

KAGRA 腕共振器鏡のための 13.5 m 防振懸架系の開発

登壇者：奥富 弘基 (総研大 D3)

KAGRA コラボレーション

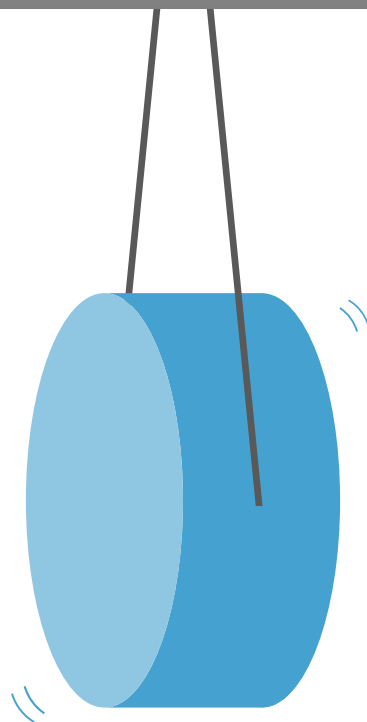
高橋竜太郎、佐藤直久、石崎秀晴、宮本昂拓、牛場崇史、
三代浩世希、山本尚弘、和泉究、宮川治、上泉眞裕、
戸村友宣、木村誠宏、井上優貴、正田亜八香、
阿久津智忠、麻生洋一、R. DeSalvo

目次

1. KAGRA~防振懸架系とは？
2. 腕共振器鏡用 防振懸架系：
Type-A suspension
3. Type-A tower 制御試験について

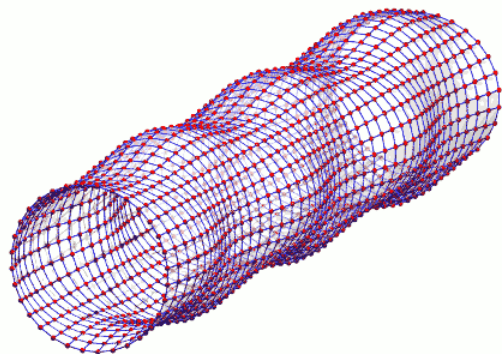
防振懸架系とは？

防振懸架系

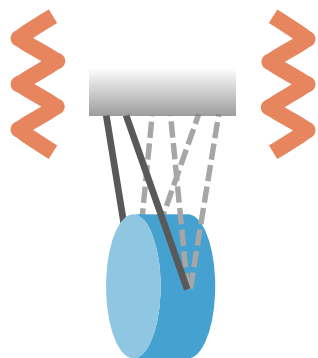


鏡を振り子のように吊る装置

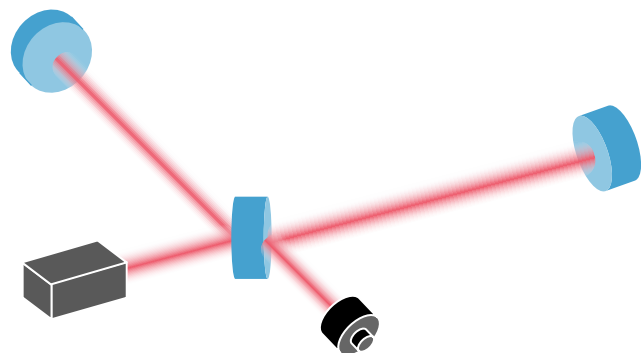
なぜ鏡を懸架するのか？



1. 重力波に対する
自由落下応答

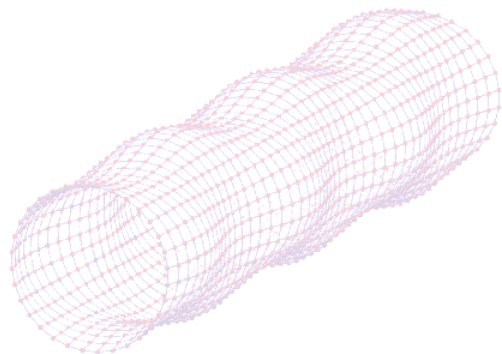


2. 地面振動からの防振

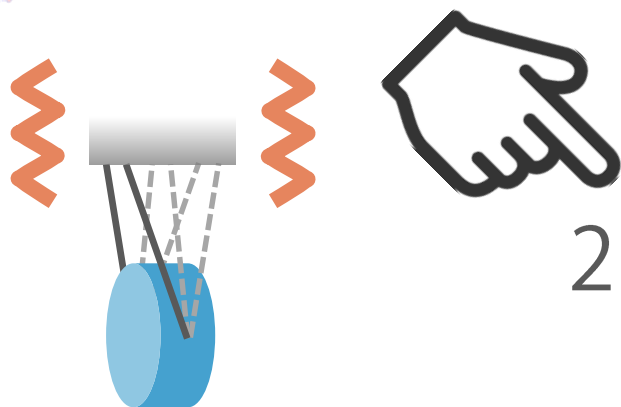


3. 干渉計の制御性能

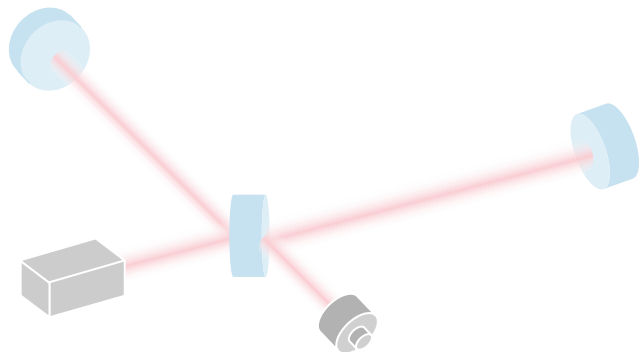
なぜ鏡を懸架するのか？



1. 重力波に対する
自由落下応答

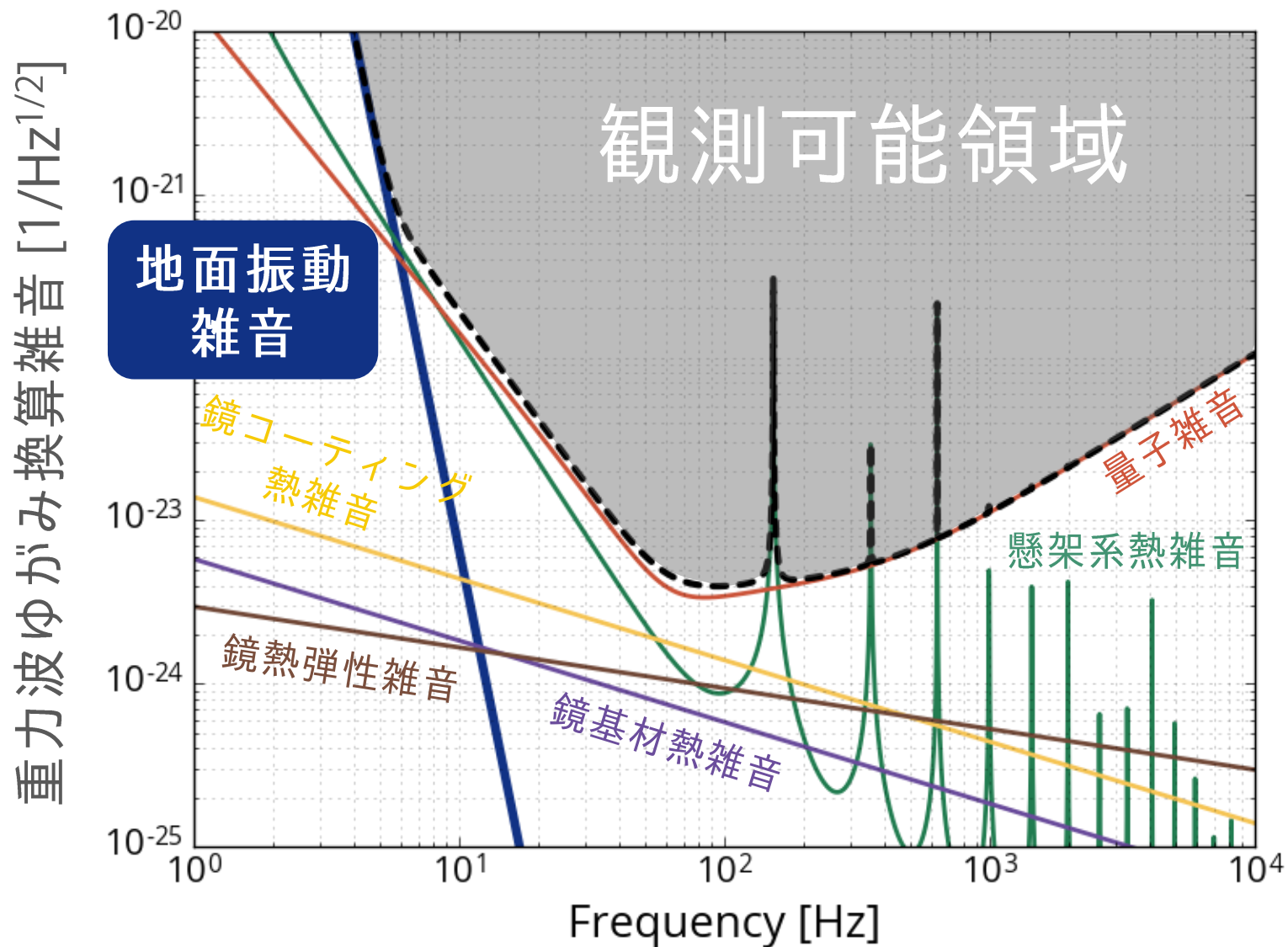


2. 地面振動からの防振



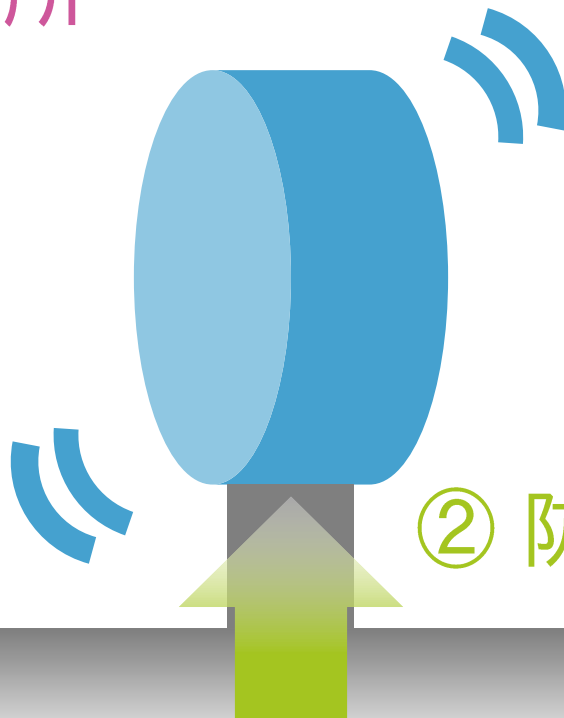
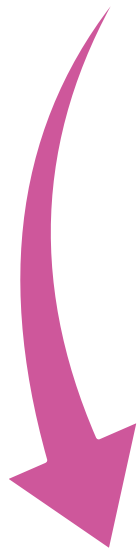
3. 干渉計の制御性能

