

2011/09/18 日本物理学会第67回年次大会

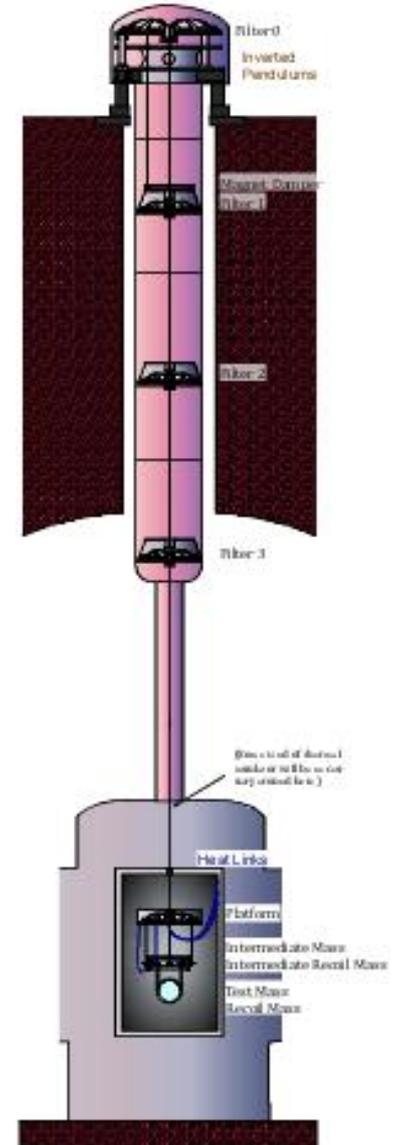


LCGT用防振装置の 3次元剛体モデルの構築

東大宇宙線研 修士2年 関口貴令

東大宇宙線研, 国立天文台^A, 東大地震研^B,
Sanio Univ^C, INFN^D, 東大理^E

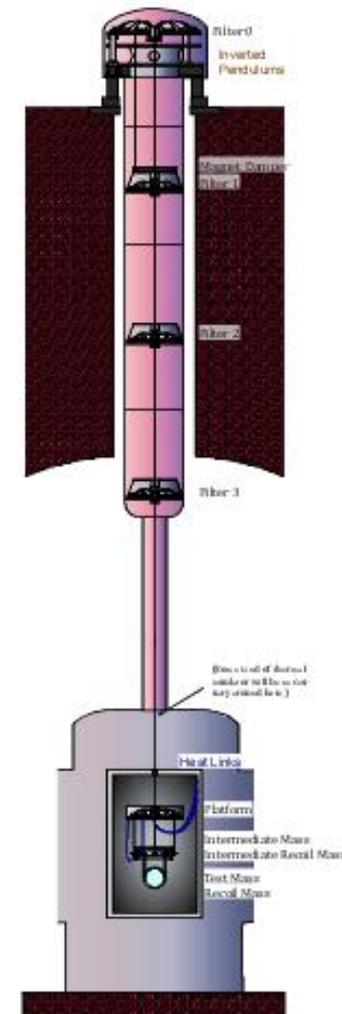
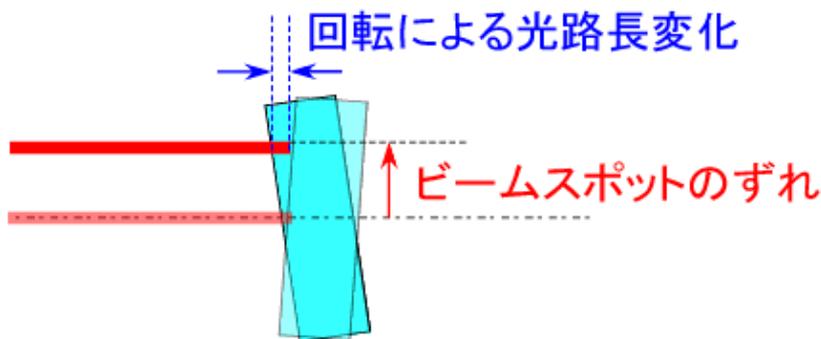
高橋竜太郎, 山元一広, 内山隆, 石崎秀晴^A, 高森昭
光^B, Riccardo DeSalvo^C, Ettore Majorana^D, 道村
唯太^E, 大橋正健, 黒田和明, LCGT Collaboration



本研究の目的と概要



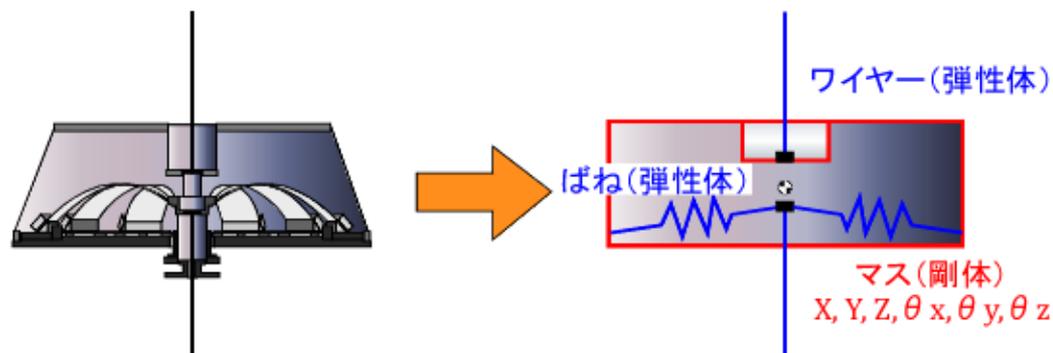
- 地面振動雑音や制御雑音の計算にLCGT用防振装置(SAS)の**力学モデル**が必要
- 従来の1次元質点モデル: 他自由度間のカップリングなし
- **角度揺れ**は並進揺れとのカップルして主に起こる
⇒ 角度揺れの計算は1次元モデルでは**正確に行えない**
- ビームスポットがずれてると鏡の角度揺れにより光路長が変化
⇒ 鏡の角度揺れが**干渉計の感度**に影響



今回は**3次元**力学モデルを構築、地面振動による鏡の角度揺れスペクトルの見積もりを行った。

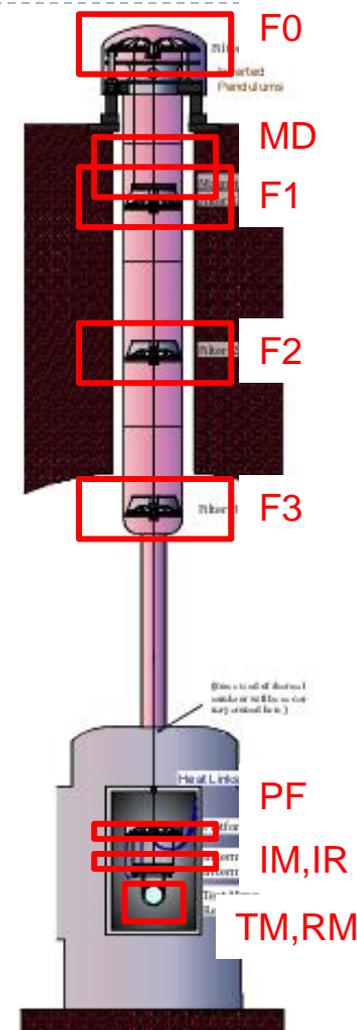
モデルの構築方法

- 防振装置 = 剛体 + 弾性体(ワイヤー・ばね)の集合体



- 各剛体に6個の自由度($X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)
- ワイヤーは伸縮と振れのモードを分けて計算
- GASフィルターは1方向にのみ運動する調和振動子とみなす
- ヒートリンクはFEMで計算したばね定数の理想的ばねとみなす
- マスの変形・ワイヤーのバイオリンモードは考慮しない

