

有限要素解析によるLCGTヒートリンク の防振性能評価

Finite element analysis Hitorinku LCGT
Evaluation of damping

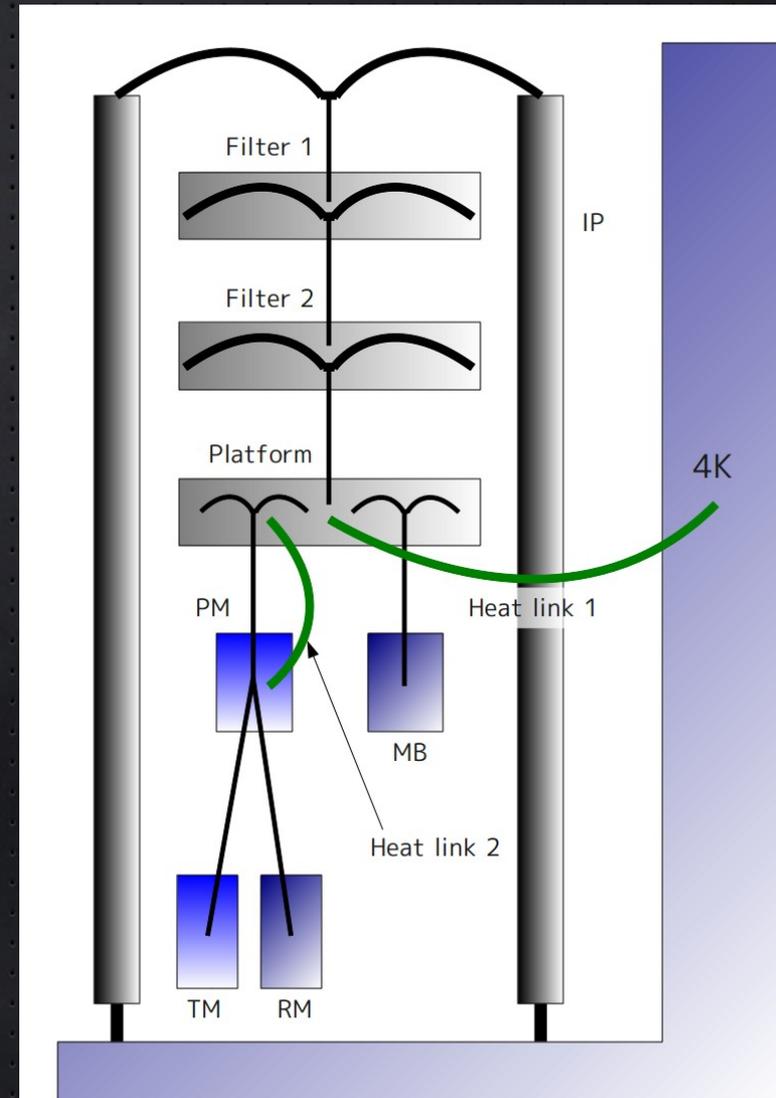
LCGT f2f meeting 2010/6/16 @ICRR
東大理 麻生洋一

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

Overview

- * Connect LCGT heatlink for suspension in the heat bath
- * Vibration Contamination from heatlink is a problem
- * Contamination vibration from heatlink so far only a simple spring model Has not been fully calculated yet
- * We conducted an analysis using the finite element method



方法

method



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

Finite element
analysis software:
COMSOL
Multiphysics
(available in a
single physics)

ジオメトリ

Geometry

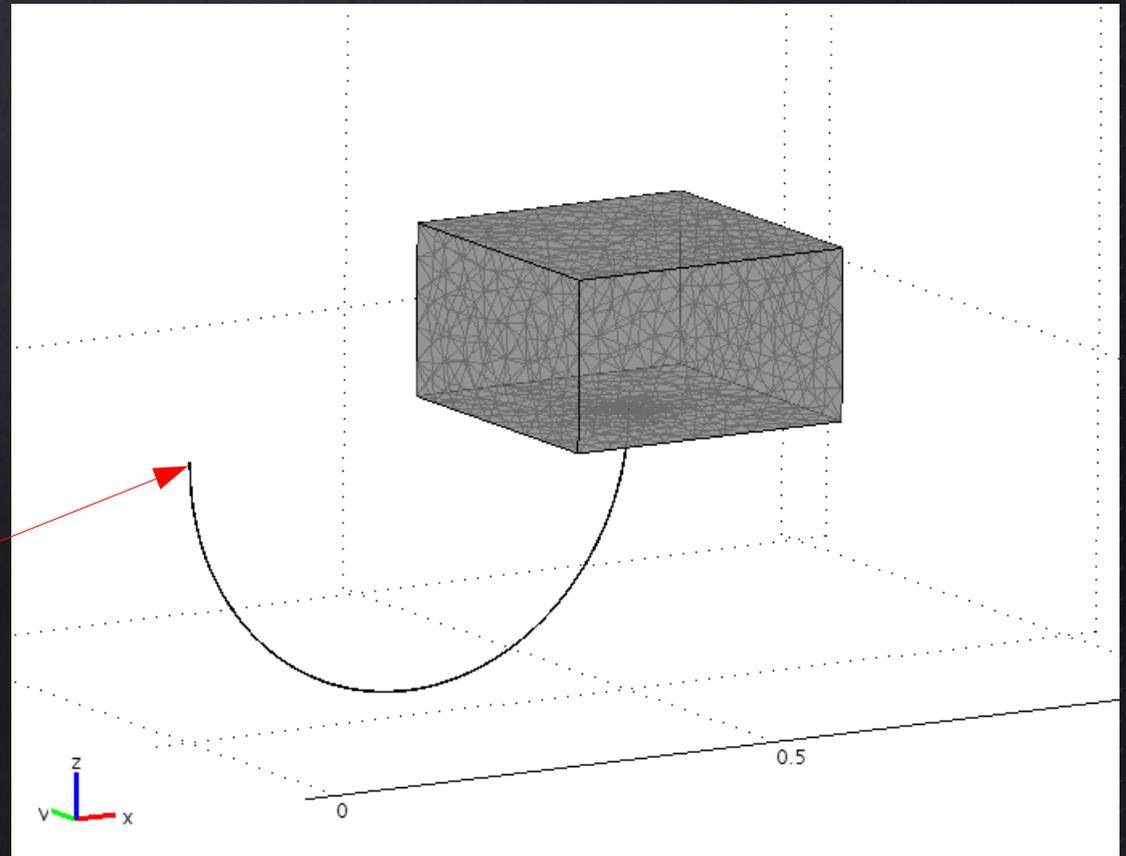
- 半円形のヒートリンク

- 曲率半径 25cm
- ワイヤ径 1mm
- 純アルミニウム (E = 68GPa)
- 損失角 $\phi = 10^{-4}$
- 120kgプラットフォーム

- 120kgのプラットフォーム

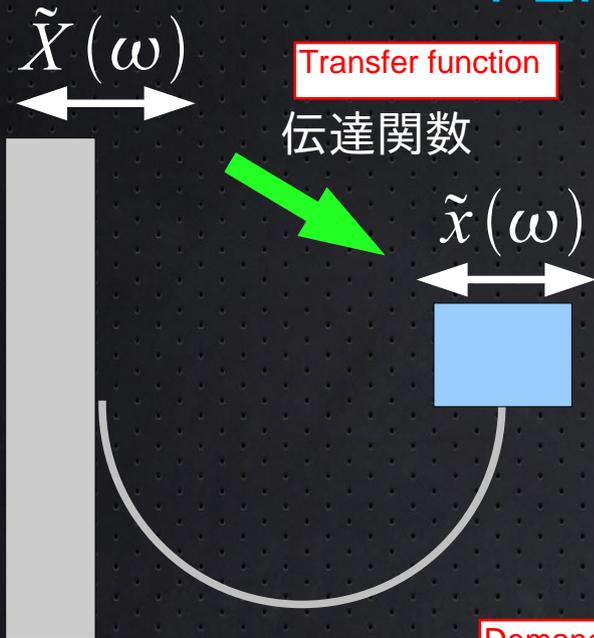
低温壁に固定

Fixed to the
thermal shield wall



FEMによる伝達関数計算

FEM calculation of transfer function



Transfer function

伝達関数

周 Frequency response analysis 析

一般の一次元線形微分方程式

線 Linear differential operator

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

Demanded function (displacement)

求める関数(変位)

Source (power)

ソース(力)

Harmonic source

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

consistent Solution

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

Time-independent differential equations

時間に依存しない微分方程式

Solved by finite element analysis in static case

有限要素法の静解析で解ける

Resulting:

得られるもの: $u_0(x)$ 周波数 ω における振動プロフィール

Vibration spectrum at frequency ω

FEMによる伝達関数計算

FEM calculation of transfer function

$\tilde{X}(\omega)$



$\tilde{x}(\omega)$

ここで問題

The problem

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

The power source analysis assumes a structural loss ?? (Force)
Displacement of the vibration input to ground can

そこでひと工夫

Then angular motion

- 座標系を動かす Changing coordinate system
- 振動する壁を静止にする See things from a moving coordinate system with a vibrating wall



Still

静止



effective power

見かけの力

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



- 壁は静止
- すべての
- 見かけの

Stationary wall
effective force due to acceleration acts on all objects
The effective power of the source term into the right-hand side