KAGRA の雑音源



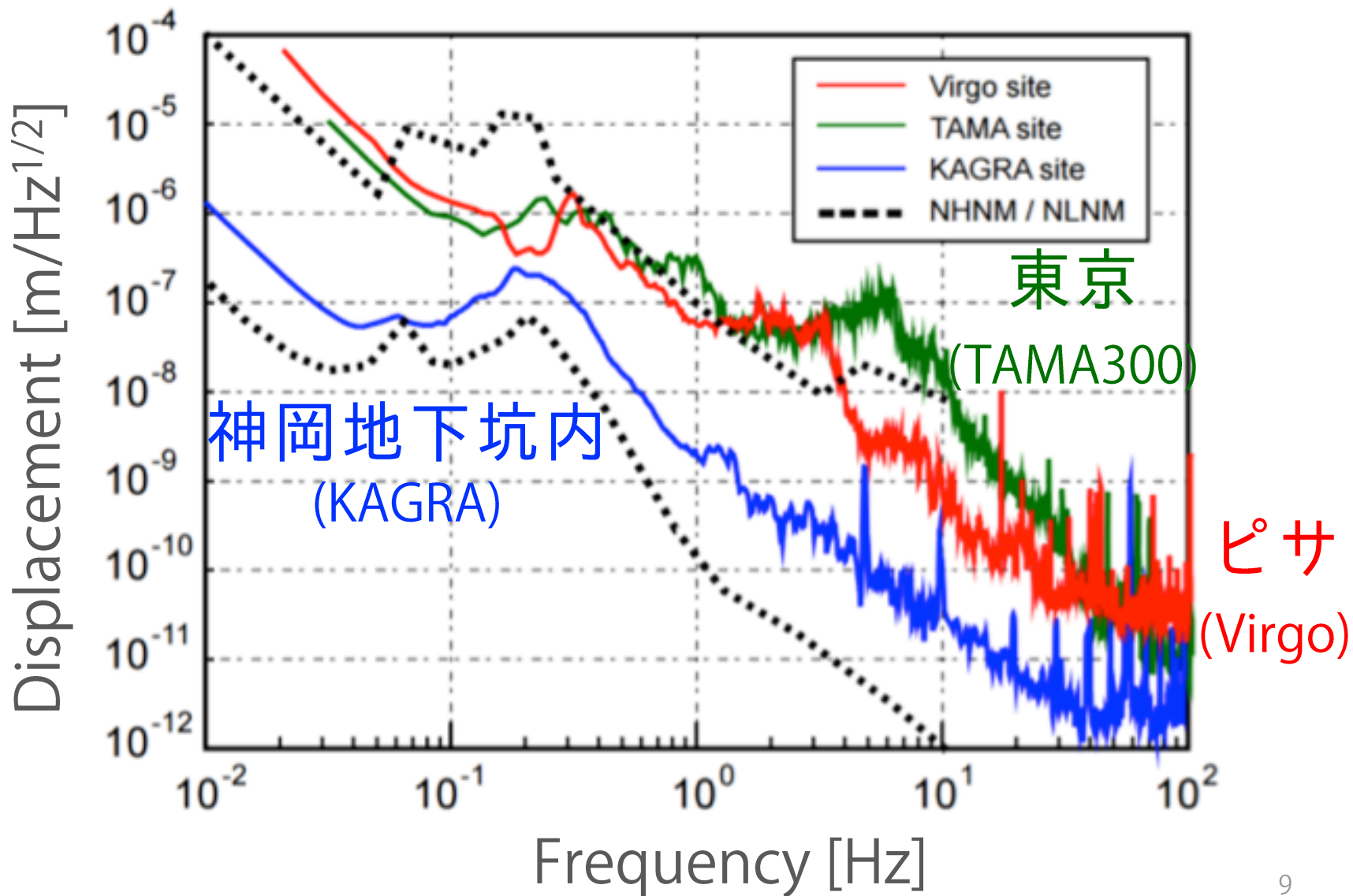
地面振動雑音を減らすには？

① 静かな場所

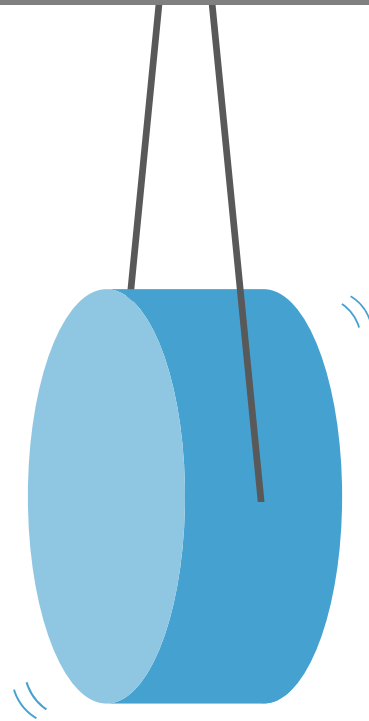


② 防振

① 地下は静か

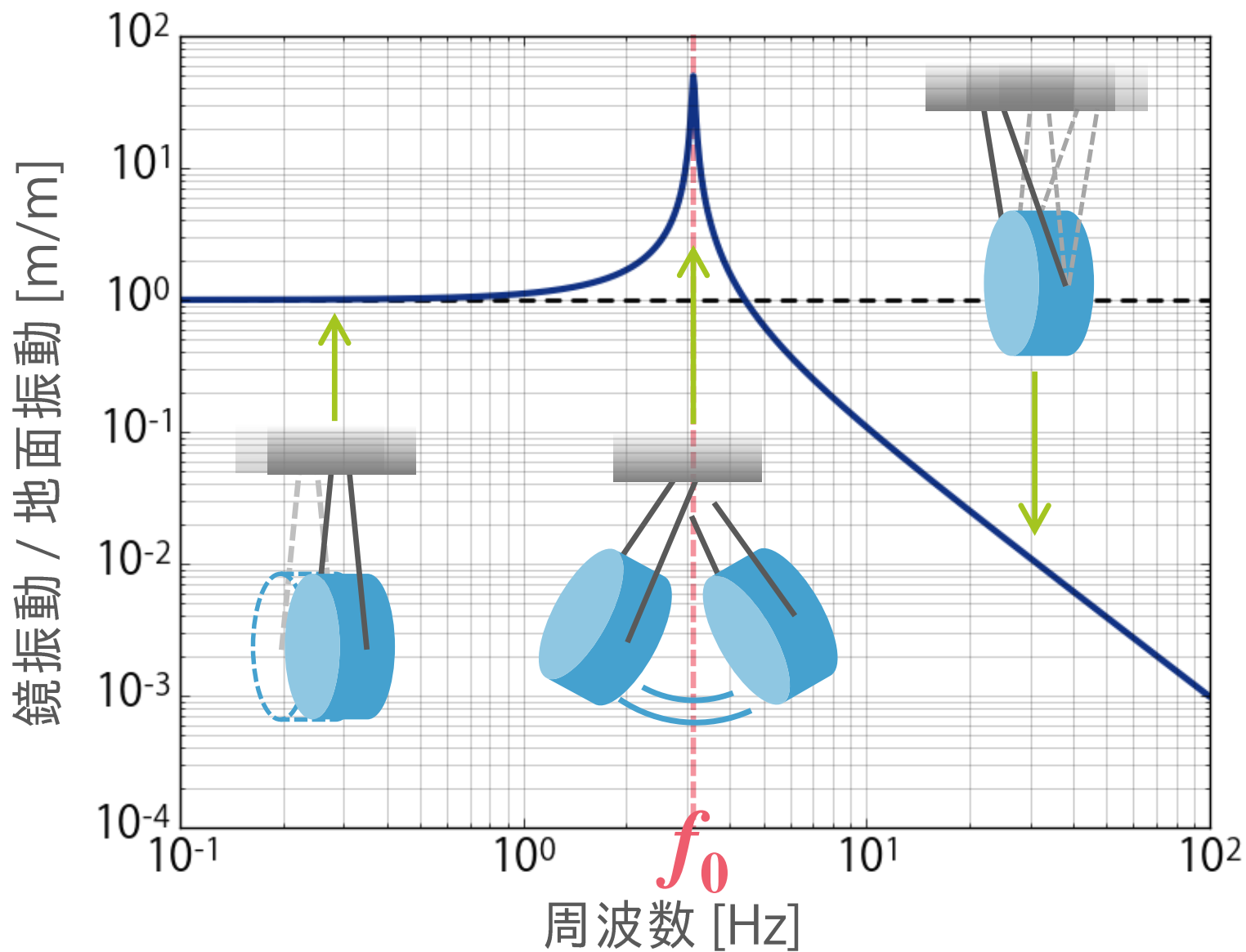


② 振り子による受動防振

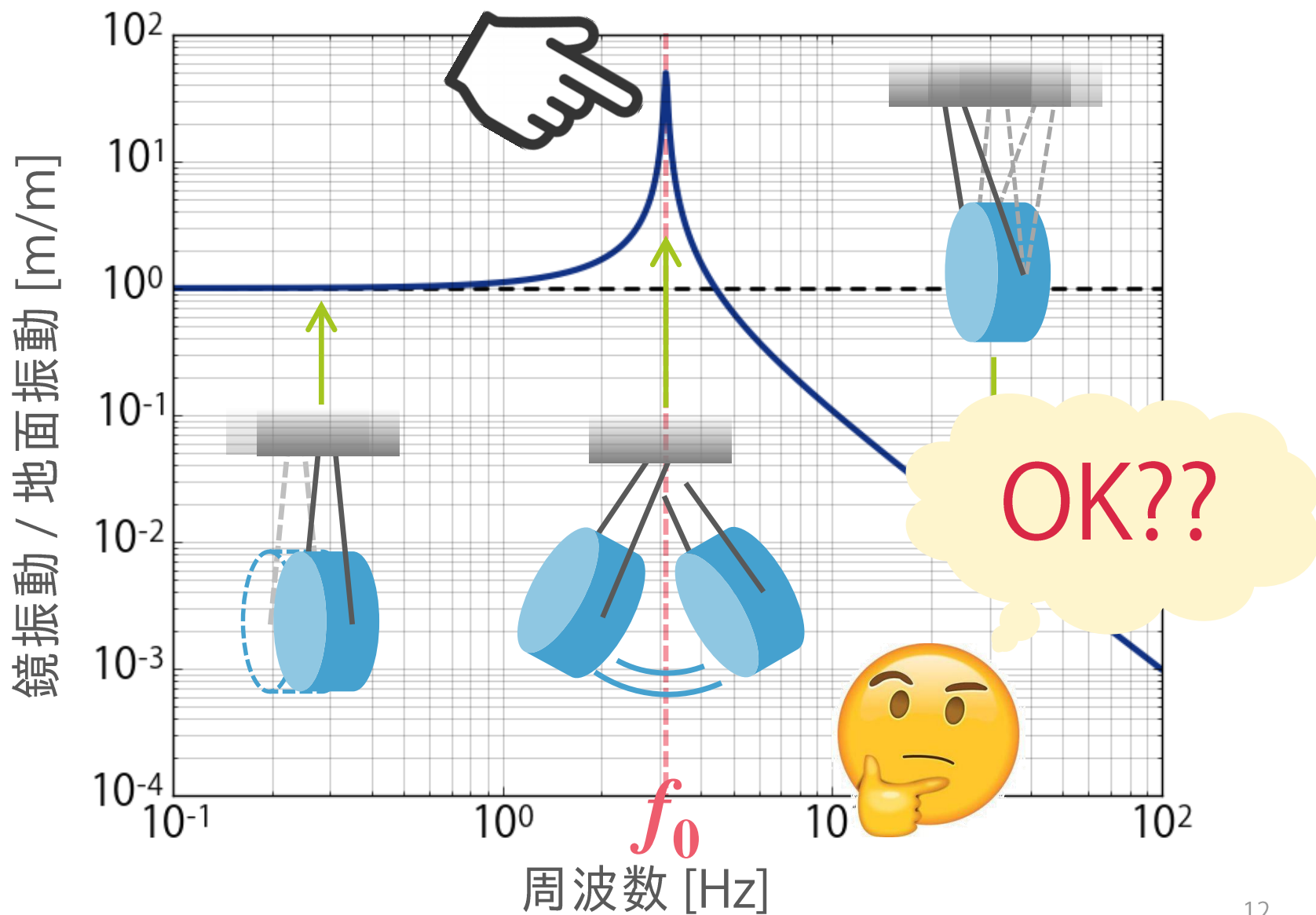


地面から鏡へ伝わる振動 $\propto f_0^2 / f^2$

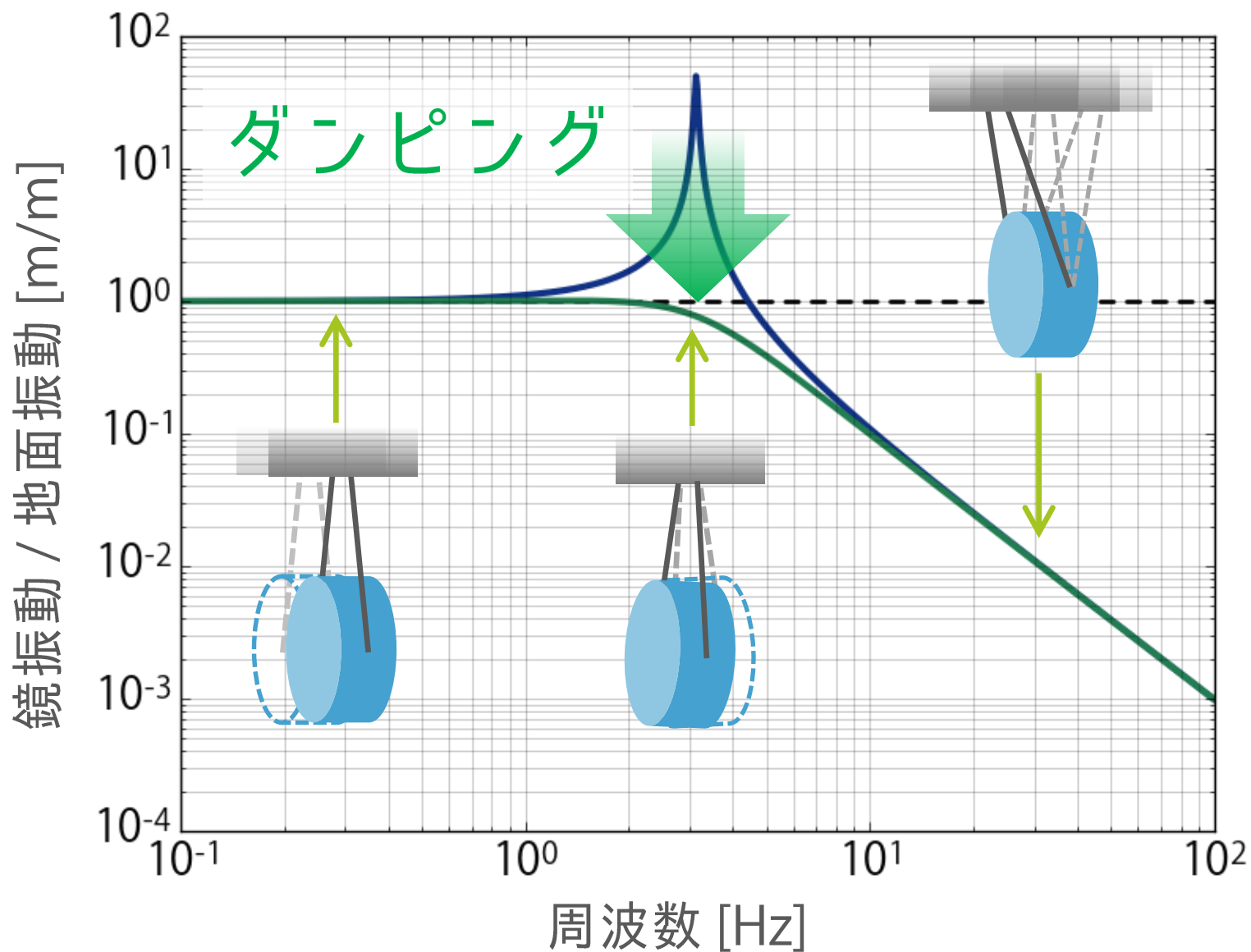
振り子の周波数応答



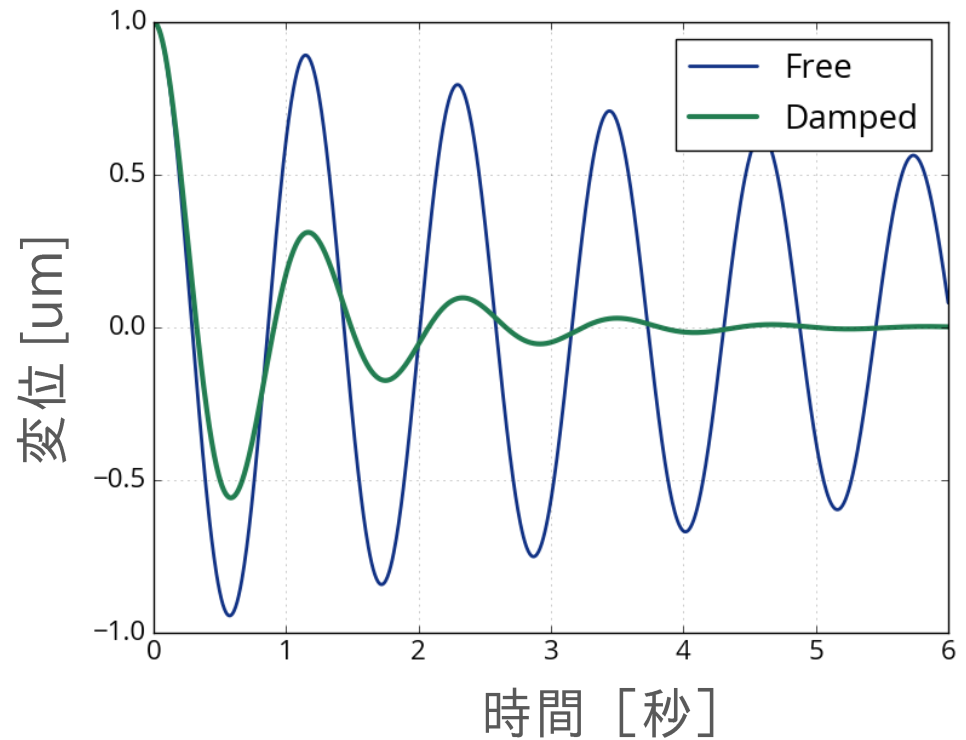
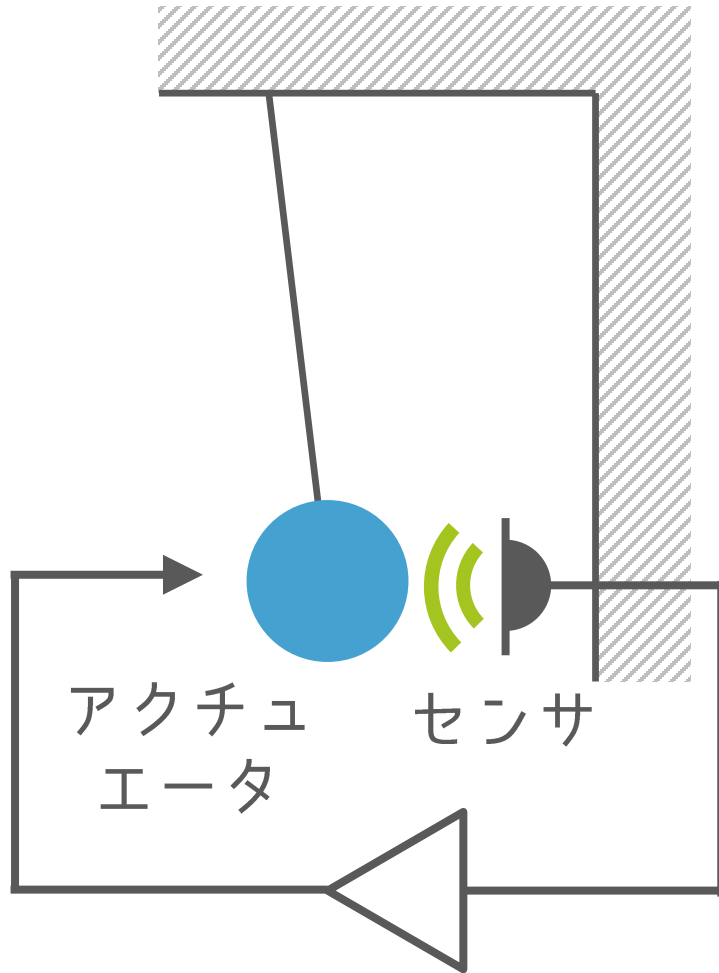
振り子の周波数応答



