

KAGRAサイトにおける シューマン共振磁場の長期観測: シューマン共振パラメータの日周変動と季節変動

大阪公立大学 安部彩優 on behalf of KAGRA collaboration

伊藤洋介, 覺依珠美, 神田展行, 阪本一樹, 松田雅久人(阪公大),
樽家篤史(京大基研), 都丸隆之(国立天文台), 西澤篤志(広島大), 姫本宣朗(日大), 横澤孝章(東大宇宙線研),
横山順一(Kavil IPMU), 鷺見貴生(国立天文台)

目次

導入

1

1.1 動機

1.2 シューマン共振とは

1.3 シューマン共振の日周変動

1.4 KAGRA 重力波望遠鏡

準備

2

2.1 実験のセットアップ

2.2 スペクトル推定

2.3 パラメータ推定

2.4 データセット

3

地上観測結果

各パラメータの変動

4

地下での測定

KAGRA内（地下）での増幅

5

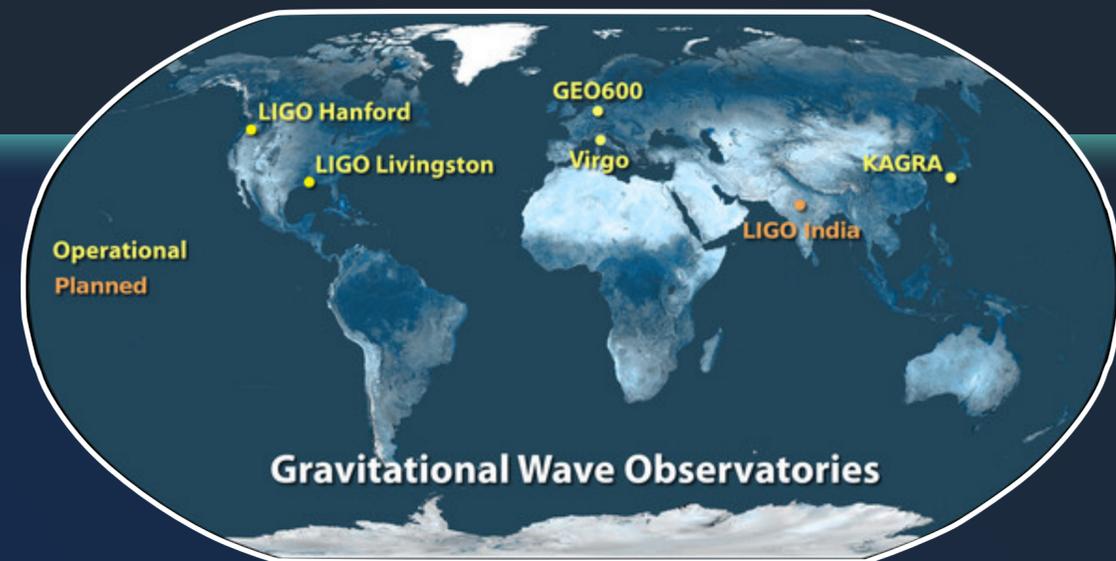
まとめ

1.1 動機

*背景重力波の検出

天体物理起源(連星合体)
宇宙論起源(初期宇宙)

個々のイベントに分離できない弱い重力波が重なっている
単一の検出器では検出できない



複数検出器を用いた相関解析による検出

検出器 i での信号: $s_i(t) = h_i(t) + n_i(t)$

$$\langle \tilde{s}_i^*(f) \tilde{s}_j(f) \rangle = \langle \underline{h_i h_j} \rangle + \langle \underline{h_i n_j} \rangle + \langle \underline{n_i h_j} \rangle + \langle \underline{n_i n_j} \rangle$$

重力波信号の相関
 $= 0$
 $= 0$
相関のあるノイズ項

離れた検出器の雑音(熱雑音、地面振動)は、基本的には独立!

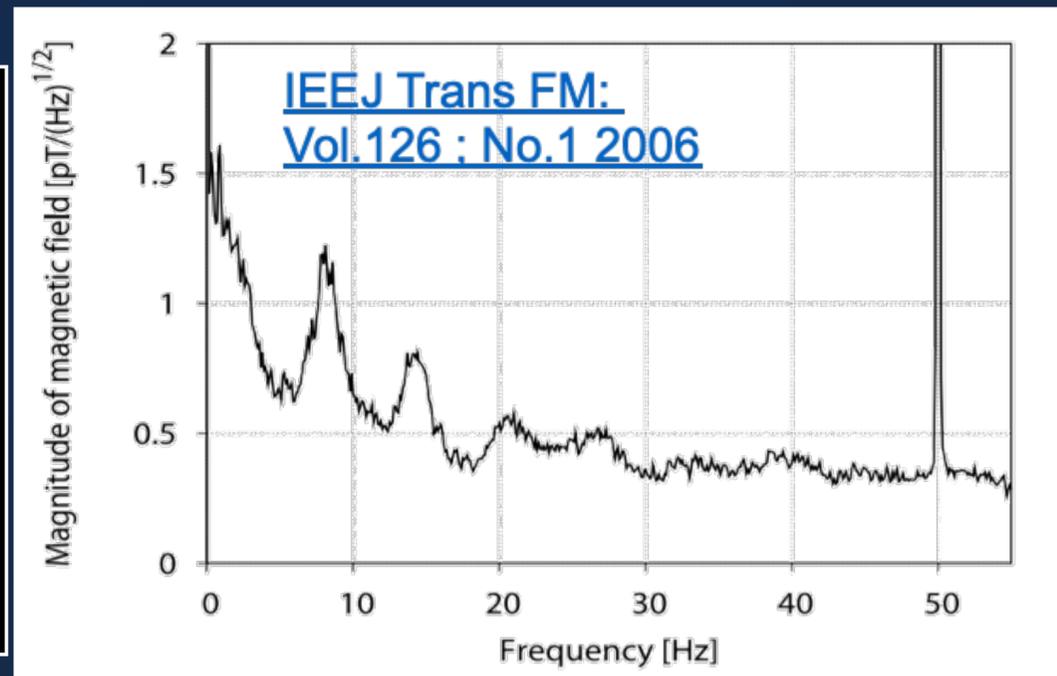
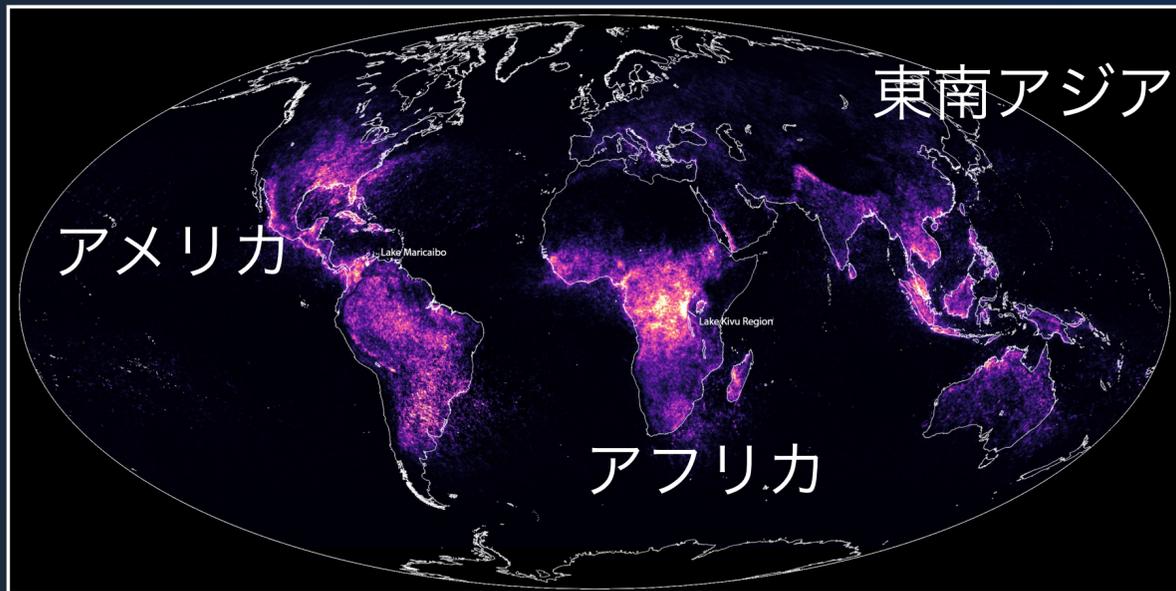
例外: 地球規模で相関をもつノイズ → シューマン共振

この性質を長期観測により定量化

1.2 シューマン共振とは

*地表-電離層間の共振現象(TMモード)

- 雷により励起された電磁波<~kHzが球殻状の導波管を共振する現象
- 雷は50 回/s 程度起きている



pT単位の世界

NASA Earth Observatory image by Lauren Dauphin, using data from Peterson, et al. (2021).

- 共振周波数 $f_n = \frac{c}{2\pi R} \sqrt{n(n+1)} \approx 7.8, 14.1, 20.3, \dots [\text{Hz}]$

1.3 シューマン共振の日周変動

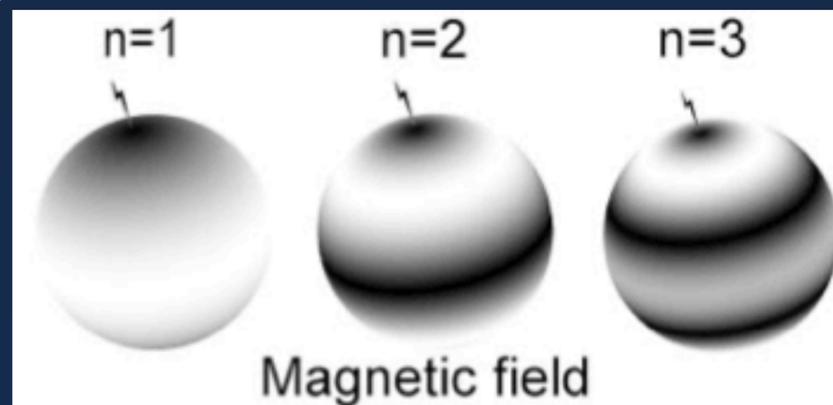
* 励起源（雷）との位置関係

$$H_{\varphi}(\omega) \propto M_C(\omega) \sum_{n=1}^{\infty} P_n^1(\cos \theta)$$

