

KAGRAにおける環境雑音 注入試験と評価

19aT11-4

東京大学宇宙線研究所

田中大生 on behalf of KAGRA collaboration

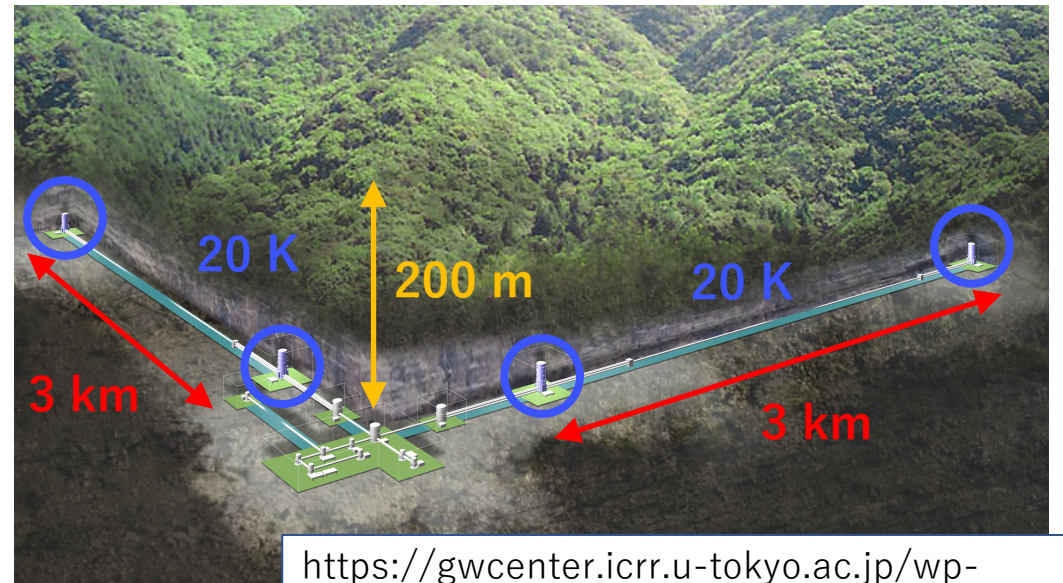
目次

- KAGRA
- Physical Environmental Monitor (PEM)
- 環境雑音注入試験
 - 実験
 - 結果
- まとめ
- 今後

KAGRA

●レーザー干渉計型重力波検出器^[*]

- 基線長：3km
- 地下：200 m
- 極低温：20 K



<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/wp-content/uploads/2018/08/Nikken-KAGRA.jpg>

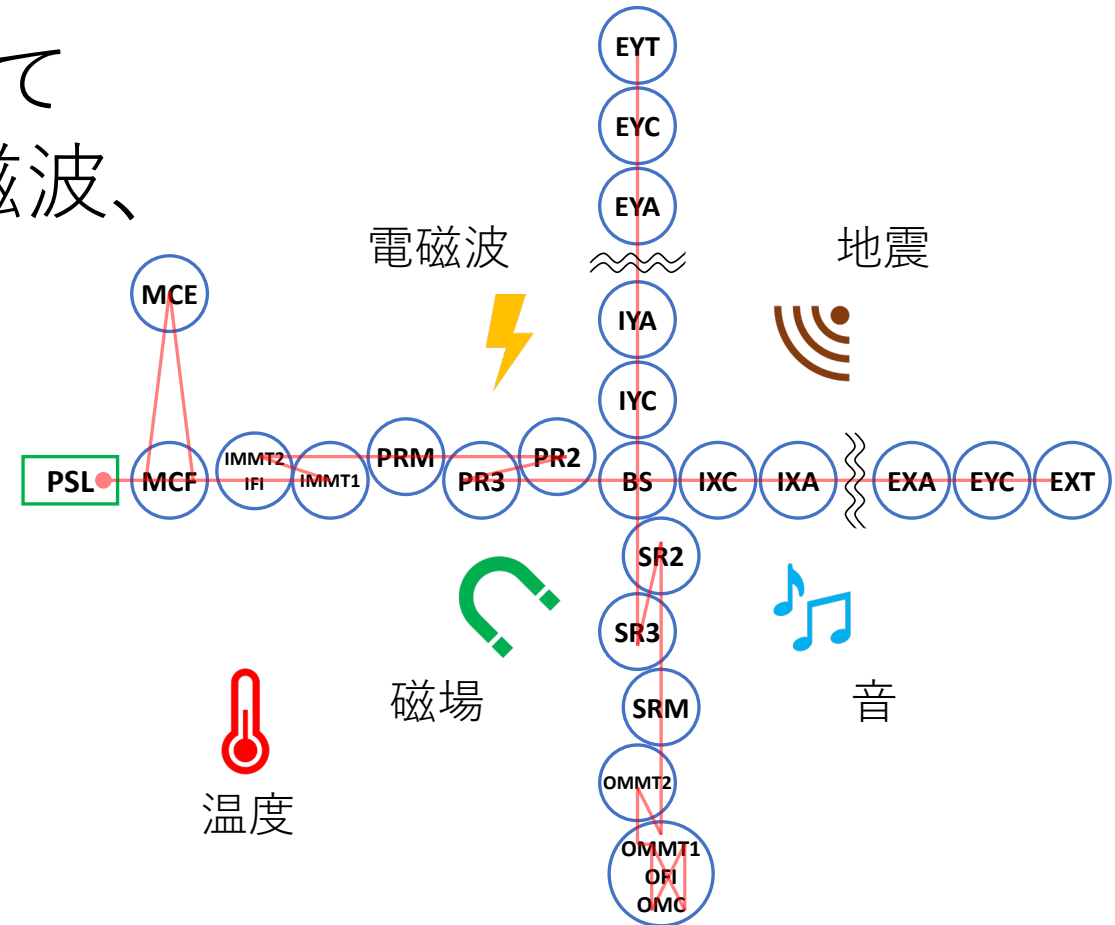
●現在の状況

- Fabry Perot Michelson干渉計制御の達成、Dual Recycled Fabry Perot Michelson干渉計制御の達成に向けて調整中（榎本 18aT11-2）
- Michelson干渉計やFabry Perot Michelson干渉計としての干渉信号を用いて、干渉計にとっての雑音を減らしたり、制御の最適化などをして感度向上を図っている

Physical Environmental Monitor (PEM)

