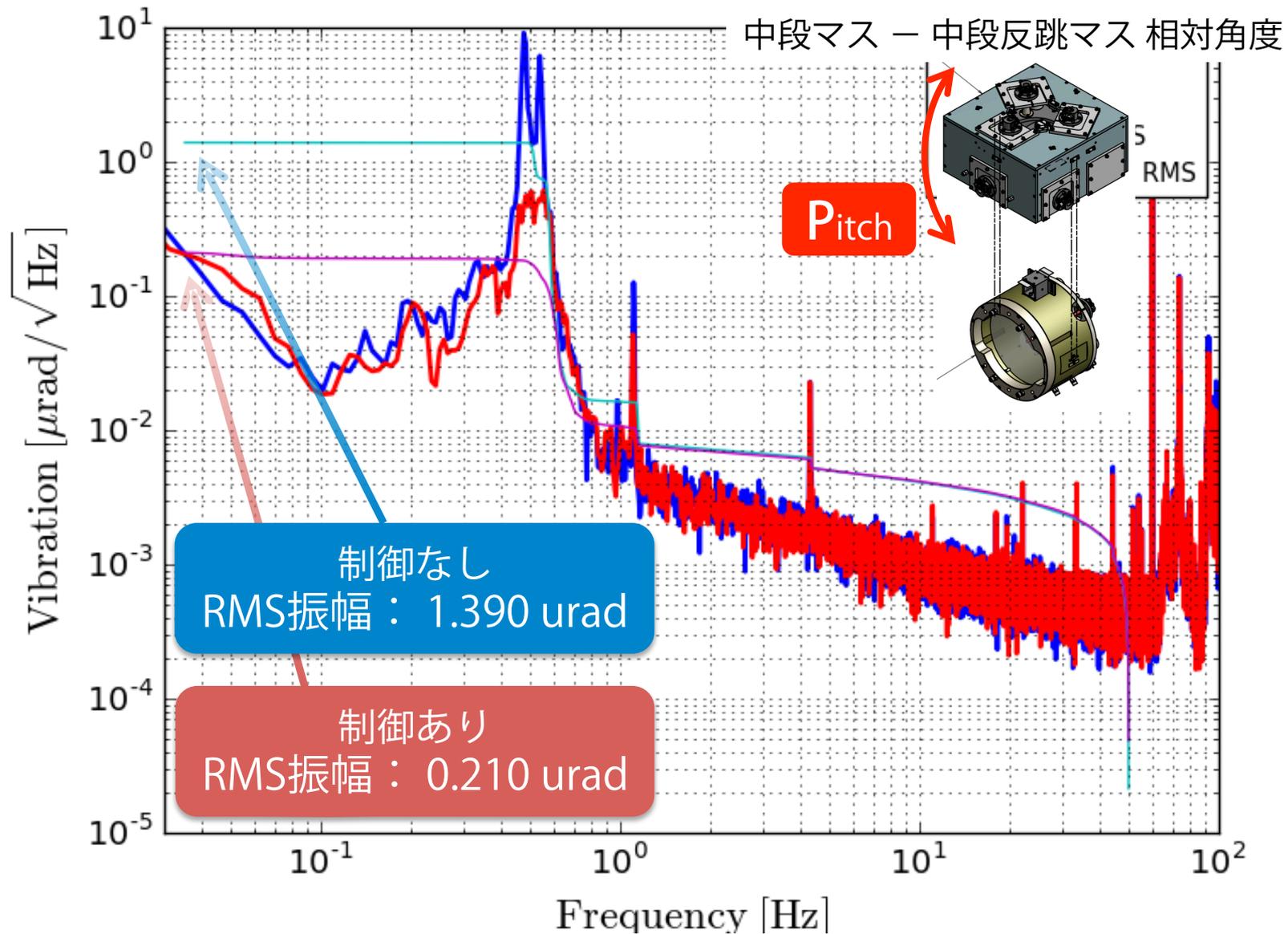


#17 : PIR

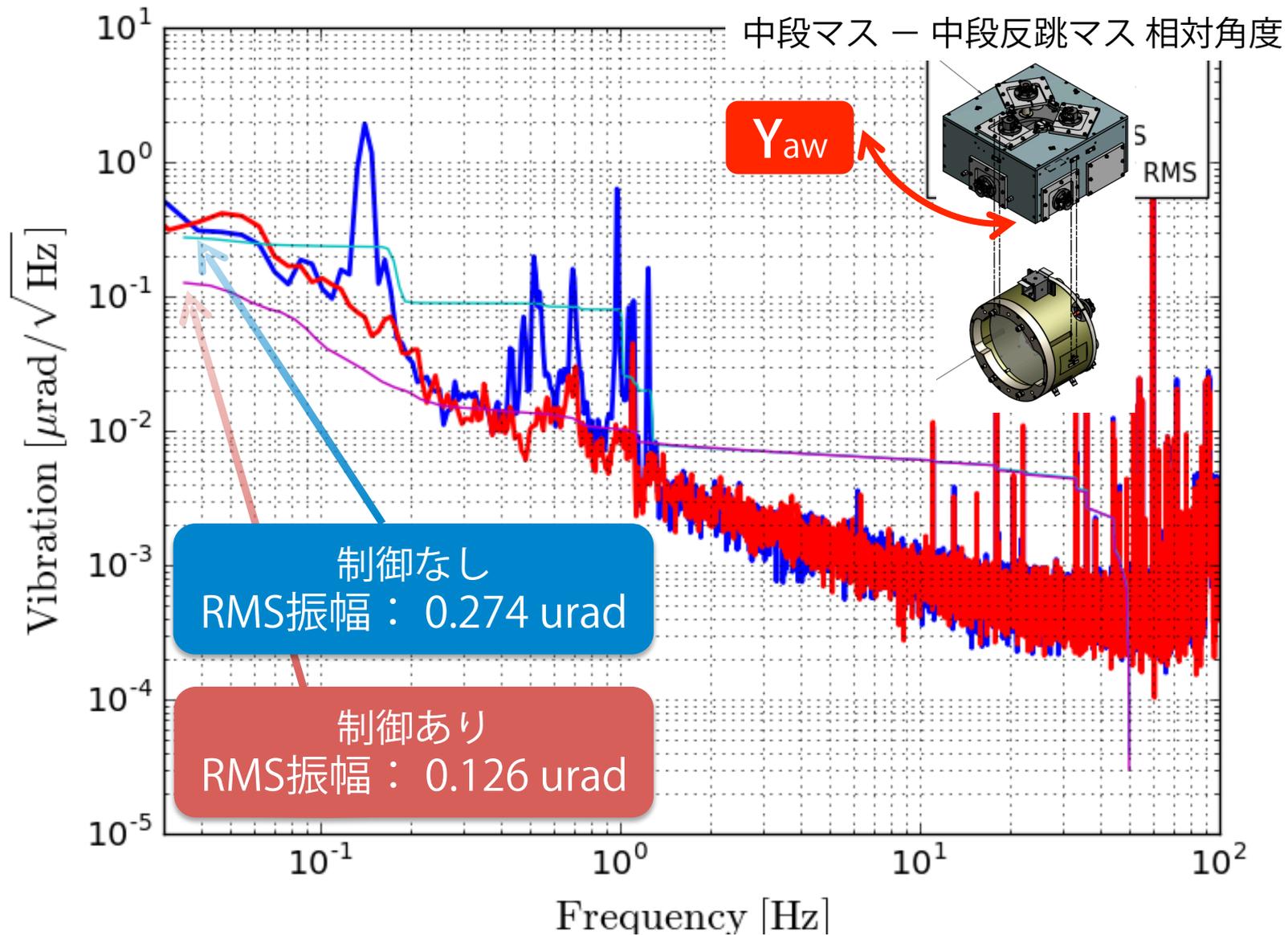


固有モードの特定、正しく懸架されているかを確認

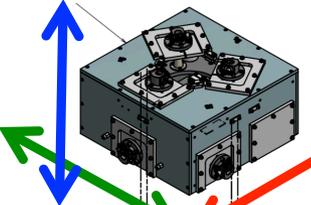
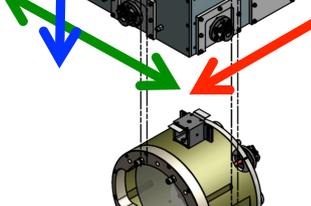
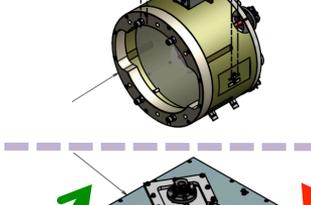
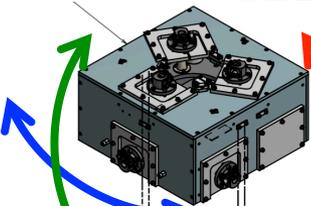
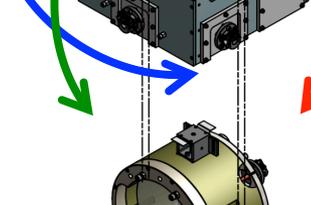
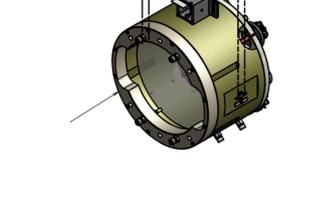
# 制御時の振動スペクトル(OSEM)