LCGTテストマス用防振装置の場合: 10個のマス(全57自由度)



計算の流れ



- パラメータ(ジオメトリ・質量・慣性モーメント)・系の自由度を設定
- 系のポテンシャル(U)・散逸(F)・運動エネルギー(T)を計算
- ポテンシャル(U)が極小となる点:系の平衡点を探す
- ラグランジュ方程式を立式、平衡点周りで線形化

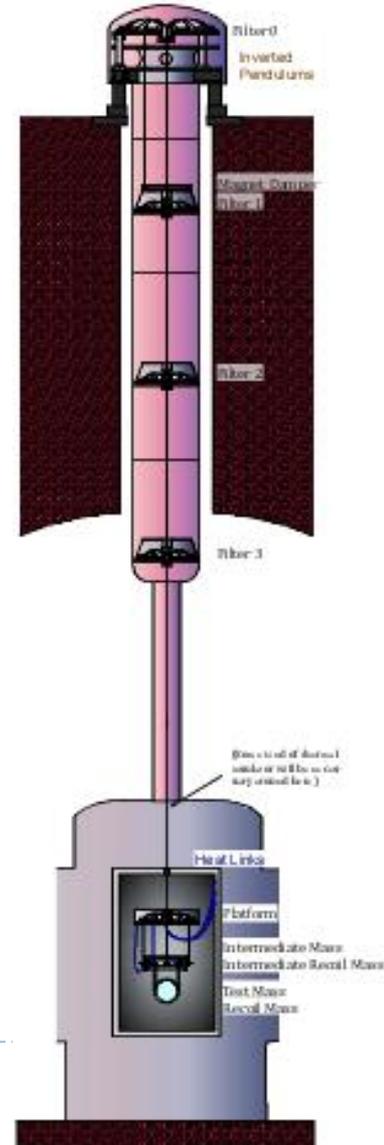
$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})}{\partial \dot{x}_i} + \frac{\partial F(\dot{\mathbf{x}})}{\partial \dot{x}_i} + \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial x_i} = f_i \quad \xrightarrow{\text{線形化}} \quad \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{eq}) = \mathbf{f}$$

- 線型化された運動方程式を元に、系の固有振動数・周波数応答などを計算

計算が煩雑ゆえ、数式処理ソフト**Mathematica**を使用

LCGT Type-A (テストマス用) 防振装置 に関する計算結果

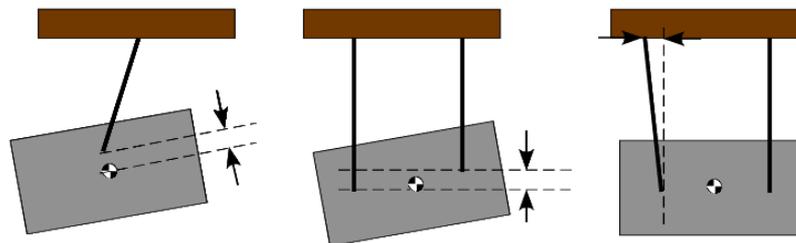
— 地面振動による鏡の **角度揺れ** の見積もり



地面振動による鏡の角度揺れの計算



- 角度揺れは系の**非対称性**により励起される
- ワイヤ懸架点の**重心からのズレ**、ワイヤの**直径・長さ**の非対称性、**ばね定数**の大きさの非対称性、etc.

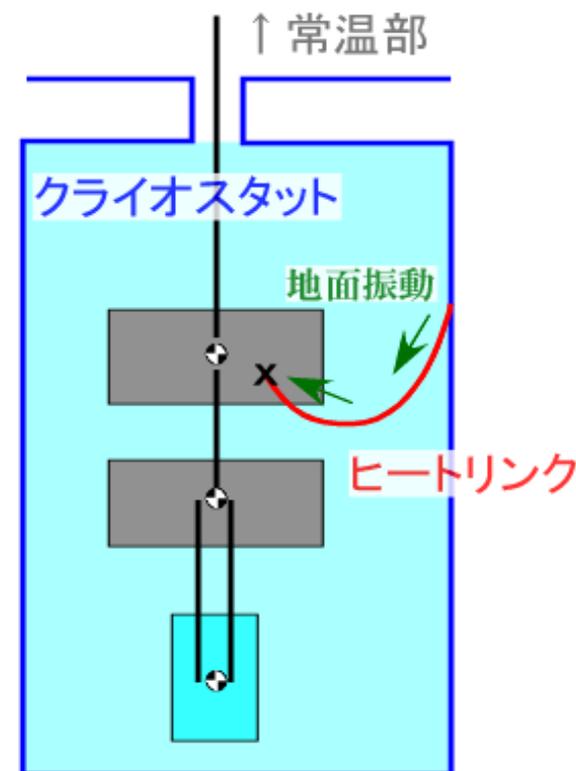
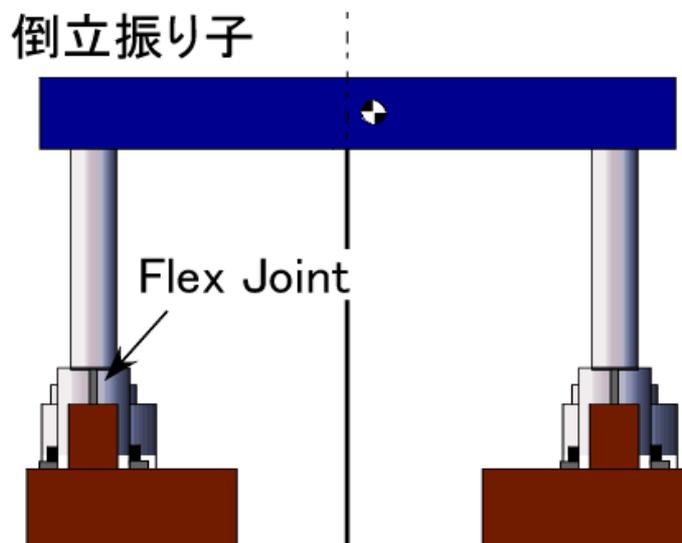


