

バースト重力波検出に向けた KAGRAにおける環境雑音モニター

新学術「地下宇宙」第7回超新星ニュートリノ研究会

2021年1月7日(木)、8日(金)

国立天文台 鷲見貴生

超新星重力波

超新星爆発では、光やニュートリノだけでなく重力波も放出されると考えられている(未発見)

柴垣氏ポスター@第6回研究会→
固武氏スライド@第4回研究会↓

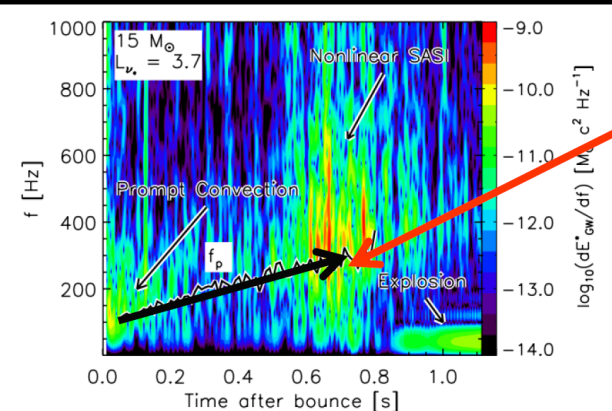
How to detect GWs with no-template features...

✓ Excess power method: Flanagan & Hugh (1998)

⇒ Decompose data-stream into time-frequency domains

⇒ Search for "hot" regions with excess power in the spectrogram !

✓ GW spectrogram from Murphy et al. ('09) ApJ.



★ Increase of typical frequency
⇒ the g-mode frequency of PNS

$$f_p = \frac{N}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{GM}{R^2} \sqrt{\frac{(\Gamma-1)m_n}{\Gamma k_b T}} \left(1 - \frac{GM}{Rc^2}\right)^{3/2}$$

M, R, T : mass, radius & temperature
of PNS, Γ : stiffness of EOS
Due to mass accretion, $M \uparrow$, $R \downarrow$

⇒ $f_p \uparrow$

(see complete derivation in B. Mueller et al. ('13), ApJ)

- ✓ (With no template character...) **Three generic phases are in the spectrogram !**
- ✓ Secular increase of typical GW frequency (f_p) **reflects the PNS evolution.**
- ✓ On top of f_p , the high frequency component comes from strong downflows to PNS.
- ✓ **These qualitative features are common to more recent 2D and 3D models.**
- ✓ The GW amplitudes $\sim 1/10$ than in 2D (KK et al. 2009, Yakunin et al. (2017))

3 計算結果

3.1 重力波 (arXiv:1909.09730)

図1が赤道方向(左)・極方向(右)からみた重力波波形(h)とそのスペクトル進化(スペクトログラム)である。準周期振動の振動数が増加しているのがわかる。 $t_{pb} \sim 70$ msの重力波が強くなっているとき、原始中性子星まわりには1本の渦状腕が現れた(図2左)、 $t_{pb} \sim 100$ ms以降の重力波が強くなっている頃には、原始中性子星まわりには2本の渦状腕が現れた(図2右)。この重力波は次世代重力波検出器であれば、Mpcスケールまで検出が期待できる(図3)。