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

これで周波数解析ができる

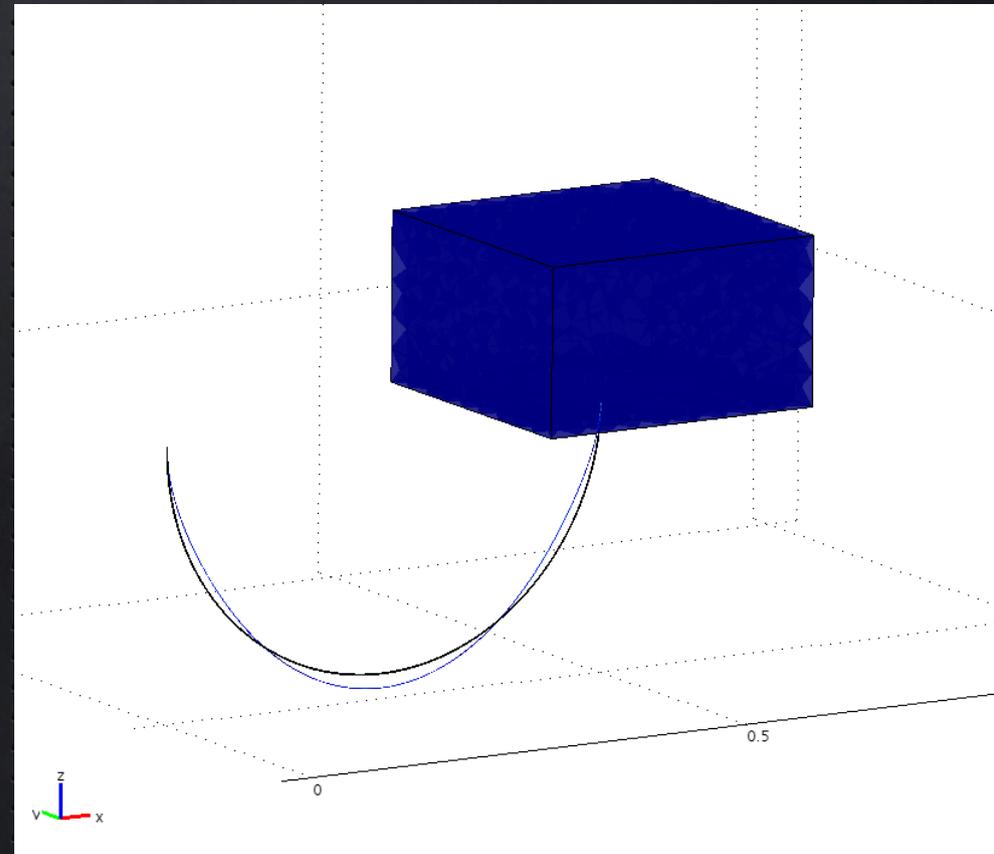
This frequency analysis can be ???

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

Check consistency with the theoretical (model)

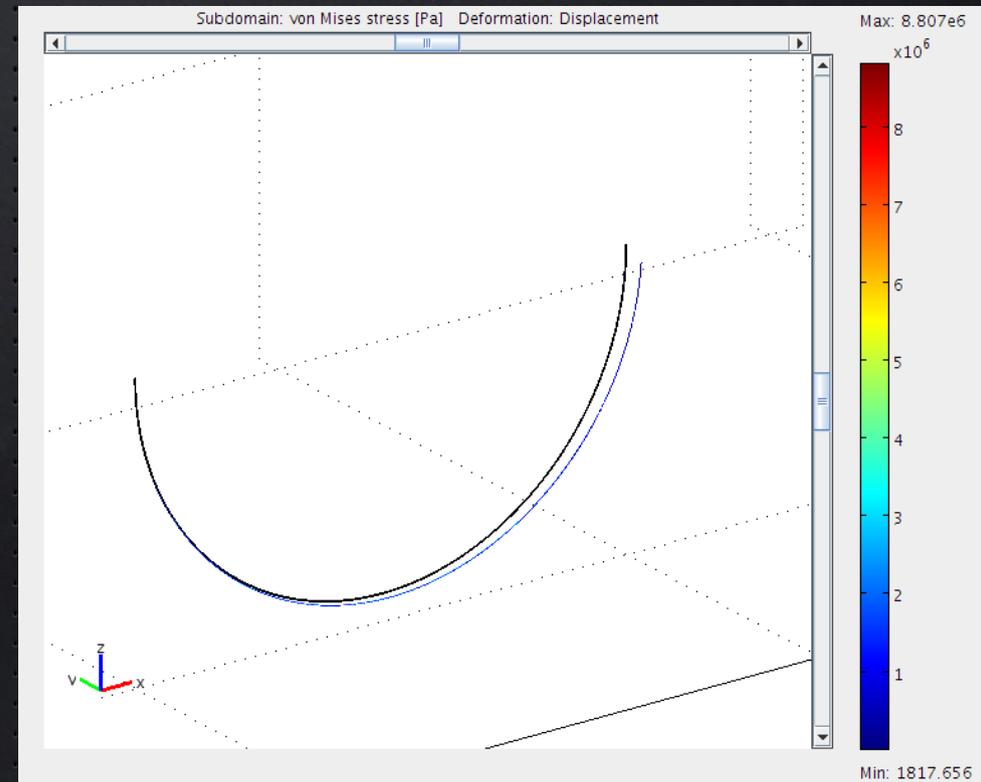
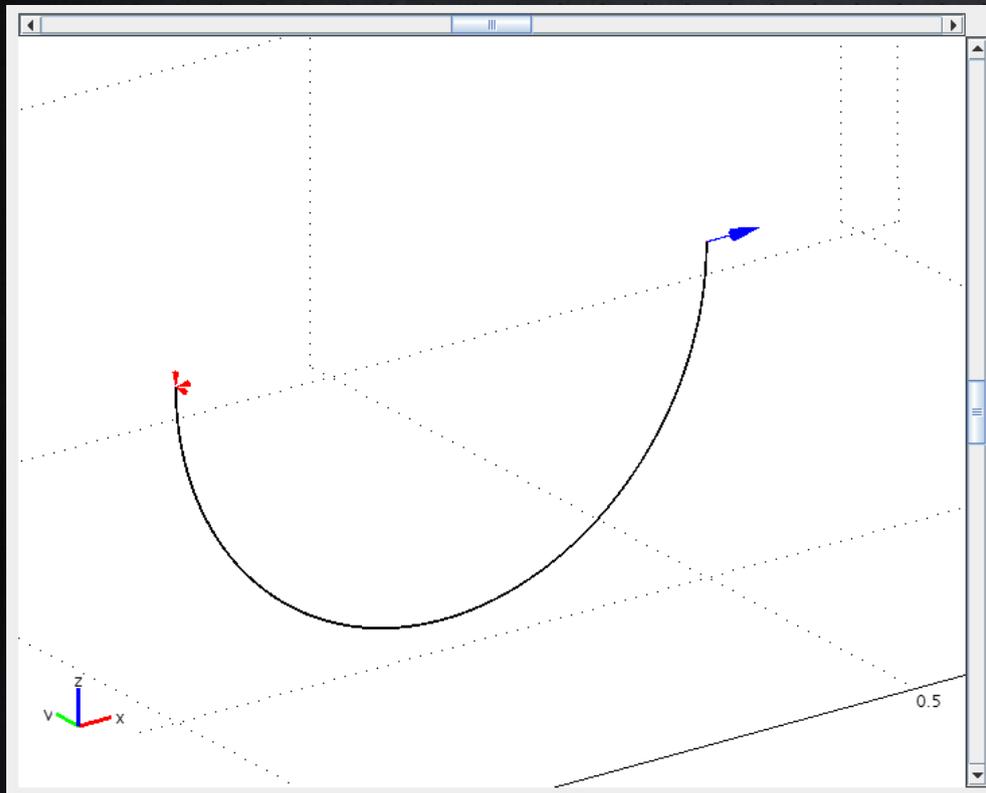
バネ係数

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

pring constant

theory

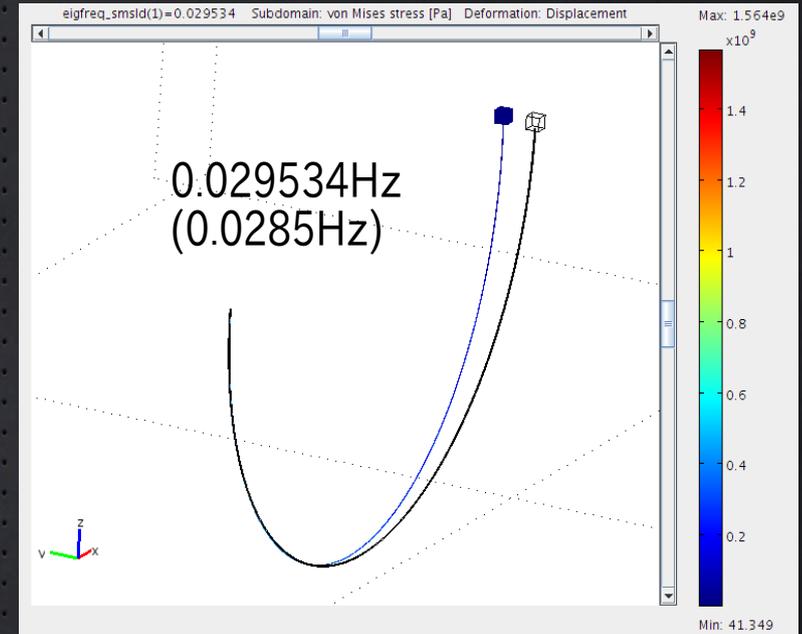
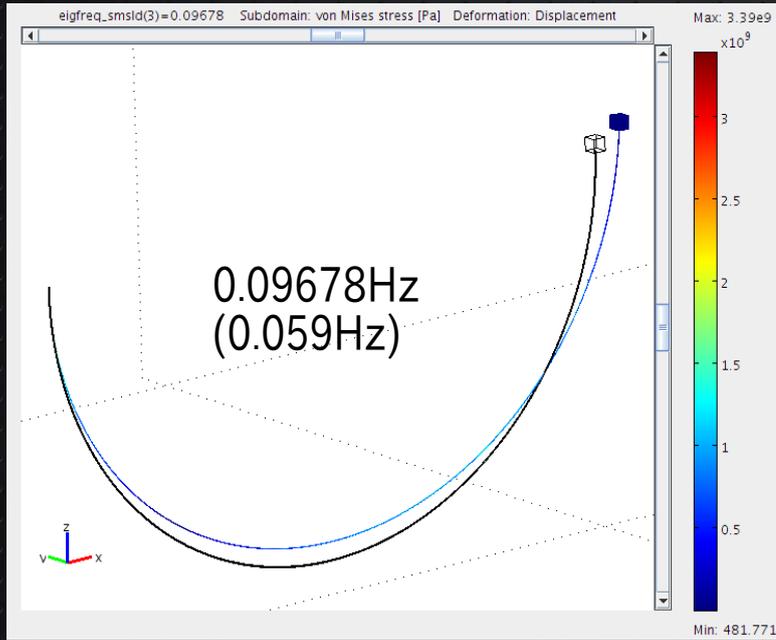
	理論	FEM
Kx [N/m]	0.136	0.137
Ky [N/m]	0.051	0.032
Kz [N/m]	0.045	0.046