共振を抑制するには…

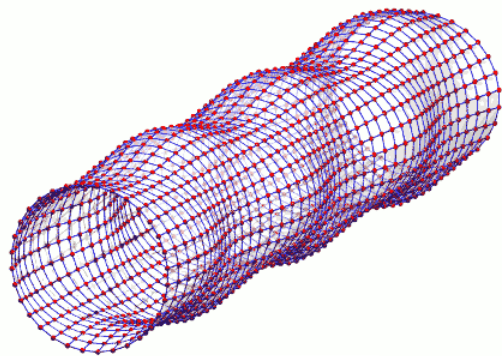


ダンピング制御

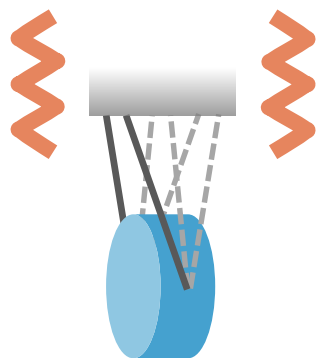


フィードバックされる力 \propto マスの変位

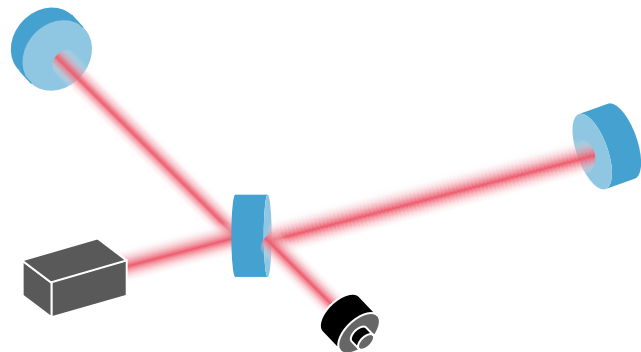
防振懸架系の役割



1. 重力波に対する
自由落下応答



2. 地面振動からの防振

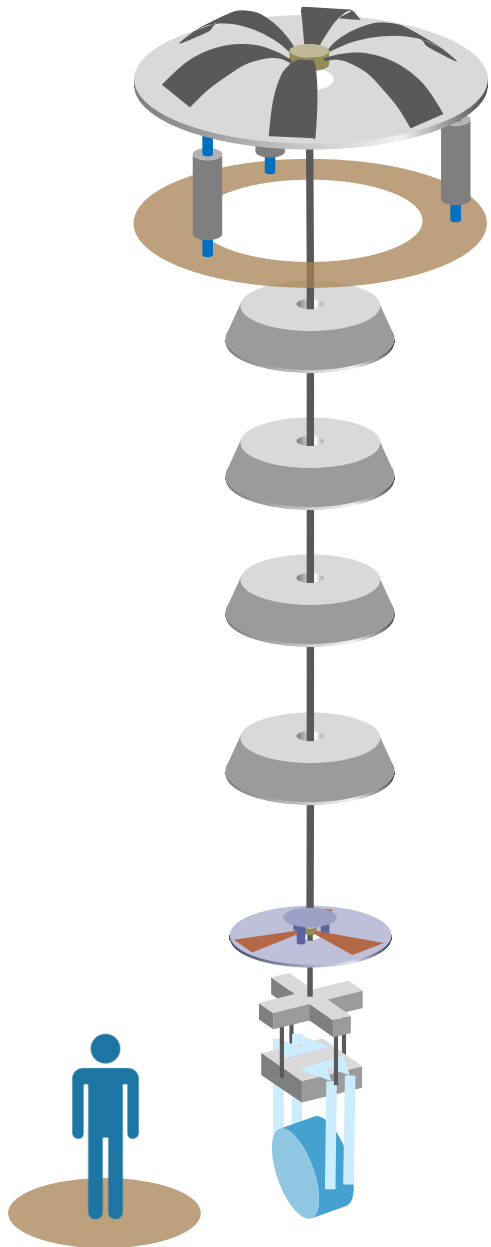


3. 干渉計の制御性能

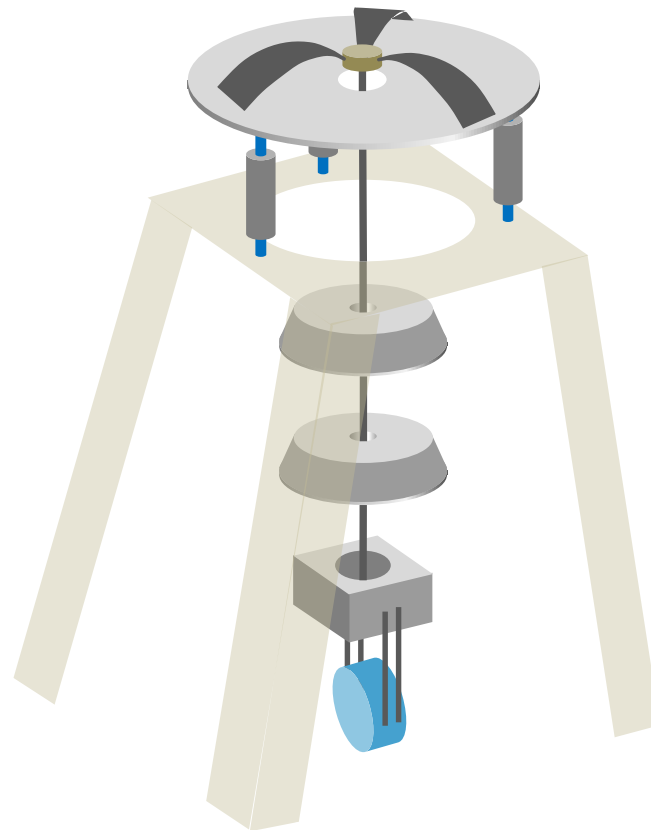
腕共振器鏡用防振懸架系: Type-A

KAGRAの防振懸架系

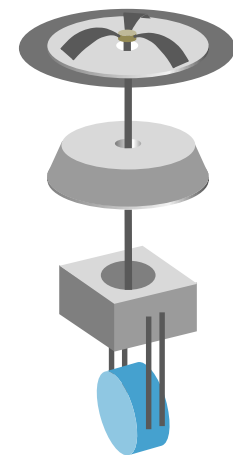
Type-A



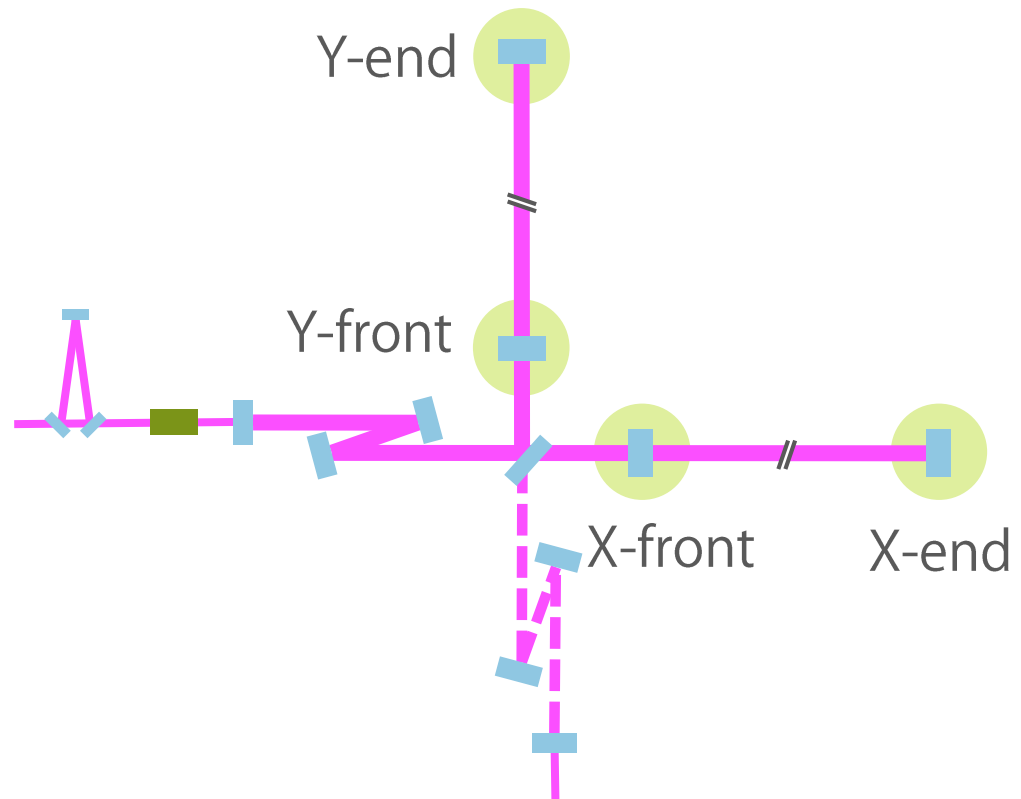
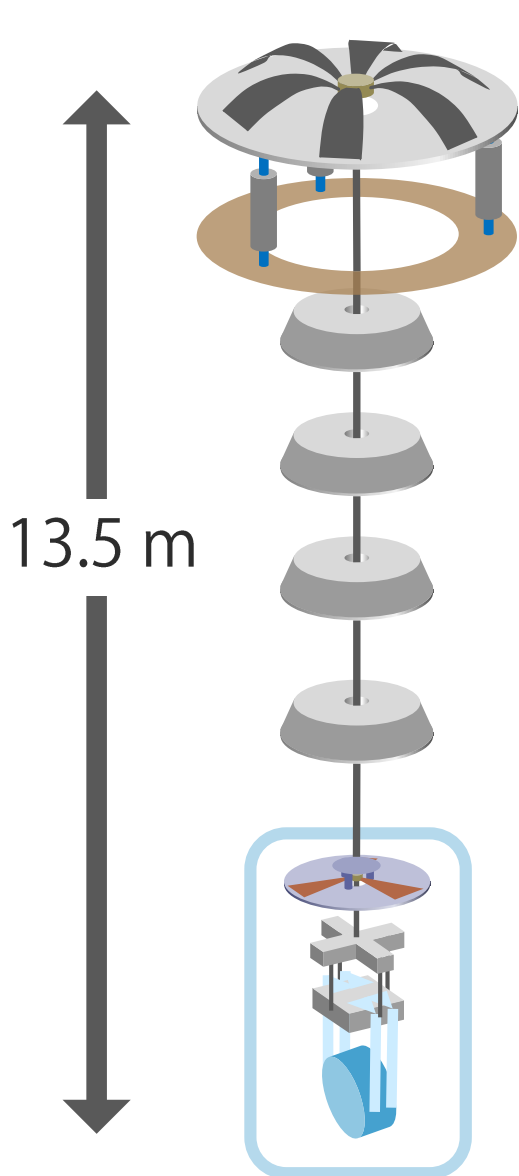
Type-B



Type-Bp



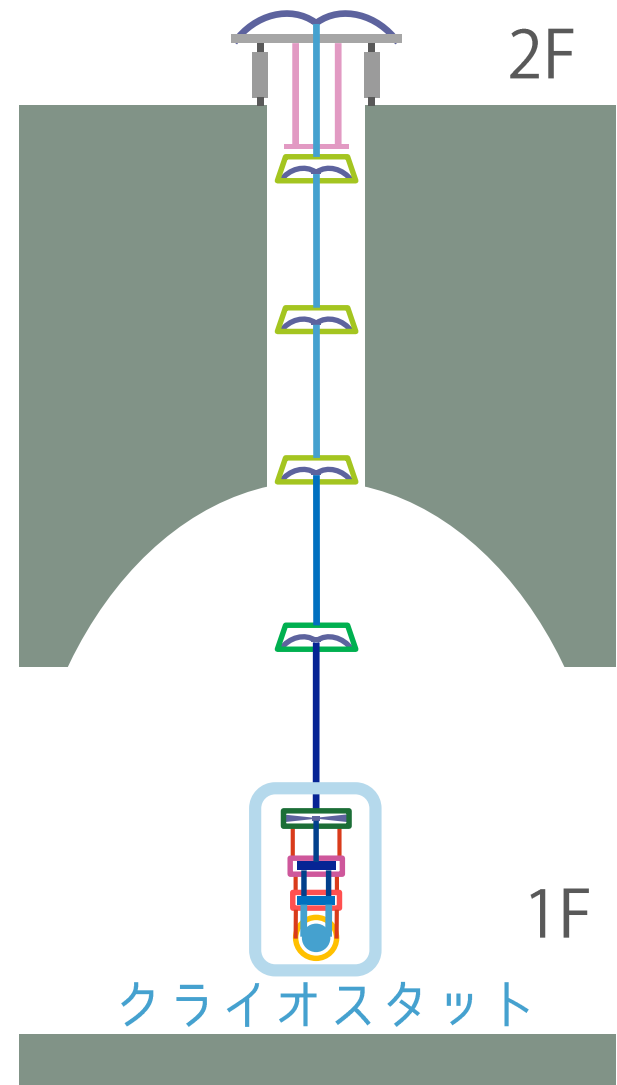
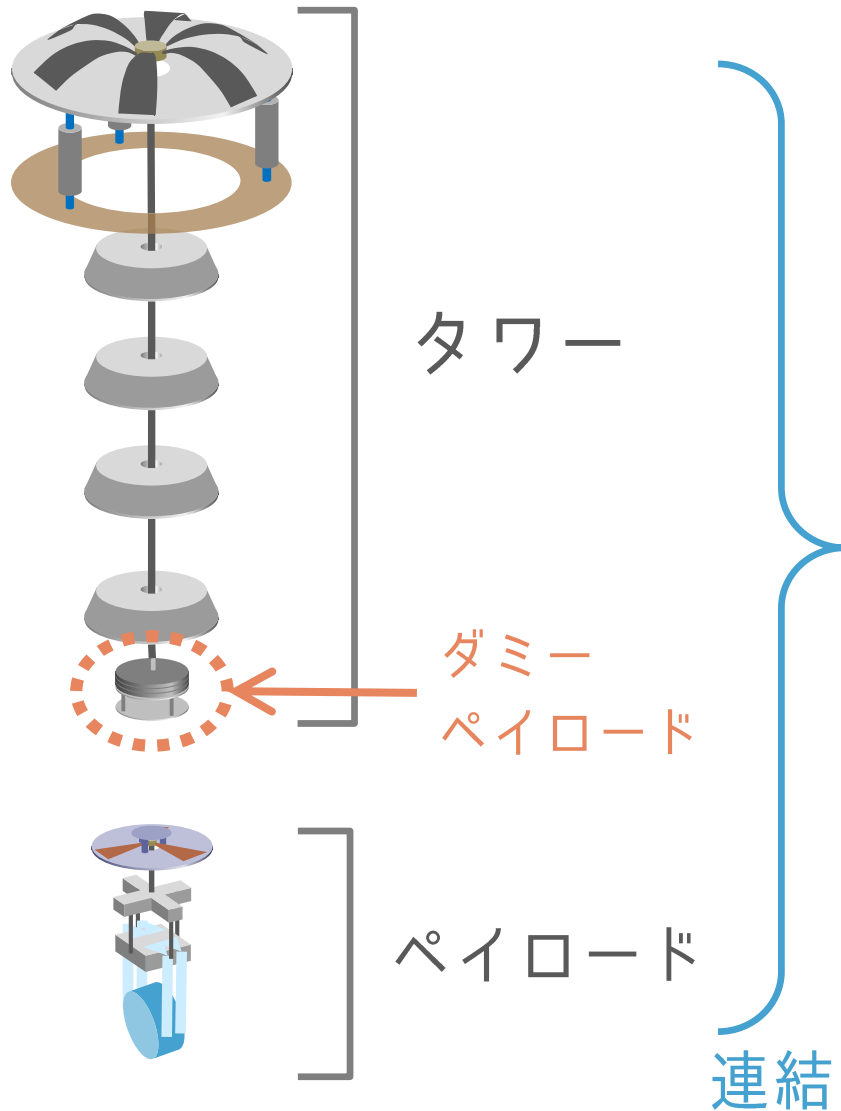
Type-A Suspension



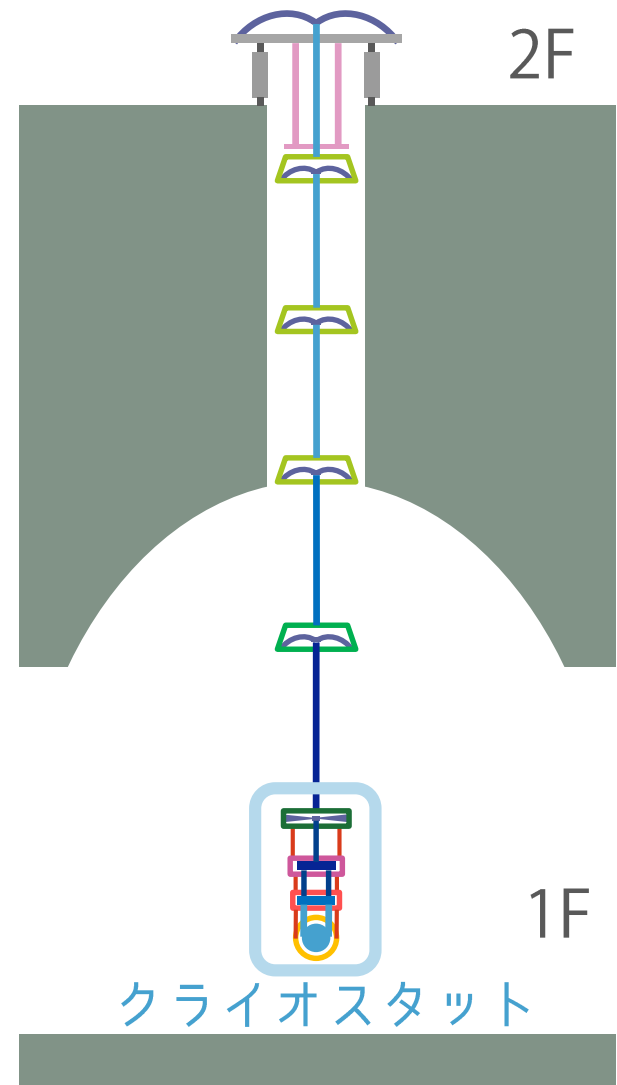
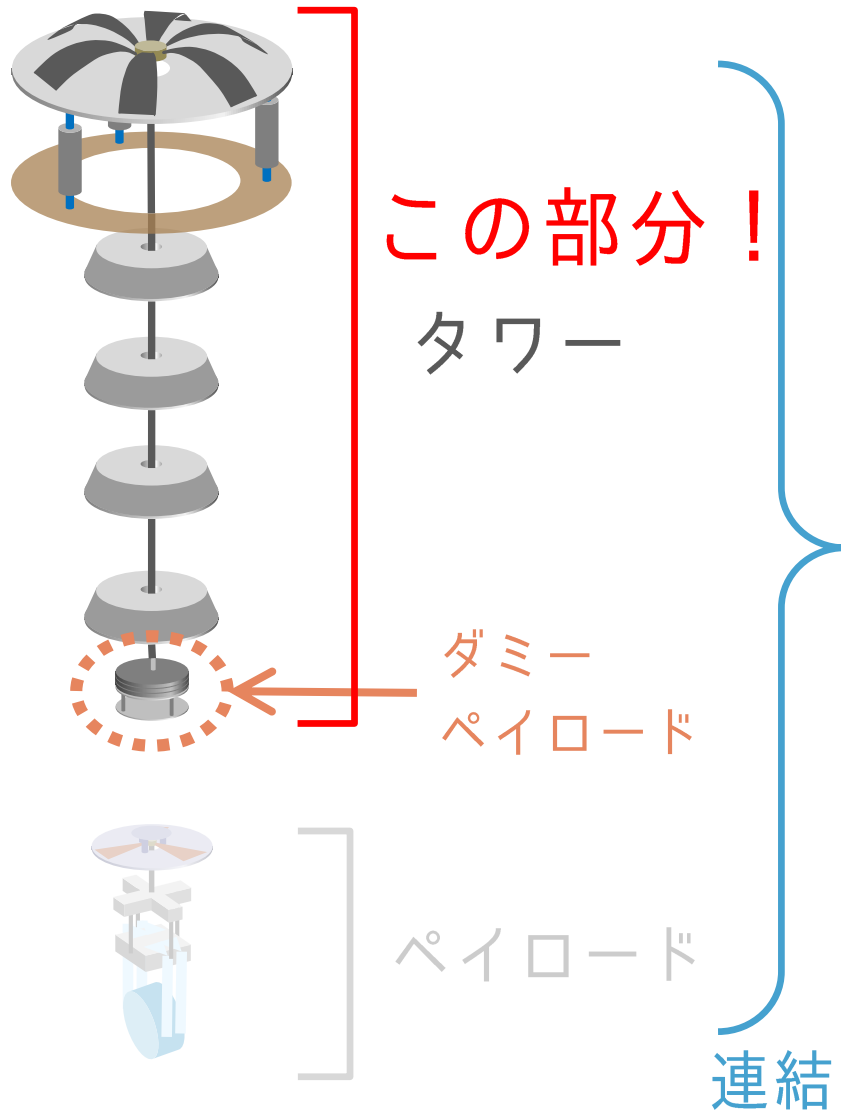
腕共振器鏡用の防振懸架系