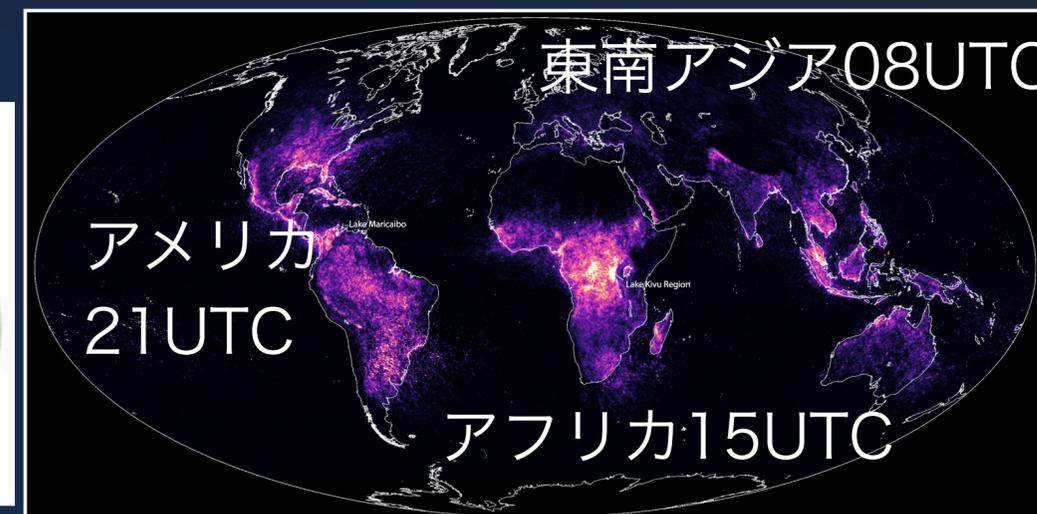
$M_C(\omega)$: 雷の電流モーメント

$P_n^1(\cos \theta)$: ルジャンドル陪関数

θ : 雷源からの角度



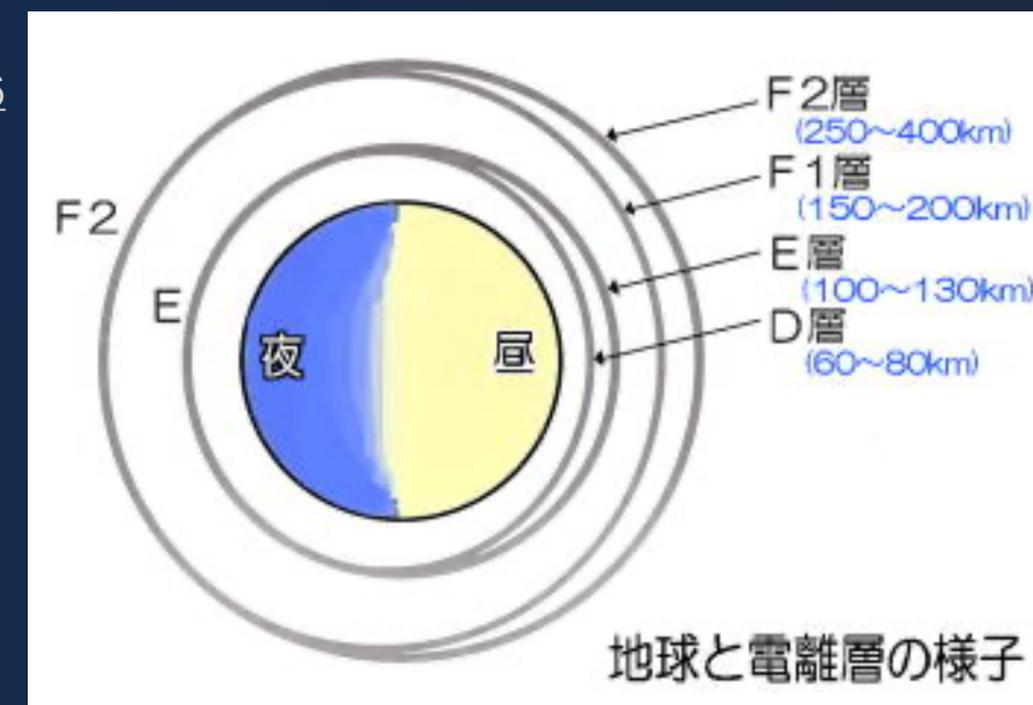
Atmosphere 2016, 7(9), 116
<https://doi.org/10.3390/atmos7090116>



* 時間変動

雷活動の活発な時刻の変動 → スペクトルの強度

電離層状態の時間変化 → 共振周波数、Q値

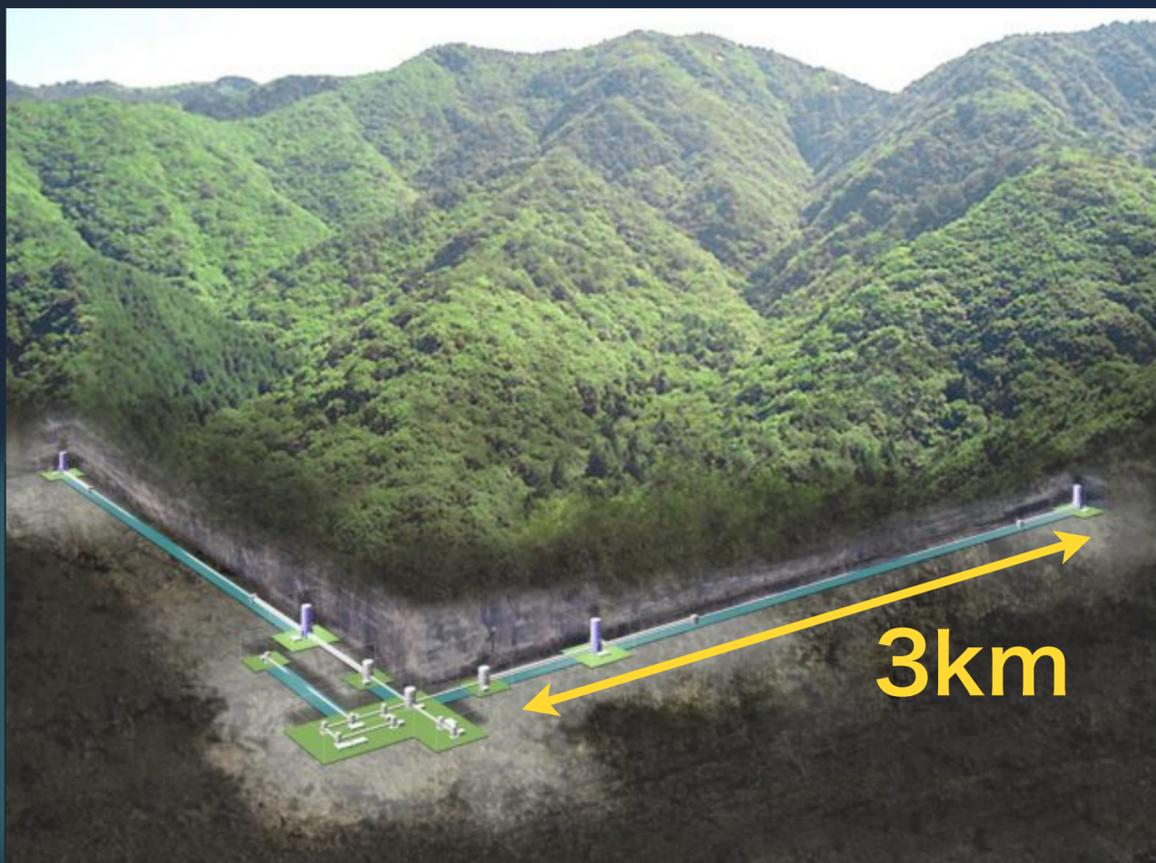


Credit: <https://www.ne.jp/asahi/yokohama/cwl/dempa.html>

3つのパラメータ（強度、共振周波数、Q値）の日周変化、季節変化を調査する

1.4 KAGRA 重力波望遠鏡

Credit : KAGRA 大型低温重力波望遠鏡
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/kagra-gallery>



構成 マイケルソン干渉計

神岡地下200~450mに位置する

レーザーは金属製真空ダクト内を通過

先行研究 Credit :福永勇, 修士論文(2023)

トンネル内、ダクト円周方向の磁場が増幅

地下 ~ 100 [pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$] > 地上 ~ 1 [pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$]
ダクトの円周方向 水平方向

→地上と地下の同時観測を行い定量評価



2.1 実験のセットアップ (地上 長期観測)

福永さん
(2022年度卒業)



