

有限要素解析によるLCGTヒートリンク の防振性能評価

LCGT f2f meeting 2010/6/16 @ICRR
東大理 麻生洋一

概要

- LCGTでは排熱のためのヒートリンクをサスペンションに接続
- ヒートリンクからの振動混入が問題となる
- これまでヒートリンクからの振動混入は簡単なバネモデルでしか計算されてこなかった
- 今回は有限要素法を用いた解析を行なった

方法

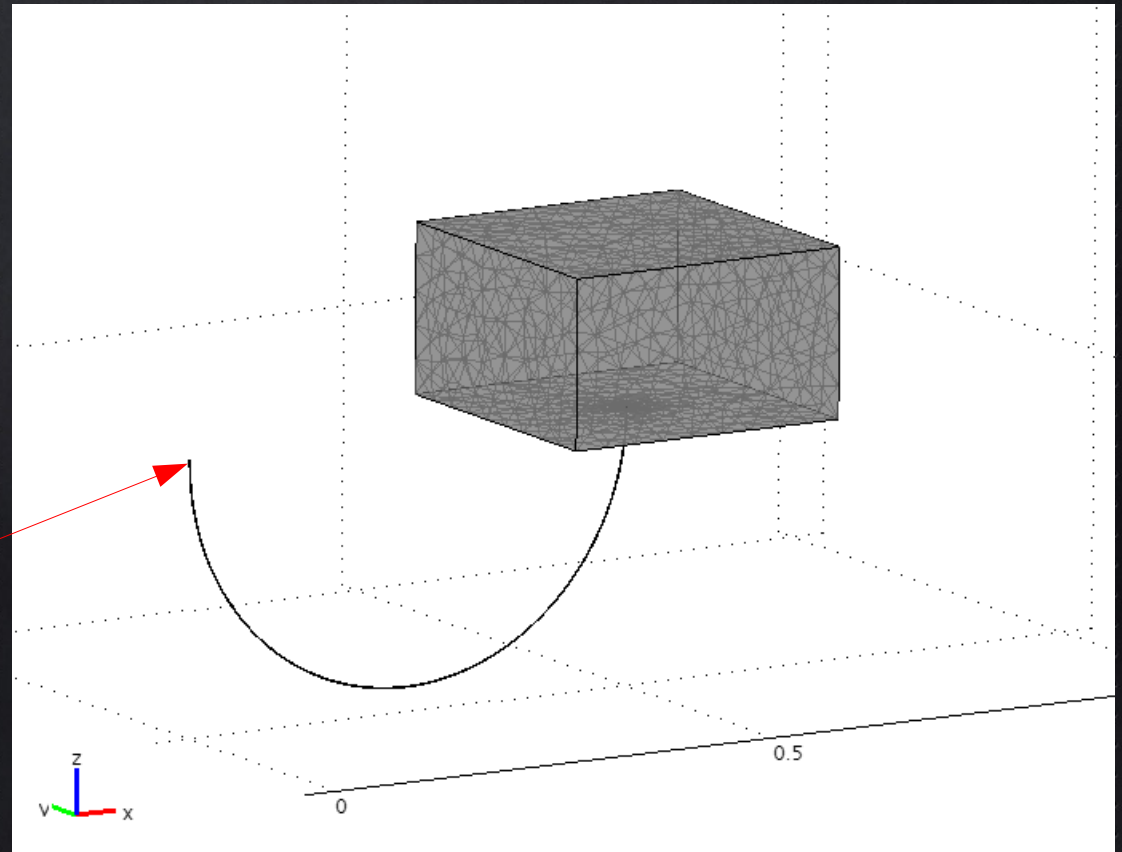


有限要素解析ソフト: COMSOL Multiphysics (をsingle physicsで利用)

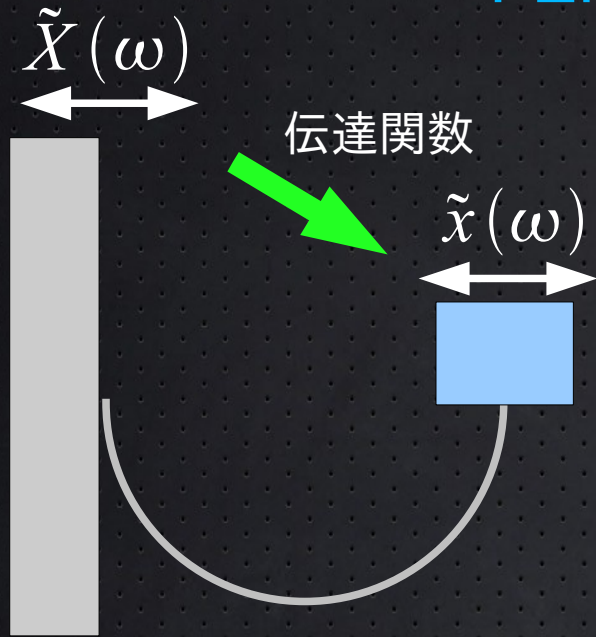
ジオメトリ

- 半円形のヒートリンク
 - 曲率半径25cm
 - ワイヤー直径1mm
 - 純アルミ ($E=68\text{GPa}$)
 - ロス $\phi = 10^{-4}$
- 120kgのプラットフォーム

低温壁に固定



FEMによる伝達関数計算



周波数応答解析

一般的な一次元線形微分方程式

線形微分演算子

$$L\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial t}\right) \cdot u(x, t) = K\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial t}\right) \cdot f(x, t)$$

求める関数(変位)

ソース(力)

ソースが調和振動: $f(x, t) = f_0(x) e^{i\omega t}$ $\xrightarrow{\text{解も調和的}}$ $u(x, t) = u_0(x) e^{i\omega t}$

$$\frac{\partial}{\partial t} \longrightarrow i\omega \quad \longrightarrow \quad L\left(\frac{\partial}{\partial x}, \omega\right) \cdot u_0(x) = K\left(\frac{\partial}{\partial x}, \omega\right) \cdot f_0(x)$$

時間に依存しない微分方程式

→ 有限要素法の静解析で解ける

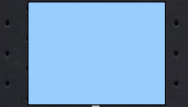
得られるもの: $u_0(x)$ 周波数 ω における振動プロファイル

FEMによる伝達関数計算

$\tilde{X}(\omega)$



$\tilde{x}(\omega)$



ここで問題

- 構造解析においてソースは力(Force)
- 地面振動の変位を入力することは出来ない

そこでひと工夫

- 座標系を変える
- 振動する壁と共に運動する座標系から物を見る

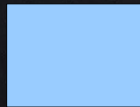


静止



見かけの力

$-\rho\omega^2\tilde{X}(\omega)$



- 壁は静止
- すべての物体に加速度による見かけの力が働く
- 見かけの力は右辺ソースタームに入る

$$L\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial t}\right) \cdot u(x, t) = K\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial t}\right) \cdot f(x, t)$$

