

KAGRAサイトにおけるクライオスタットの 振動測定

東京大学 理学系研究科 物理学専攻 越智聡郎

山元一広^A、三代木伸二^B、木村誠宏^C、小池重明^C、鈴木敏一^C、
都丸隆行^C、KAGRA cryogenic group^D

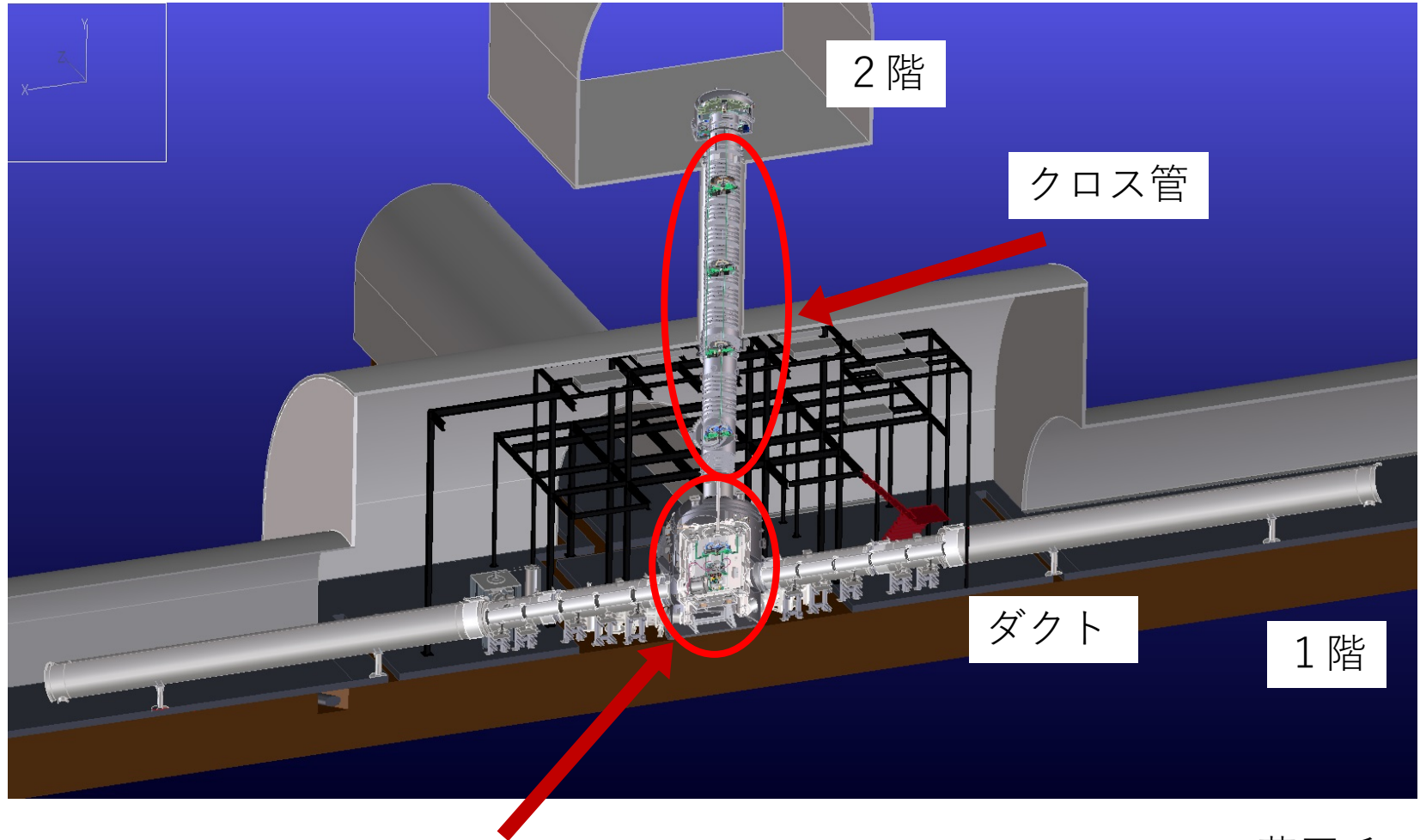
富山大^A、東大宇宙線研^B、高エネルギー加速器研究機構^C、
KAGRA cryogenic group^D

物理学会@大阪大学
2017/3/17

概要

- ・ KAGRAは、3 Kmのアームを持つ大型低温重力波望遠鏡である。その特徴は、熱雑音低減のため20 Kまで冷却する点と、地面振動低減のため地下200 mより深い場所に建設する点である。
- ・ 本研究では、低温加速度計をKAGRAサイトのクライオスタットにインストールし、真空かつ常温での冷凍機の振動を測定した。
- ・ 現在はKAGRAクライオスタット内で冷却中の測定を行っている。

