

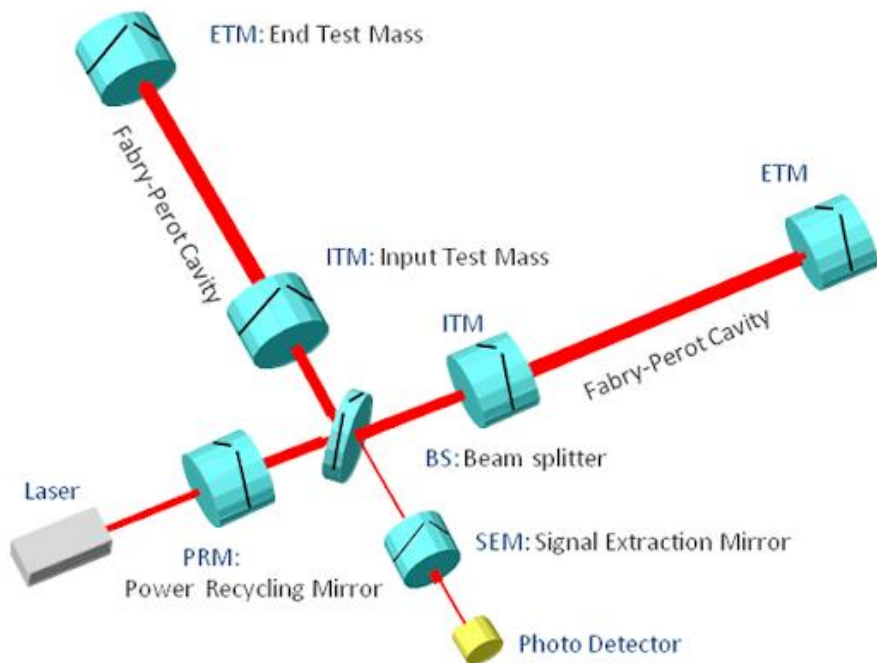
# KAGRAにおける 微気圧・低周波音響雑音モニタ

国立天文台 鷺見貴生  
他KAGRA collaboration

# 重力波とKAGRA

重力波は「時空のさざなみ」

- ブラックホールや中性子星の連星合体、超新星爆発などで発生
  - 典型的な大きさは、地球と太陽の距離が水素原子1個分程度だけの伸縮
  - あらゆる雑音を極限まで低減する必要がある
- キロメートルの腕を持つレーザー干渉計で検出
- 2015年にアメリカのLIGOが初検出



## KAGRA

- 神岡地下200~450m
- 両腕3kmのレーザー干渉計
- 20Kのサファイアミラー



最近のレビューペーパー：[Galaxies 2022, 10\(3\), 63](#)

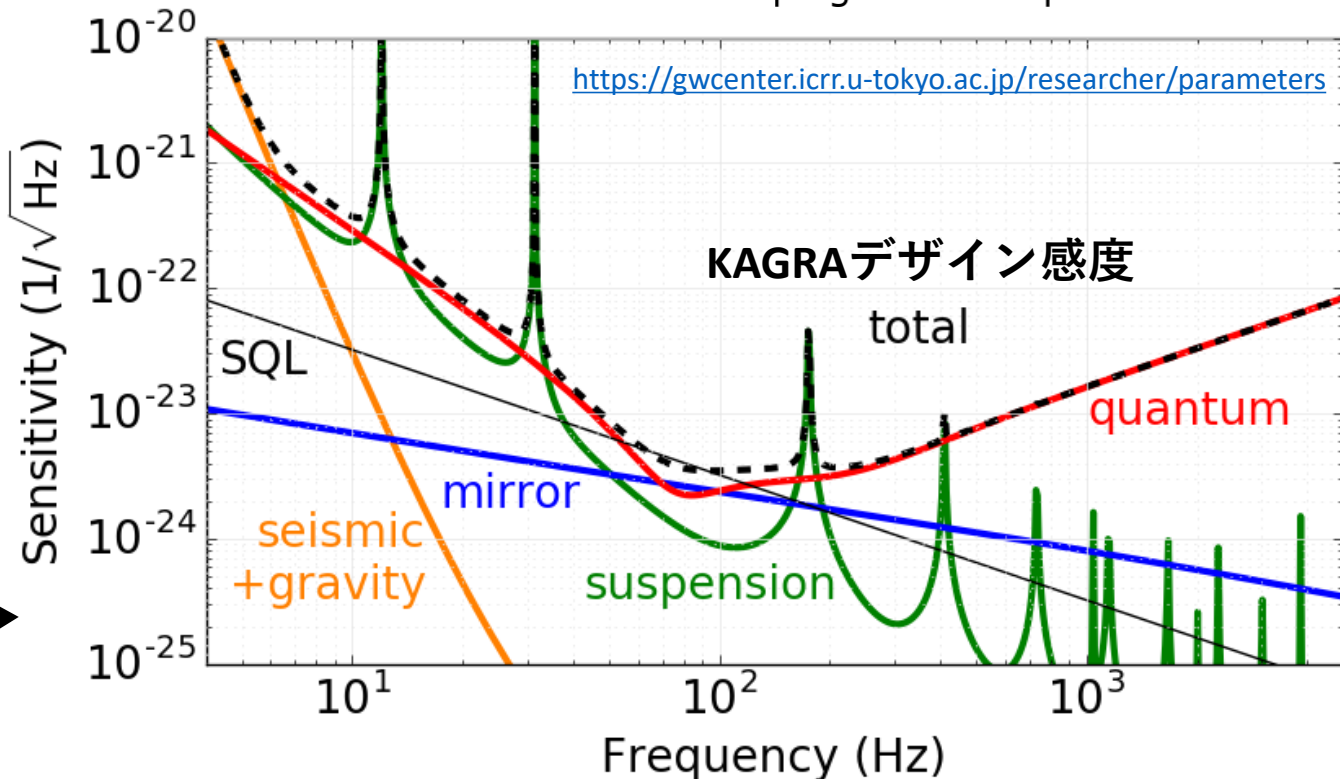
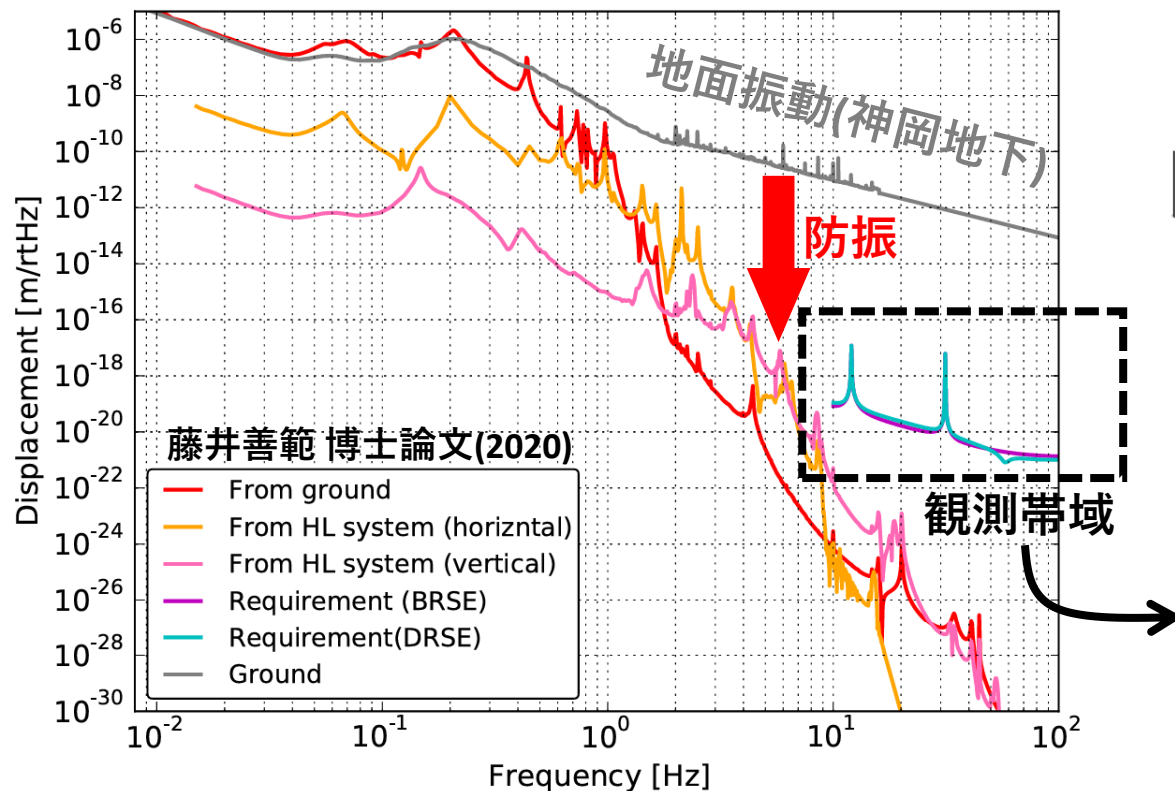
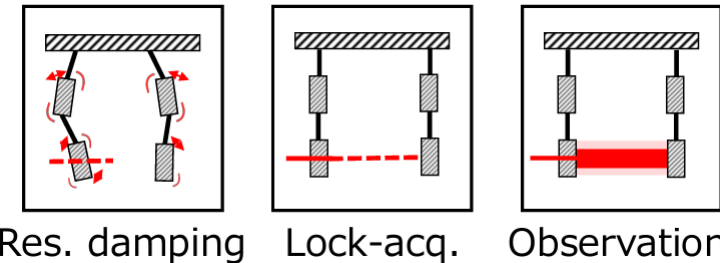
# 重力波観測における擾乱