- 実際の装置にどれだけ非対称性があるかはわからない
⇒非対称性を**ランダム**に与え、計算を反復(**モンテカルロ法**)

非対称性の導入



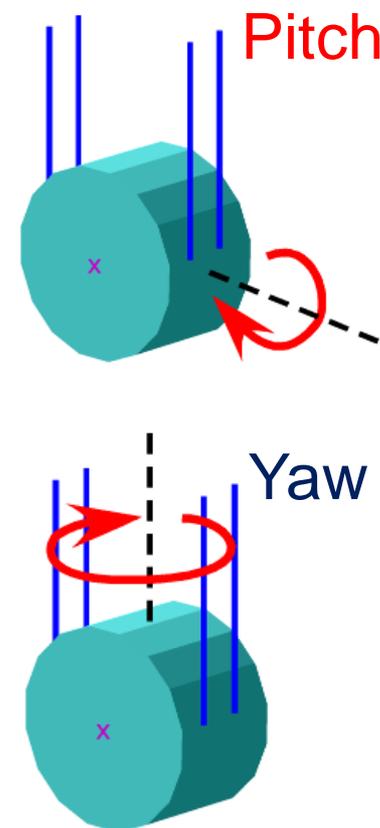
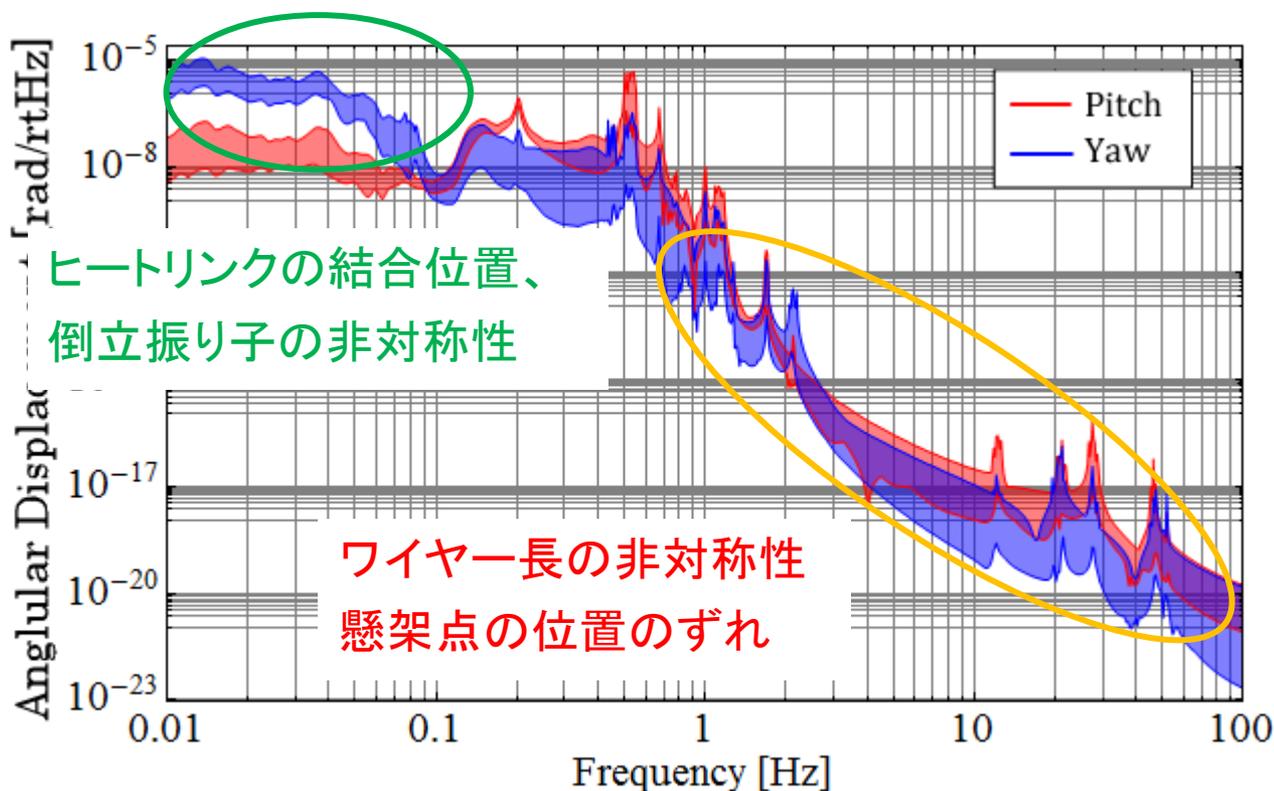
- ワイヤーの長さ: $\pm 0.5 \text{ mm}$
- ワイヤーの直径: $\pm 5 \%$
- ワイヤーの懸架点: x,y,z座標それぞれ $\pm 0.5 \text{ mm}$
- 倒立振り子の実効的なばね定数: $\pm 50 \%$
- ヒートリンクとマスとの接続点: 重心から $\pm 5 \text{ cm}$



鏡の角度揺れスペクトル

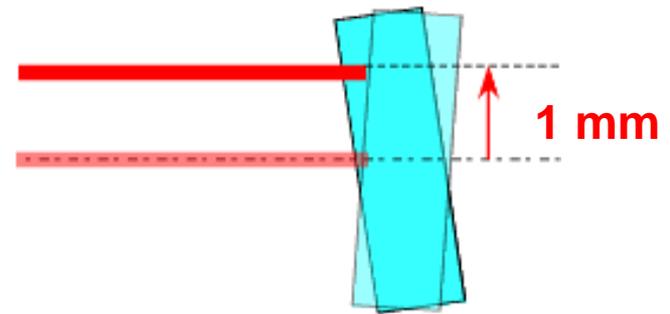
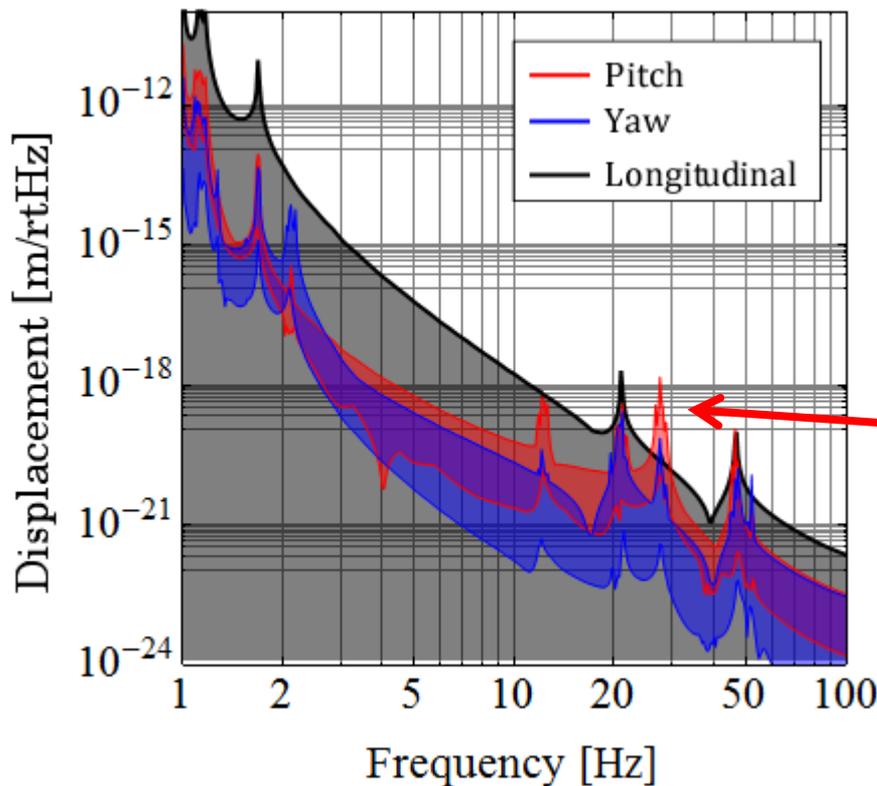