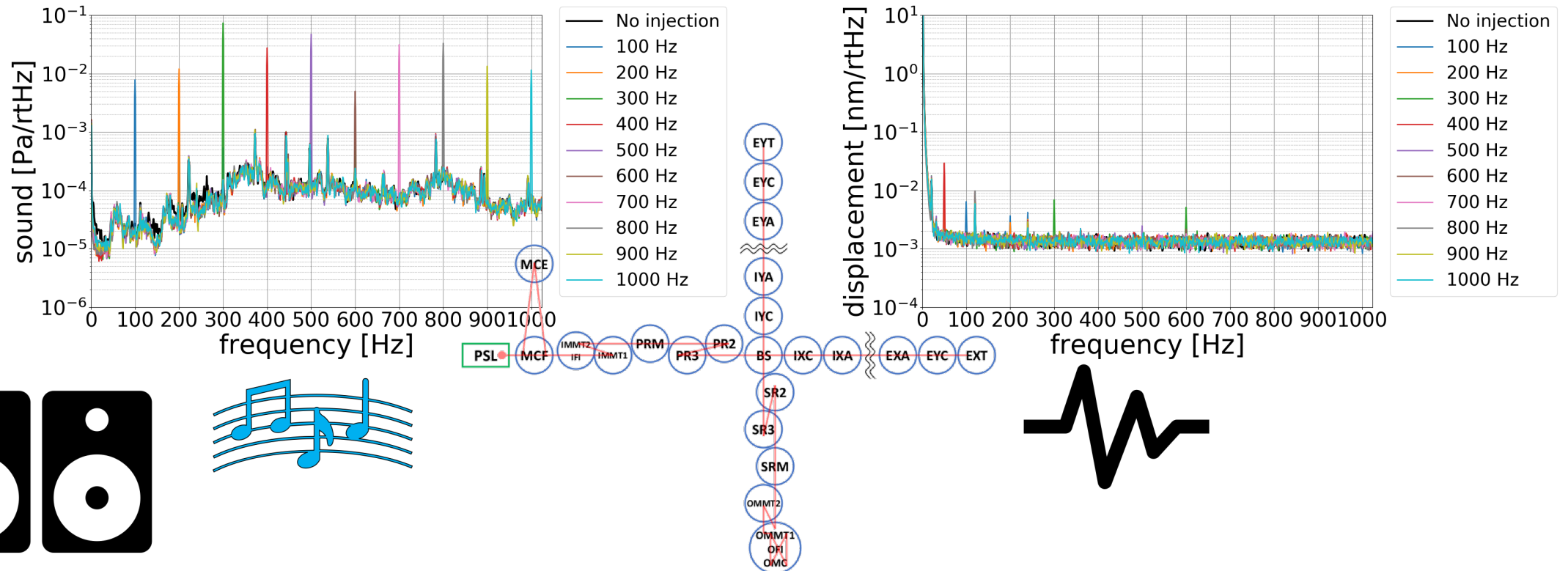
- KAGRAの様々な機器などについて
周辺環境（地震、音、磁場、電磁波、
温度、湿度など）が影響を与え、
環境雑音として検出される
- 例えば音は様々な機器を揺らし
音響雑音として検出される

そのような環境雑音を減らすのが
PEMグループである



環境雑音注入試験

- 環境雑音の評価方法の一つとして環境雑音注入試験がある
- 環境信号を注入することによって干渉計の環境雑音を意図的に増加させ、その影響を評価する



環境雑音注入試験

- 干渉信号を $a(f)$ 、重力波を $x(f)$ 、今回評価する音響雑音を $n_{\text{env}}(f)$ として

$$a^2 = x^2 + n_{\text{env}}^2$$

- マイクの信号を $b(f)$ 、音を $x_{\text{env}}(f)$ として

$$b = x_{\text{env}}$$

環境雑音注入試験

- カップリング関数 $C(f)$ を使って、

音響雑音を $n_{\text{env}} = Cx_{\text{env}}$ のように書けると

すると干渉信号は

$$\begin{aligned} a^2 &= x^2 + n_{\text{env}}^2 \\ &= x^2 + C^2 x_{\text{env}}^2 \end{aligned}$$