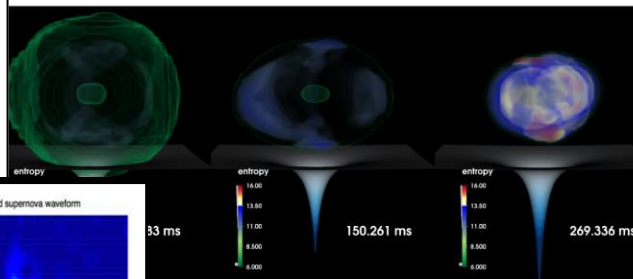


図0. エントロピーの3次元プロット

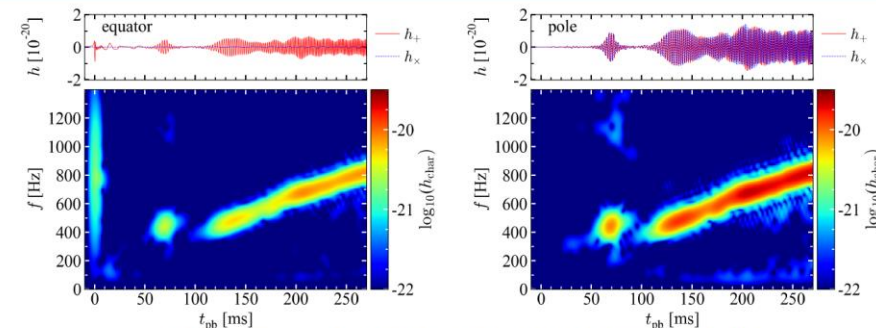


図1. 赤道方向・極方向からみた重力波波形とそのスペクトル進化

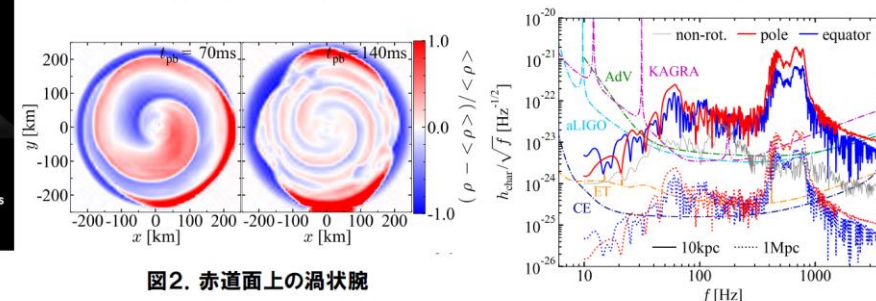


図2. 赤道面上の渦状腕

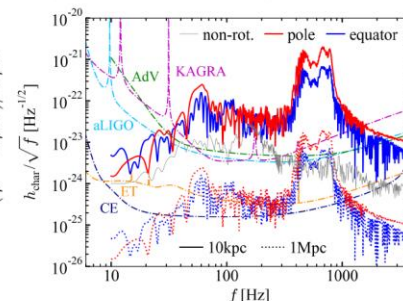


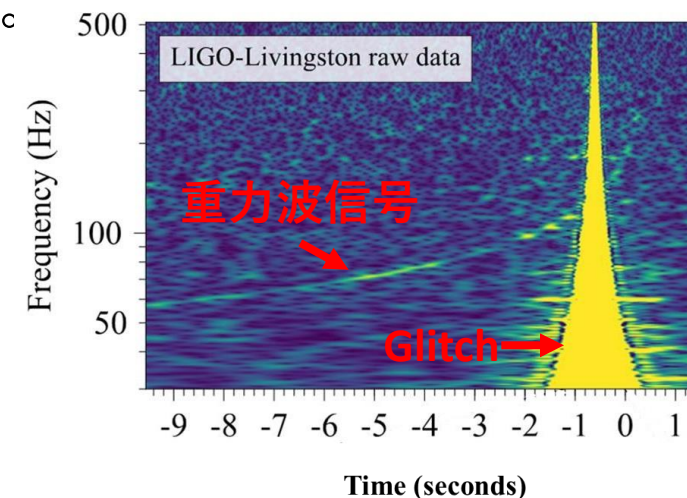
図3. 重力波のスペクトル振幅と検出器ノイズ

超新星重力波はミリ秒程度のバースト重力波で、
波形の理論予測が難しい。

- c.f. 連星中性子星合体→ GW170817

突発性雑音(Glitch)の
理解・削減が重要

&なるべく多くの検出器
で同時観測するのがよい



世界の重力波検出器とKAGRA

LIGO Hanford
USA

LIGO Livingston
USA

GEO600 Hanover
Germany

Virgo Pisa
Italy

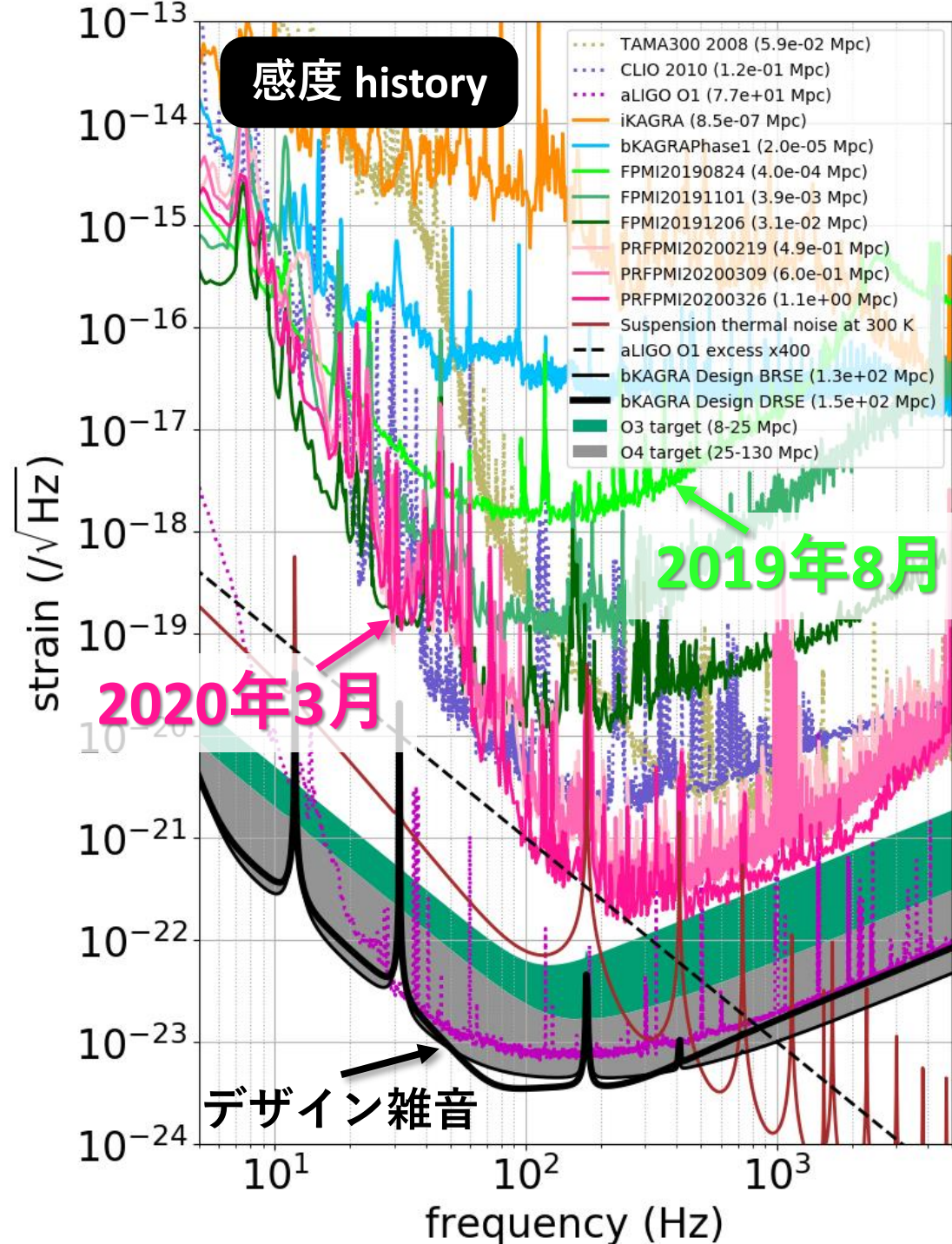


KAGRA Hida
Japan



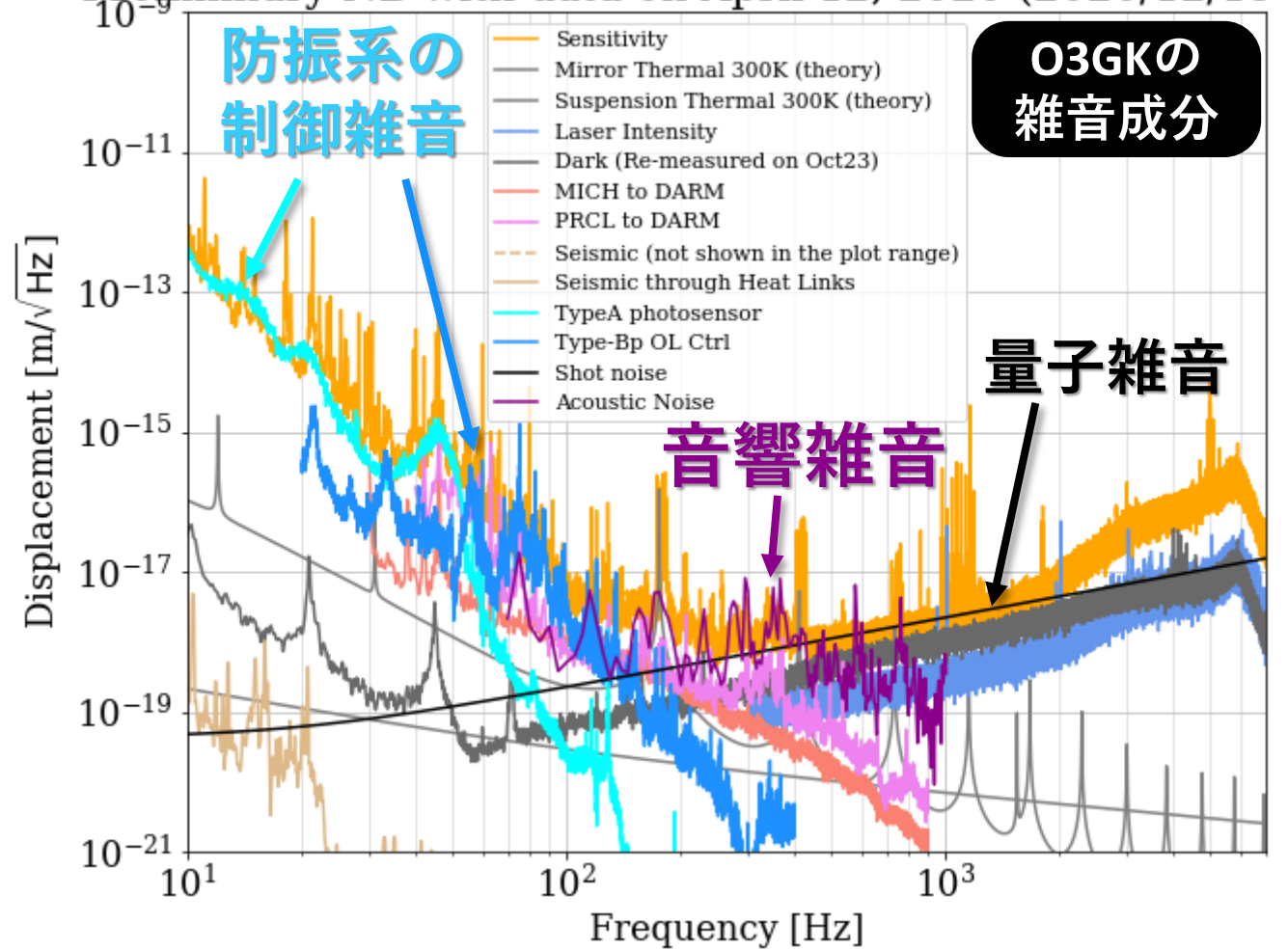
- 飛騨市神岡町 池ノ山
 - 地下200~450m に建設
 - 世界で唯一、
 - 地下施設
 - 低温鏡
- の重力波検出器