## ① 重力波観測帯域 (5Hz ~ 5kHz)

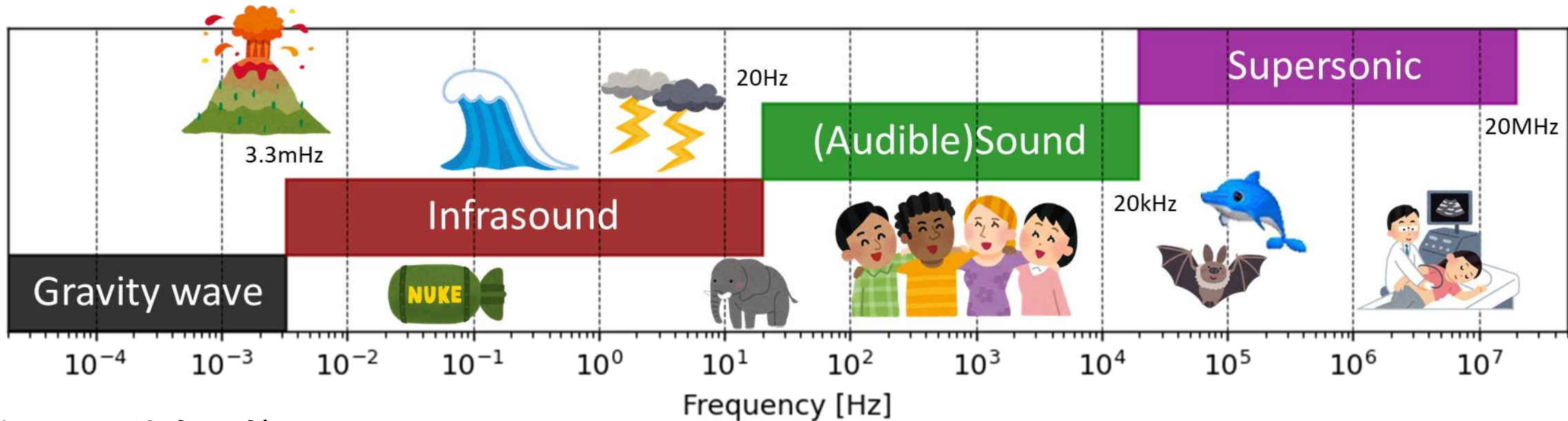
- 重力波信号に対するノイズとなる(かき消す、偽信号になる) -> 最大限の低減が必要

## ② それよりも低い周波数帯

- 干渉計を「組む」ために、ある程度静かである必要がある
  - 検出器の稼働率に大きく影響する
- 地震や海洋波浪(次トーク)などの影響で荒れるときがある



# 微気圧、低周波音

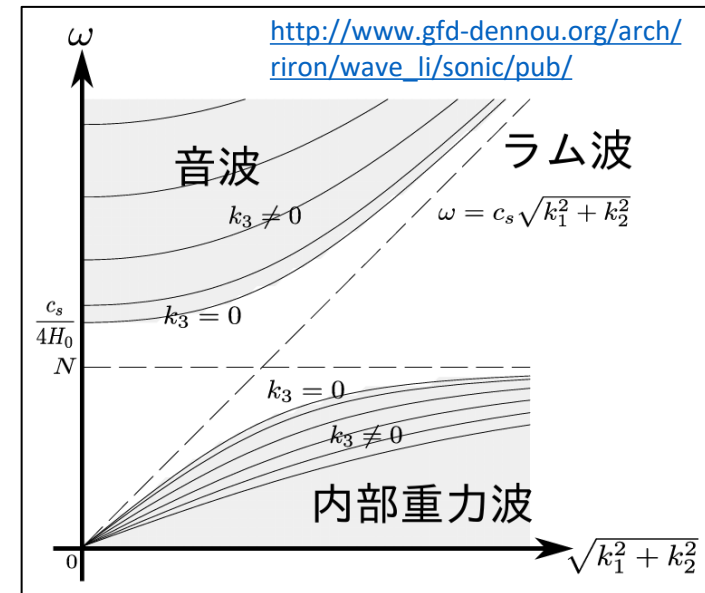


## ● インフラサウンド






- 人間の耳の可聴域( $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ )よりも低い周波数の音響波動 (縦波)
  - 波動伝搬の分散性によるカットオフ周波数( $3.3\text{mHz}$ )以上
- 地震, 雷, 噴火, 津波, 雪崩, ダム放水, 隕石, 核実験などで発生する
- 減衰長  $\propto$  (周波数) $^2$  のため、低周波音ほど長距離を伝搬する