固有振動モード

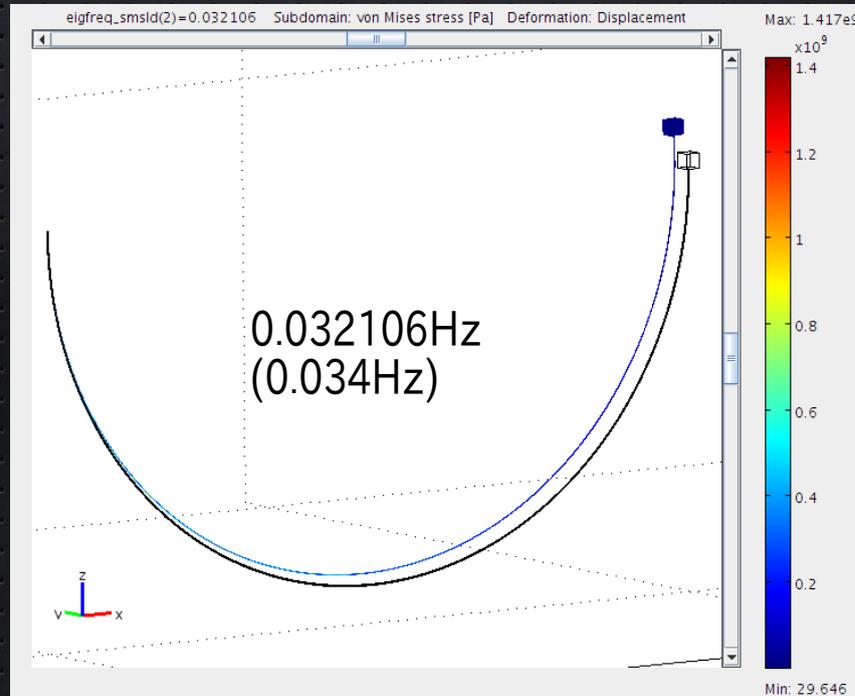
1kgのマス先端に取り付け
1kg mass attached to its tip