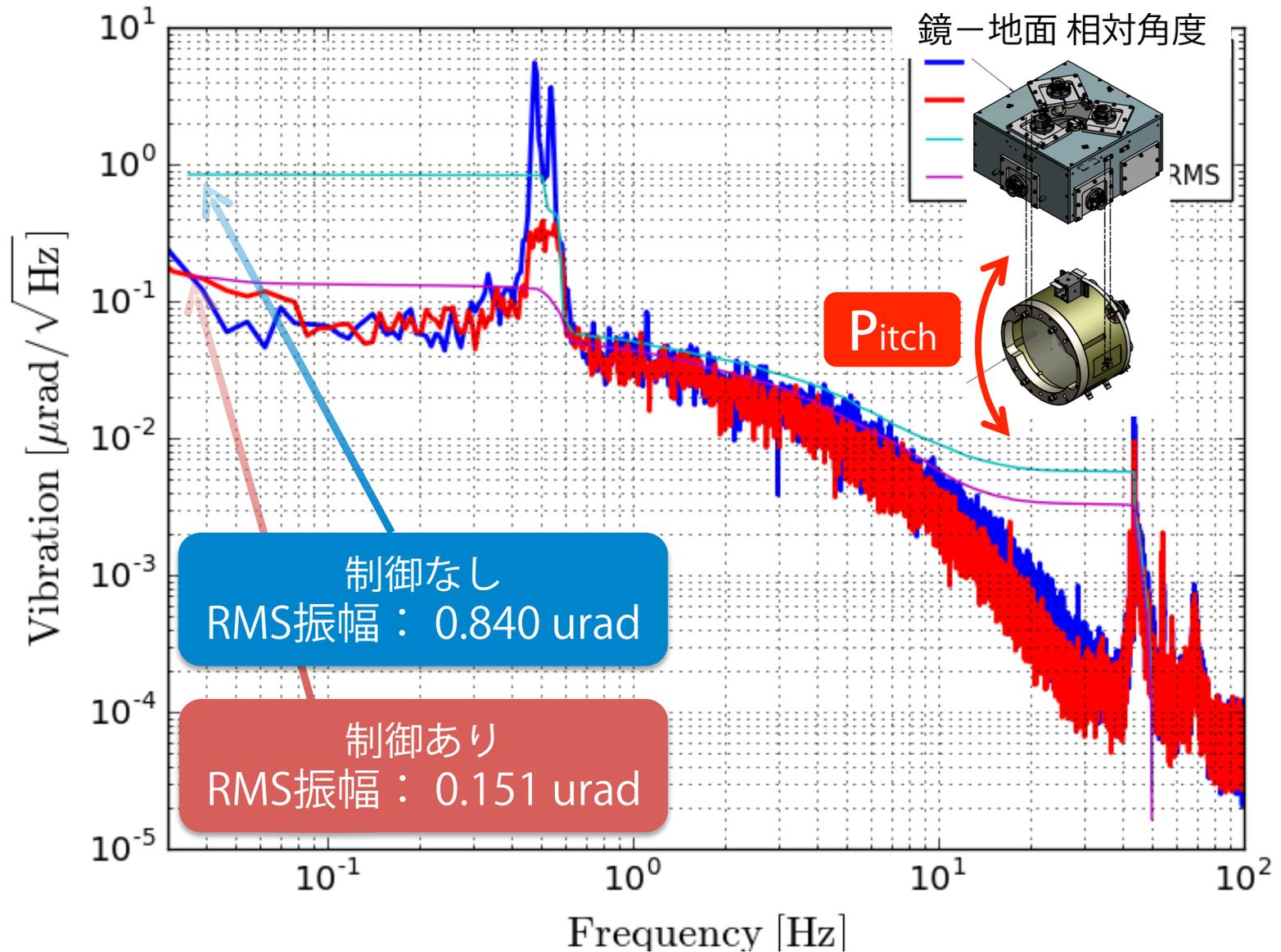
# 制御時の振動スペクトル(OSEM)



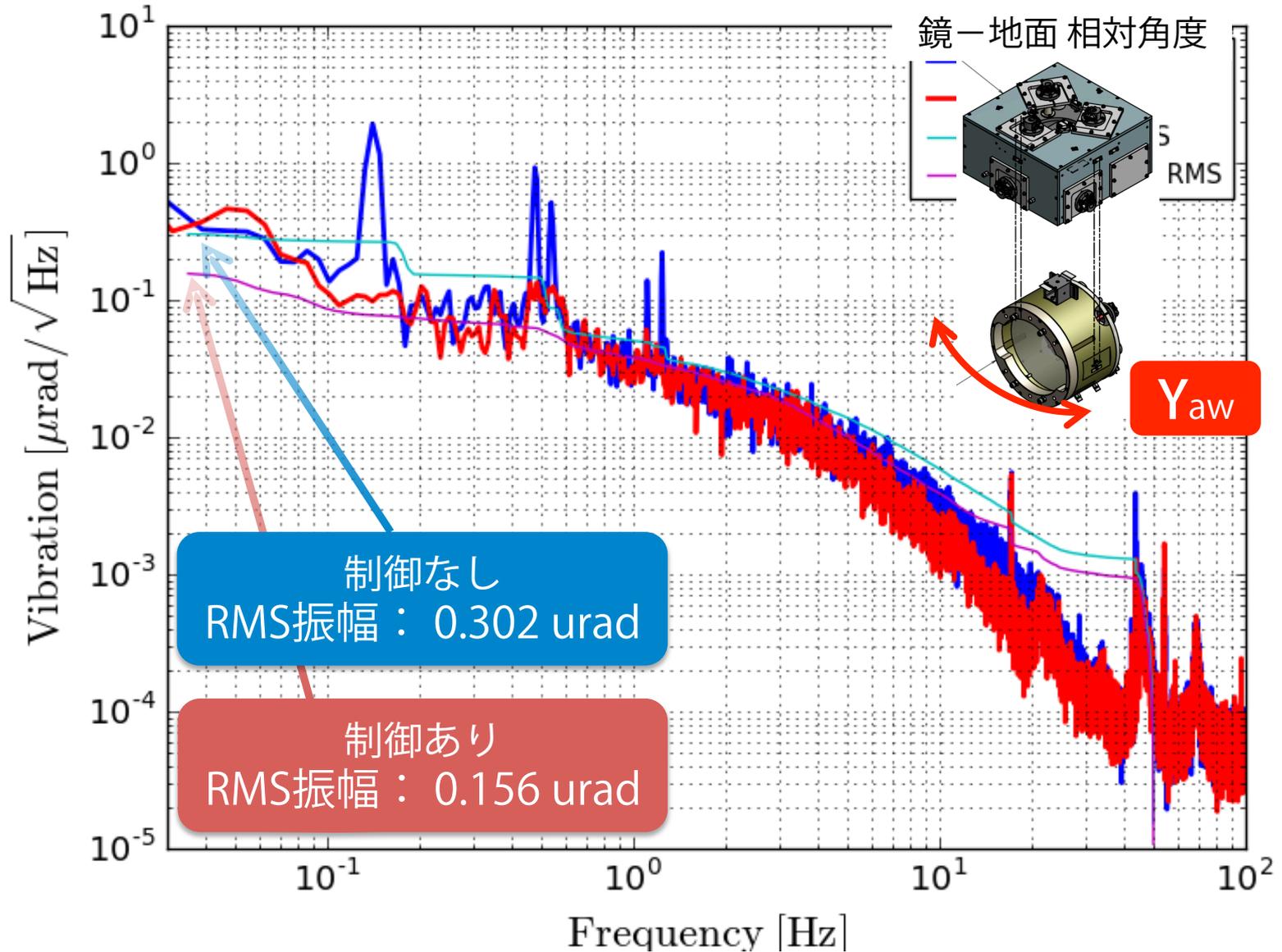
# ダンピング制御による振動低減

| 中段マスー<br>中段反跳マス間   | 制御なしRMS             | 制御ありRMS             |
|--|---------------------|---------------------|
|  <div data-bbox="465 468 633 554">Long.</div>     | 0.175 $\mu\text{m}$ | 0.026 $\mu\text{m}$ |
|  <div data-bbox="465 606 633 692">Trans.</div>    | 0.374 $\mu\text{m}$ | 0.025 $\mu\text{m}$ |
|  <div data-bbox="465 745 633 831">Vert.</div>     | 0.126 $\mu\text{m}$ | 0.051 $\mu\text{m}$ |
|  <div data-bbox="465 896 633 982">Roll</div>     | 1.217 $\text{urad}$ | 0.091 $\text{urad}$ |
|  <div data-bbox="465 1035 633 1120">Pitch</div> | 1.390 $\text{urad}$ | 0.210 $\text{urad}$ |
|  <div data-bbox="465 1173 633 1259">Yaw</div>   | 0.274 $\text{urad}$ | 0.126 $\text{urad}$ |