MFS-06e : 1方向の磁場の測定

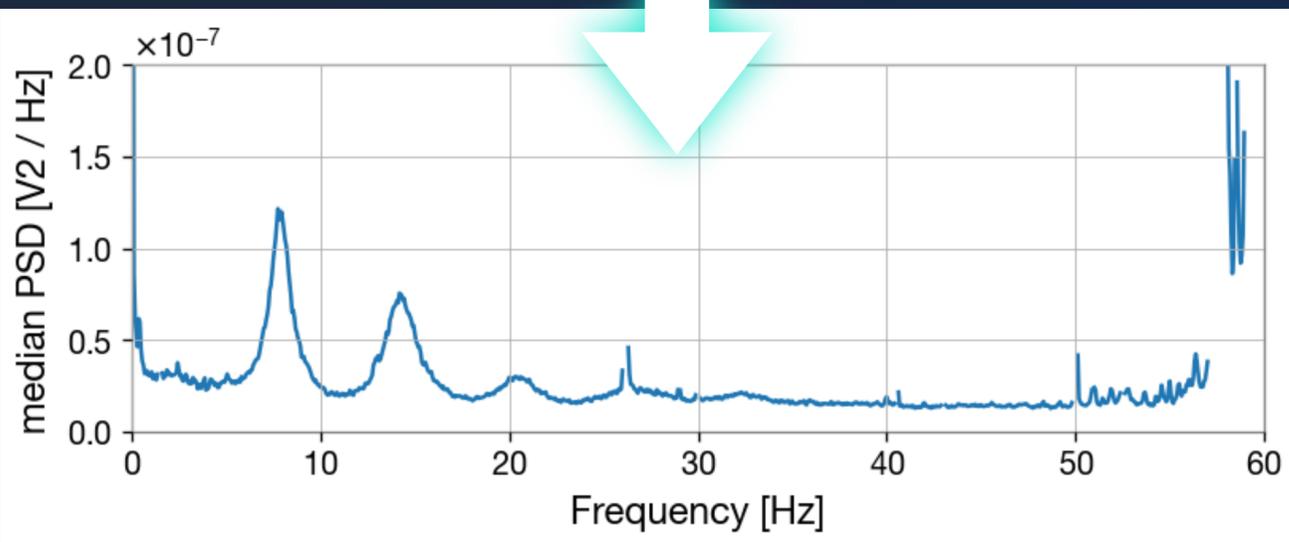
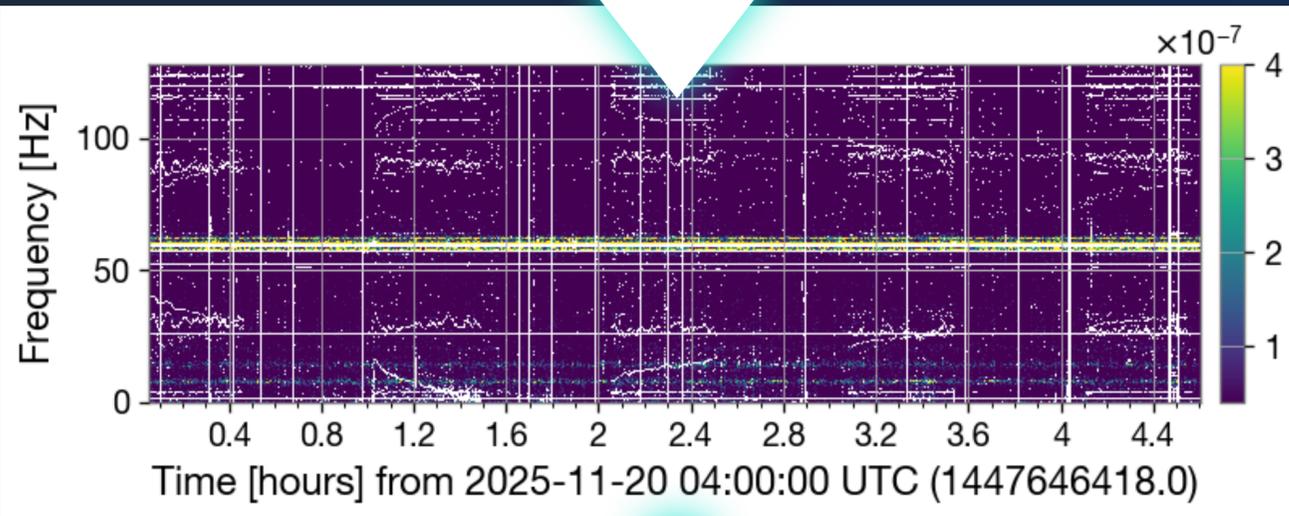
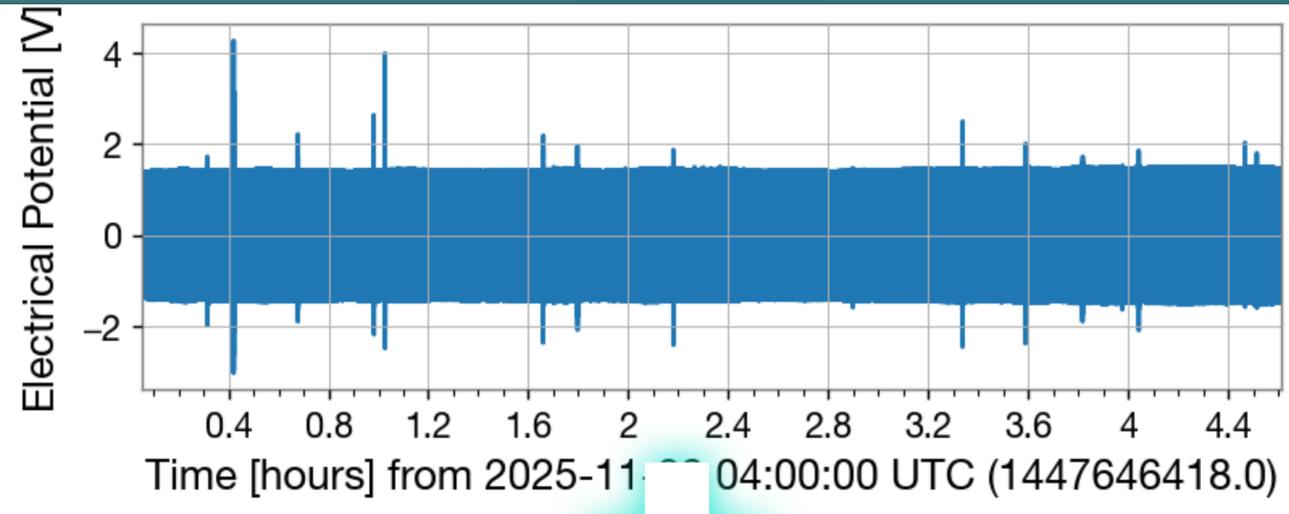
原理 : インダクションコイル

使用した理由 : 1pT程度の磁場も測定できる



2.2 スペクトル推定

×2方向



1 NS(南北)/EW(東西)成分を計算



2 10分間の時系列データに切り取り



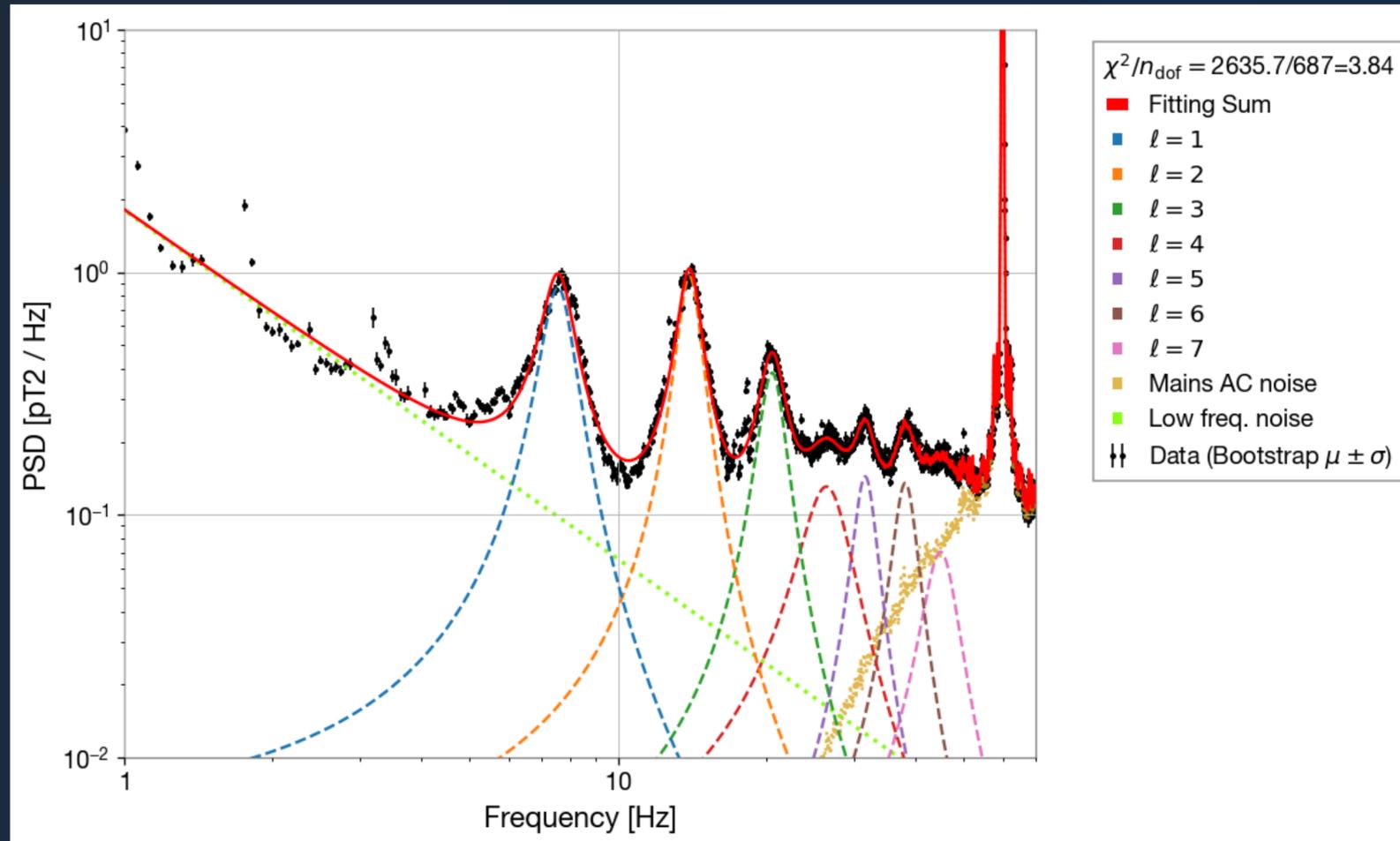
3 FFT (16s, 50%overlap, hann窓)

4 ラインノイズ、グリッチ除去



5 パワースペクトル密度とその誤差を
Bootstrap法により計算

2.3 パラメータ推定



Power Spectral Density

$$M(f) = \sum_{n=1}^7 M_n(f) + M_{BG}(f)$$

シューマン共振(Lorentz関数)

$$M_n(f; f_n, Q_n, A_n) = \frac{A_n}{1 + 4Q_n^2 \left(\frac{f - f_n}{f_n} \right)^2}$$

(n 番目のモード, f_n : 共振周波数, Q_n : Q値, A_n : 強度)

