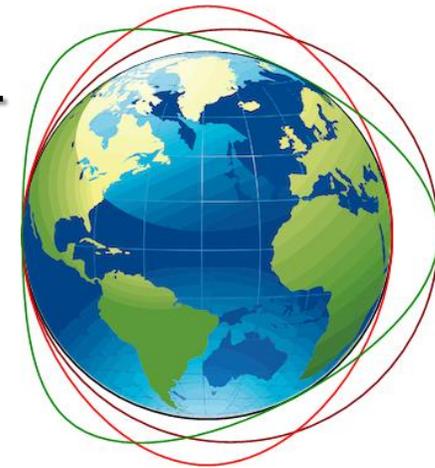


神岡における 地球共振磁場の観測

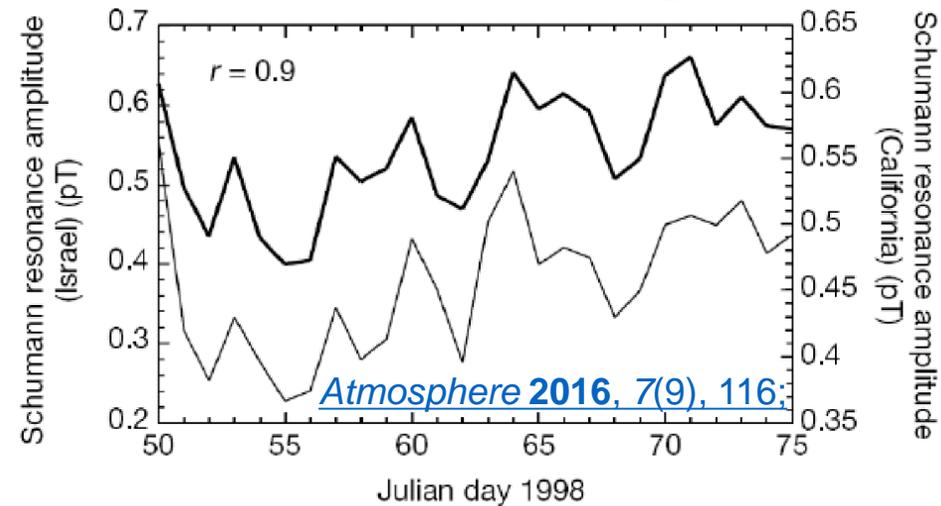
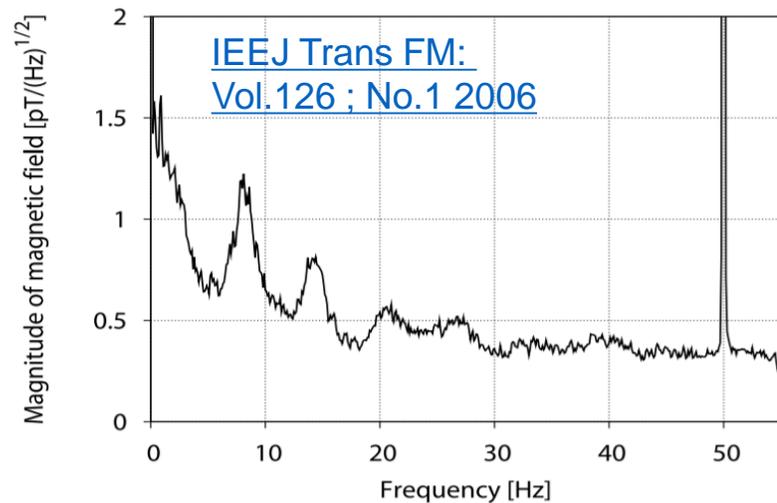
鷺見貴生（国立天文台）

地球共振磁場 (Schumann共振)

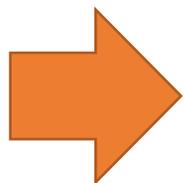
- 地球の地面と電離層の間で共鳴状態となる電磁場
- 雷や太陽風などによって励起される
- 共振周波数 $f_n = \frac{c}{2\pi R_{\oplus}} \sqrt{n(n+1)} = 7.8 \text{ Hz}, 14.1 \text{ Hz}, 20.3 \text{ Hz}, \dots$
- 振幅 $\sim 1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$



- fundamental mode (7.83Hz)
- second order (14.1Hz)
- third order (20.3Hz)