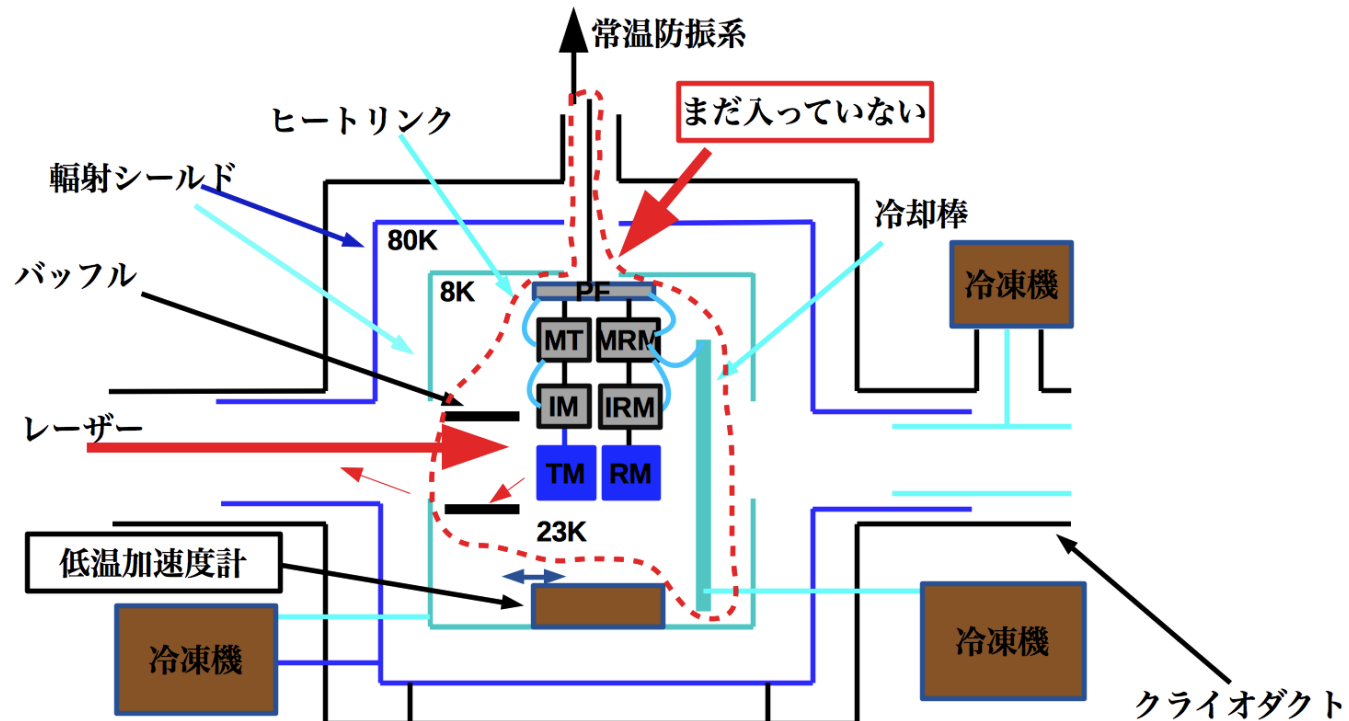
クライオスタットの概要



真空チャンバー

KEK 萩原氏

目的



KAGRAクライオスタット内の放射シールドの振動を測定する

放射シールドの振動

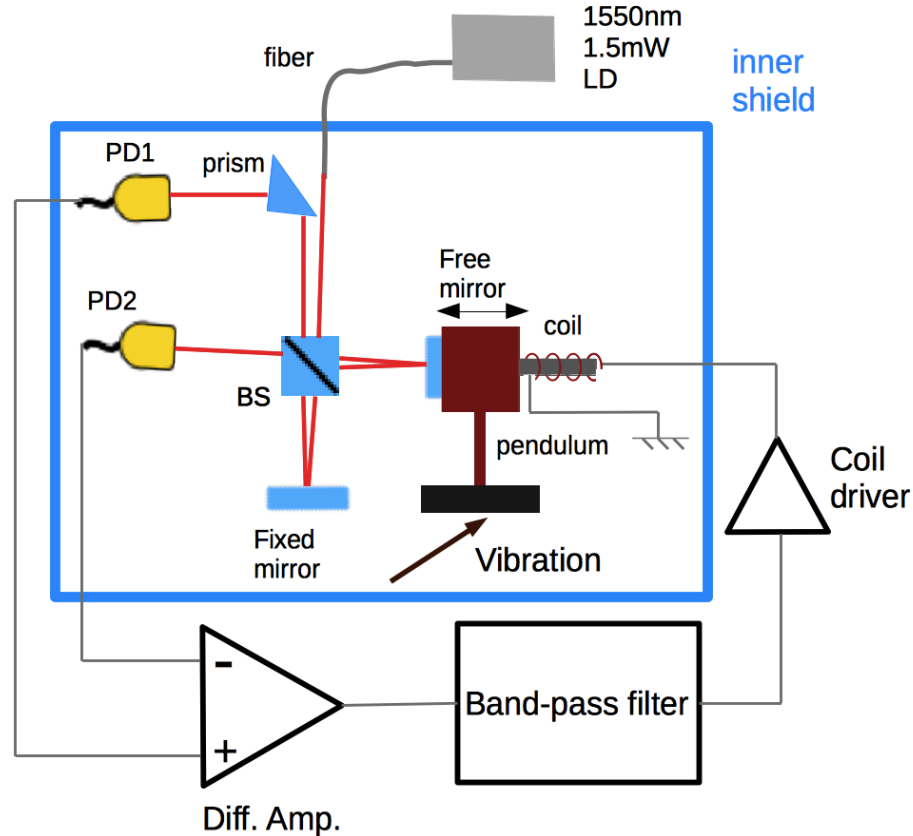
1. 散乱光に変調をかけて雑音となる

2. 冷却棒・懸架系から鏡に伝搬し雑音となる : 本研究で検討

KAGRAにインストールされたクライオスタットの放射シールド内に
低温対応の加速度計を設置

冷凍機のスイッチをいれた状態で振動の測定を行う

加速度計の測定原理



一方の鏡を倒立振り子による自由鏡（共振周波数:10 Hz）、もう一方を固定鏡としたマイケルソン干渉計の差動出力を自由鏡にフィードバックする。

振動により自由鏡がゆれ、光路長が変化し干渉信号が変化
→加速度信号として検出

先行研究－東芝京浜事業所での測定



東芝京浜事業所でのクライオスタット

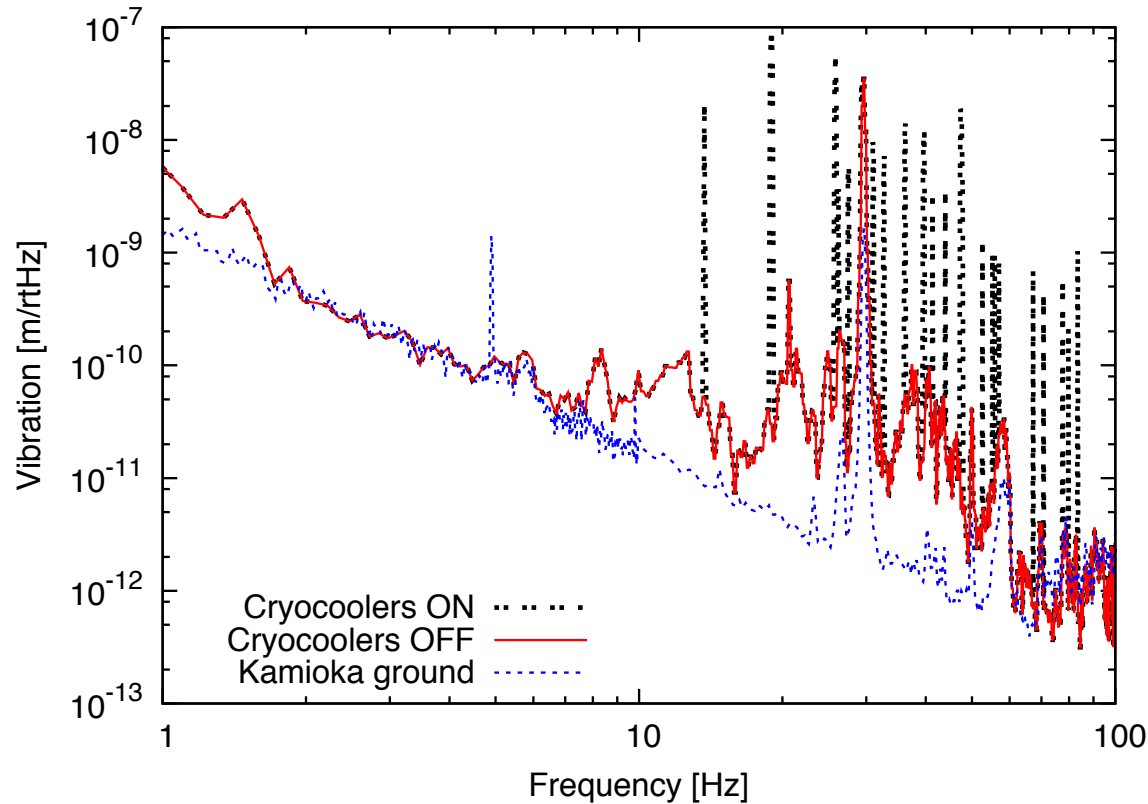
ダクトなし

冷凍機



真空チャンバー

先行研究－東芝京浜事業所での測定



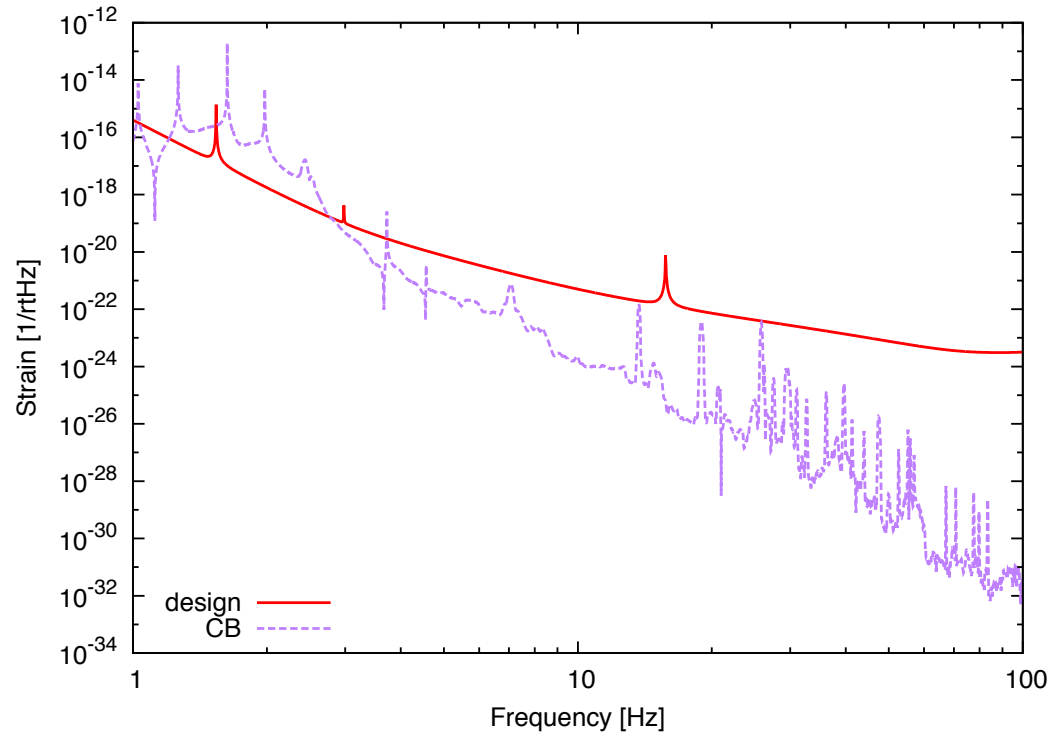
冷凍機	4台 (シールド + 懸架系)
真空度	1.0×10^{-7} mbar
温度	10 K
ダクト	なし

納入前の2013年に東芝社の京浜事業所（横浜）にてシールド内の振動測定を行った

- ・ 地面振動が神岡より100倍大きい
- ・ 地面から輻射シールド内部への伝達関数に神岡の地面振動をかけ、冷却試験で現れた冷凍機の振動のピーク(on/offの差)を足してサイトでの振動を評価

