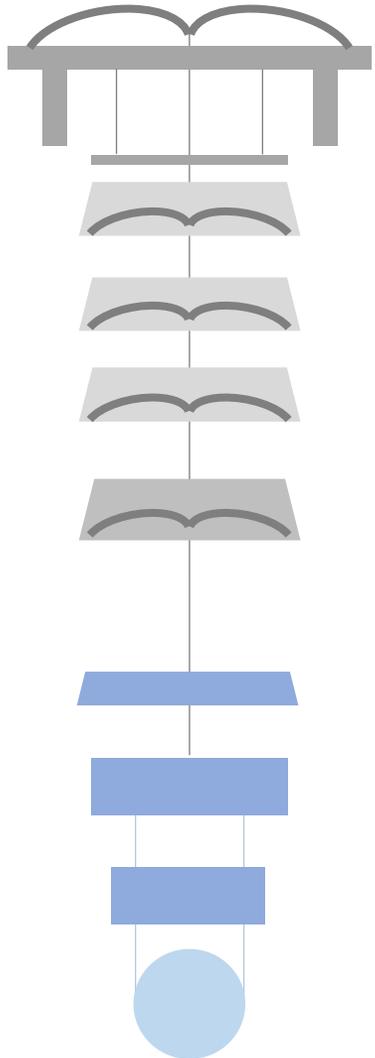


The logo for KAGRA, featuring the word "KAGRA" in a bold, sans-serif font. The letter "A" is stylized with a blue circular element behind it, and a blue swoosh underline is positioned above the letters "G" and "R".

重力波望遠鏡 KAGRA における サファイア鏡懸架系の制御



玉木 諒秀 ^{A, B}

牛場崇文 ^B、 山本尚弘 ^B、 三代浩世希 ^B、 池田覚 ^C、
高橋竜太郎 ^C、 都丸隆行 ^C、 三代木伸二 ^B

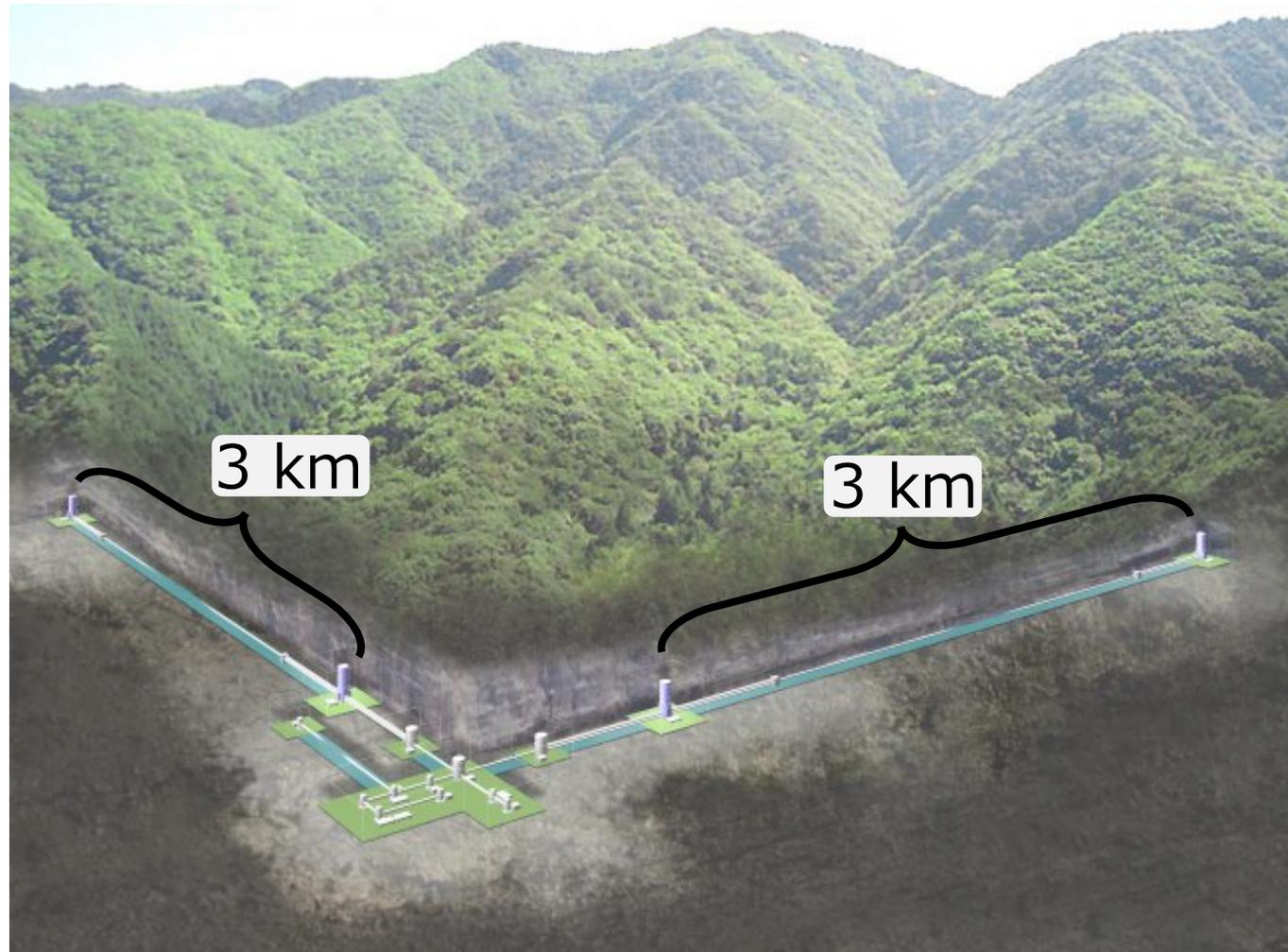
on behalf of KAGRA collaboration

東大理 ^A、 東大宇宙線研 ^B、 国立天文台 ^C

発表内容

1. イントロダクション
2. KAGRAにおけるサファイア鏡懸架装置
(Type-A suspension)
3. 懸架装置の Damping 制御
4. まとめ

重力波望遠鏡 KAGRA



レーザー干渉計型重力波検出器

- ・・・干渉計を利用して重力波による鏡（自由質点）間の距離変動を測定

2020年2月初の本格観測

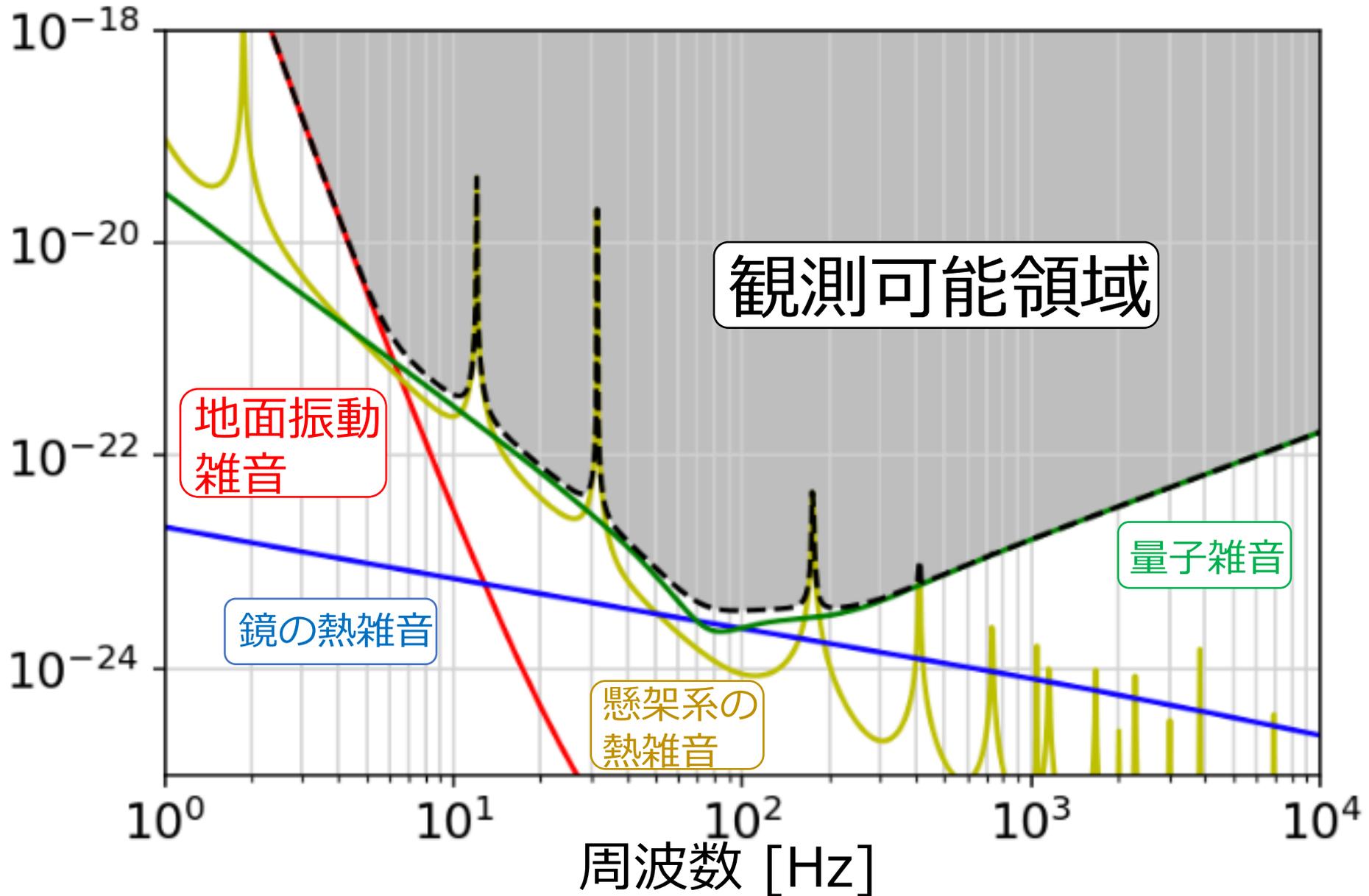
次回・・・2022年12月開始予定

大きな特徴

- ・地下に建設 → 地面振動低減
- ・低温（鏡：20 K） → 熱雑音低減

KAGRAの雑音源

重力波ゆがみ換算雑音 [$1/\text{Hz}^{1/2}$]



地面振動の影響を減らす

1. 基線長を長くする

- • • 重力波（振幅: h ）による光路長変化: $\delta x = h \times L$ （基線長: L ）
地面振動による光路長変化は L によらない
→ L が長いほど地面振動への要求は緩和される

2. 地面振動の小さい環境に干渉計を建設

- • • 地下に建設

3. 防振する

- • • 地面に存在する振動を防振系により減衰
鏡の支点の振動が鏡に伝わらないようにする
→ 振り子による防振

地面振動の影響を減らす

1. 基線長を長くする

- • • 重力波（振幅: h ）による光路長変化: $\delta x = h \times L$ （基線長: L ）
地面振動による光路長変化は L によらない
→ L が長いほど地面振動への要求は緩和される

2. 地面振動の小さい環境に干渉計を建設

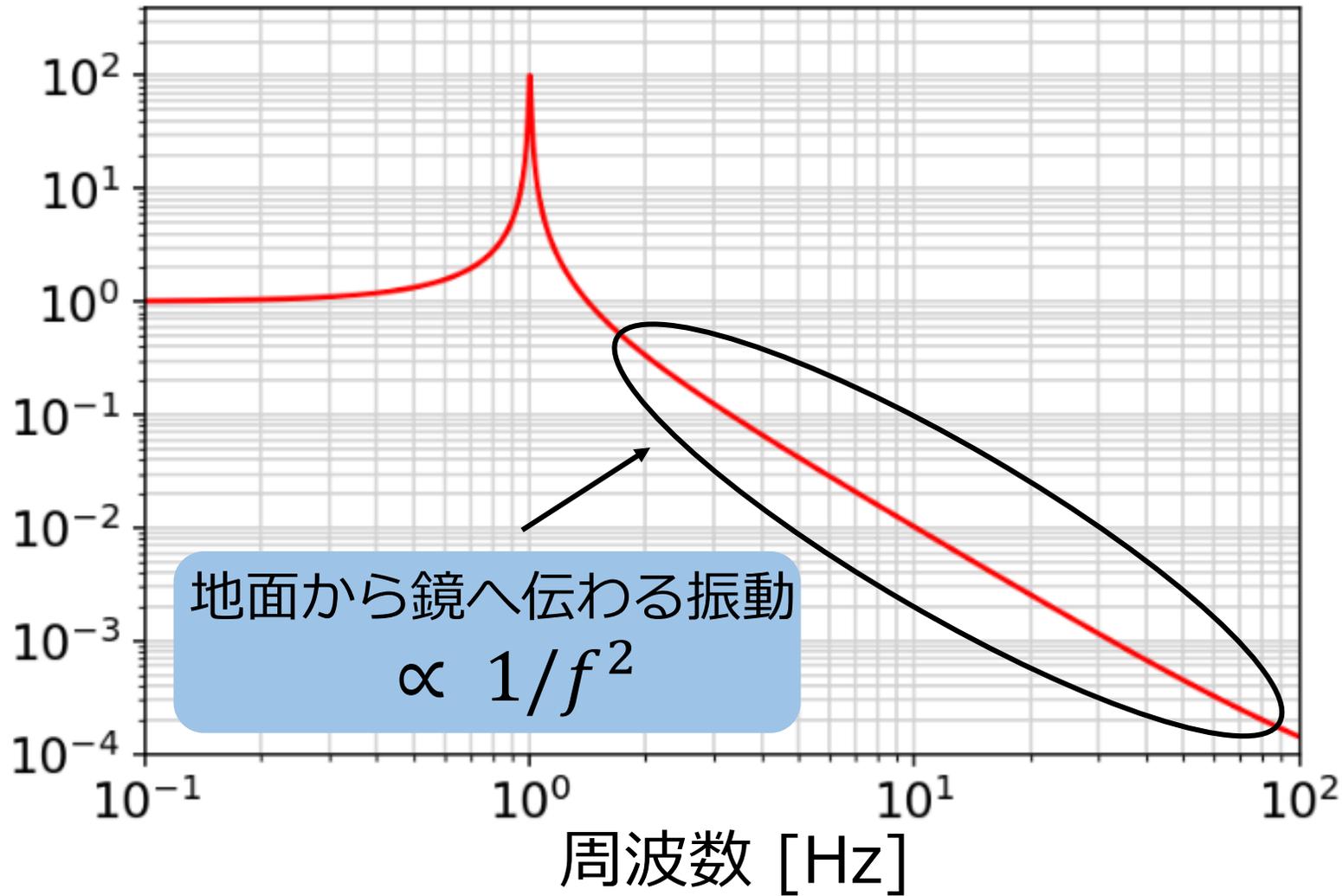
- • • 地下に建設

3. 防振する

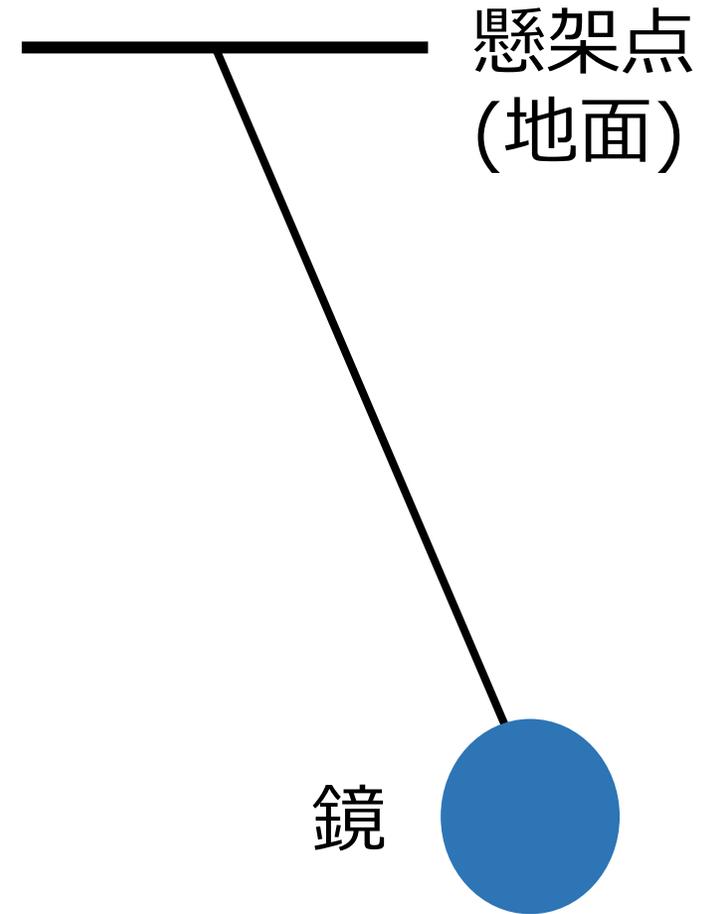
- • • 地面に存在する振動を防振系により減衰
鏡の支点の振動が鏡に伝わらないようにする
→ 振り子による防振