## ● 大気重力波 (Gravity wave)

- 空気にかかる重力と浮力による上下振動が伝搬する気圧波動 (横波)
- 時空の重力波 (Gravitational wave) とは全く別の現象

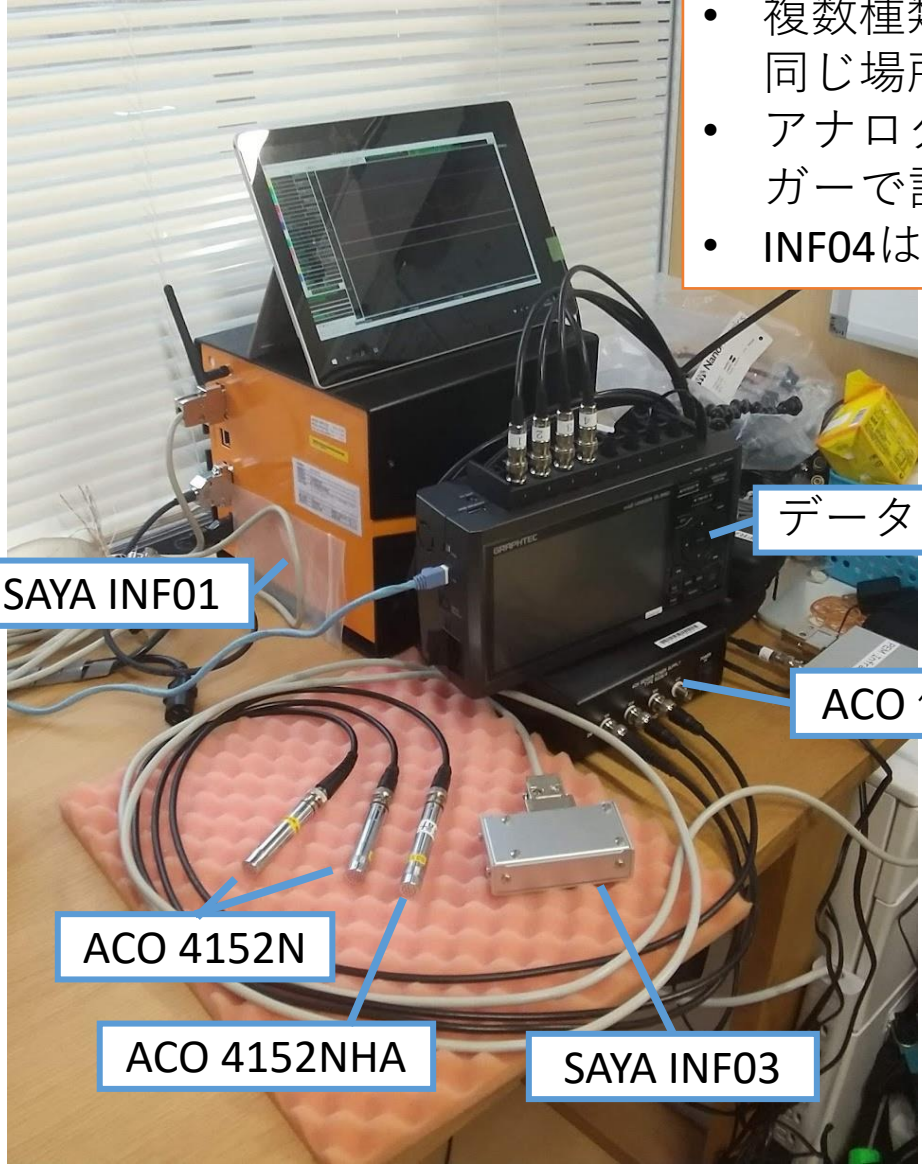


# KAGRAで所持しているインフラサウンドセンサー

	株式会社サヤ			株式会社アコー	
	ADXⅢ-INF01LE	ADXⅢ-INF04LE	INF03	ACO 4152NHA	ACO 4152N
写真					
観測周波数帯	LF : DC～1mHz HF : 0.3mHz～6.25Hz	LF : DC～0.1Hz HF : 0.1Hz～1kHz	0.1Hz～1kHz	0.05Hz～8kHz	低周波対応アンプを使うことで、0.1Hz以下まで使用可能 20Hz～20kHz
補助センサ	騒音計 3軸加速度計 温度計 (2種) GPS時刻同期	3軸加速度計 温度計 GPS時刻同期	なし	なし	なし
電源	コンセント	コンセント	外部電源装置	外部電源装置	外部電源装置
ADC, net接続	内蔵	内蔵	なし	なし	なし
信号出力	デジタル	デジタル	130mV/Pa	1mV/Pa	20mV/Pa

# 地上室内での試運転

- 複数種類のセンサーを購入し、同じ場所・時間の信号を比較
- アナログ信号は汎用データロガーで記録
- INF04はこの試験後に購入した



データロガー GL980

ACO 低周波アンプ

気圧計 (PTB110)