# 制御時の振動スペクトル (光てこ)



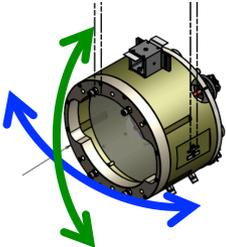
# 制御時の振動スペクトル (光てこ)



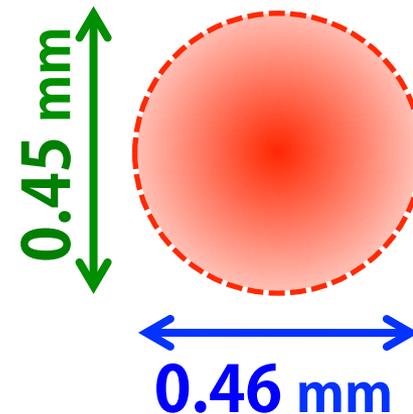
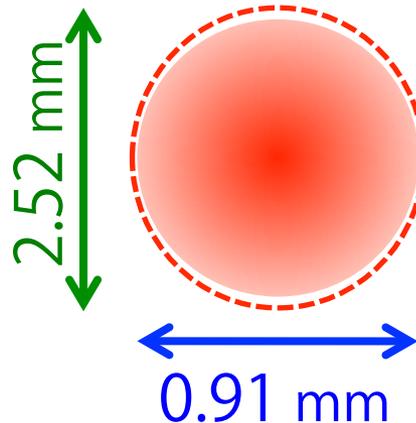
## 制御への要求

PR3 鏡の  
角度揺れ  $\leq 0.3 \mu\text{rad}$

要求を満たす  
制御を達成した

| 鏡-地面間   | 制御なしRMS                 | 制御ありRMS           |
|---|-------------------------|-------------------|
|  | <b>Pitch</b> 0.840 urad | <b>0.151 urad</b> |
|   | <b>Yaw</b> 0.302 urad   | <b>0.156 urad</b> |

3 km 先での  
ビームスポット  
の揺れ



# まとめ

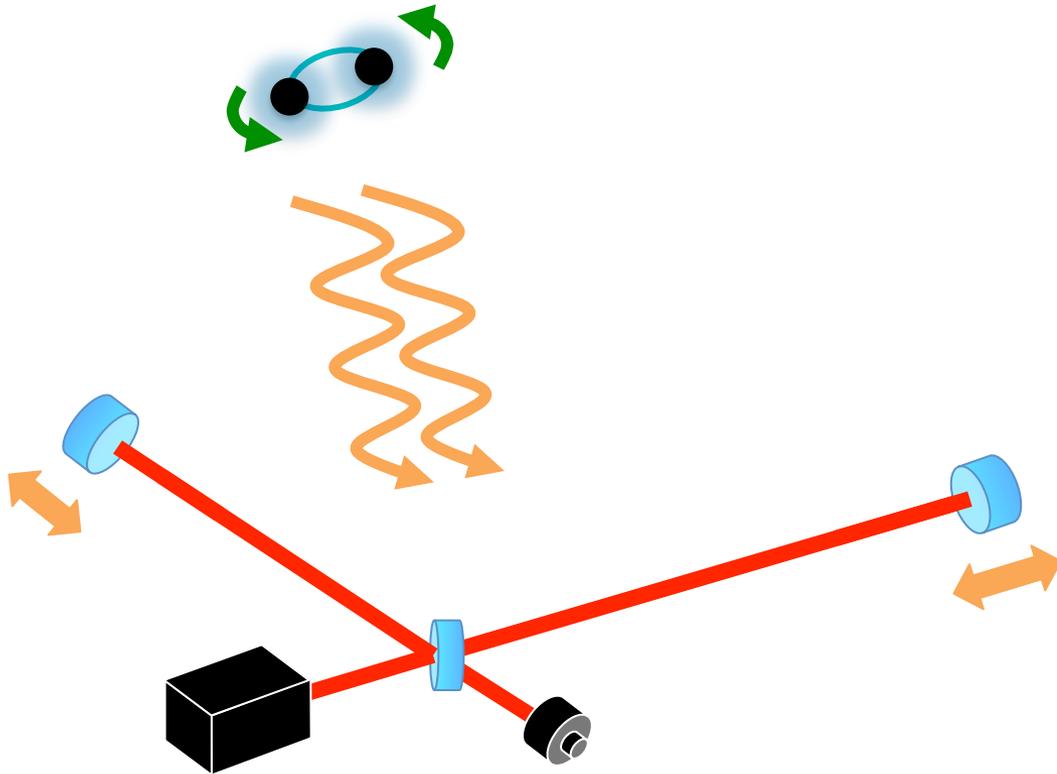
- Type-Bp' SASを干渉計に組み込み、要求を満たすダンピング制御を達成した

## bKAGRAに向けて…

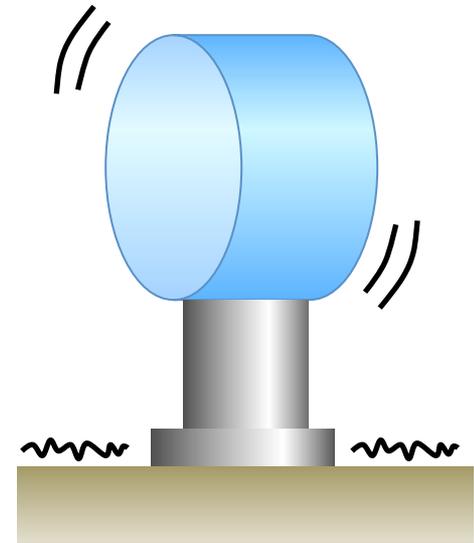
- 細かなチューニング作業
  - 鏡OSEMの修理
  - 制御系の対角化
  - Simulationによるデザインの改良 etc...
- Type-Bp' で得られた知見のフィードバック
  - Type-B, Type-Aデザインのマイナーチェンジ
  - インストール手順の改良 etc...