a	:	干渉信号
b	:	マイクの信号
x	:	重力波
x_{env}	:	音
n_{env}	:	音響雑音

環境雑音注入試験

- x_{inj} の音を音響雑音注入試験をした場合の

マイクの信号 $b_{inj}(f)$ を考えると、

$$b_{inj}^2 = x_{env}^2 + x_{inj}^2$$

- 干渉信号 $a_{inj}(f)$ は

$$a_{inj}^2 = x^2 + C^2(x_{env}^2 + x_{inj}^2)$$

a	:	干渉信号
b	:	マイクの信号
x	:	重力波
x_{env}	:	音
C	:	カップリング ファンクション
n_{env}	:	音響雑音

環境雑音注入試験

●カップリング関数は

$$C = \sqrt{\frac{a_{\text{inj}}^2 - a^2}{b_{\text{inj}}^2 - b^2}}$$

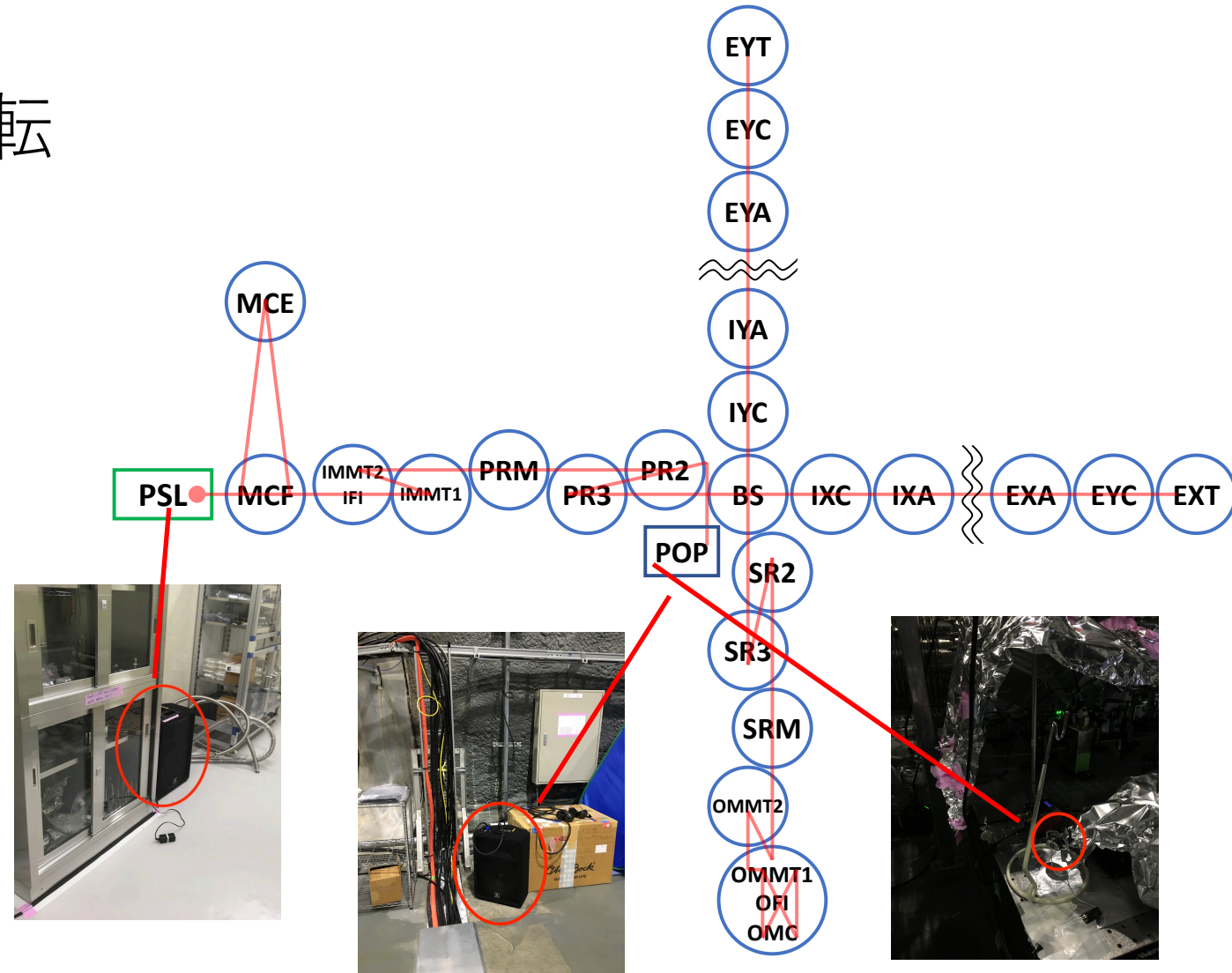
●音響雑音は

$$n_{\text{env}} = Cx_{\text{env}} = \sqrt{\frac{a_{\text{inj}}^2 - a^2}{b_{\text{inj}}^2 - b^2}} b$$

a	: 干渉信号
a_{inj}	: 注入試験中の干渉信号
b	: マイクの信号
b_{inj}	: 注入試験中のマイクの信号
x	: 重力波
x_{env}	: 音
x_{inj}	: 注入した音
C	: カップリング関数
n_{env}	: 音響雑音

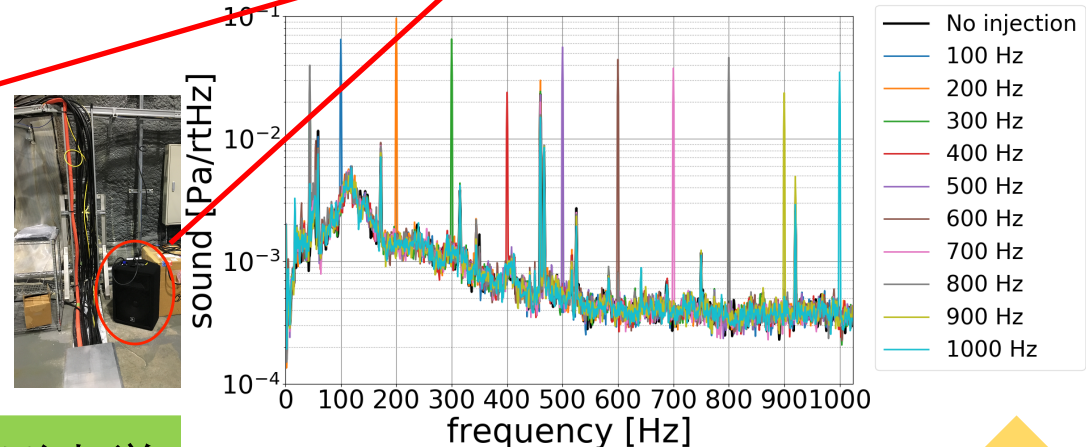
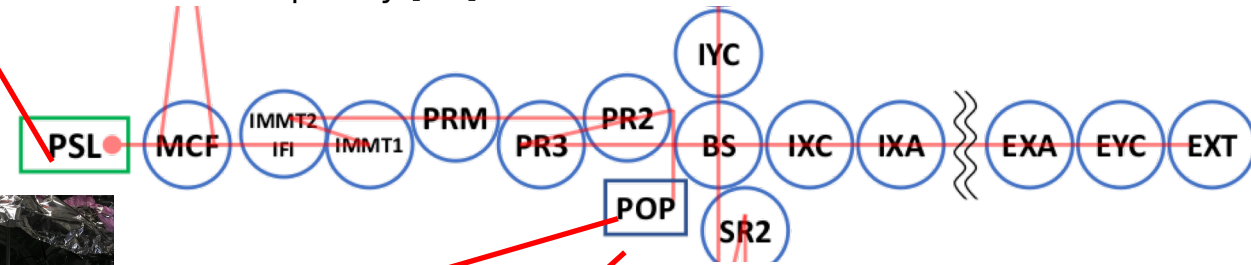
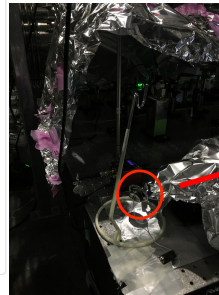
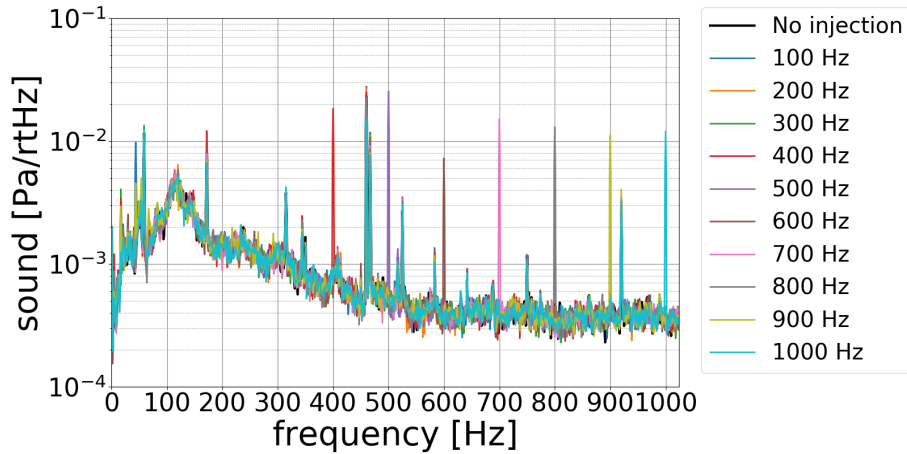
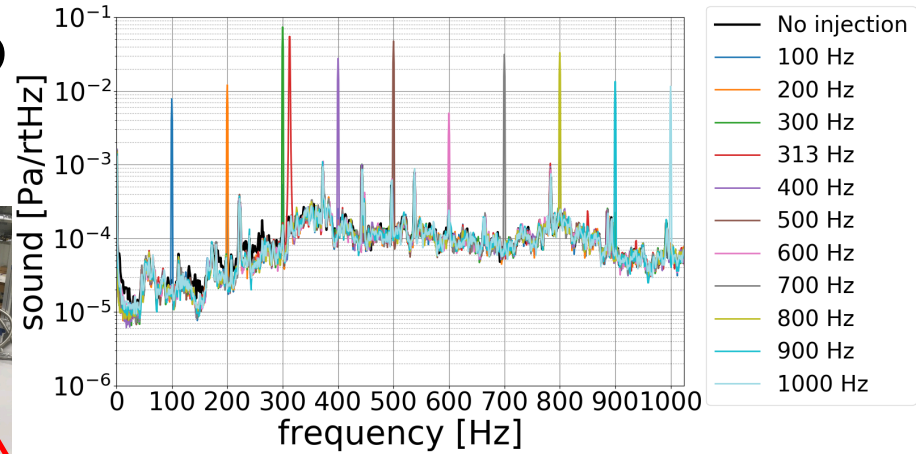
実験