D.Chen et al , *Class. Quantum Grav.* **31** (2014) 224001

先行研究—東芝京浜事業所での測定：デザイン感度との比較



懸架系に求められたサイトでの振動を注入し鏡での振動応答を解析
4 Hz以上ではデザイン感度を下回る結果となった

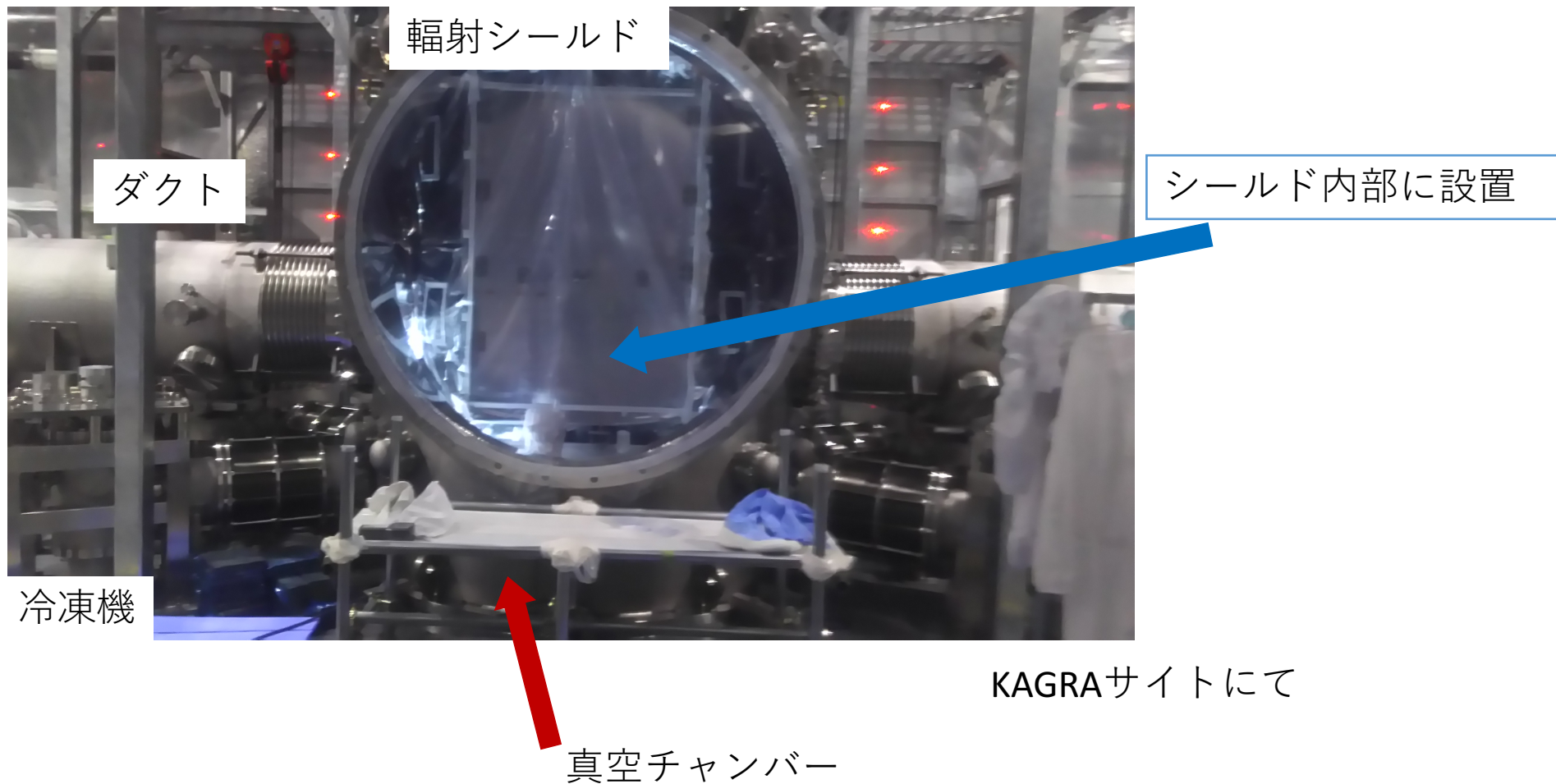
問題点および相違点

- ・ 冷凍機の振動が地面振動に埋もれている可能性がある
- ・ ダクトおよびクライオダクト冷凍機と真空チャンバーは未接続

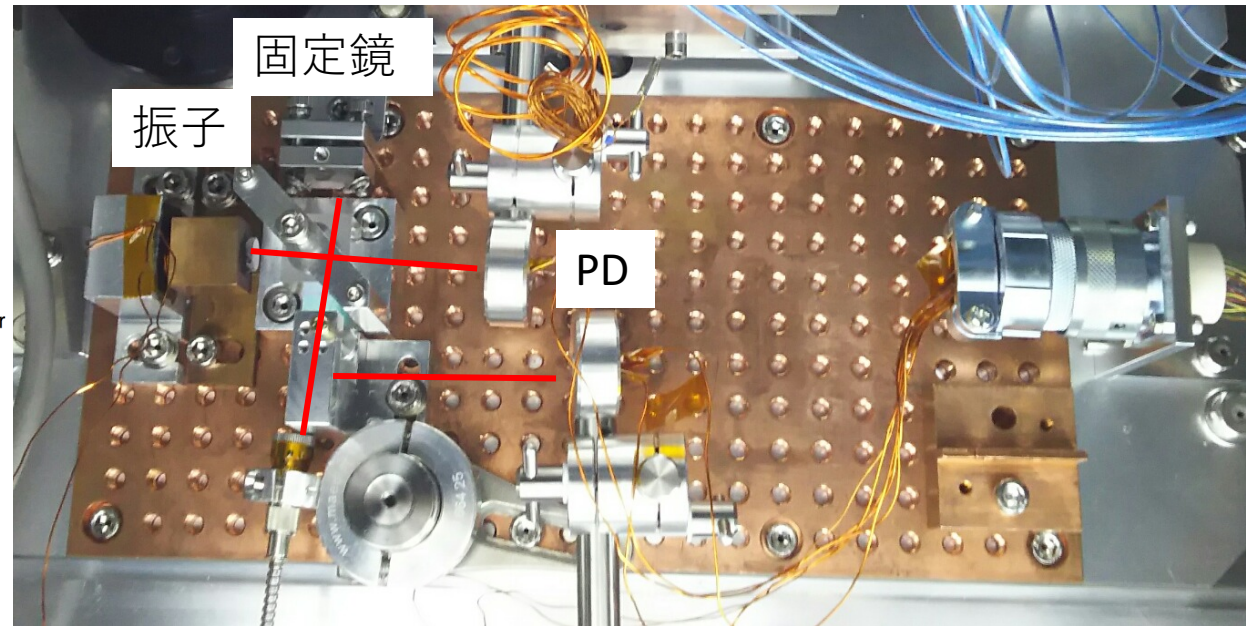
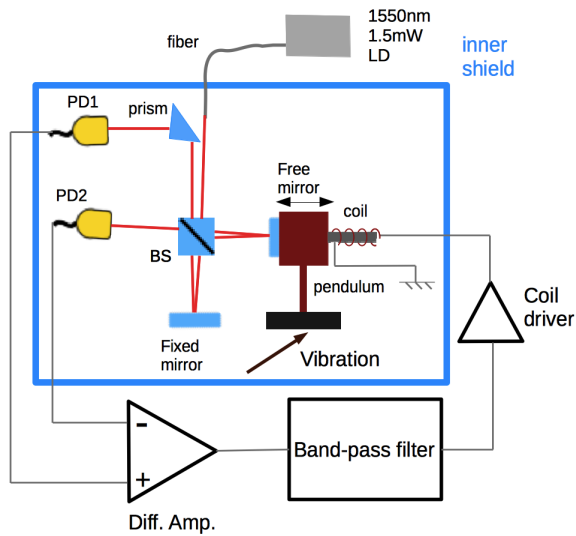
本研究－KAGRAの実使用環境と構成に近い形での 輻射シールドの振動の再測定



低温加速度計のインストール



低温加速度計のインストール



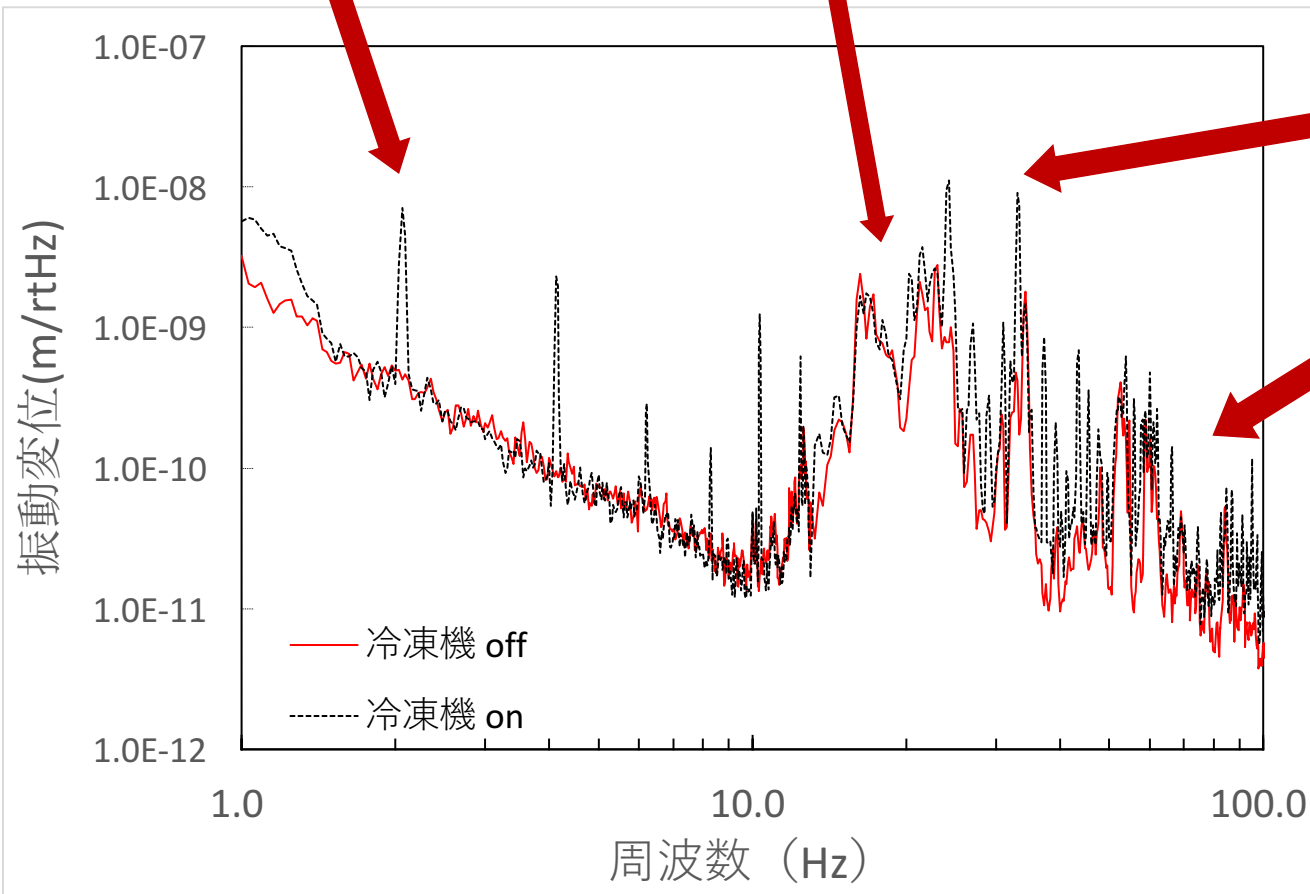
光ファイバー

8 K輻射シールドの底面に低温加速度計を設置
12月22日にインストール完了
2月27日より冷却試験開始

測定結果

2 Hzの冷凍機振動 16 Hz, 23 Hzに大きなピーク

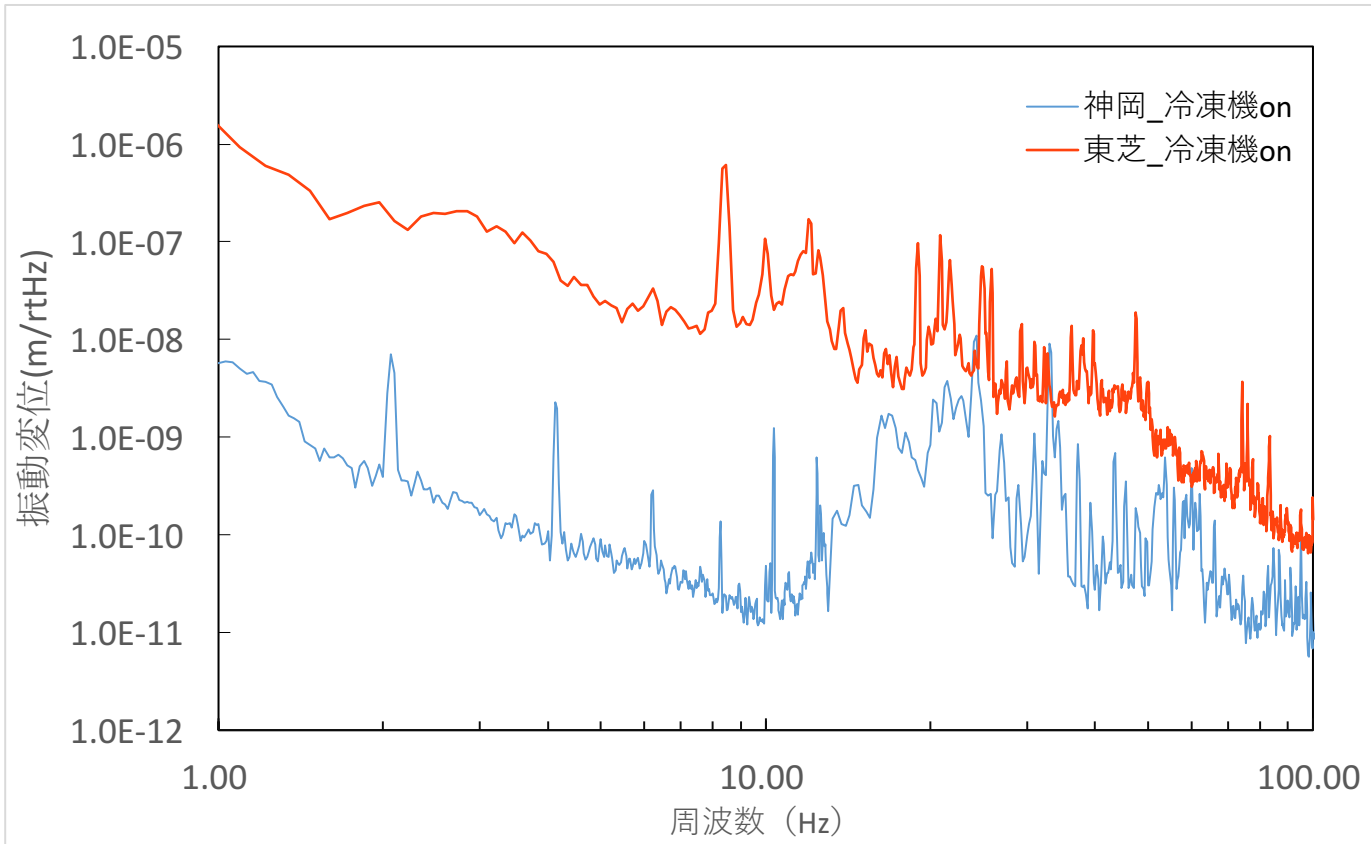
冷凍機	2 台 (輻射シールド冷却用)
真空度	1.0×10^{-7} mbar
温度	300 K