振り子による防振

鏡の振動 / 地面振動 [m/m]

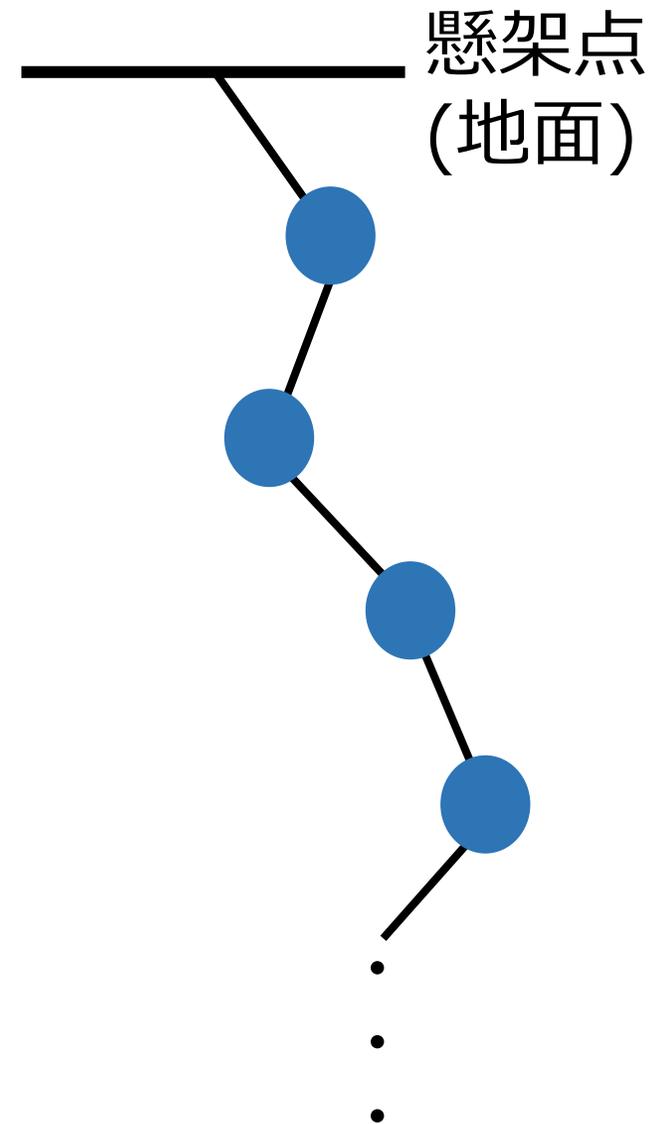
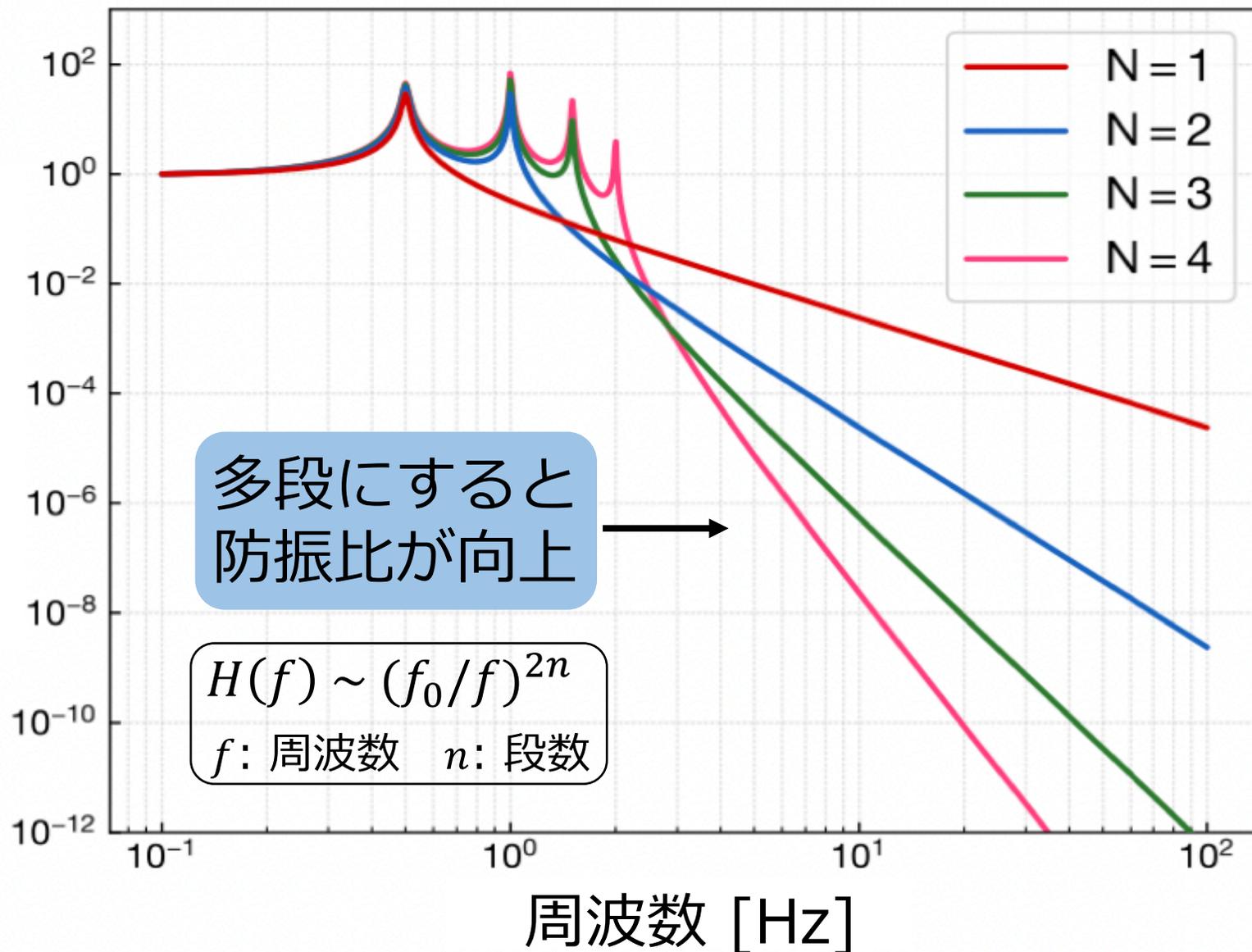


防振比が不十分 → 多段にする

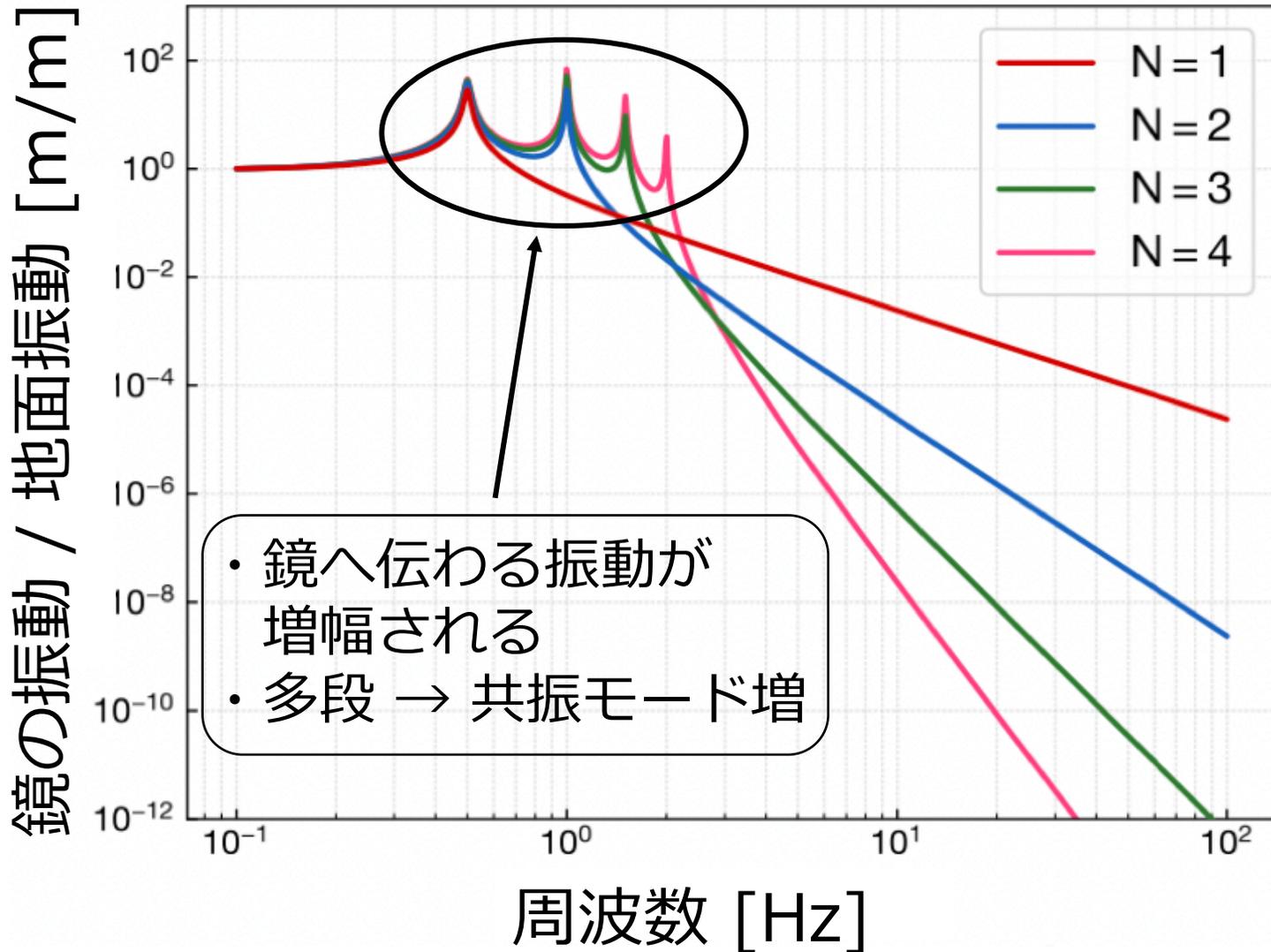


多段にすると

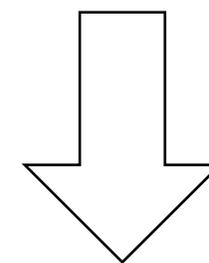
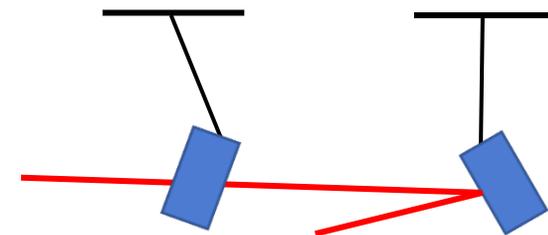
鏡の振動 / 地面振動 [m/m]



共振周波数では . . .