低周波のノイズ

$$M_{BG}(f) = A_{BG} \cdot f^{-\alpha} + \text{const.}$$

得られるパラメータ

χ^2 , 自由度, $(f_n, Q_n, A_n) \times 7$ 次, + error,

A_{BG} , α , const + error

2.4 データセット

Start

End

2023年 5月 1日 0:00 UTC ~ 2025年 10月 6日 0:00 UTC

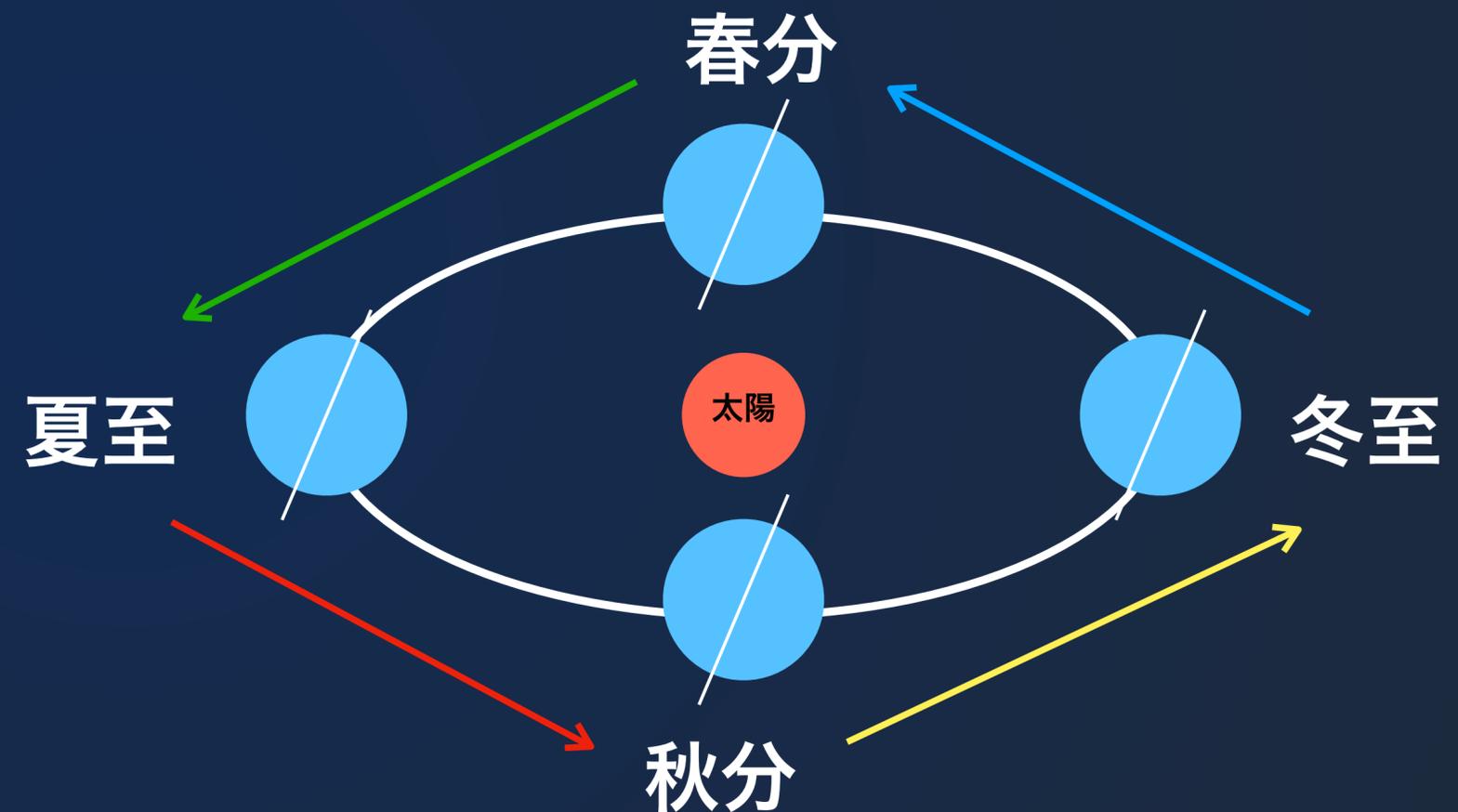
季節定義

春：春分(3/21)～夏至(6/21)

夏：夏至(6/21)～秋分(9/22)

秋：秋分(9/22)～冬至(12/21)

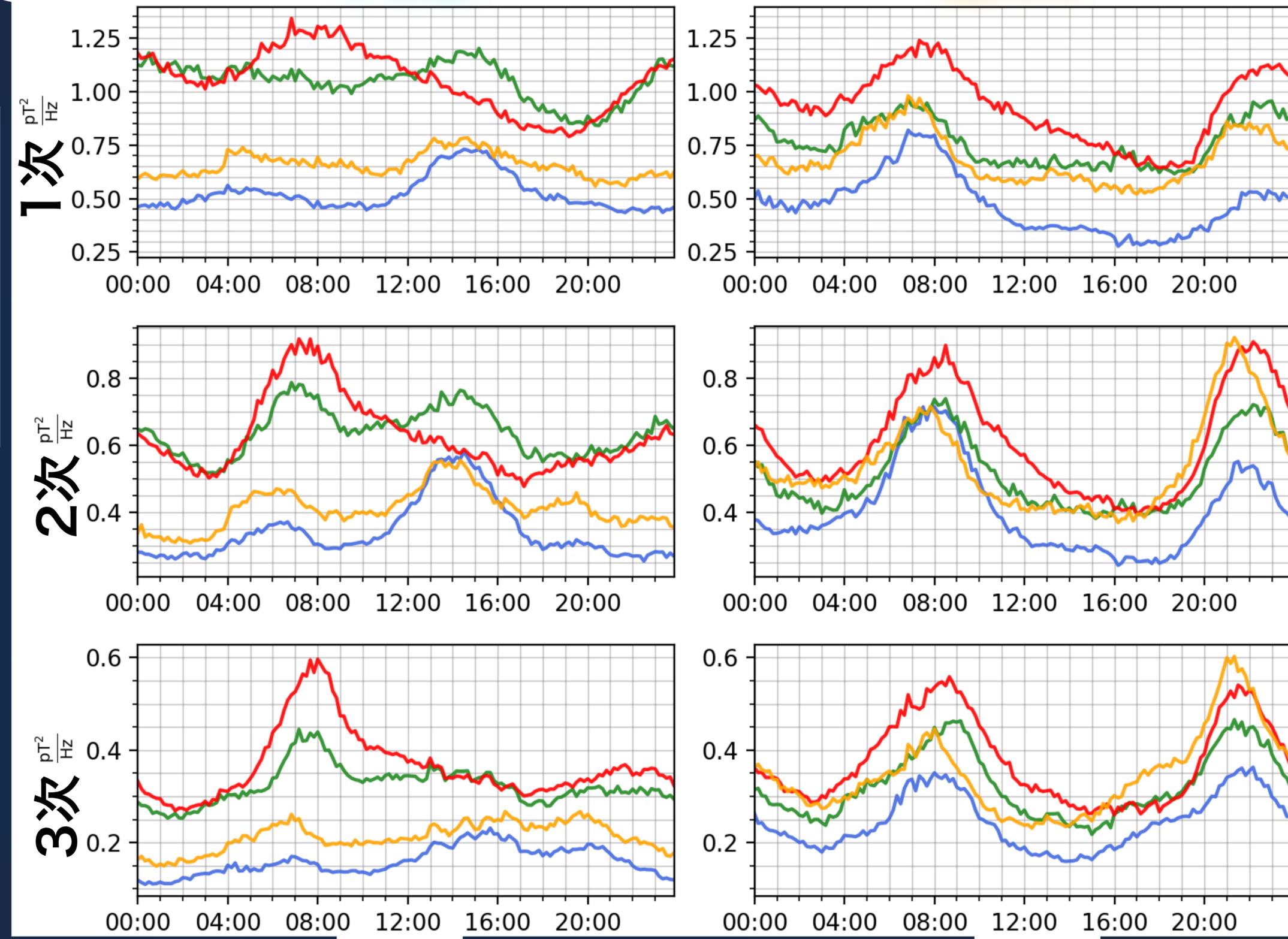
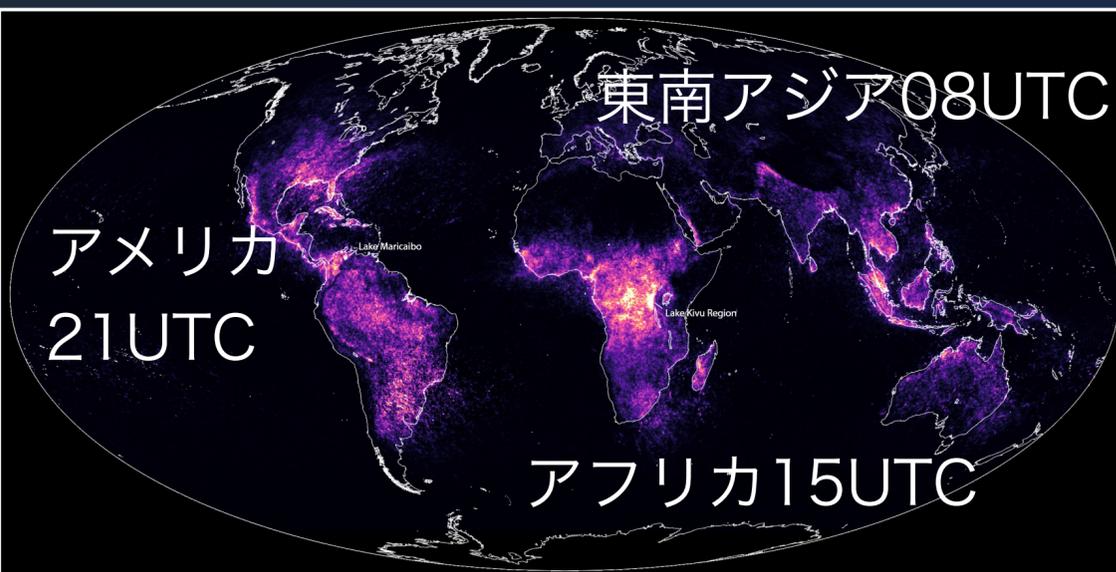
冬：冬至(12/21)～春分(3/21)