- 地球上全体で相関を持つ
- 振幅・位相・方向などが時間とともに変化する



重力波観測では離れた観測地点(日米欧)で相関のある信号を探索するため、シューマン共振磁場がやっかいな雑音となる

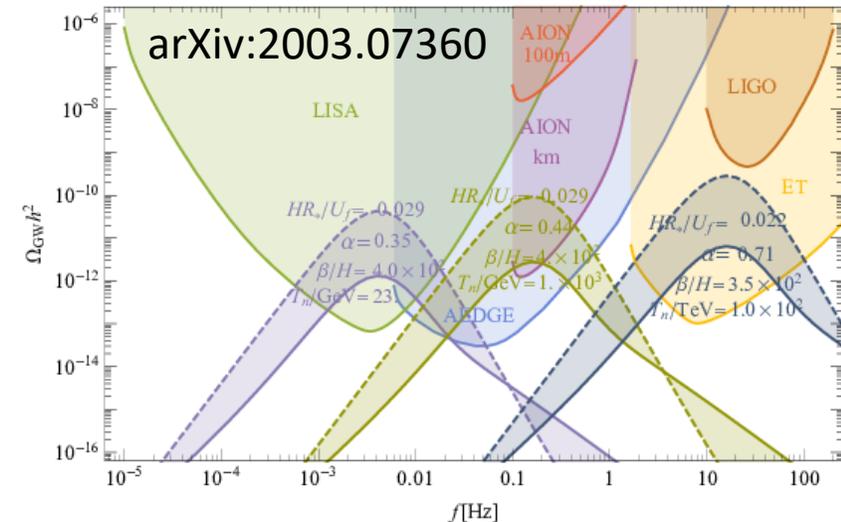
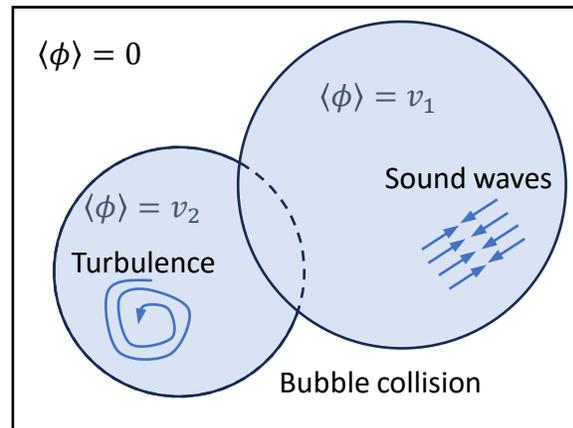
- 特に背景重力波と呼ばれる重力波を探索する場合
- e.g., [Meyers et al. PRD 102, 102005 \(2020\)](#)

初期宇宙の真空相転移による背景重力波

周波数スペクトルにピーク構造を持つ背景重力波を産んだと期待されている。

- $\mathcal{O}(100\text{TeV}) \Rightarrow \mathcal{O}(10\text{Hz})$ にピーク

エネルギー密度は、2つの指数を持つ broken-power-low model で近似される。Sound waveの場合が、最も鋭いピークになる。

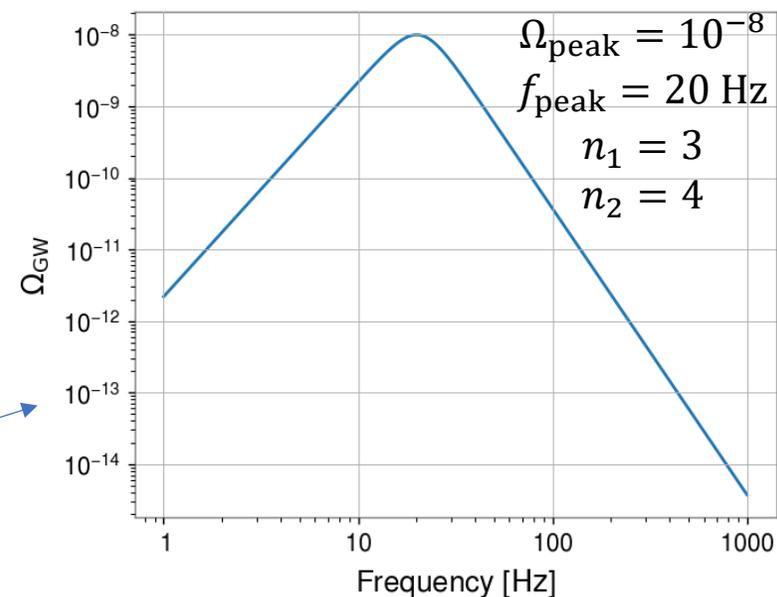


broken-power-low

$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \Omega_0 \times \left[\left(\frac{f}{f_0} \right)^{-n_1} + \left(\frac{f}{f_0} \right)^{n_2} \right]^{-1}$$