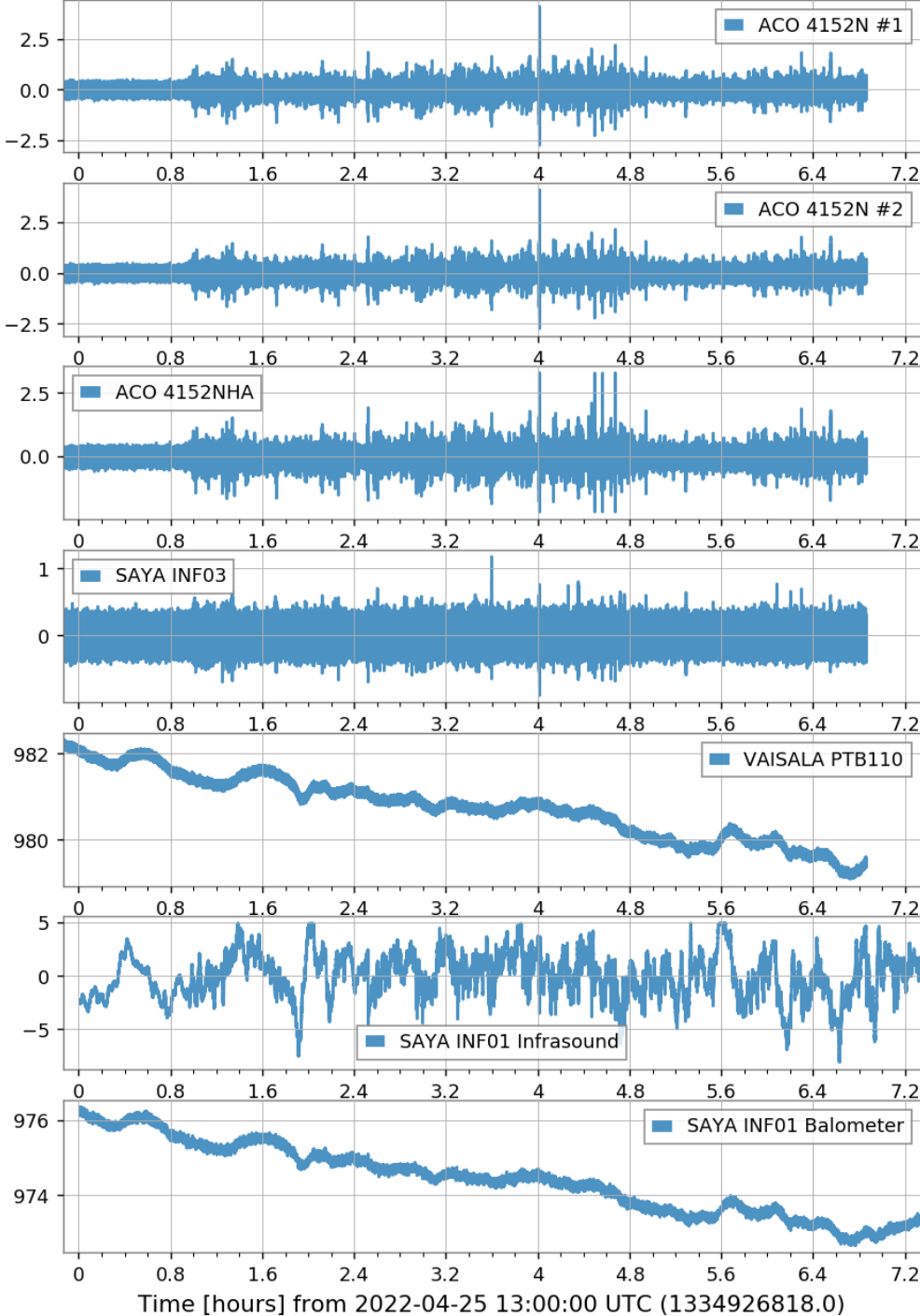


SAYA INF01

ACO 4152N

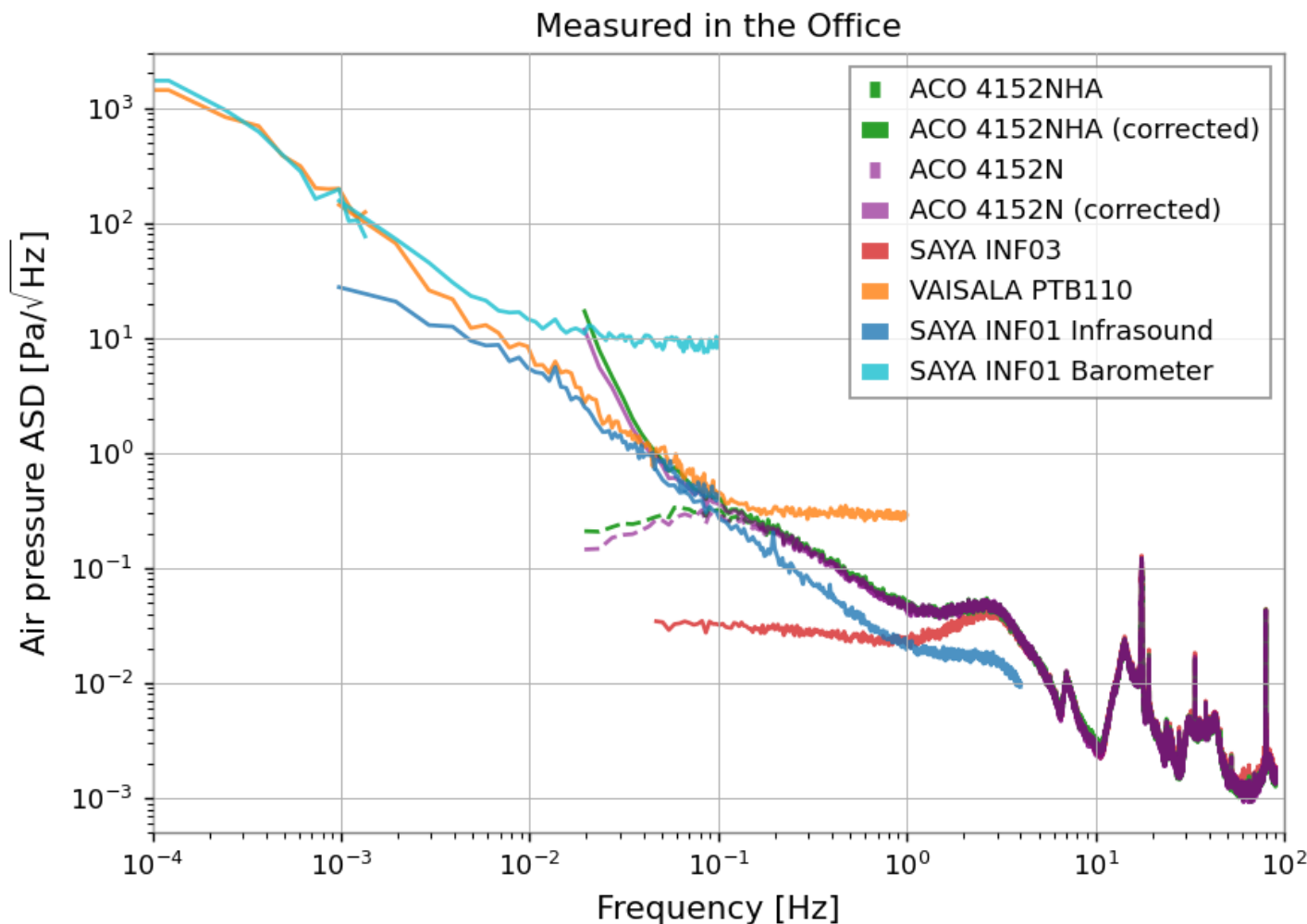
ACO 4152NHA

SAYA INF03



# 振幅スペクトルの比較

較正方法が確立されていないため、  
各種センサー間の多数決や接続性で判断



- 3Hz以上では、ACO4152N, ACO4152NHA, INF03の信号にほとんど違いはない
- ACO4152N, ACO4152NHA はメーカー提供の周波数特性式で補正すると、0.04Hzあたりまで信用できるか
- INF03は3Hz以下に補正が必要
- INF01のインフラサウンドセンサーは0.1Hz付近を連続的にカバーしている(ただし周波数応答の補正が必要)
- INF01の気圧計は10Pa/√Hzにセンサーノイズ
- VAISALA PTB110気圧計は周波数応答の情報が公開されていないが、0.1Hz程度まで使用可能と判断できる

環境モニターとしては、KAGRAのDAQを使える地下実験室ではACO4152NとVAISALA PTB110を使用し、地上ではDAQ/GPS搭載のINF01とINF04を使用する