- タワー部 (常温: ~ 300 K)
- ペイロード (低温: ~ 20 K)

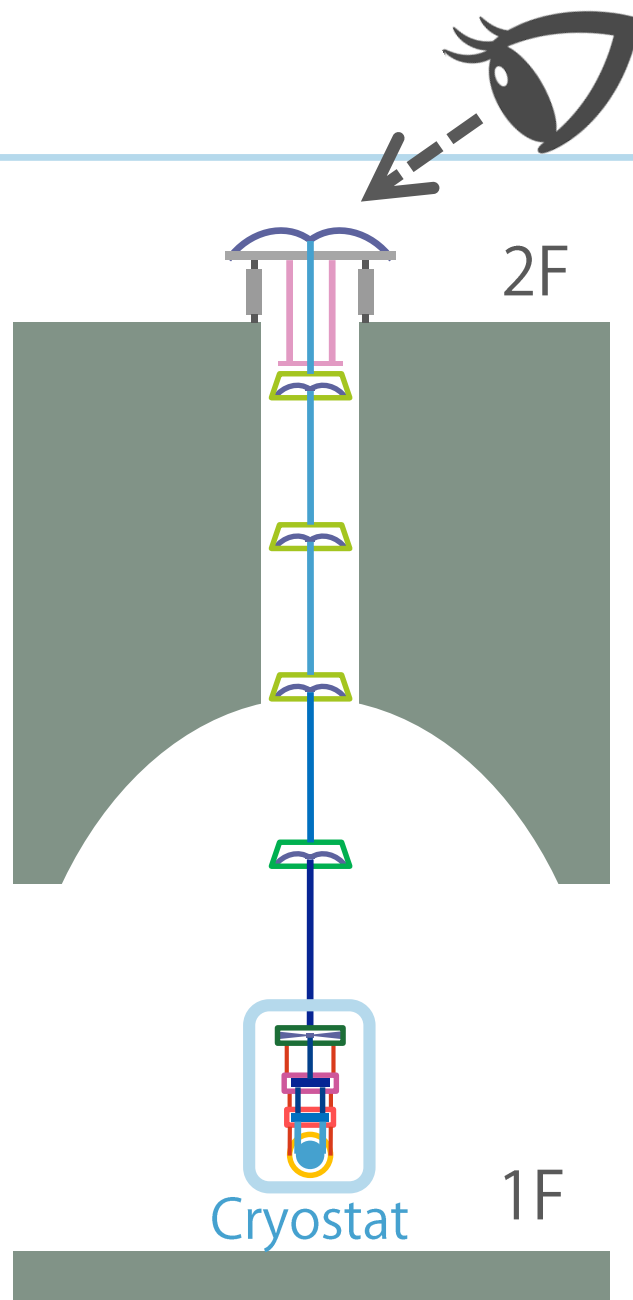
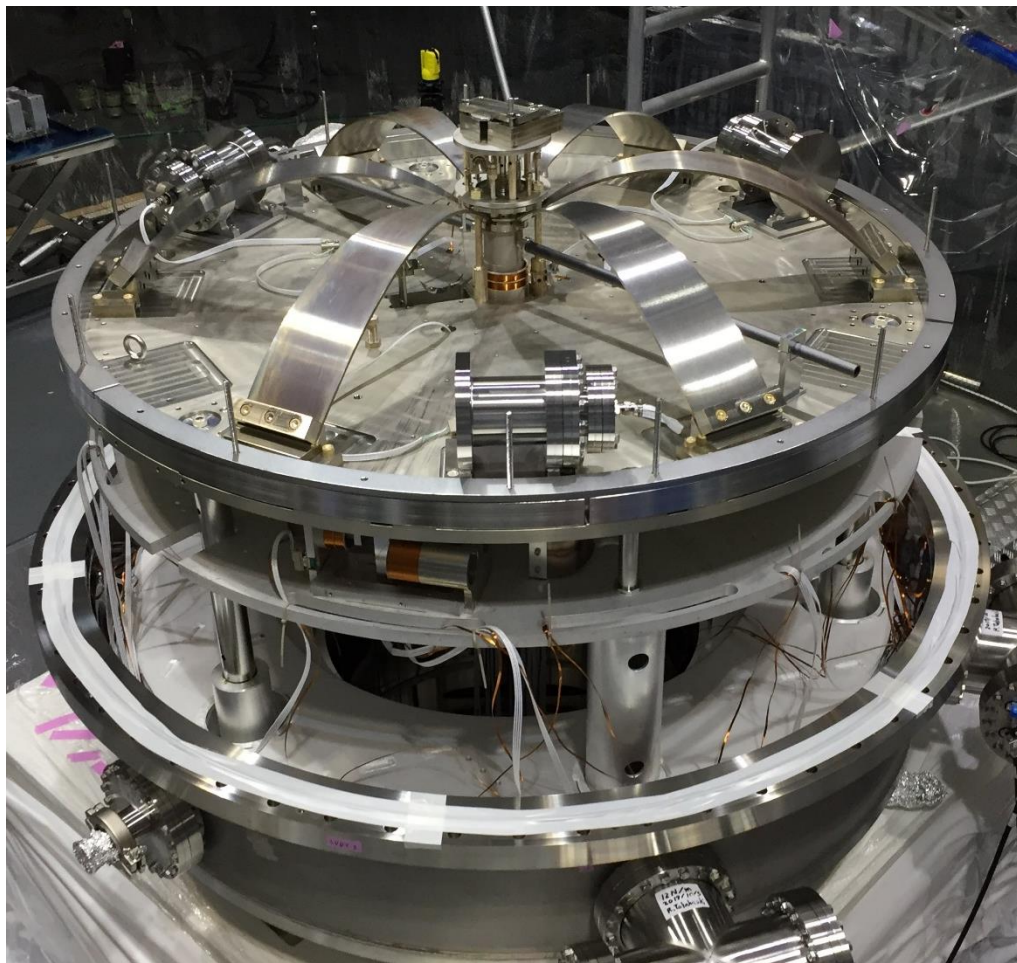
インストール



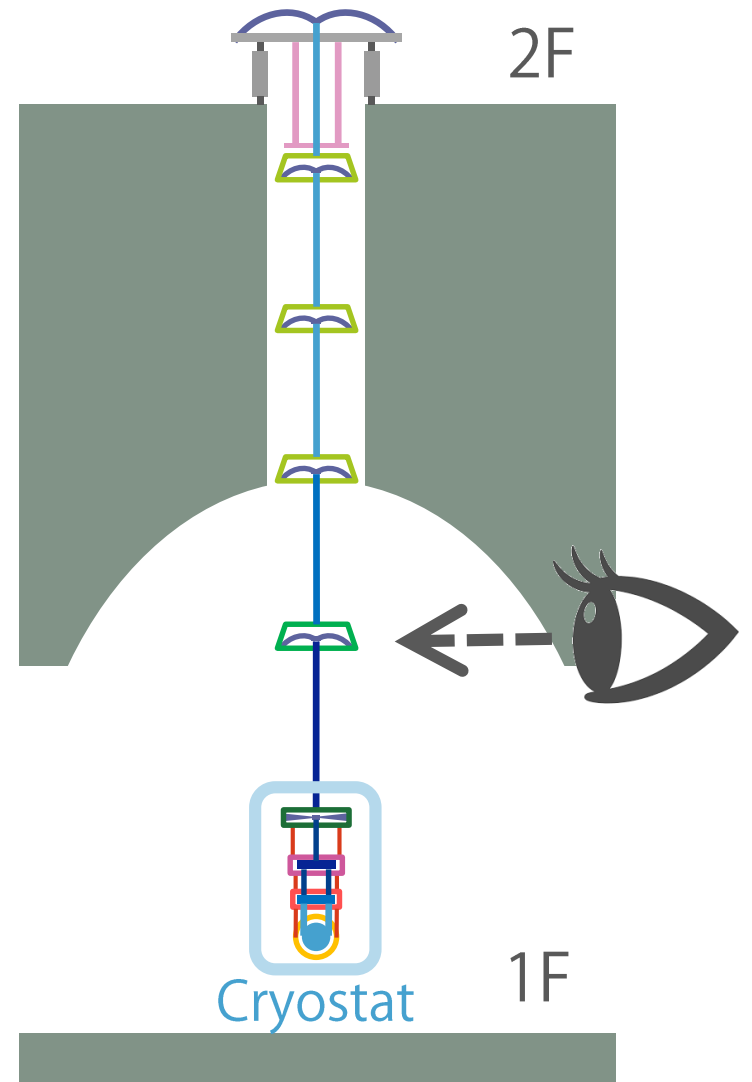
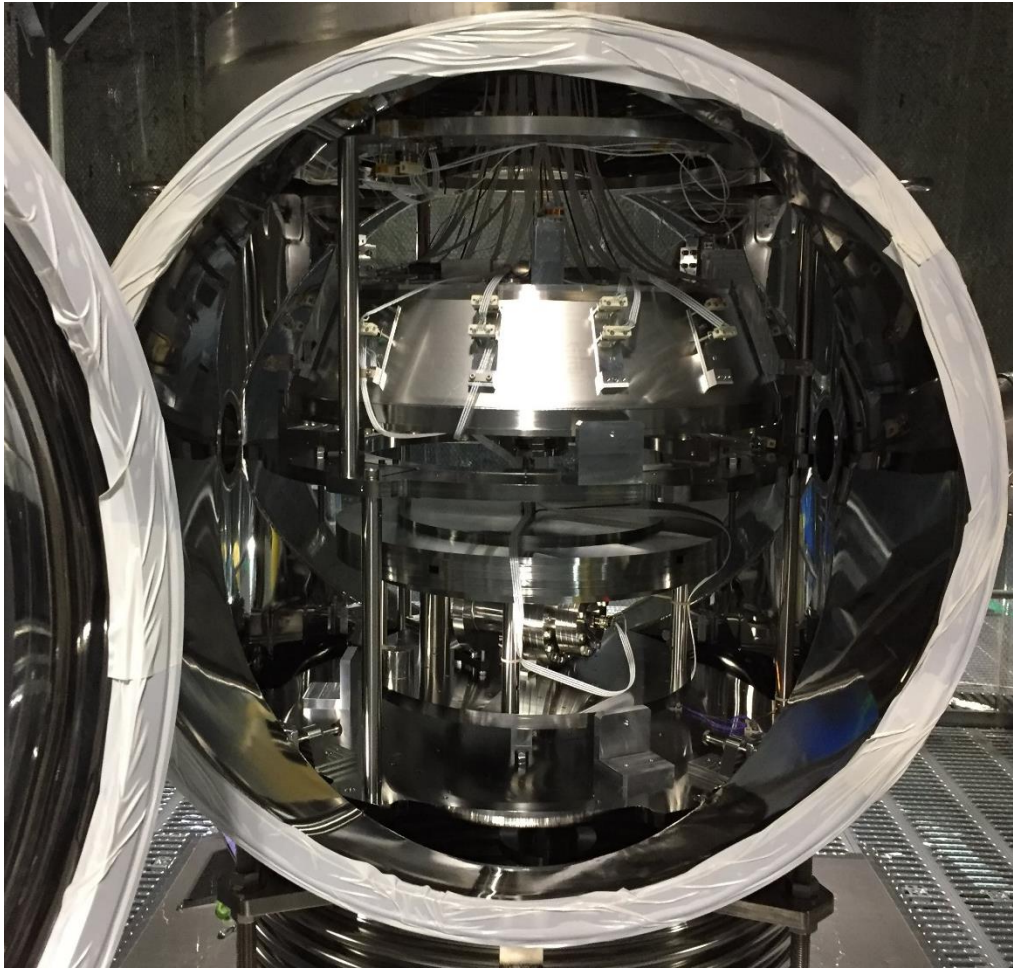
インストール



インストール



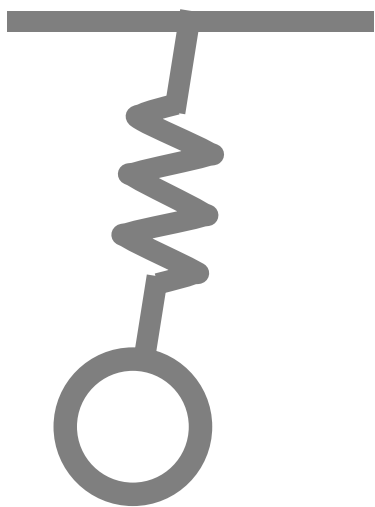
インストール



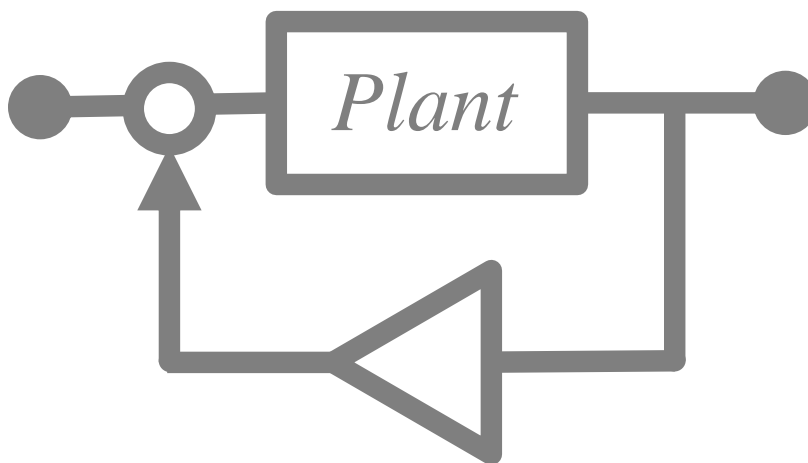
目次

1. KAGRA~防振懸架系とは？
2. 腕共振器鏡用 防振懸架系：
Type-A suspension
3. Type-A tower 制御試験について

防振懸架系の性能評価

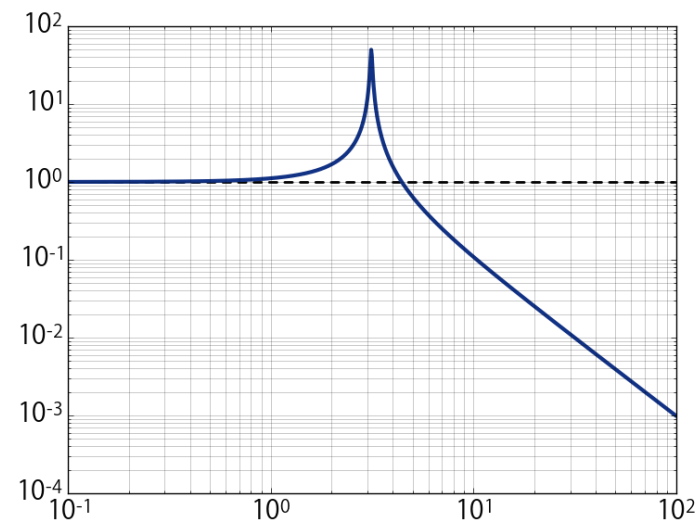
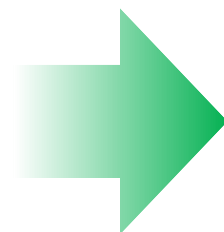
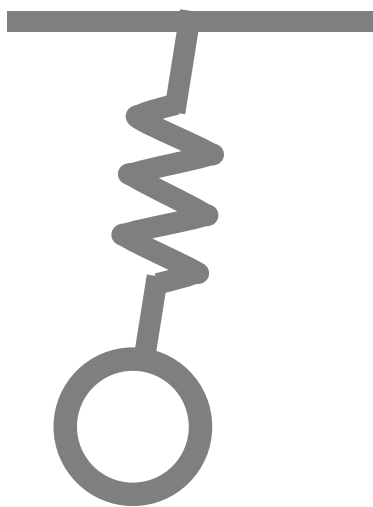