冷凍機振動はこの2つのピークが最も大きい

100 Hzまで冷凍機振動の倍音が見えている

東芝での振動測定結果(生データ)との比較



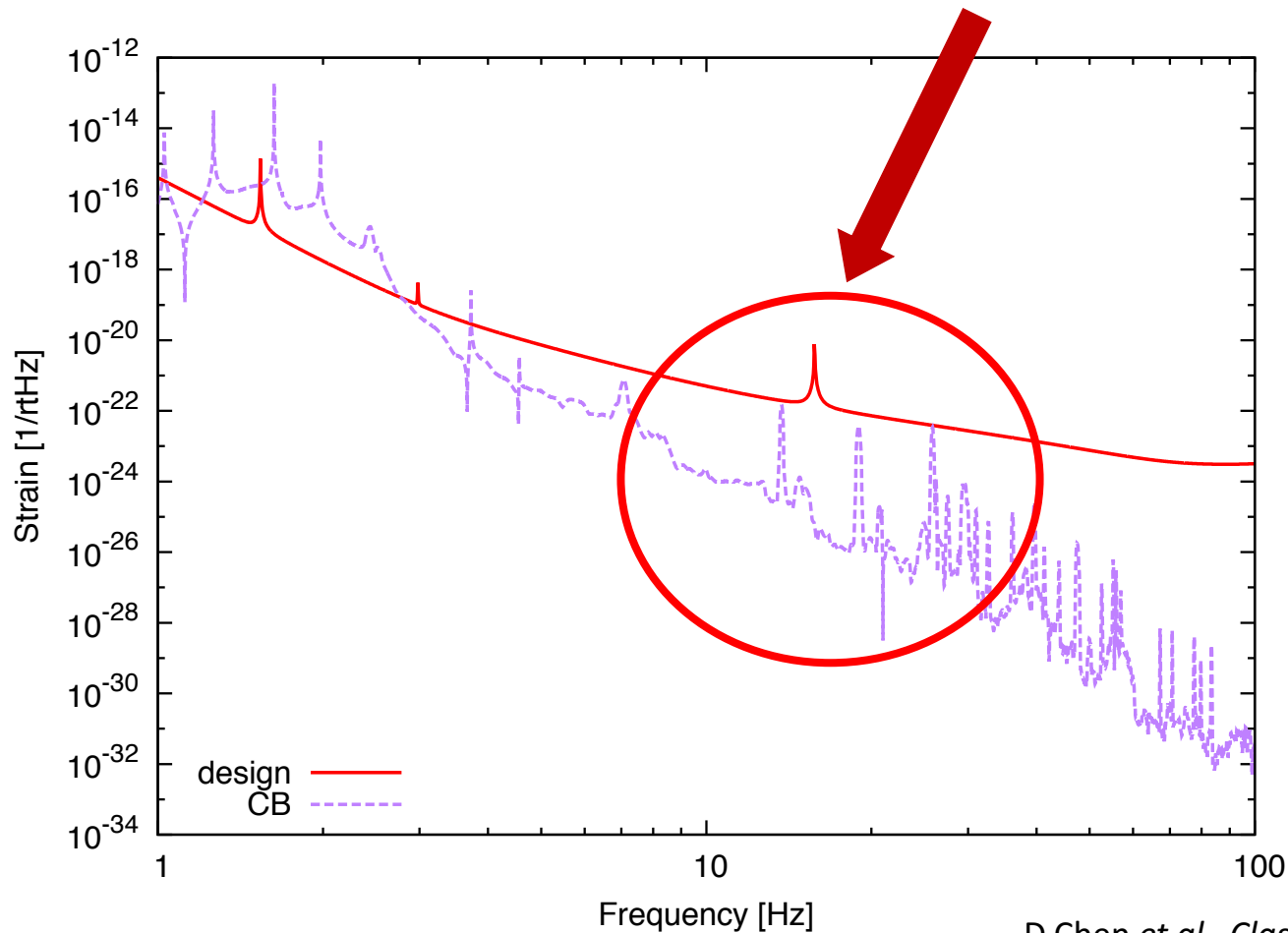
東芝社での測定結果との比較

神岡のクライオスタット内の振動レベルは東芝での測定より**1/100**程度小さい
全周波数帯域で東芝社での振動を下回る結果となった

冷凍機振動による**2 Hz**の倍音によるピークを**100 Hz**までほぼ全て観測
低周波での冷凍機振動によるピークも観測

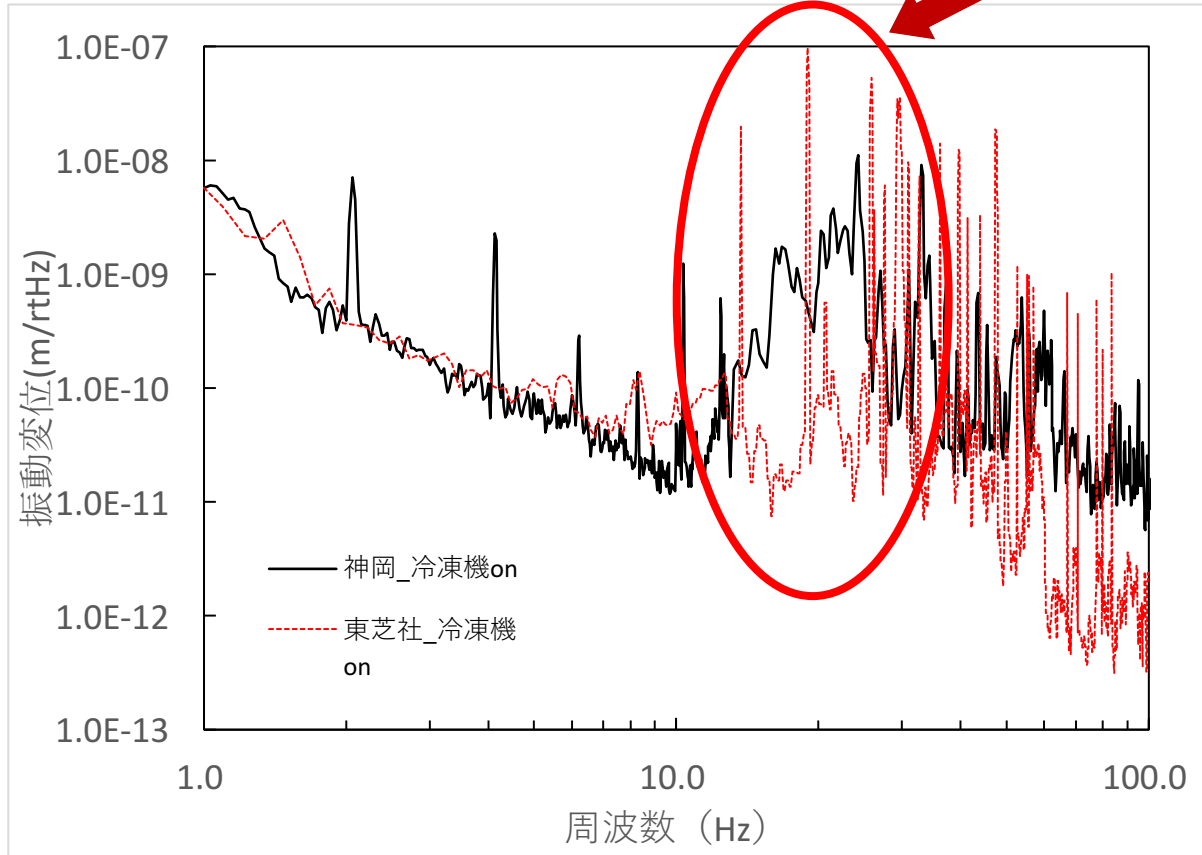
冷凍機の振動による雑音はKAGRAデザイン感度を上回るか？

10-30 Hzのピークが最もデザイン感度に近い



D.Chen et al , *Class. Quantum Grav.* **31** (2014) 224001

東芝京浜事業所での振動測定結果(変換後)との比較



10-30 Hzの振動：冷凍機振動の変位の大きさは低下
ただし冷凍機以外の振動による大きなピークが出現

10-30 Hzのピークは低下
→冷凍機振動による雑音はデザイン感度を汚さない？

冷凍機の振動による雑音はKAGRAデザイン感度を上回るか？

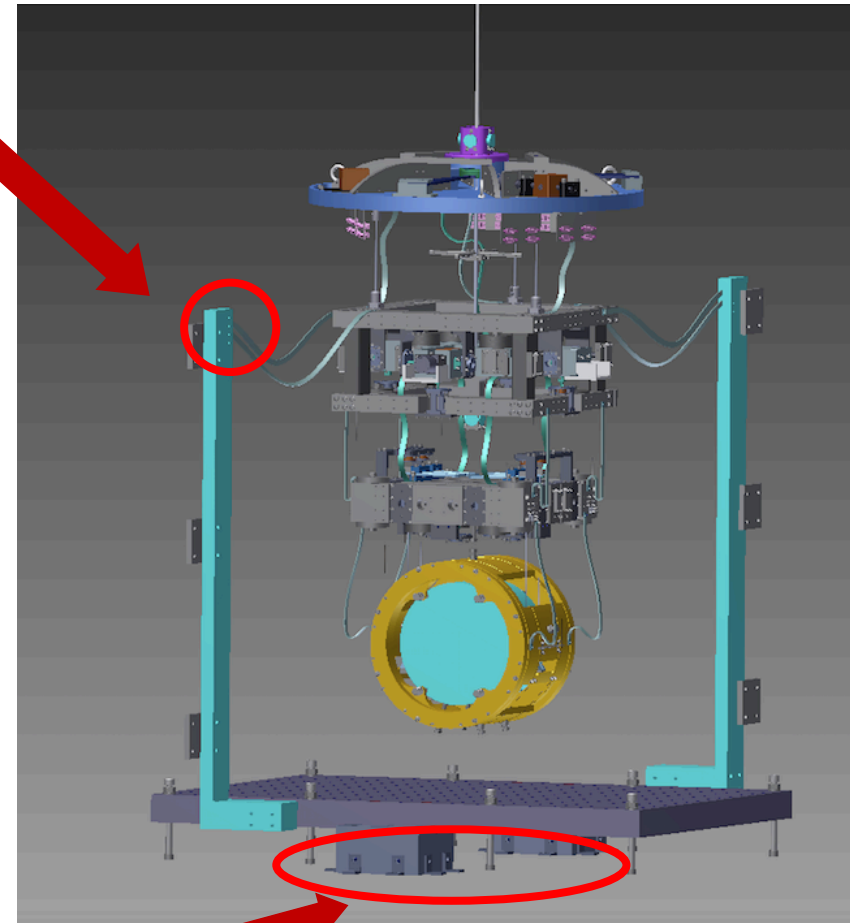
ヒートリンク接続部

結論