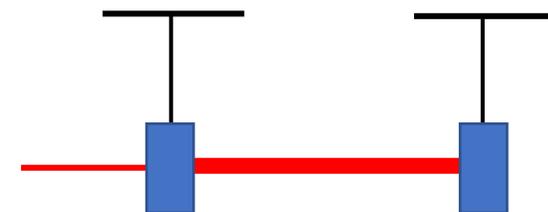


共振周波数で大きく揺れる

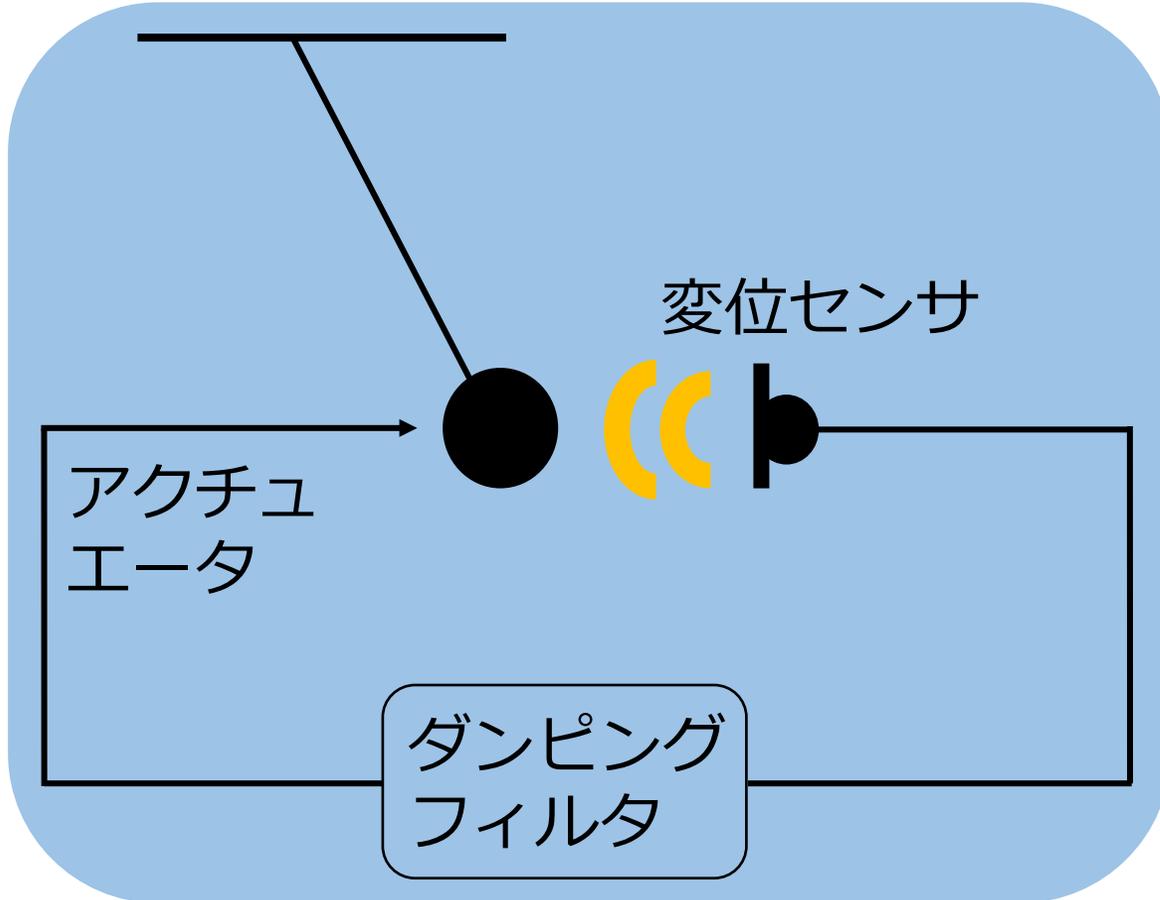


共振周波数では振動を減衰する必要がある (Damping制御)

安定時



Damping制御



懸架装置の変位を局所的にセンサで検出し、速度に比例した力を、
アクチュエータを通じて懸架装置に
フィードバックする

各センサーからの信号

・・・さまざまな自由度が混ざっている

→ 各自由度に分解してダンピングフィルタ
をかけてフィードバック信号を作成
各自由度の駆動信号をアクチュエータ
に分配してダンピングを行う

干渉計の制御フェイズのサイクル

地震などの外乱
による制御の
破綻

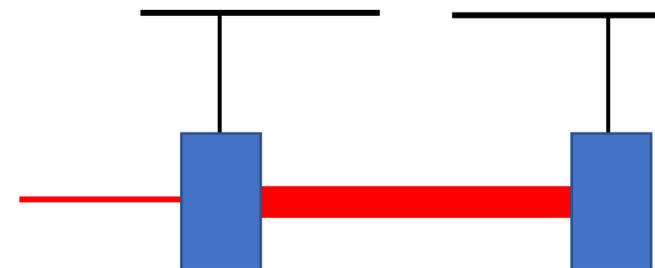
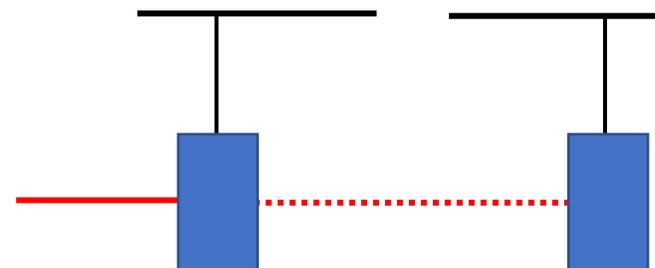
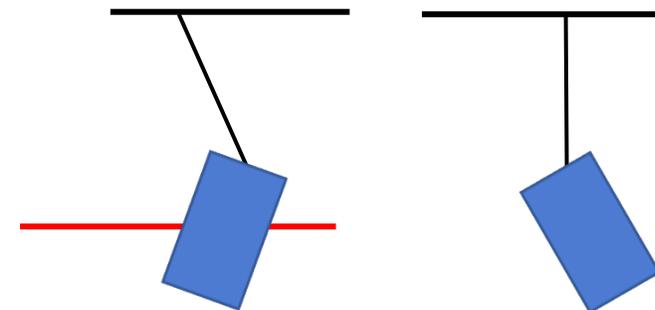
Calm-down Phase
共振モードの減衰
振幅の低減

安定化

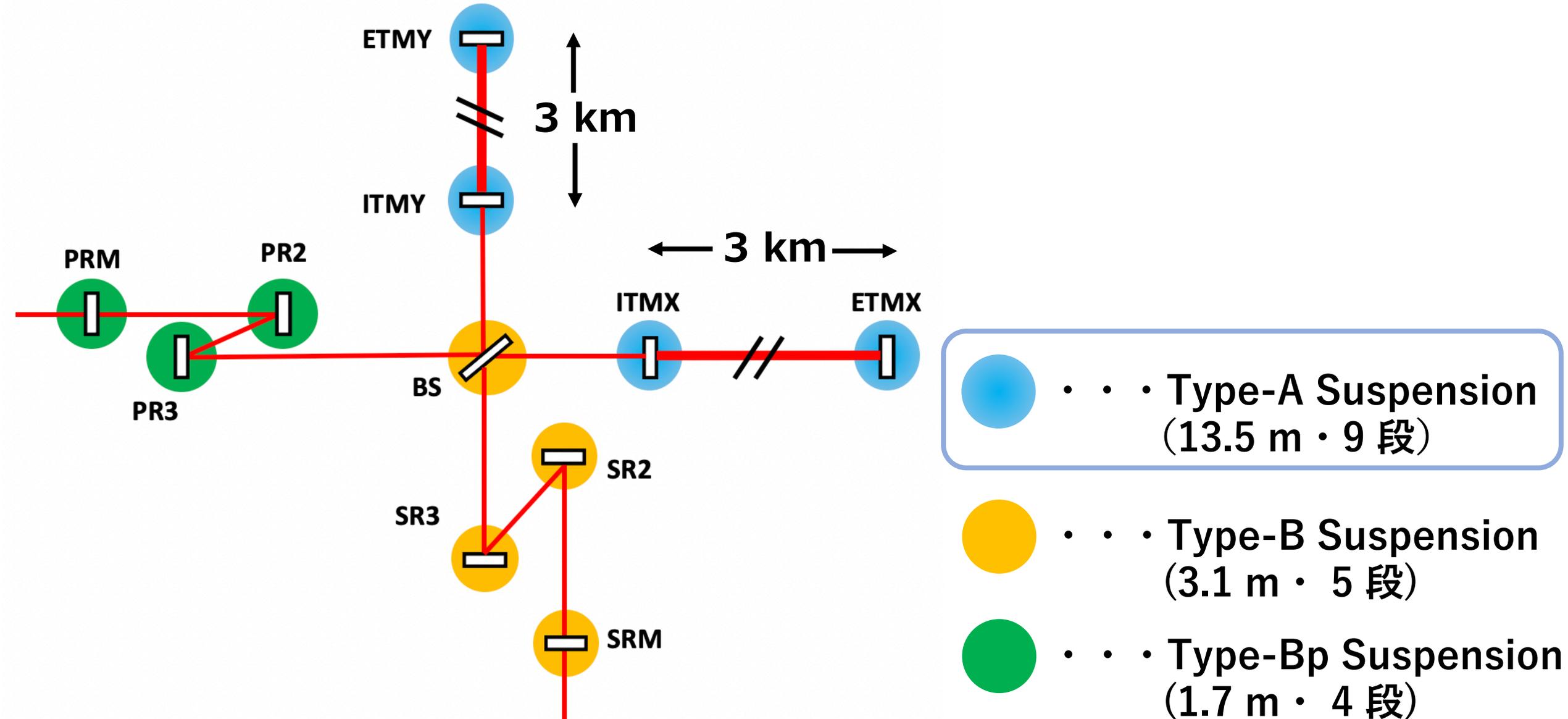
Lock-acquisition Phase
共振器長制御
アライメント角度制御