機械的パラメータ
の同定



制御系設計

機械的パラメータの同定

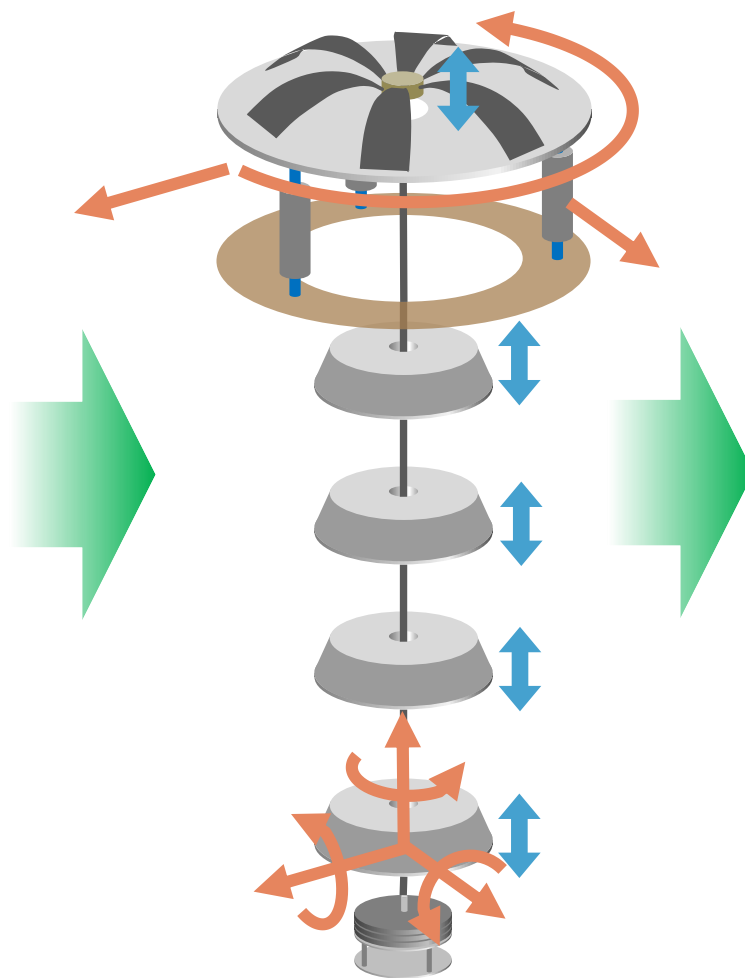


- 固有振動モード
周波数
- 振動のQ値

- 伝達関数の測定
- 3D剛体モデルシミュレーションとの比較

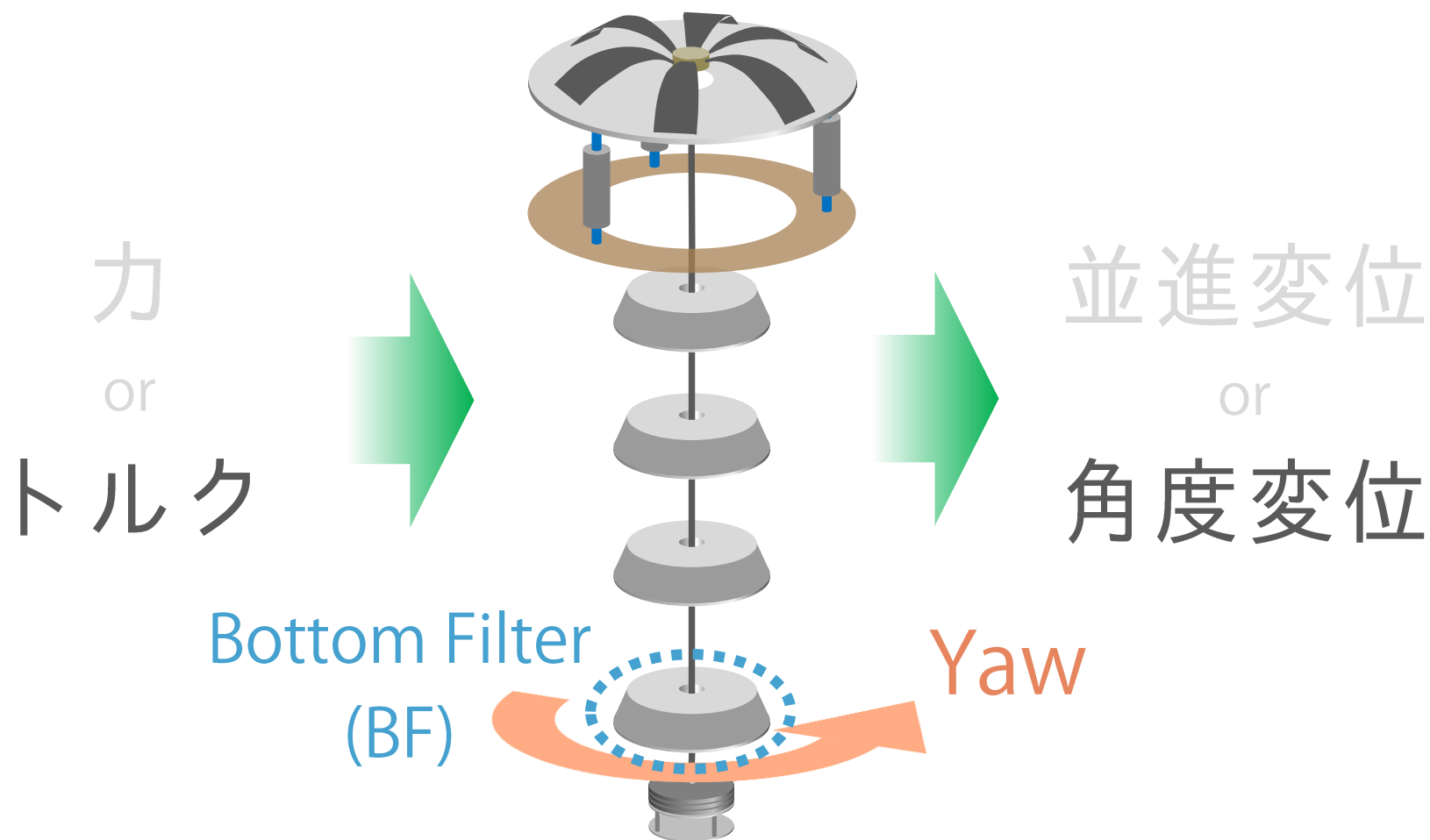
伝達関数の測定

力
or
トルク

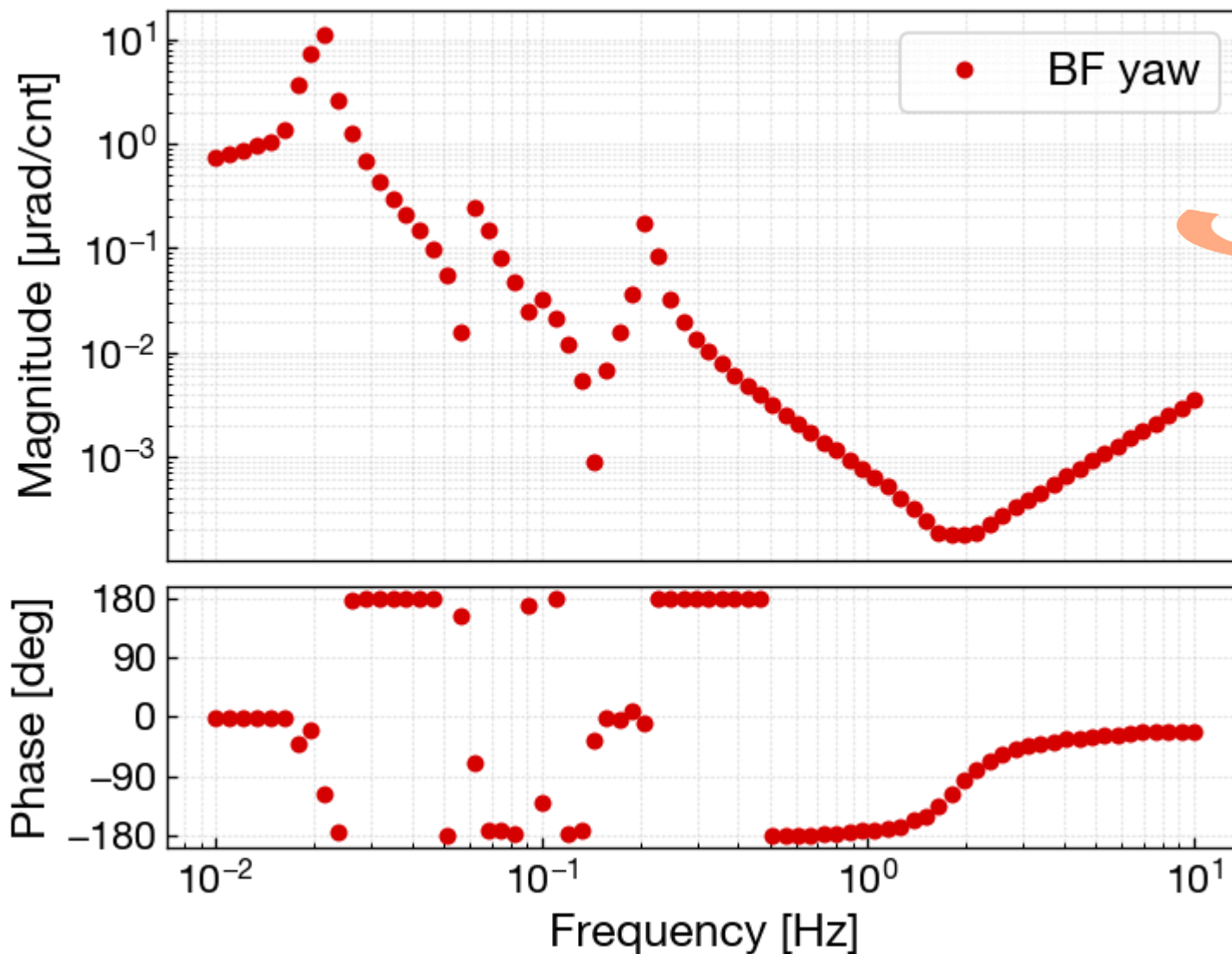
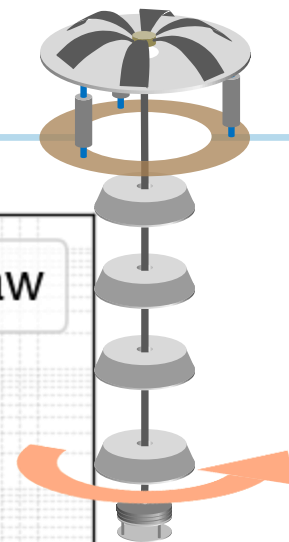


並進変位
or
角度変位

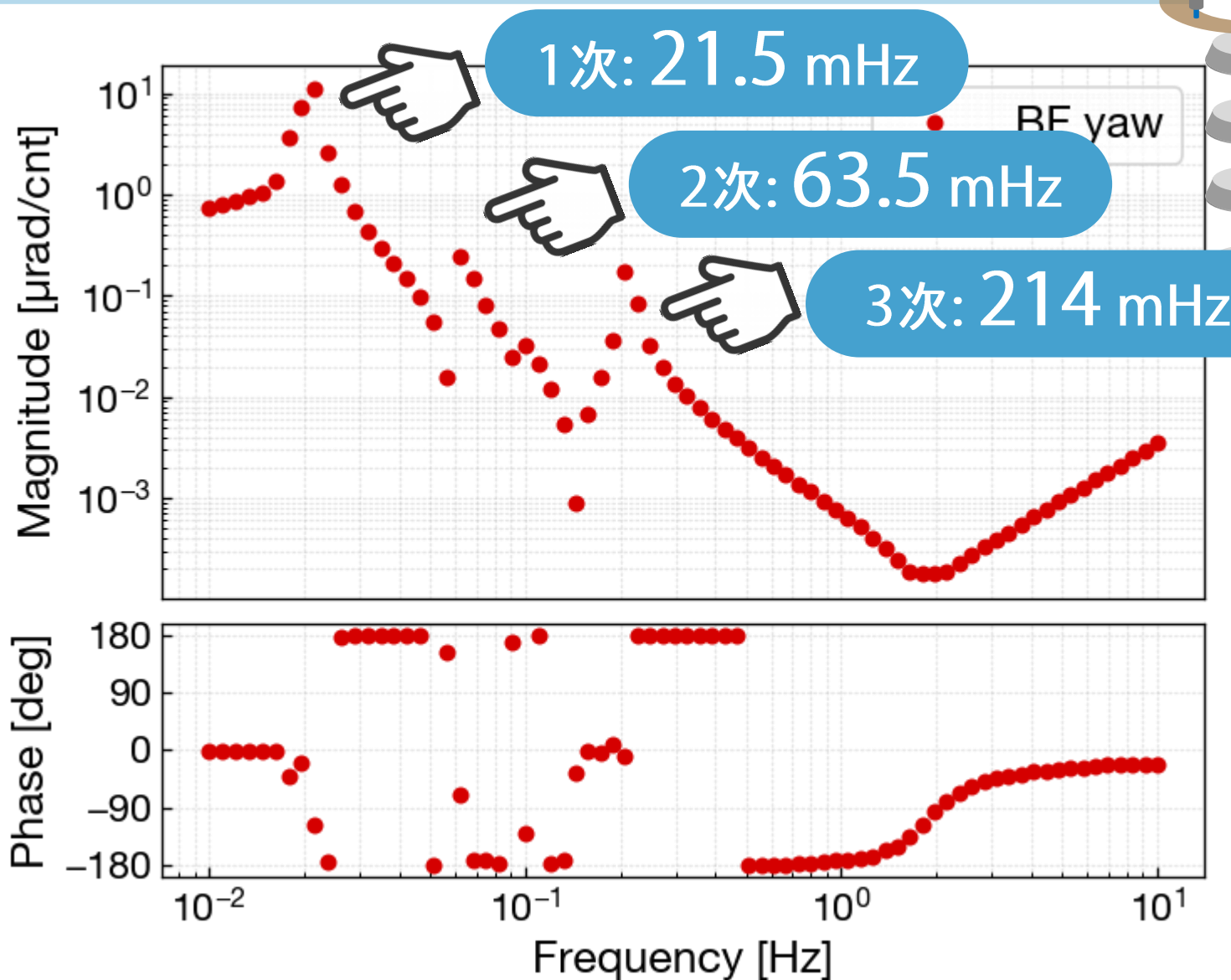
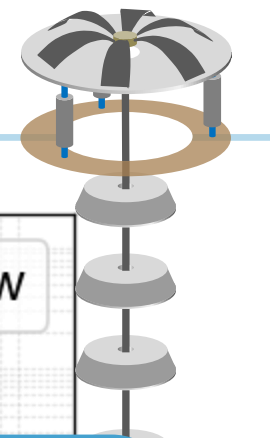
伝達関数の測定



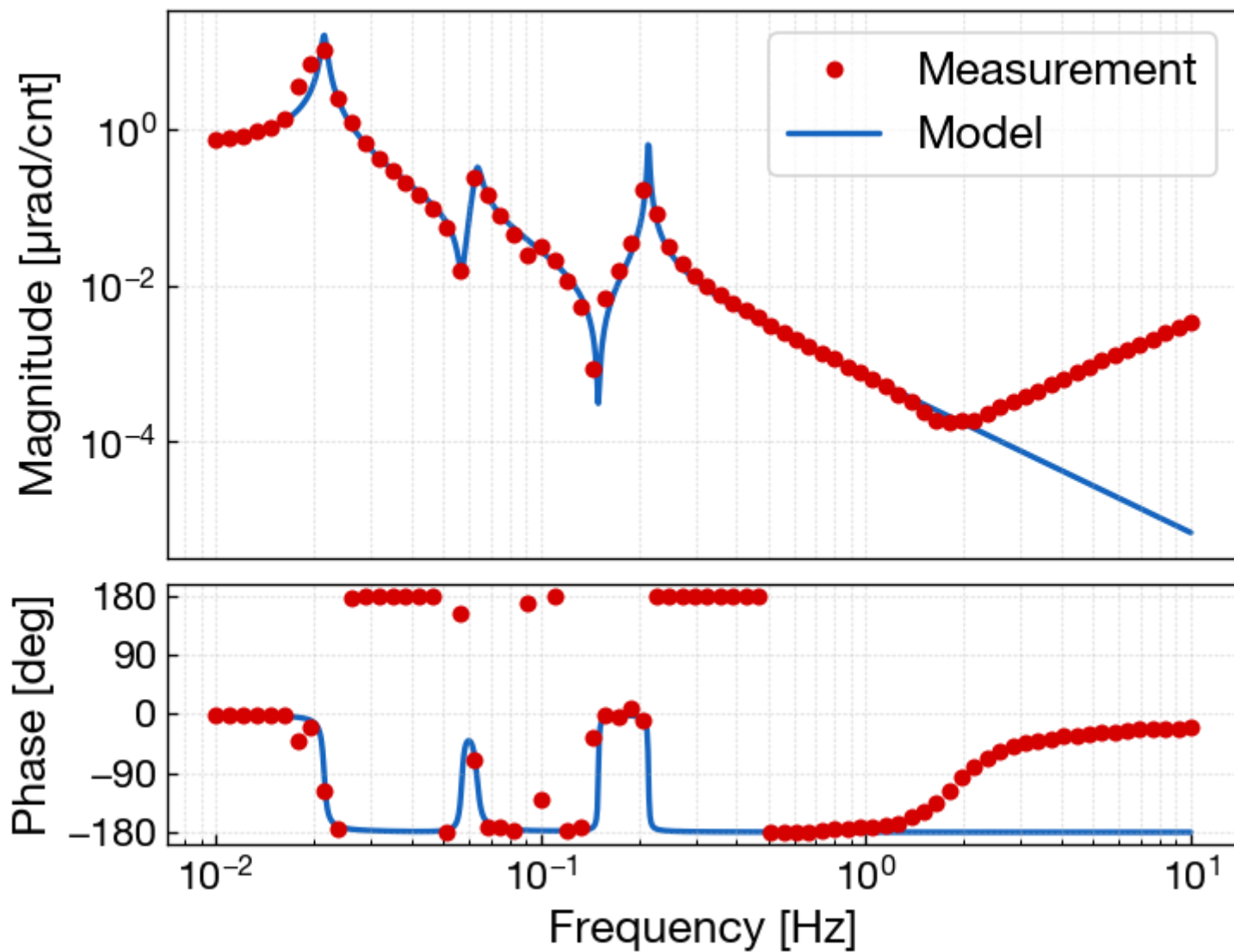
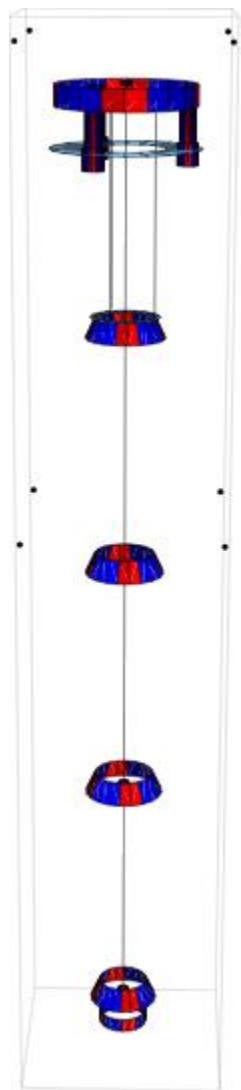
トルク角度伝達関数 (BF Yaw)