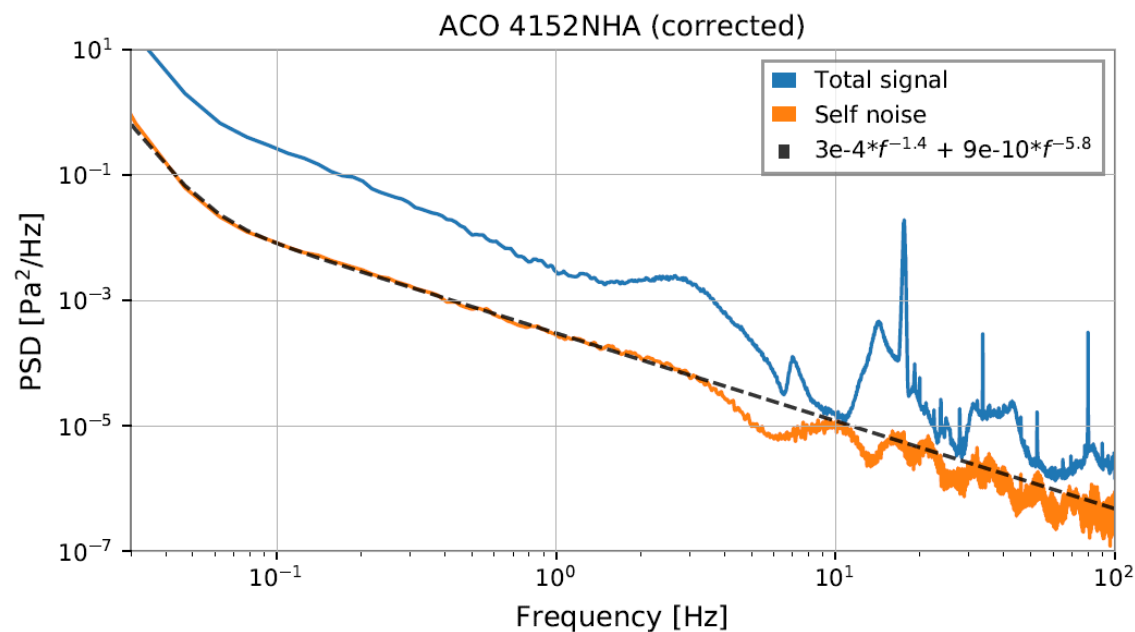
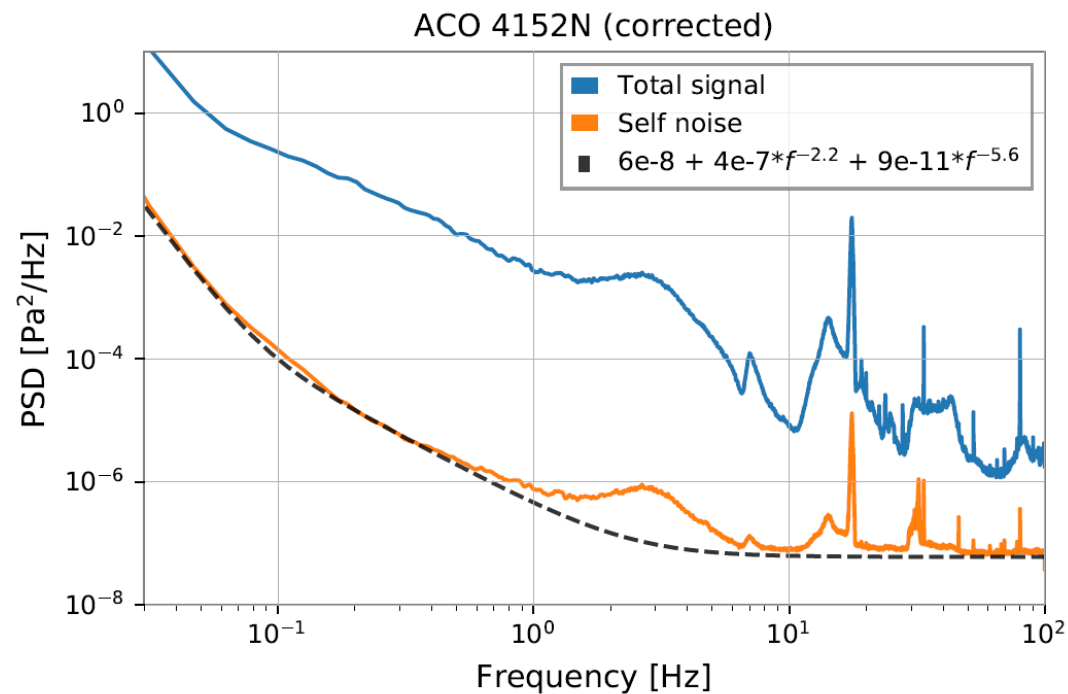
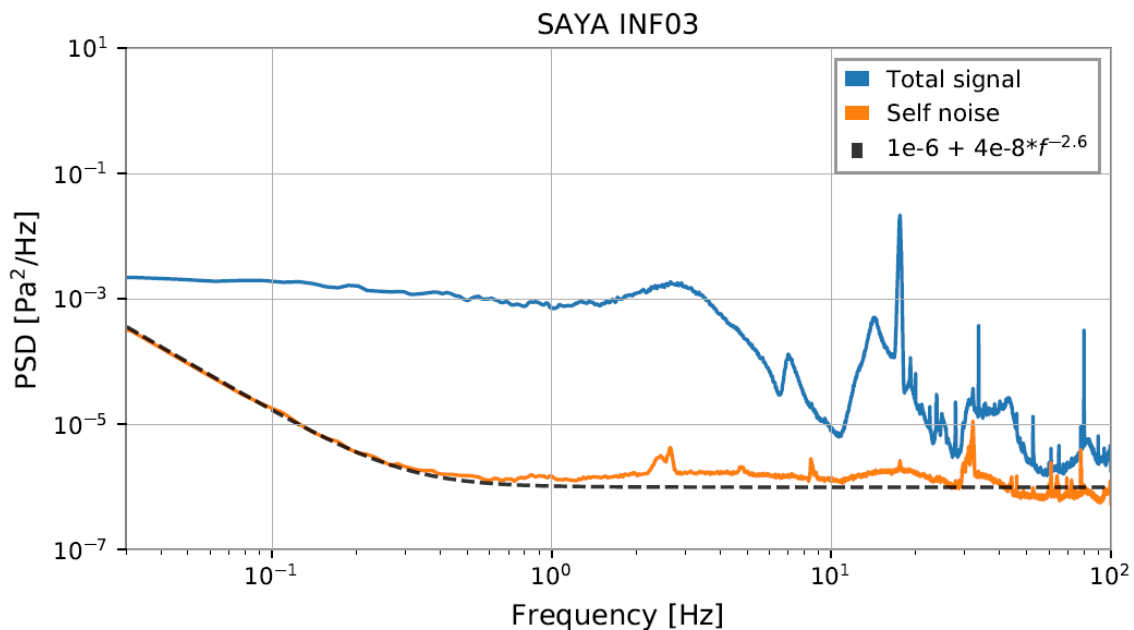
# Self noiseの評価

## 【ACO 4152N】

2つのセンサーの時系列データの差のPSD/2

## 【ACO 4152NHA, SAYA INF03】

そのセンサー(添字 0)の信号に対し、2つACO 4152N (添字 1,2)をreferenceとして、クロススペクトル密度  $C_{ij}$  を用いてインコヒーレントな成分  $C_{10} * C_{02} / C_{12}$  を評価 (-> Self noiseとみなす)