FP共振器ロック

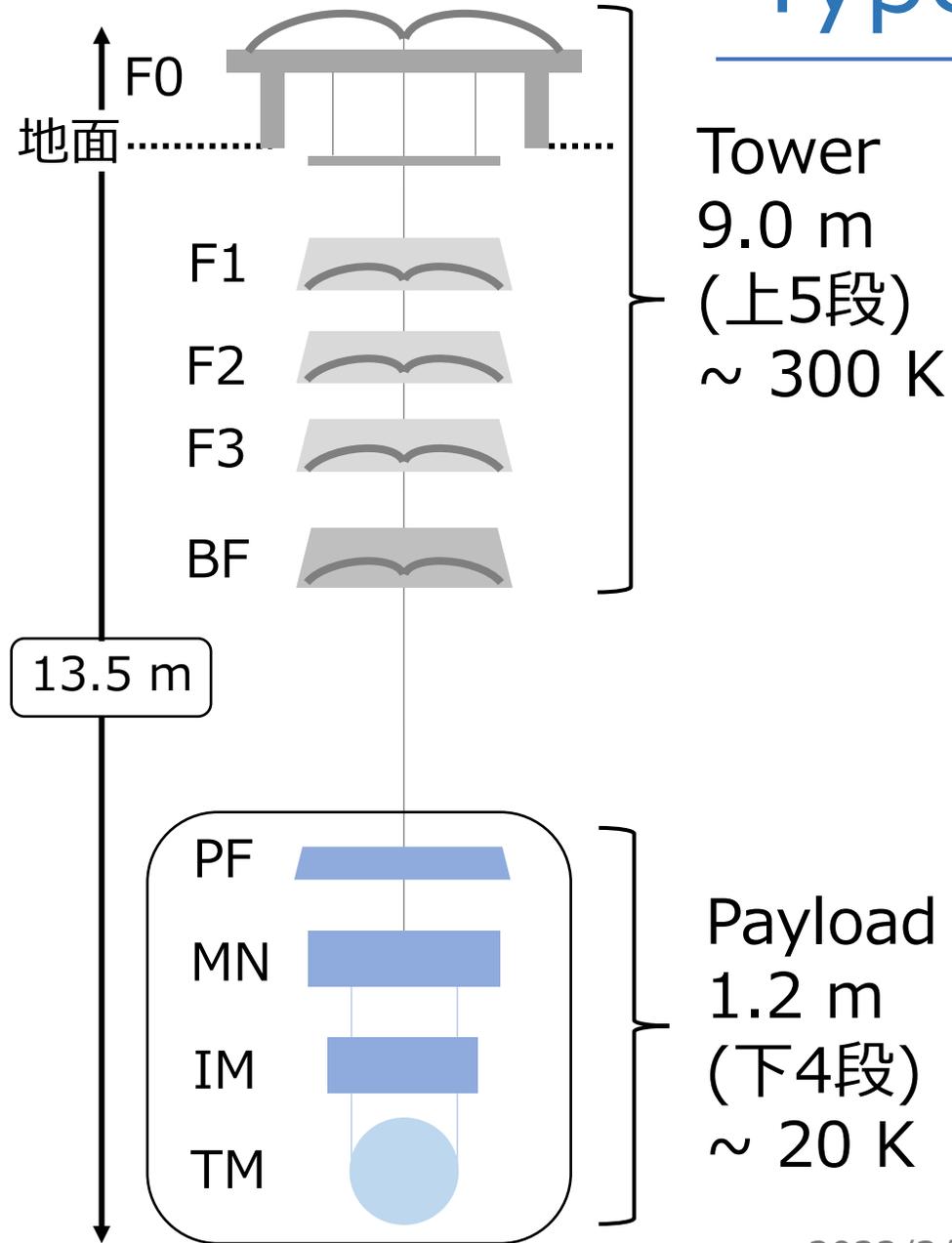
Observation Phase
安定な干渉計ロックの保持



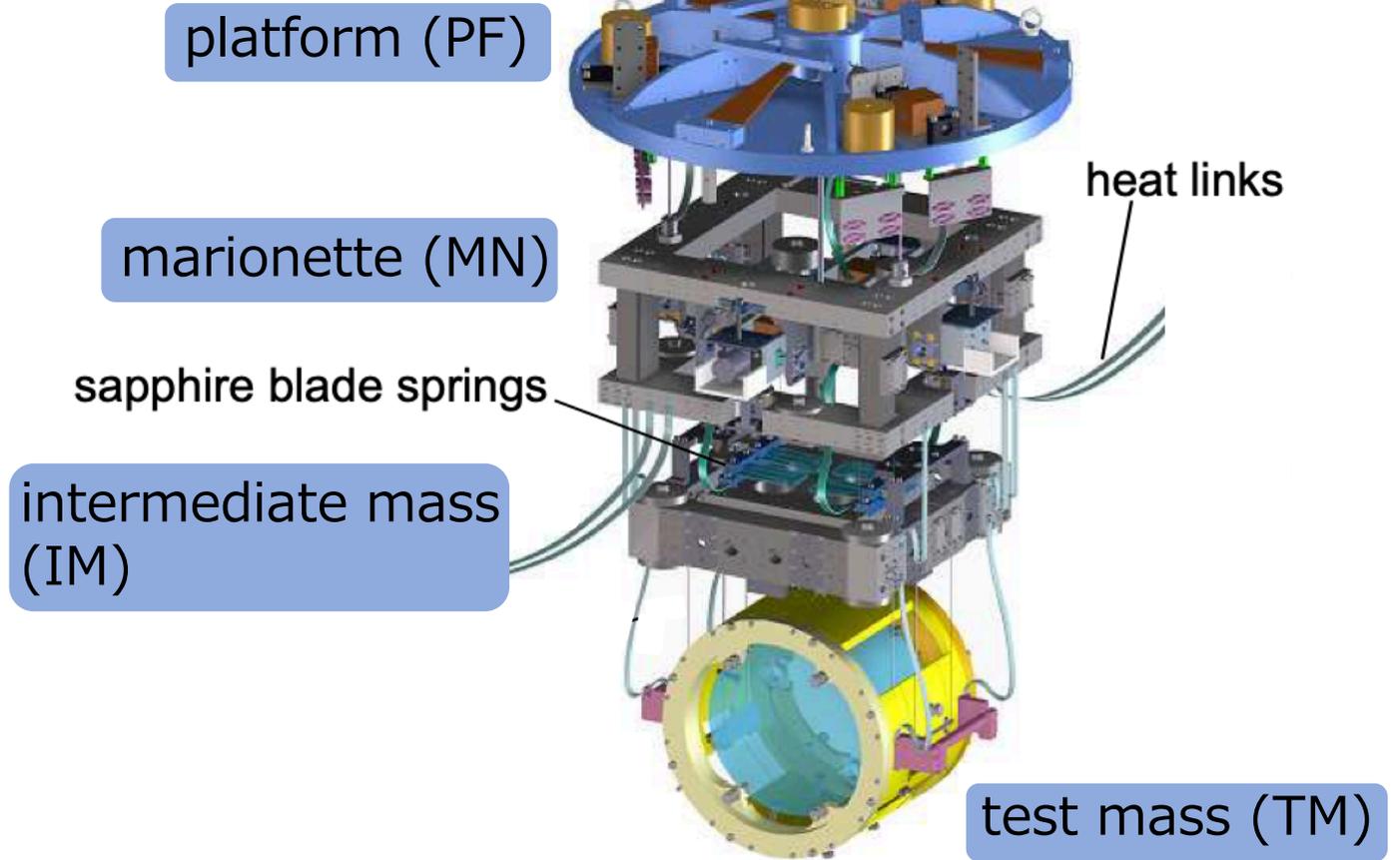
KAGRAの防振システム



Type-A suspension

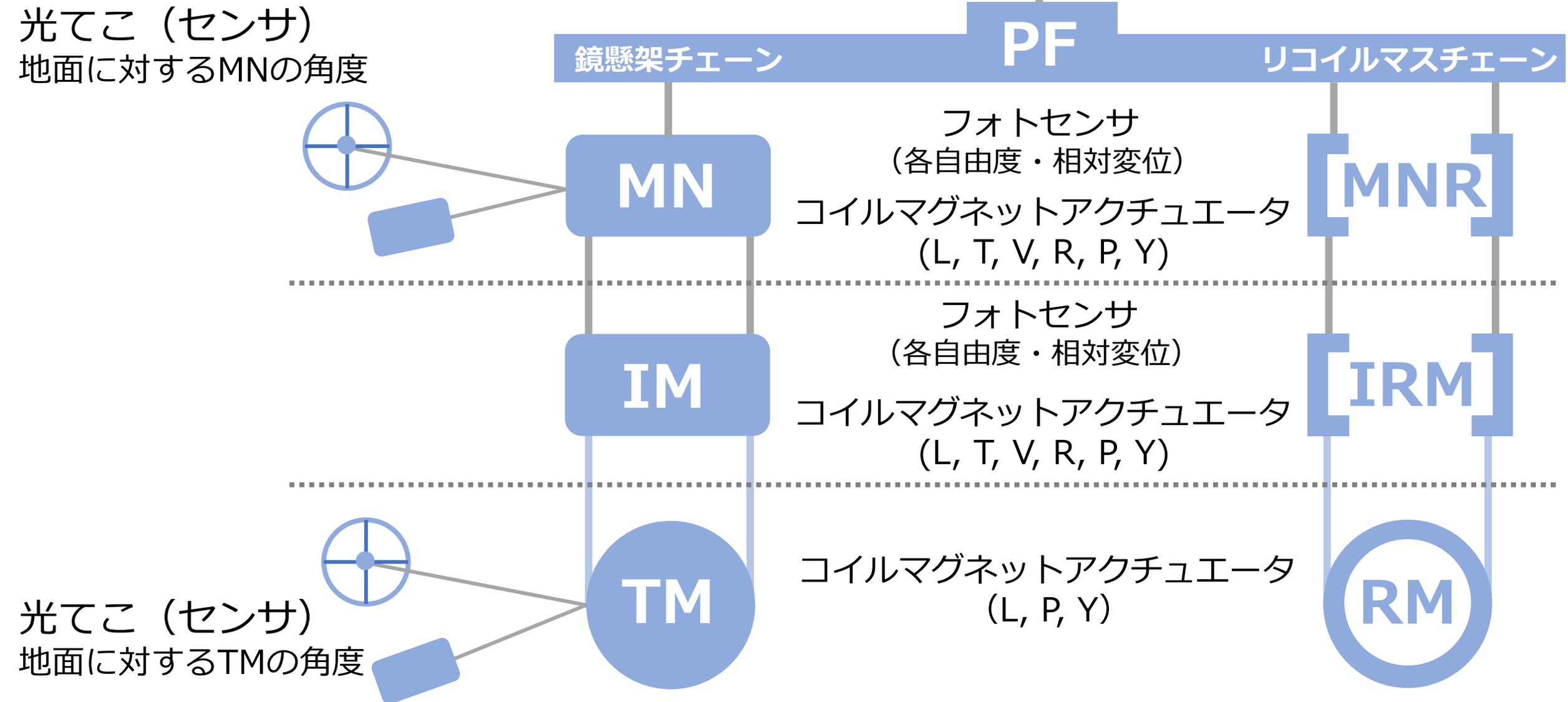


Payload

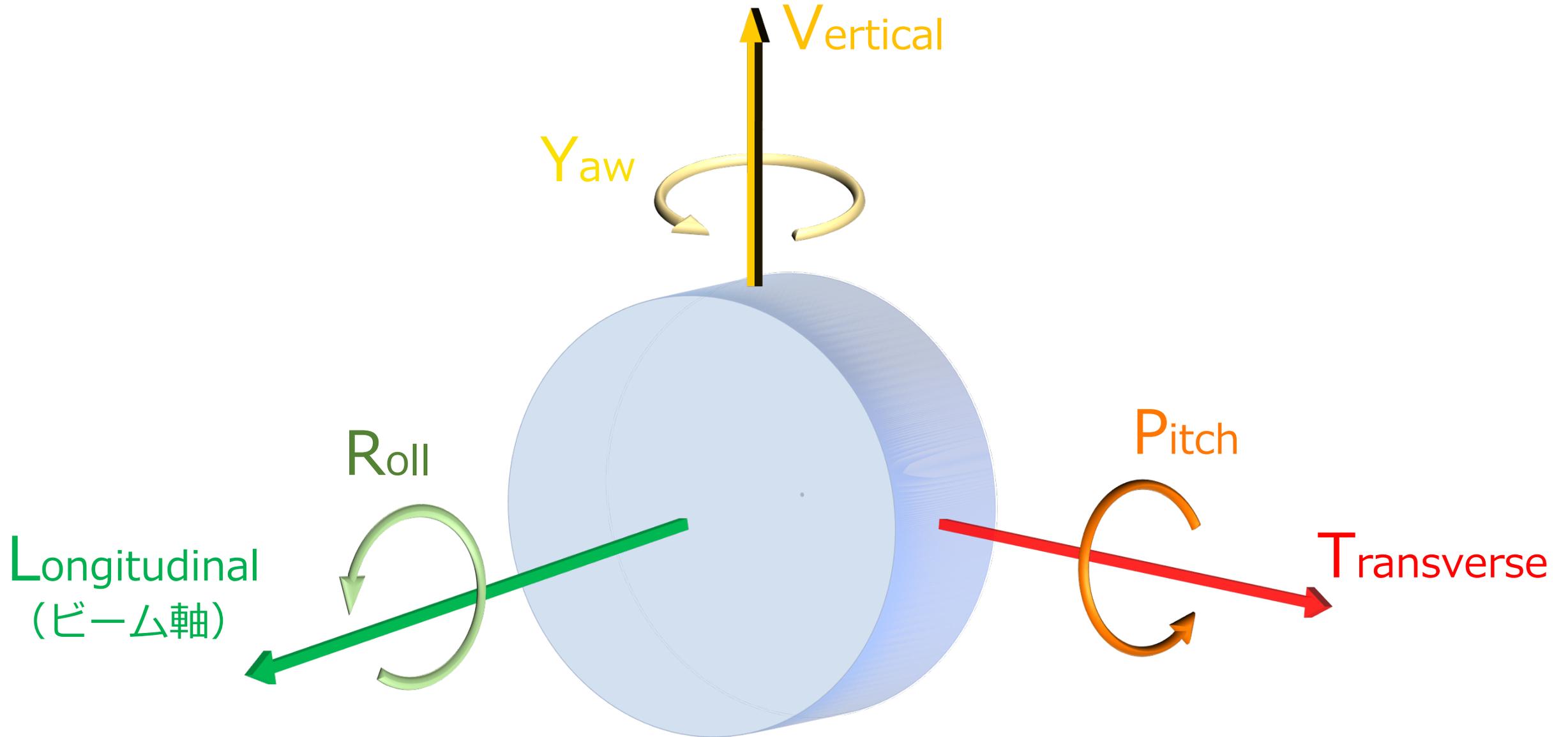


引用 : Akutsu T *et al* 2019 First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA *Class. Quantum Grav.* **36** 165008

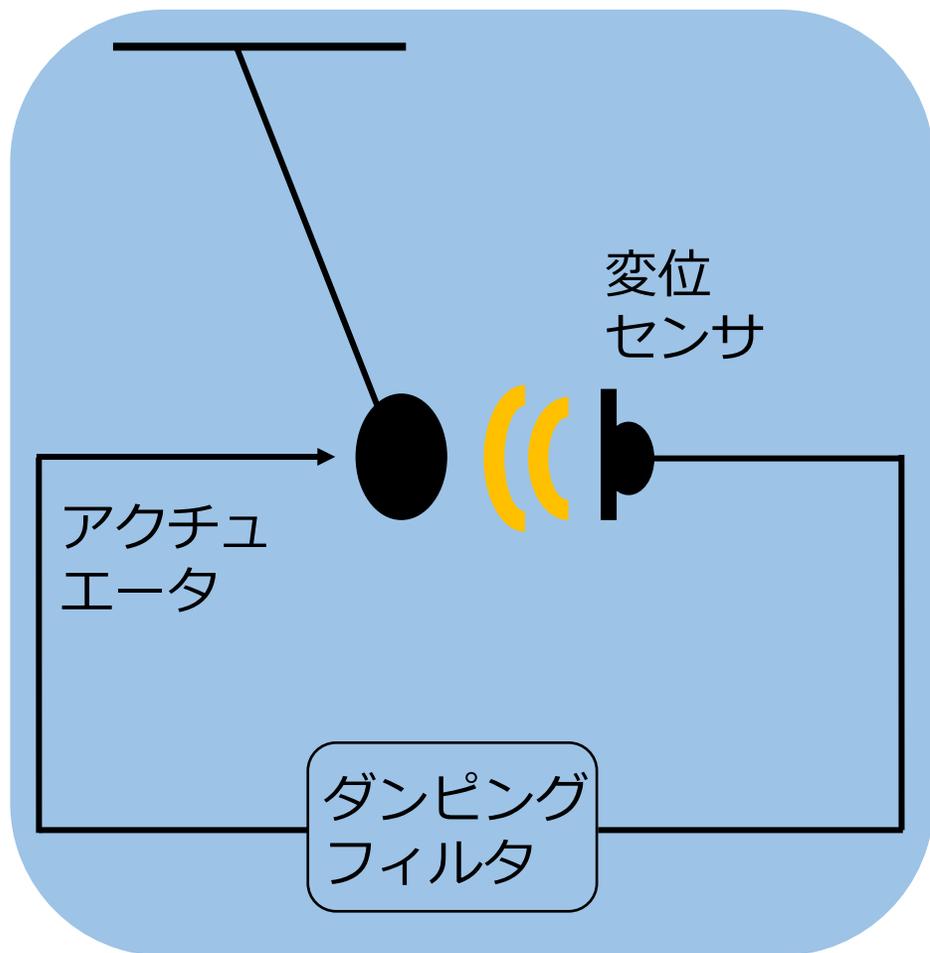
センサ・アクチュエータ (Payload)



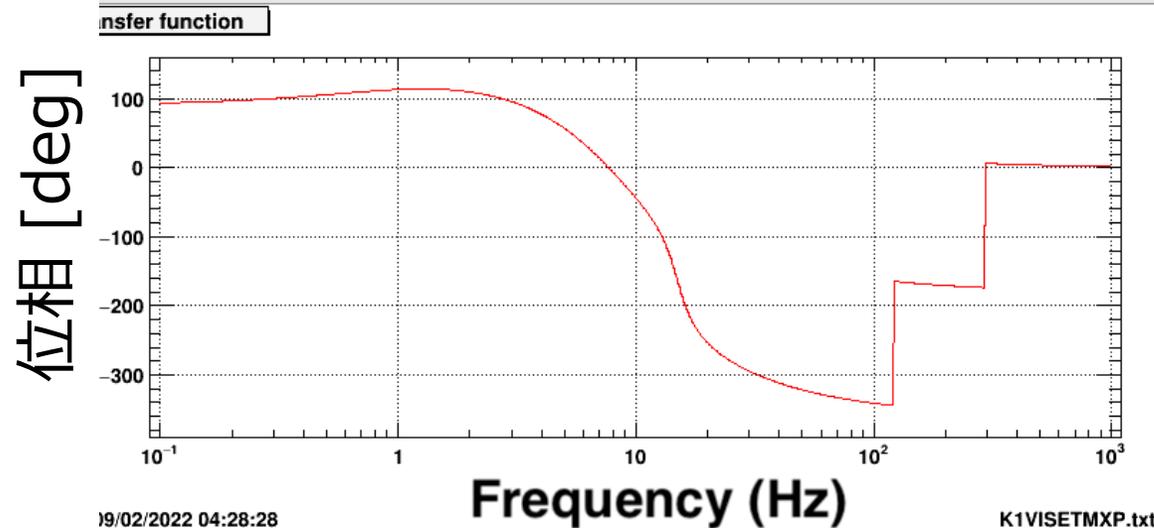
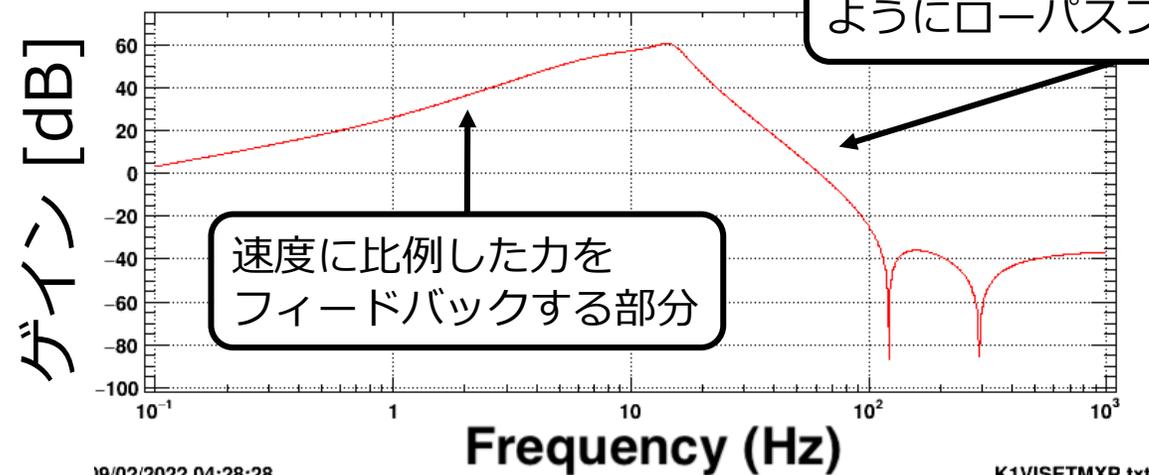
自由度