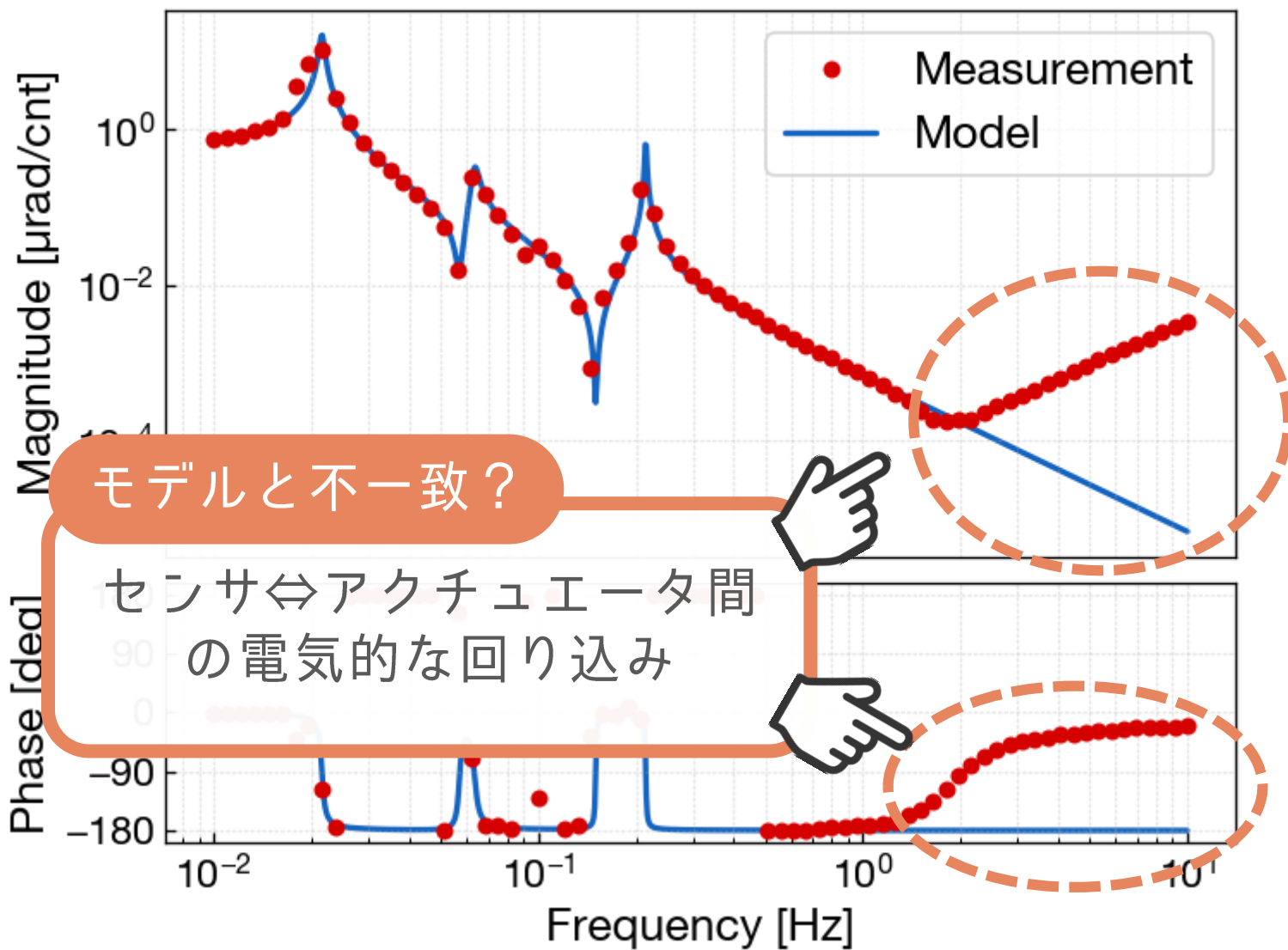
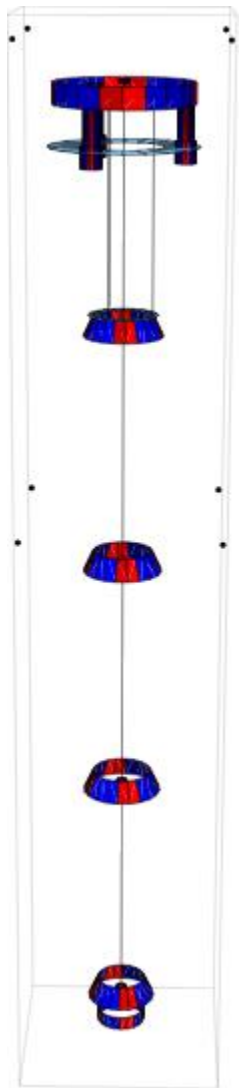
トルク角度伝達関数 (BF Yaw)



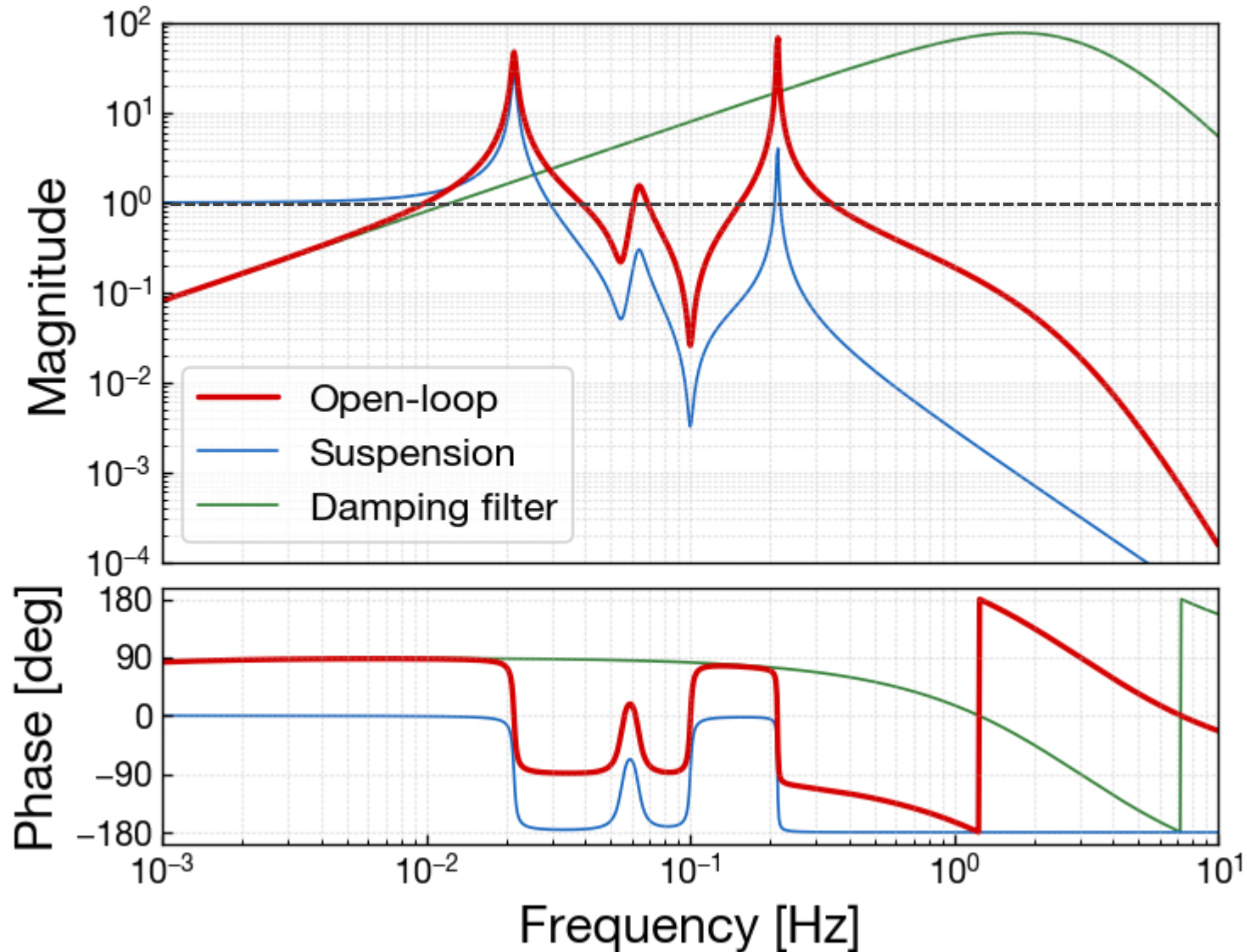
モデルとの比較



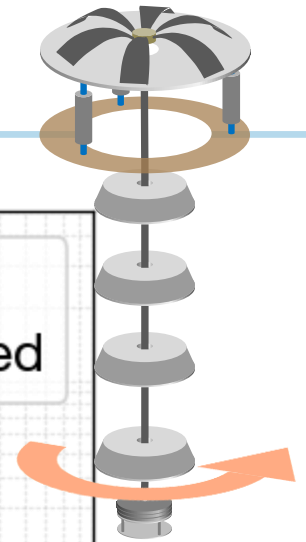
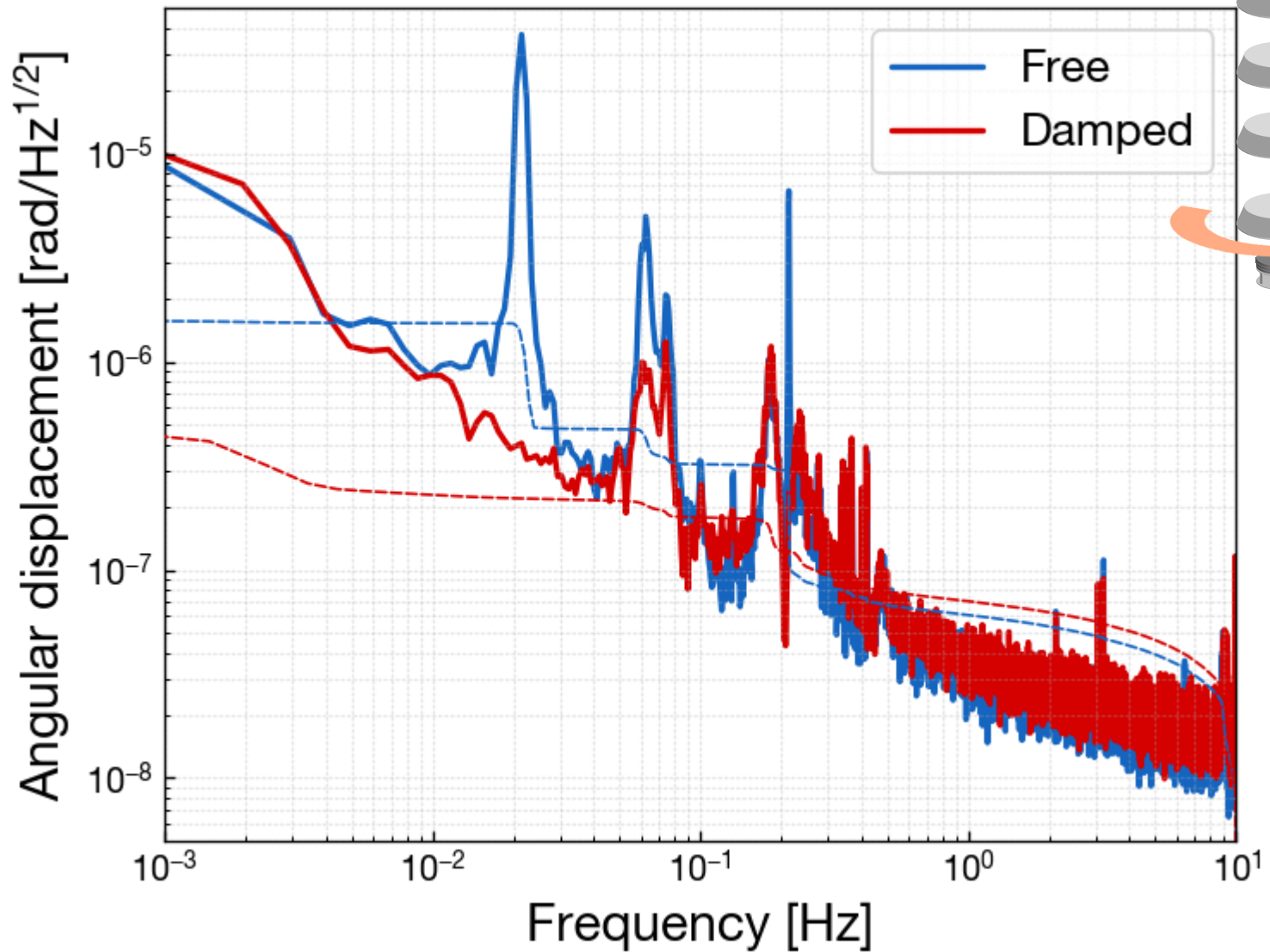
モデルとの比較



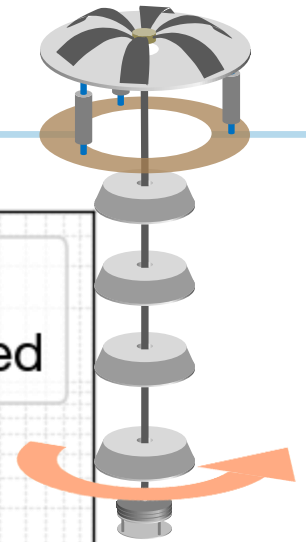
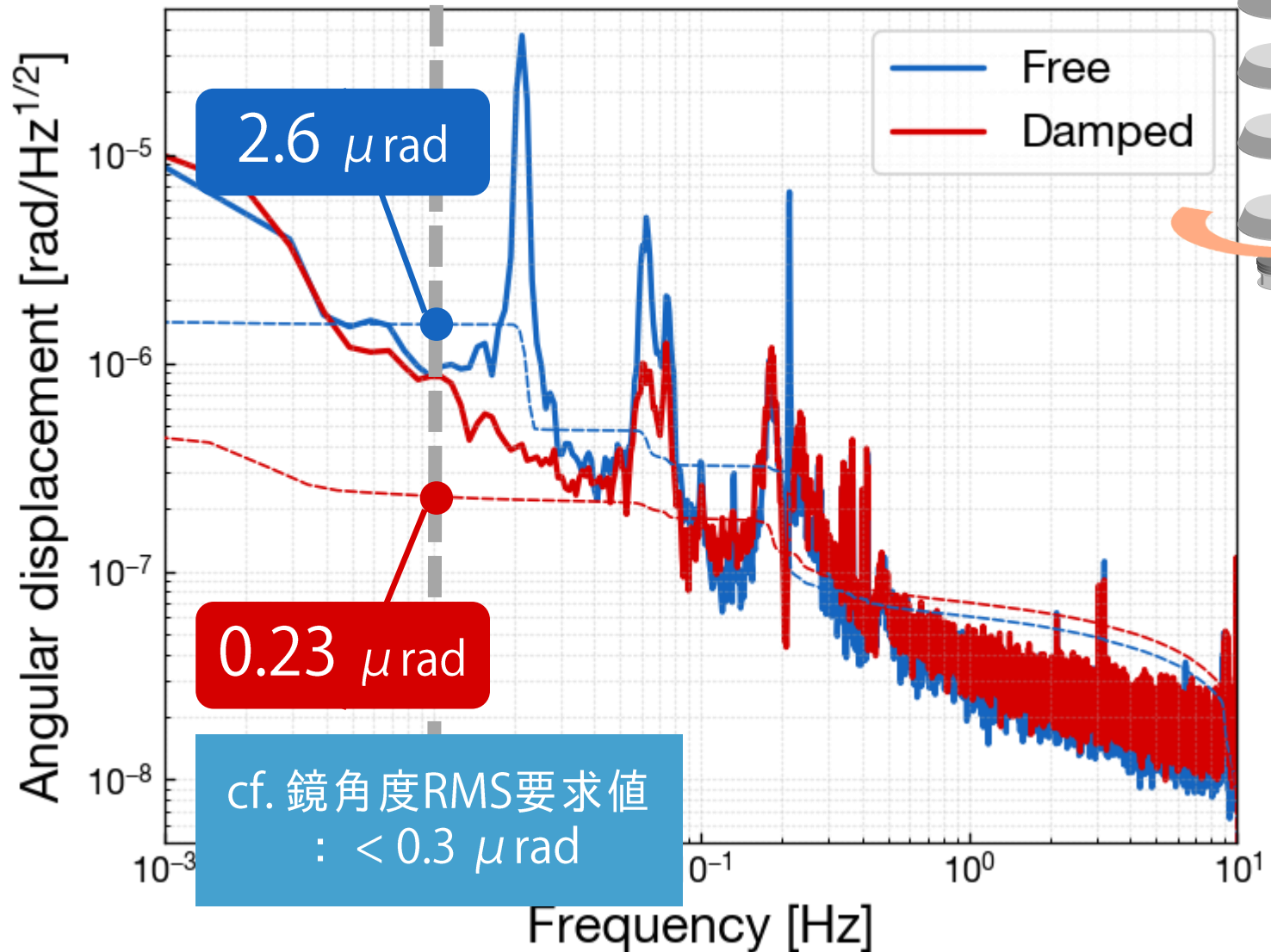
ダンピング制御 - 開ループ伝達関数