- 2014年トンネル完成
- 2019年に装置完成
 - [PTEP paper](#)
- 2020年4月に2週間、GEOとの共同観測を行った (**O3GK**)
- 次の観測(O4)は2022年6月以降(詳細未定)



KAGRAの感度の現状

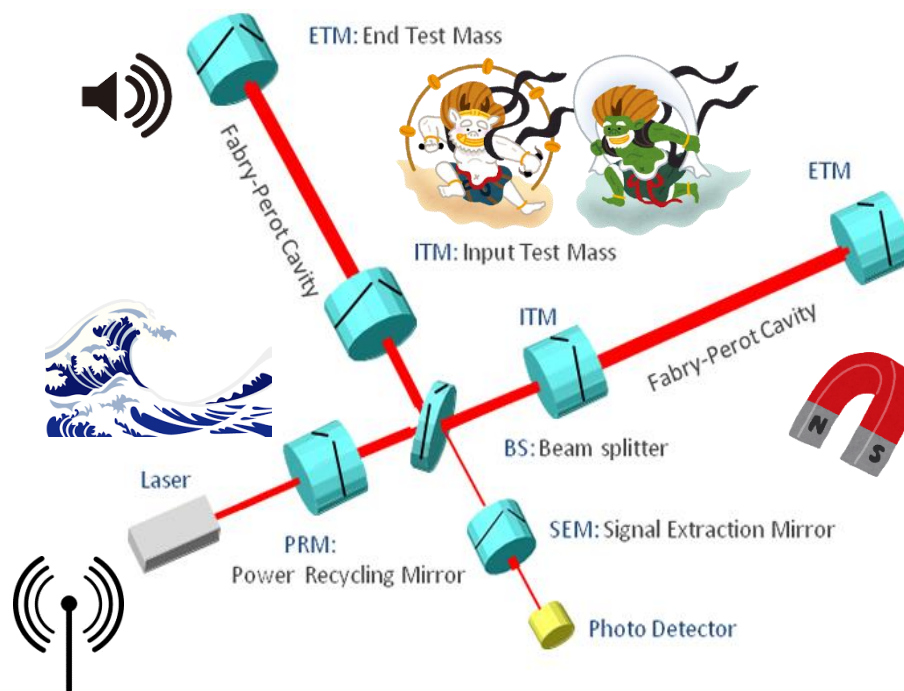
Preliminary NB with data on April 12, 2020 (2020/12/15 v1)



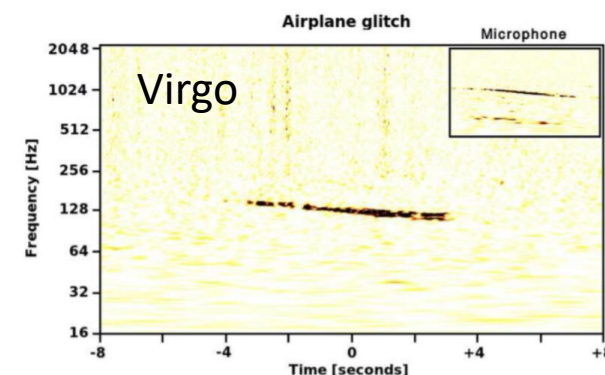
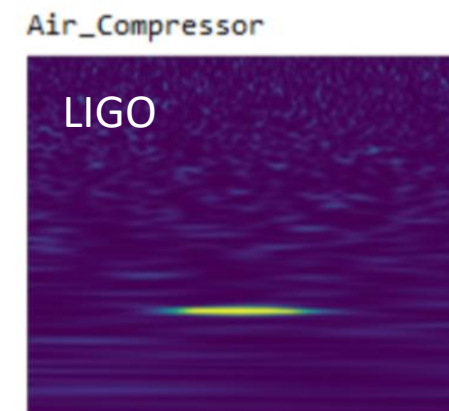
- 到達感度 $\sim 1\text{Mpc}$ (連星中性子星レンジ)
- 雑音成分もおおむね理解されている(論文準備中)
- 現在は真空容器を開け、アップグレード作業が進行中

重力波観測における環境雑音

- ◆ **Vibration & Sound** from machines, Seism, ...
 - Vibration of optics (laser, mirror,...), vacuum apparatus (chamber, view port, ...)
- ◆ **Sound** (Density fluctuation of air)
 - Fluctuation of refractive index
 - Newtonian noise
- ◆ **Magnetic field**
 - coupling to the actuator magnets
- ◆ Radio frequency waves (MHz)
 - beat noise
 - coupling to the laser modulations
- ◆ Electrical noise
 - all readout and control electronics
- ◆ Newton gravity, gravity gradient
- ◆ cosmic ray
- ◆ etc ...