Dampingフィルタ



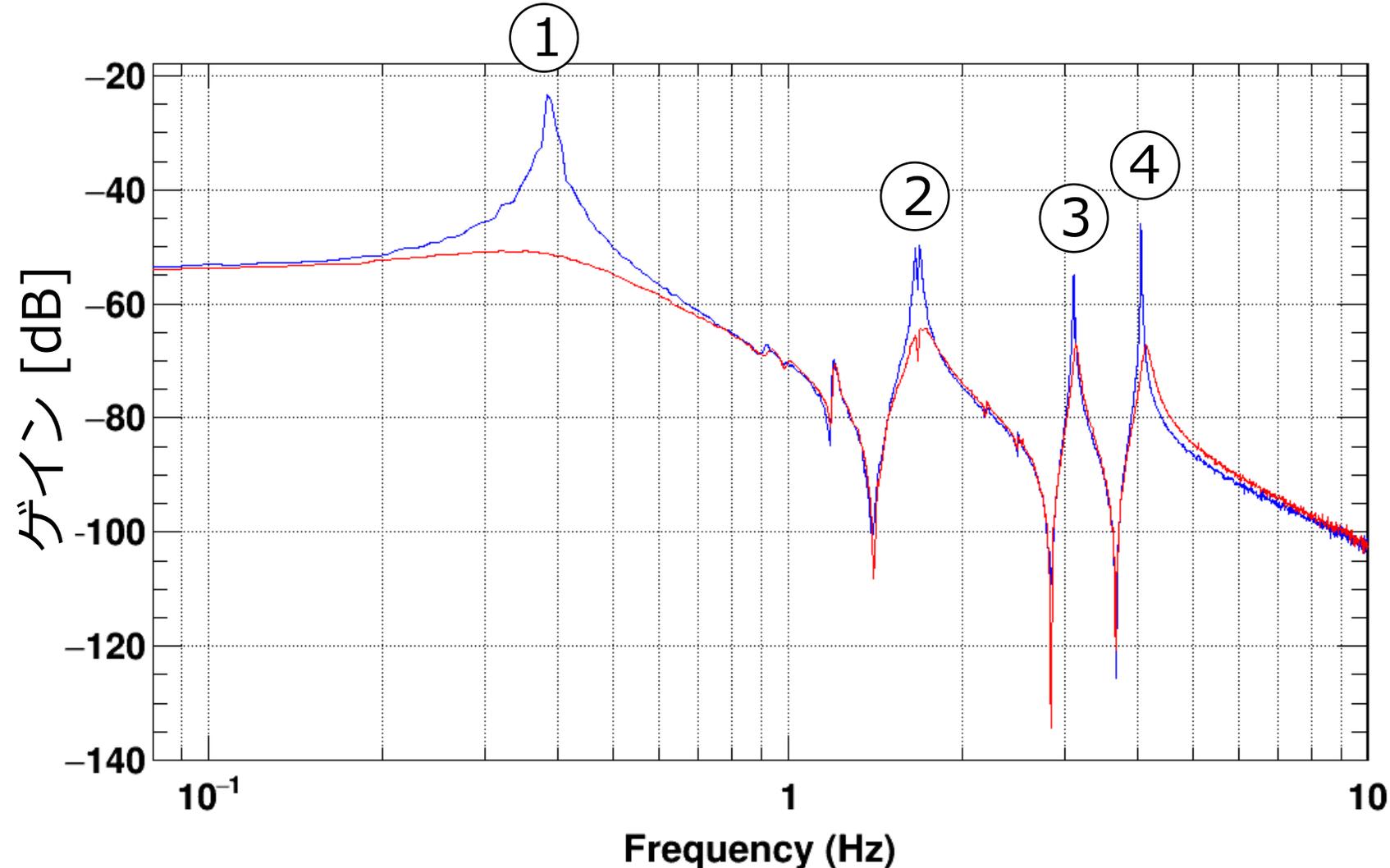
例) ETMX MN Yaw



ダンピング制御の確認 (周波数領域)

例) ETMX MN Yaw の伝達関数

* 励起信号を入れて測定



— . . . フィルターなし
— . . . フィルターあり

モード

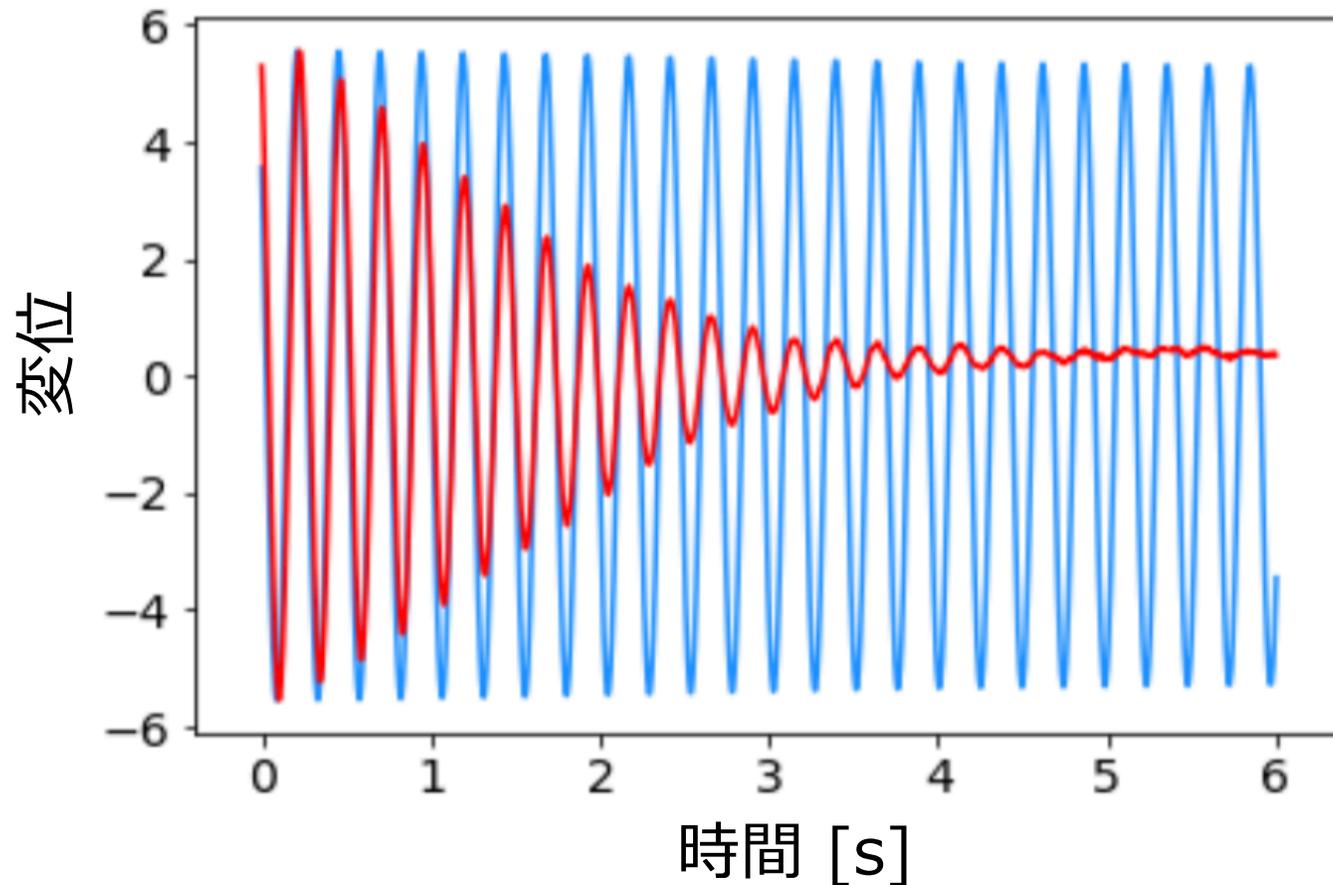
1	. . .	0.38 Hz
2	. . .	1.66 Hz
3	. . .	3.12 Hz
4	. . .	4.08 Hz

狙い通り共振周波数での揺れをダンピングできた

ダンピング制御の確認 (時間領域)

- 振動が $1/e$ に減衰するまでの時間 : KAGRA における要求値 $\tau = 60 \text{ sec}$

例) ETMX MN Yaw モード4

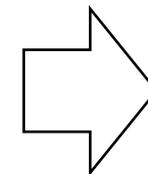


ダンピングフィルター

なし . . . $\tau = 97.1 \pm 0.4 \text{ s}$

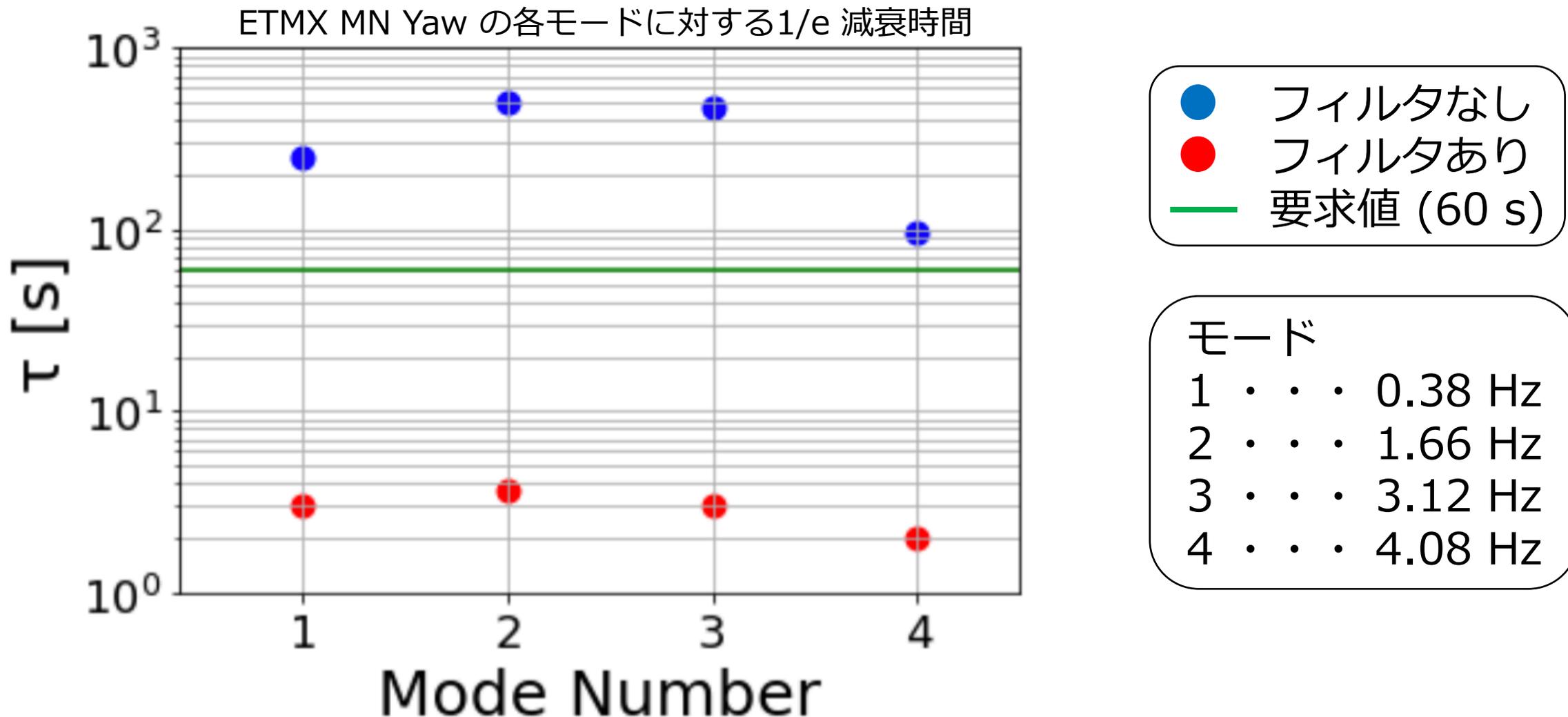
あり . . . $\tau = 2.07 \pm 0.21 \text{ s}$

* 包絡線を
 $y = a \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + b$
でフィッティング
(τ . . . 時定数)



要求を満たすダンピング
制御ができた

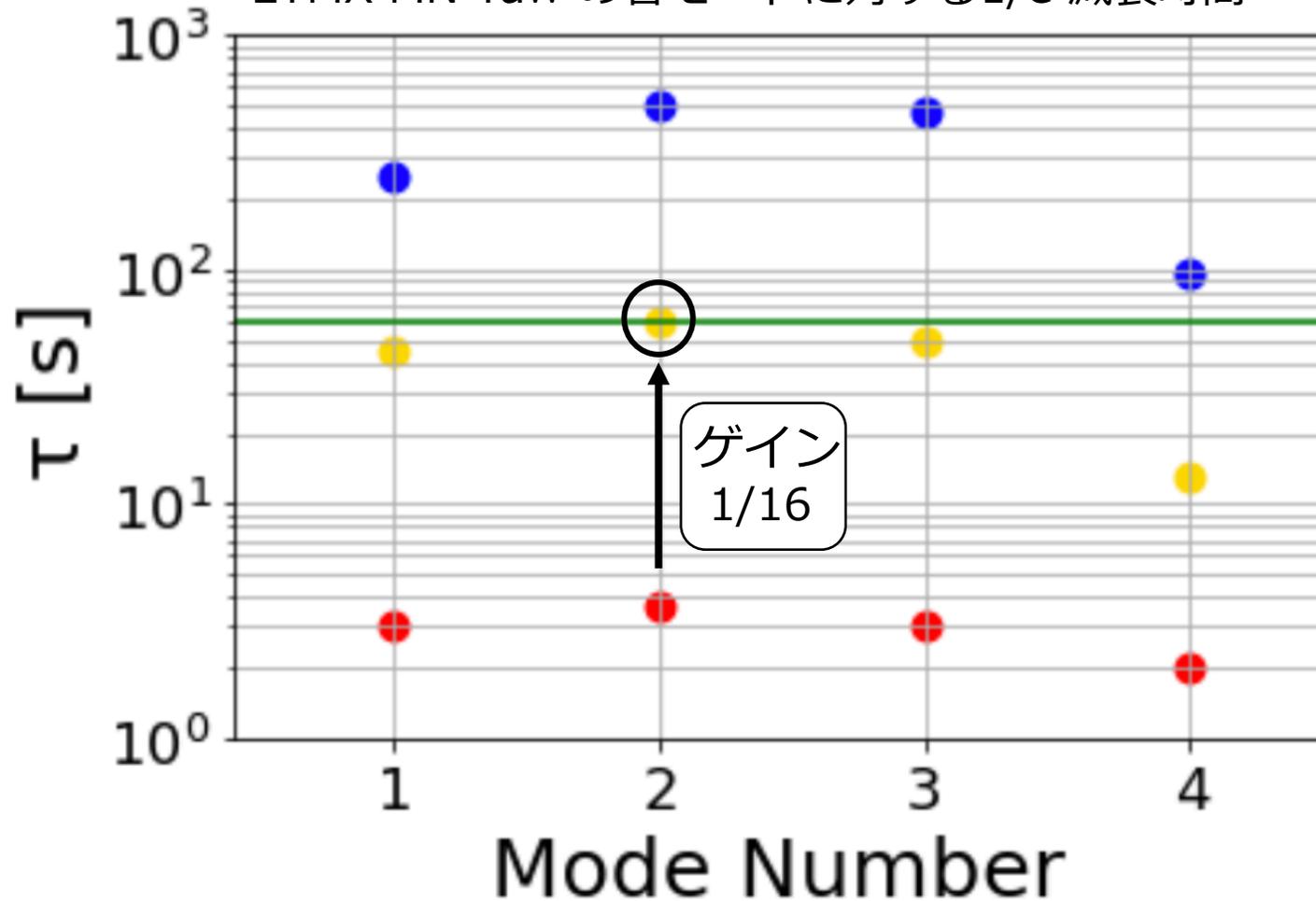
1/e 減衰時間



→ 十分要求を満たしているが、ゲインが高く、雑音が大きくなる

ダンピングフィルタのゲインの調整

ETMX MN Yaw の各モードに対する1/e 減衰時間



- フィルタなし
- ゲイン調整後
- フィルタあり
- 要求値 (60 s)