ダンピング制御の結果

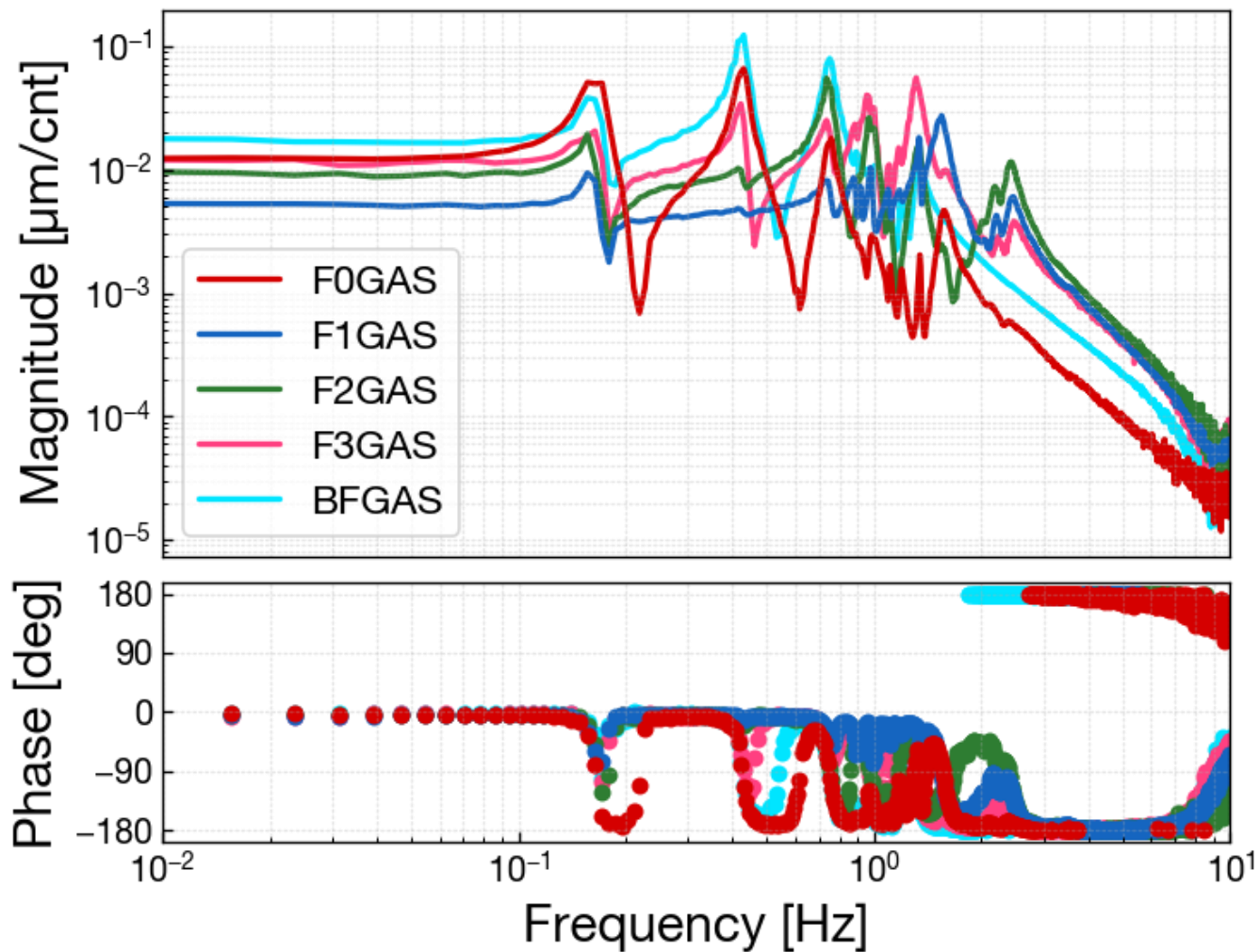
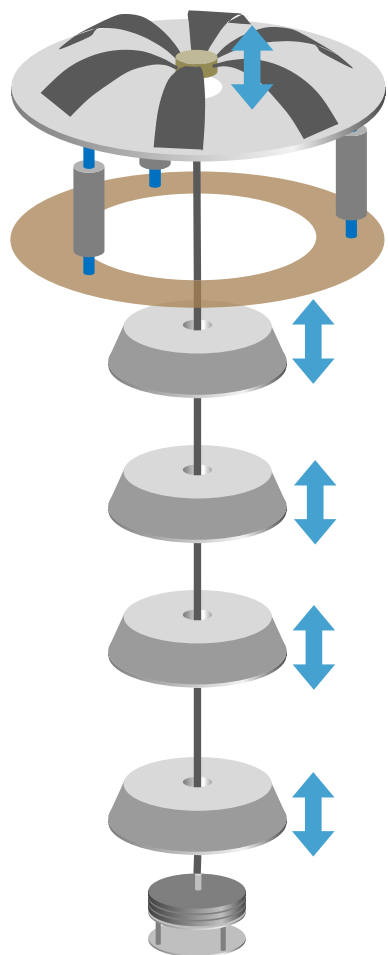


ダンピング制御の結果



GAS（垂直方向）の制御

GAS各段の伝達関数



制御系を組みにくい

2次: 0.43 Hz

1次: 0.17 Hz

3次: 0.74 Hz

RMSに寄与する
低周波共振モード

Magnitude

10^{-3}

10^{-4}

10^{-5}

モデル化の難しい
高周波特性 (>1 Hz)

周波数 [Hz]

FCGAS

F10GAS

F20GAS

FCGAS

FCGAS

FCGAS

FCGAS

FCGAS

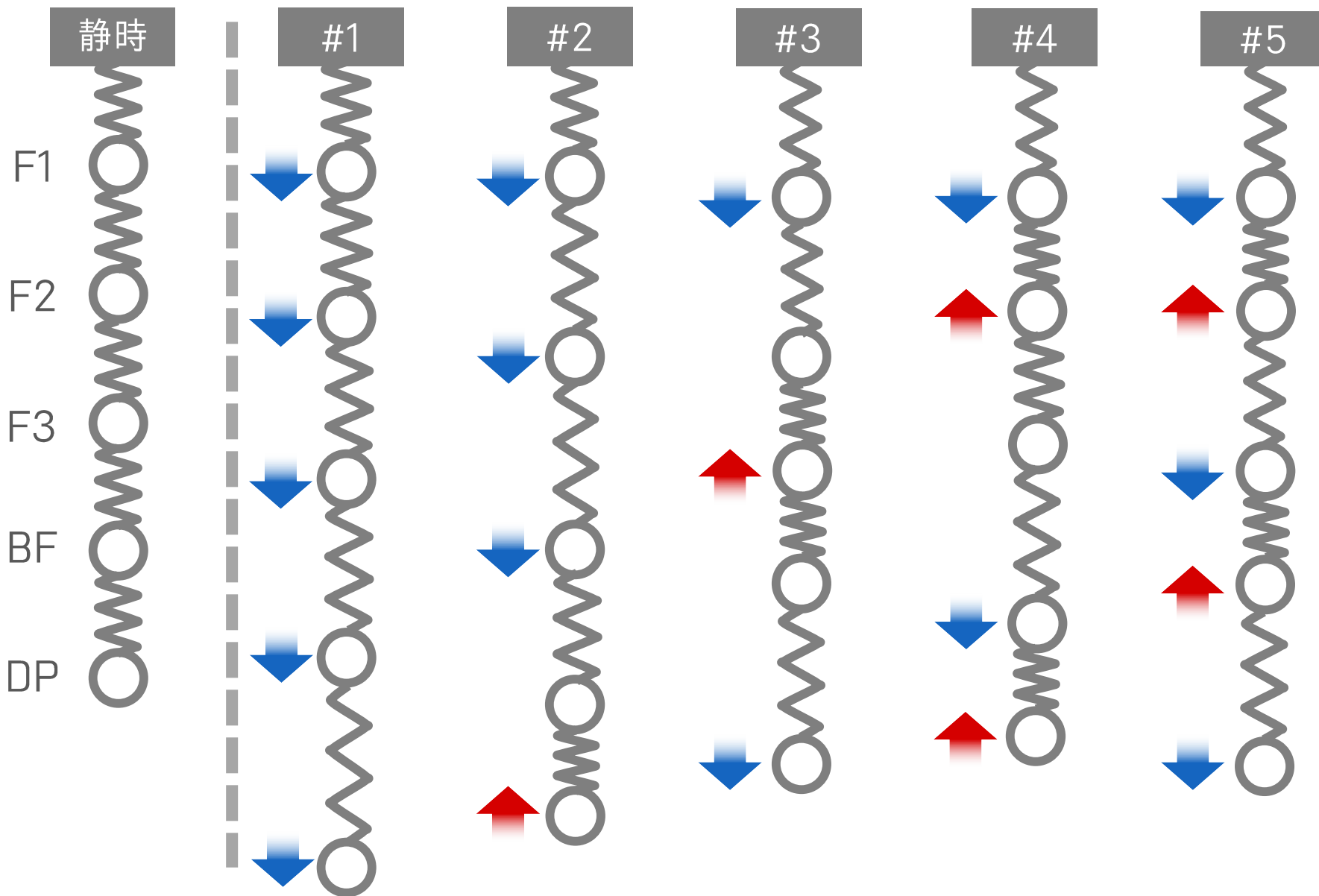
FCGAS

共振をモードごとに減衰できないか…？



モーダルダンピング

GASの振動モード



モード分解

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}^{-1} \mathbf{M} \begin{bmatrix} V_{F0GAS} \\ V_{F1GAS} \\ V_{F2GAS} \\ V_{F3GAS} \\ V_{BFGAS} \end{bmatrix}$$

モード基底

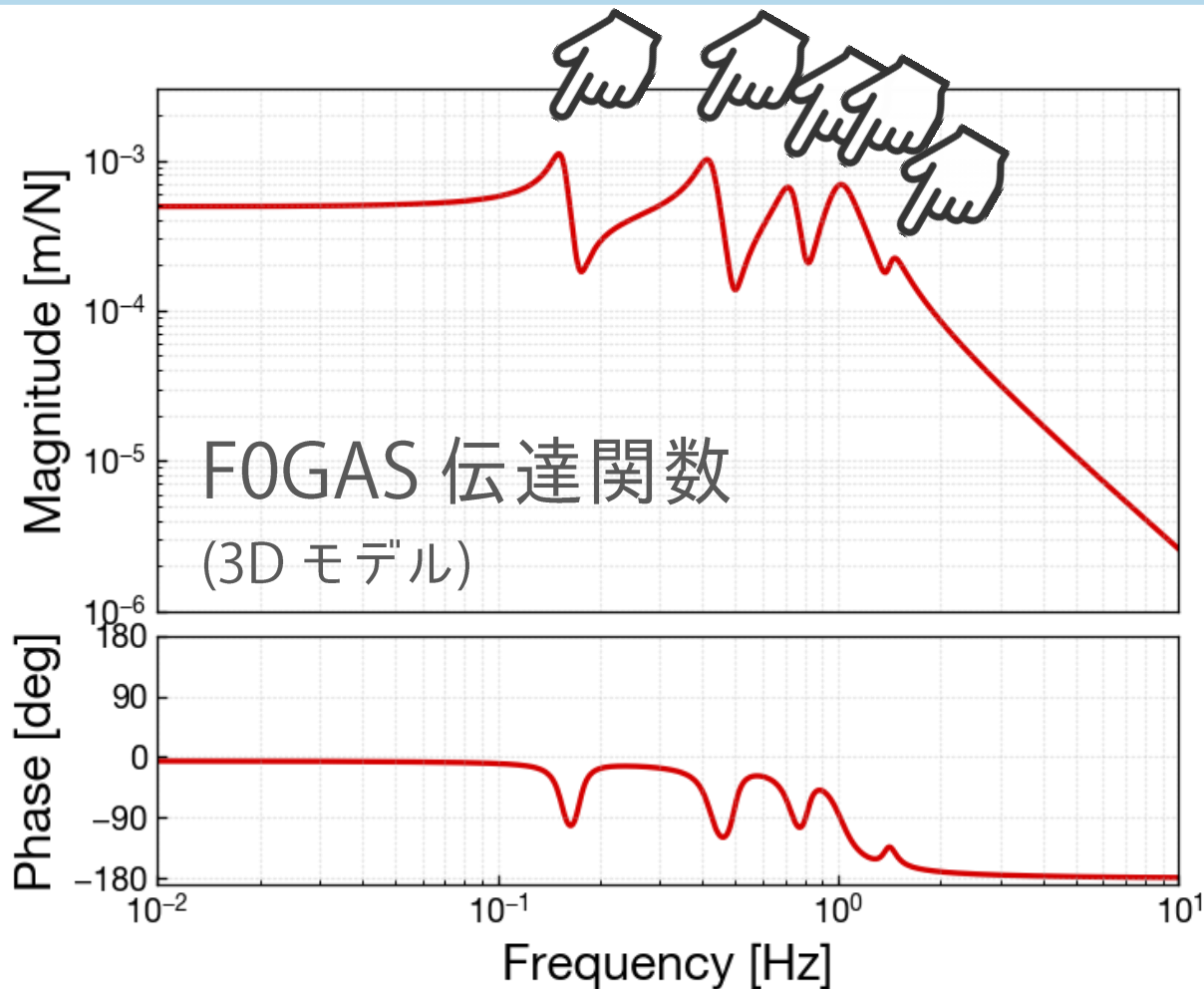
センサ基底

$\mathbf{\Phi}$: 固有モード行列 (モード座標系→物理座標系への変換行列)