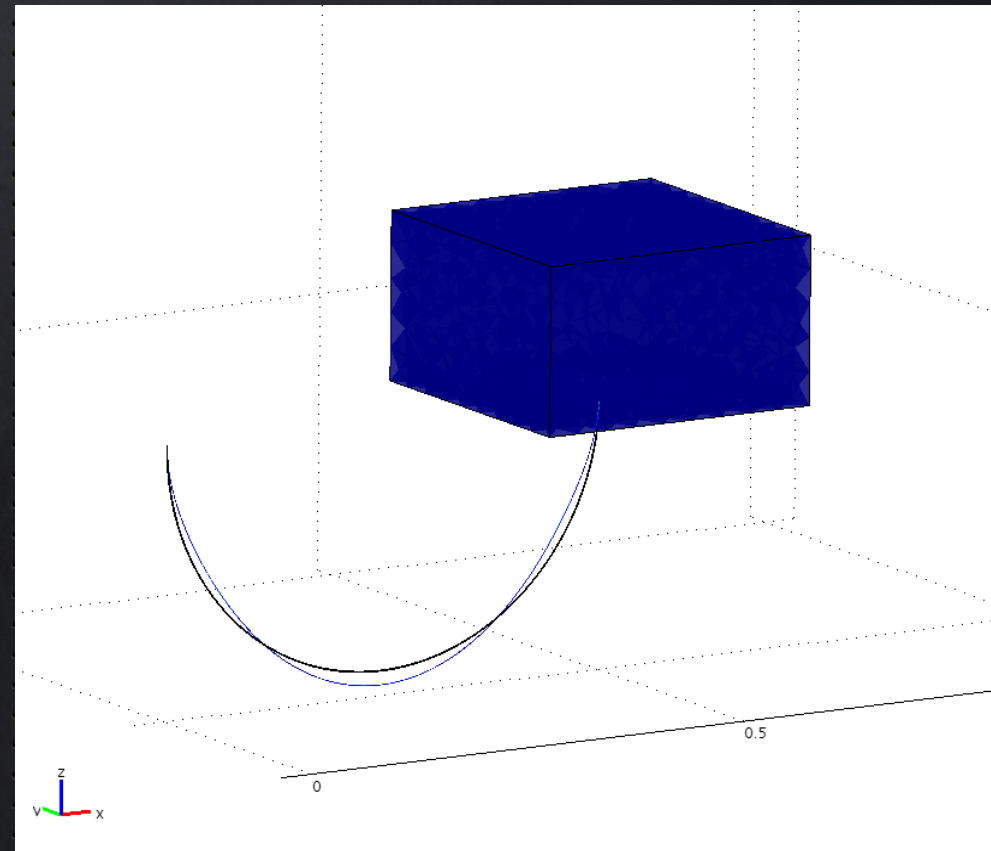
これで周波数解析ができる

応力硬化

- ヒートリンクは重力でたわむ
- 弾性体が変形すると剛性が変化する --> 応力硬化
- 周波数解析に重力を入れると、重力も調和振動してしまう。



- 先に重力のみをかけて変形を静解析で求める
- その解を初期値として周波数応答を求める。

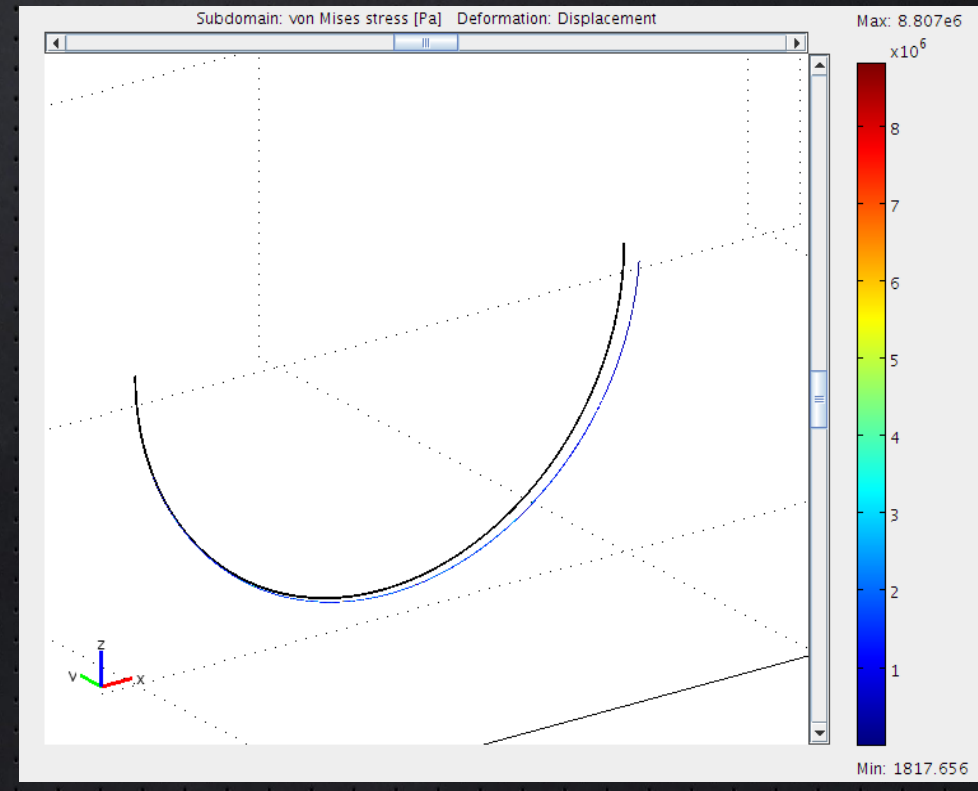
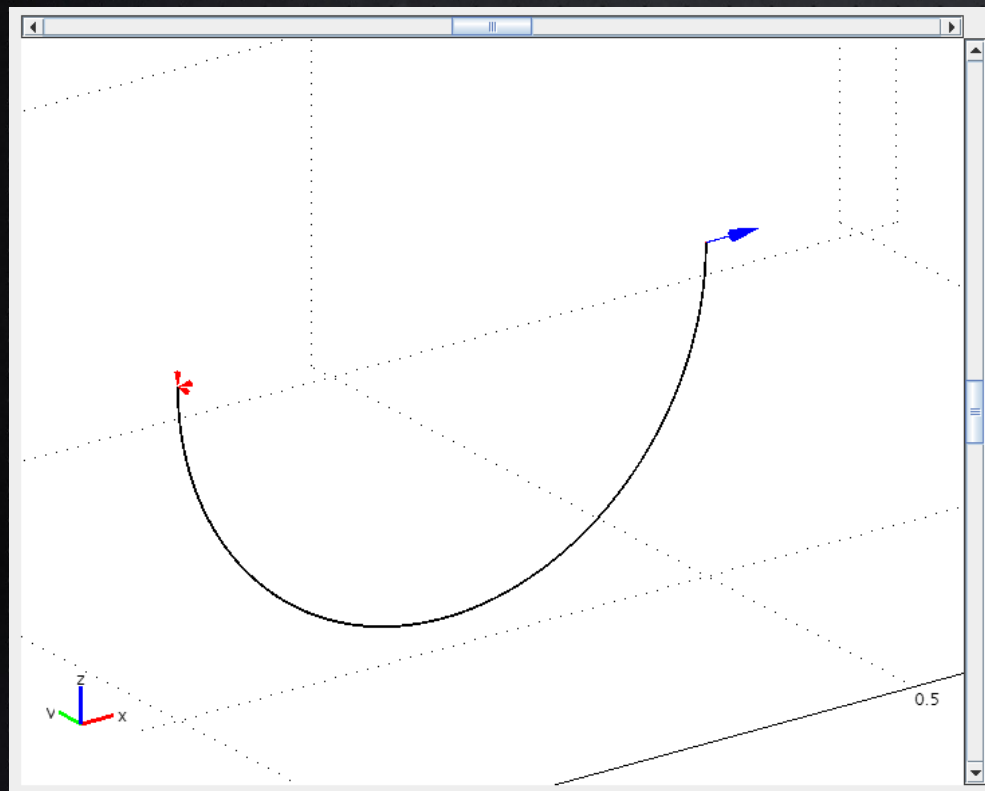


理論式との整合性チェック

バネ係数

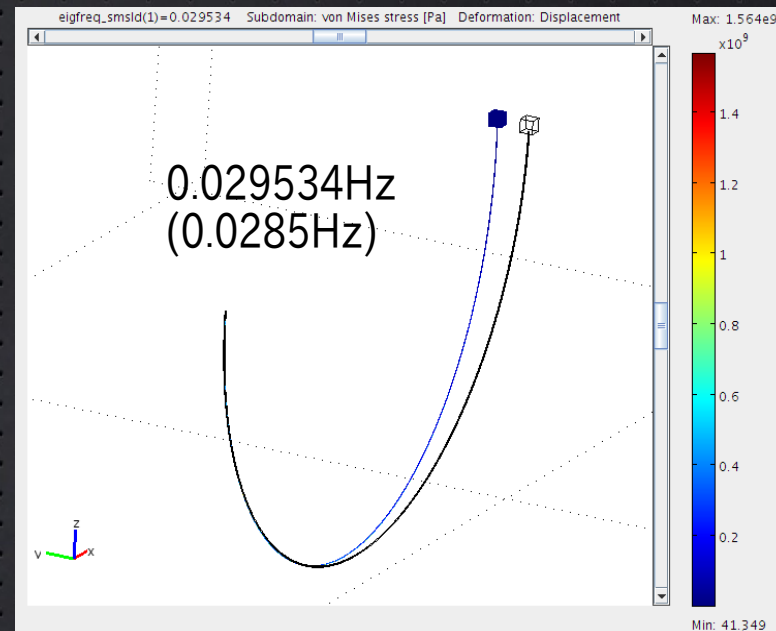
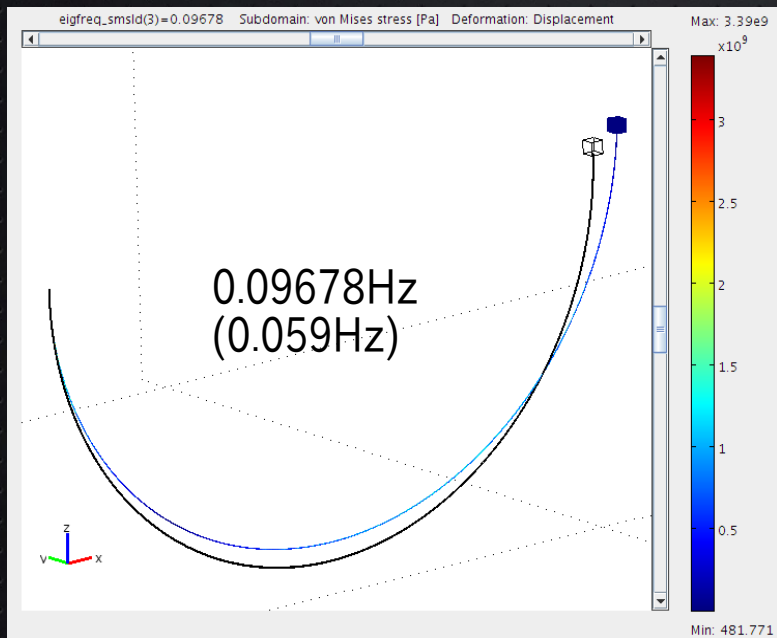
$$k_x = \frac{4\pi E^4}{64r^3} \frac{1}{6\theta + \sin(2\theta) - 8\sin(\theta)}$$