モード	
1	0.38 Hz
2	1.66 Hz
3	3.12 Hz
4	4.08 Hz

→ 要求を満たしつつ、高周波でのノイズが少なくなるようなフィルタを作成できた

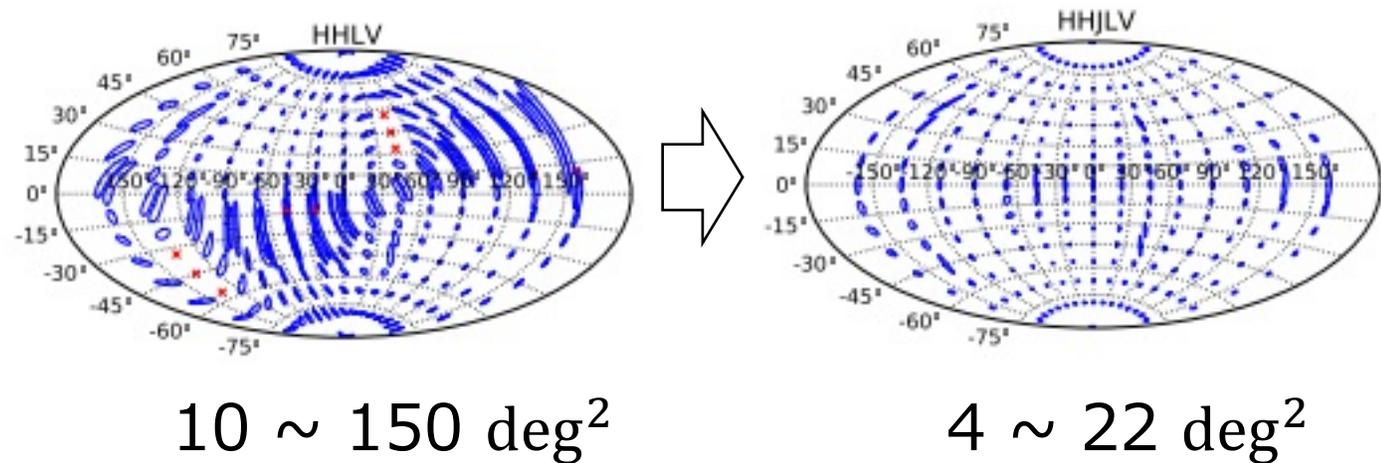
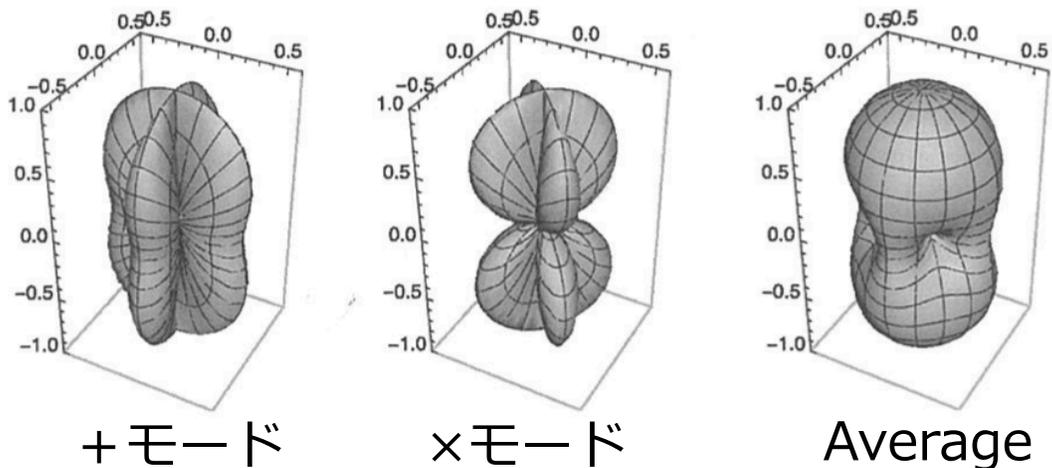
まとめと展望

- ETMX MN Yawについて、
各モードに対する $1/e$ 減衰時間が要求値 (60 sec) 以内になり、
かつ高周波でのノイズが少なくなるようなフィルタを作成できた
 - 地震などの外乱で懸架系が揺れてしまっても、早くその揺れを
抑えられる干渉計をロックした状態に素早く戻すことができる
 - 観測時間 (Observation mode) の増加につながる
- 残りのサスペンション(ETMY, ITMX, ITMY)や他の自由度についても
同様に行う

Backups

KAGRA の意義

重力波源の方向の決定

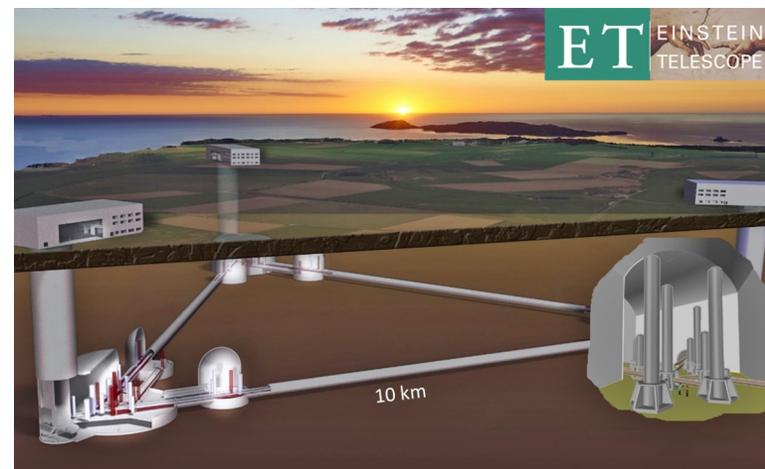


Fairhurst (2012)

→ 標準音源としての重力波
マルチメッセンジャー天文学
(重力波・電磁波・ニュートリノ観測の融合)

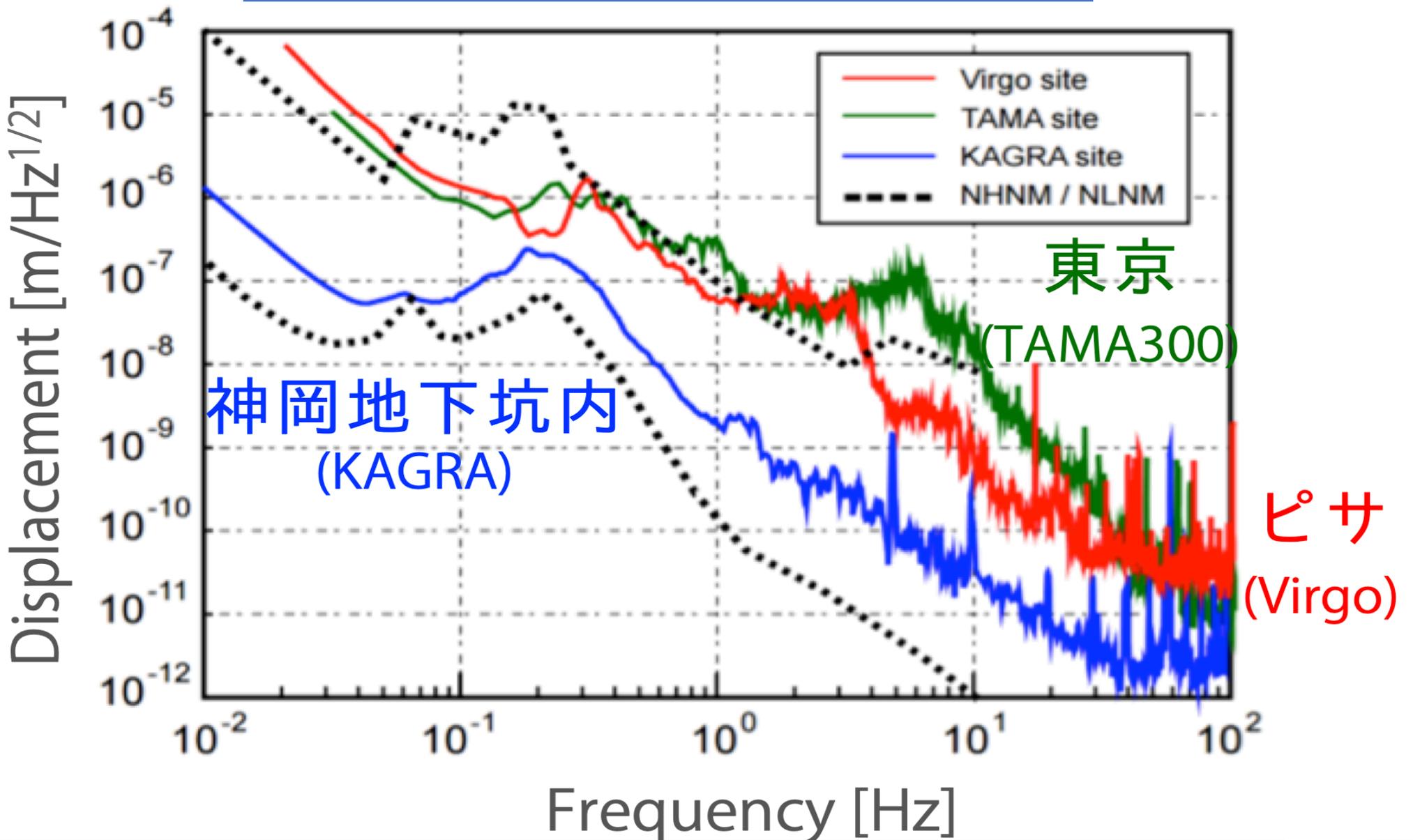
地下 + 低温による雑音低減技術

→ 次世代の重力波望遠鏡での応用



© EGO

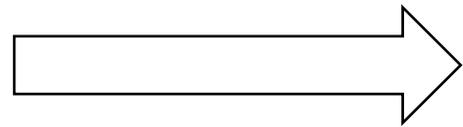
地下はどれだけ静か？



振り子の段数

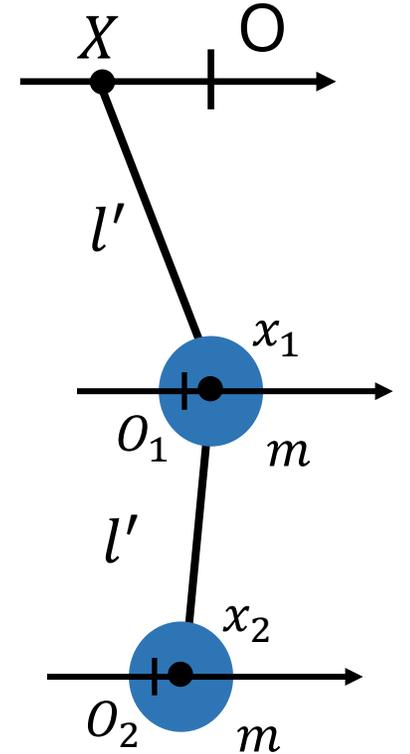
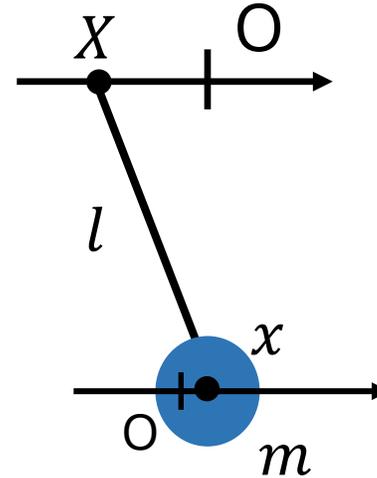
1段の場合

$$\text{運動方程式 } m\ddot{x} = -\frac{mg}{l}(x - X)$$



Fourier変換
してまとめる

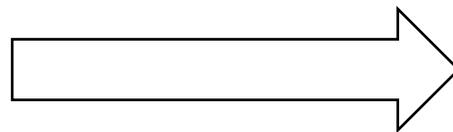
$$\frac{\tilde{x}}{\tilde{X}} = \frac{mg/l}{-m\omega^2 + mg/l} = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$$



2段の場合

$$\text{運動方程式 } m\ddot{x}_1 = -\frac{2mg}{l'}(x_1 - X) - \frac{mg}{l'}(x_1 - x_2)$$

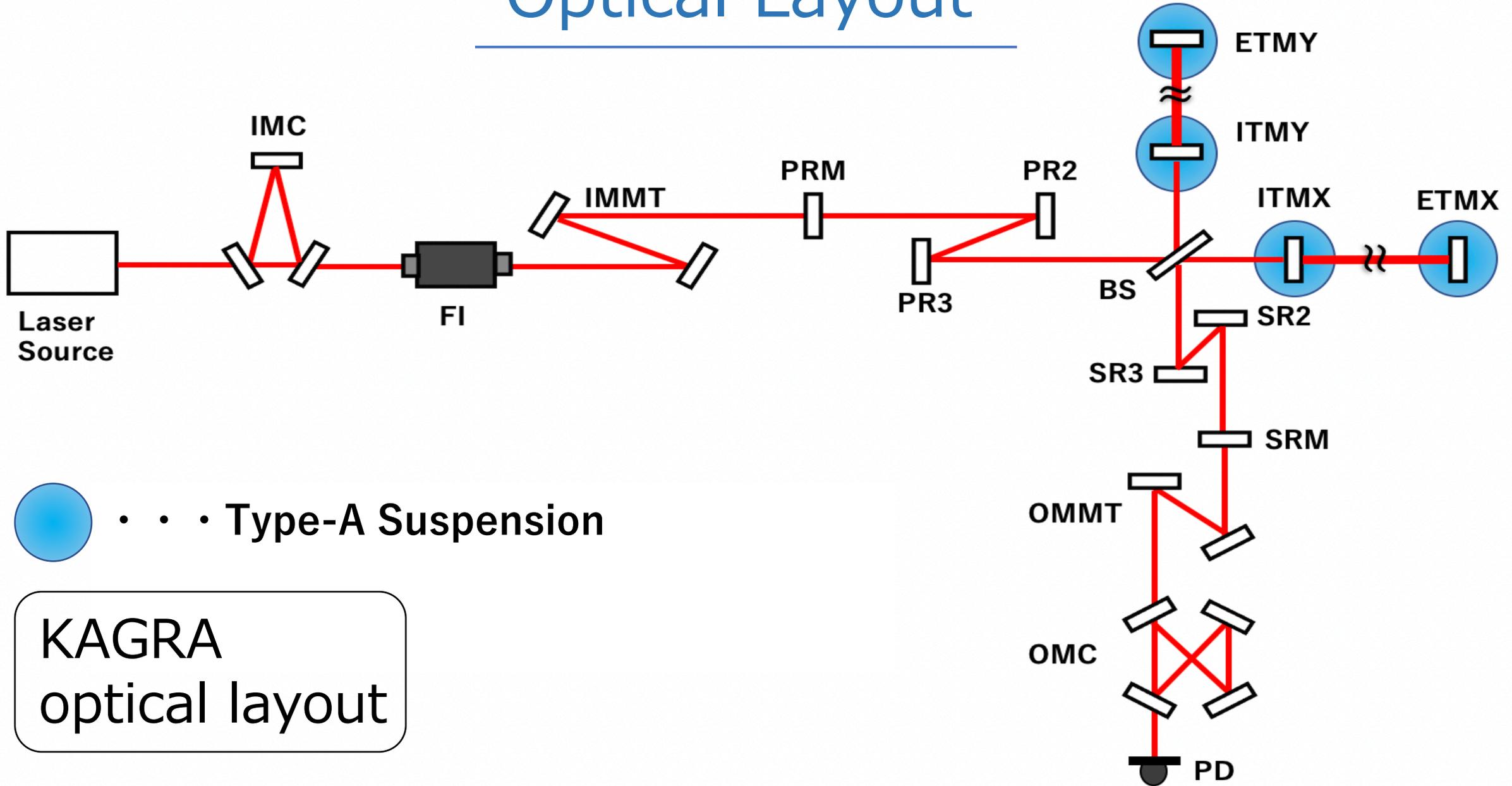
$$m\ddot{x}_2 = -\frac{mg}{l'}(x_2 - x_1)$$