環境起因の突発性雑音の例



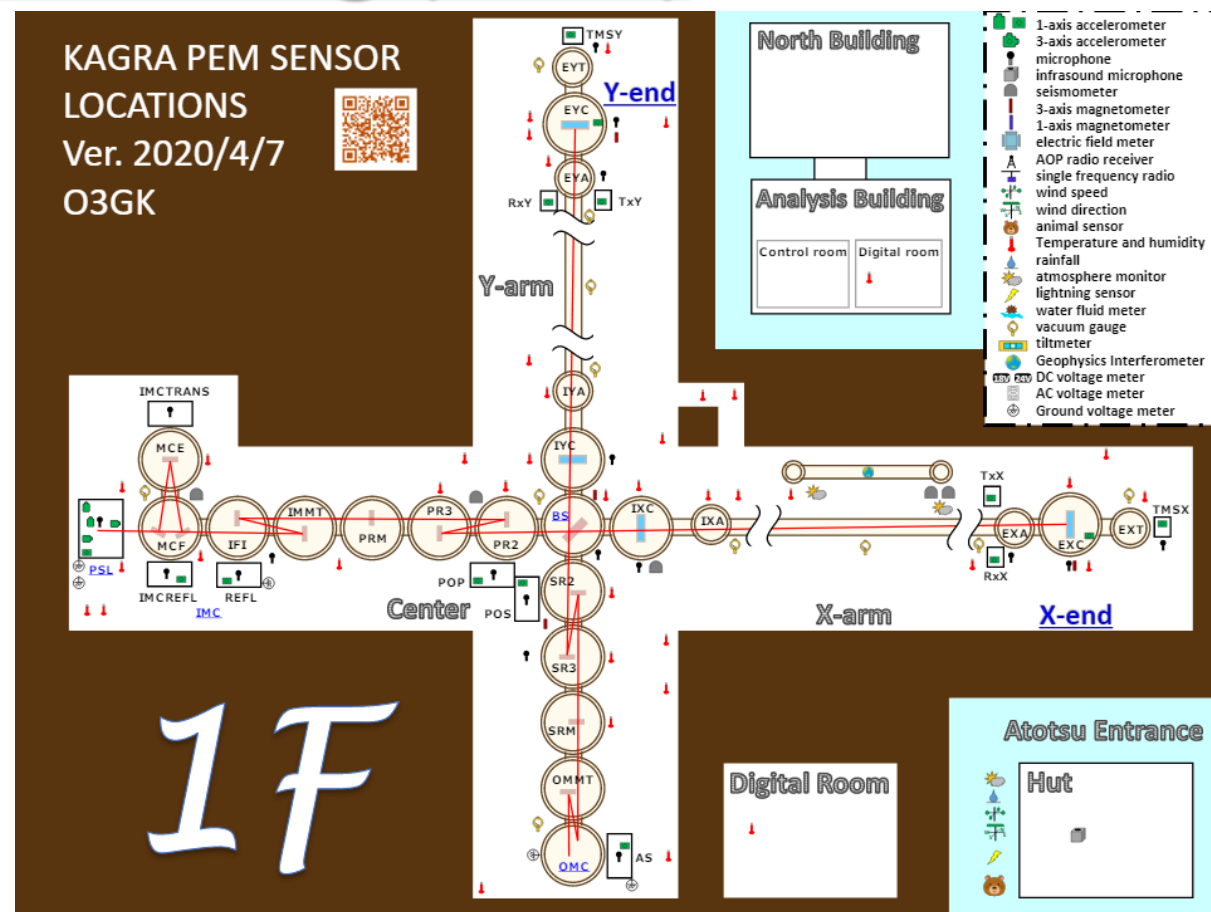
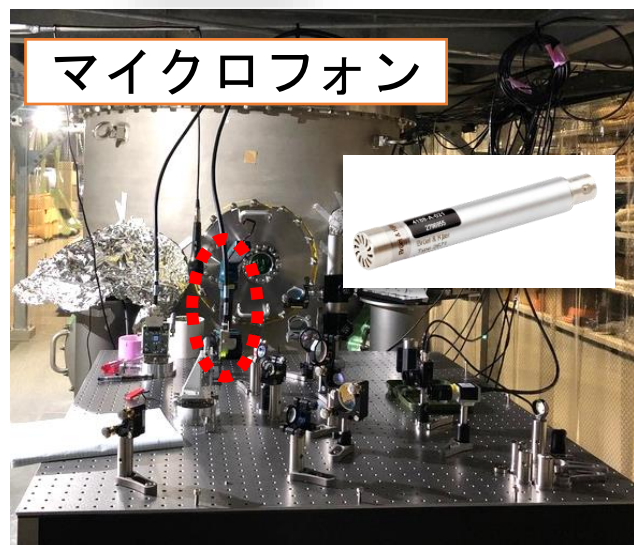
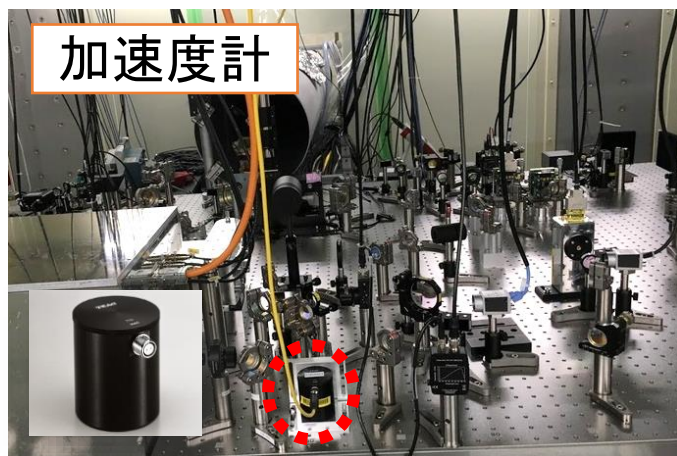
➡ **Targets of Physical Environmental Monitoring (PEM)**

Physical Environmental Monitoring (PEM)

<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~washimi/KAGRA/PEM/PEMmap/archives/O3GK/>

KAGRAトンネル内外に様々なセンサーを設置し、ありとあらゆる環境を常にモニターしている。

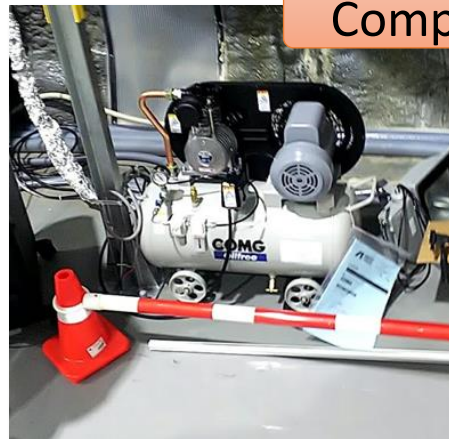
<https://arxiv.org/abs/2009.09305>



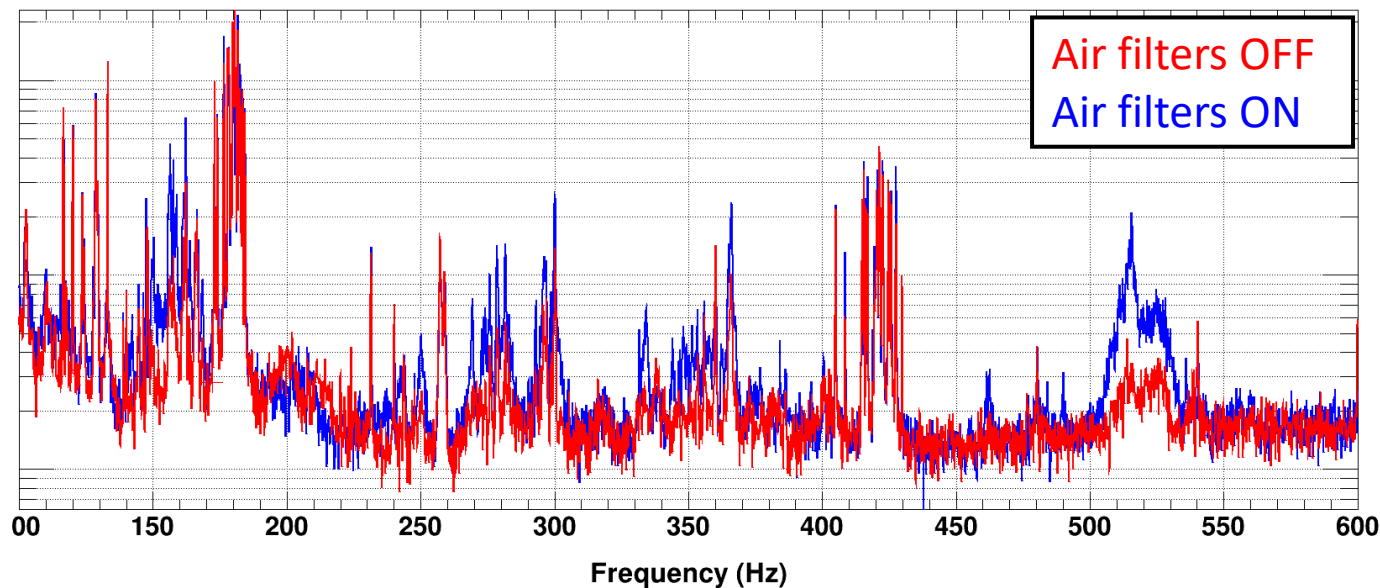
直接的な雑音となる重力波観測帯域(10 Hz~数kHz)だけでなく、up/down conversionによる雑音や干渉計制御に影響する量(基線長、室温など)の長期モニターも行っている

Noise Hunting before the O3GK

KAGRA坑内の雑音源となるあらゆる機器を、できる限りOFFに
(室温や真空度など、検出器への影響がないように注意しながら)