- 2019/7/13にKAGRAがMichelson干渉計として運転していた際に音響雑音注入試験を行った
- スピーカーを用いて3つの場所に向け行った
 - 入射光を作る光学系 (PSL)
 - 入射光を2つの腕に分割する鏡 (BS)
 - 干渉信号を受け取る検出器 (POP)



実験

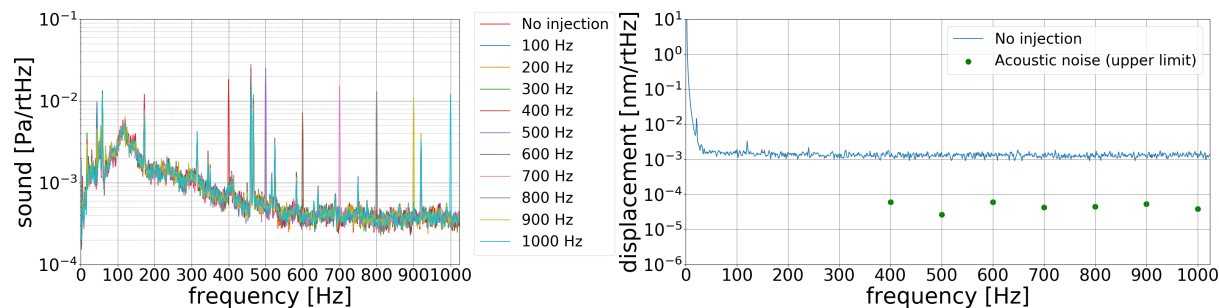
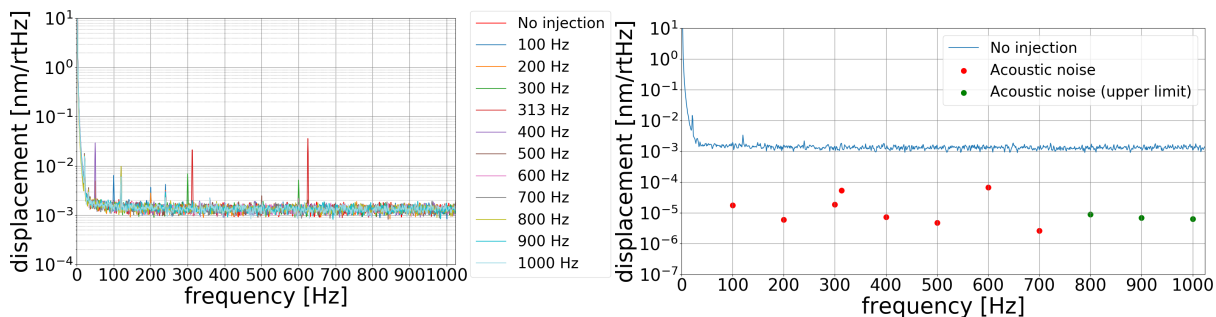
- 100~1000 Hzまで100 Hzずつ (PSLのみ312.5 Hzも含む) のsin波を注入



結果

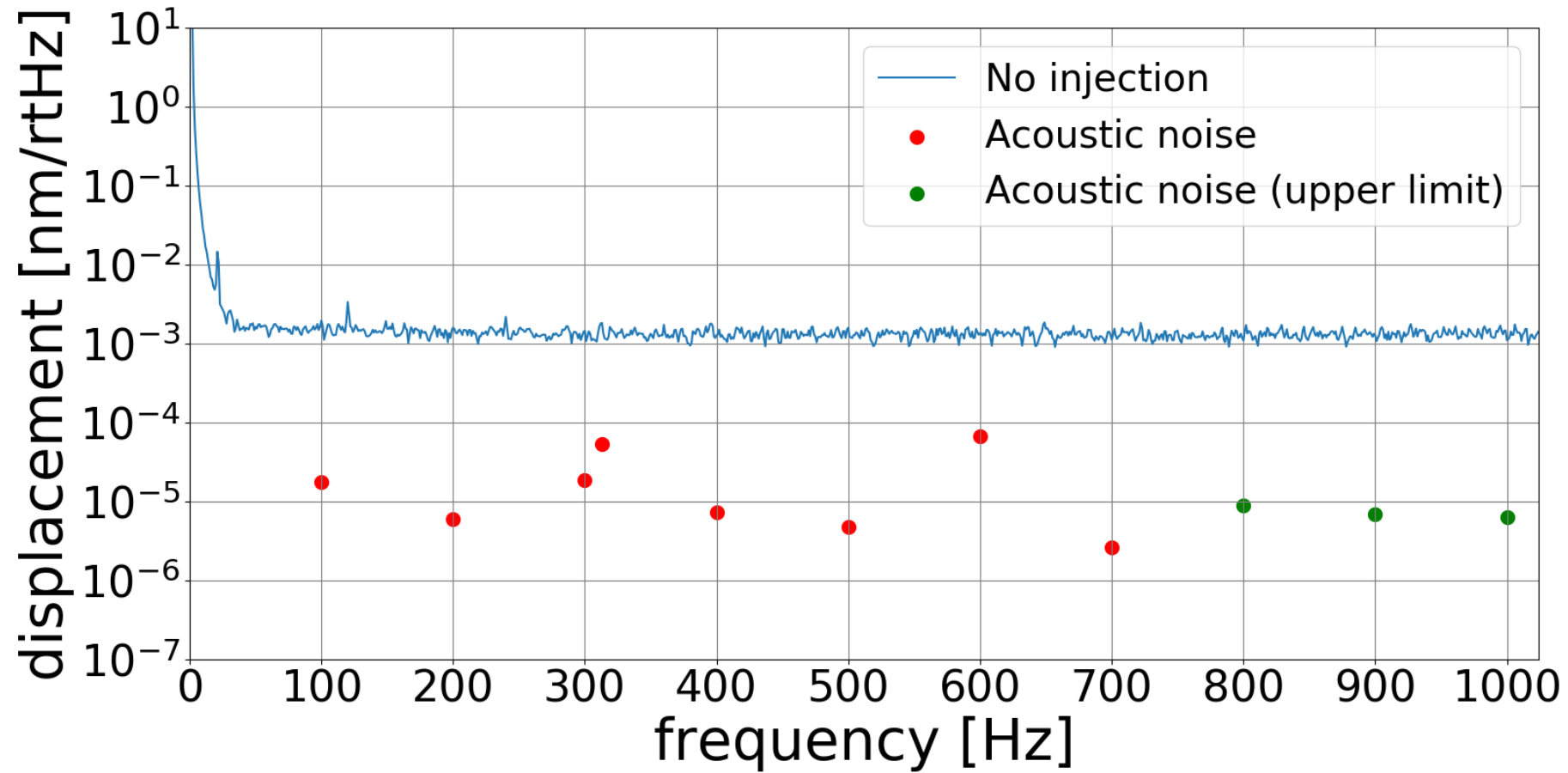
- Michelson干渉計の干渉信号の音響雑音を評価した
- 干渉信号は青い線
- 音響雑音は
 - 十分音響雑音が注入できた場合に赤い点
 - 十分音響雑音が注入できなかった場合には緑の点
 - 十分音が確認できなかった場合には点を打っていない