Natural vibration modes



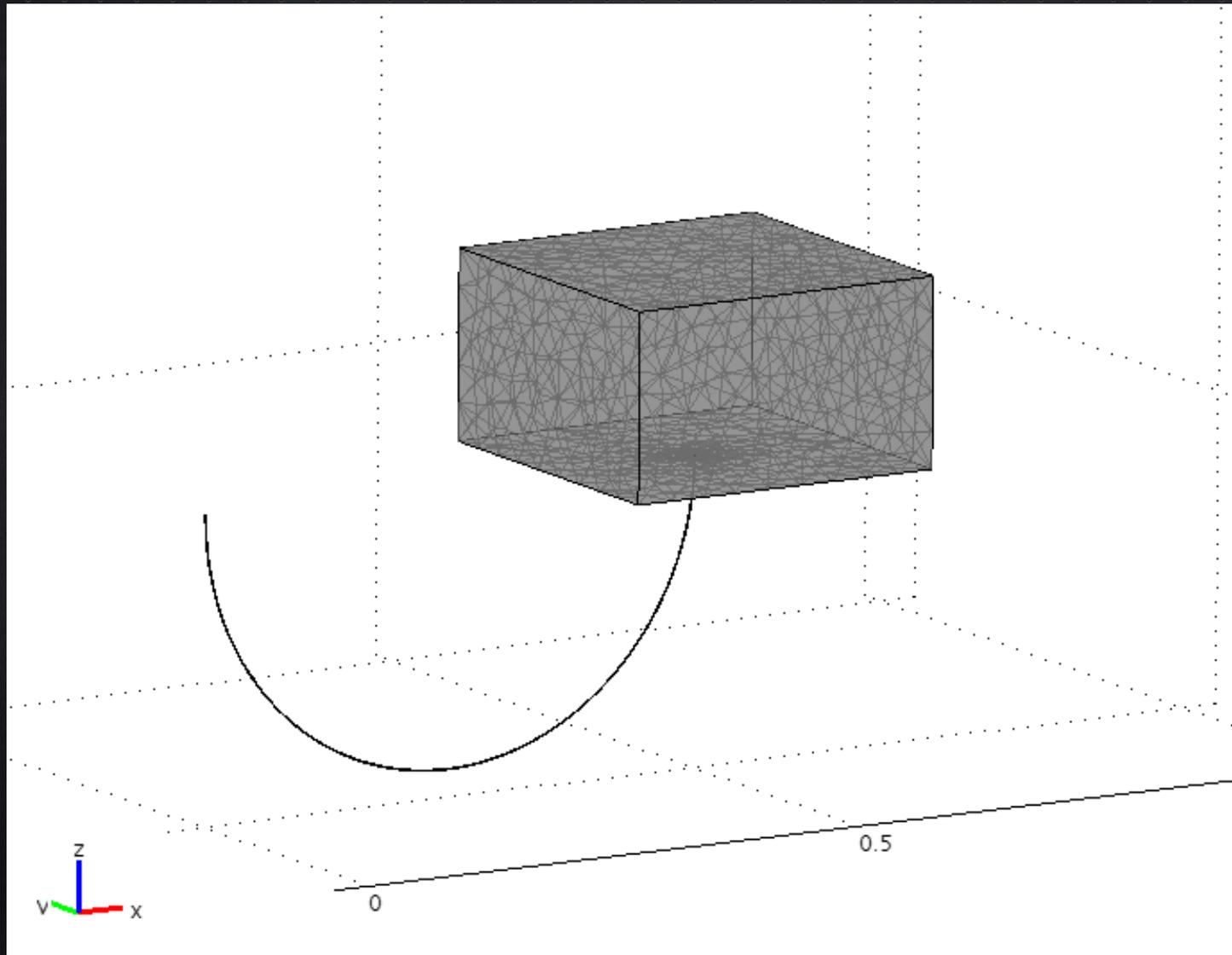
()内はバネ係数から予想される共振周波数

(???) Is expected from the spring constant
The resonant frequency



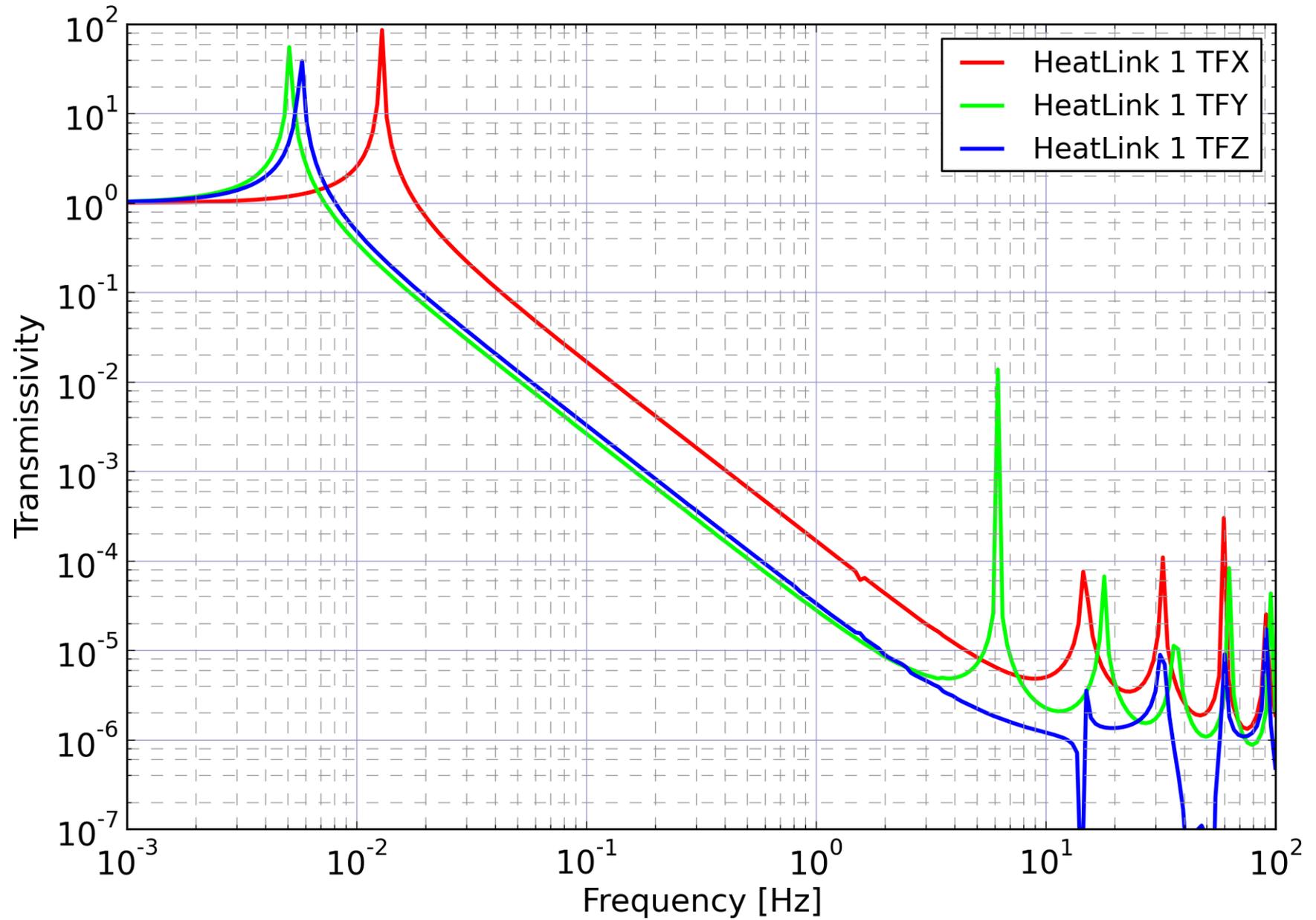
ヒートリンカー一本

a single heat link



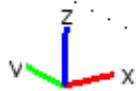
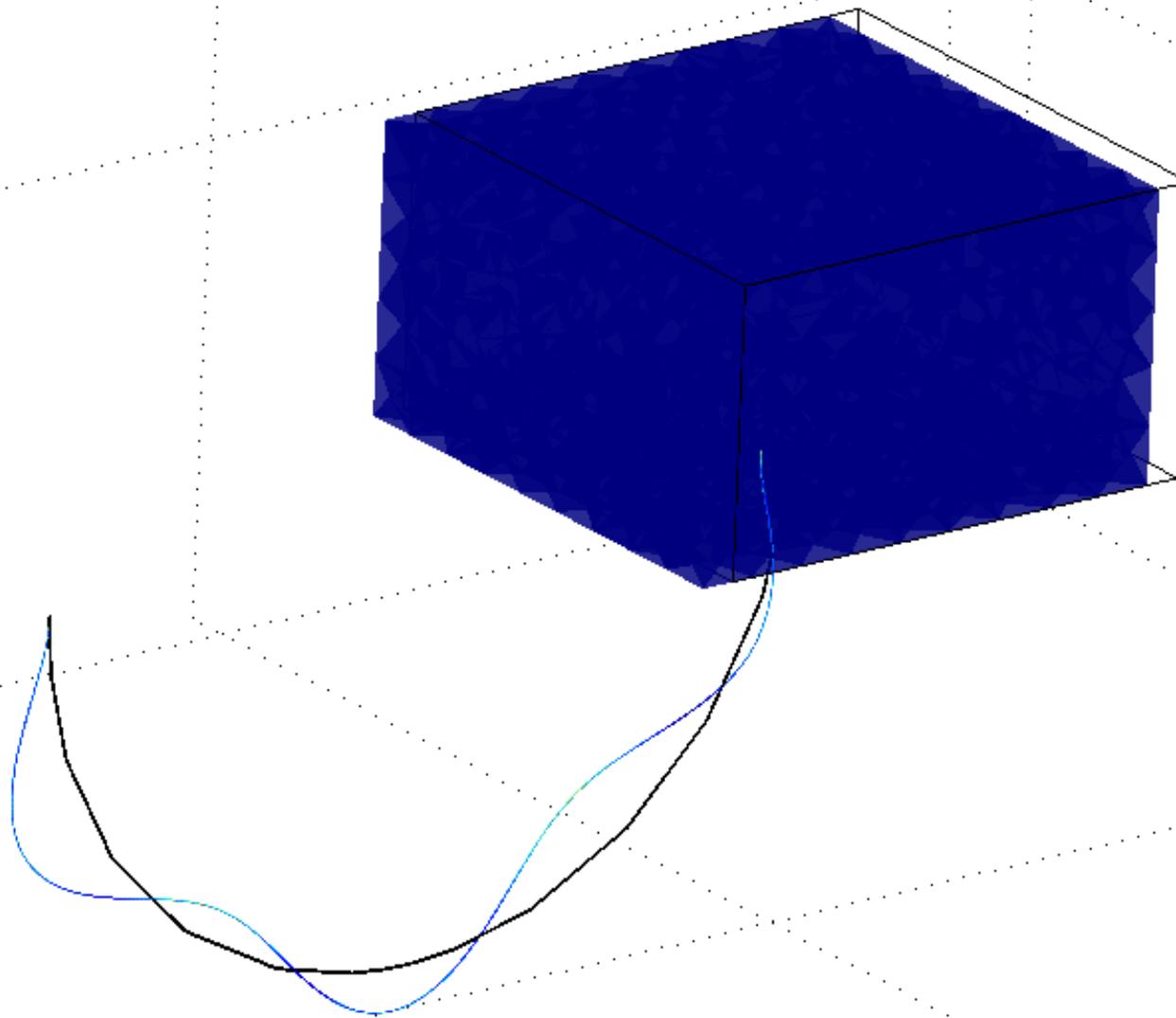
伝達関数