- 計算の反復回数: 20回
- 地面振動: 2007年2月における実測値 (20 Hz以上は $\propto f^2$ で補間)



鏡の角度揺れの感度への影響

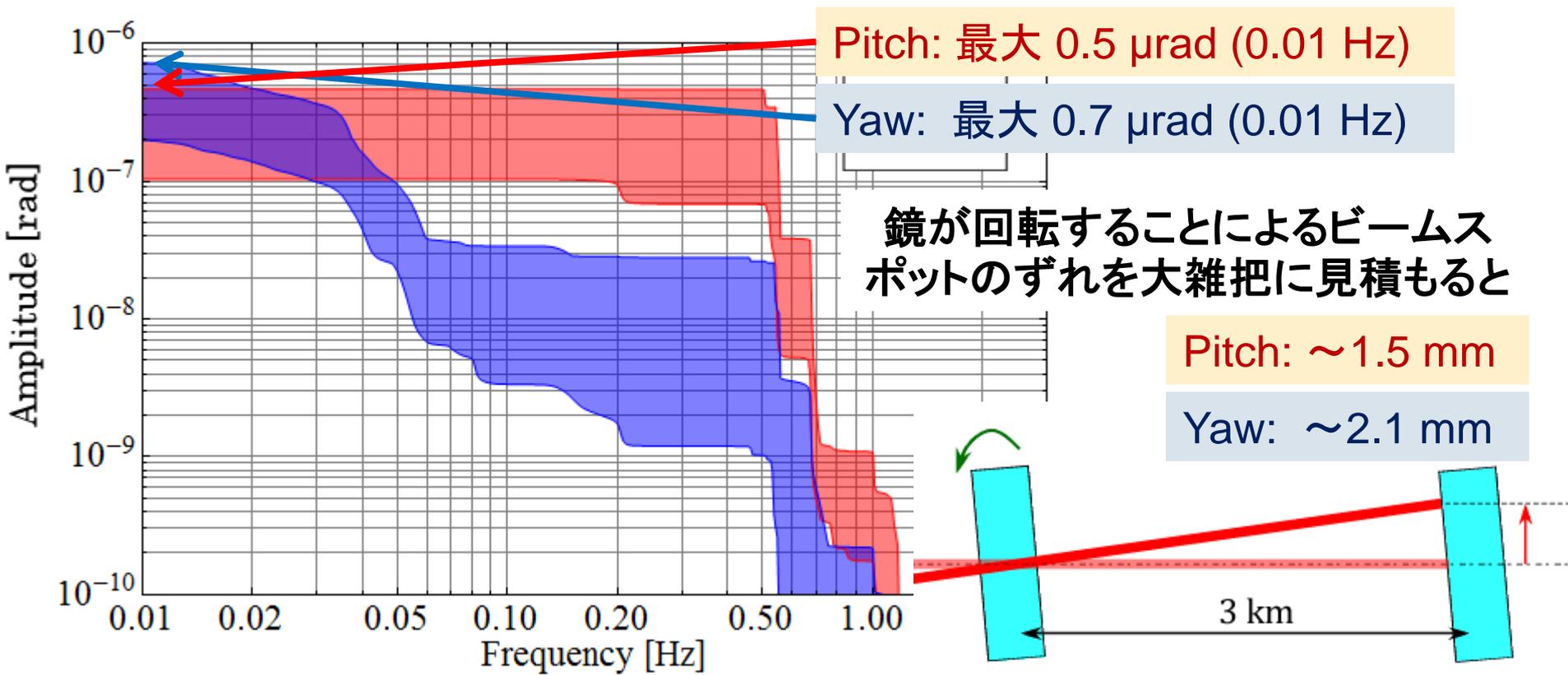
- ビームスポットのずれ1mmを仮定した時の干渉計感度への影響



鏡のPitchモードの共振

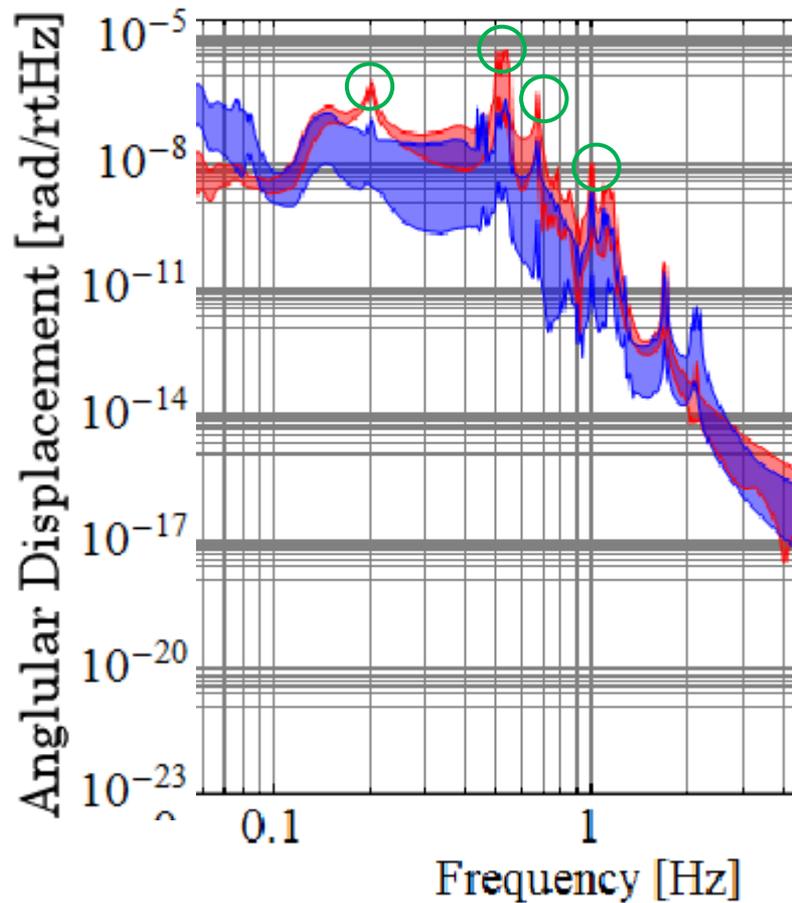
鏡の角度揺れによる感度への影響は、並進揺れに比べて小さい

鏡の角度揺れのRMS振幅

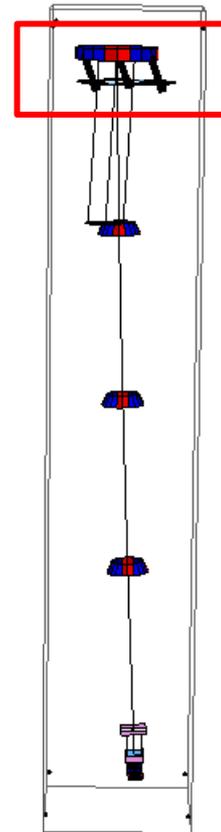


実際には鏡の曲率・レーザーの輻射圧の影響を考慮する必要
⇒道村唯太氏「LCGTのアラインメント制御」(18pSV-2)

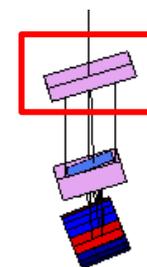
RMSを小さくするには



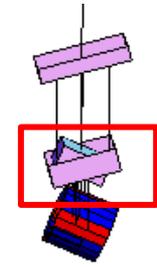
0.20Hz



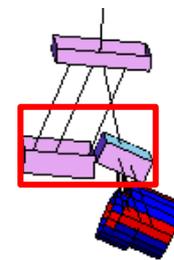
0.51Hz



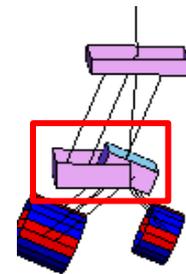
0.54Hz



0.67Hz



1.01Hz



まとめ



- LCGT用防振装置の3次元剛体モデルを構築
- 地面振動による鏡(テストマス)の角度揺れスペクトルを計算
- 今回仮定した装置の非対称性の下では、鏡の角度揺れによる感度への影響は並進揺れに比べ十分小さい