Source	n_1	n_2
Bubble collision	2.8	2
Turbulence	3	5/3
Sound waves	3	4

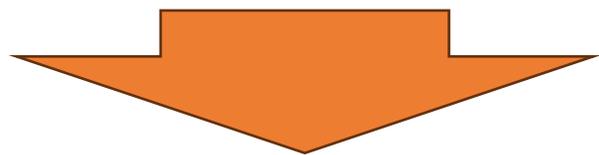
Sachiko Kuroyanagi et al, JCAP11(2018)038



背景重力波探索における相関磁場雑音の影響

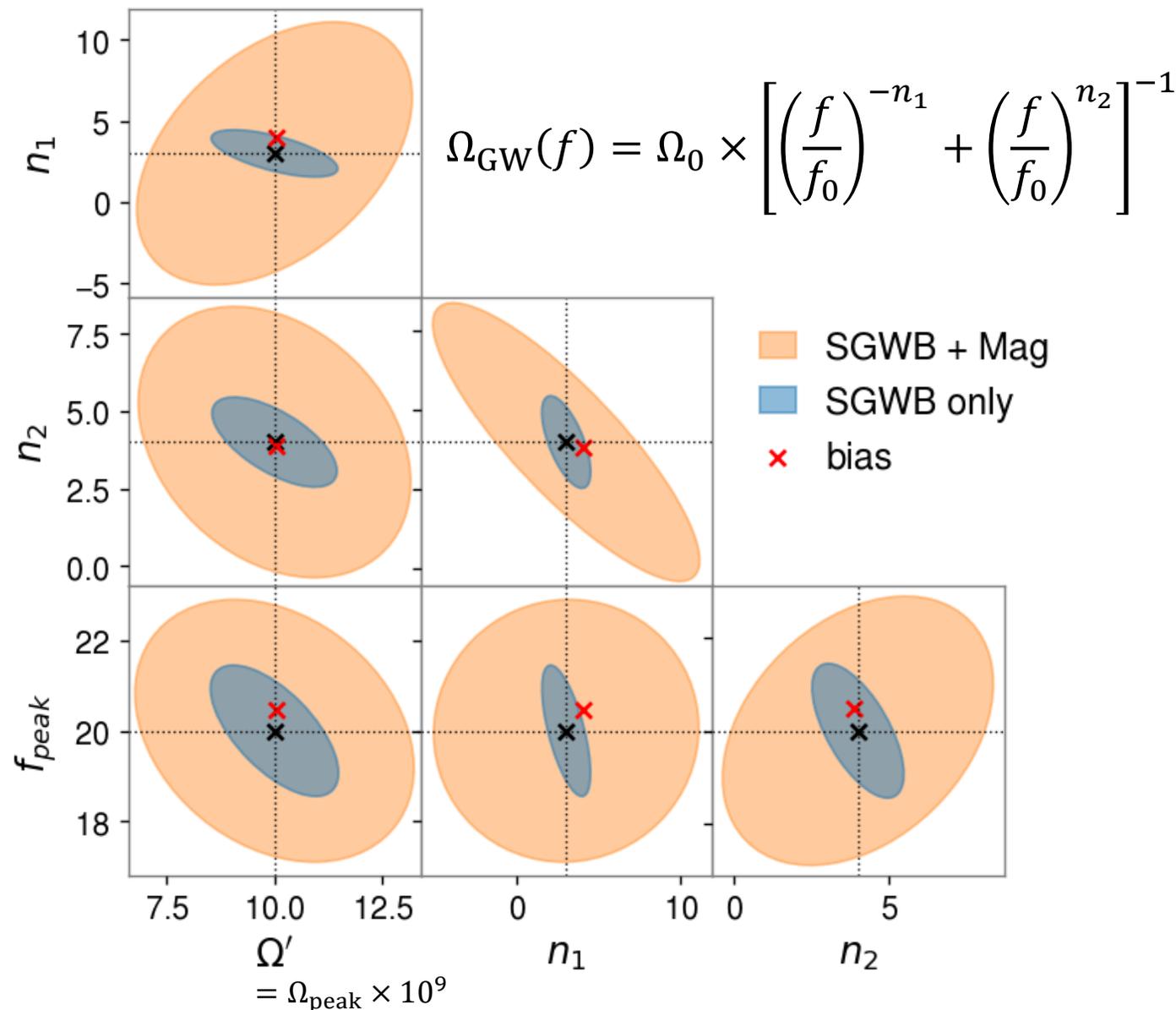
Fisher解析により、背景重力波のパラメタ推定における相関磁場雑音の影響を評価