	理論	FEM
Kx [N/m]	0.136	0.137
Ky [N/m]	0.051	0.032
Kz [N/m]	0.045	0.046

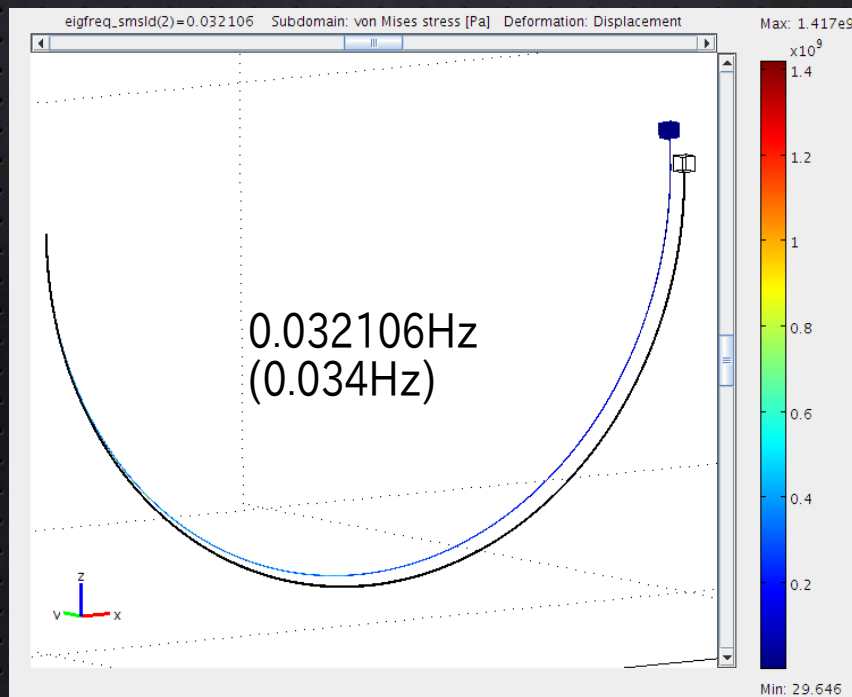


固有振動モード

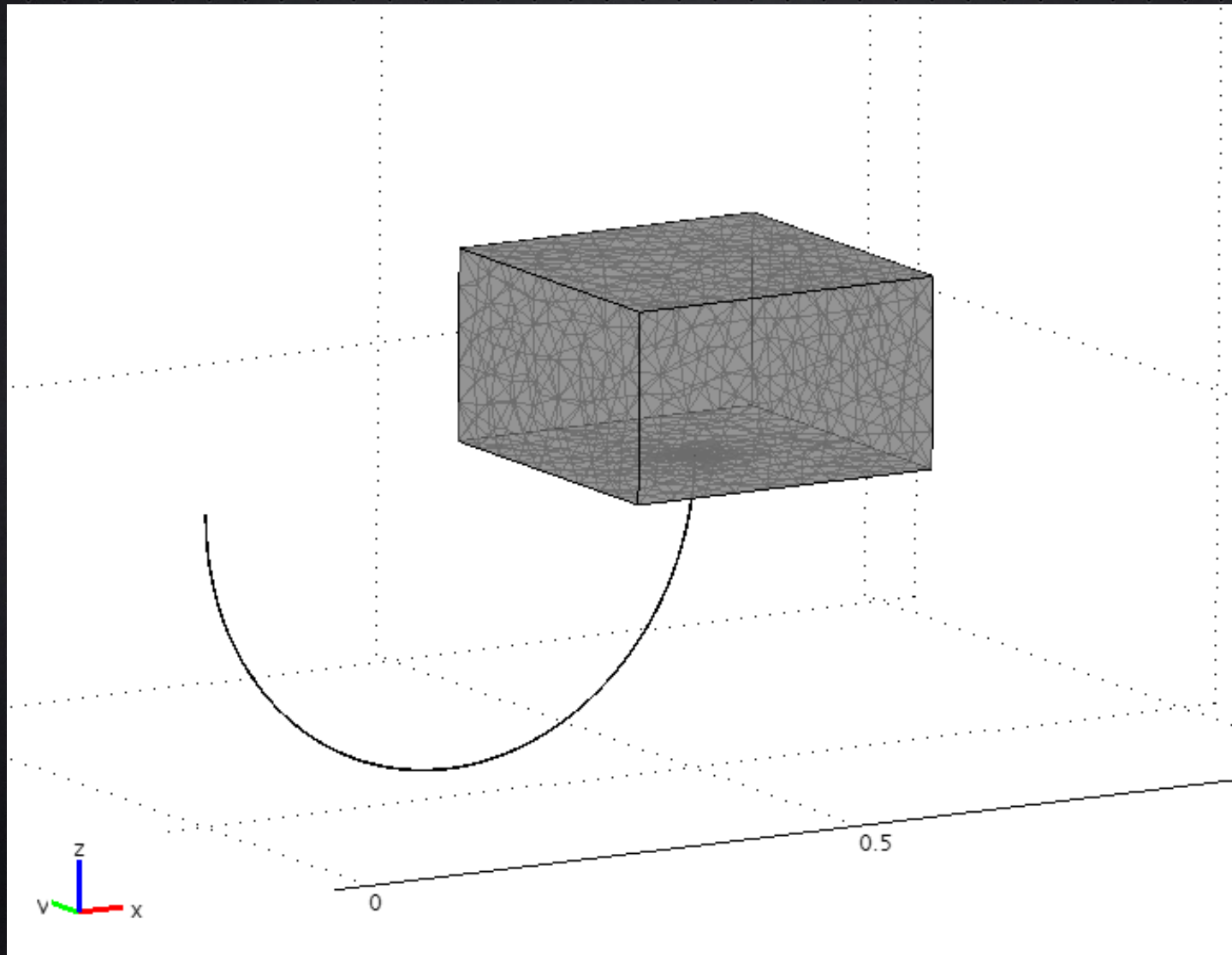
1kgのマスを先端に取り付け



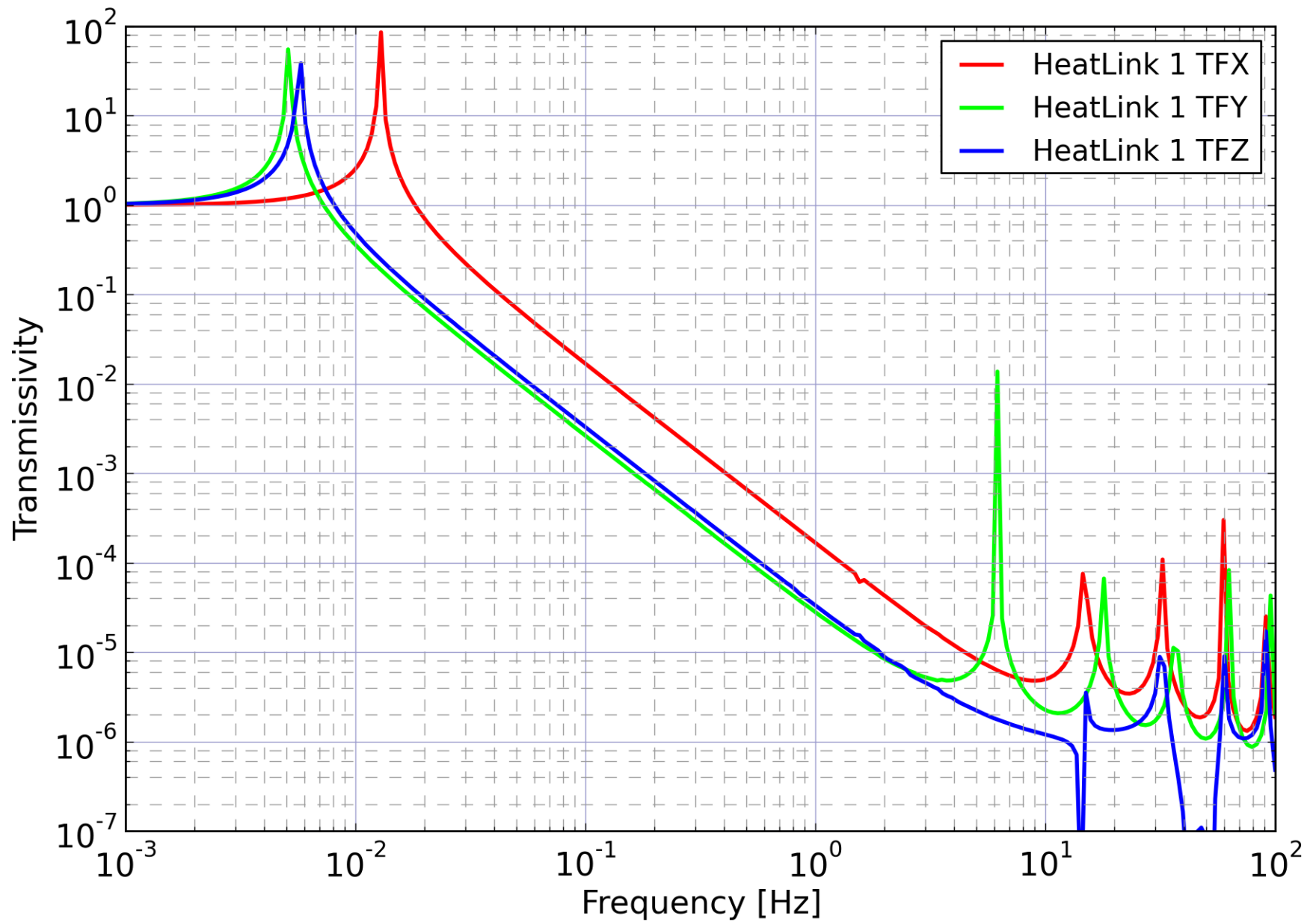
()内はバネ係数から予想される共振周波数



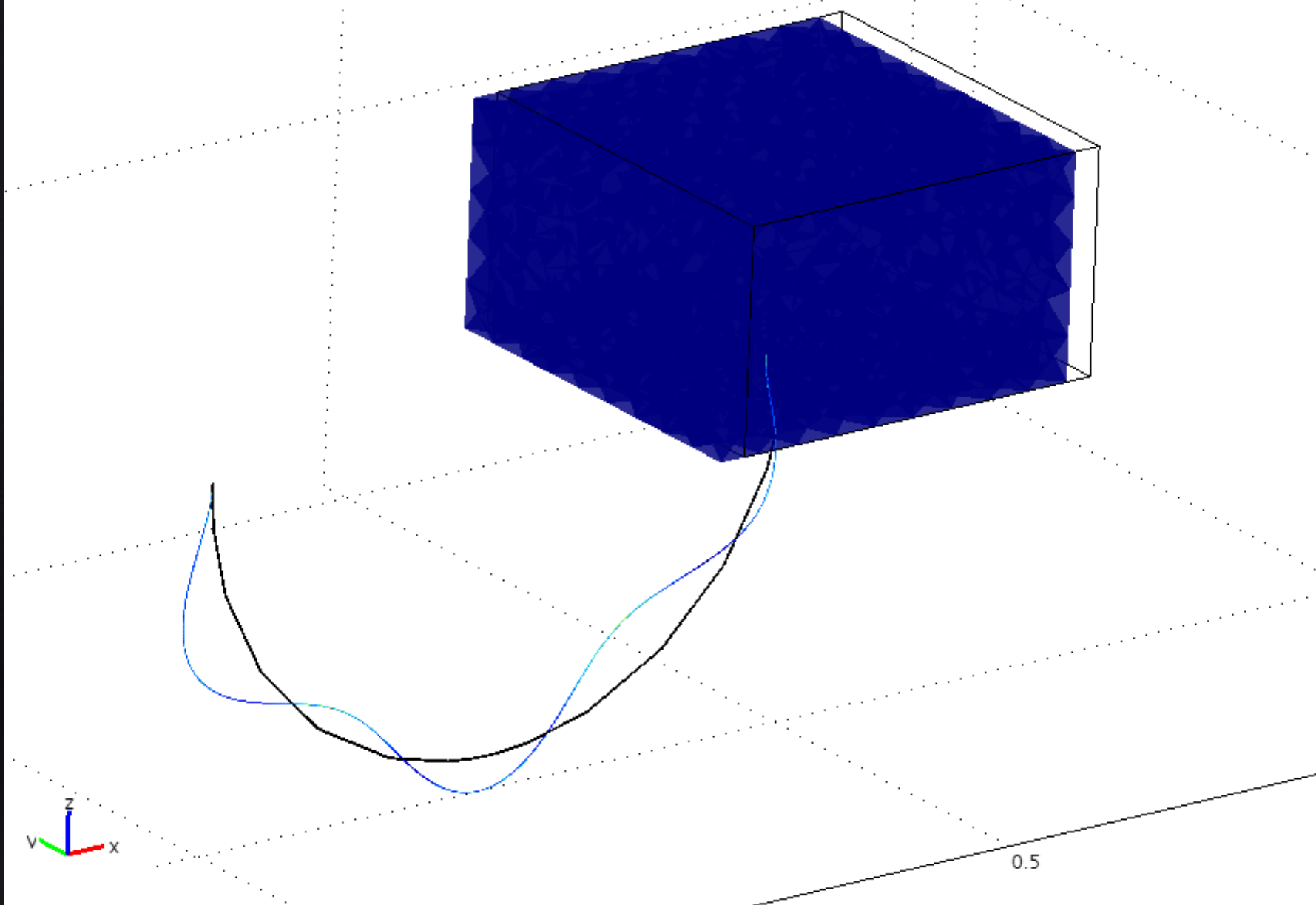
ヒートリンカー一本



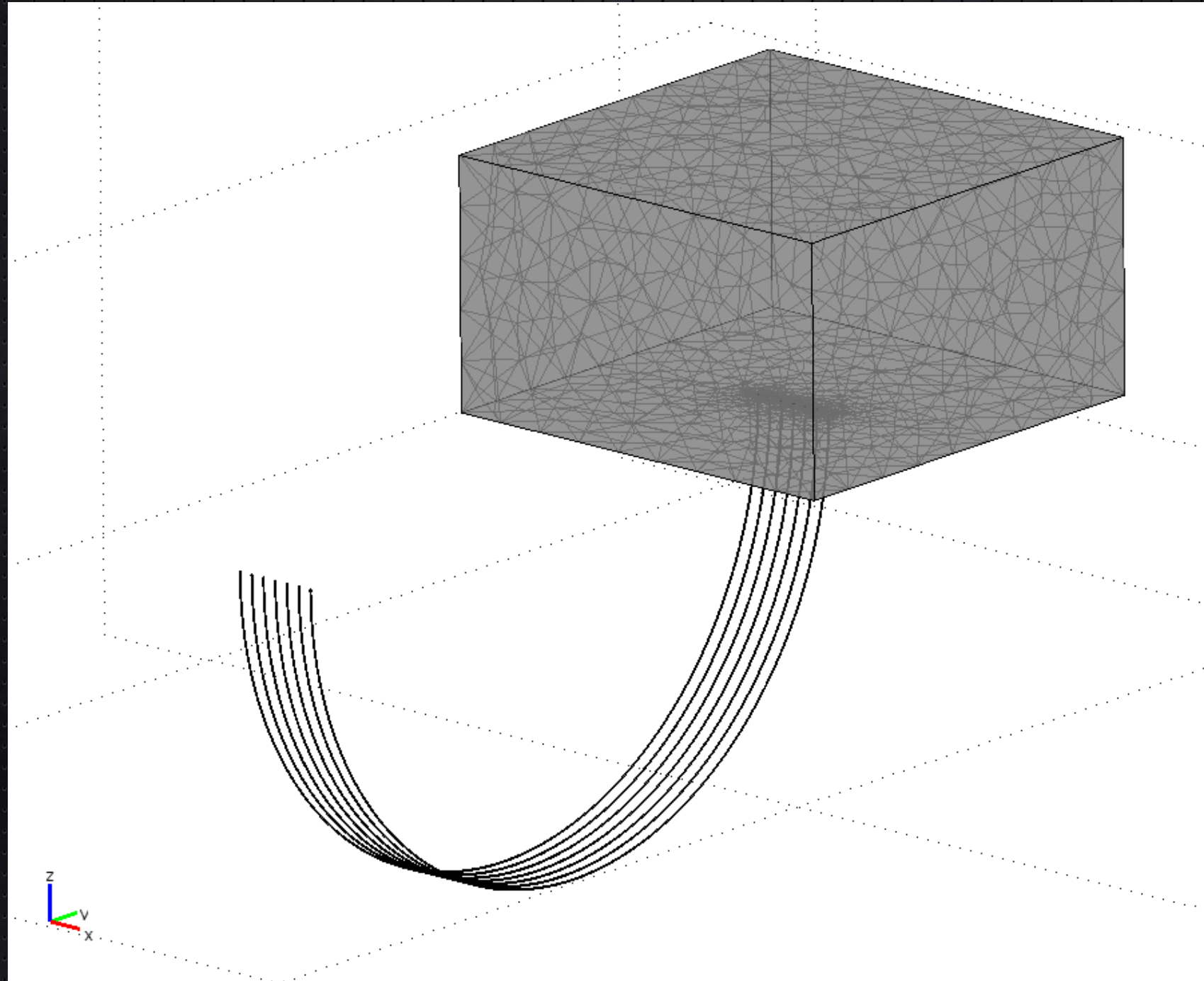
伝達関数



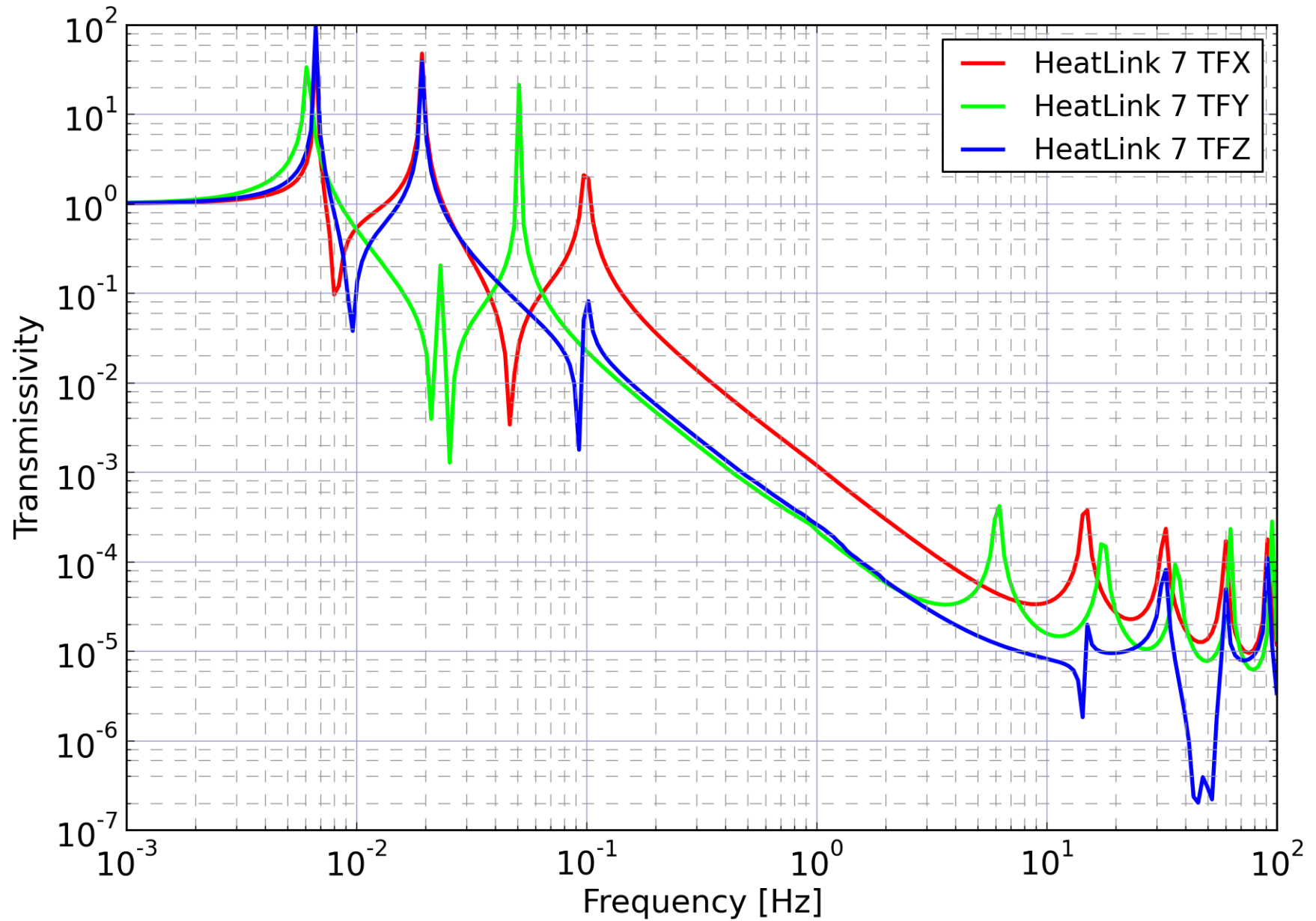