# Backup Slides

# 地面振動雑音



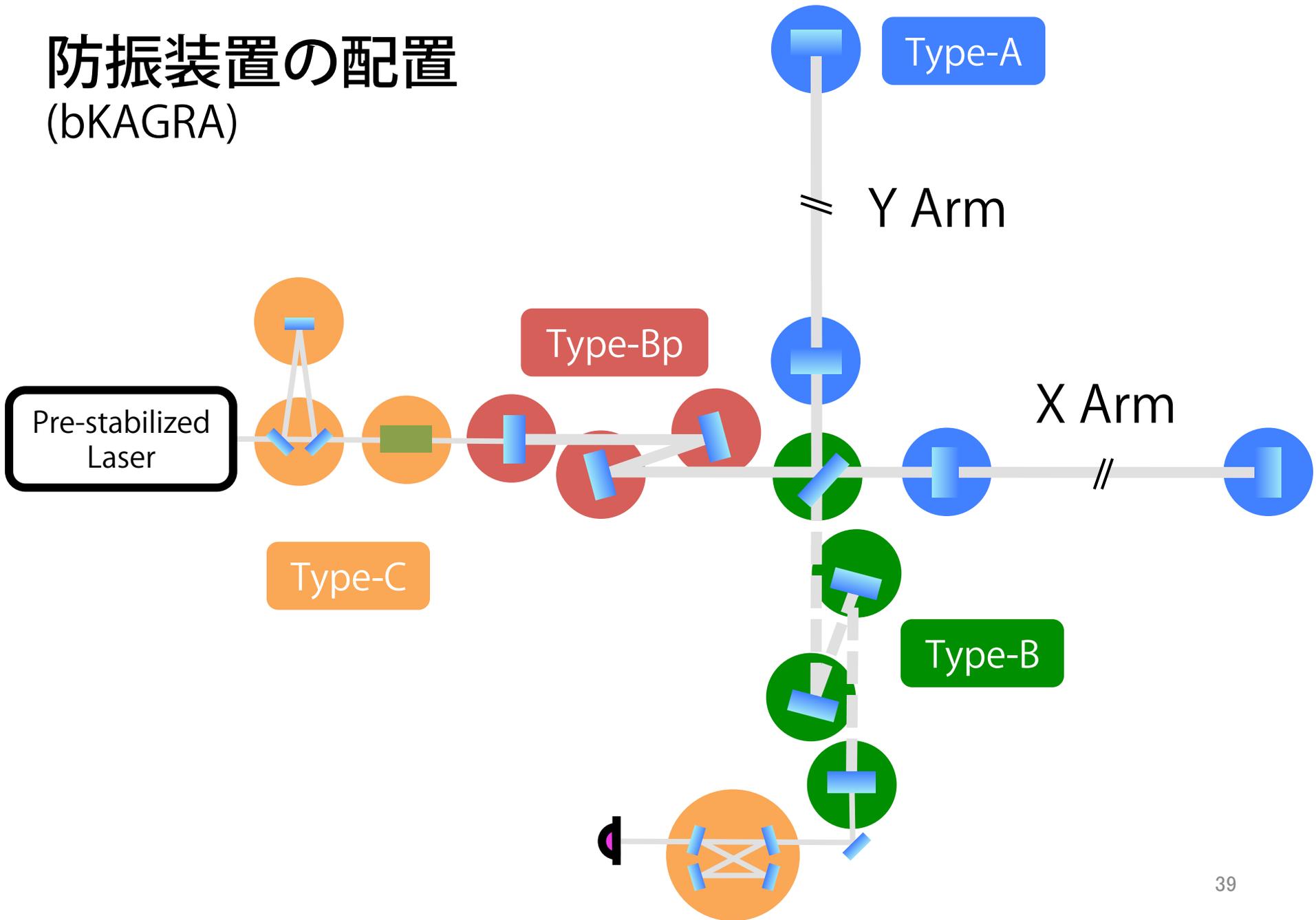
重力波による鏡の揺れ



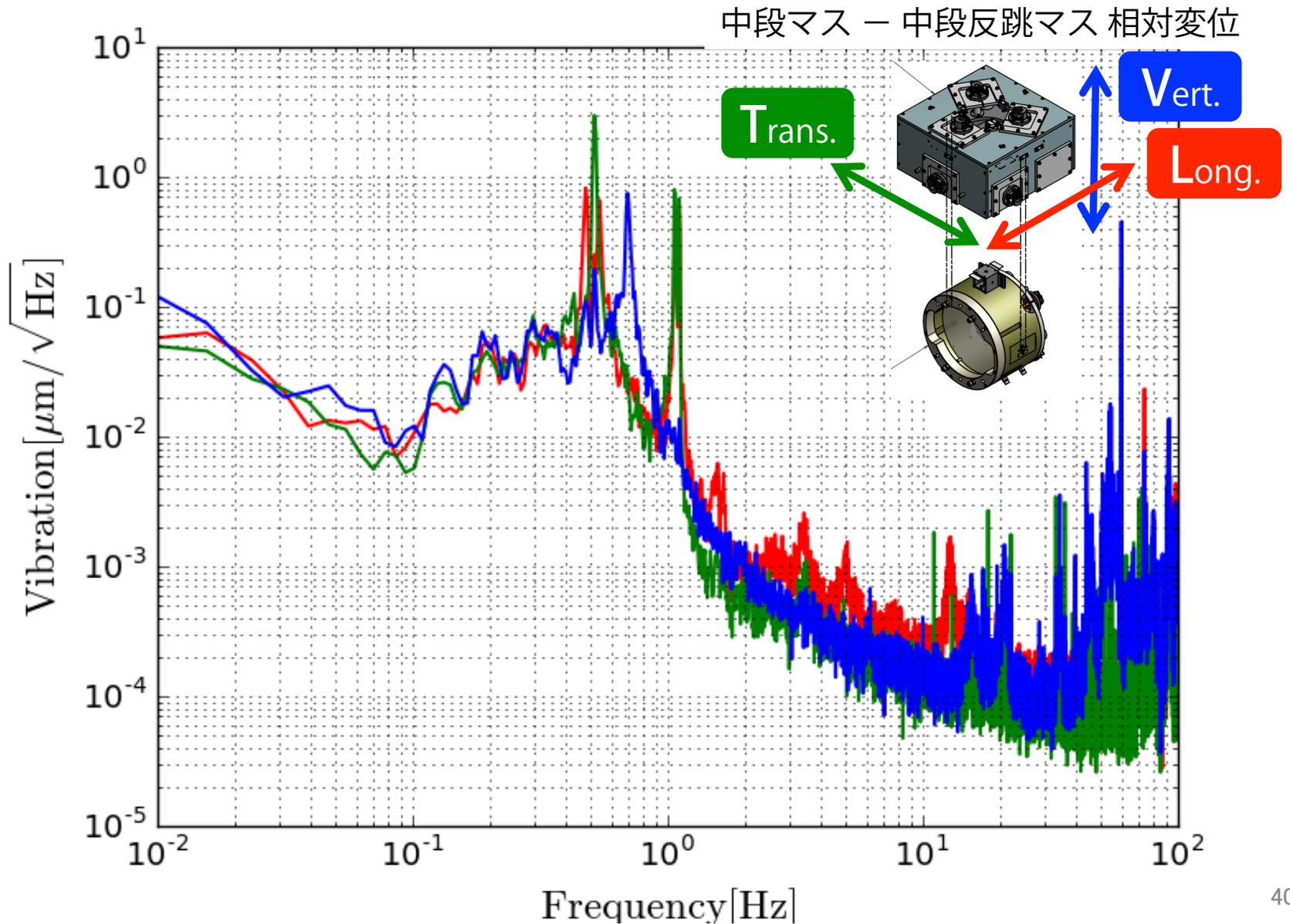
地面振動による鏡の揺れ

区別できない → 雑音となる

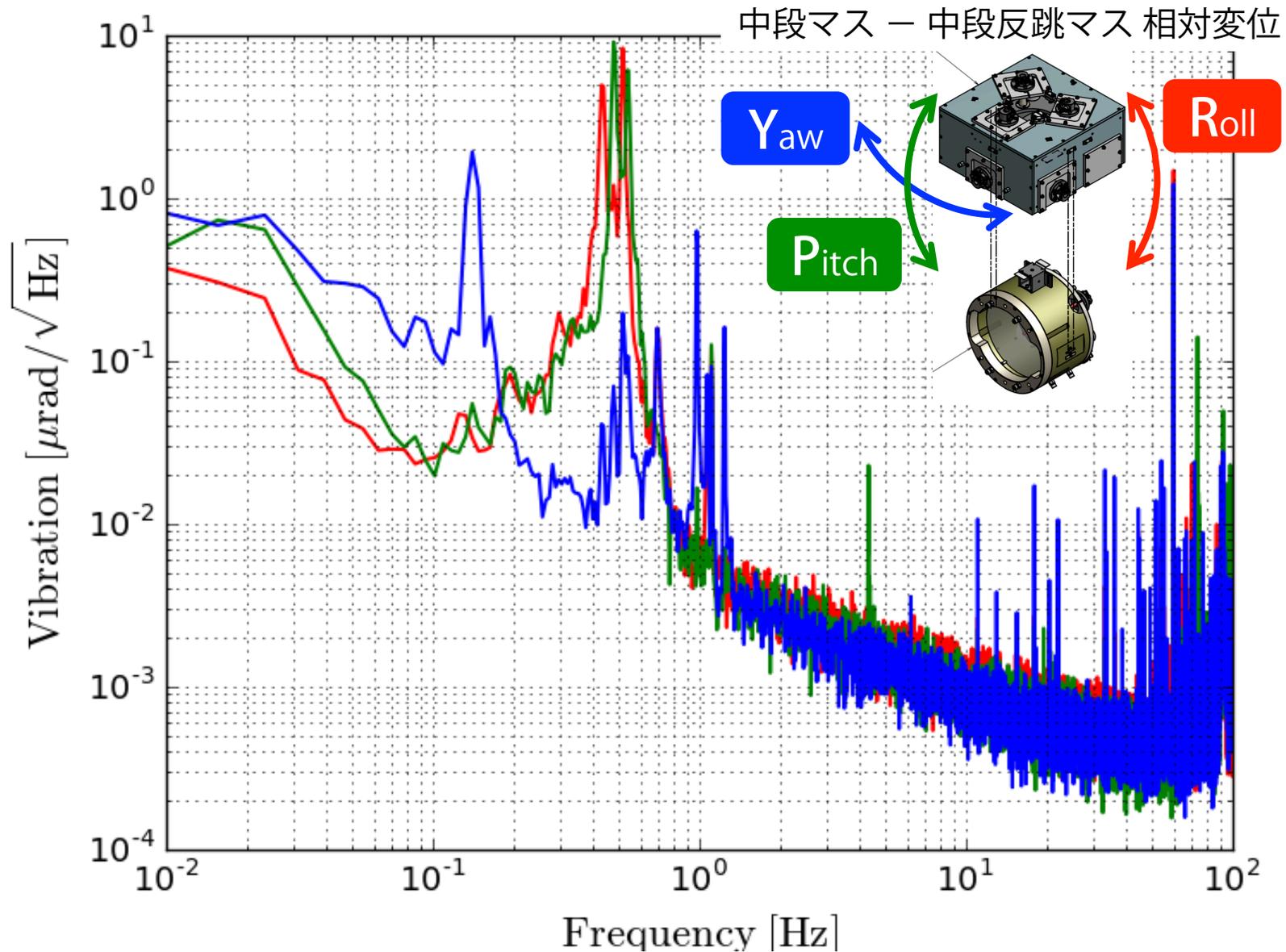
# 防振装置の配置 (bKAGRA)