3.1 日周変動 強度

NS

EW



*ピークに対応する時刻

NS : 東南アジア、アフリカ

EW : 東南アジア、アメリカ

UTC

UTC



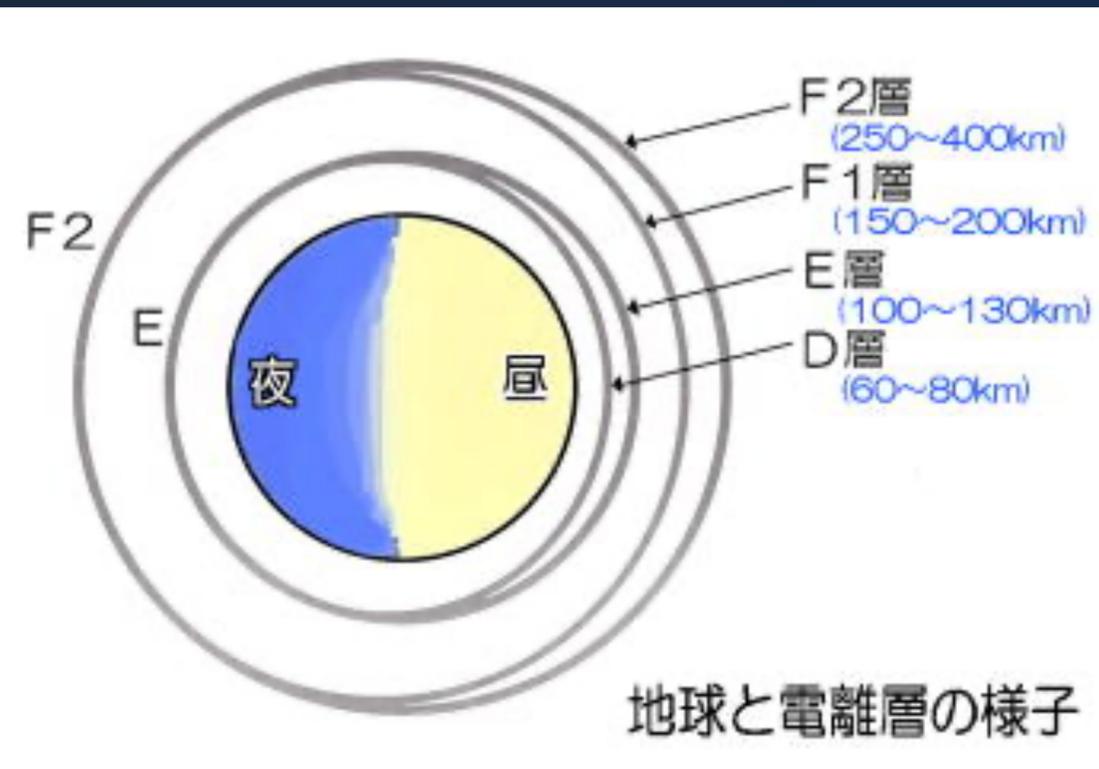
3.2 共振周波数

＊NSの特徴

高次モードに行くと、変動も増加

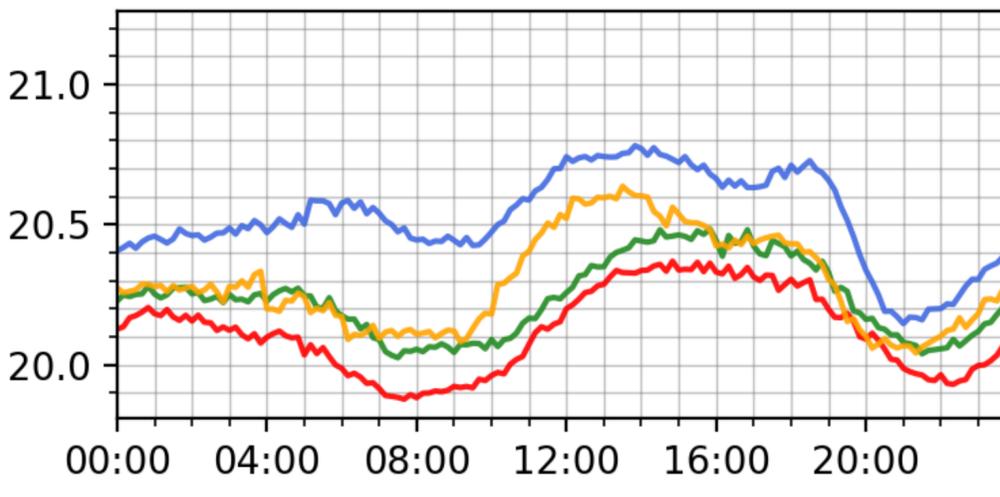
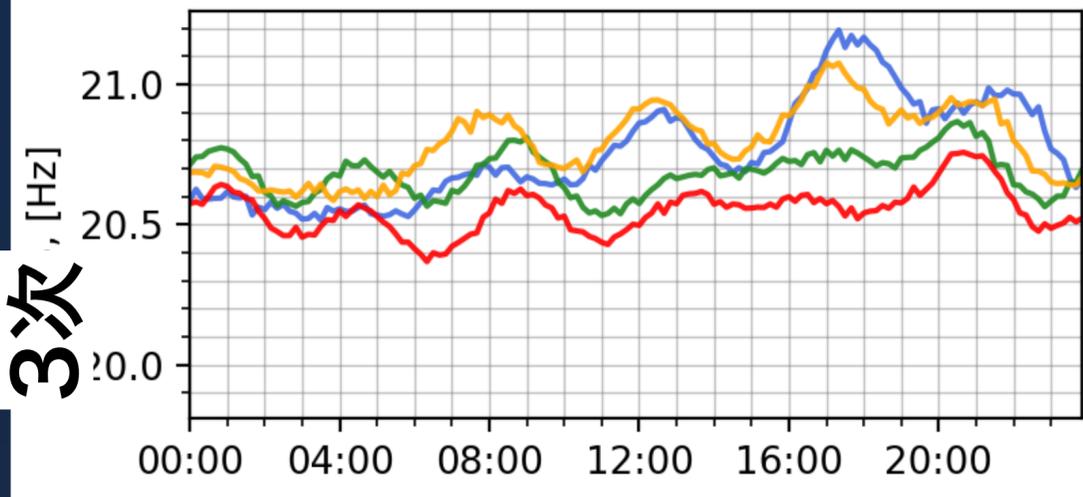
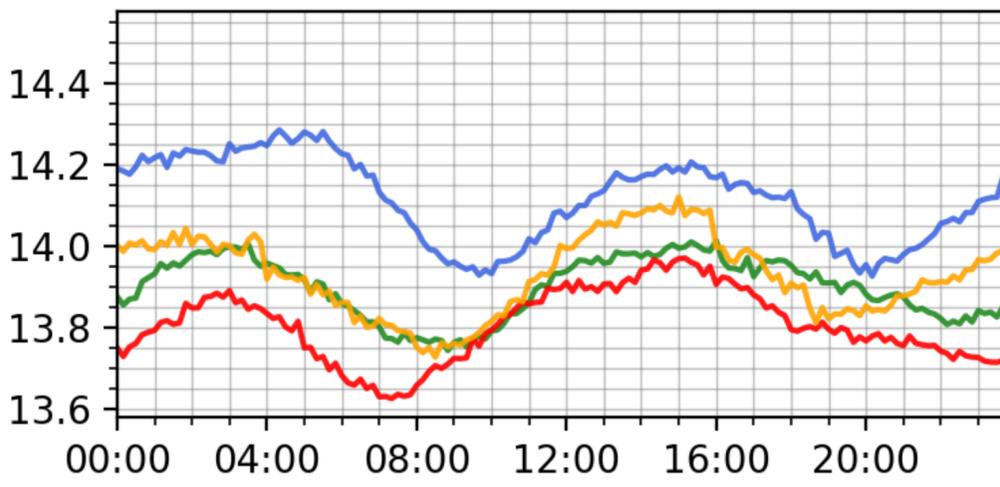
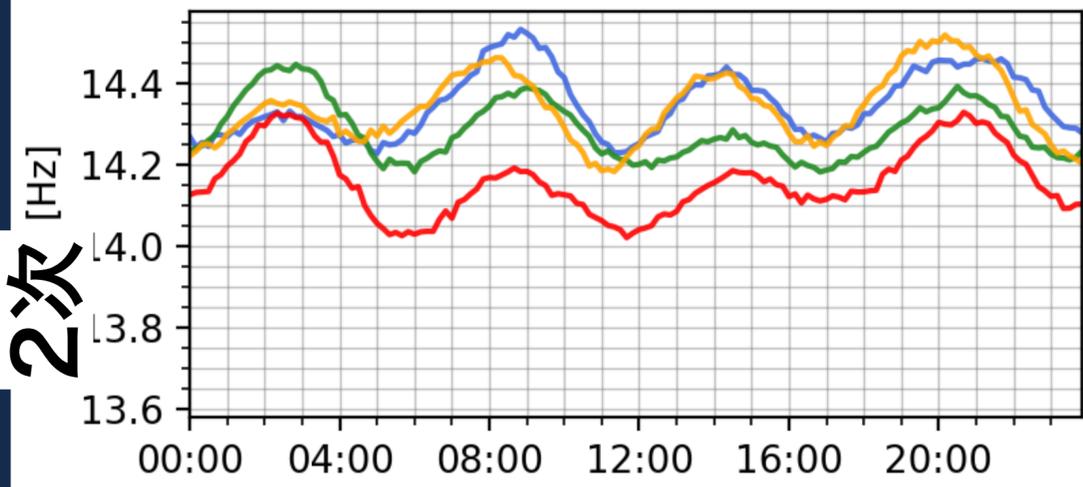
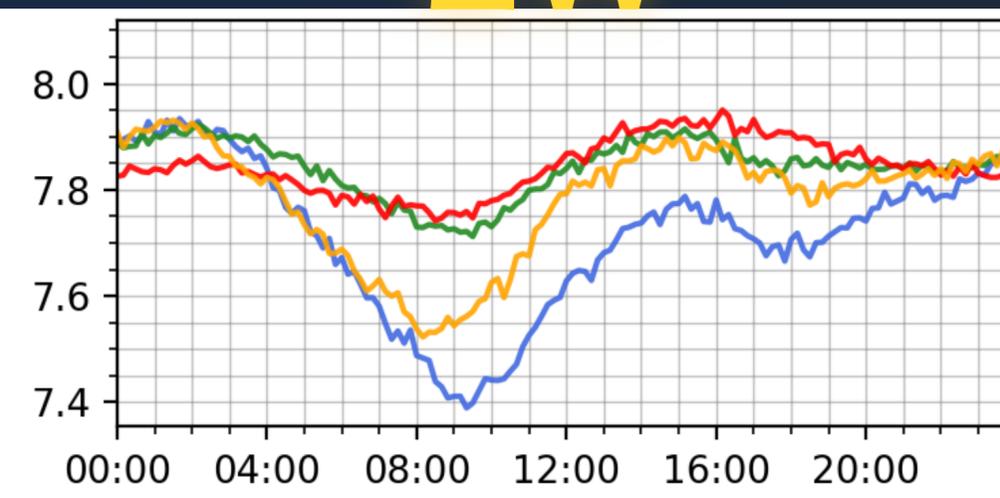
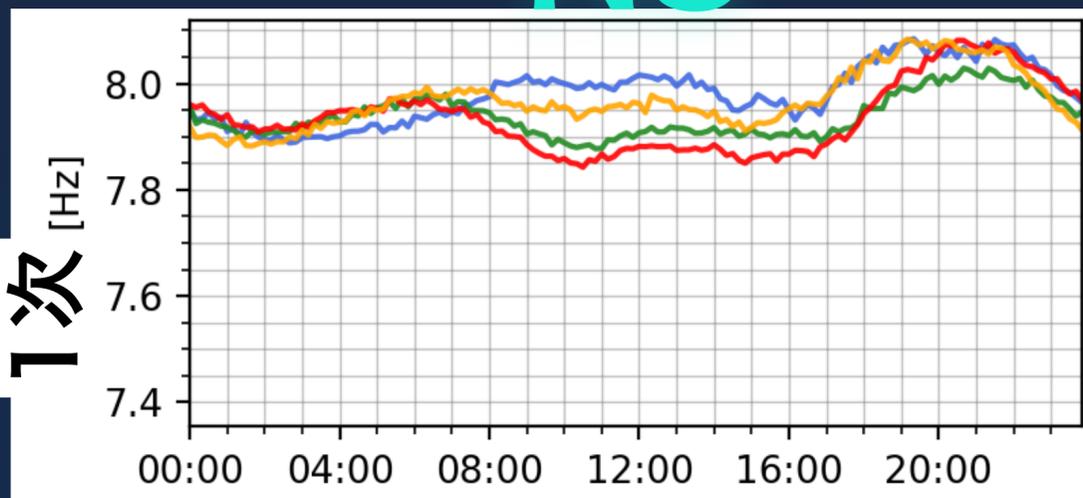
＊EWの特徴