ワイヤーの共振



ヒートリンク7本



伝達関数



SASへの接続

- 高橋さんがMatlabで作ったSASの質点モデル
- FEMで計算したヒートリンク伝達関数を接続

プラットフォームの運動方程式

$$m \ddot{x}(t) = -K_{\text{HL}}(x(t) - X(t)) - \sum_n K_n(x(t) - x_n(t))$$

他段からの寄与

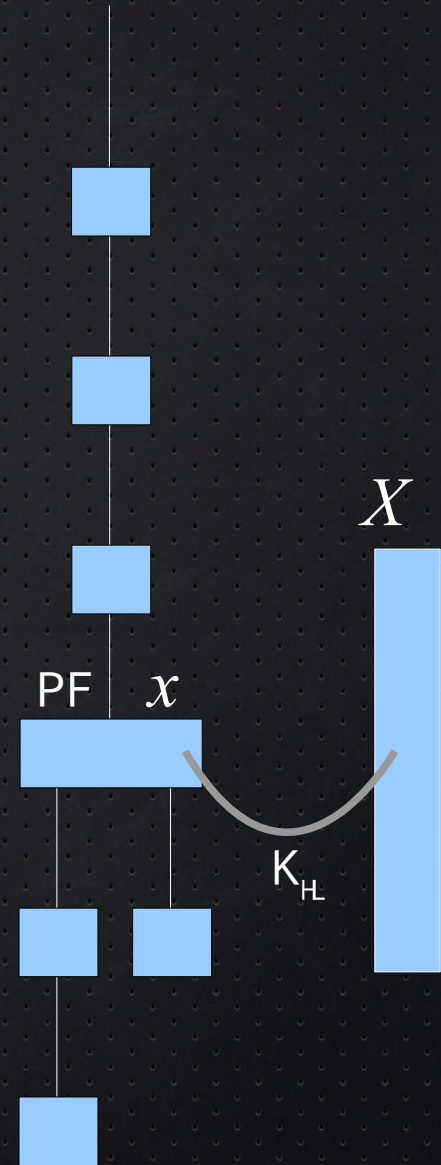
フーリエ変換

$$\begin{aligned} (\tilde{K}_{\text{HL}}(\omega) + \sum_n \tilde{K}_n(\omega) - \omega^2 m) \tilde{x}(\omega) - \sum_n \tilde{K}_n(\omega) \tilde{x}_n(\omega) \\ = \tilde{K}_{\text{HL}}(\omega) \tilde{X}(\omega) \end{aligned}$$

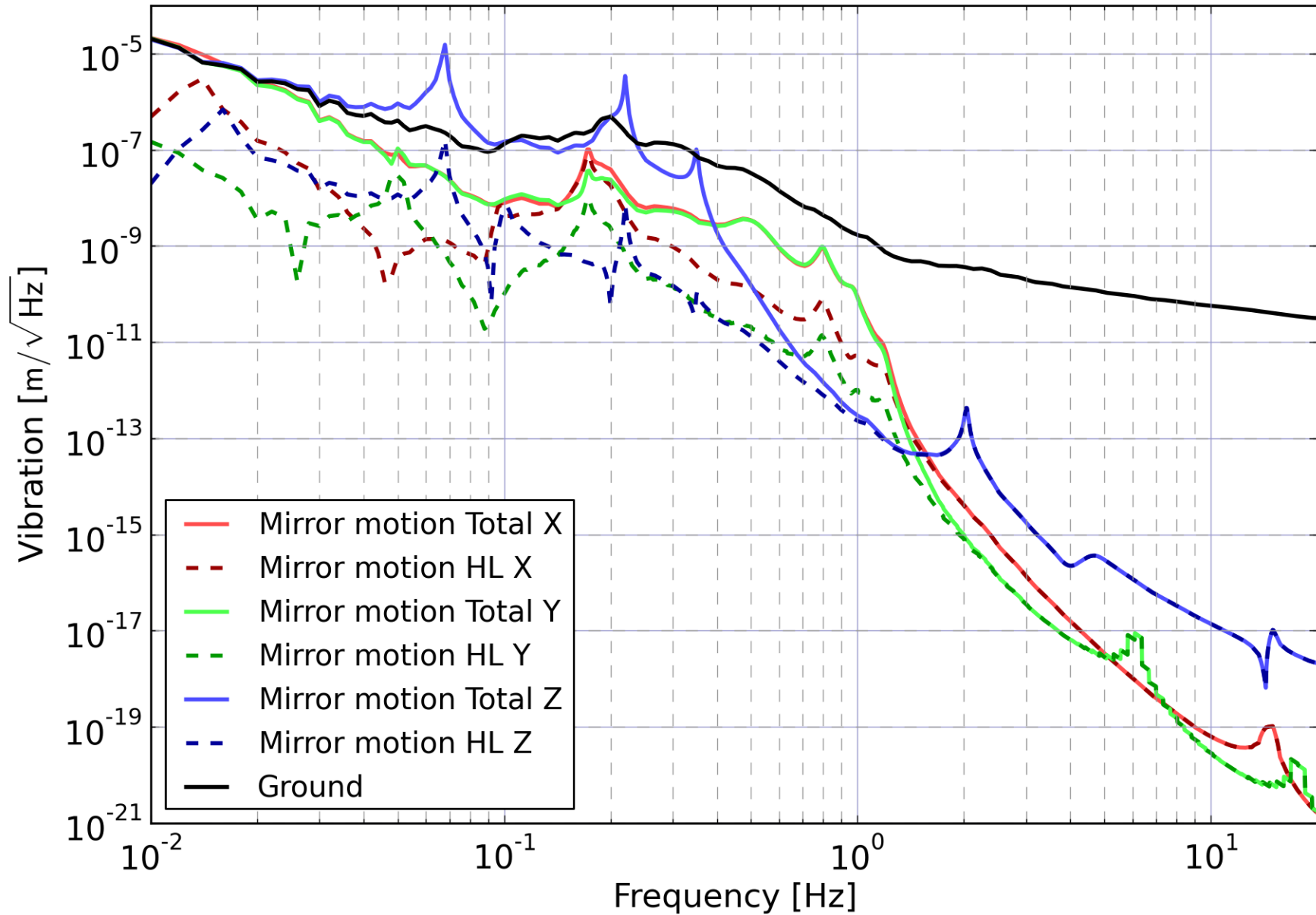
$\tilde{K}_{\text{HL}}(\omega)$ を求めればよい。

自由質点+HLの運動方程式 $m \ddot{x}(t) = -K_{\text{HL}}(x(t) - X(t))$

フーリエ変換してまとめると: $\tilde{K}_{\text{HL}}(\omega) = \frac{\omega^2 m \tilde{x}}{\tilde{x} - \tilde{X}} = \frac{\omega^2 m T}{T - 1}$ $T \equiv \frac{\tilde{x}}{\tilde{X}}$:伝達関数