# 振動スペクトル (並進)

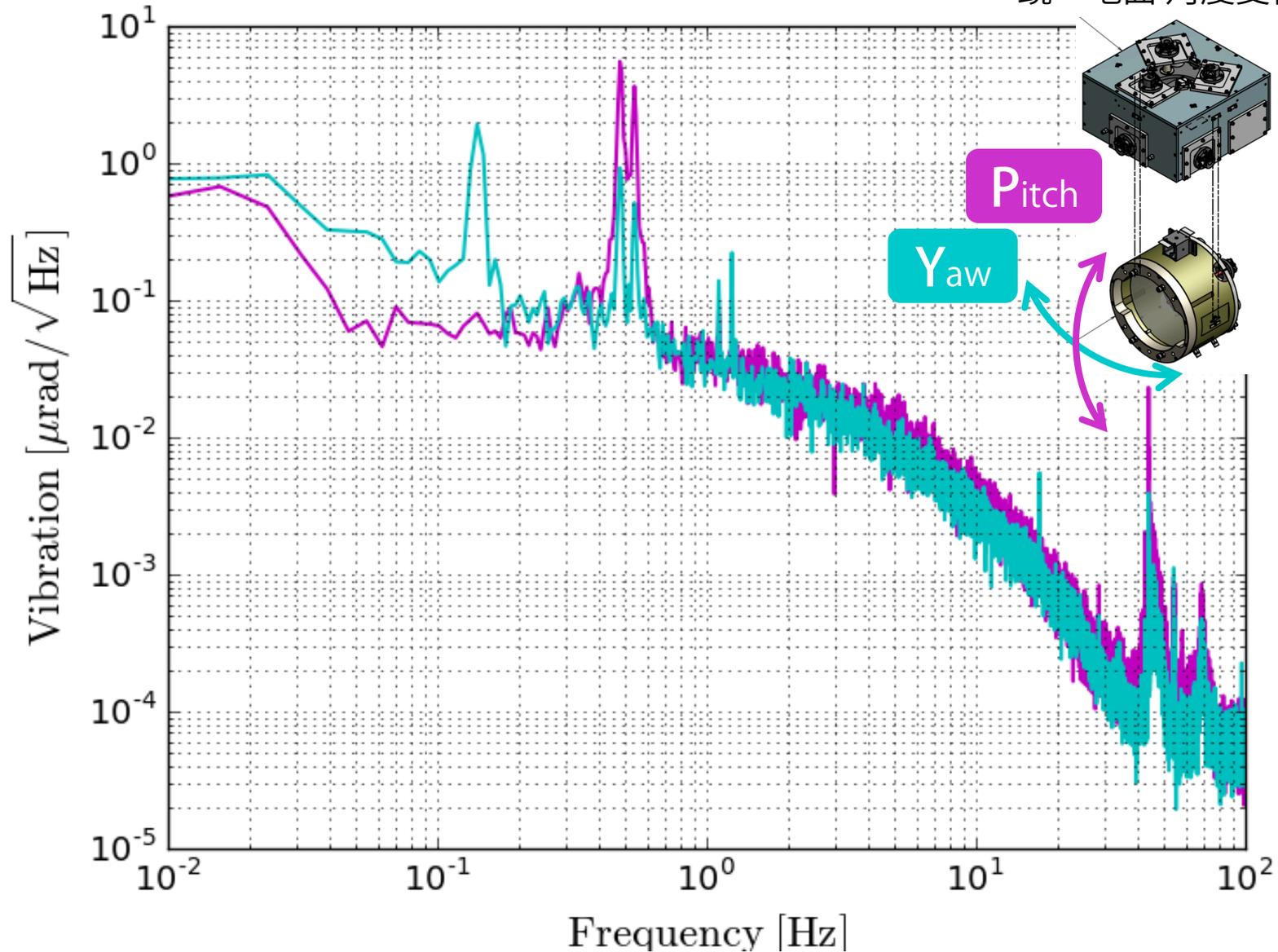


# 振動スペクトル (回転)

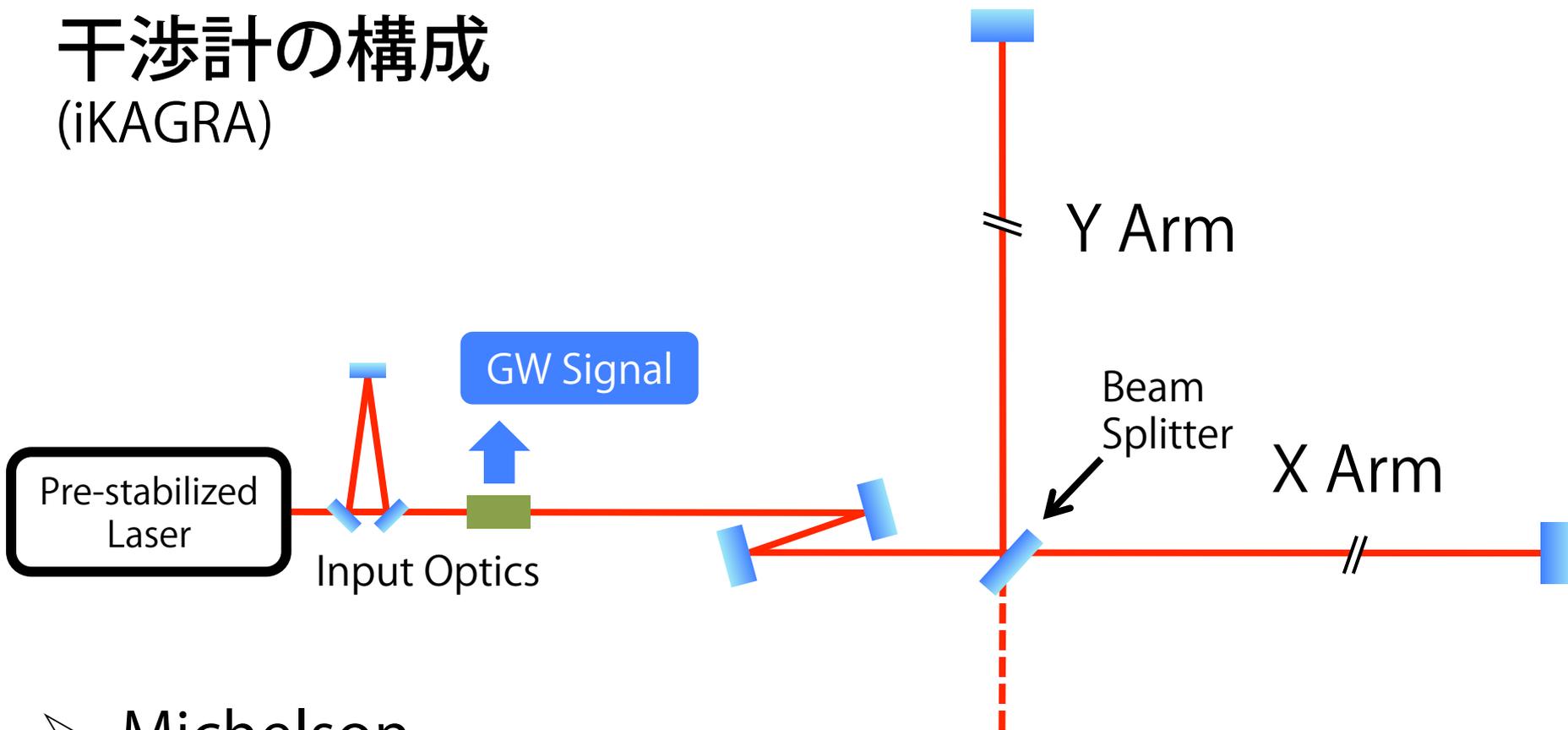


# 振動スペクトル (光てこ)

鏡-地面 角度変位

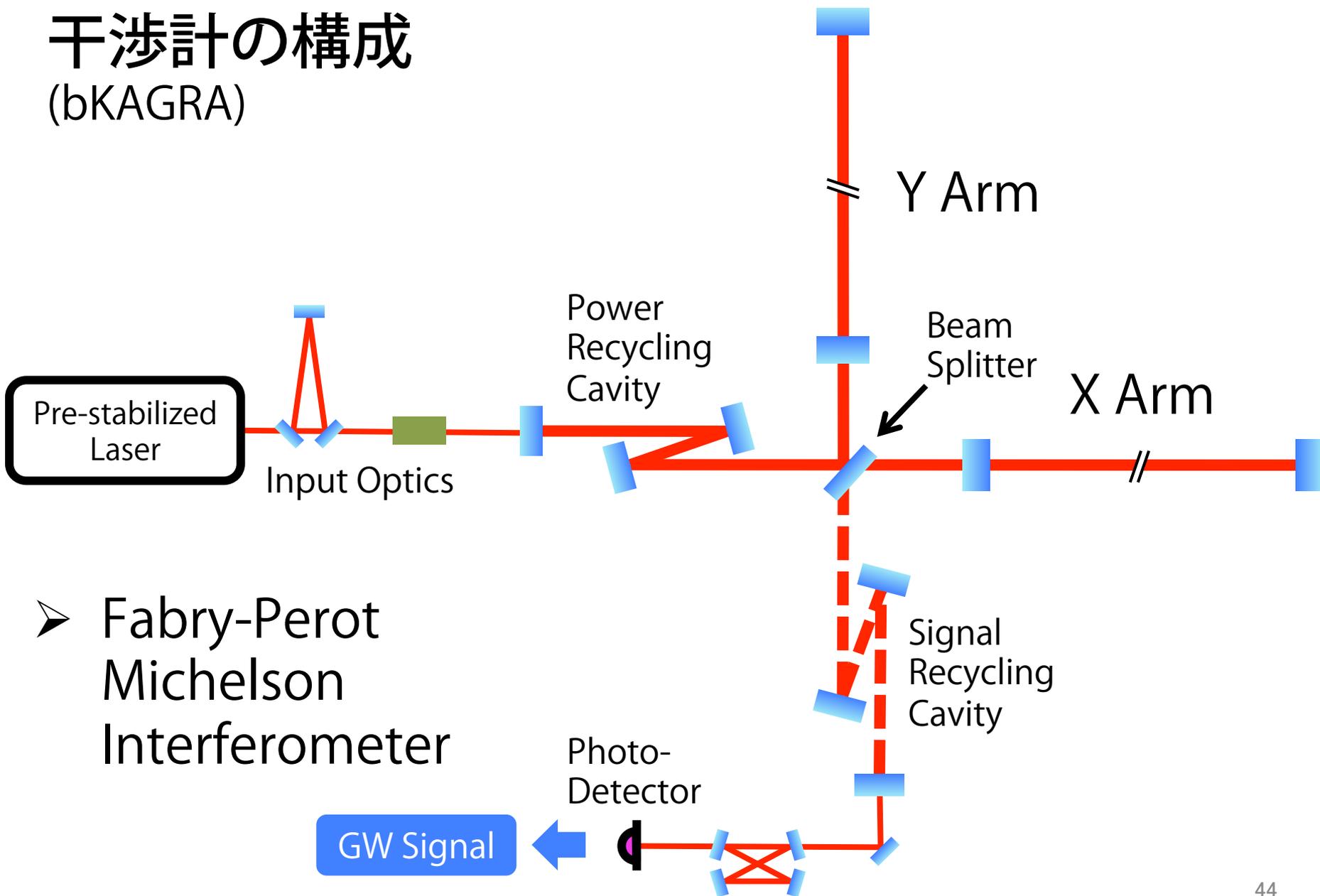


# 干渉計の構成 (iKAGRA)



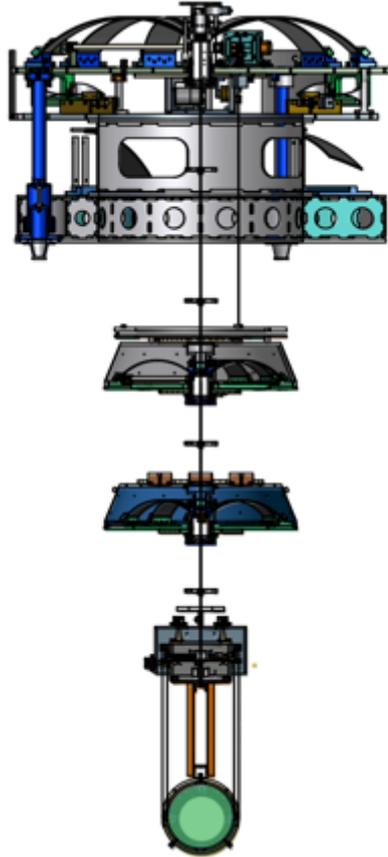