- 天文起因の背景重力波：
Himemoto et al., PRD 107, 064055 (2023)
- 真空相転移の背景重力波：
鷲見ポスター発表@ GWppBSM 2023

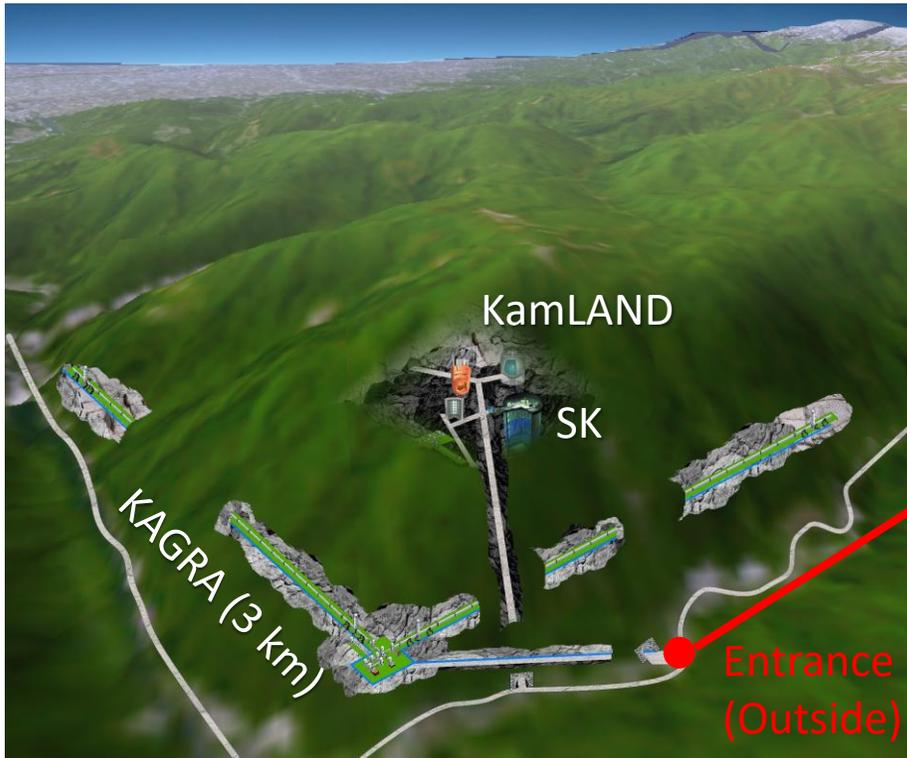


- 磁場雑音が存在すると誤差楕円が数倍大きくなる
 - 指数がゼロをまたぐようになる
- 相関の符号が変わる組み合わせもある
- Biasが磁場なしの 1σ 楕円から外れることもある

それぞれの重力波観測地点で、同時に磁場も観測することが重要



神岡地上における常時磁場観測



市販のMetronix MFS-06e (磁力計) とADU-08e (DAQ)を使用

Period		Sampling rate	Direction from North	
start	end		axis 1	axis 2
2022-08-26	2022-10-24	64 Hz	230°	110°
2022-10-24	2022-12-13	128 Hz	200°	110°
2023-05-04	2023-07-09	256 Hz	200°	110°
2023-10-13	Continuing	256 Hz	200°	110°

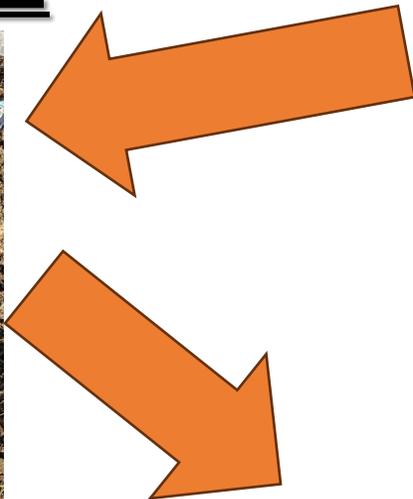


ご存じの通り、神岡は豪雪地帯

2022年の観測では、DAQ(+バッテリー)を駐車場の壁側に置くしかなかったため、冬季は一時中断。
2023年に長いケーブル(20m -> 60m)を購入し、小屋の近くにDAQを設置できるようにした。



2023年の再設置



2023年の再設置

野生動物にかじられたりしないよう、ケーブルを保護チューブに入れ、土の中に埋める作業。
(跡津周辺は石が多く、手作業で掘るのは非常に大変だった)