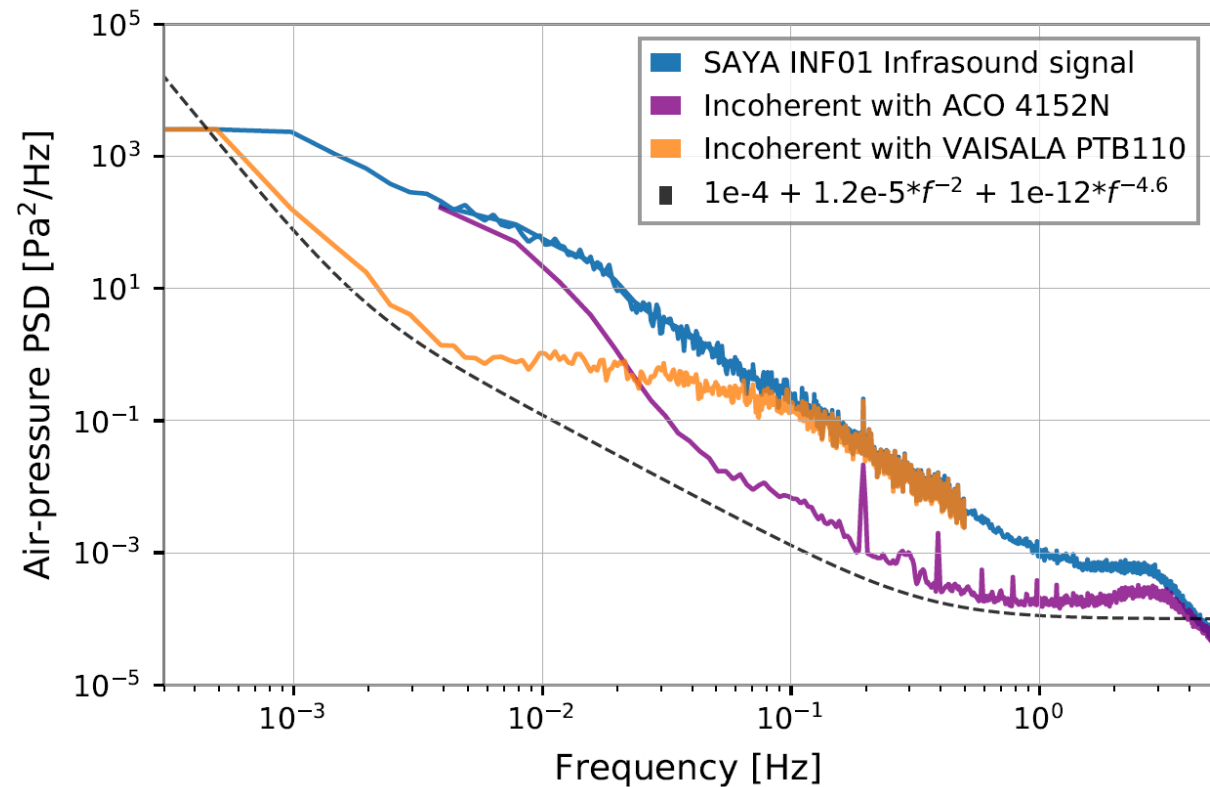
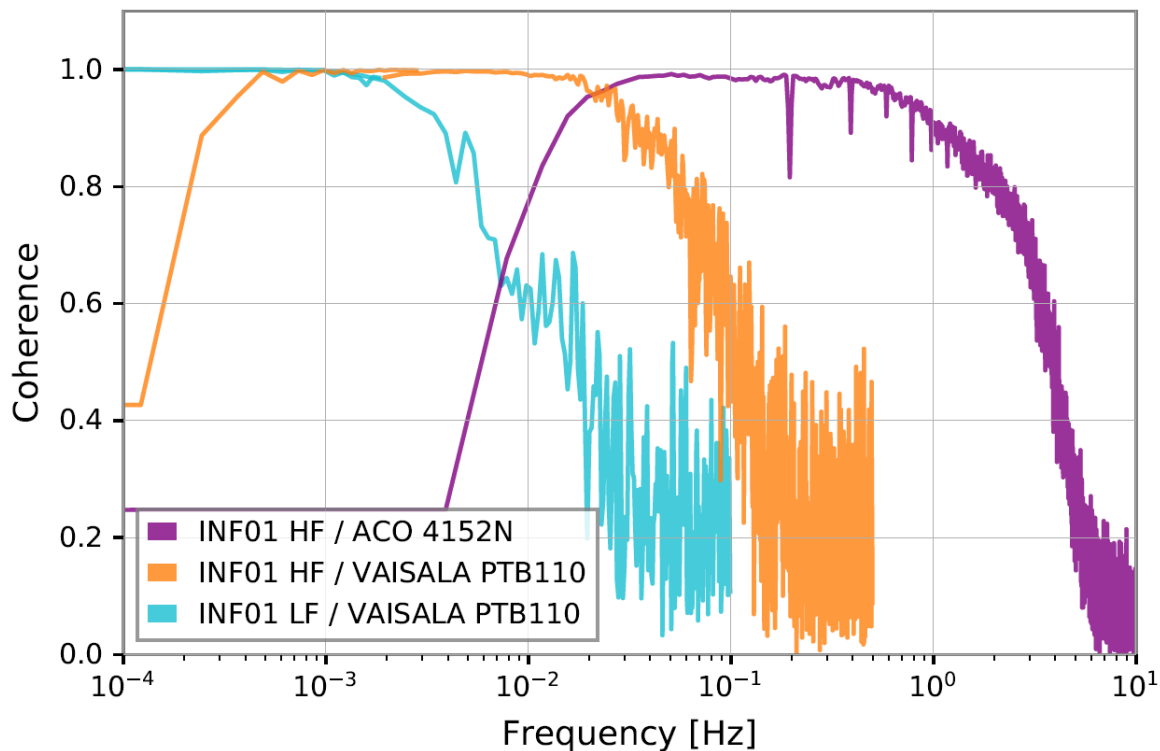