今後の課題

- モデルの妥当性を防振装置のプロトタイプを用いて検証
- 鏡の角度・位置のローカル制御法の確立
- 本モデルを用いた熱雑音の計算





以上です。

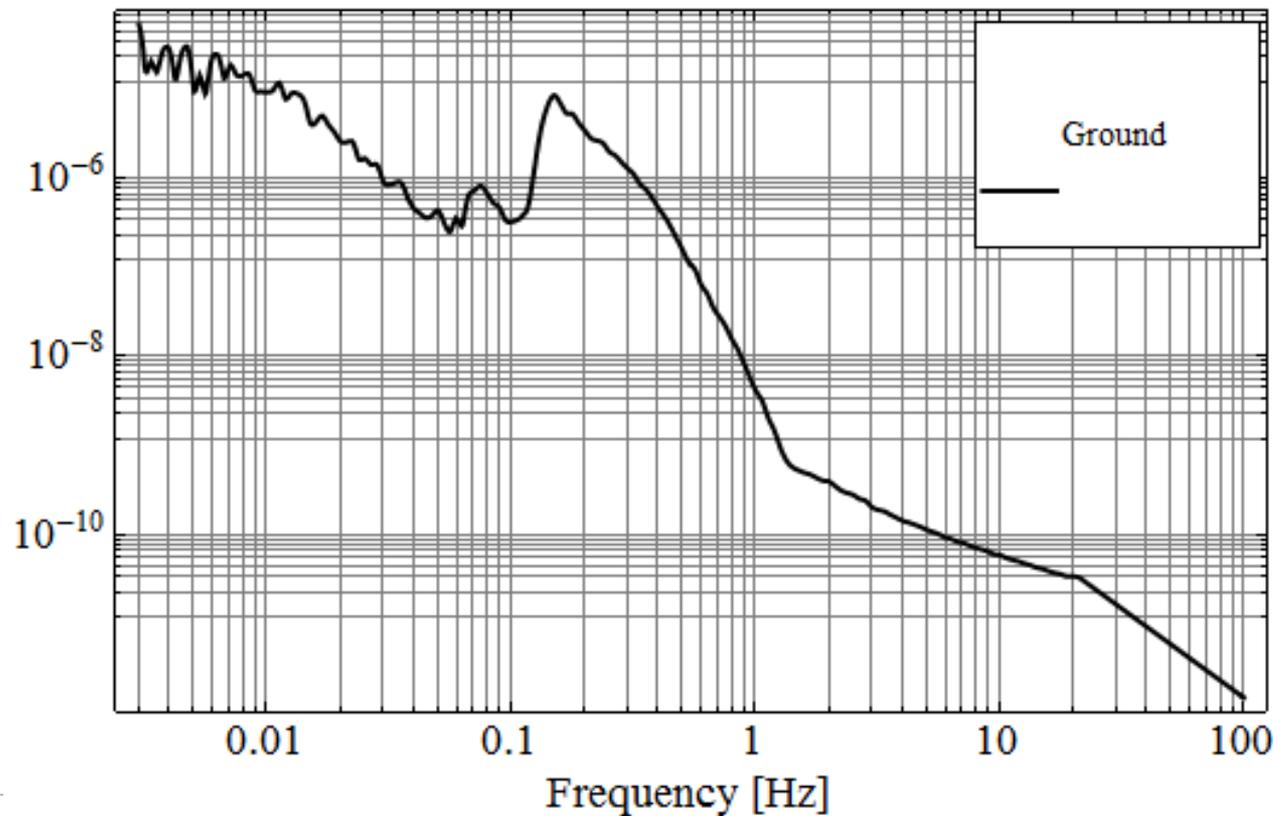


資料

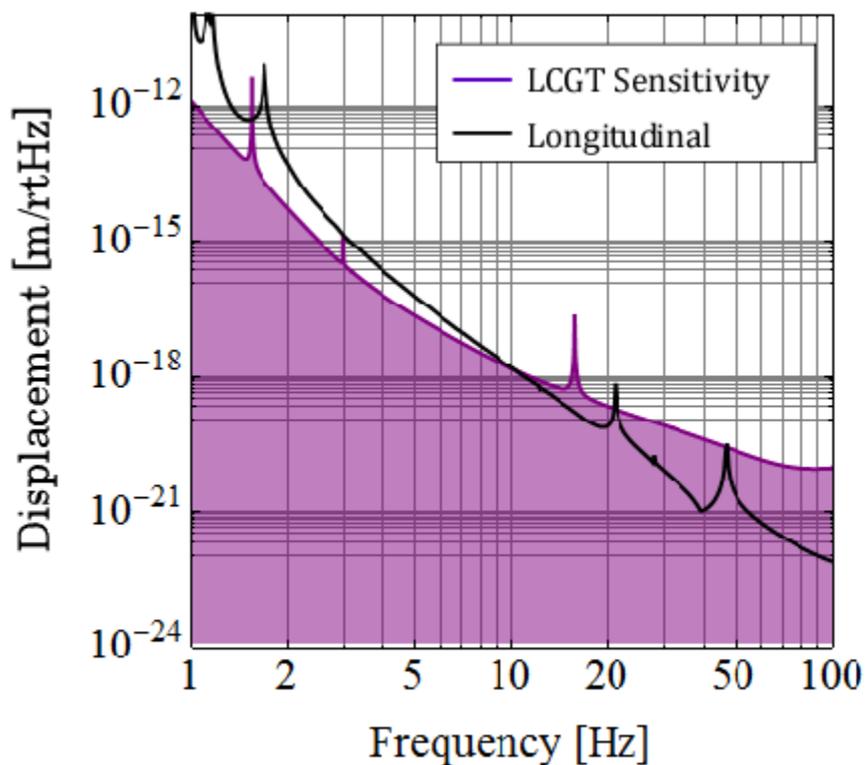
神岡の地面振動データ



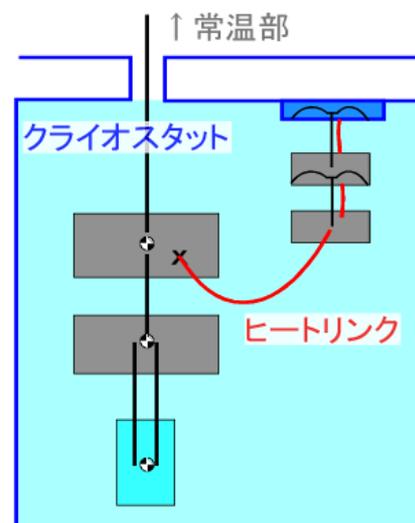
- 2007年2月13日に測定されたデータ(20Hz以上は補間)
- 天気が悪く地面振動は普段より大きい



そもそも防振レベルが足りない！



- 感度ぎりぎり
- 2 Hz以上はヒートリンクの影響
- クライオスタットのインナーシールドが地面と同じレベルで揺れている保証はない
⇒さらに悪くなる可能性が大
- 対策:ヒートリンク防振



2011年1月の感度曲線 V.S. 地面振動H+V/300

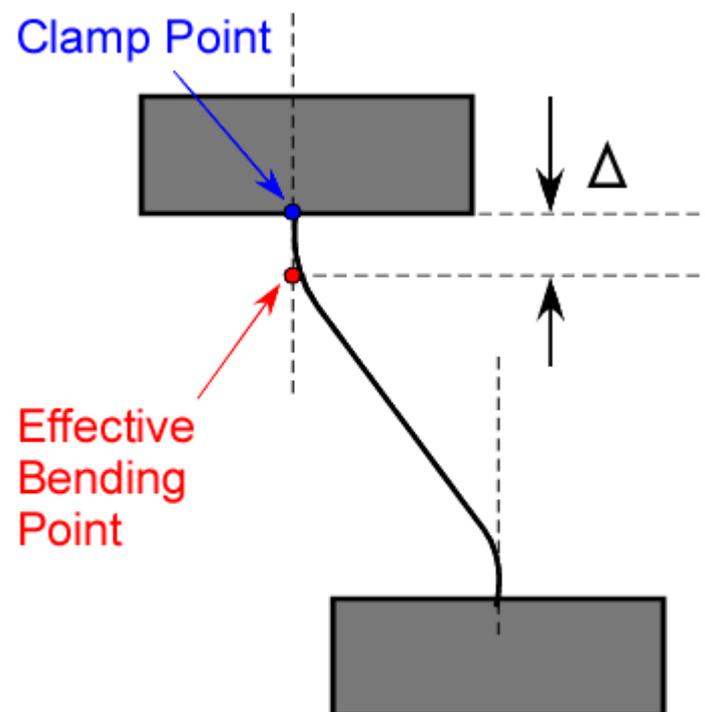
ワイヤーの曲がり点に関する補正



- ワイヤーの持つ弾性の影響でワイヤーの曲がり点がクランプ点からずれる

$$\Delta = \sqrt{\frac{EI}{T}}$$

E: ヤング率 I: 断面2次モーメント T: 張力



散逸の導入



- 系の散逸: **Viscous damping** と **Structure damping**
- Viscous dampingは速度に比例するダンピング (LCGTでは渦電流ダンピングを利用) ⇒ 散逸エネルギーとして計算

$$E_{\text{Damp}} = \frac{1}{2} C (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2$$

- Structure dampingは内部摩擦により生じるダンピング ⇒ ばね定数を複素数にすることにより計算 (ϕ : 散逸角度)

$$k \rightarrow k(1 + i\phi)$$

Dissipation Dilution



- 本モデルでは、振り子の復元力はワイヤーの弾性により生じる
- 実際には復元力の大部分が重力により生じている
⇒ワイヤーの材質が持つ散逸よりも、振り子の散逸は小さい

$$\phi_{\text{Pendulum}} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{EI}{T}} \phi_{\text{Wire}}$$