モードに依らず2つの極小を持つ



NS

EW



UTC

UTC



Credit: <https://www.ne.jp/asahi/yokohama/cwl/dempa.html>

3.3 Q値

NS

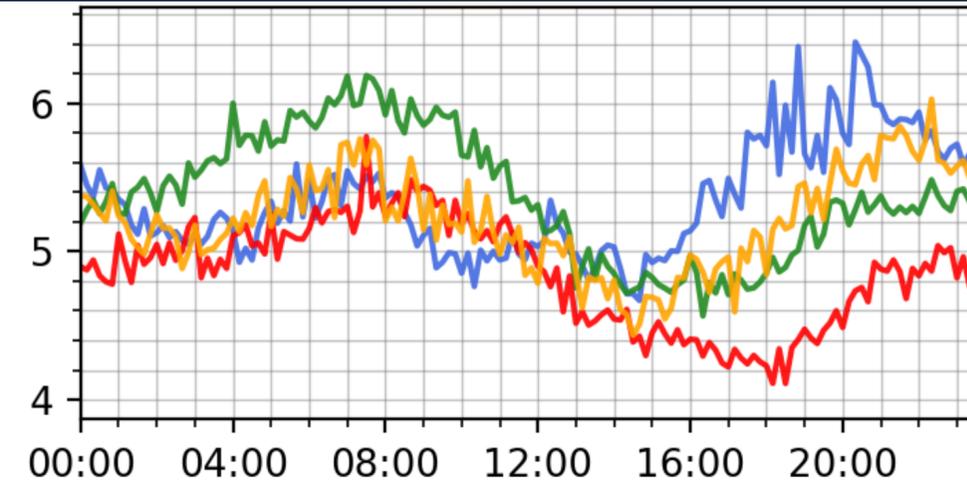
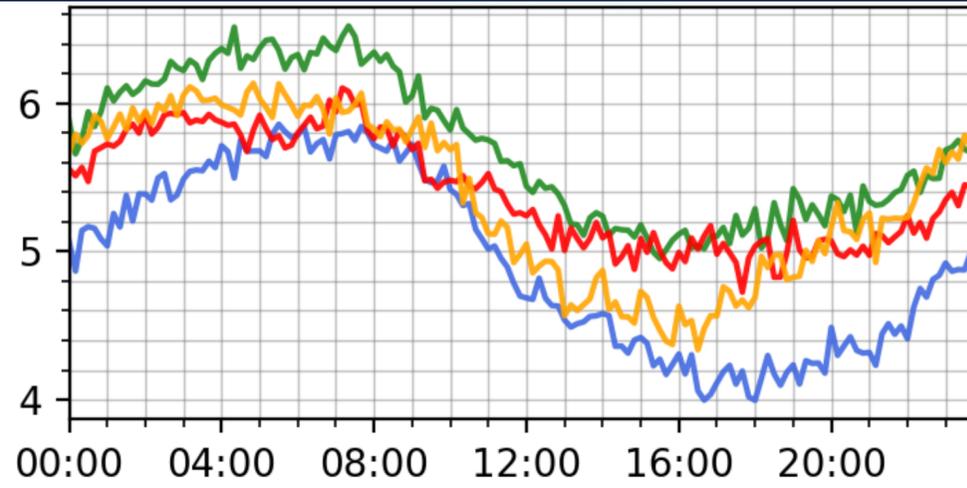
EW

1次は1日周期がある

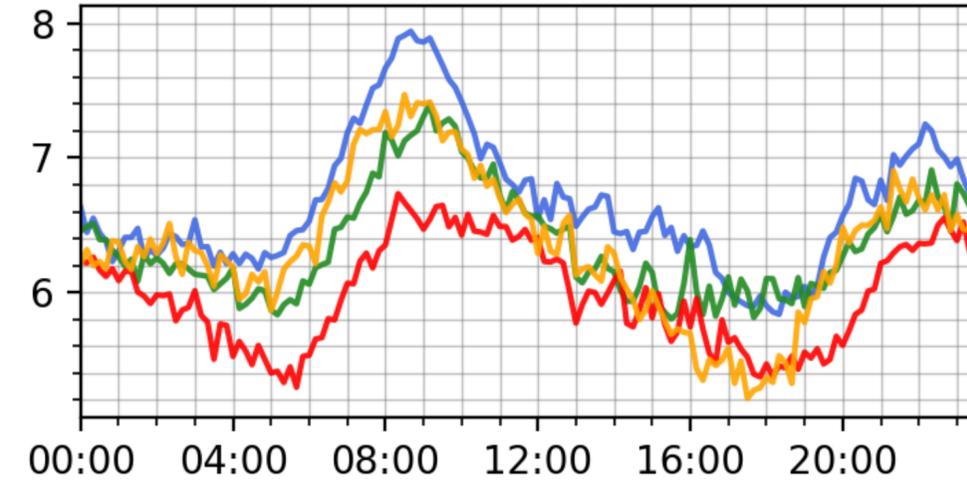
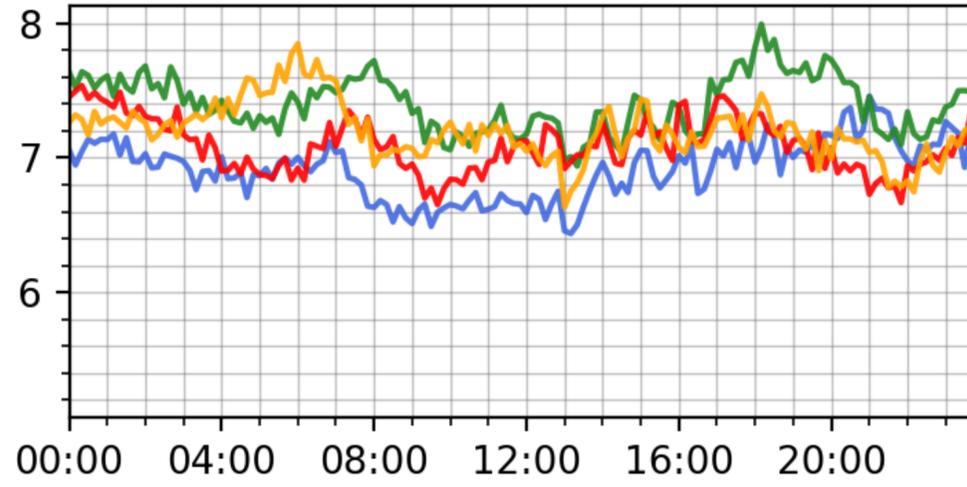
1次以外はモードや方向によって変化する

原因は現状不明

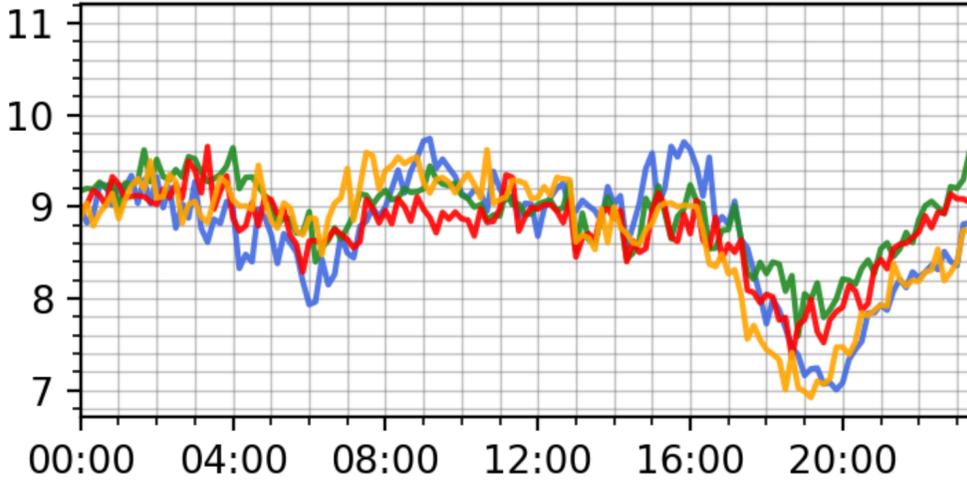
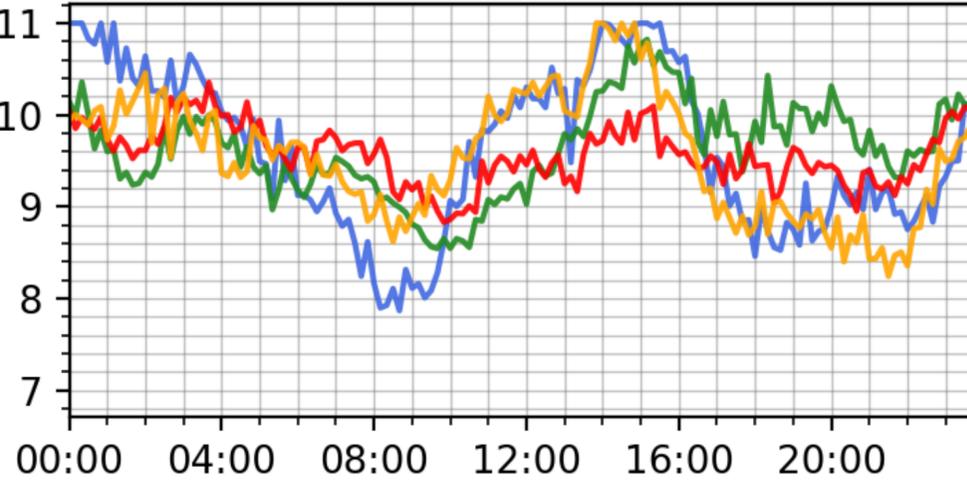
1次