重力波感度



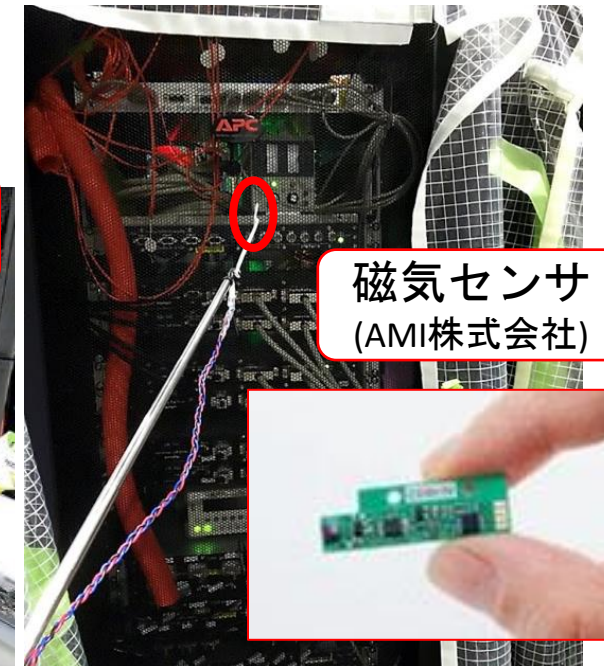
ポータブルPEMシステム

ChromebookとUSBセンサを組み合わせ、
坑内における作業効率を大幅に改善

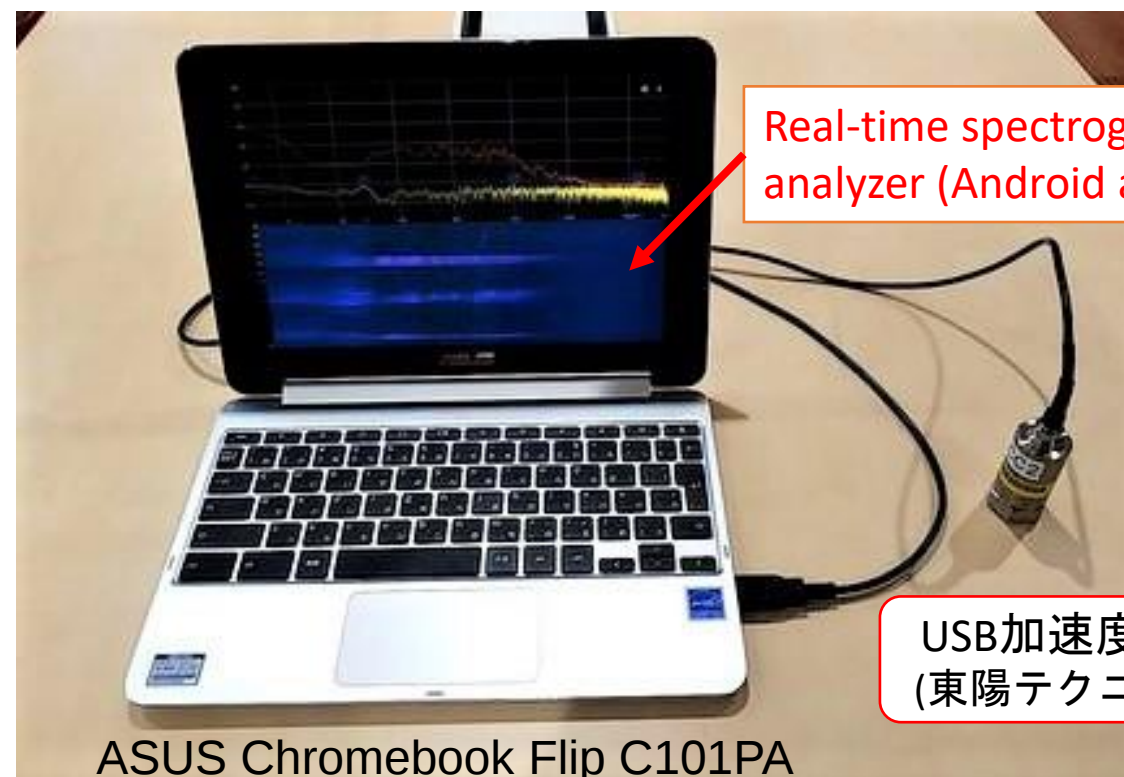
- ✓コンパクトで軽量、起動が速い
- ✓電源やケーブリング等の制限なし
- ✓世の中の便利なAndroidアプリが使える



計測用USBマイク
(miniDSP社)



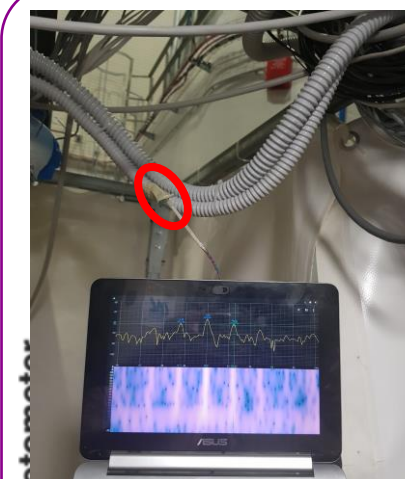
磁気センサ
(AMI株式会社)



Real-time spectrogram
analyzer (Android app)

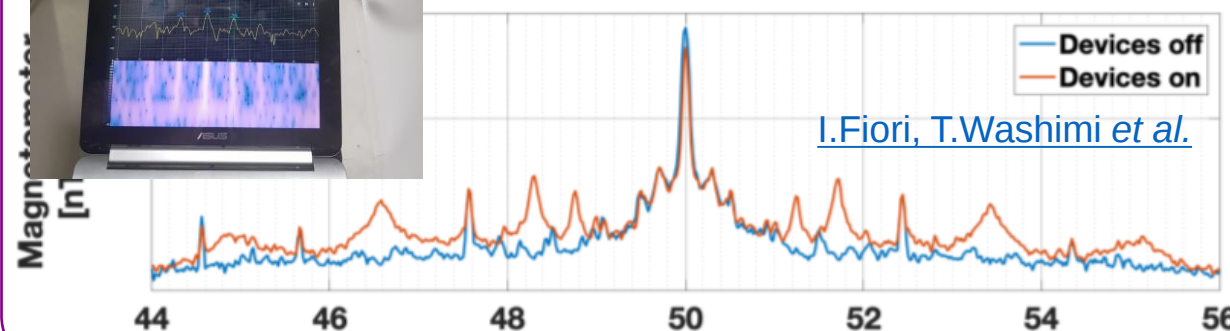
USB加速度計
(東陽テクニカ)

ASUS Chromebook Flip C101PA



このセットをVirgoに持参してノイズ
探索に参加した(2019年10月)