- この効果を取り入れるため、鉛直方向と水平方向の運動とで散逸を分けて計算する

シミュレーションの使用したパラメータ



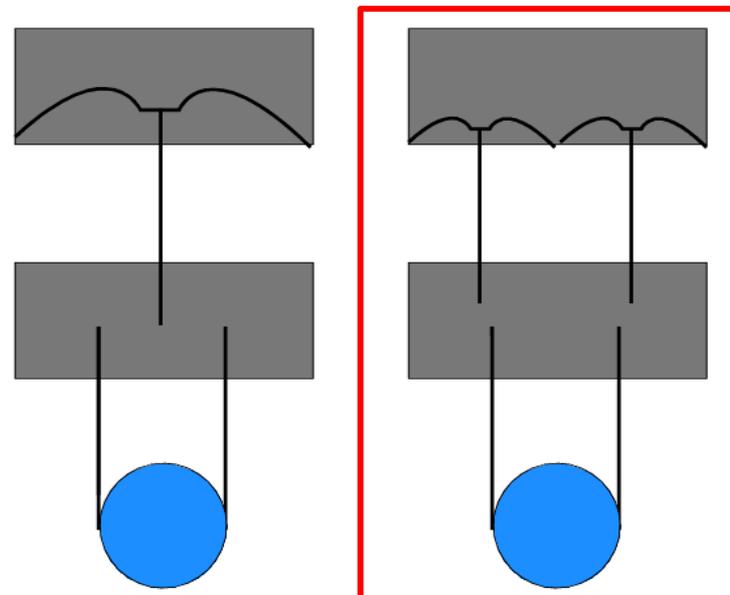
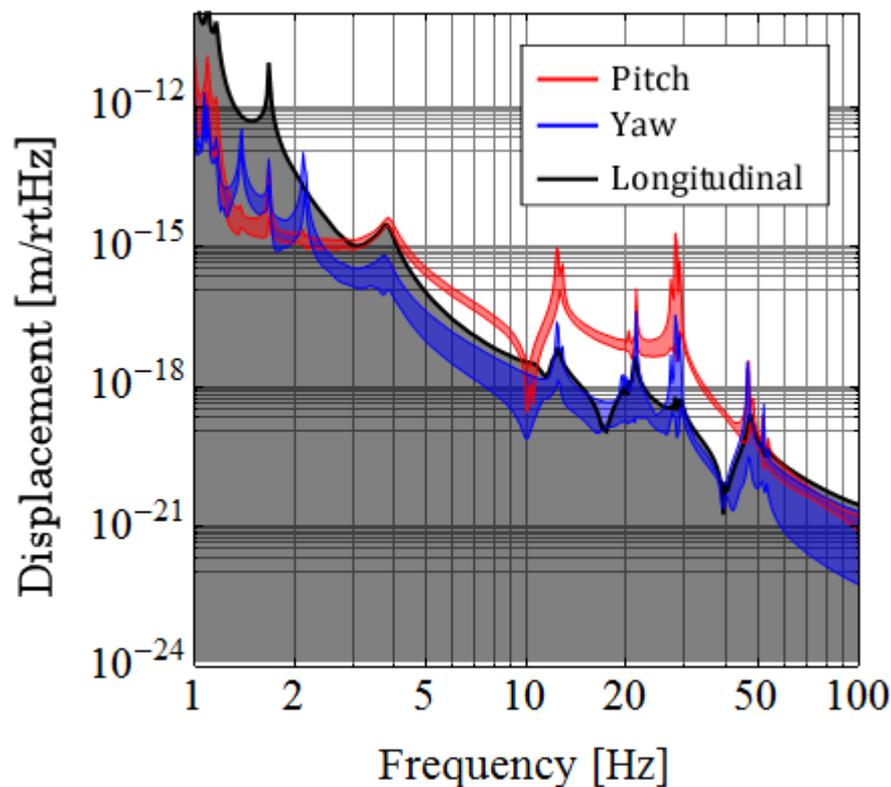
■ Parameters

```
(*      F0, MD, F1, F2, F3, PF, IR, IM, RM, TM  *)
mass={474.,30.0,104.,90.2,87.3,120.,60.0,60.0,37.3,22.7}kg;
moix={48.0,0.92,4.00,4.00,4.00,4.20,0.26,0.96,0.50,0.11}kg meter2;
moy={96.0,1.83,6.40,6.20,6.00,6.80,0.69,2.35,0.50,0.11}kg meter2;
moiz={48.0,0.92,4.00,4.00,0.92,4.20,0.55,1.51,0.60,0.19}kg meter2;
numw={3,1,1,1,1,3,1,4,4};
matw={"C70","Mar","Mar","Mar","Bol","Tun","Mar","Tun","Sap"};
lenw={2.9130,3.0523,3.0506,3.0518,3.0520,0.5064,0.4981,0.3154,0.300}meter;
diNw={0.50,3.10,2.80,2.50,2.20,0.60,1.40,0.72,1.60}mm;
diWw={0.30,3.10,3.80,3.80,3.80,0.60, 1.80,0.72,1.60}mm;
dyuw={50.0,0.0,5.0,5.0,5.0,-3.6,5.0,-7.7,0.0}mm;
dylw={0.0,5.0,5.0,5.0,5.0,0,3.6,-5.0,-7.7,0.0}mm;
dxuw={35.0,0.0,0.0,0.0,0.0,15.0,0.0,14.5,12.5}cm;
dzuw={35.0,0.0,0.0,0.0,0.0,15.0,0.0,3.0,1.5}cm;
```

IMを4本のmini-GASで吊った場合



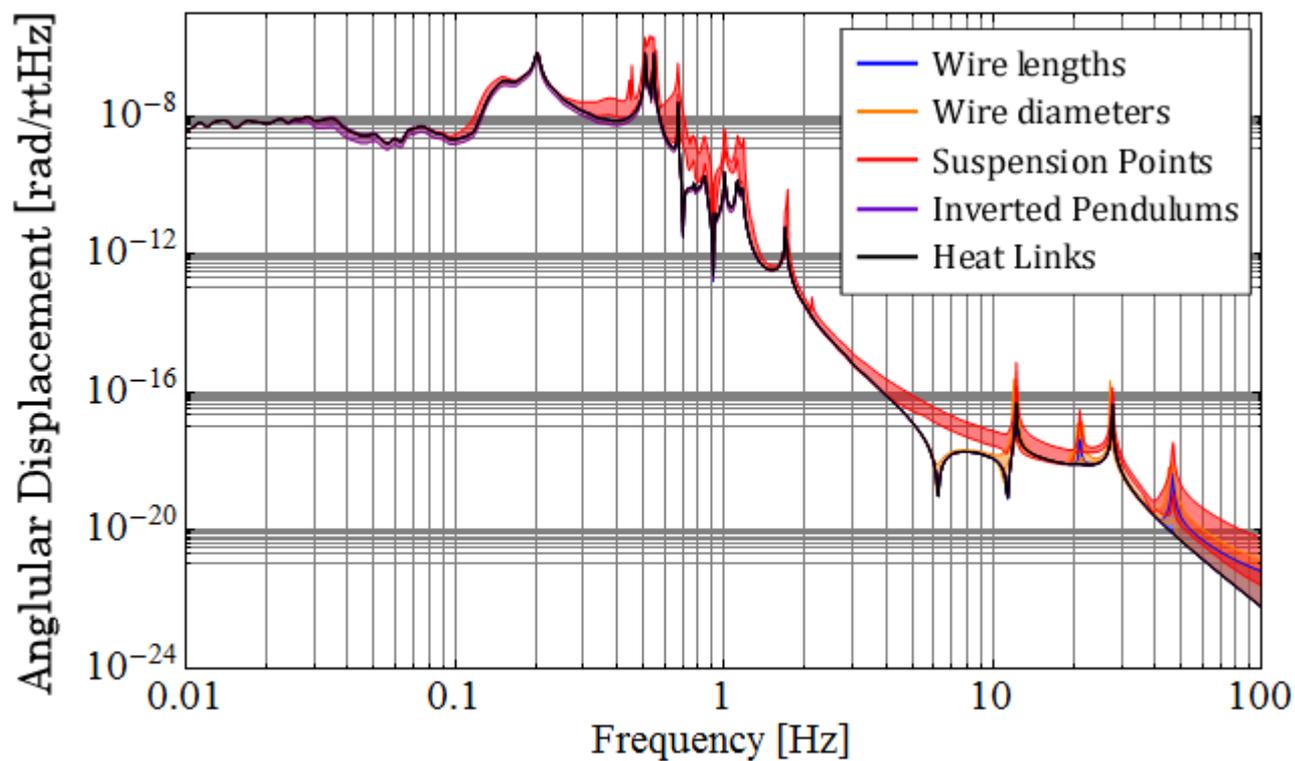
- Pitch-Lengthのカップリングが大きい
- またmini-GASの非対称性によるVertical-Pitchも考えられる