- ・ 東芝社での測定当時と現在で低温懸架系のデザインが異なる
- ・ 輻射シールドの底面からヒートリンク接続部への振動の伝達関数が不明



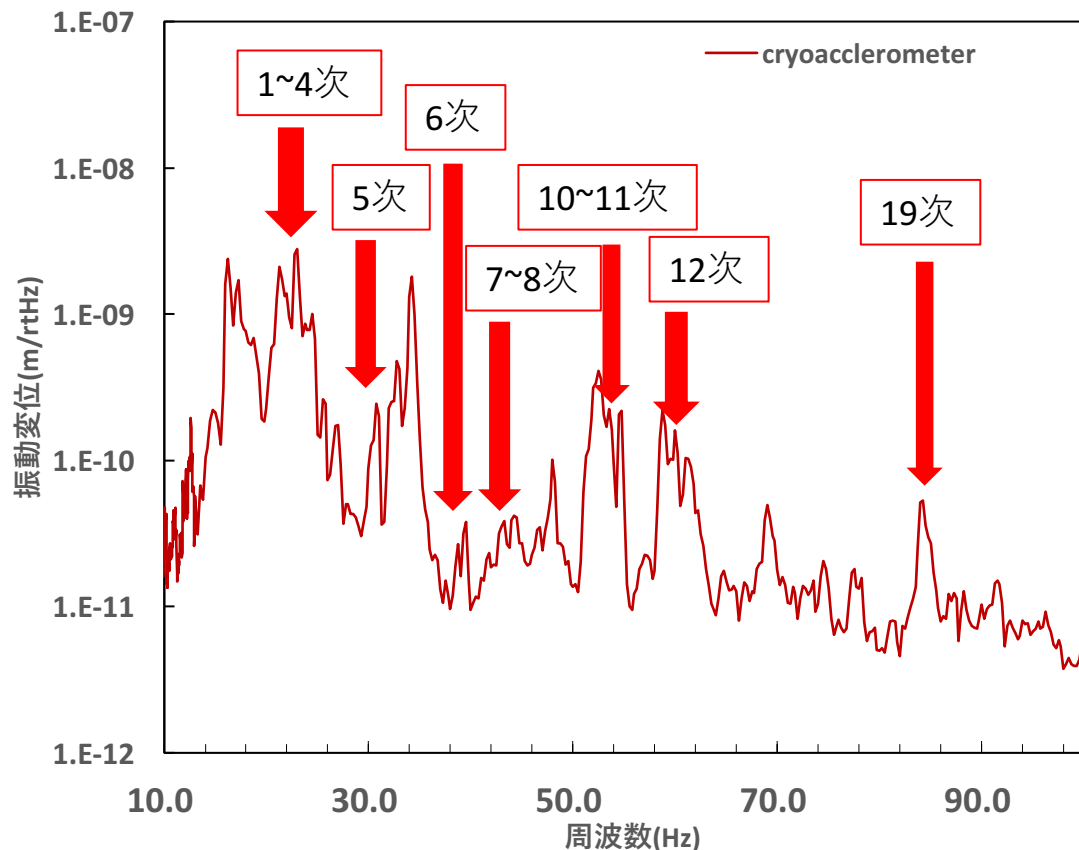
上記伝達関数を求め、低温懸架系の制御系に注入しないと雑音レベルは分からない



KEK 萩原氏

輻射シールドの底面部

構造解析結果との比較(輻射シールド)



一致した輻射シールドのモード

次数	周波数(Hz)
1	20.7
2	23.9
3	24.7
4	24.9
5	30.8
6	38.2
7	42.2
8	45.1
10	51.4
11	51.7
12	61.1
19	83.8

KEK 小池氏

輻射シールドの振動モードについてANSYSで解析

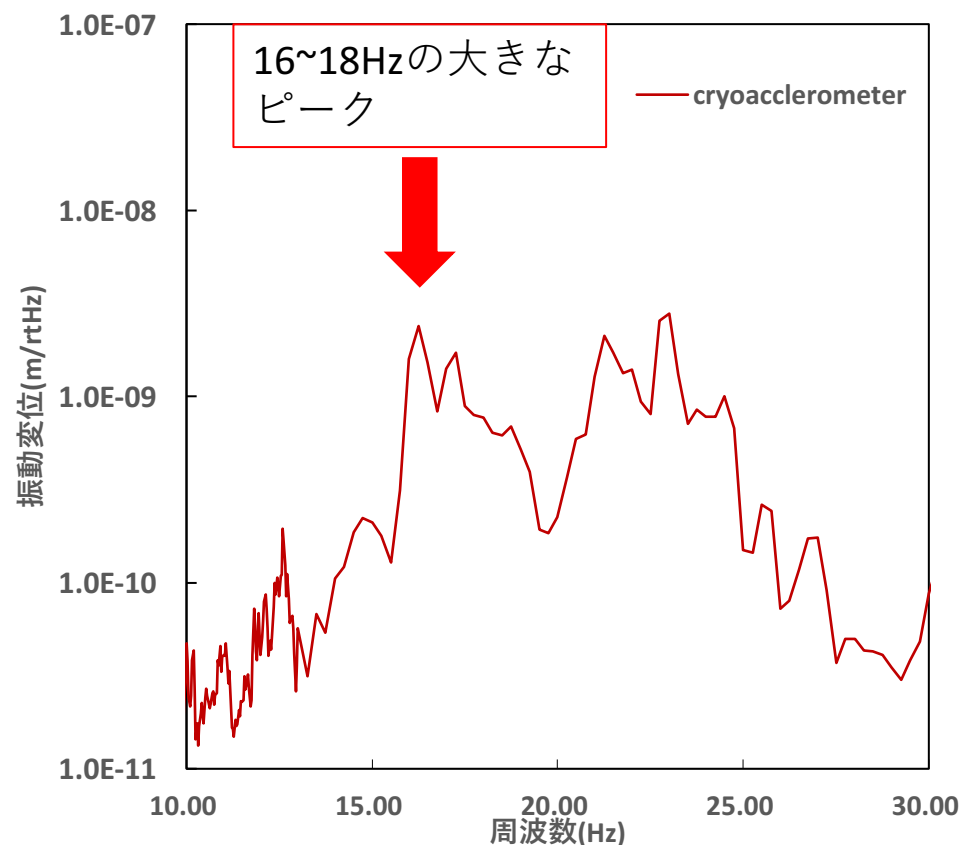
測定結果の多数の大きなピークが輻射シールドの解析結果と一致

構造解析結果との比較(真空チャンバー)

真空チャンバー底面
4箇所固定の場合の固有値

次数	周波数(Hz)
1	14.6
2	31.3
3	36.0
4	42.5
5	52.4

KEK 小池氏



16~18Hzのピーク：4箇所固定の結果が最も近いが、一致するとは言えない

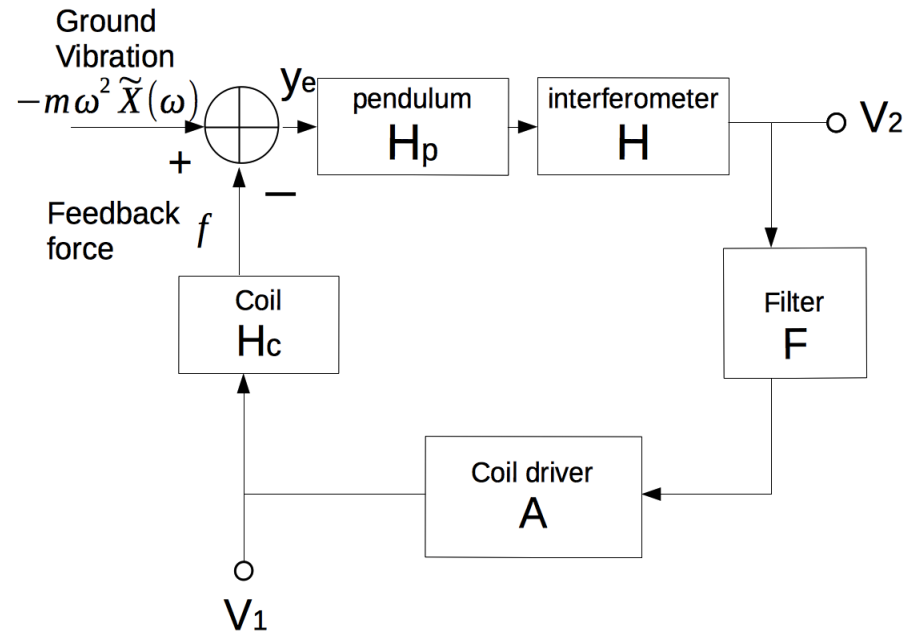
ハンマリング試験によりサイトに納入されている状態の真空チャンバーの固有周波数を求める必要がある