# Self noiseの評価

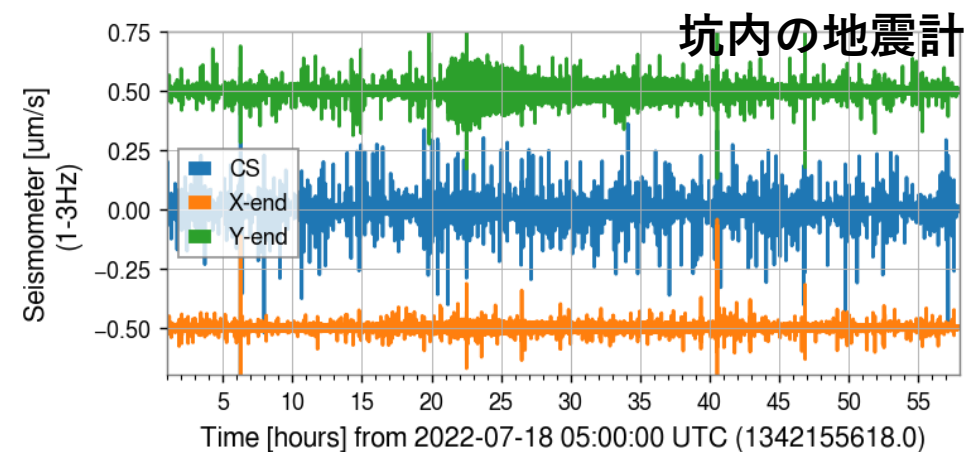
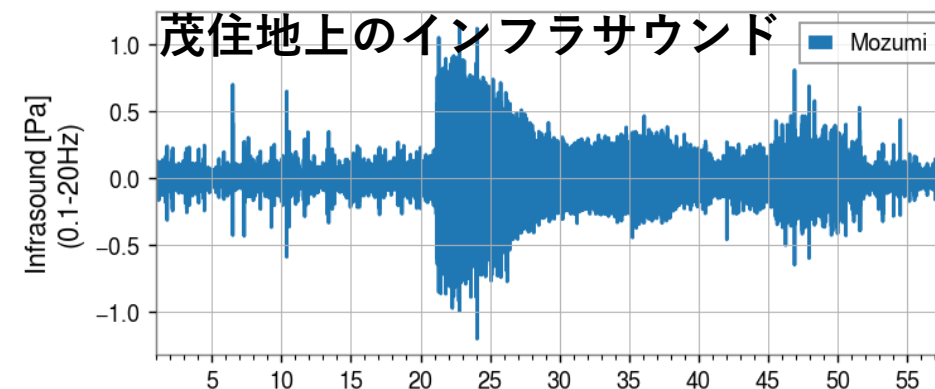
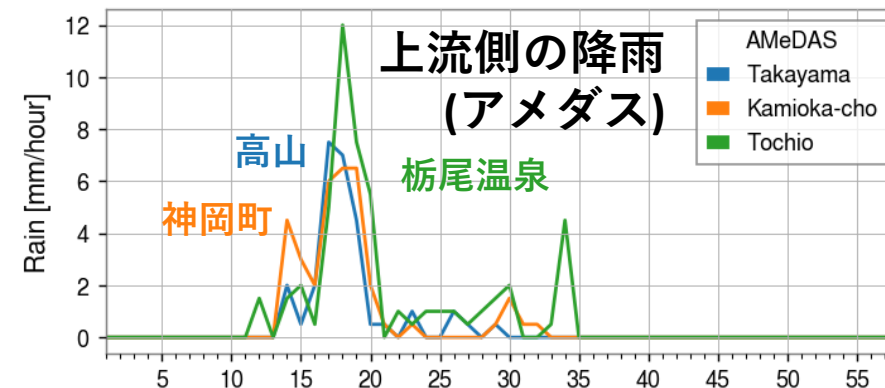
【SAYA INF01 HF(infrasound channel)】

高周波ではACOマイク、低周波では気圧計とのコヒーレンス  $\gamma(f)$  を使って、  
インコヒーレントな成分  $\text{PSD} * (1-\gamma^2)$  を評価し、包絡線を心の目で作る



# 観測例:ダム放水

- KAGRAのすぐ近くにダムがあり、川が増水すると放水する
- 放水により、KAGRA坑内の地面振動(2Hz付近)が大きくなる
  - 特にダムに近いY-endで顕著
- 茂住地上のインフラサウンド観測で信号が見られる
  - わざわざ人が見に行ったり、北陸電力に放水時刻を問い合わせたりする必要がなくなった

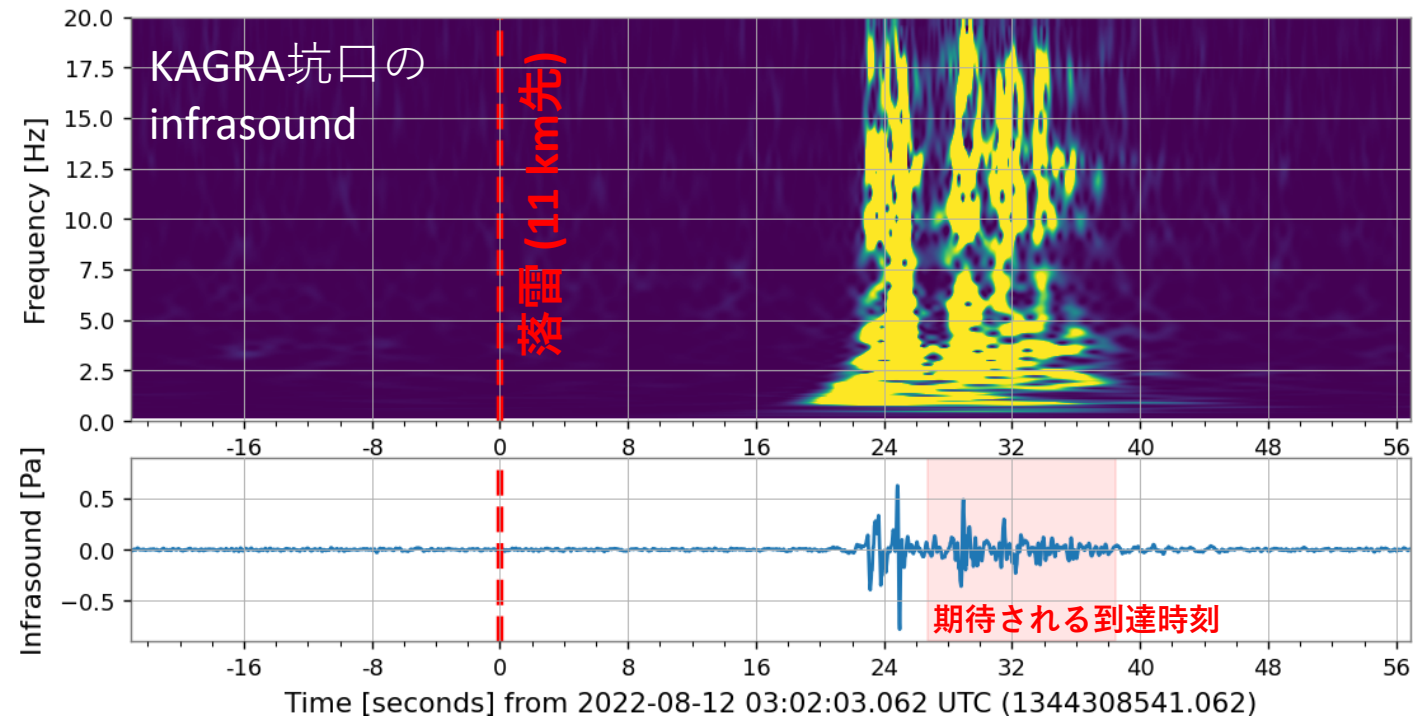
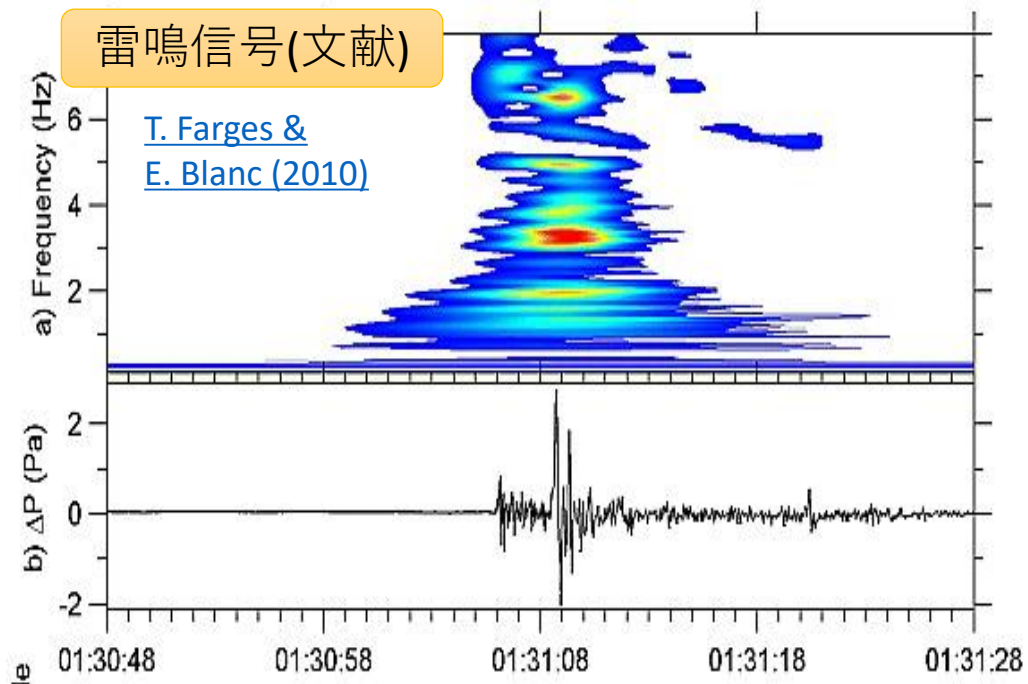