3D剛体モデルの次元を削減して求める

\mathbf{M} : センサ基底から各段の物理座標系への変換行列

モード基底



1次 : 0.17 Hz

2次 : 0.43 Hz

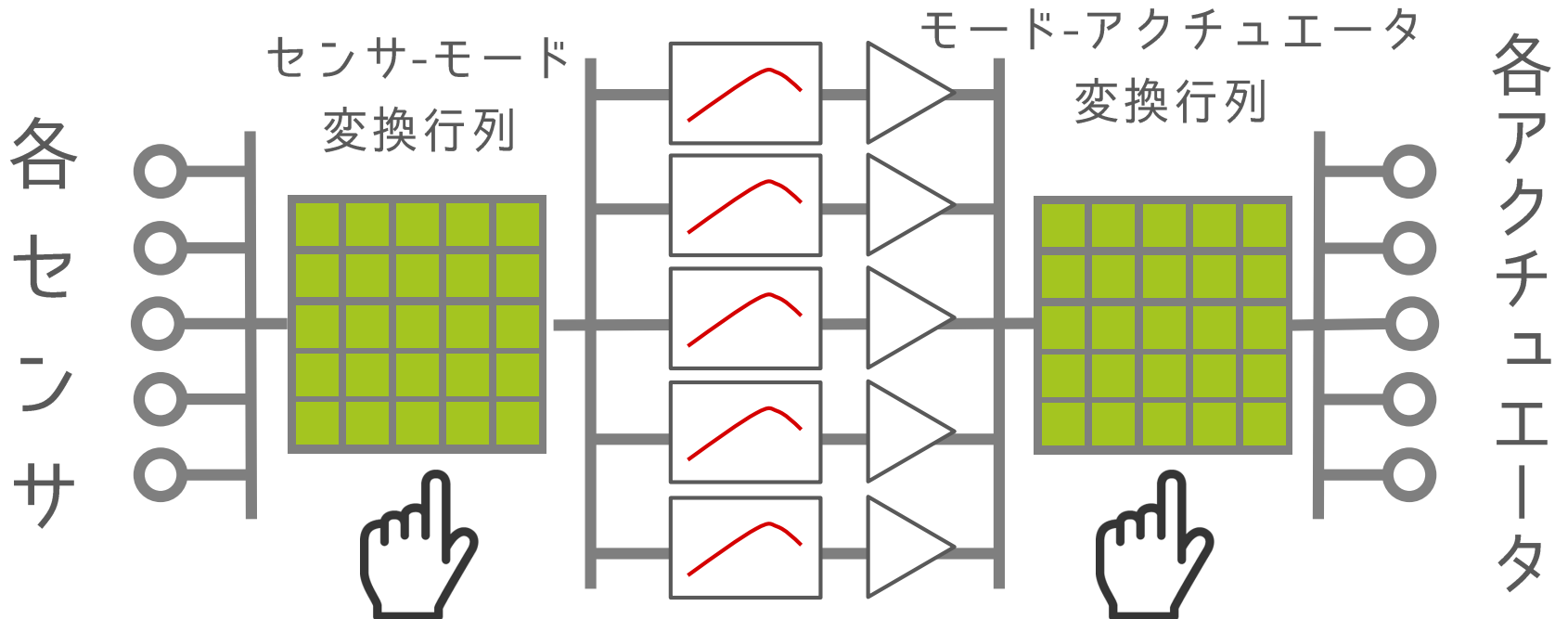
3次 : 0.74 Hz

4次 : 1.02 Hz

5次 : 1.43 Hz

▶ 3D剛体モデルで同定できているモード周波数

センサ・アクチュエータ対角化



各モード周波数で励起



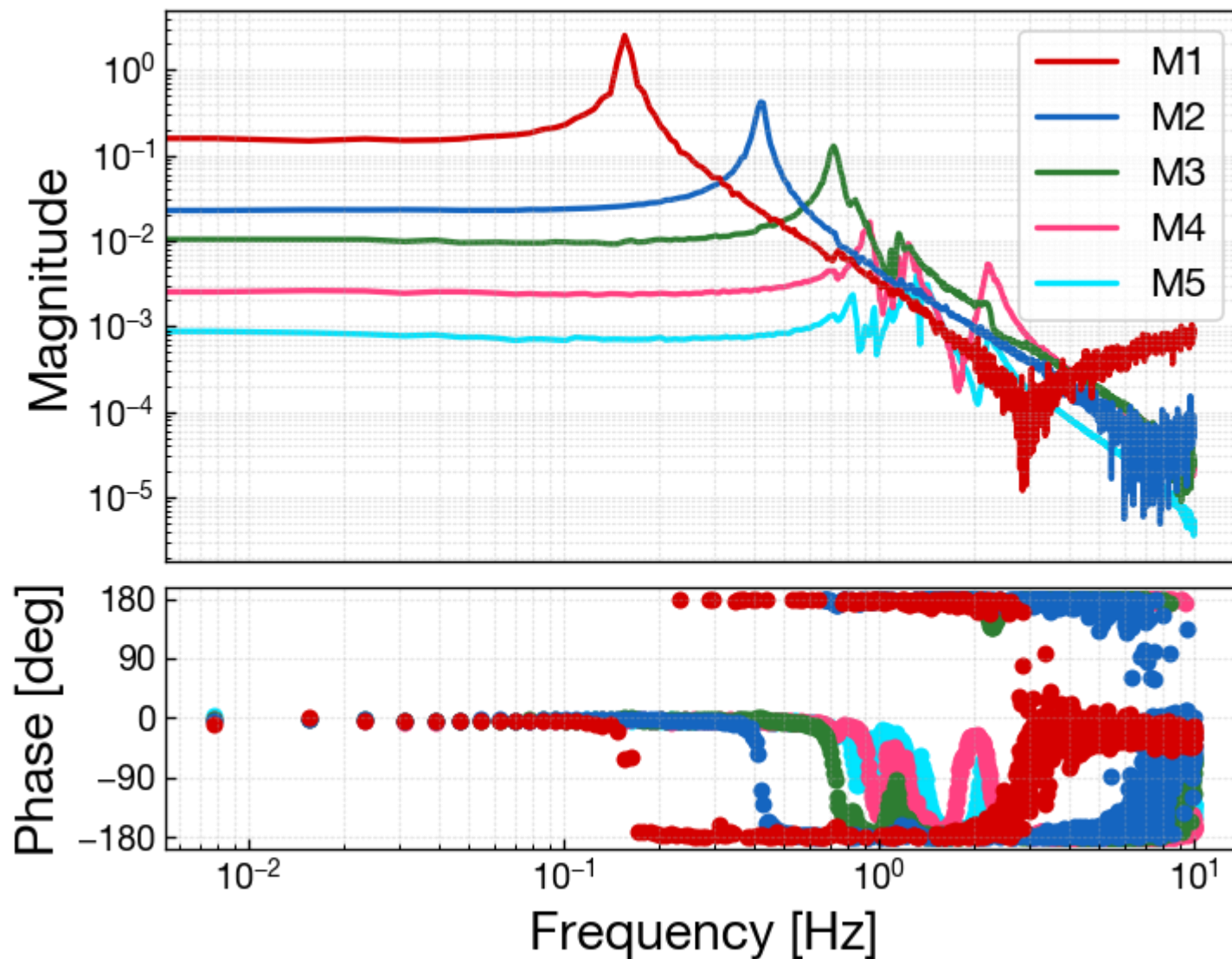
カップリング係数行列
の逆行列を乗算

伝達関数のDCゲイン

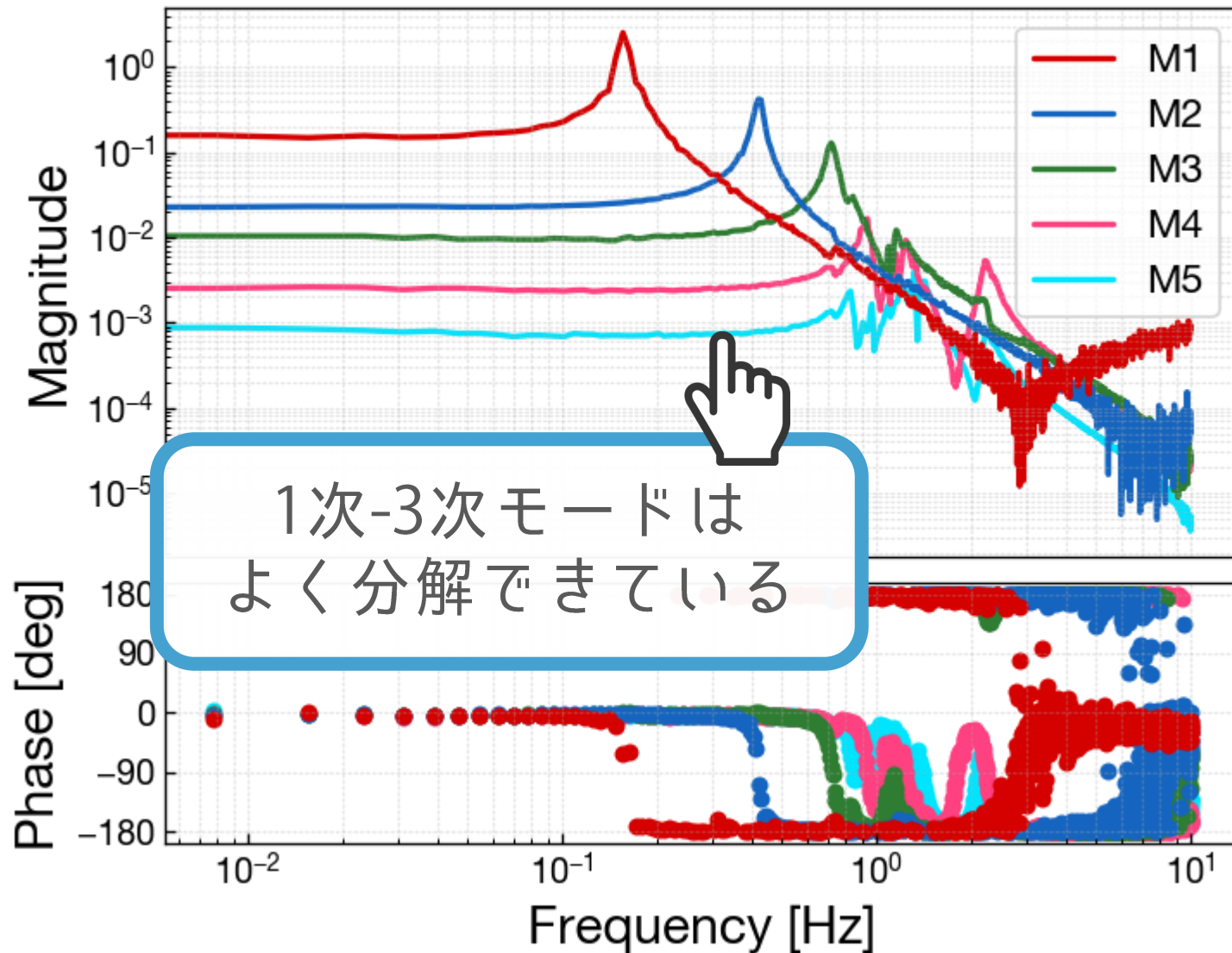


カップリング係数行列
の逆行列を乗算

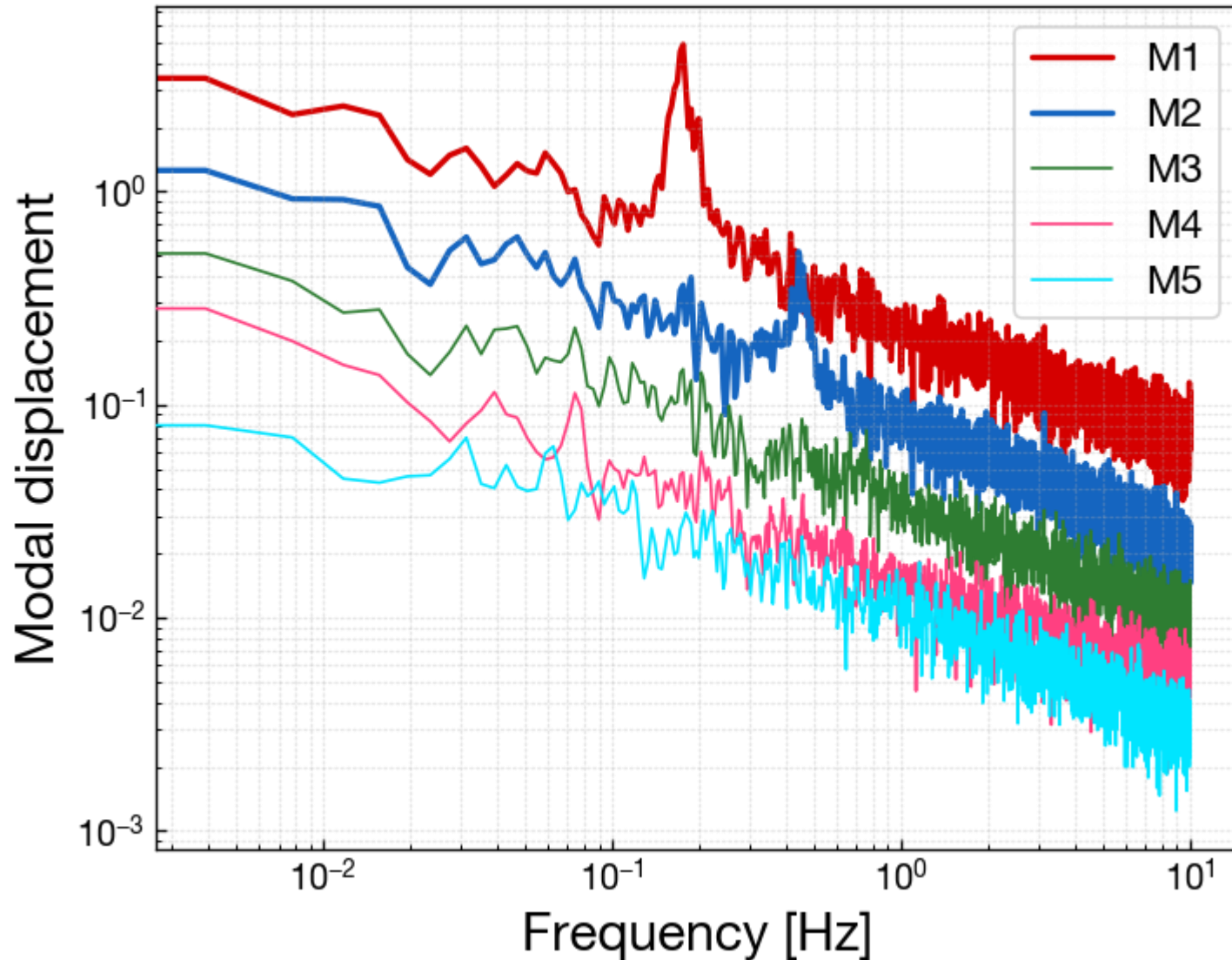
モード座標系での力変位伝達関数



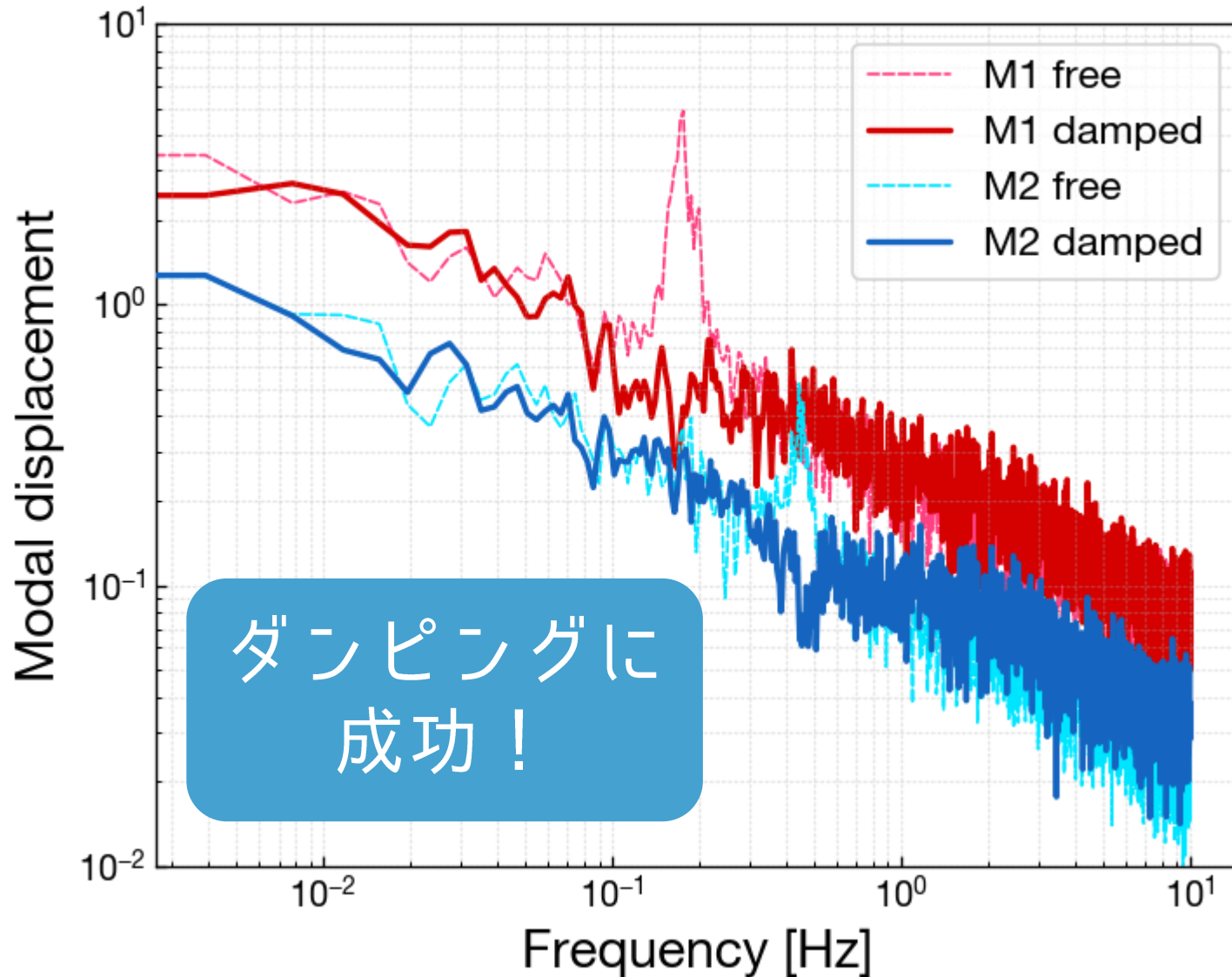
モード座標系での力変位伝達関数



GASモードスペクトル (制御OFF)



GASモードダンピングの結果



考察・今後の展望

モーダルダンピングの考察

○ 高周波の複雑な応答を無視してダンピング制御可能

➤ より容易な制御系設計が可能

△ GAS全段にFB ▶ 観測帯域(>10 Hz)で制御雑音を導入

➤ ダンピング時のみ使用、観測状態のときには使わない

今後の展望

- 低温ペイロードと接続、全体の性能評価
- 現代制御システムの実装
 - 最適レギュレータによる状態推定フィードバック