Transfer function



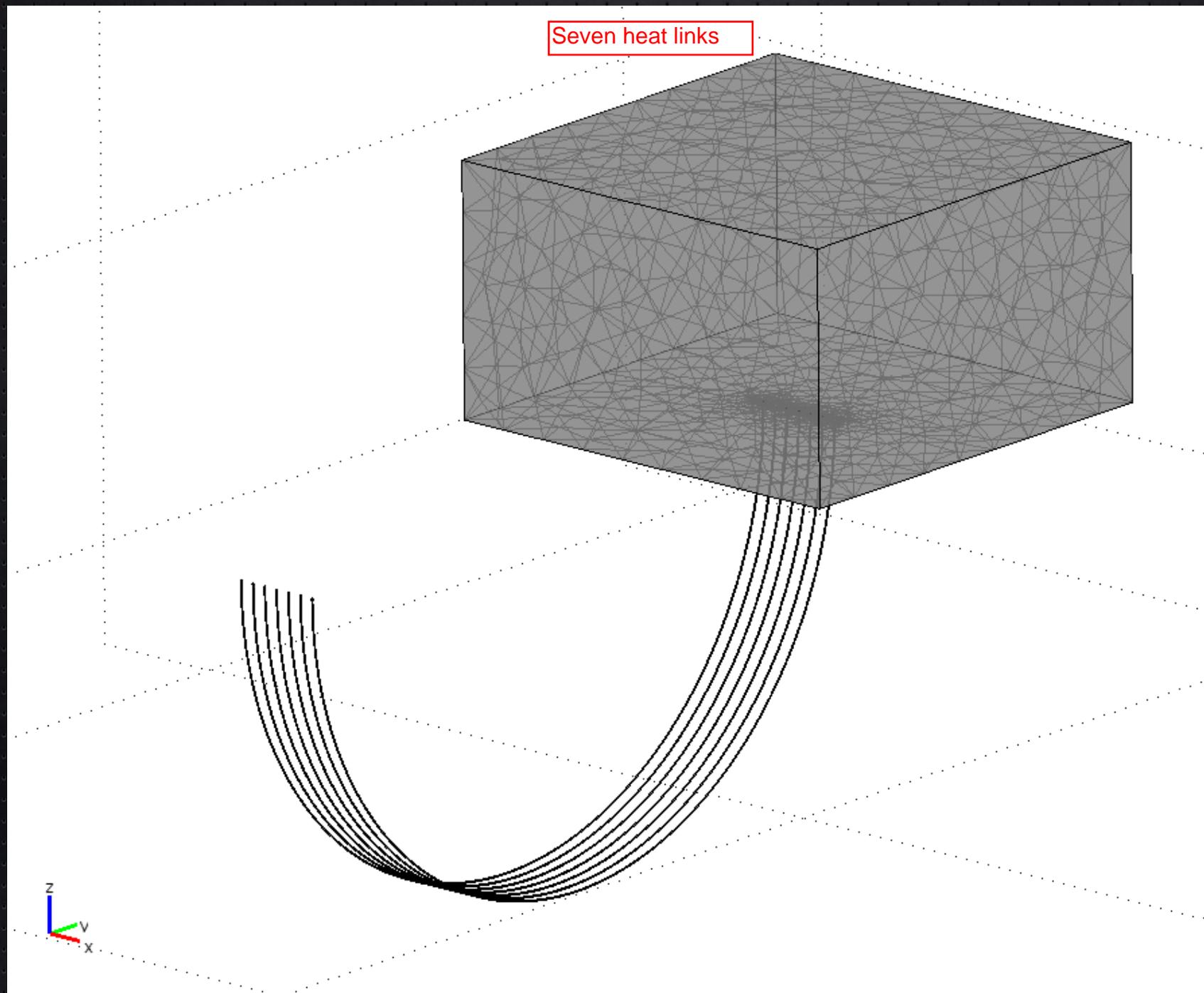
ワイヤーの共振

wire in a
Resonance



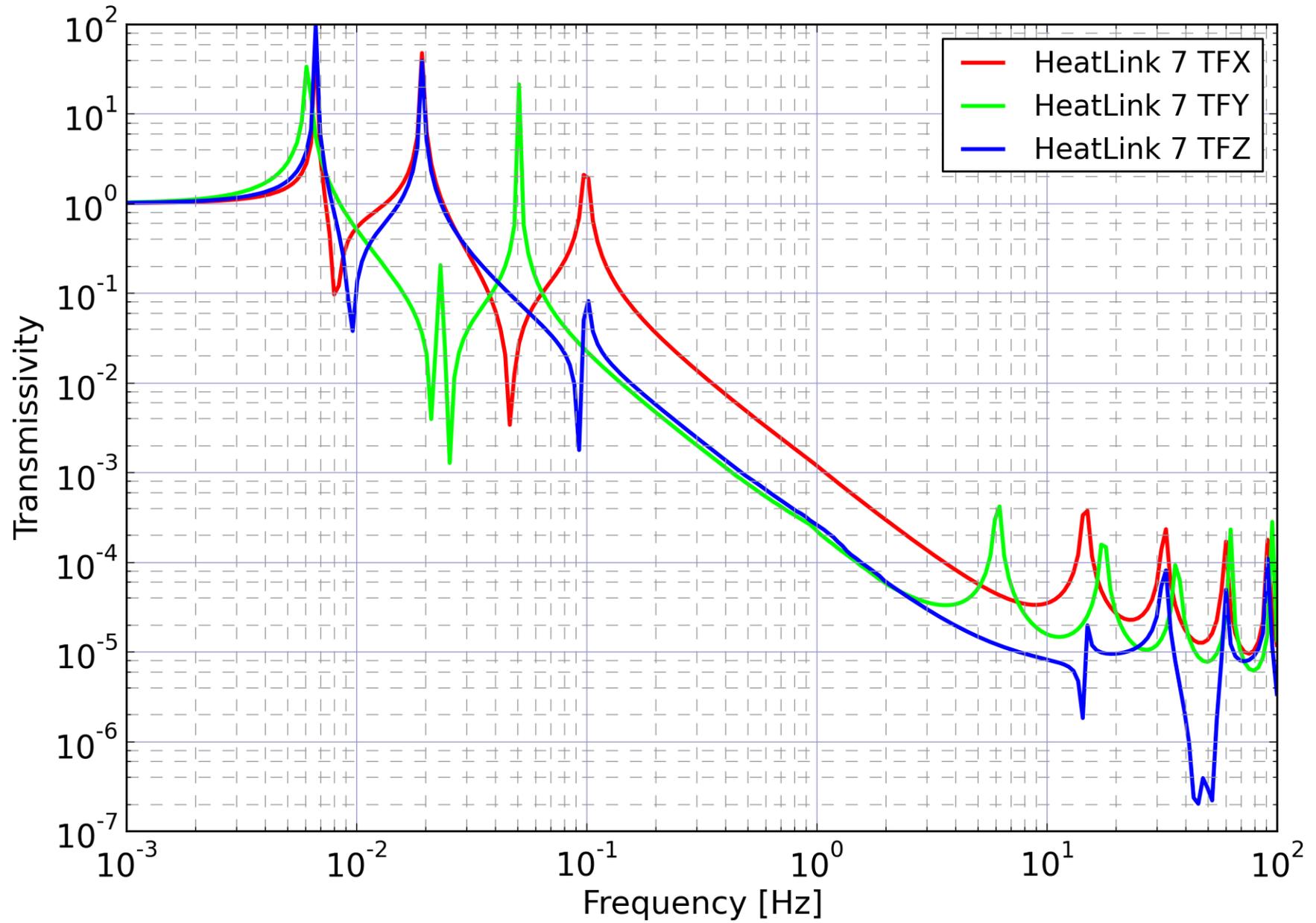
0.5

ヒートリンク7本



伝達関数

Transfer function



SASへの接続

Connecting to SAS

- 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

Takahashi made the Matlab mass model of SAS
Connect the transfer function of the FEM calculation heat link

Equations of motion of the platform

プラットフォームの運動方程式

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

他段からの寄与

Fourier transform
フーリエ変換

Other contributions from the (upper) stages

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

$\tilde{K}_{HL}(\omega)$ を求めればよい。

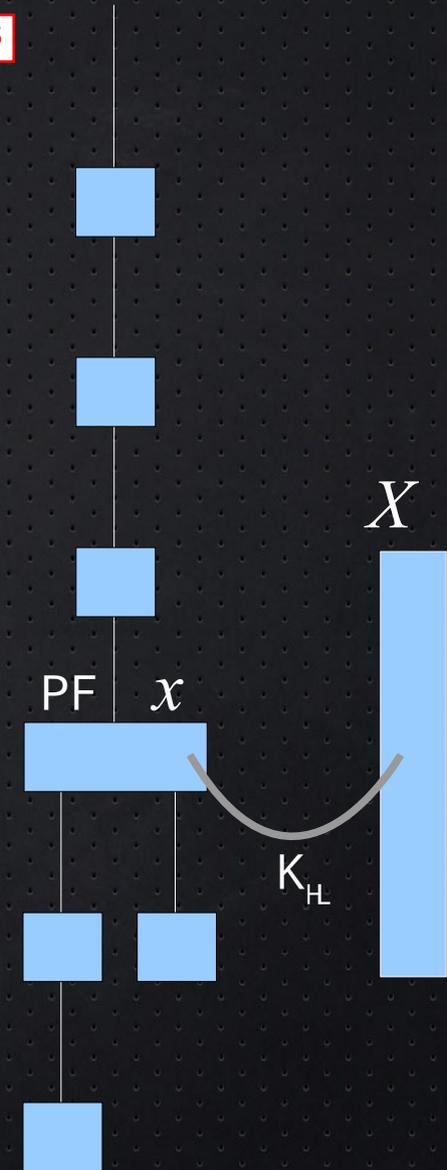
We should find a.
HL-mass equations of the motion freedom ???

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

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

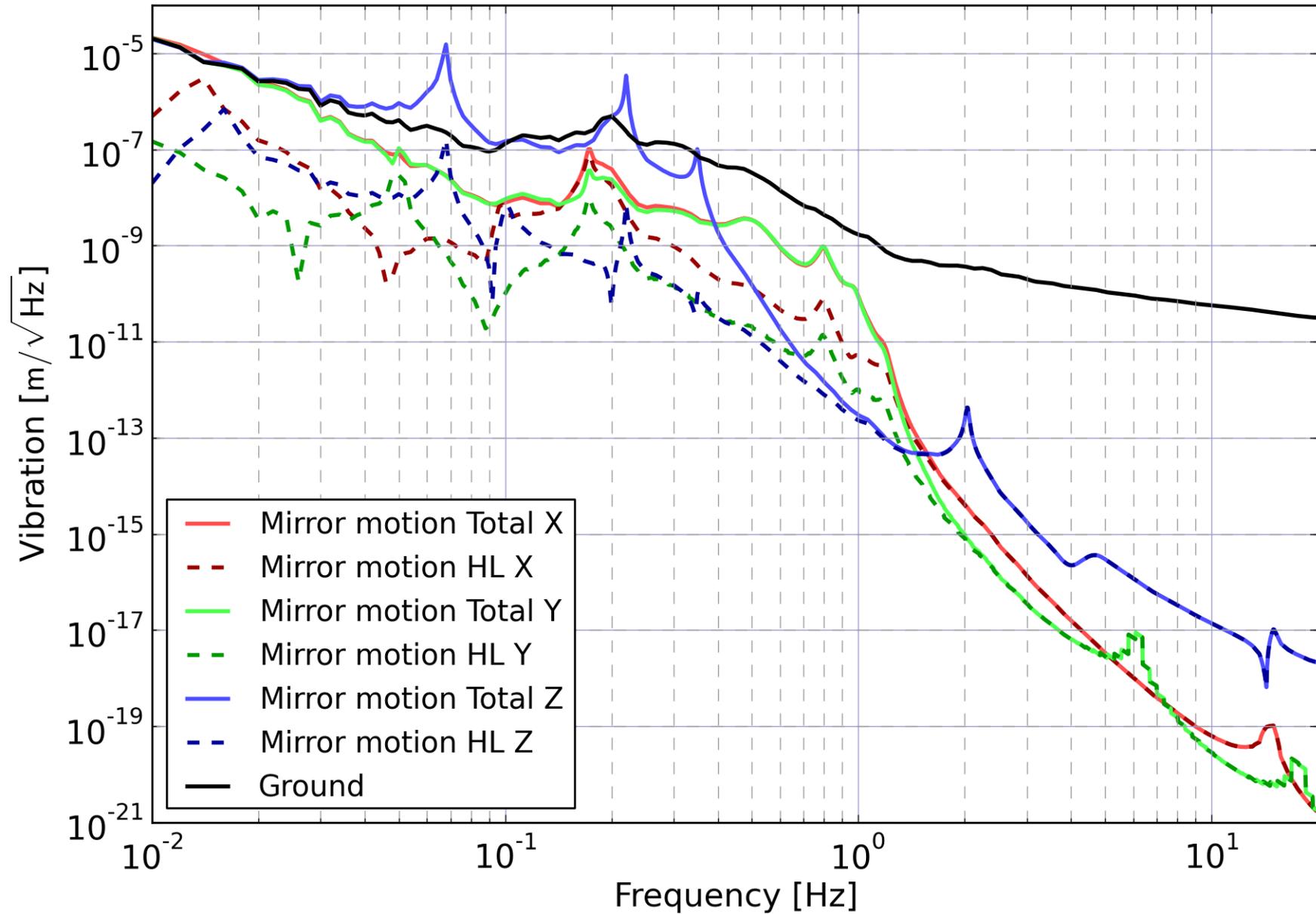
Taken together with the Fourier transform:

$T \equiv \frac{\tilde{x}}{\tilde{X}}$: 伝達関数
: transfer function



HL付きSASの防振性能

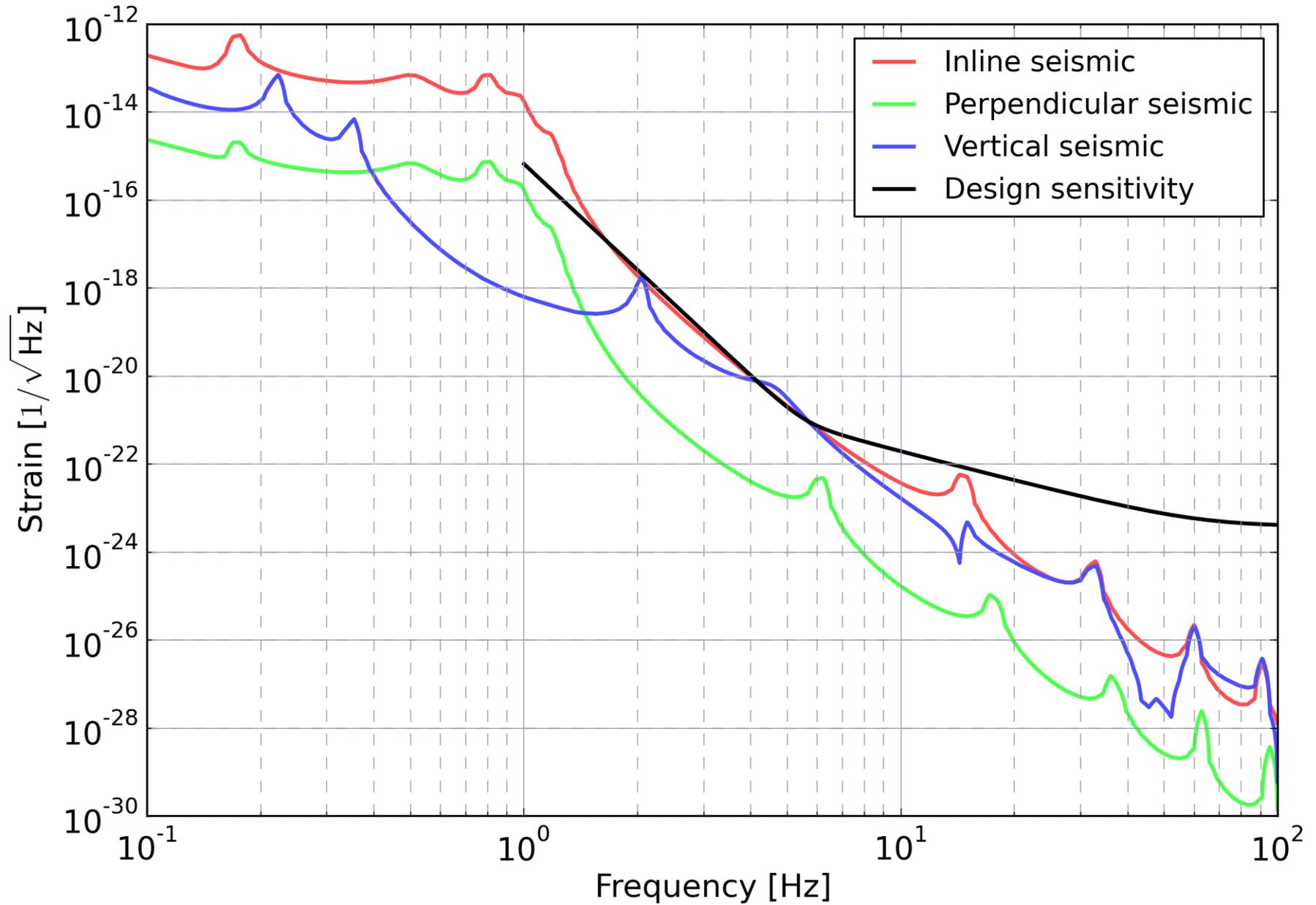
anti-vibration
performance of
SAS With HL



感度への影響

Impact (on) sensitivity
Inline non-directional vibration% assuming a coupling

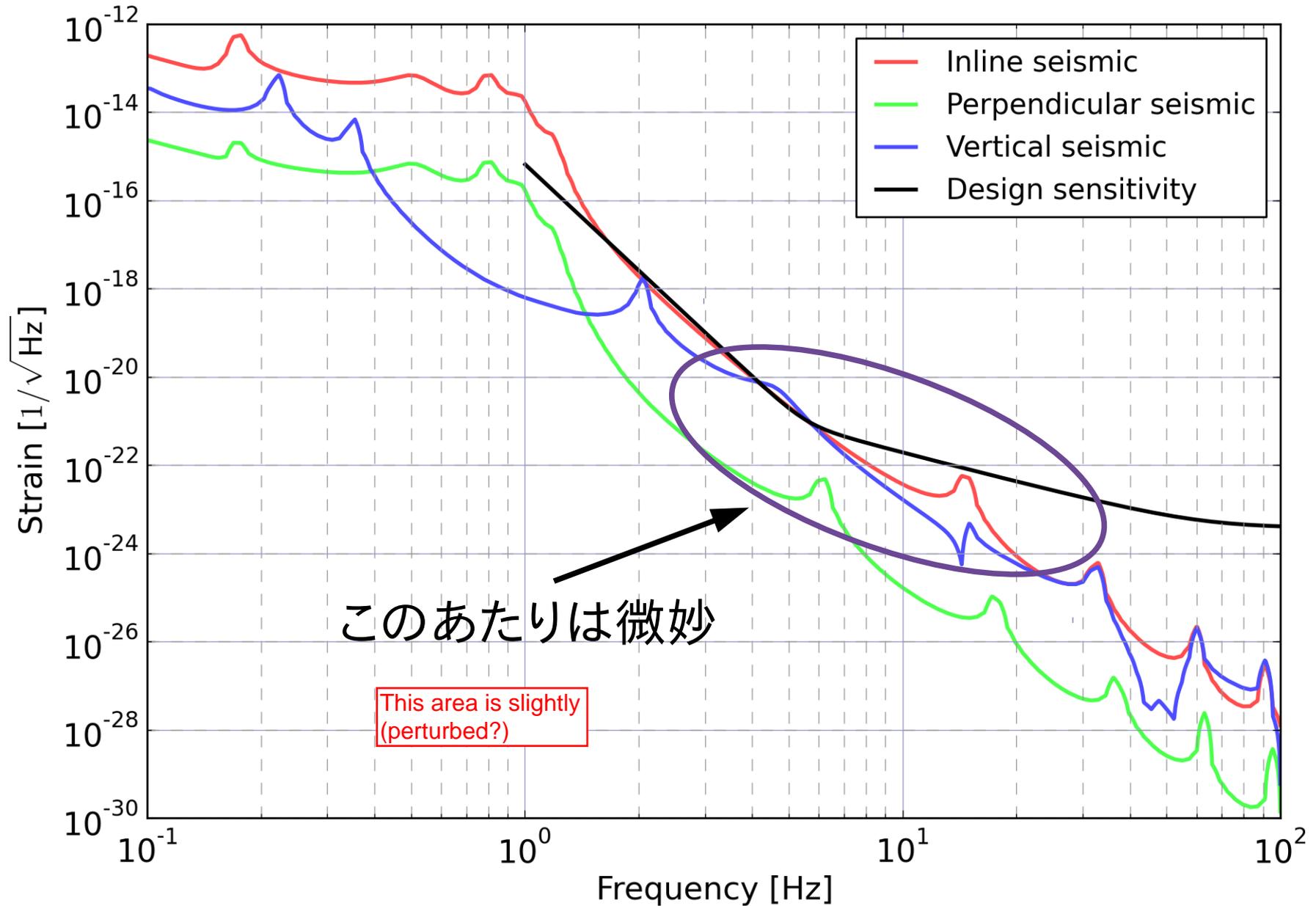
Inline以外の方向の振動はカップリング1%を仮定



感度への影響

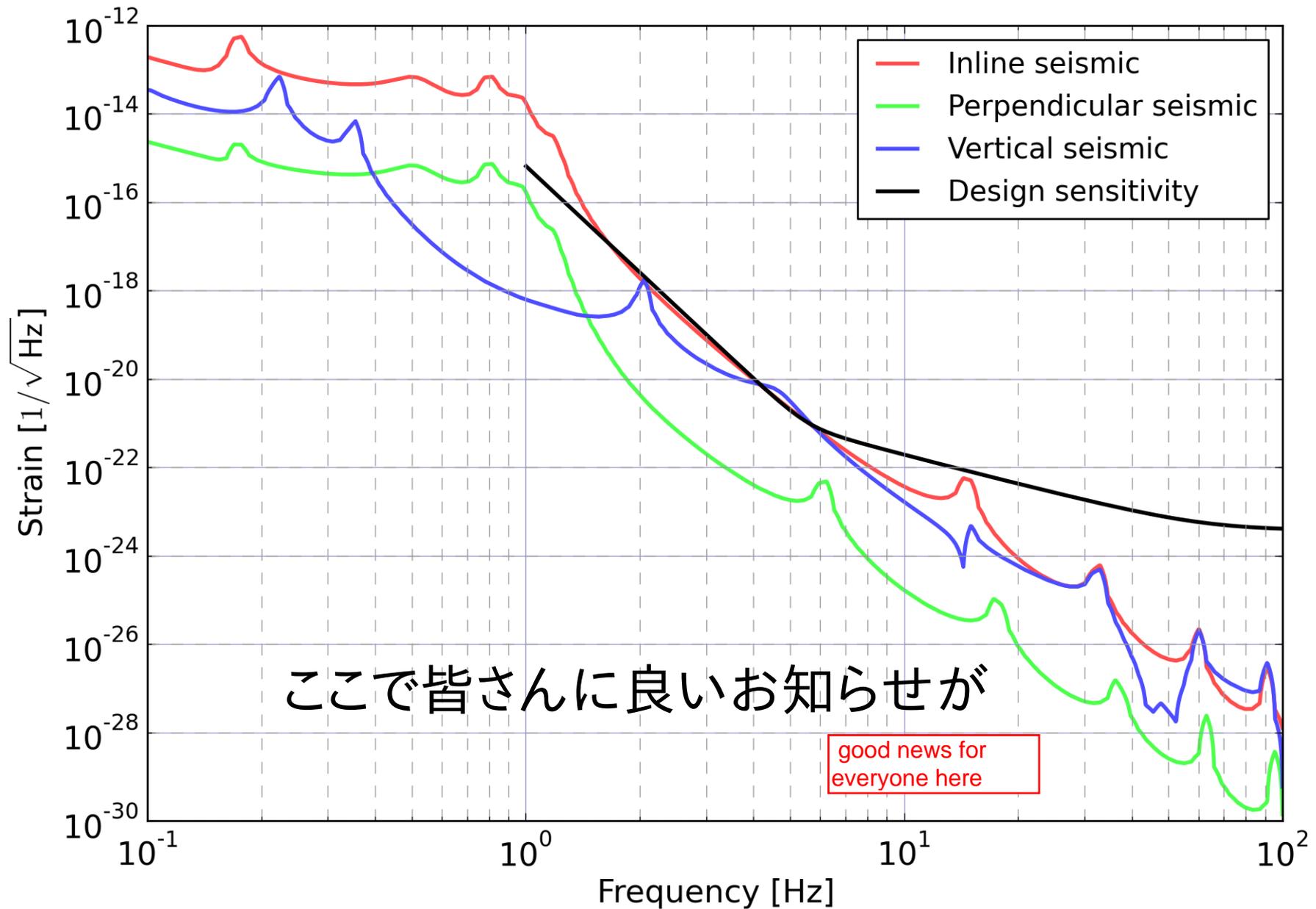
Impact (on) sensitivity
Inline non-directional vibration% assuming a coupling