各非対称性の影響



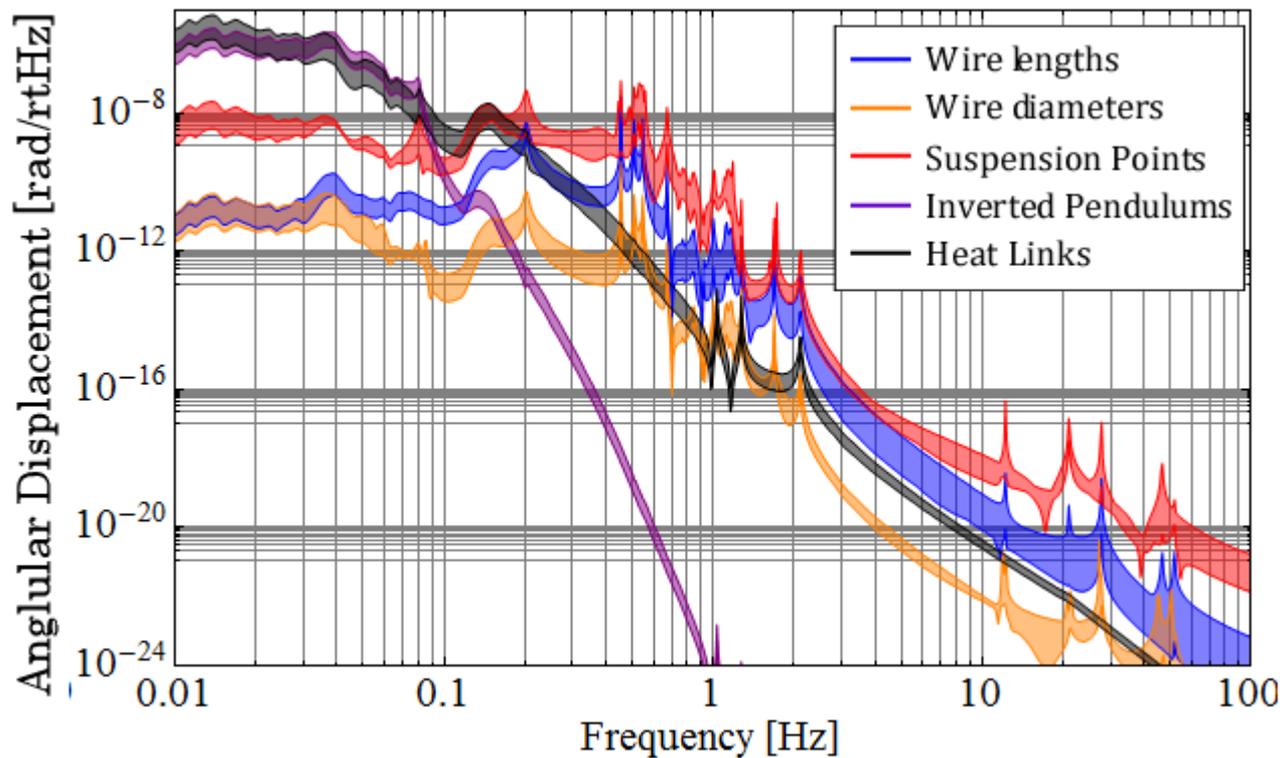
■ Pitch



各非対称性の影響



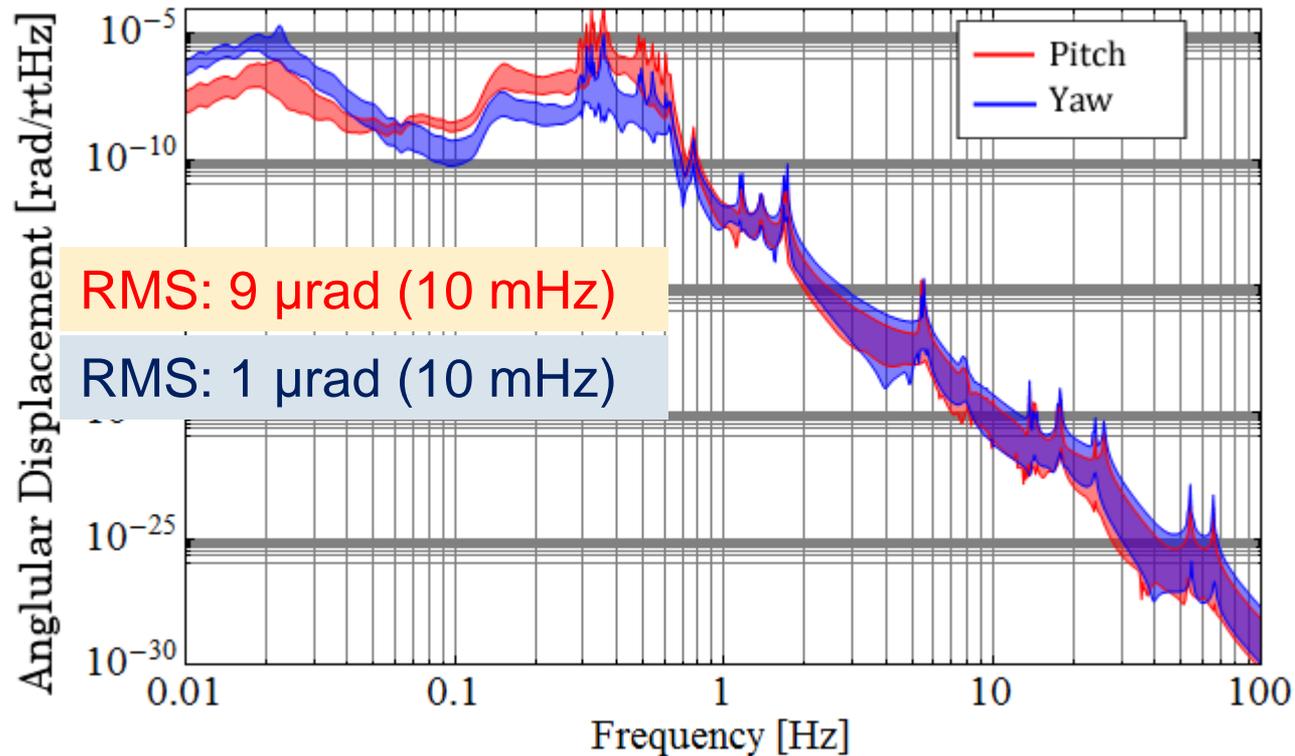
■ Yaw



Type-B防振系における鏡の角度揺れ



■ Recycling Mirrors



Type-B防振系における鏡の角度揺れ



■ Beam Splitter