まとめと今後の課題

- ・ KAGRA坑内に設置されたクライオスタットの輻射シールド内に低温加速度計を設置し、シールド内での冷凍機による振動を測定した
 - ・ 2 Hzの冷凍機の振動の倍音が観測された
 - ・ 振動の最大レベルは減少
 - ・ 測定結果の多数の大きなピークが輻射シールドの解析結果と一致
- ・ ハンマリング試験による真空チャンバーの固有周波数を求める
- ・ 冷凍機振動の輻射シールドへの伝播経路を求める
- ・ 上記2つから10-30 Hzの大きな振動の原因を特定する
- ・ 低温懸架系の制御系に振動を注入して鏡のゆれの計算を行い、KAGRAの感度への影響を評価する
 - ・ クライオスタットの1階と2階をつなぐ真空ダクトをつけた状態でもう一度冷却試験を行う

予備スライド

振動：キャリブレーション



入力 y_e は,

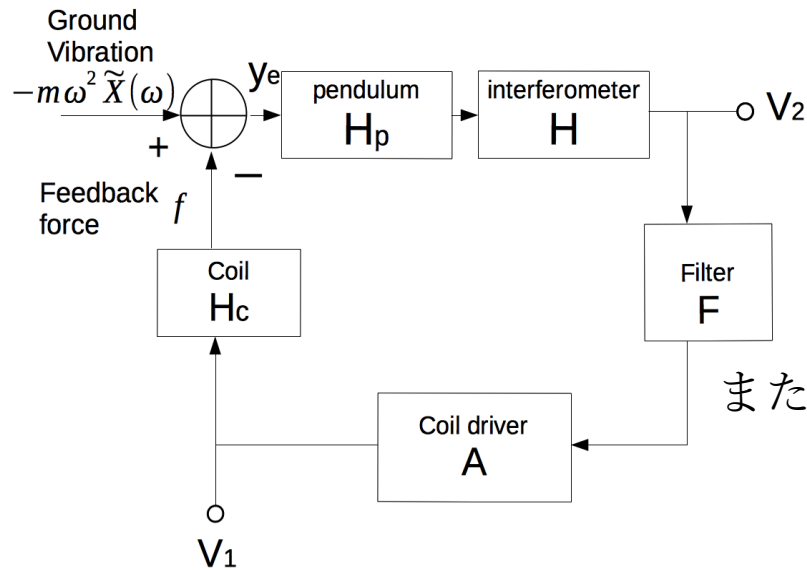
$$\begin{aligned} y_e &= -m\omega^2 \tilde{X}(\omega) - f \\ &= -m\omega^2 \tilde{X}(\omega) - H_p H F A H_c y_e \end{aligned}$$

$G = H_p H F A H_c y_e$: 開ループ伝達関数とすれば,

$$y_e = \frac{G}{1 + G} (-m\omega^2 \tilde{X}(\omega))$$

となる。

振動：キャリブレーション



また、測定電圧 V_1, V_2 は,

$$\begin{aligned} V_1 &= H_p H F A y_e \\ &= \frac{G}{1+G} H_c (-m\omega^2 \tilde{X}(\omega)) \end{aligned}$$

$$V_2 = H H_p y_e = \frac{H H_p}{1+G} (-m\omega^2 \tilde{X}(\omega))$$

となる. 従って, 地面振動変位は,

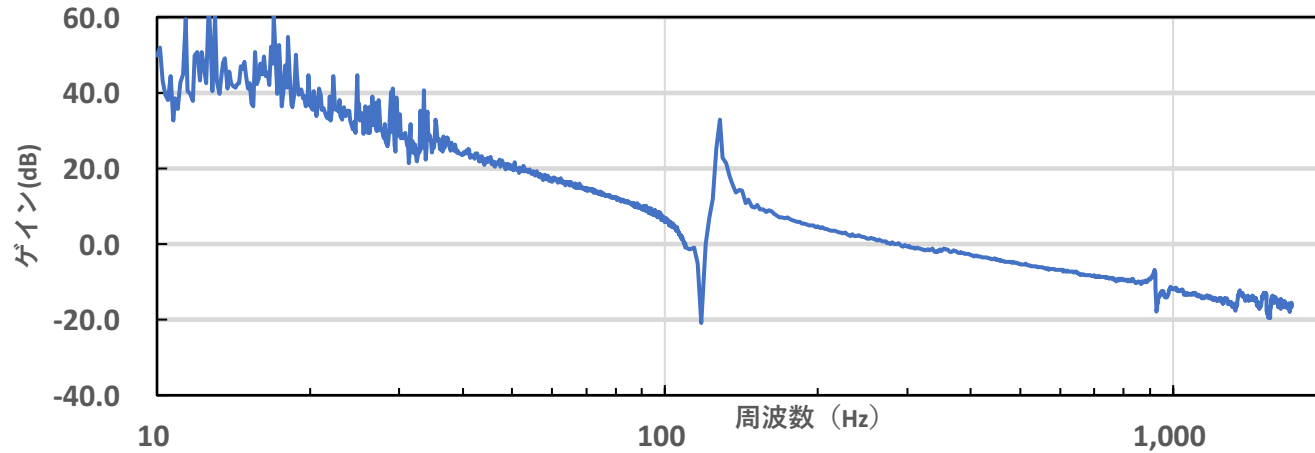
$$|\tilde{X}(\omega)| = \frac{1}{m\omega^2} \left| \frac{1+G}{G} \right| H_c V_1 \quad (*1)$$

$$|\tilde{X}(\omega)| = \frac{1}{m\omega^2} \left| \frac{1+G}{H H_p} \right| V_2$$