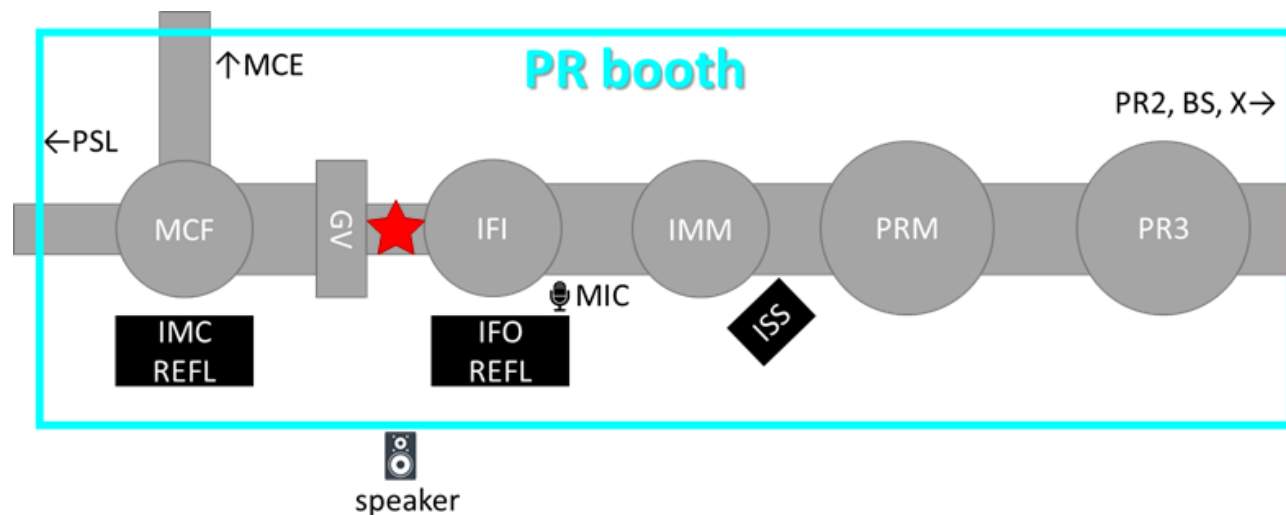
- 深刻なノイズ源の同定に成功し、
~2Mpcの感度向上に貢献



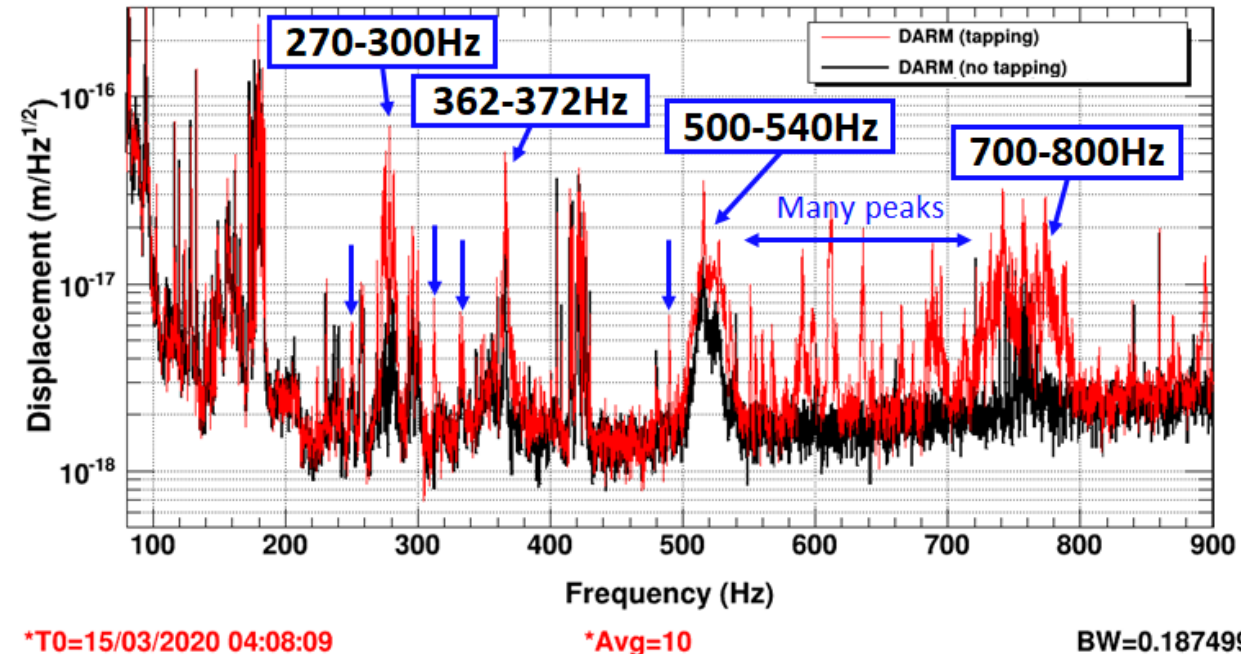
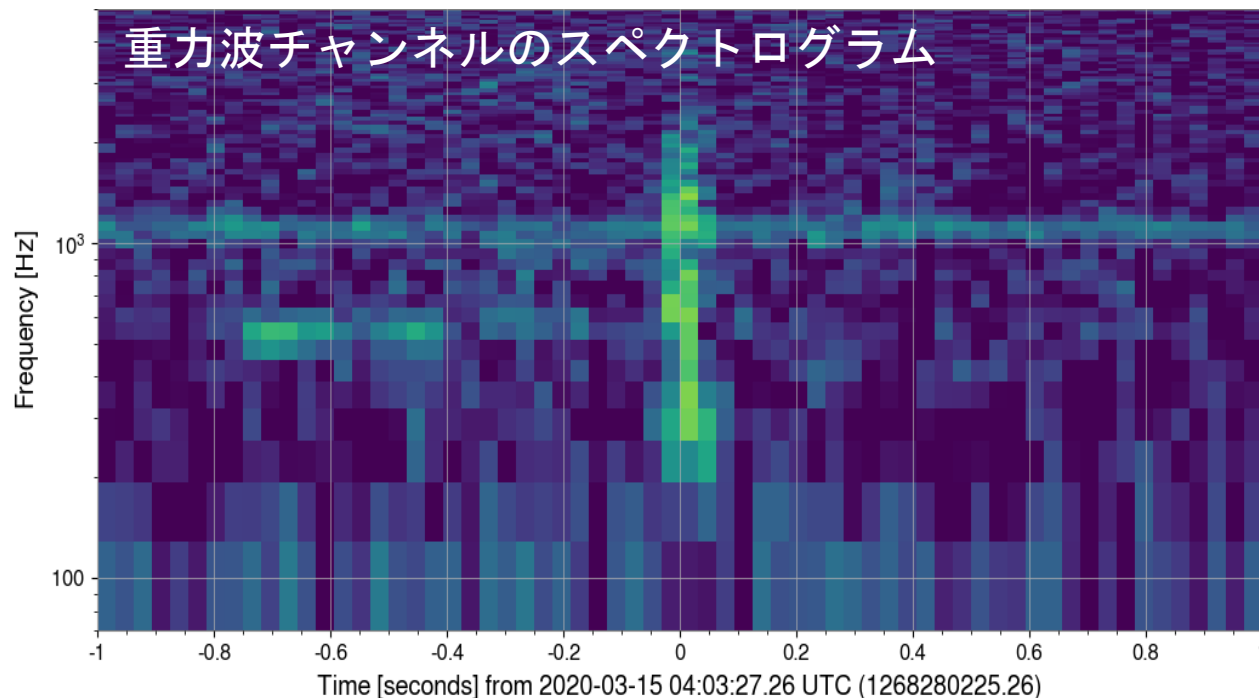
突発性環境雑音の例①:散乱光雑音(hammering)

干渉計を維持した状態で、あらゆる場所を叩いて回り、「装置の弱点」を探す。

- 感度に最も影響のあった場所→
- 音響雑音がこの場所を振動させて生じた雑音が、O3GKの感度に影響していた (page 4)