- Michelson Interferometer

# 干渉計の構成 (bKAGRA)

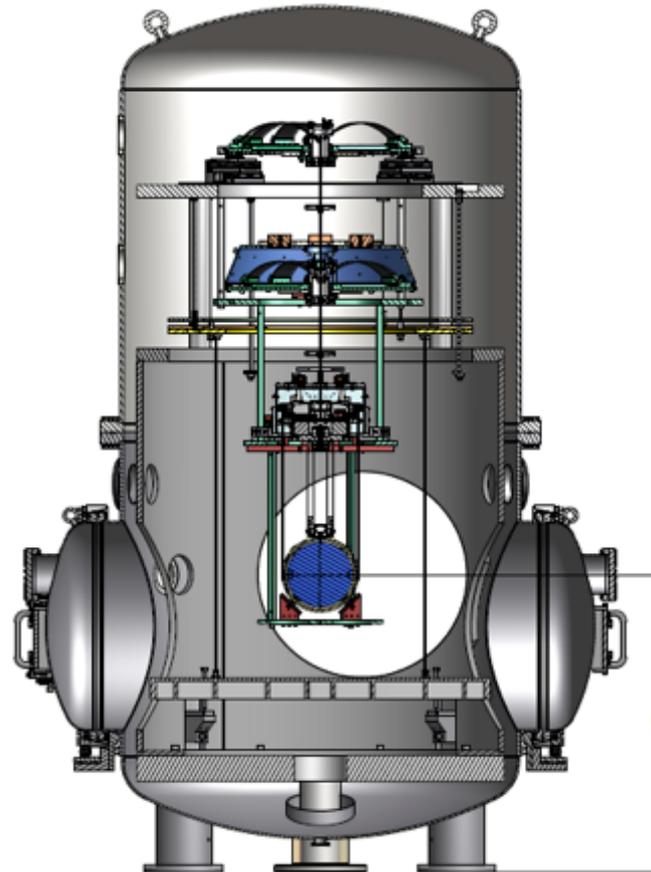


➤ Fabry-Perot  
Michelson  
Interferometer

Type-B



Type-Bp



3D CAD of KAGRA SAS

# Lowering Resonant Frequency

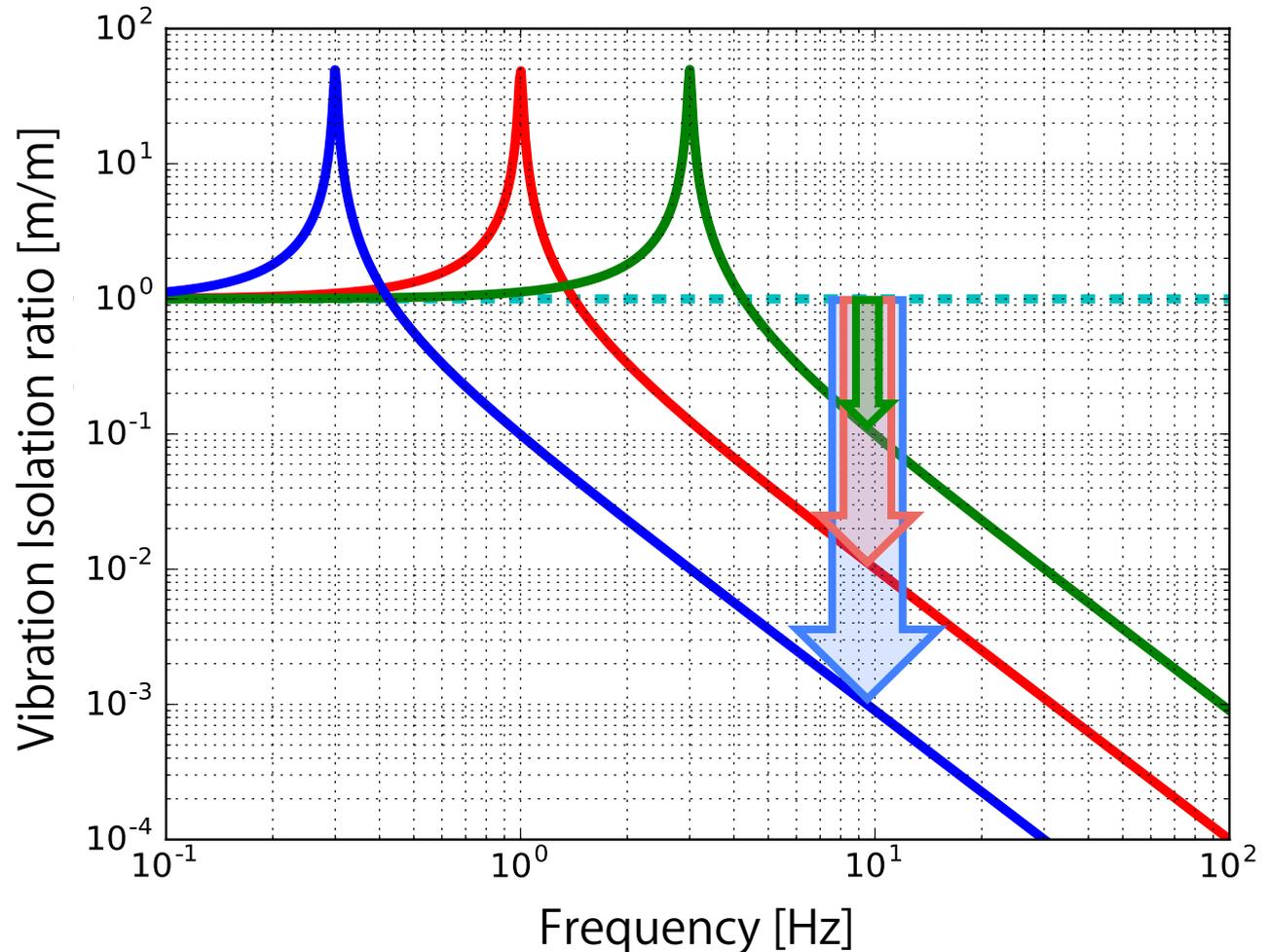
Vibration  
isolation ratio:

$$\frac{X}{X_0} \propto \left( \frac{f}{f_0} \right)^2$$

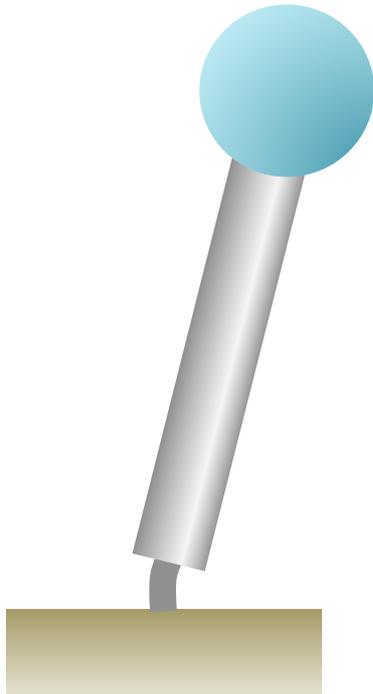
Resonant freq:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

We want smaller  
spring constant  $k$



# Techniques for smaller $k$



Inverted **P**endulum

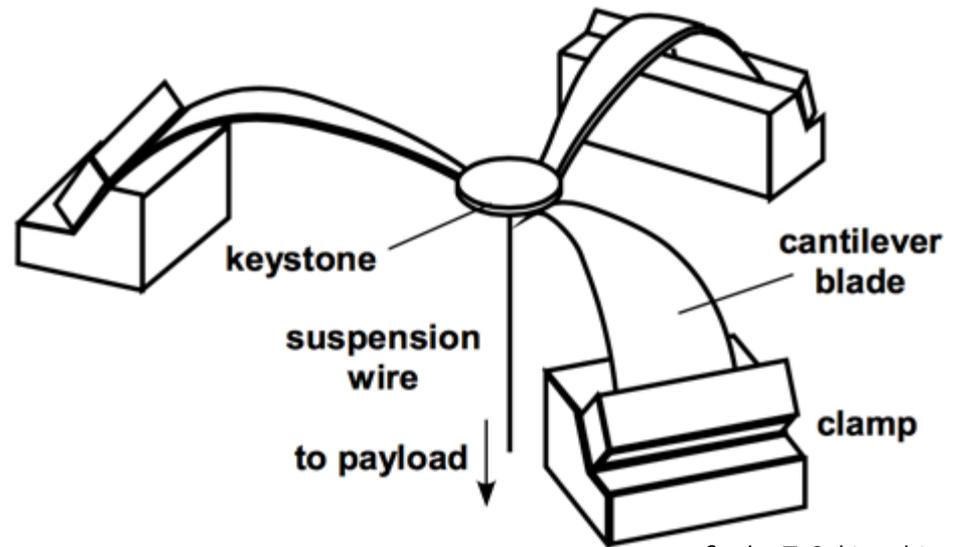
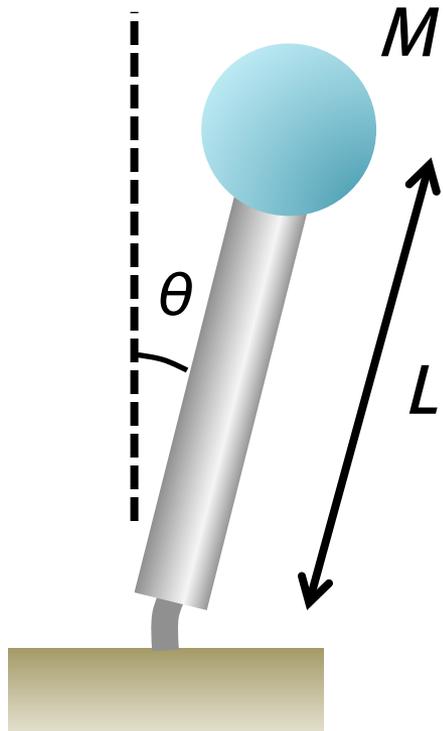


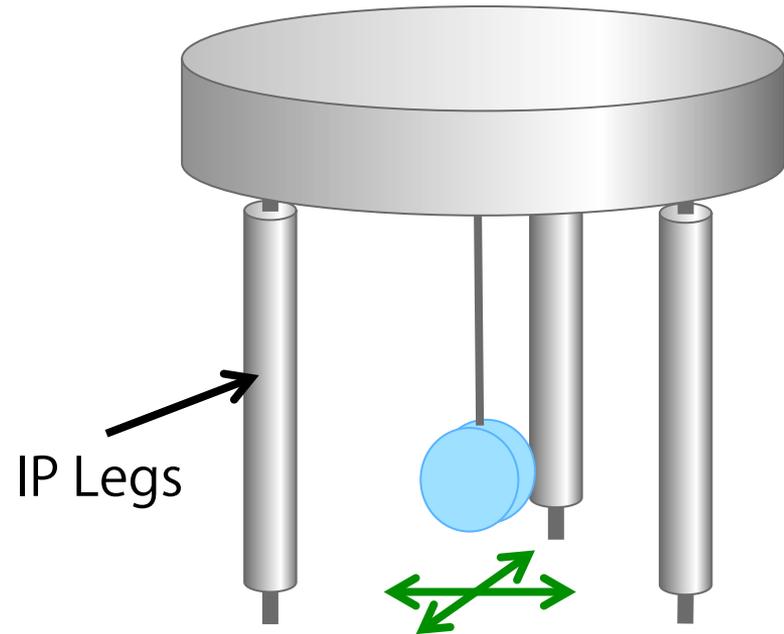
fig. by T. Sekiguchi

Geometric  
**A**nti-**S**pring filter

# Inverted Pendulum

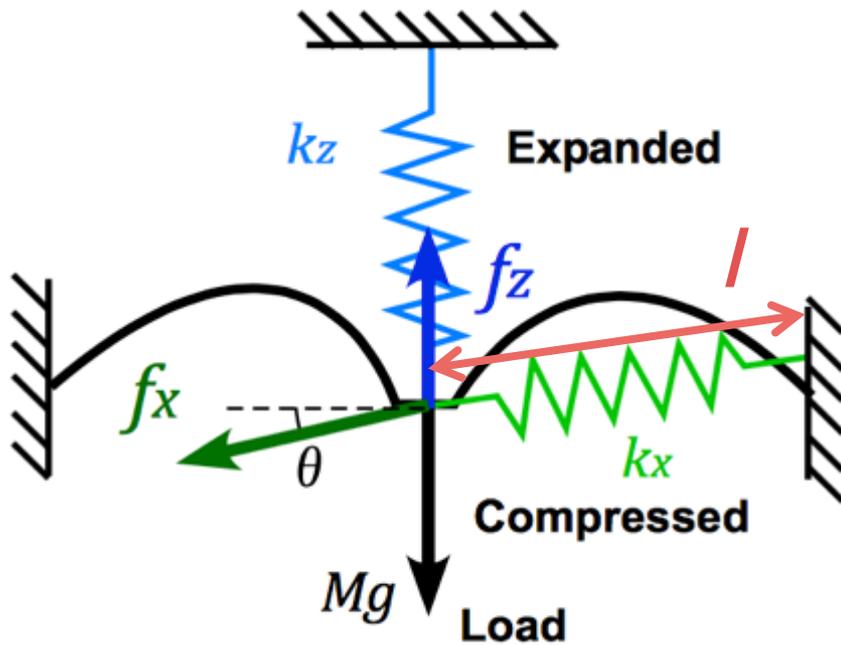


$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\theta}}{L^2} - \frac{Mg}{L}$$