2次



3次

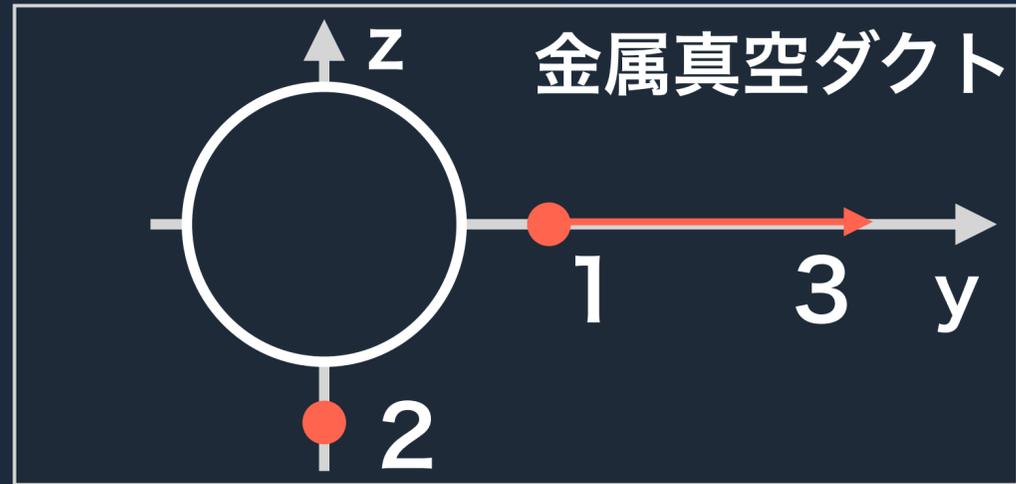


UTC

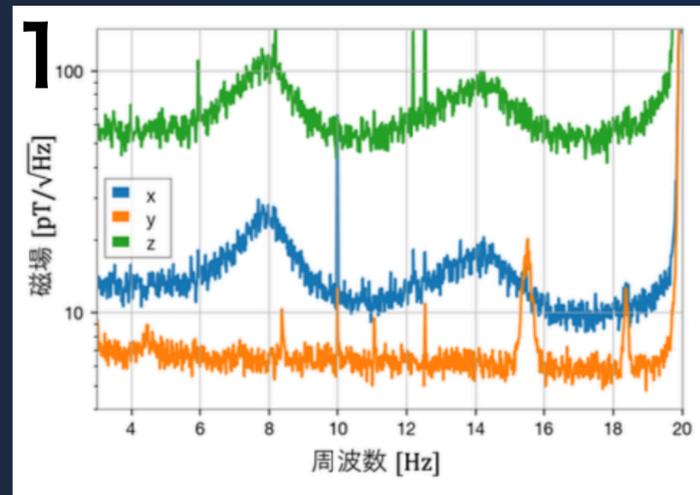
UTC



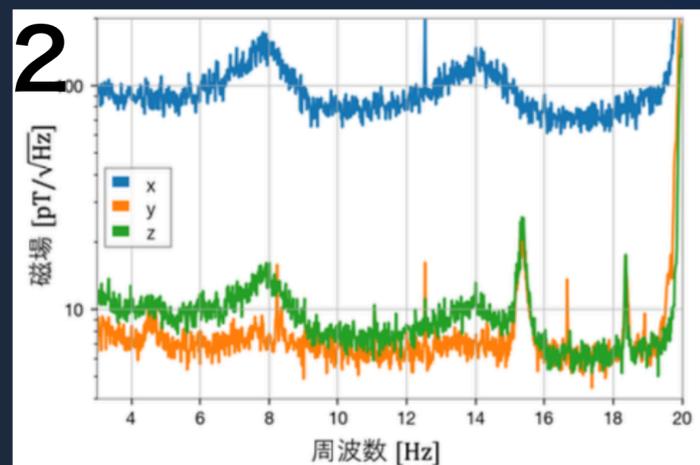
4.1 KAGRA内（地下）での増幅



- 2013年頃から、**地下での共振磁場が地上より大きいこと**が知られていた
- 先行研究(2023)では、機材が揃わず**同時測定できなかった**
Credit :福永勇, 修士論文

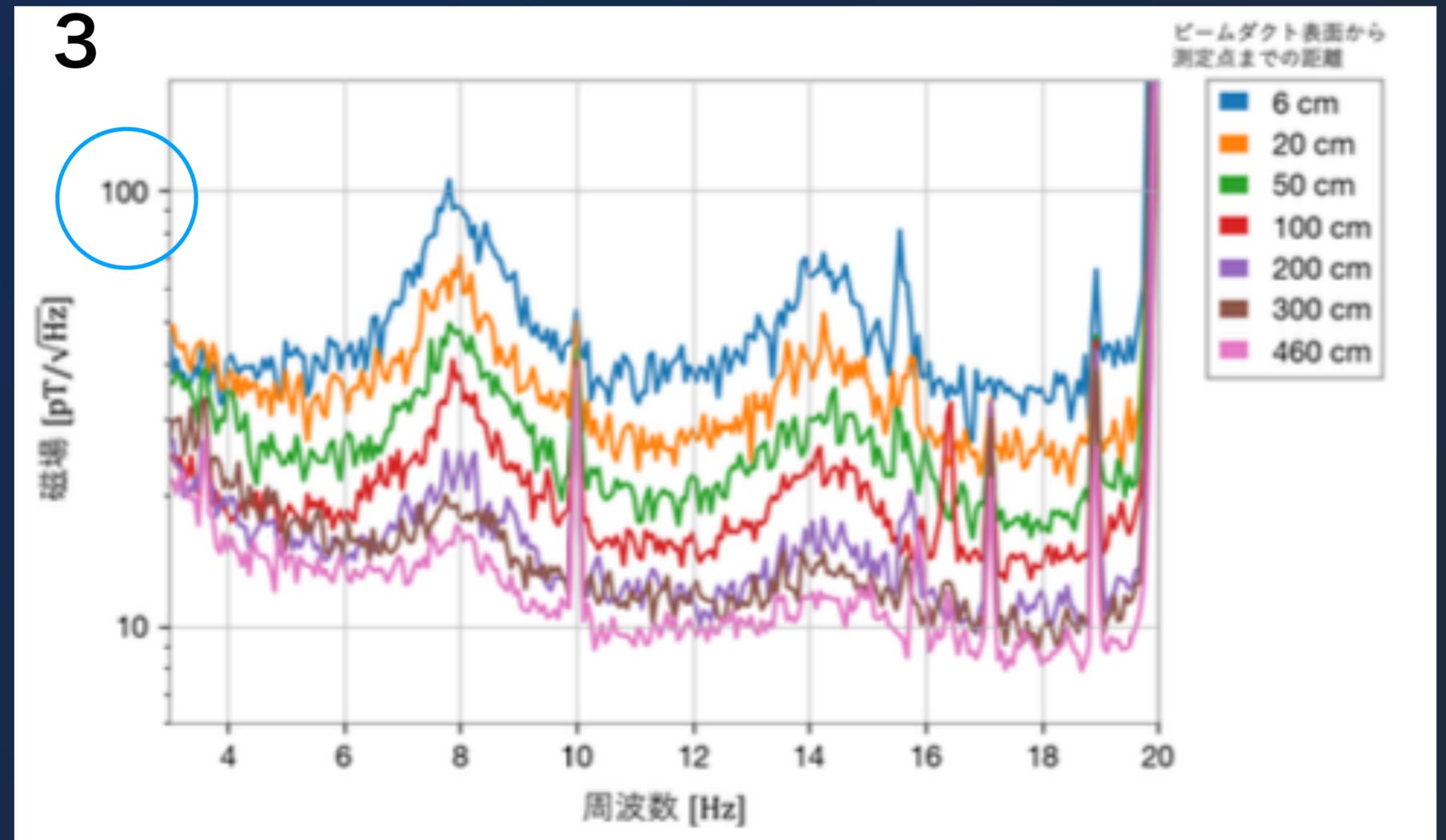


**Z軸
増幅!**



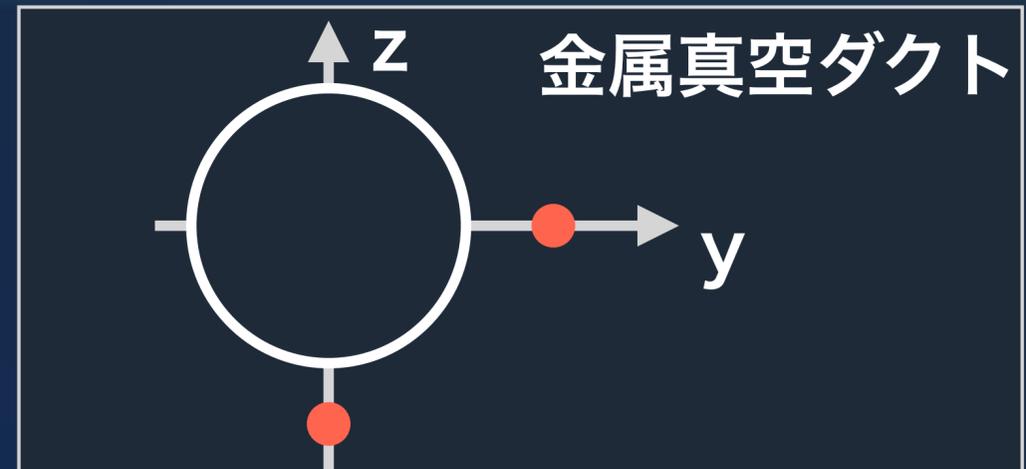
**X軸
増幅!**

図 4.6 真空ダクト表面から鉛直方向の下6cm離れた地点での磁場スペクトル



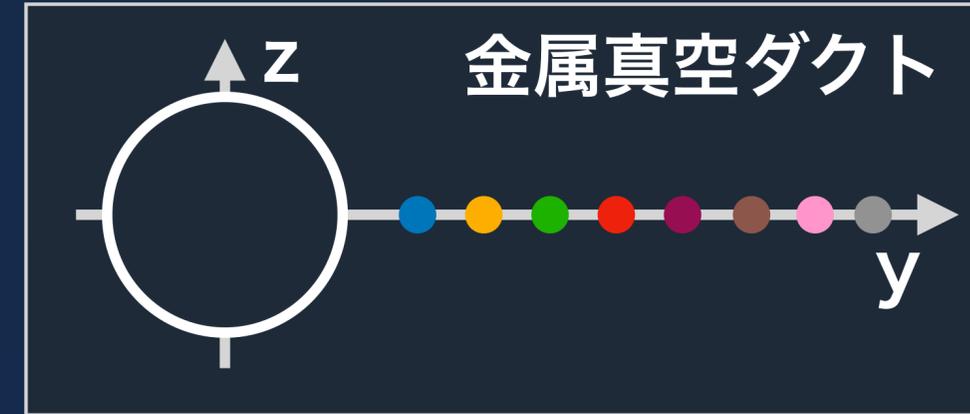
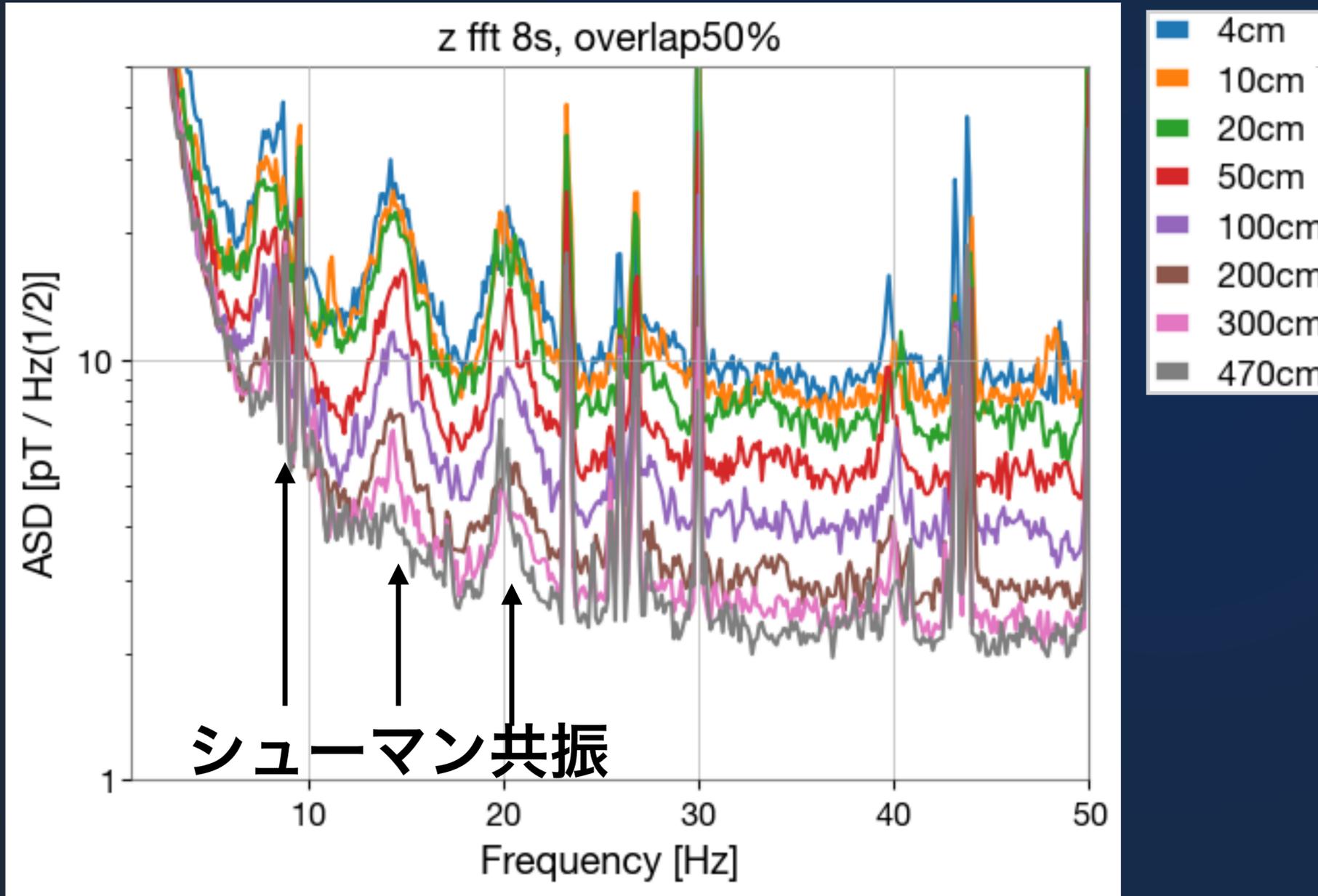
4.2 同時観測 地下でのセットアップ