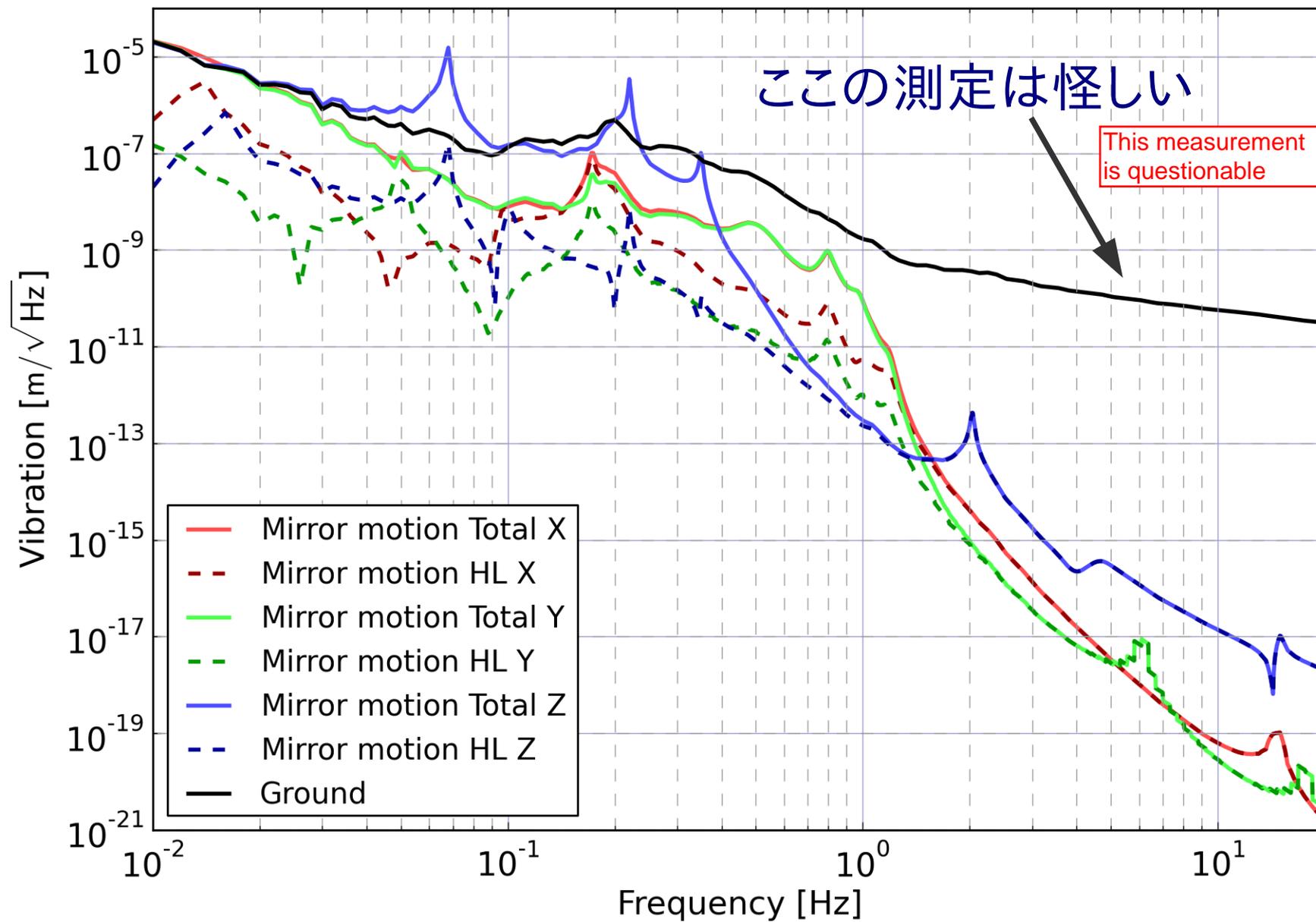
Inline以外の方向の振動はカップリング1%を仮定

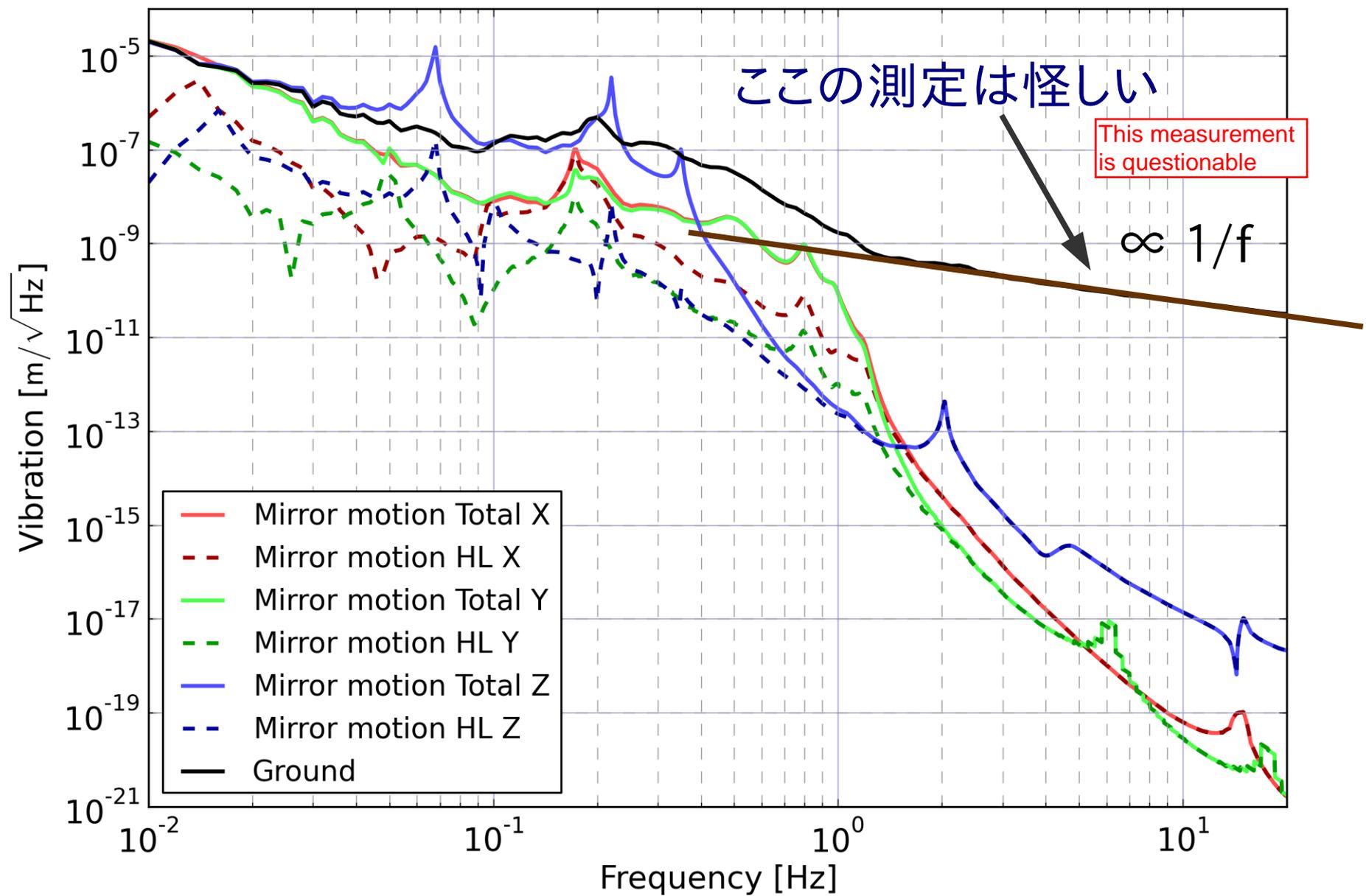


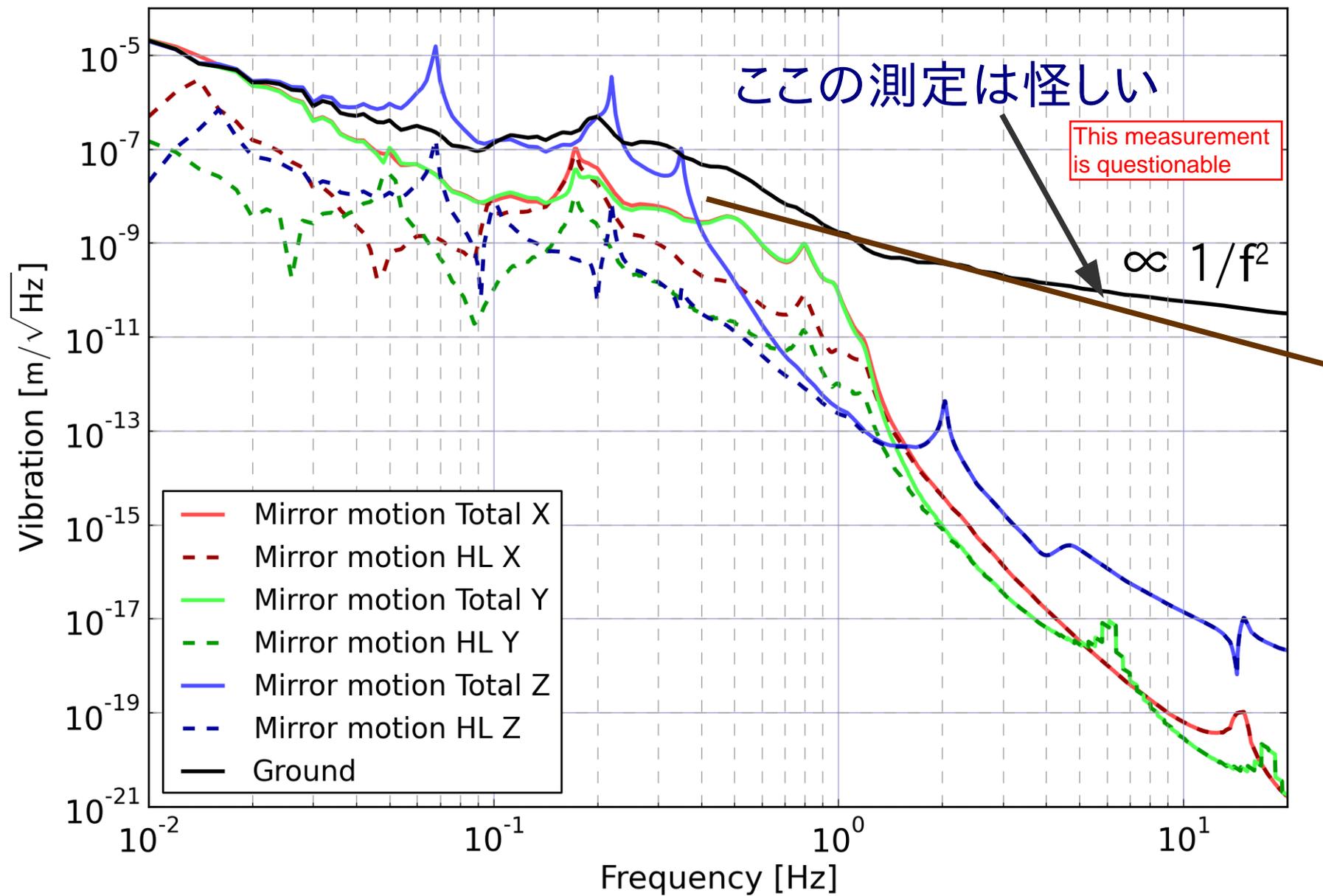
感度への影響

Inline以外の方向の振動はカップリング1%を仮定



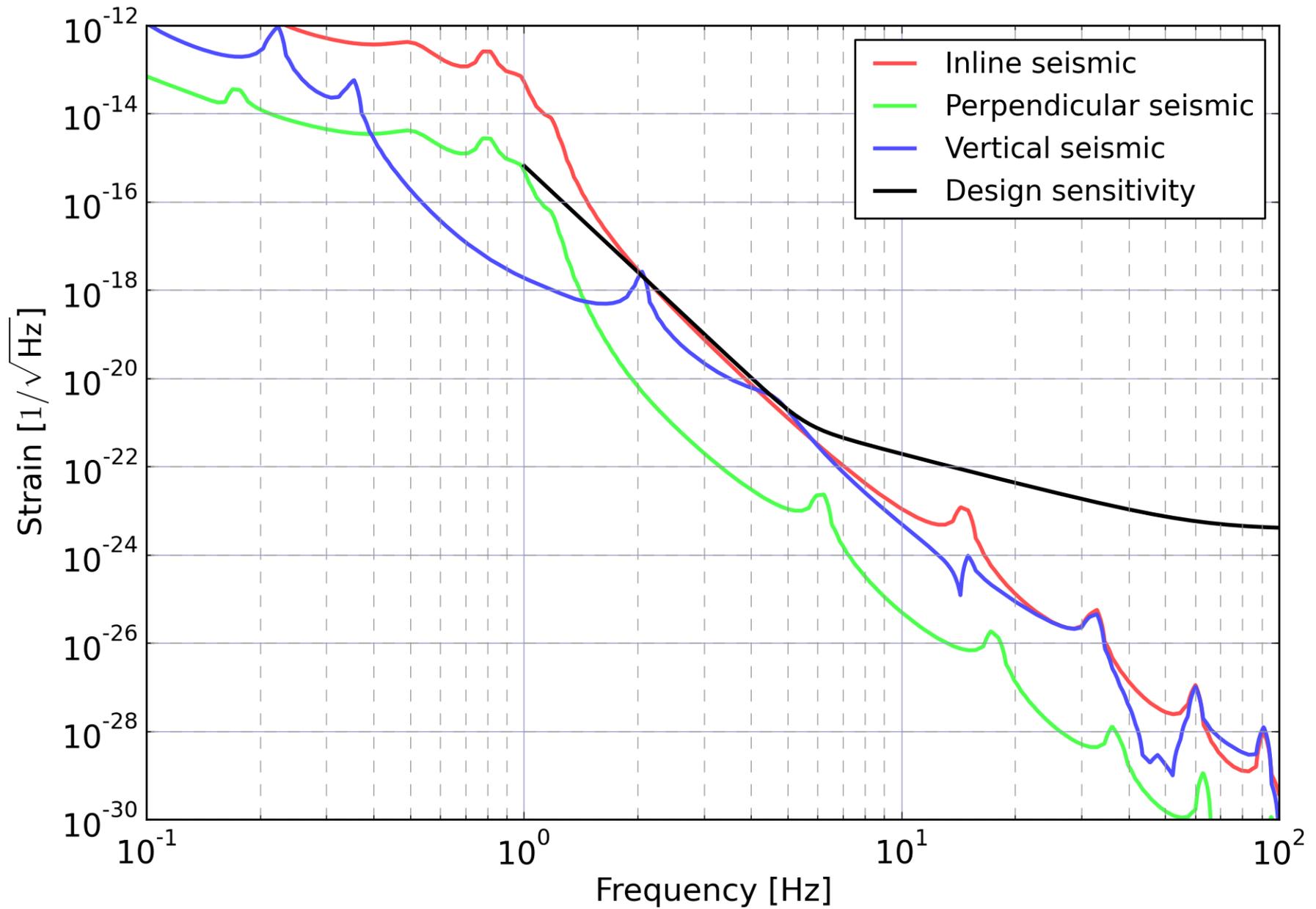




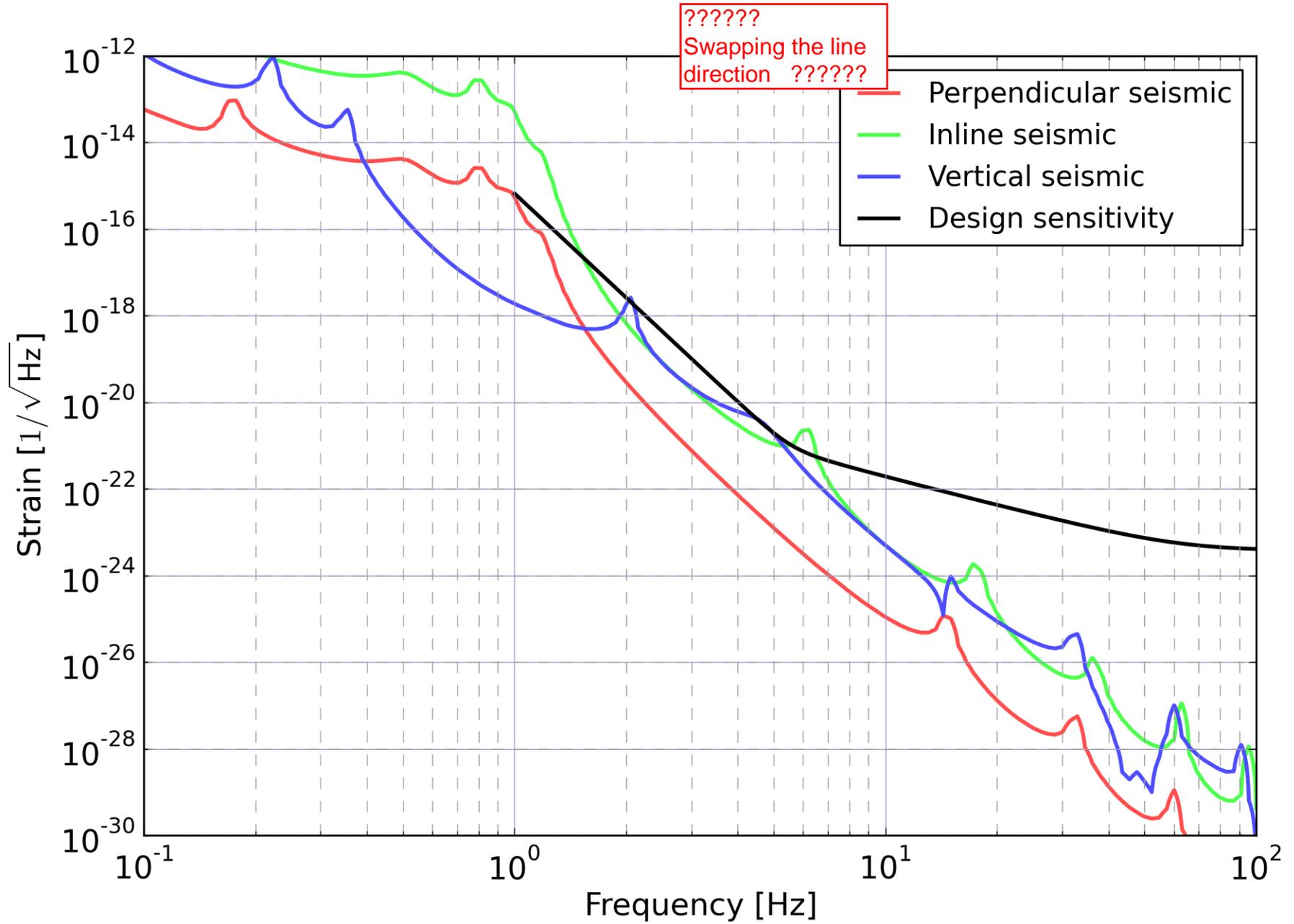


地面振動を $1/f^2$ にすると

Assuming a ground vibration $1/f^2$



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
- 1/fの地面振動スペクトルでは、10Hz
- 1/f²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

Summary

heat link vibration transmission was calculated by finite element method
assuming 1 / f spectrum of ground vibration, 10Hz or even lower we have barely the target sensitivity
if 1/f² spectrum, above 10Hz we have safety margin of at least two orders of magnitude

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

Future work

- *change heat link the connection, position find the optimal configuration
- * Make a more realistic platform model
- * use FEM to solve the heat conduction, and check the cooling capacity

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