$$C_{\text{upper}} = \frac{a_{\text{inj}}}{\sqrt{b_{\text{inj}}^2 - b^2}}$$



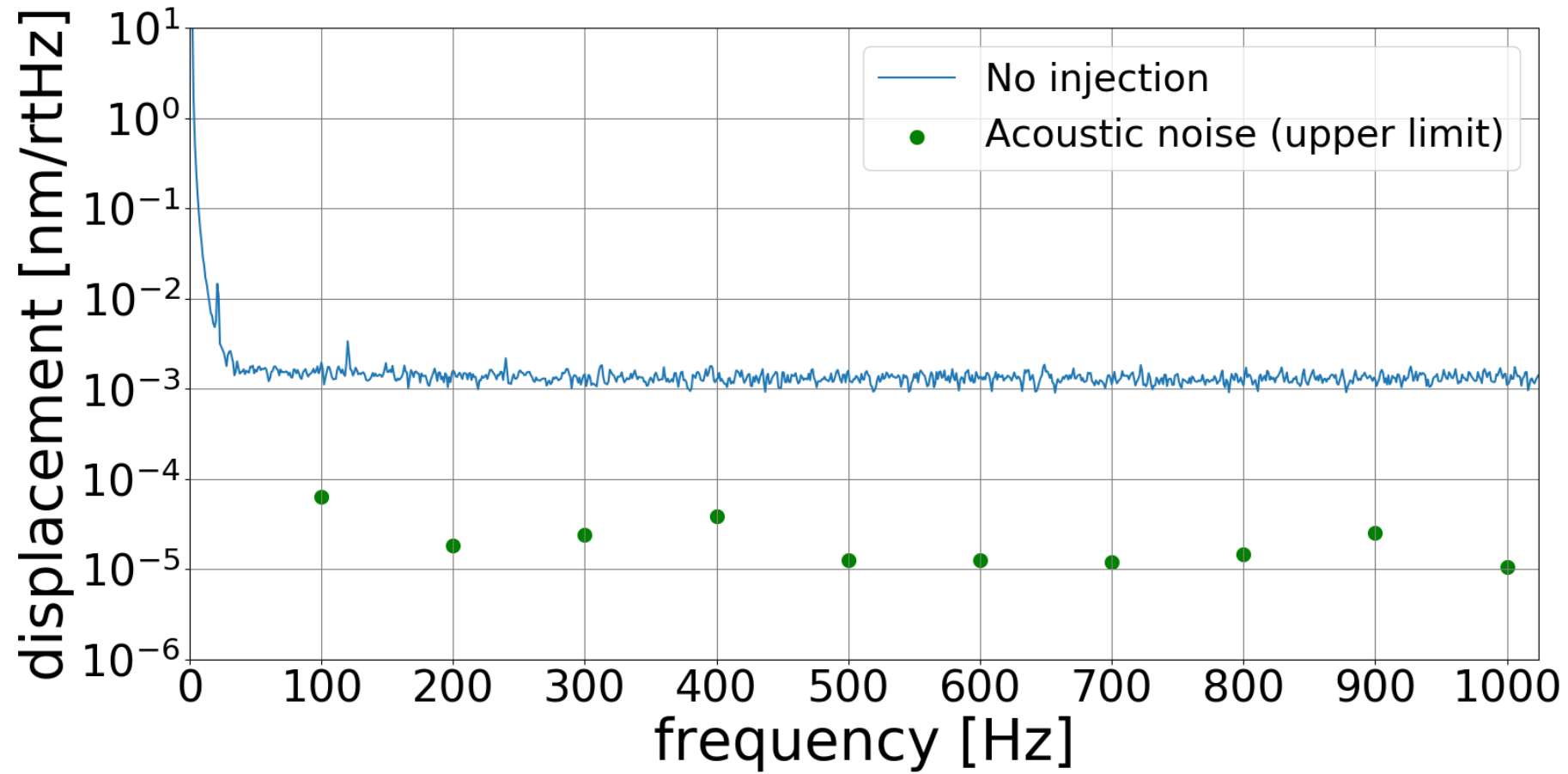
結果

●PSL



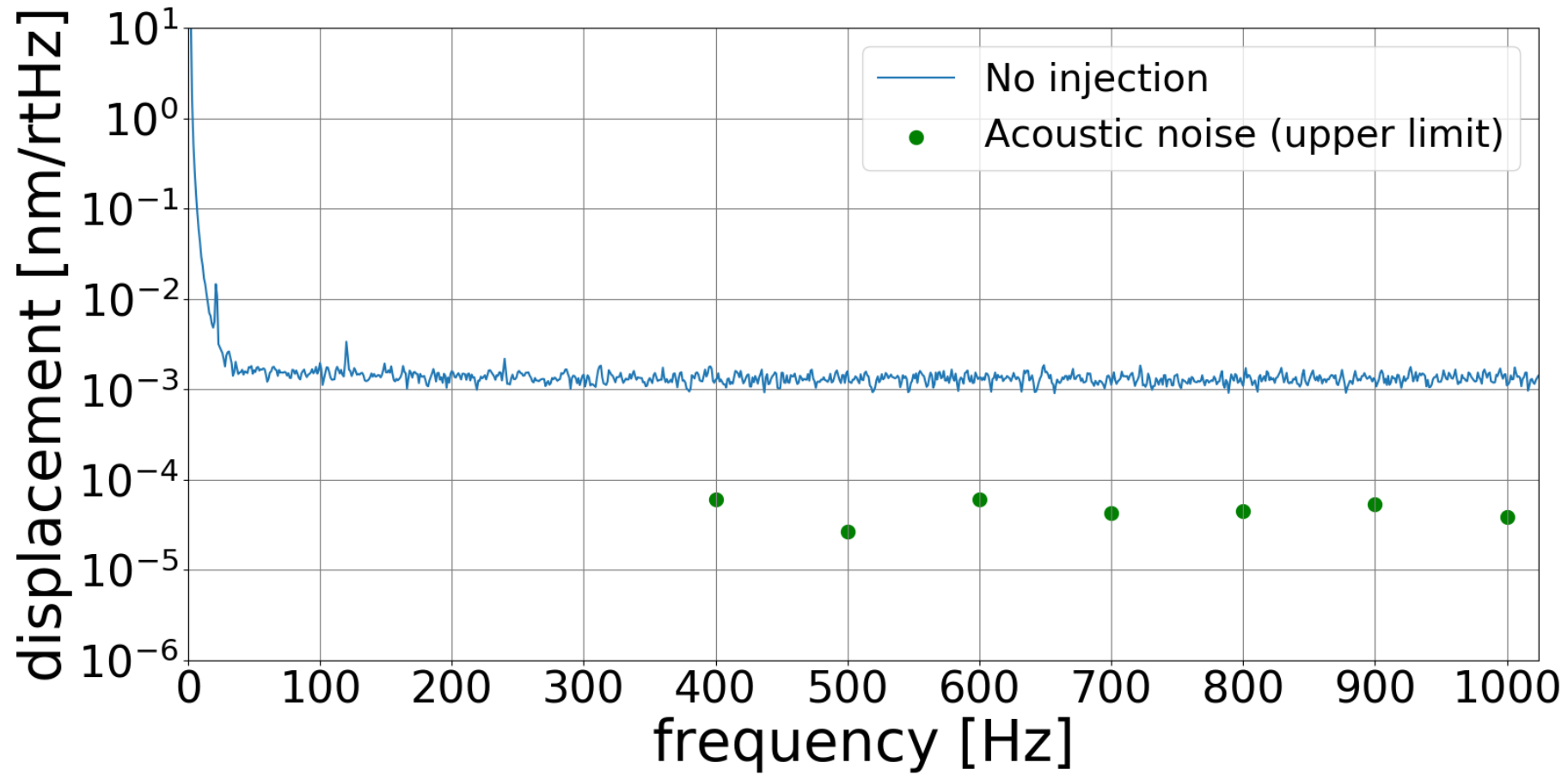
結果

●BS



結果

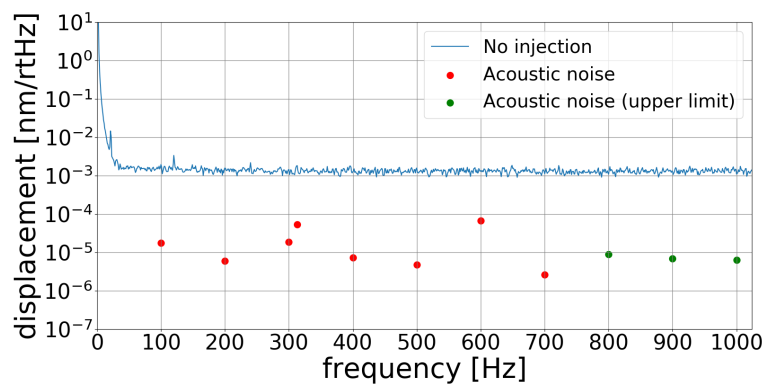
●POP



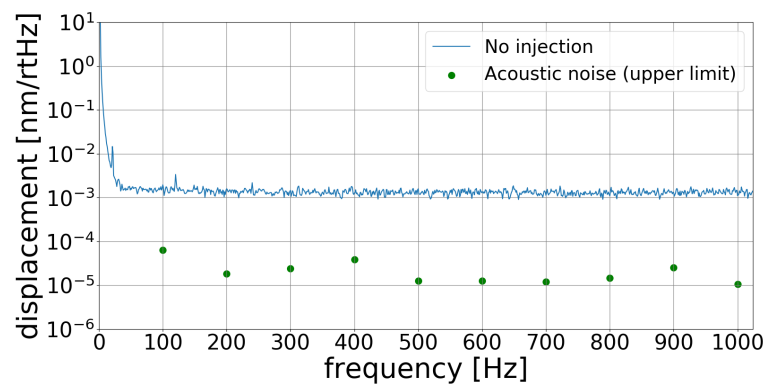
まとめ

- 現在のKAGRAの干渉計の干渉信号ではまだ音響雑音はKAGRAの感度を侵すものとはなっていない
- 今後感度が**2桁**良くなるとPSLでカップリングする音響雑音がKAGRAにおいて大きな雑音となりうる

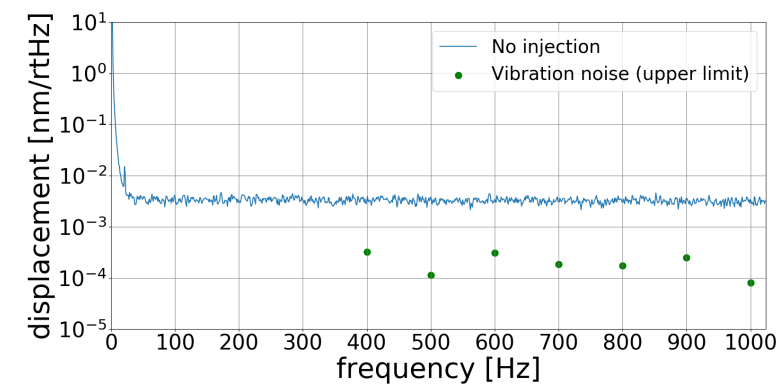
PSL



BS



POP



今後

- 音響雑音評価だけでなく振動、磁場の環境雑音評価のためにシェイカー、インパルスハンマー、コイルを用いた環境雑音注入試験を行いたい