重力波チャンネルのスペクトログラム



*T0=15/03/2020 04:08:09

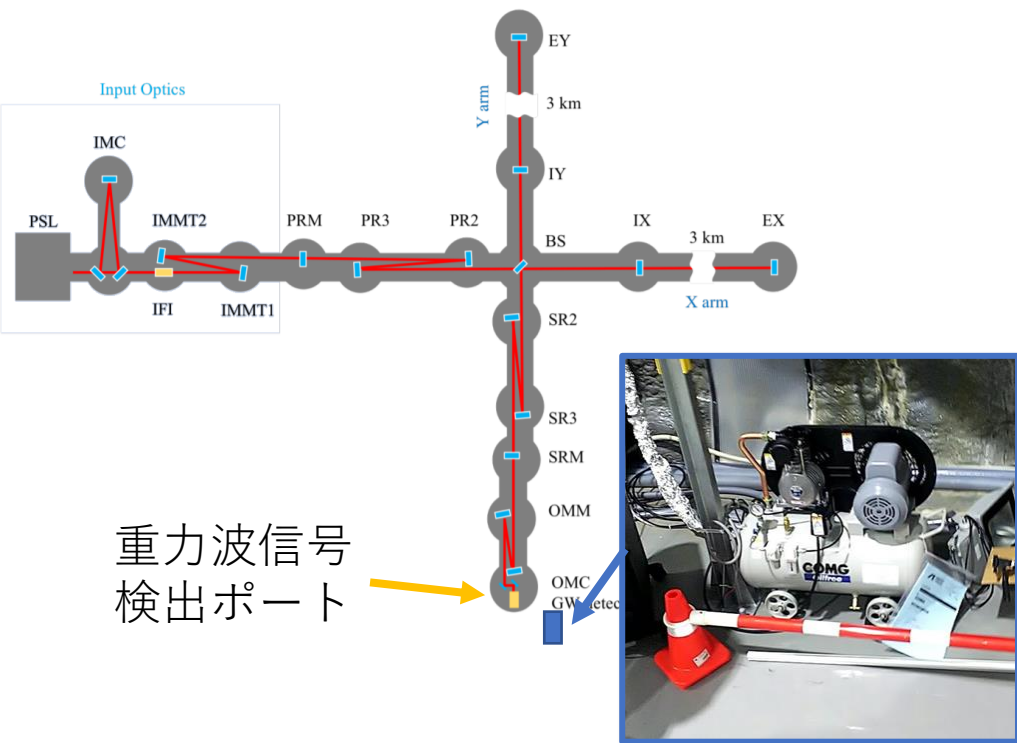
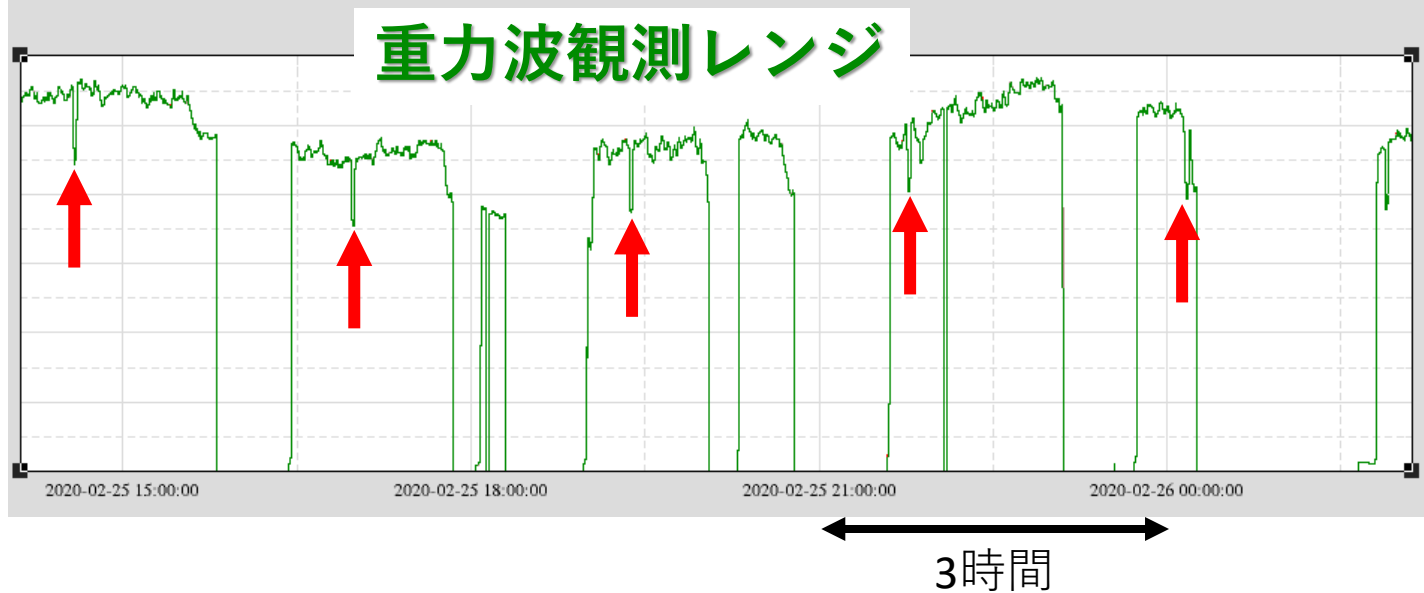
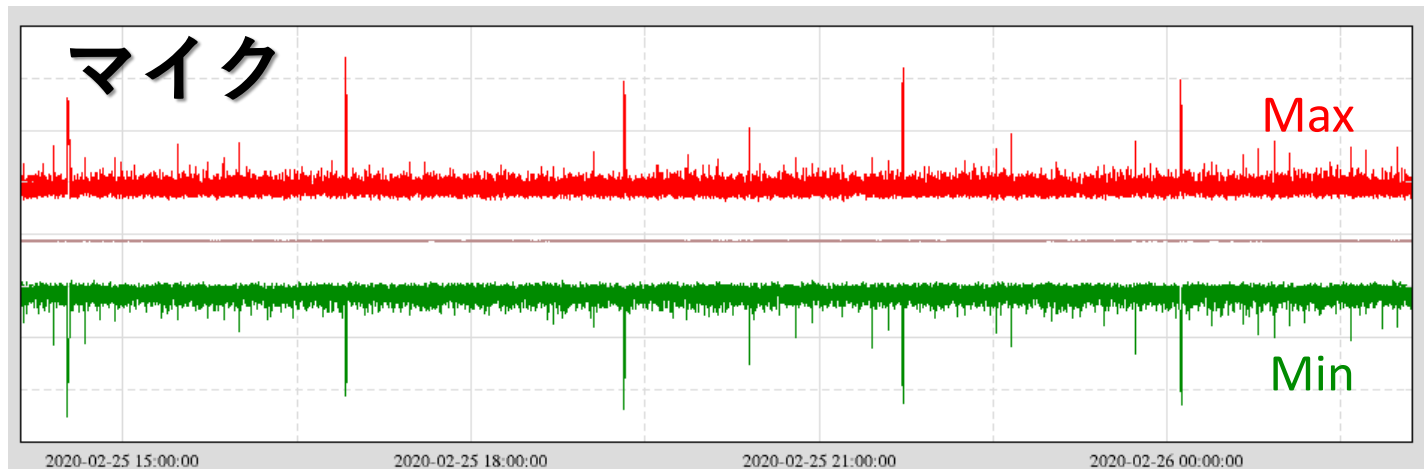
*Avg=10