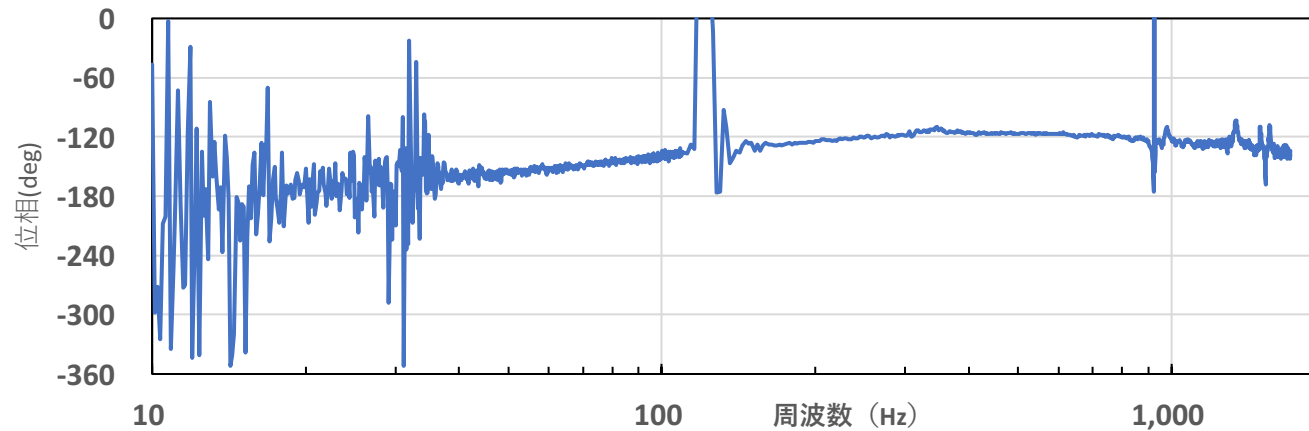
となる. 今回は、上の式から変位を求める。

地面振動：キャリブレーション

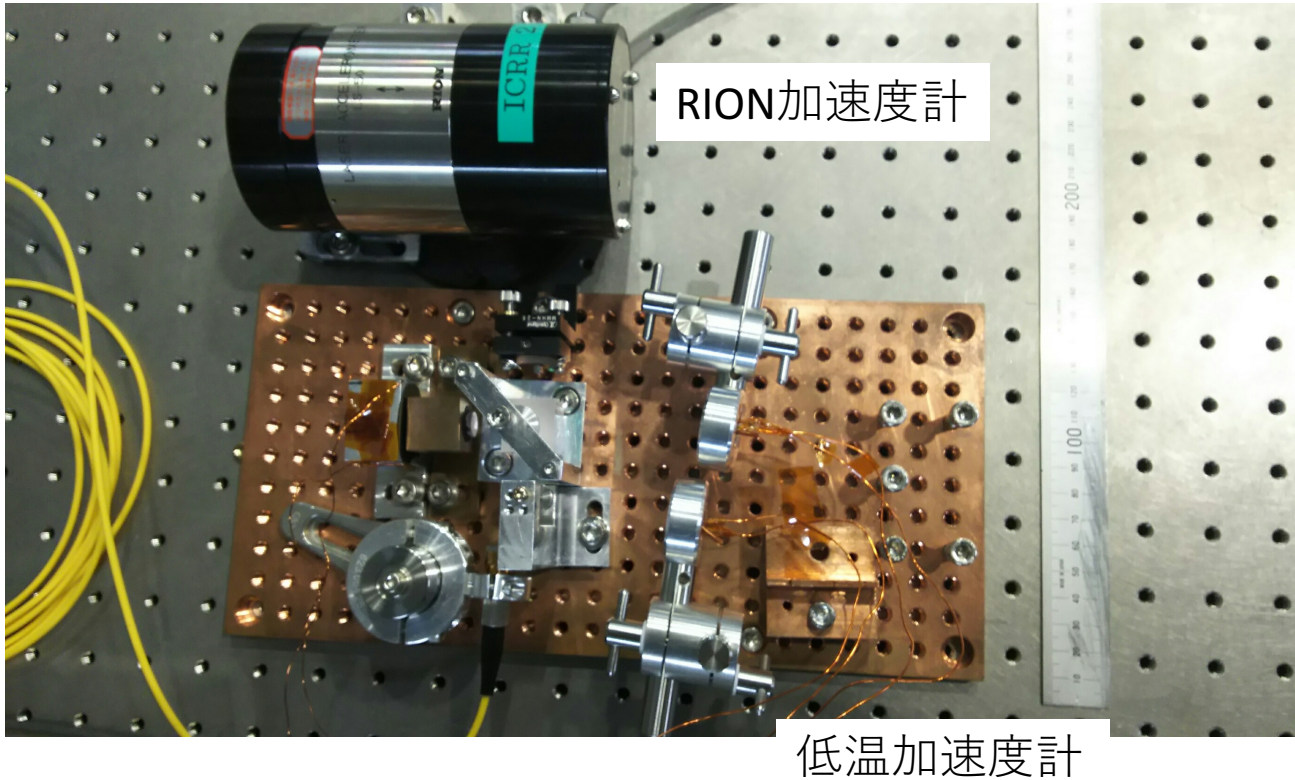
開ループゲイン ゲイン曲線



開ループゲイン 位相曲線

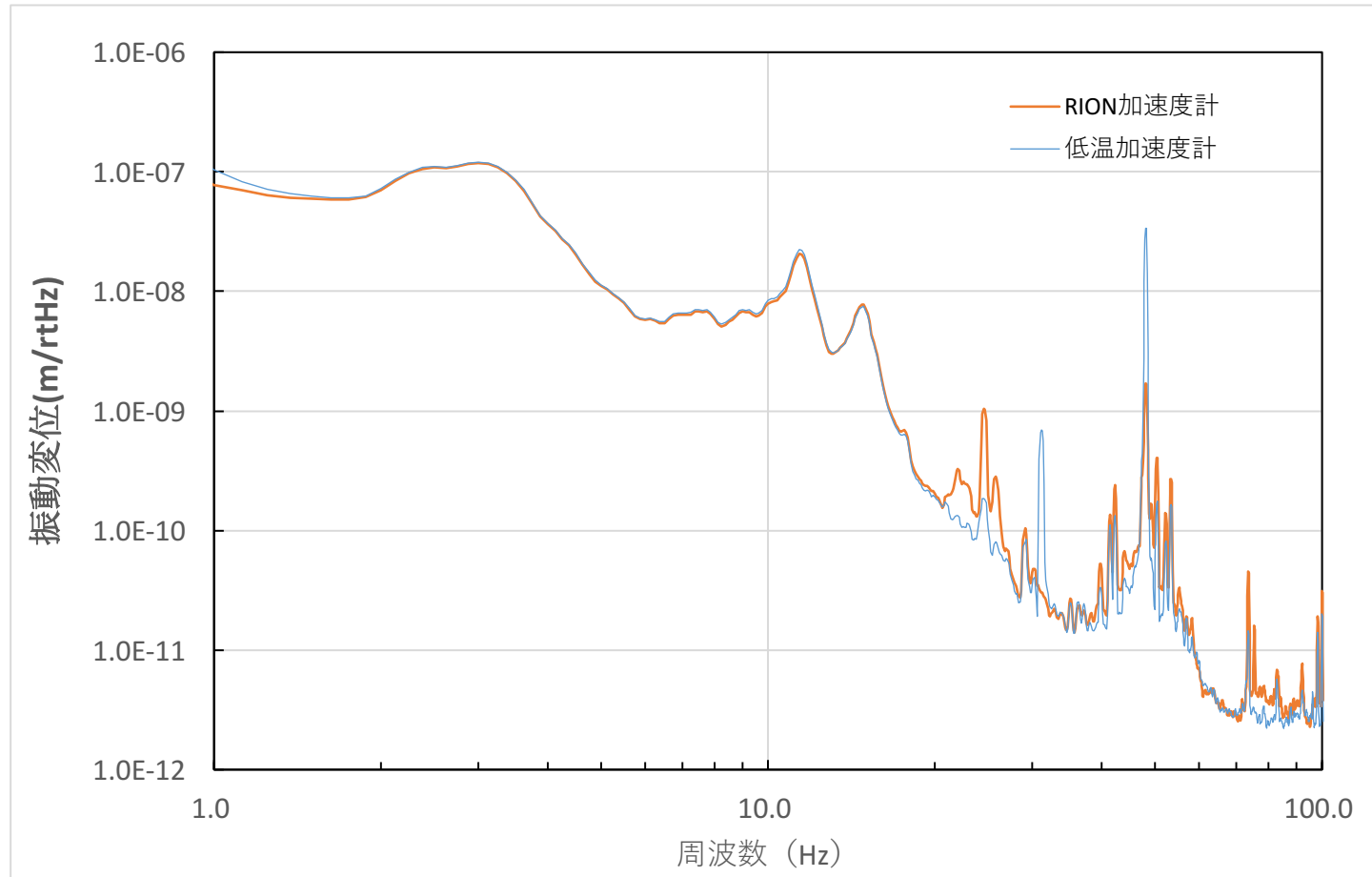


市販の加速度計(RION)との同時測定



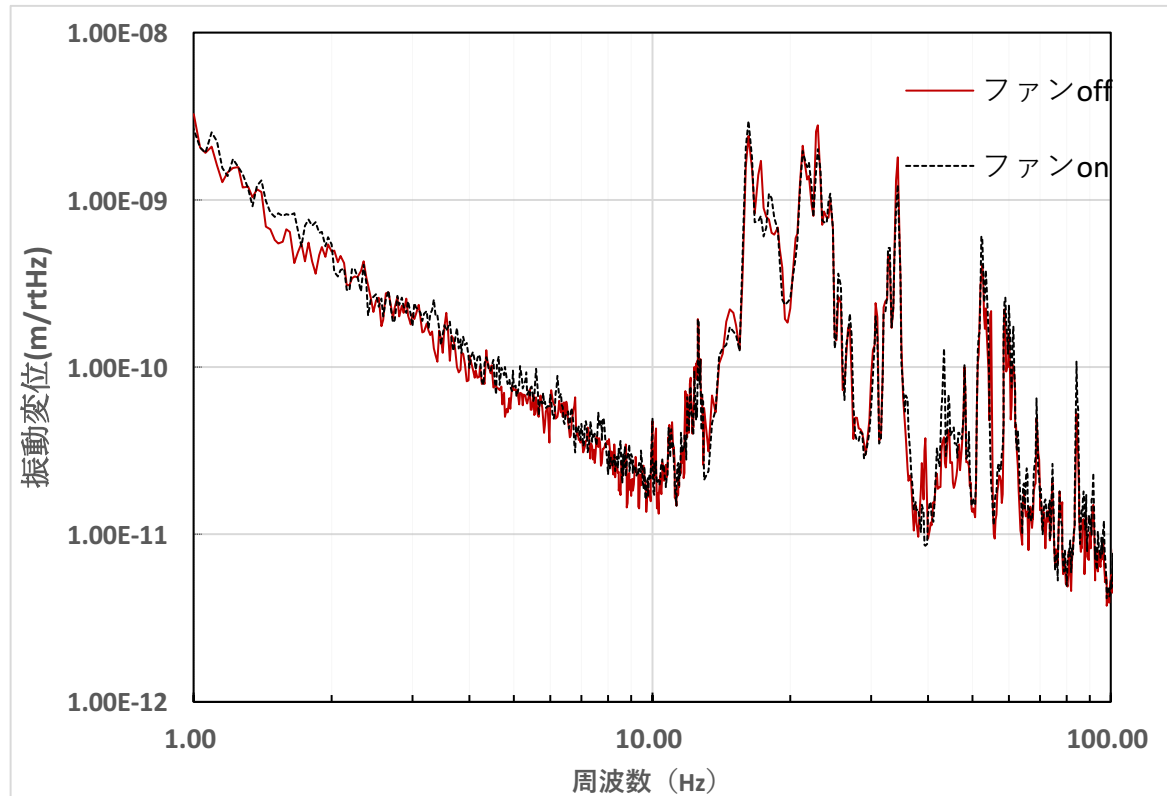
柏にて光学定盤の上でRION加速度計と同時測定

市販の加速度計(RION)との同時測定

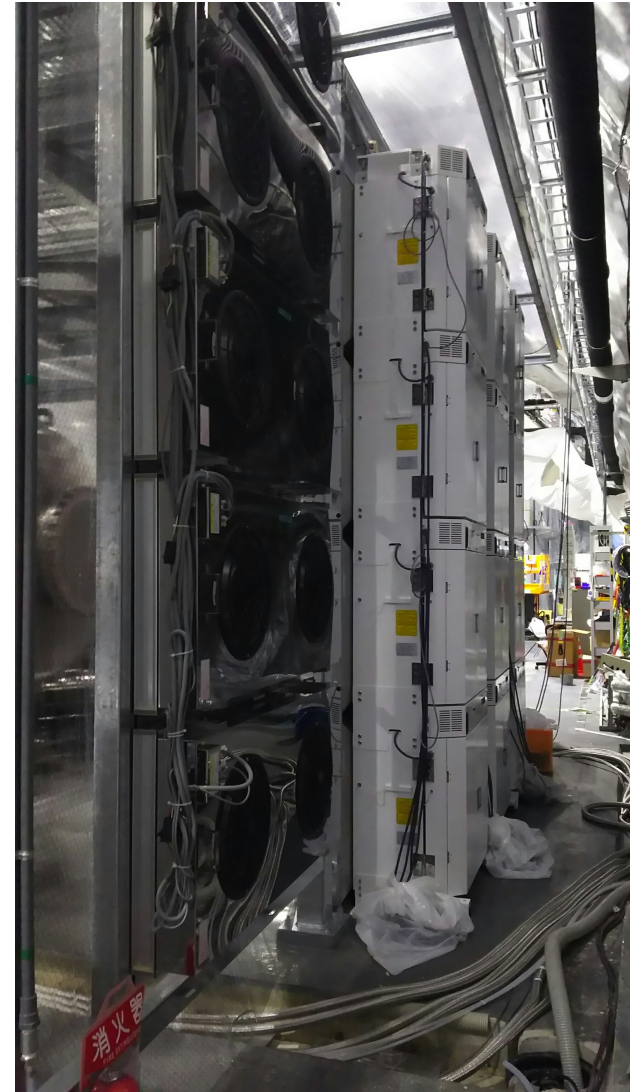


100 Hzまででほぼ一致

クリーンブースのファンのon offによる変化

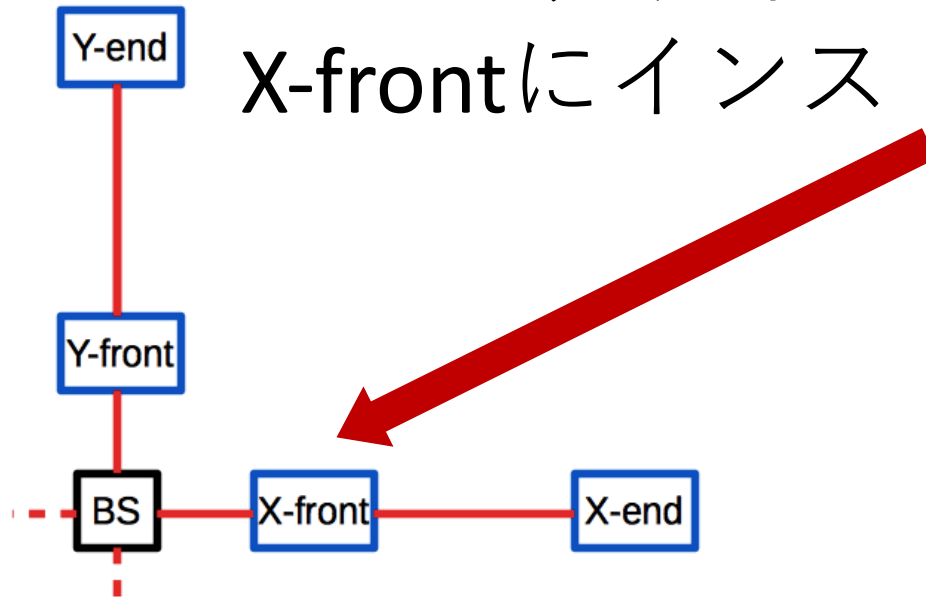


ファンによる影響を測定
ほとんど影響なし
→風による影響はほとんどない

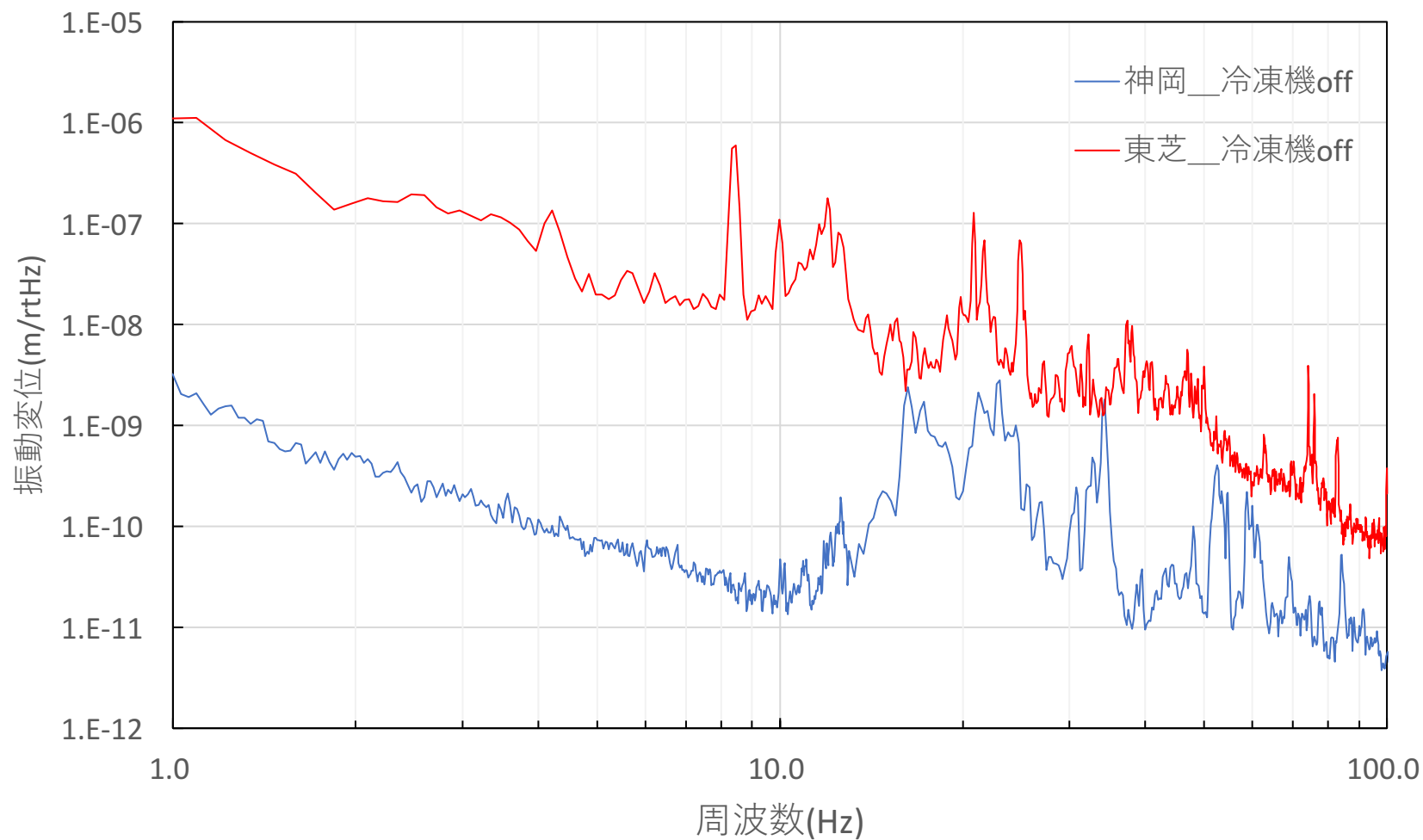


X-front クライオスタット

4つのクライオスタットのうち、
X-frontにインストール



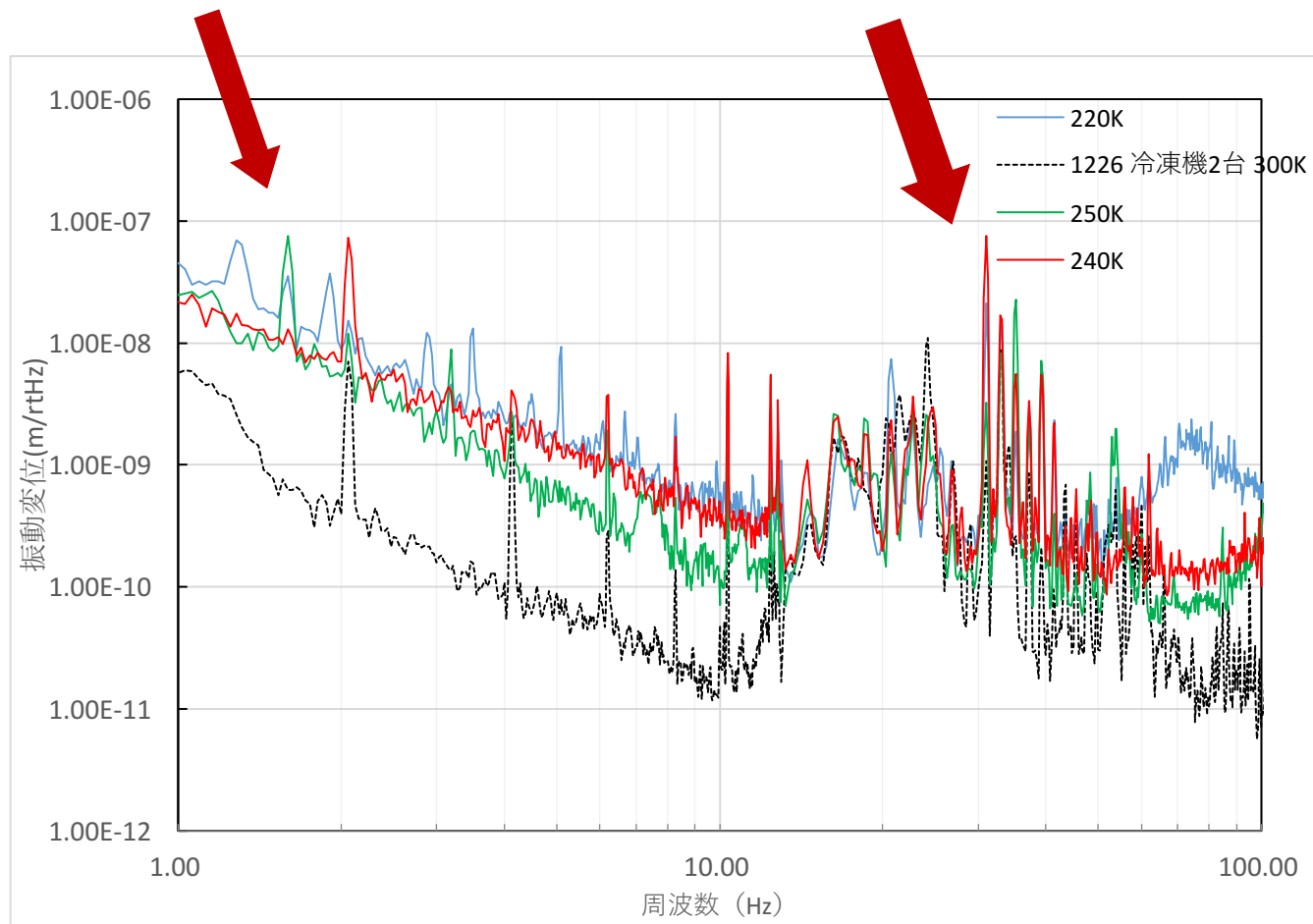
冷凍機off



冷却試験中の測定