- KAGRAは今後様々な干渉計の状態で行っていくため、それぞれの状態でも環境雑音注入試験を行いたい



今後の計画

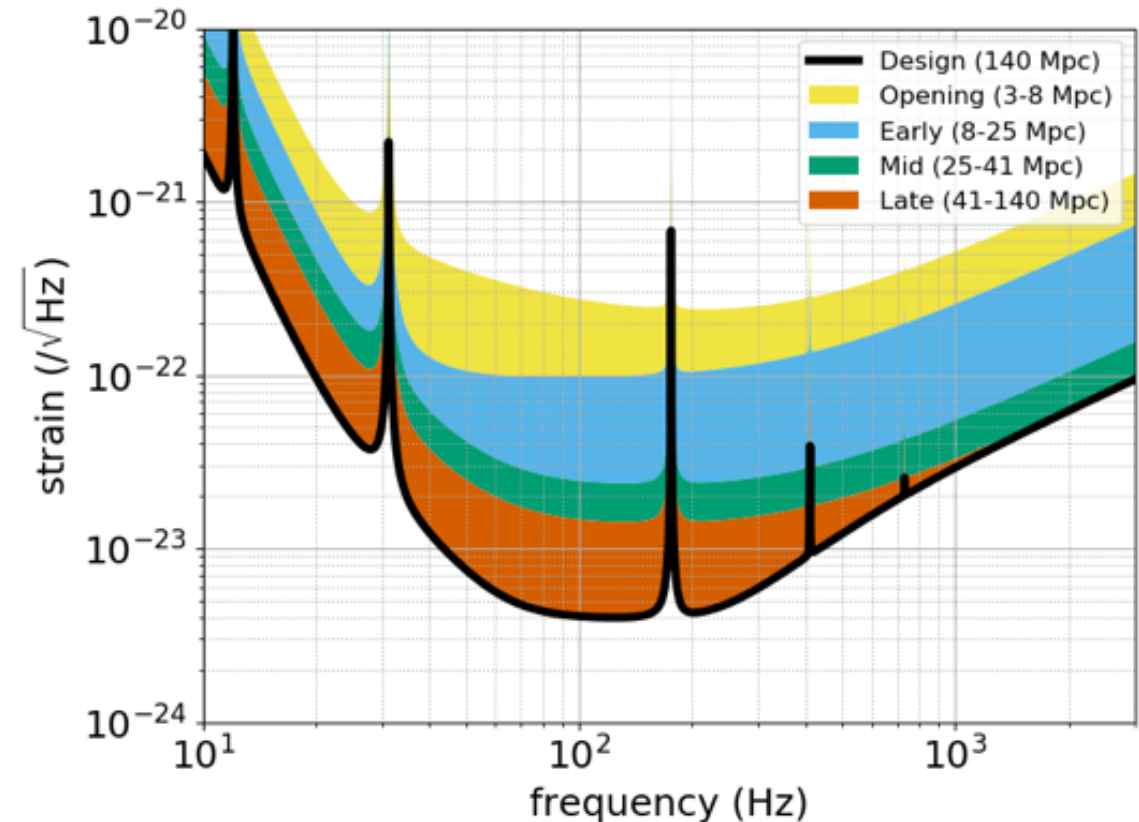
日程	KAGRA	PEM（環境雑音注入試験）
9/1~	Dual Recycled Fabry Perot Michelson 干渉計の制御調整	<ul style="list-style-type: none">各雑音注入装置（スピーカー、シェイカー、インパルスハンマー、コイル）の準備およびテスト環境雑音注入試験の方法の発展および最適化
10/1~	制御の調整およびメンテナンス	<ul style="list-style-type: none">環境雑音注入試験の方法の発展および最適化<ul style="list-style-type: none">環境雑音注入試験による雑音評価
11/1~	ノイズハンティング	<ul style="list-style-type: none">環境雑音注入試験による雑音評価
12月頃	LIGO、Virgoとの国際同時観測への参加	