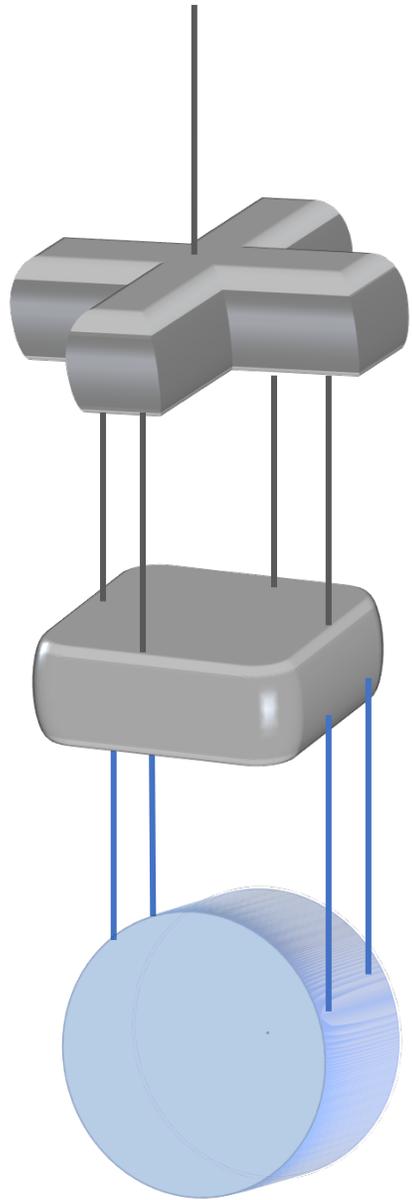
$$\begin{pmatrix} 3\omega_0'^2 - \omega^2 & -\omega_0'^2 \\ -\omega_0'^2 & \omega_0'^2 - \omega^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\omega_0'^2 \tilde{X} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{\tilde{X}} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega^4 - 4\omega_0'^2\omega^2 + 2\omega_0'^4} \begin{pmatrix} 2(\omega_0'^4 - \omega_0'^2\omega^2) \\ 2\omega_0'^4 \end{pmatrix}$$

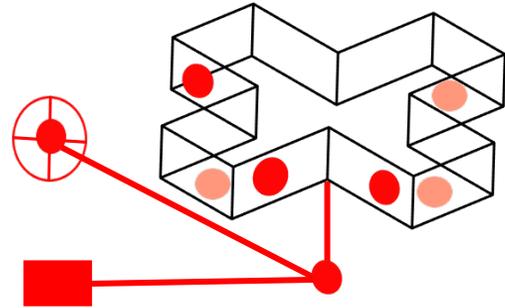
Optical Layout



センサ・アクチュエータ

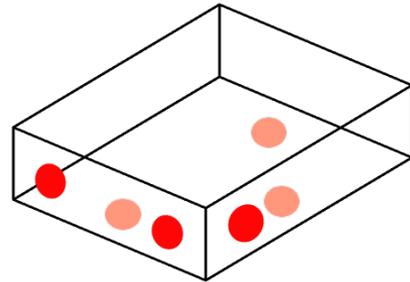


MN



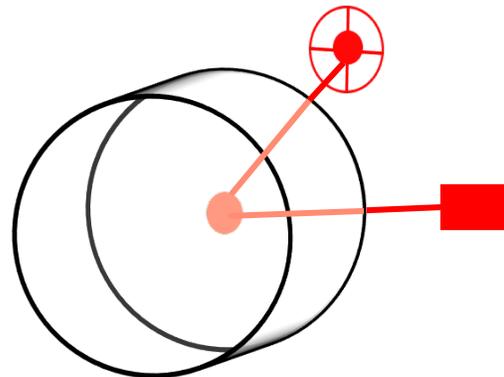
- 反射型フォトセンサ
MN-MNR間の相対変位
- 光てこ (OpLev)
地面に対するMNの角度

IM



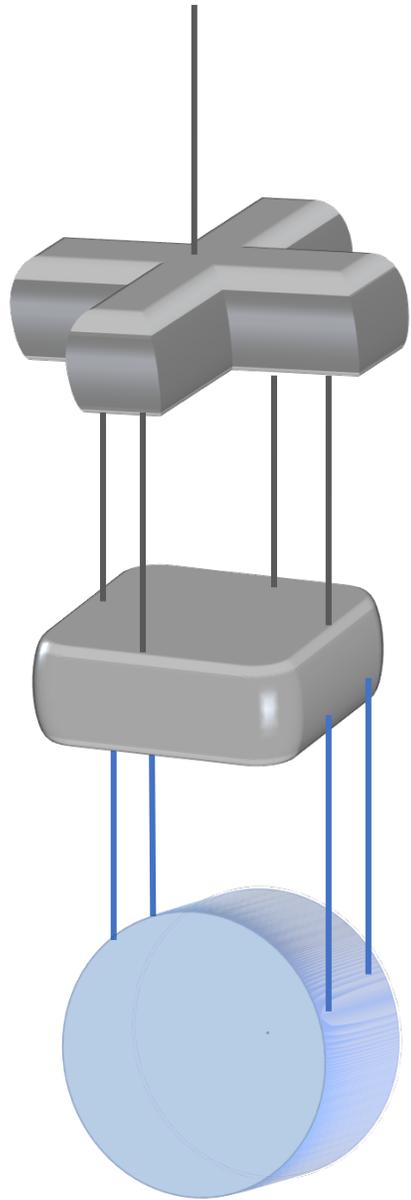
- 反射型フォトセンサ
IM-IRM間の相対変位

TM

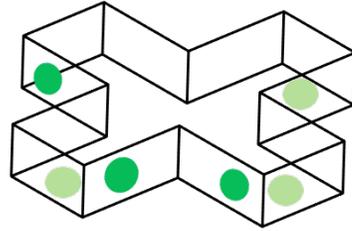


- 光てこ (OpLev)
地面に対するTMの変位

センサ・アクチュエータ

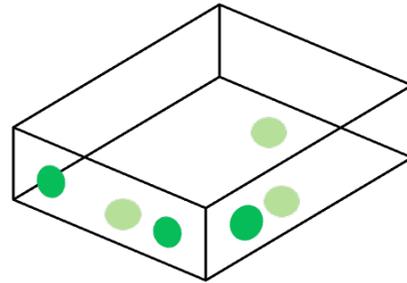


MN



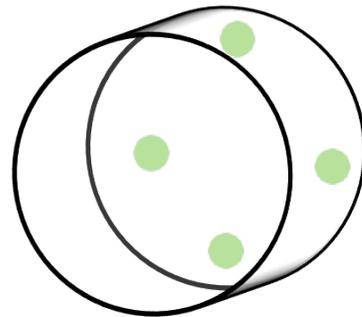
- ・ コイルマグネットアクチュエータ
MN-MNR間の相対6自由度

IM



- ・ コイルマグネットアクチュエータ
IM-IRM間の相対6自由度

TM



- ・ コイルマグネットアクチュエータ
TM-RM間の相対3自由度 (L, P, Y)

コイルマグネットアクチュエータ

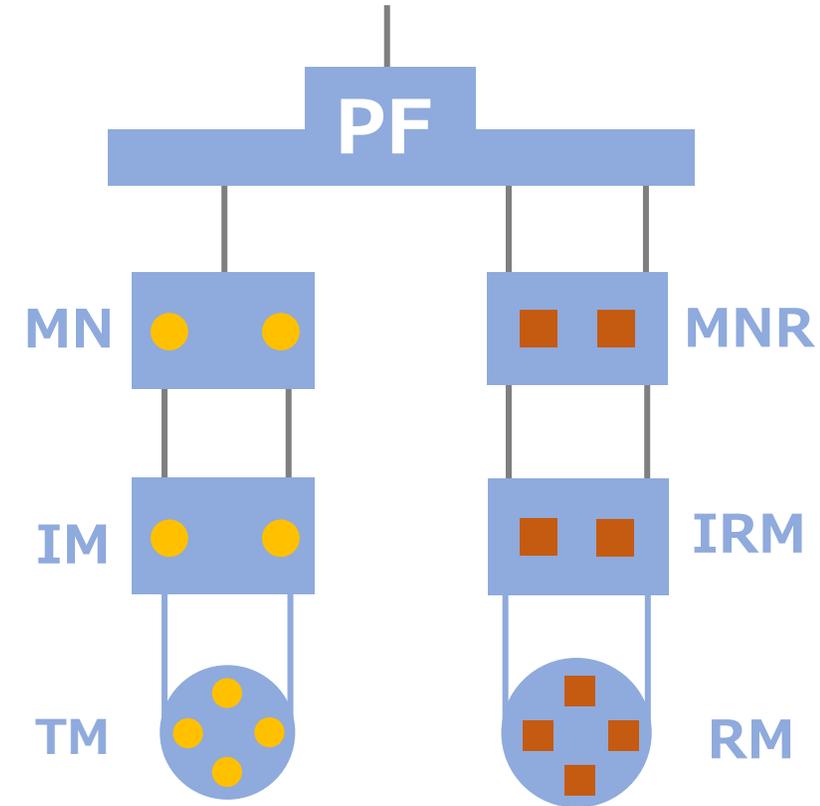
- ソレノイド電磁石 + コイル

↓
鏡懸架チェーン

↓
リコイルマスチェーン

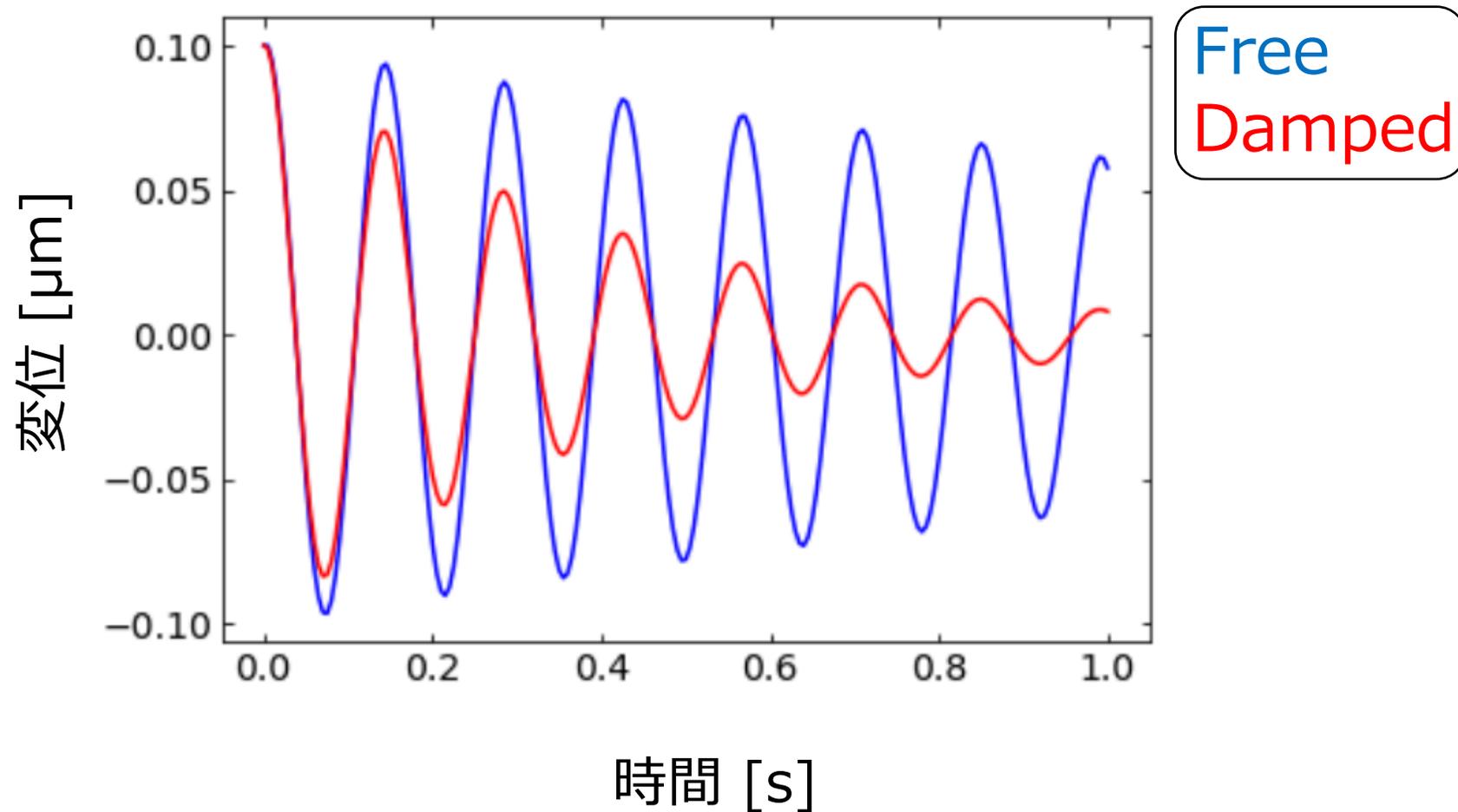
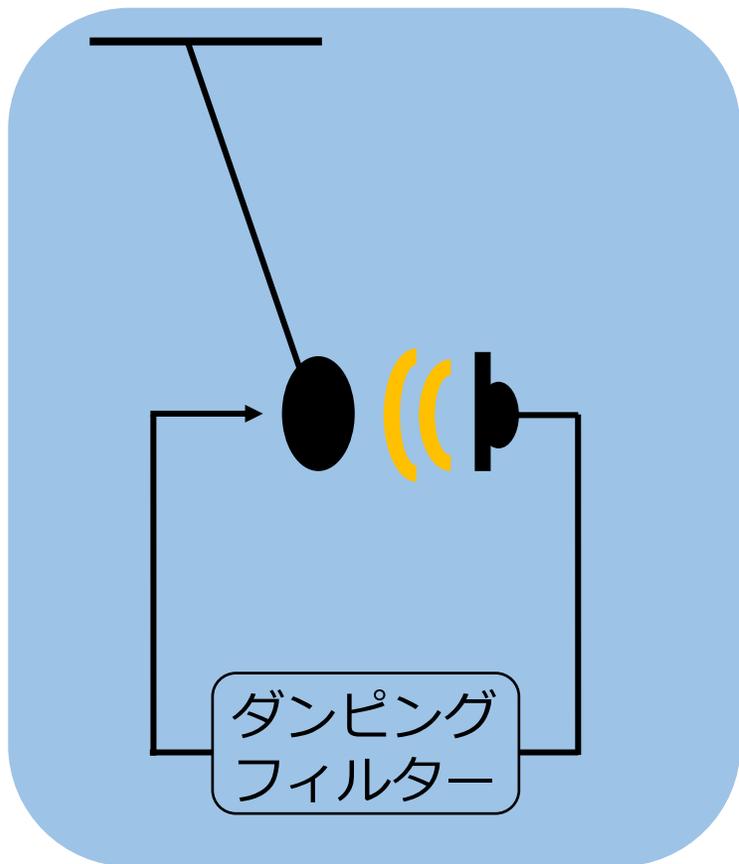
コイル自身も防振が必要