Mag-13 : 3方向の測定が可能
フラックスゲート



4.3 地下ダクト周り

- z軸方向の磁場、ダクト水平方向に距離変化



距離が離れると磁場が小さくなる

先行研究 ~ 100 [pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$]

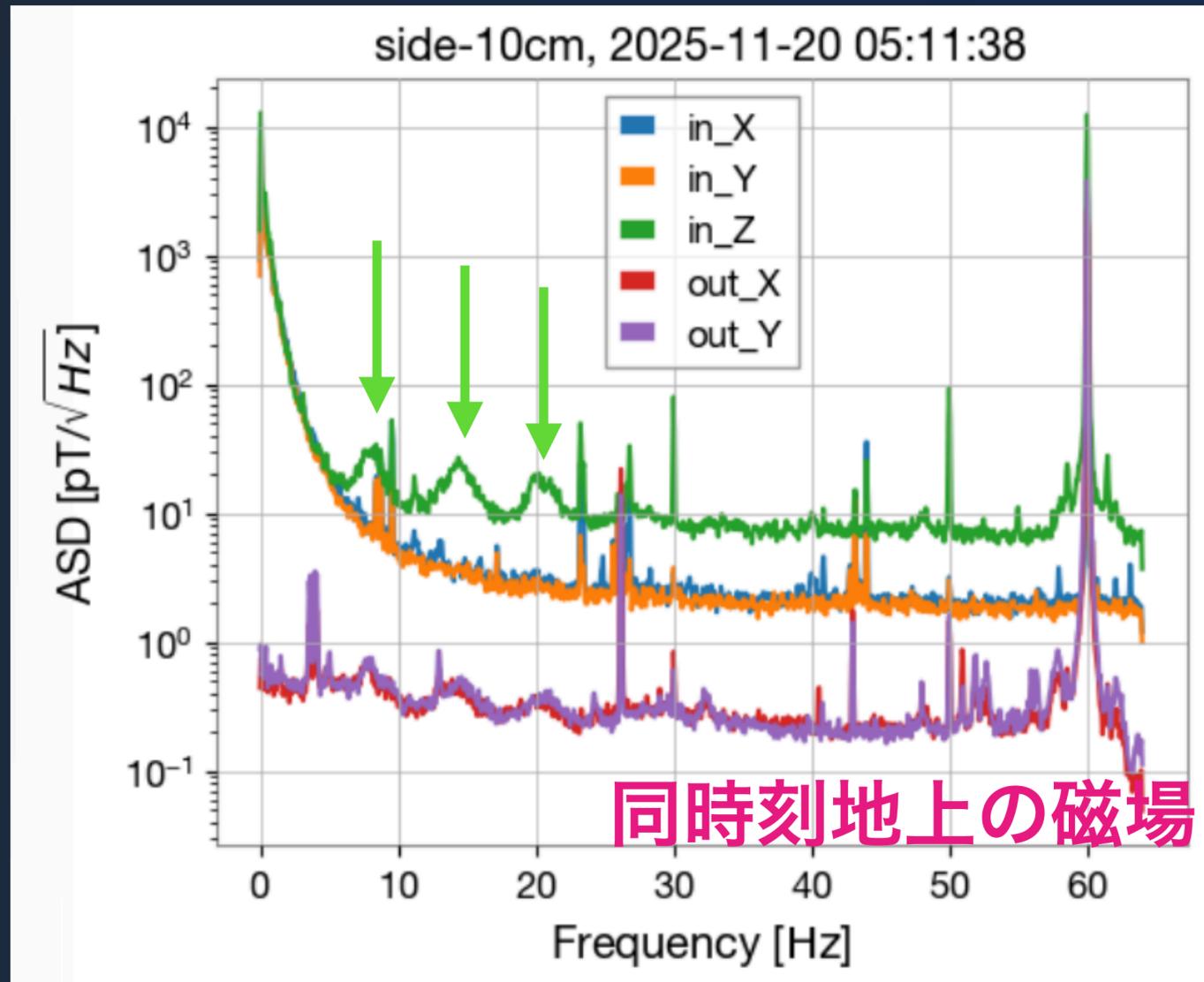
今回 ~ 40 [pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$]

先行研究 7月

今回 11月

4.4 地下ダクト周り

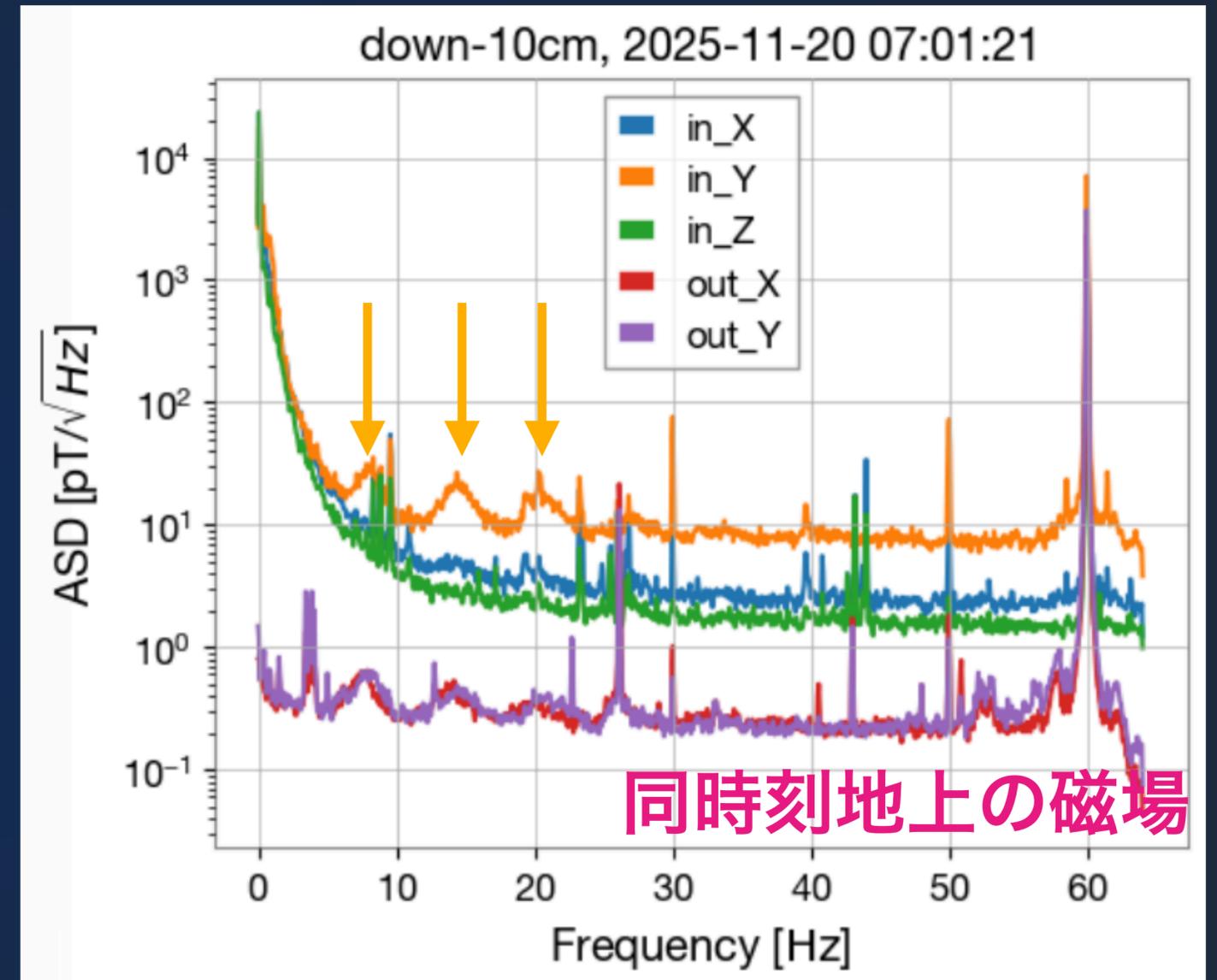
- ダクト水平方向10cm



Z軸にシューマン共振の構造！

x : ダクトにそう方向 y : xに直行する方向
z : 鉛直方向

- ダクト鉛直下方向10cm



Y軸にシューマン共振の構造！

先行研究と同様に円周方向に増大している

5 まとめ

- シューマン共振の強度と共振周波数, Q値の**日周, 季節変動**を見た
- 金属真空ダクトの**円周方向に20~40倍増幅**されることが確認できた
- これらの結果を示す論文を執筆中

Future work

- 既知の磁場を注入し、ノイズがどのくらい入るのかを確認する
- 背景重力波探索への影響を評価する
- アクシオン探索 <https://arxiv.org/abs/2504.06653>

Backup