ご静聴ありがとうございました

KAGRA

●感度向上

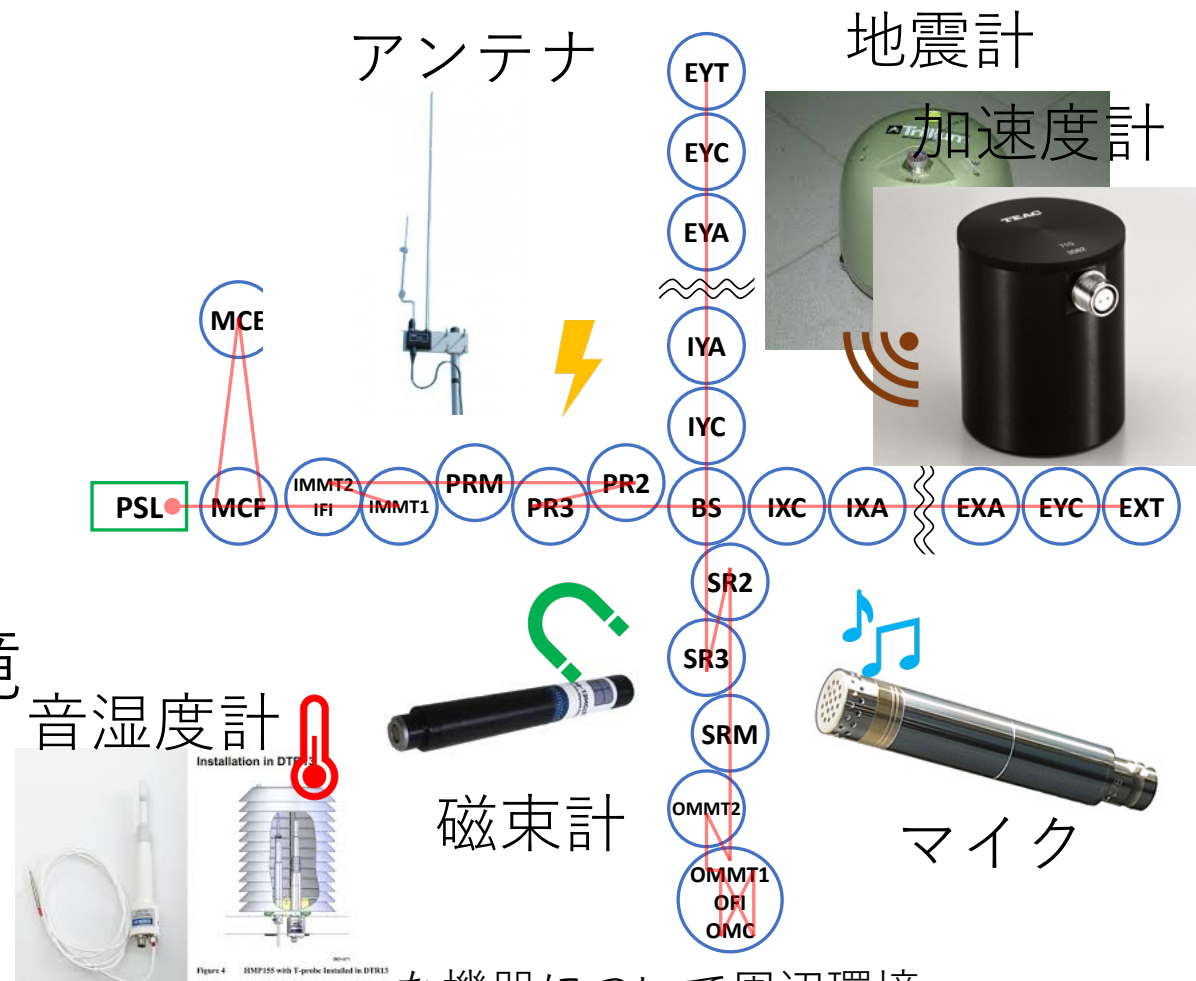
- KAGRAのデザイン上減らすことが出来ない原理雑音以外の、散乱光雑音、回路の雑音、環境雑音などを減らす必要がある
- それぞれの雑音について、対処するグループが存在するが、今回は環境雑音について発表する



Living Rev Relativ (2018) 21:3, Fig.1

Physical Environmental Monitor (PEM)

- 環境モニターの設置
- 雑音の特徴付け
- 環境雑音注入試験
- 環境データのdata quality flagへの提案
- コヒーレンス解析を用いた環境雑音探索



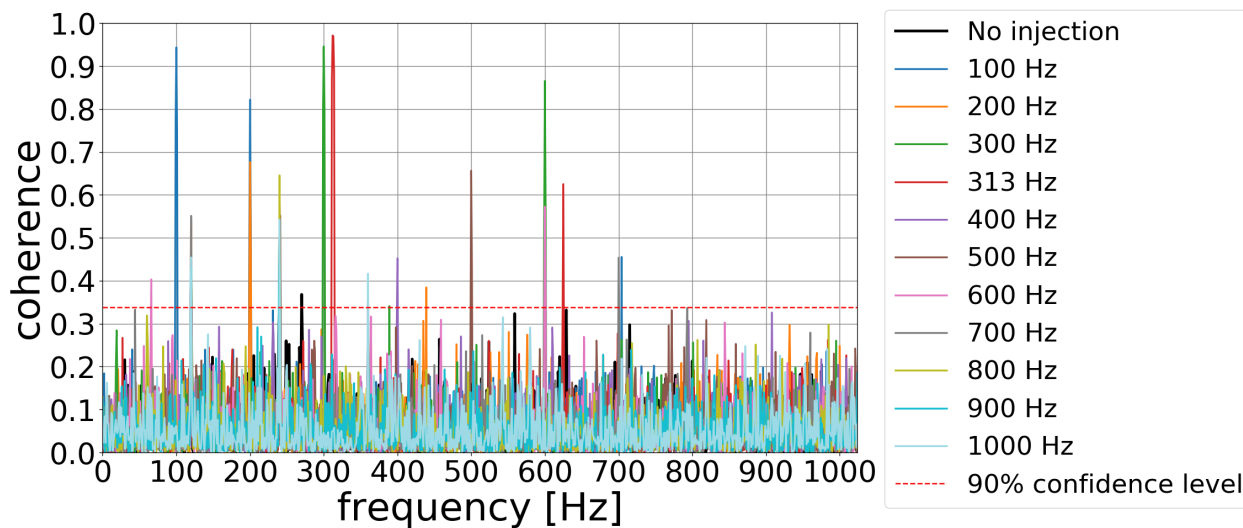
KAGRAの様々な機器について周辺環境
(地震、音、磁場、電磁波、温度、湿度など)
が影響を与える