コイルをチェンバー底面などに固定してしまうとその部分の振動を直接拾ってしまい、結果として磁石を介して鏡に伝播してしまう



- コイルに電流を流して磁場を発生させ、磁石に力を加えることでミラーを動かしてミラーの位置を制御

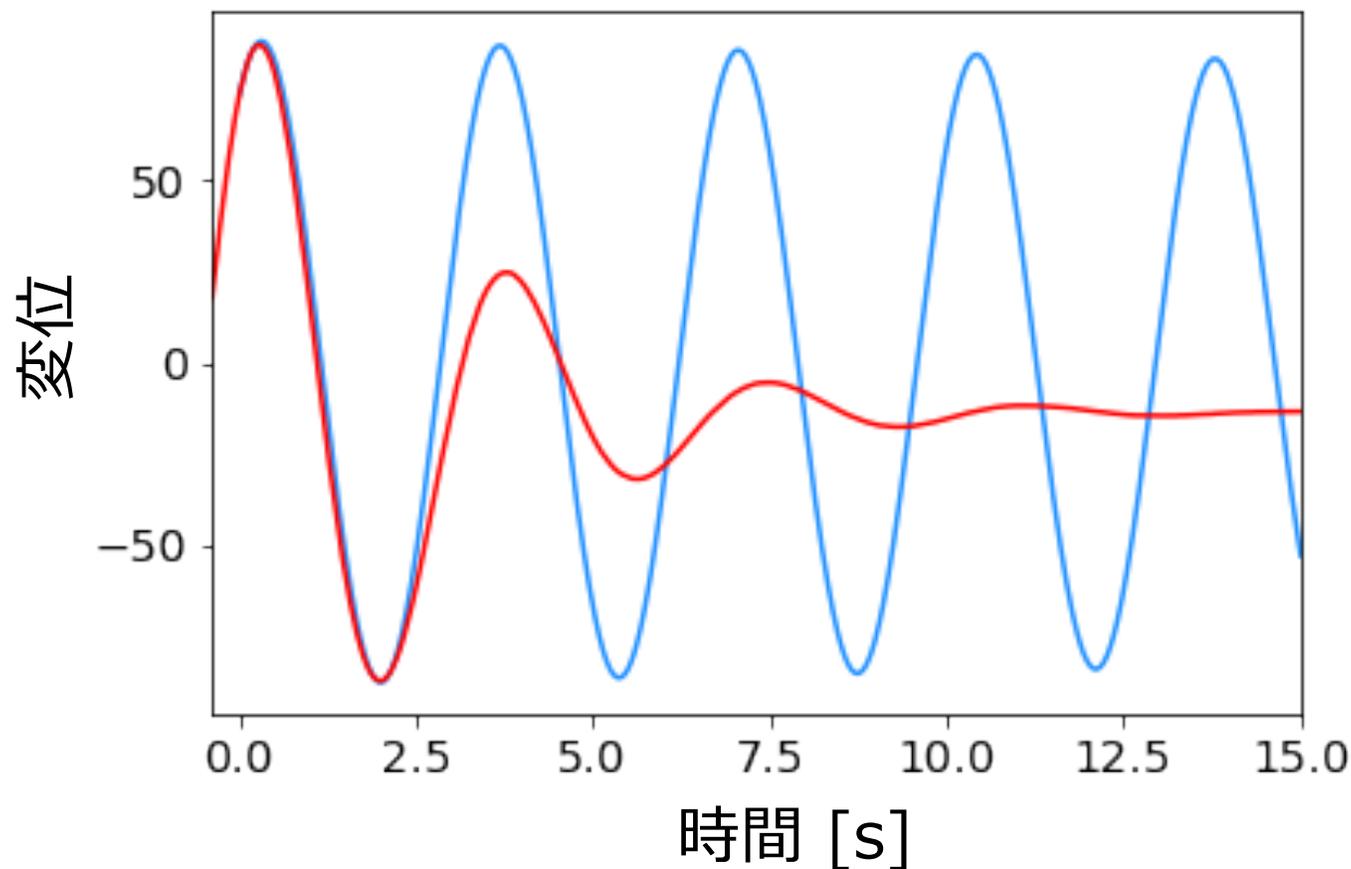
Damping制御



ダンピング制御の確認 (時間領域)

- 振動が $1/e$ に減衰するまでの時間：KAGRA における要求値 $\tau = 60 \text{ sec}$

例) ETMX MN Yaw モード1

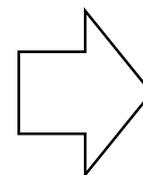


ダンピングフィルター

なし . . . $\tau = 251 \pm 0 \text{ s}$

あり . . . $\tau = 3.23 \pm 0.23 \text{ s}$

* 包絡線を
 $y = a \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + b$
でフィッティング
(τ . . . 時定数)

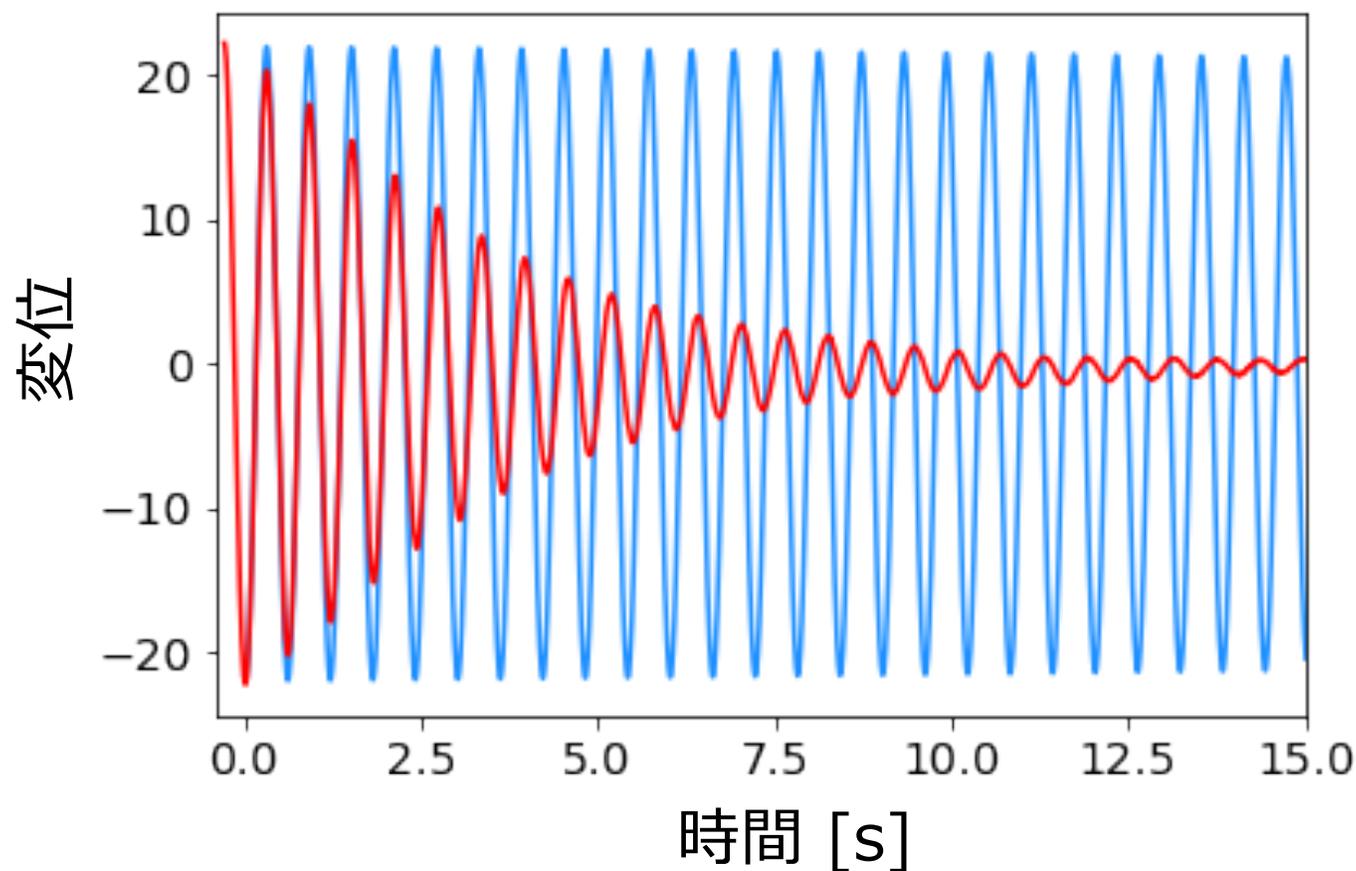


要求を満たすダンピング
制御ができた

ダンピング制御の確認 (時間領域)

- 振動が $1/e$ に減衰するまでの時間：KAGRA における要求値 $\tau = 60 \text{ sec}$

例) ETMX MN Yaw モード2

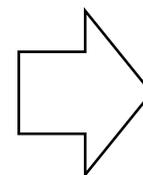


ダンピングフィルター

なし . . . $\tau = 498 \pm 6 \text{ s}$

あり . . . $\tau = 3.68 \pm 0.09 \text{ s}$

* 包絡線を
 $y = a \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + b$
でフィッティング
(τ . . . 時定数)

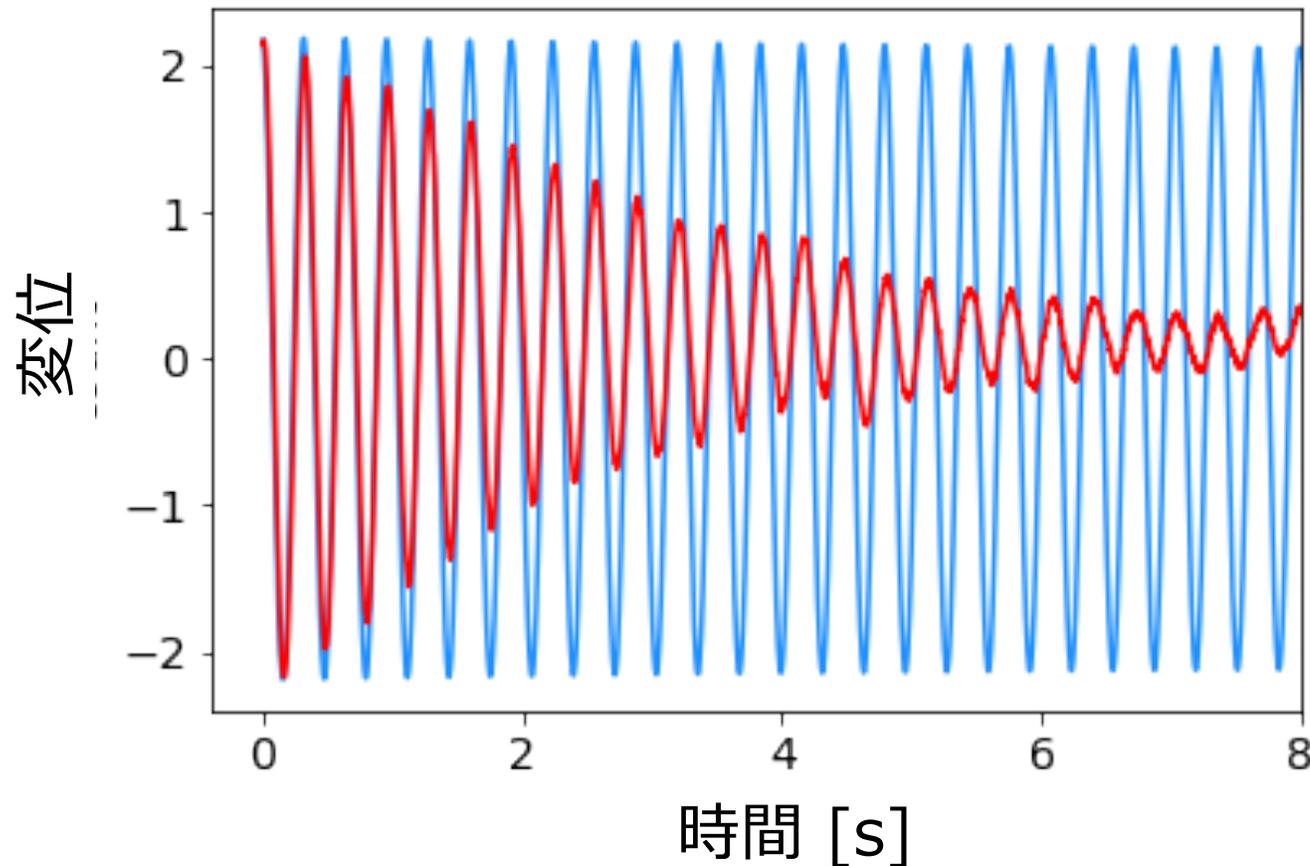


要求を満たすダンピング
制御ができた

ダンピング制御の確認 (時間領域)

- 振動が $1/e$ に減衰するまでの時間 : KAGRA における要求値 $\tau = 60 \text{ sec}$

例) ETMX MN Yaw モード3

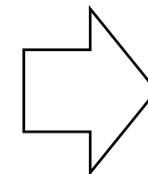


ダンピングフィルター

なし . . . $\tau = 479 \pm 2 \text{ s}$

あり . . . $\tau = 3.02 \pm 0.10 \text{ s}$

* 包絡線を
 $y = a \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + b$
でフィッティング
(τ . . . 時定数)



要求を満たすダンピング
制御ができた