BW=0.187499

突発性環境雑音の例②: コンプレッサー

2020年2月のKAGRA単独観測の際、重力波観測レンジが定期的に悪化する現象が見られた。

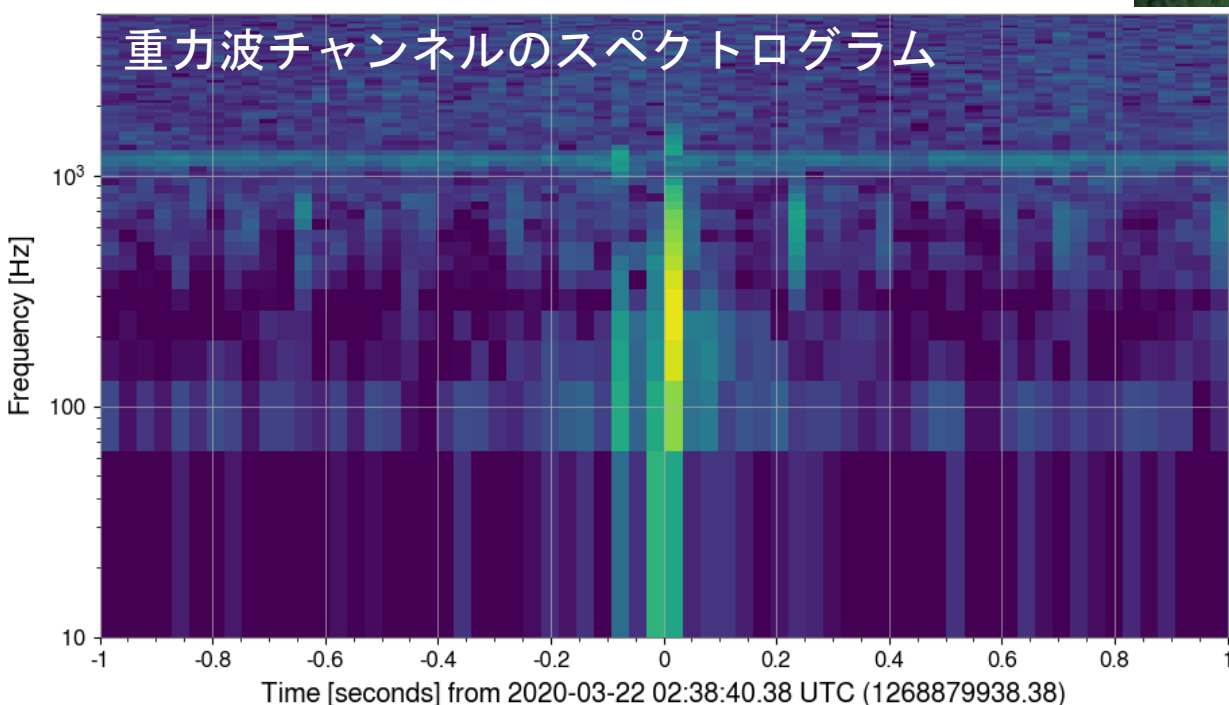
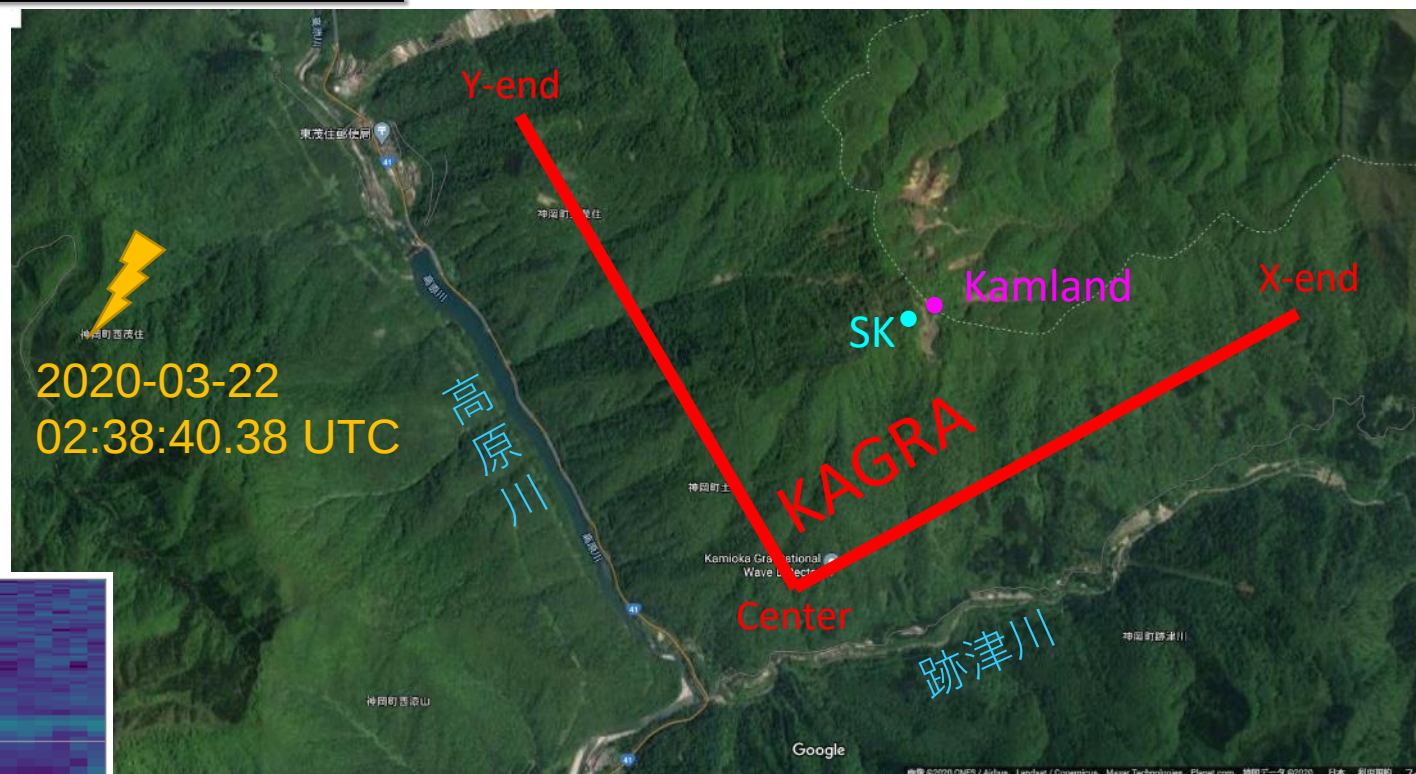
- 重力波検出ポート近くのコンプレッサーによる音・振動が原因と判明
- OFFにできない機器 (緊急時に真空容器を閉じるためのもの) だが、防音と防振を施すことで解決した。



突発性環境雑音の例③: 落雷

KAGRAのすぐ近くで落雷があり、
同時に干渉計にもGlitchが観測された。

- 坑口の落雷検知器および坑内の磁力計でもしっかりとモニターされた
- 他のセンサー(加速度計など)には反応なし



- ✓ 落雷磁場を利用した研究を、D01班の公募研究として遂行中
 - 詳細は[2020年6月の領域研究会](#)を参照
- ✓ 地下施設における落雷の影響について、論文を執筆中

Summary

- ◆ 超新星重力波はバースト信号(未発見)で、突発性雑音(Glitch)への対策が非常に重要となる
 - ◆ KAGRAは2020年4月に初の国際共同観測(O3GK)を行った
 - ◆ LIGO/Virgo/KAGRAは現在アップグレード中
 - ◆ KAGRAの環境雑音モニター(PEM)の活動を紹介した
 - ◆ KAGRAで見られた環境雑音起因のGlitchを紹介した
-
- 重力波チャンネルのGlitch解析については次の小坂井講演
 - 他、上島ポスターにて機械学習を用いたGlitch分類について、昨日の武田講演にて超新星重力波信号解析について発表