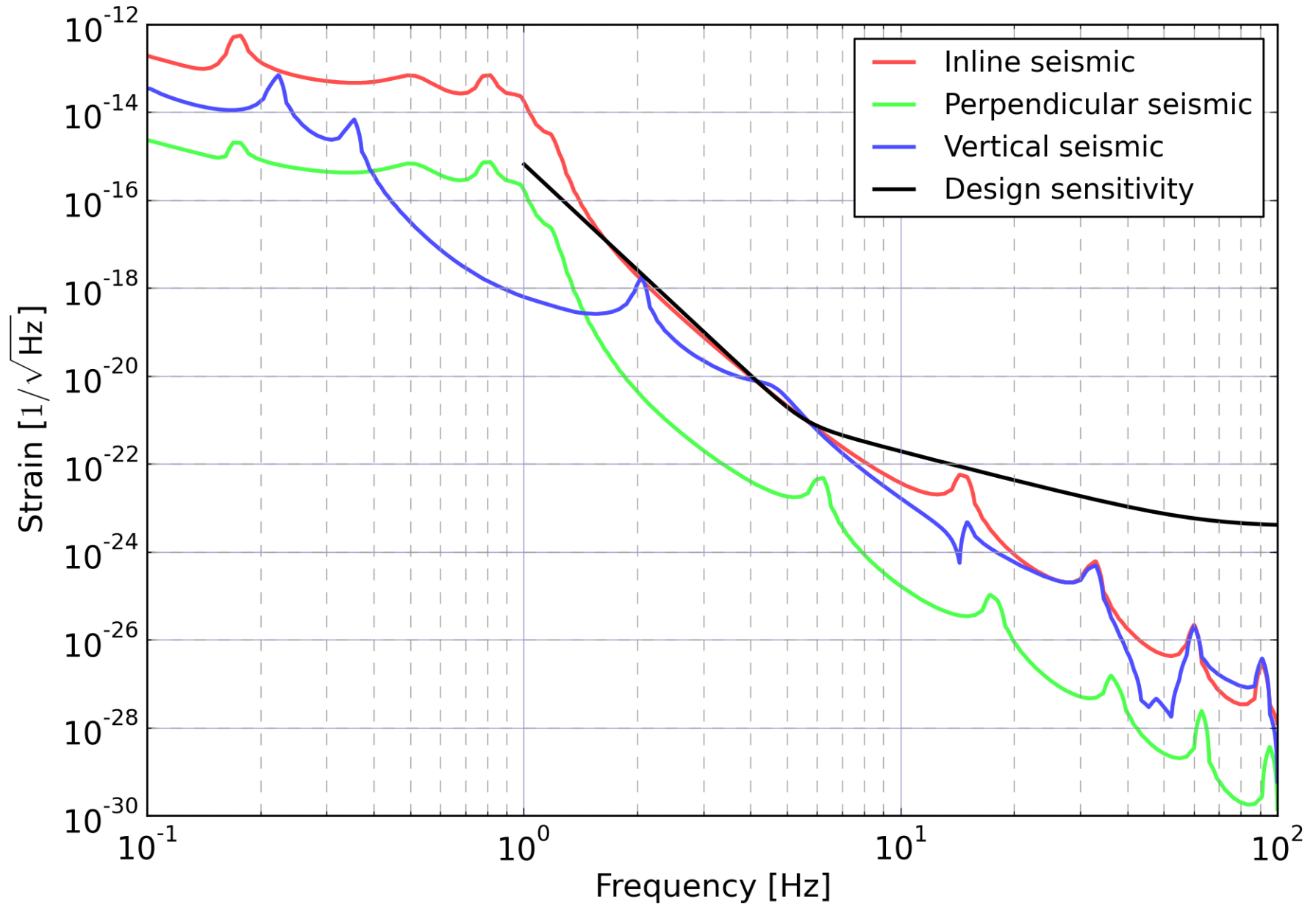


HL付きSASの防振性能



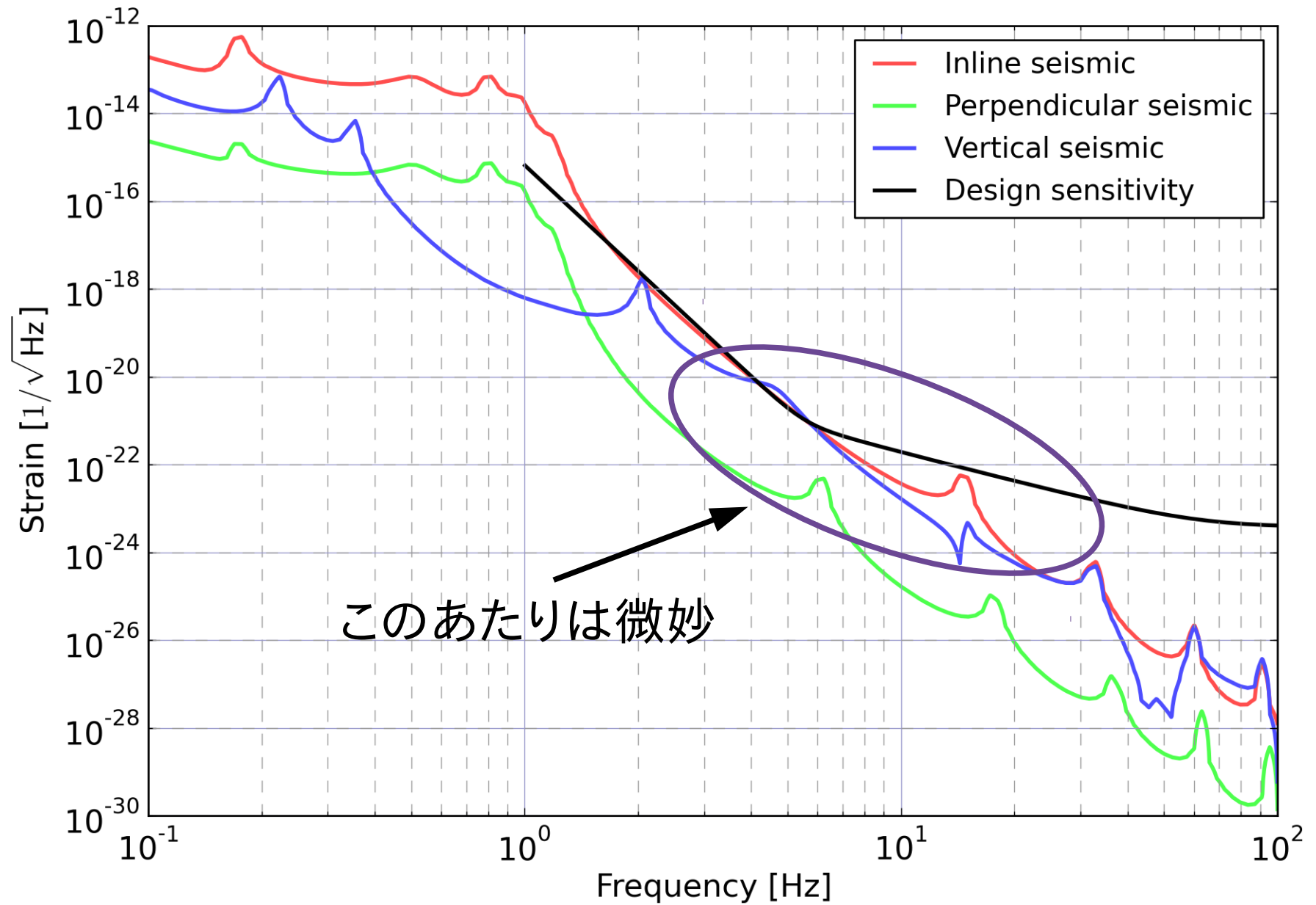
感度への影響

Inline以外の方向の振動はカップリング1%を仮定



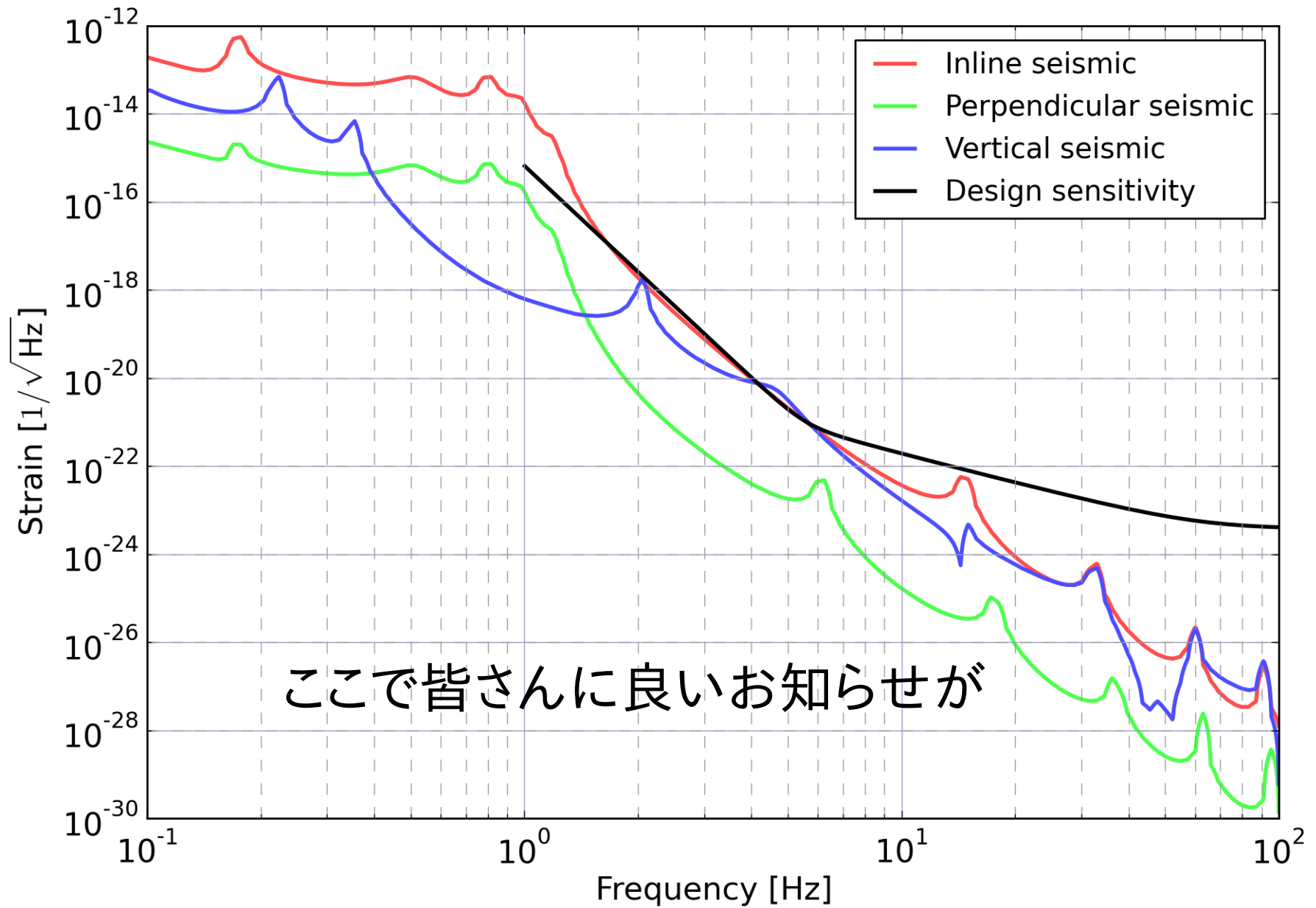
感度への影響

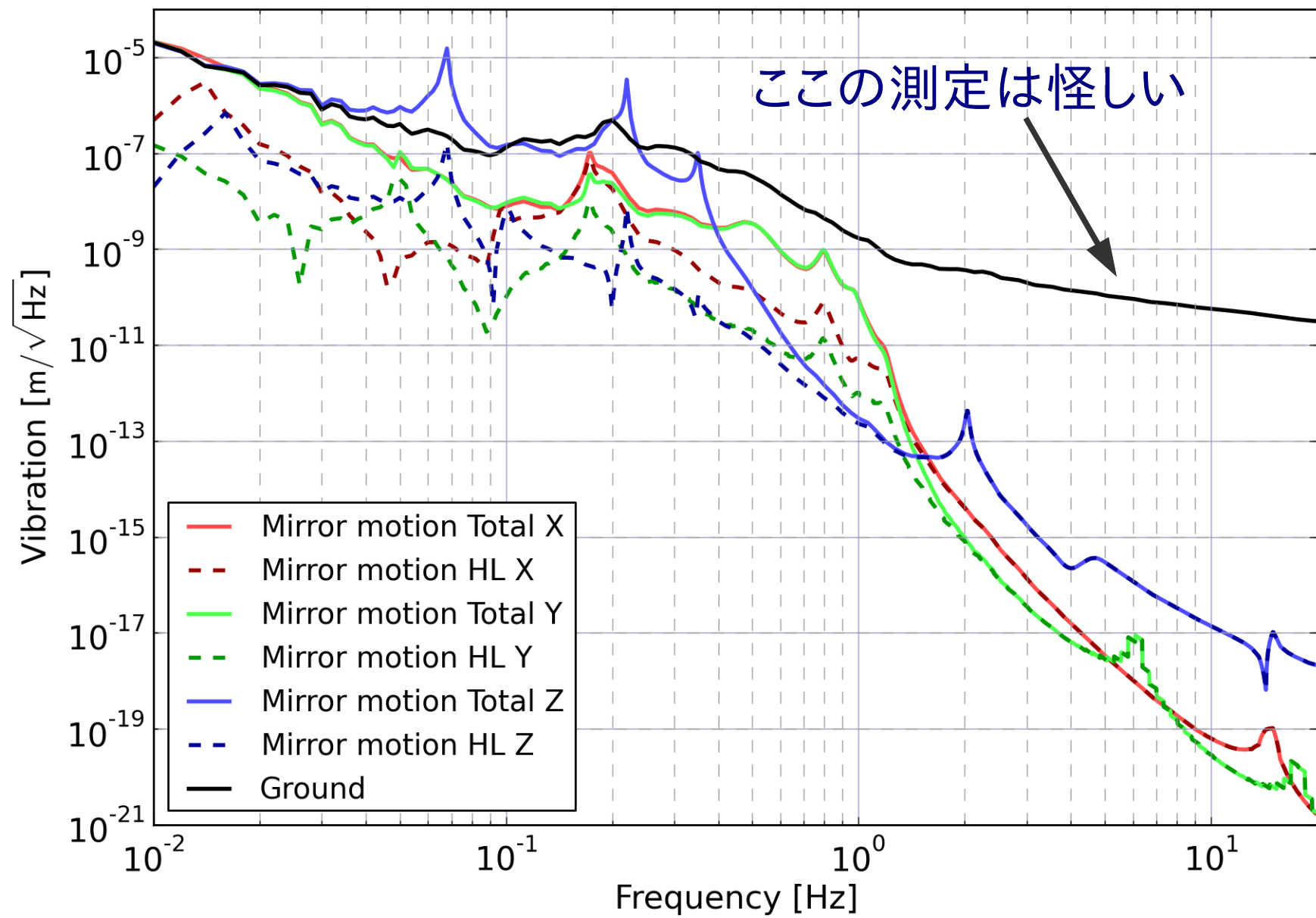
Inline以外の方向の振動はカップリング1%を仮定

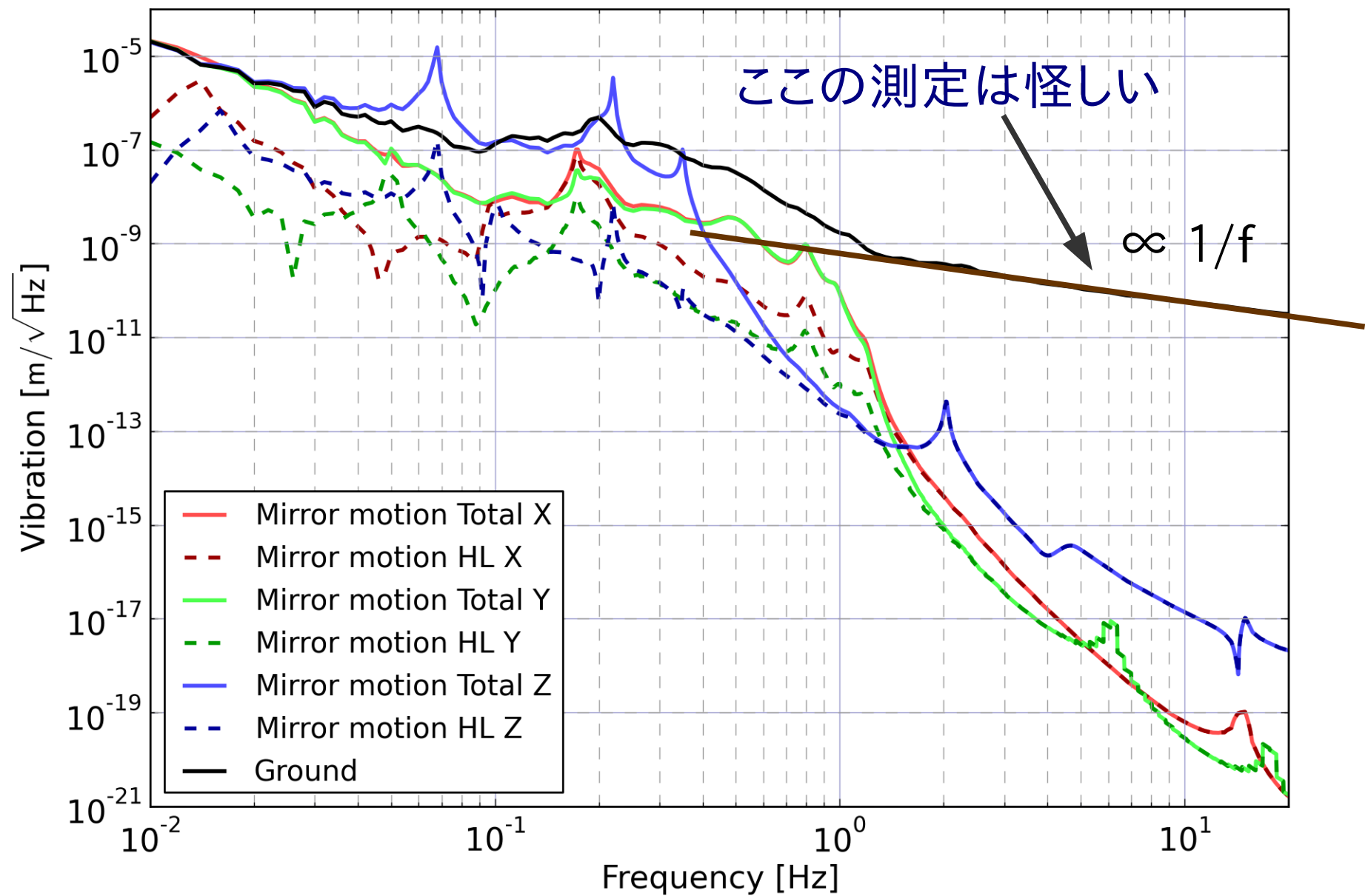


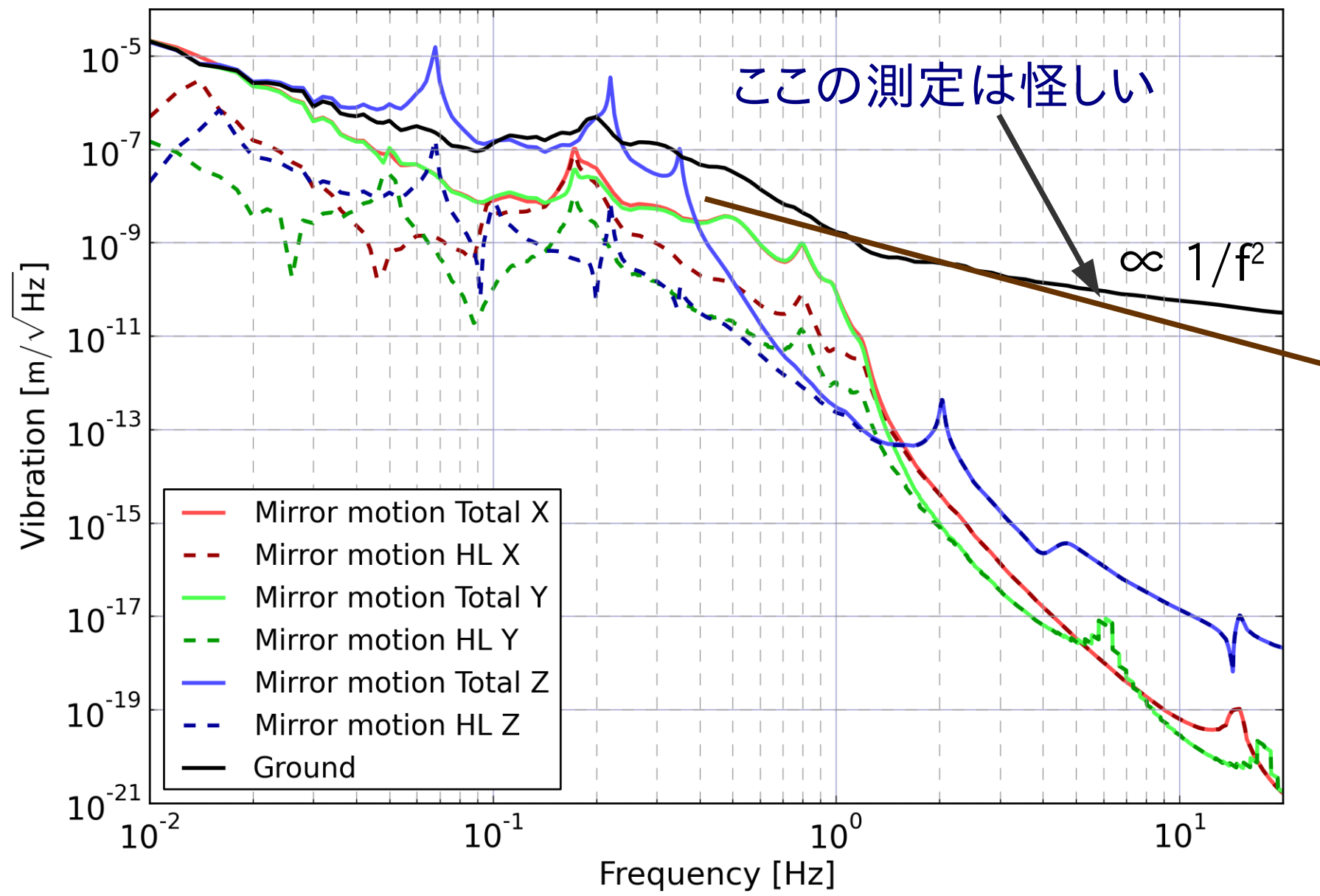
感度への影響

Inline以外の方向の振動はカップリング1%を仮定