クライオダクトの冷凍機の振動（1.6 Hz）も観測

30—40 Hzでピークが10倍程度上昇
測定により大きさが上下



モーダル解析結果

自由振動

周波数の値

F1	37.41 Hz
F2	40.95 Hz
F3	42.92 Hz
F4	43.15 Hz
F5	43.66 Hz
F6	56.56 Hz
F7	77.60 Hz
F8	79.33 Hz

底板全周固定

周波の値

F1	21.52 Hz
F2	35.28 Hz
F3	43.23 Hz
F4	48.79 Hz
F5	49.10 Hz
F6	56.02 Hz
F7	56.35 Hz
F8	66.96 Hz

2箇所固定結果

周波数の値

F1	3.58 Hz
F2	20.76 Hz
F3	24.97 Hz
F4	35.87 Hz
F5	42.17 Hz
F6	43.75 Hz
F7	55.79 Hz
F8	55.96 Hz

3箇所固定結果

周波数の値

F1	11.07 Hz
F2	22.22 Hz
F3	34.72 Hz
F4	38.03 Hz
F5	43.02 Hz
F6	44.81 Hz
F7	55.97 Hz
F8	56.14 Hz

4箇所固定の場合

モード	周波数 [Hz]
1	14.557
2	31.281
3	35.963
4	42.53
5	52.414
6	53.655
7	64.279
8	76.052
9	85.882
10	87.376
11	91.379
12	101.41