Physical Environmental Monitor (PEM)

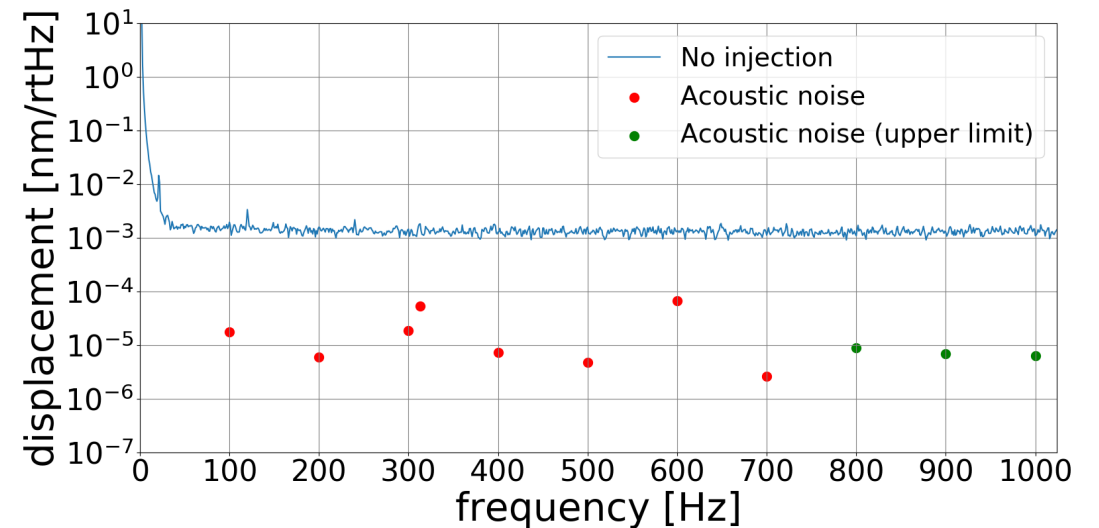
●環境との相関

- 環境信号は干渉計の諸装置に実際に相関し、環境雑音として検出される
- 例えば音は様々な機器を揺らし音響雑音として検出される

音信号と干渉信号とのコヒーレンス



干渉信号と音による環境雑音



諸装置の雑音レベルの要求値を上回る可能性がある
環境雑音は出来るだけ除去しなければならない

コヒーレンス

二つの信号 $x(t), y(t)$ のフーリエ変換 $X(\omega), Y(\omega)$ を用いてクロススペクトル $S_{xy}(\omega)$ は

$$S_{xy}(\omega) = \overline{X^*(\omega)Y(\omega)}$$

と定義され、それを使って2乗コヒーレンス $\gamma_{xy}^2(\omega)$ は

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)}$$

と定義される。

コヒーレンスは各周波数について二つの信号間でどれだけ相関を持っているのかを判断する指標となる。
今回の解析では $x(t)$ は音の信号、 $y(t)$ はmichelson干渉計の干渉信号。

コヒーレンス

100(1 - α)%有意でコヒーレンスが無いという帰無仮説を棄却する場合の2乗コヒーレンスの信頼限界 $\gamma_{1-\alpha}^2$ は、

となる。ここで、 N_e は等価自由度。
$$\gamma_{1-\alpha}^2 = 1 - \alpha^{\frac{1}{N_e - 1}}$$

環境雑音注入試験

$$a^2 = x^2 + C^2 x_{\text{env}}^2$$

$$b^2 = x_{\text{env}}^2$$

$$a_{\text{inj}}^2 = x^2 + C^2 (x_{\text{env}}^2 + x_{\text{inj}}^2)$$

$$b_{\text{inj}}^2 = x_{\text{env}}^2 + x_{\text{inj}}^2$$

$$C = \sqrt{\frac{a_{\text{inj}}^2 - a^2}{b_{\text{inj}}^2 - b^2}}$$

$$n_{\text{env}} = C x_{\text{env}} = \sqrt{\frac{a_{\text{inj}}^2 - a^2}{b_{\text{inj}}^2 - b^2}} b$$

環境雑音注入試験

- 検出器の信号 $a(f)$ を、検出器の測りたい物理量を $x(f)$ 、今回評価する環境雑音を $n_{\text{env}}(f)$ 、その他の検出器の雑音を $n_a(f)$ として

$$a^2 = x^2 + n_{\text{env}}^2 + n_a^2$$

と表す

- 対して、PEMの信号 $b(f)$ は、環境信号を $x_{\text{env}}(f)$ 、環境モニタの雑音を $n_b(f)$ として

$$b^2 = x_{\text{env}}^2 + n_b^2$$

と表す

環境雑音注入試験

- ここで、環境雑音をカップリング関数 $C(f)$ というものを使って、環境信号を $n_{\text{env}} = Cx_{\text{env}}$ のように書けるとすると検出器の信号は

$$\begin{aligned} a^2 &= x^2 + n_{\text{env}}^2 + n_a^2 \\ &= x^2 + C^2 x_{\text{env}}^2 + n_a^2 \end{aligned}$$

と書ける

環境雑音注入試験

- 環境雑音注入試験をした場合の検出器信号 $a_{inj}(f)$ および、環境モニタ一信号 $b_{inj}(f)$ を考えると

$$a_{inj}^2 = x^2 + C^2(x_{env}^2 + x_{inj}^2) + n_a^2$$

$$b_{inj}^2 = x_{env}^2 + x_{inj}^2 + n_b^2$$

のように書ける

環境雑音注入試験

- 以上より、カップリングファンクションは

$$C = \sqrt{\frac{a_{\text{inj}}^2 - a^2}{b_{\text{inj}}^2 - b^2}} = \sqrt{\frac{n_{\text{inj}}^2 + n_a^2}{x_{\text{inj}}^2 + n_b^2}}$$

のように書け($n_{\text{inj}} = Cx_{\text{inj}}$)、環境雑音は

$$n_{\text{env}} = Cb = C\sqrt{x_{\text{env}}^2 + n_b^2}$$

のように書ける