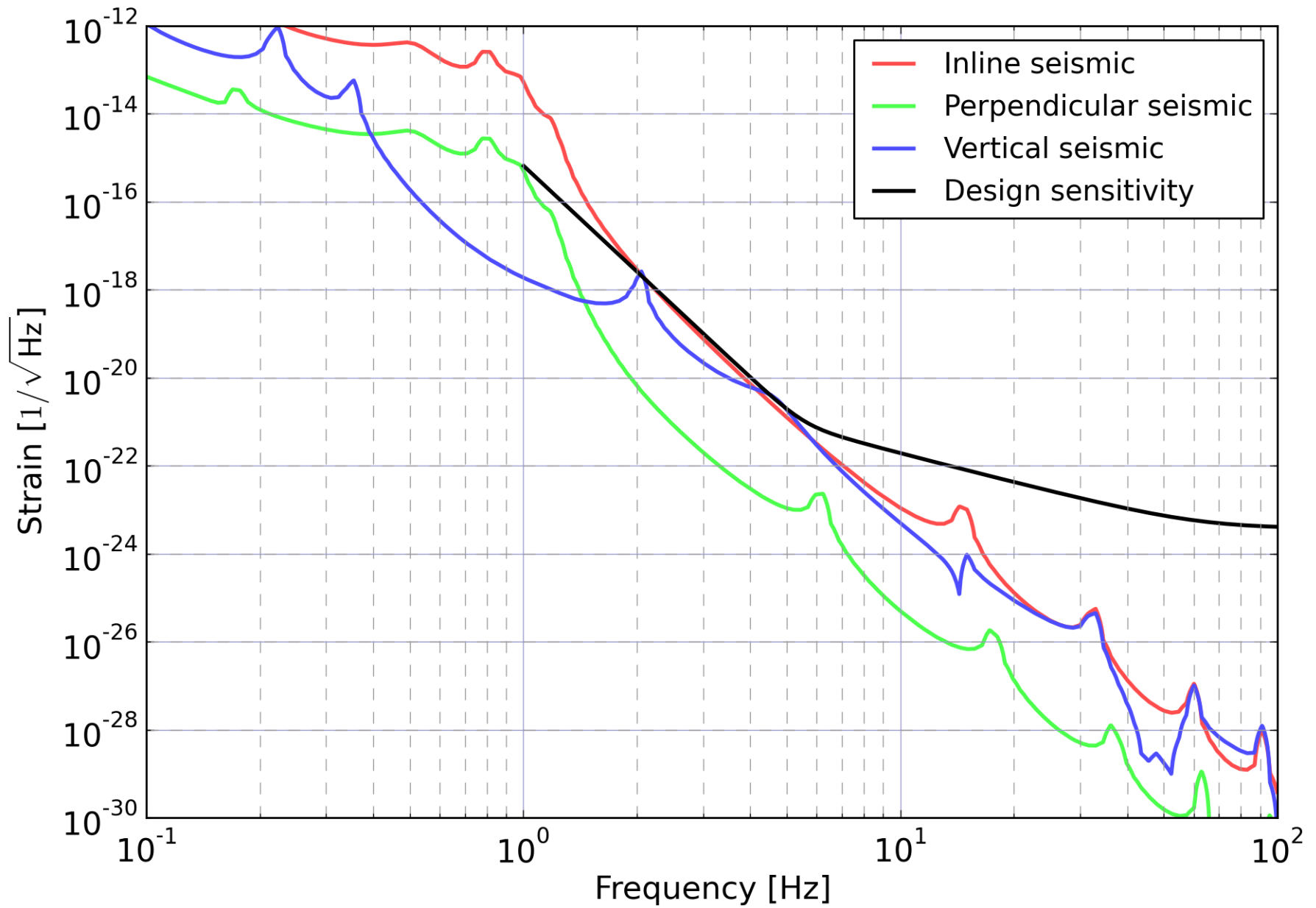




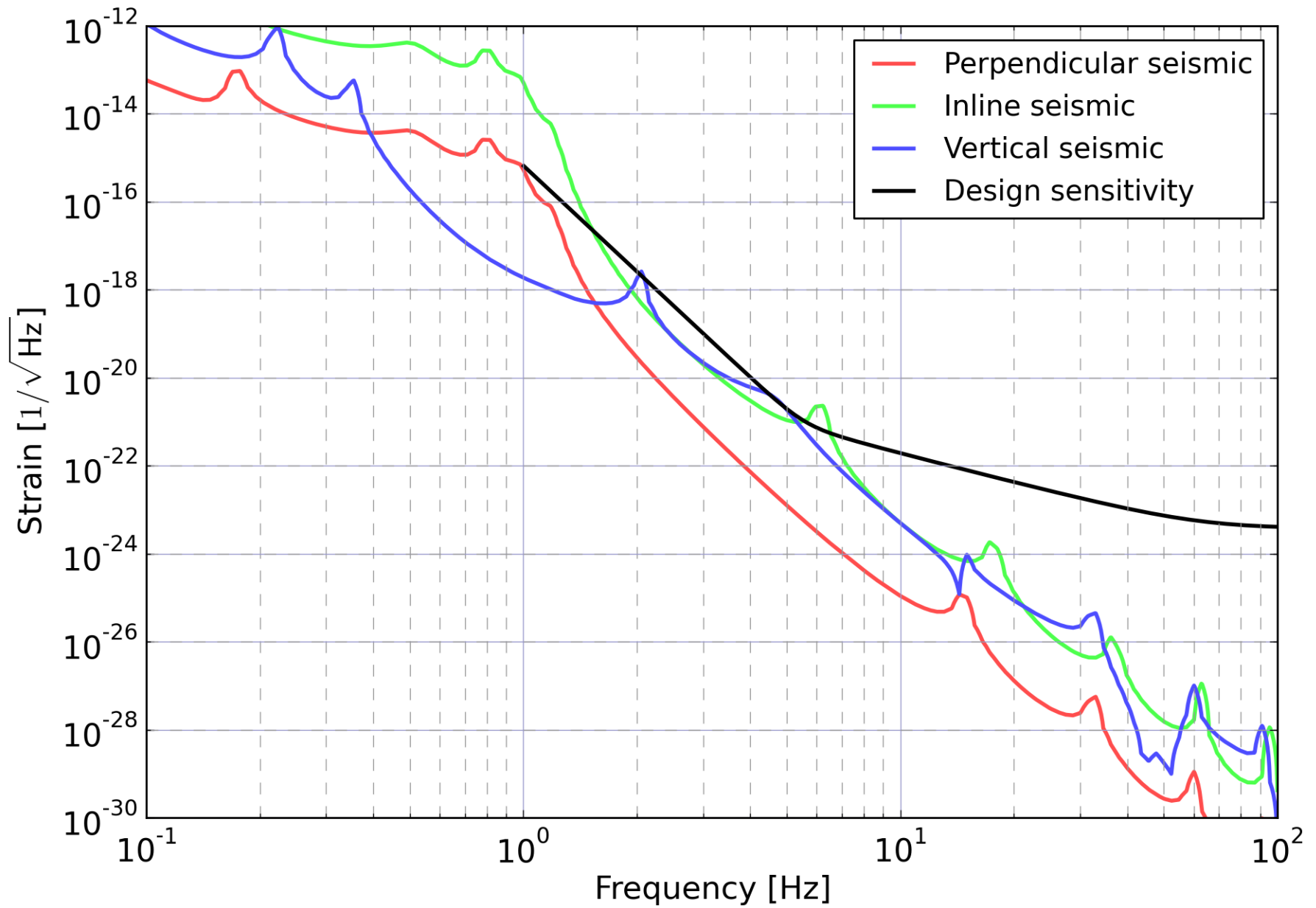




地面振動を $1/f^2$ にすると



インライン方向を入れ替えると



まとめ

- 有限要素法でヒートリンクの振動伝達を計算した
- $1/f$ の地面振動スペクトルでは、10Hz以上でも目標感度ギリギリ下
- $1/f^2$ のスペクトルならば、10Hz以上で2桁以上のセーフティマージンがある

今後

- ヒートリンクの接続位置等を変えて、最適な構成を探す
- よりリアリスティックなプラットフォームのモデルを作る
- 熱伝導をFEMで解いて、冷却能力を確認する

ベンチマーク

ヒートリンク7本モデル

自由度: 265374

体積要素数: 38054

境界要素数: 31088

エッジ要素数: 14414

マシン1 (ラックマウントサーバ)

CPU: Intel Xeon X5680 3.33GHz L3 cache 12MB x 2 (6 core x 2 = 12 core)

Memory: 48GB (DDR3-1333 ECC)

計算時間: 1周波数点当たり32秒 250点で2時間13分

マシン2 (デスクトップ)

CPU: Intel Core i7 Extreme Edition 980X 3.33GHz L3 cache 12MB (6 core)

Memory: 12GB(DDR3-1333)

計算時間: 1周波数点当たり35秒 250点で2時間25分

マシン3 (ラップトップ)

CPU: Intel Core2Duo T9900 3.06GHz, L2 cache 6MB (2 core)

Memory: 8GB

計算時間: 1周波数点当たり116秒 250点で8時間