## 新猪谷ダム



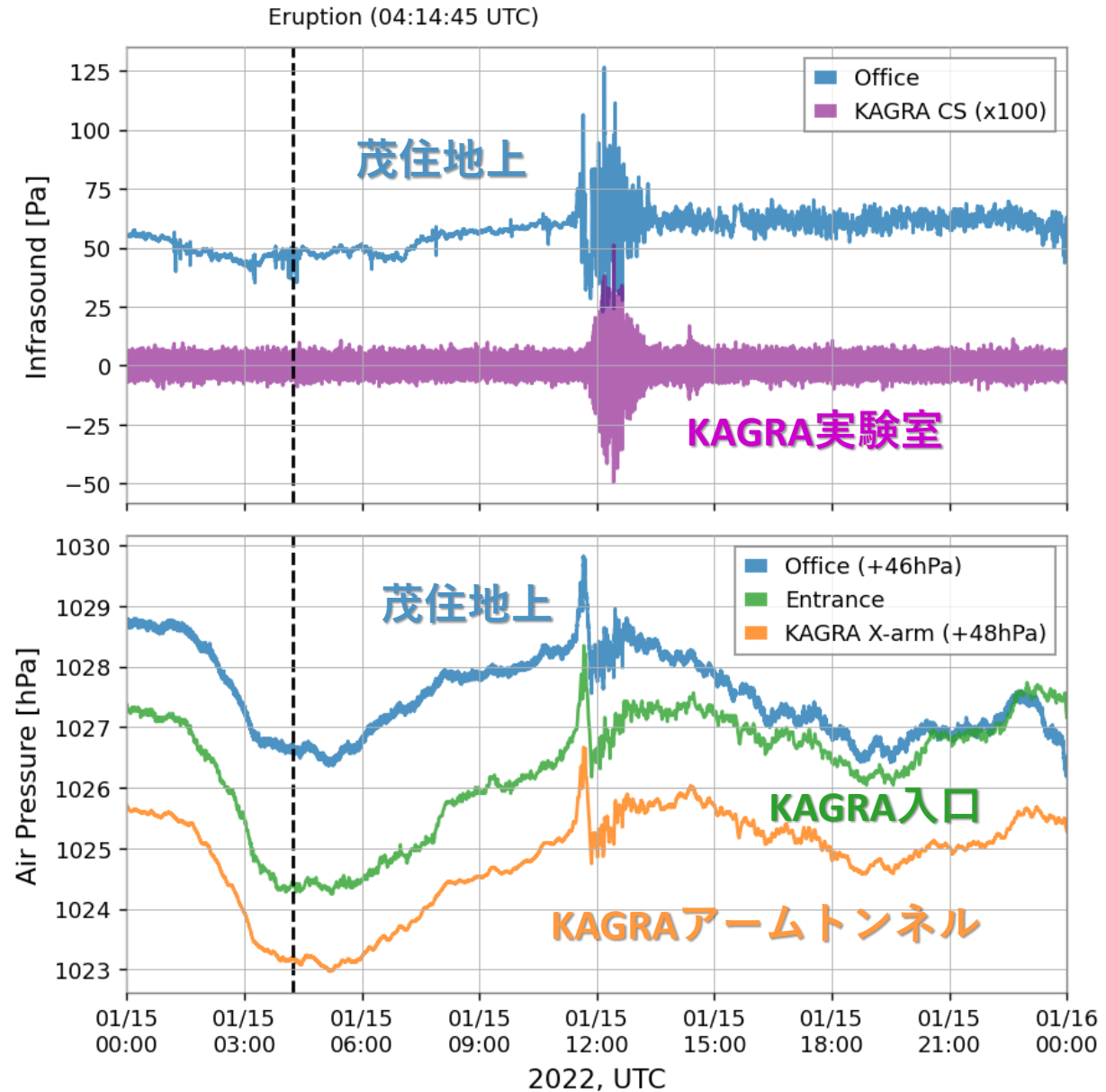
# 観測例：雷鳴 (thunder)

- 雷鳴はインフラサウンドソースのひとつとして良く知られている
  - 近年、音波を用いた位置標定やエネルギー推定が考案されている (実用段階には至っていない)
  - 伝搬速度が遅いため、電磁波観測よりも良い精度・分解能を得られる可能性がある
- 地上の重力波検出器(Virgo)では、雷鳴の影響が見られたとの報告もある [[arXiv:2203.04014](https://arxiv.org/abs/2203.04014)]
  - 雷の電磁波によるノイズはKAGRAでも見られている [[JINST 16 P07033 \(2021\)](https://arxiv.org/abs/1607.07033)]



# 観測例: トンガ噴火

- 2022年1月15日、トンガで非常に大きな噴火が起こり、世界中で気圧変動が観測された
- KAGRAでも地上・地下の両方でトンガからの気圧変動・地面振動・電磁波を観測した
  - 地上の気圧変動が地下環境に与える影響を定量評価し、PTEPに論文投稿中 **Accepted!**
  - 詳細は [[arXiv:2206.14396](https://arxiv.org/abs/2206.14396)] を参照



# まとめ

- ✓ KAGRAでは環境擾乱の一種として微気圧・低周波音のモニターを行っている
- ✓ 様々な種類の市販センサーを購入し、それぞれの性能を比較評価した
- ✓ 微気圧・低周波音を用いてダム放水・雷鳴・噴火などの現象をモニターできている

今後は重力波観測に向け、干渉計に与える影響の調査やモニターツールの整備などを進めていく