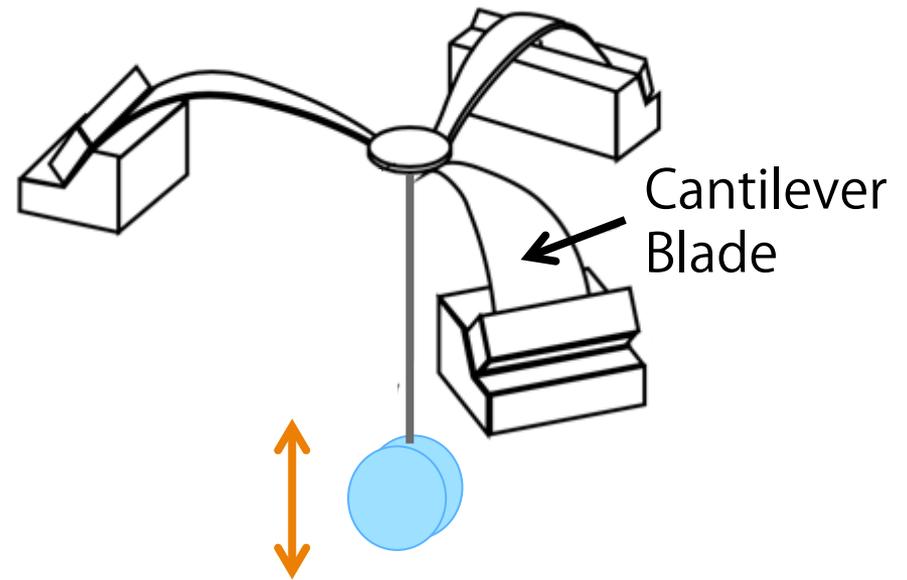


Low-freq. resonance in  
**horizontal motion**

# Geometric Anti-Spring Filter



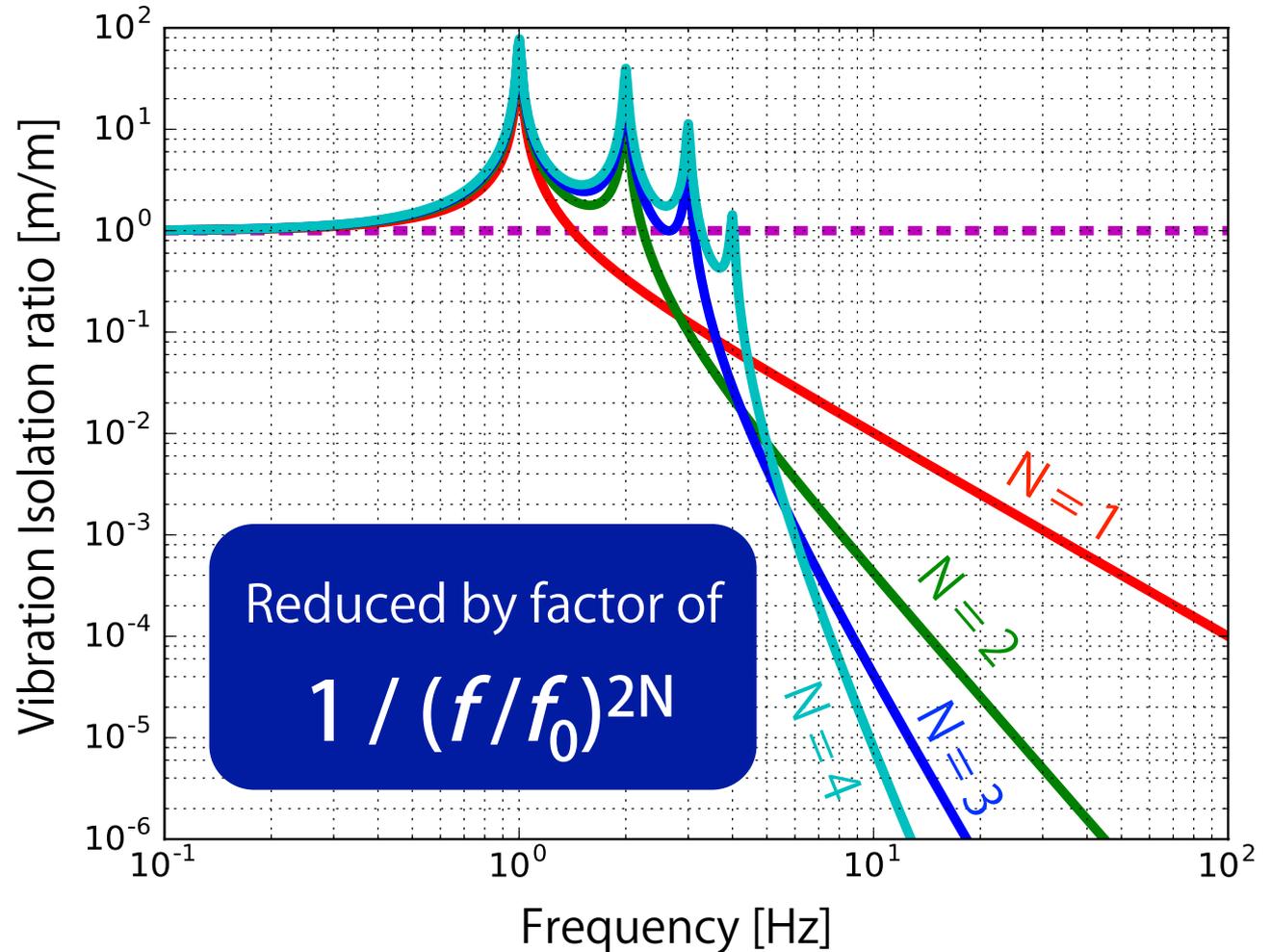
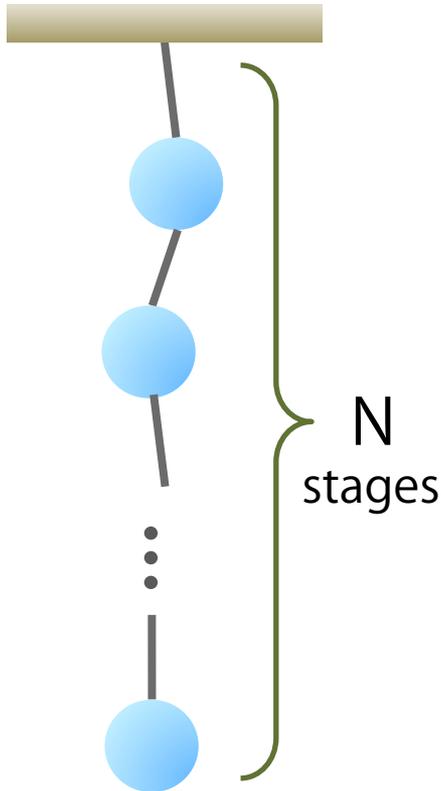
figs. by T. Sekiguchi



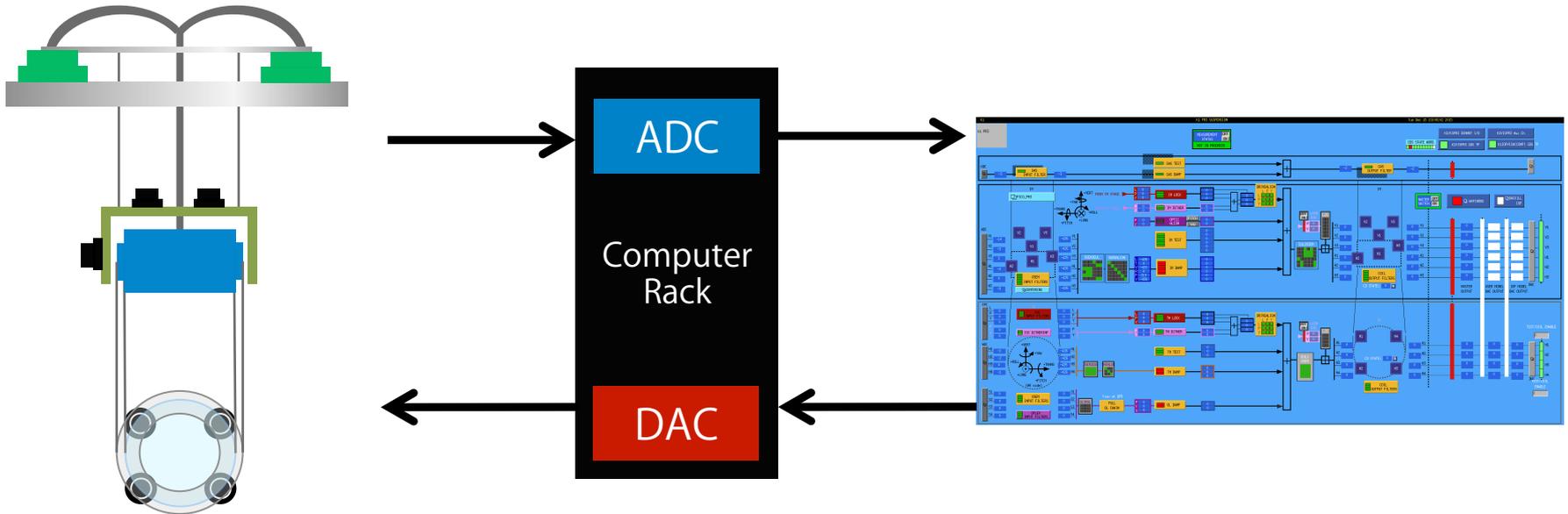
$$k_{\text{eff}} = k_z - a(l)k_x$$

Low-freq. resonance in  
**vertical motion**

# Multi-stage Suspension



# 制御系



- メカニカル系
- センサ
- アクチュエータ

- ADC, DAC
- Real time computer
- ドライバ回路類

- 自由度変換
- フィルタの実装
- 出力監視システム
- 懸架系の状態の操作