2023年の再設置

2023-10-06



ひたすら手作業で掘って埋める

2023-10-11



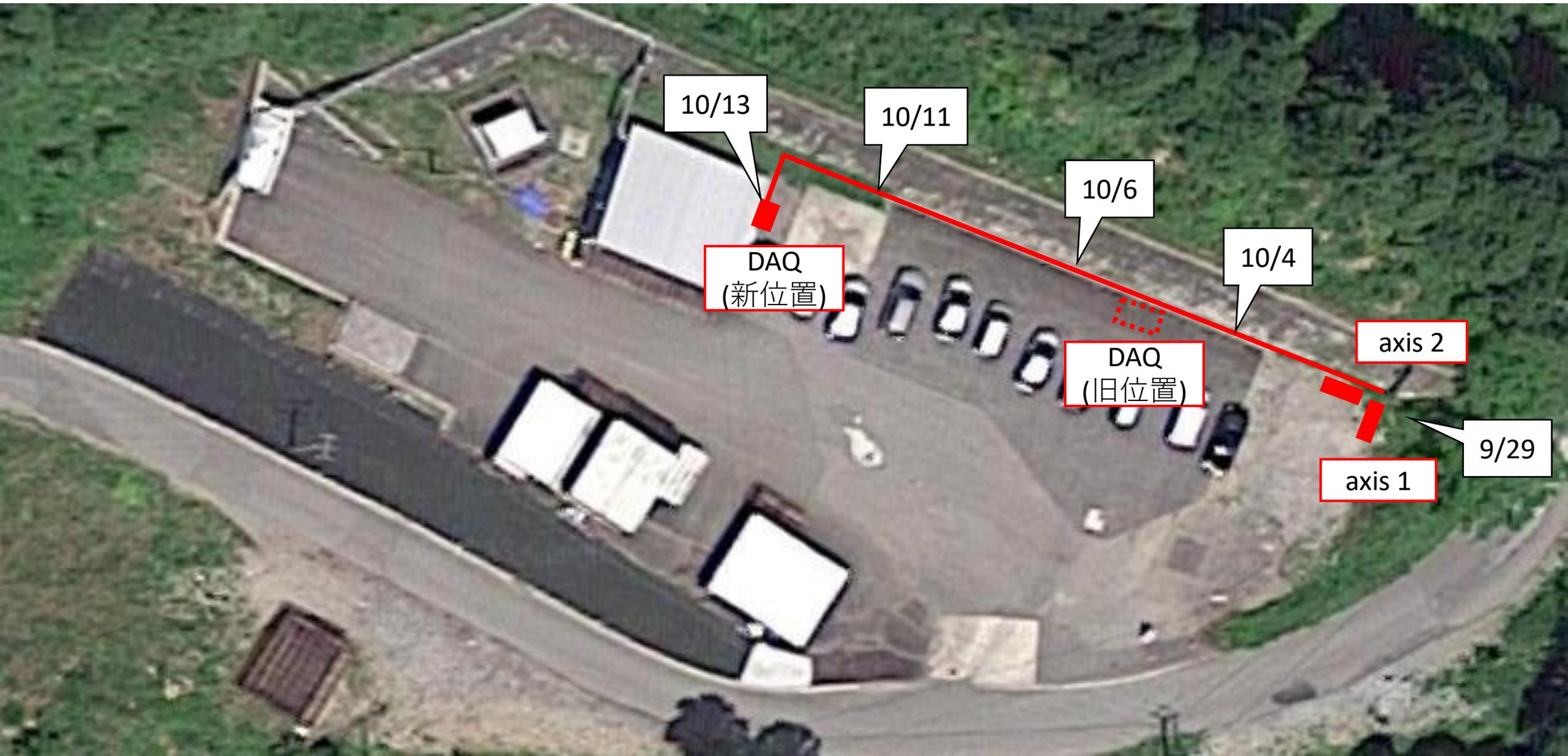
- 雨の日は作業できない
- 良く晴れた日は暑い
- 曇りの日や夕方を狙って作業

2023年の再設置



完了！

2023年の再設置



10/13

10/11

10/6

10/4

9/29

DAQ
(新位置)

DAQ
(旧位置)

axis 2

axis 1

雪よけ



DAQが雪に埋もれないように、板を立てかけた
➤ 冬季も連続して観測を続けられる体制が確立



神岡地上の磁場スペクトル評価

- 回転行列でNS/EW方向に変換し、時間的・周波数的に局在した雑音を除去
- 1時間ごとにパワースペクトル密度 (PSD) を計算 (Bootstrap法による統計誤差付き)
- iminuitによる χ^2 Fitting (シューマン共振ではないBGノイズもモデル化し、同時Fit)

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

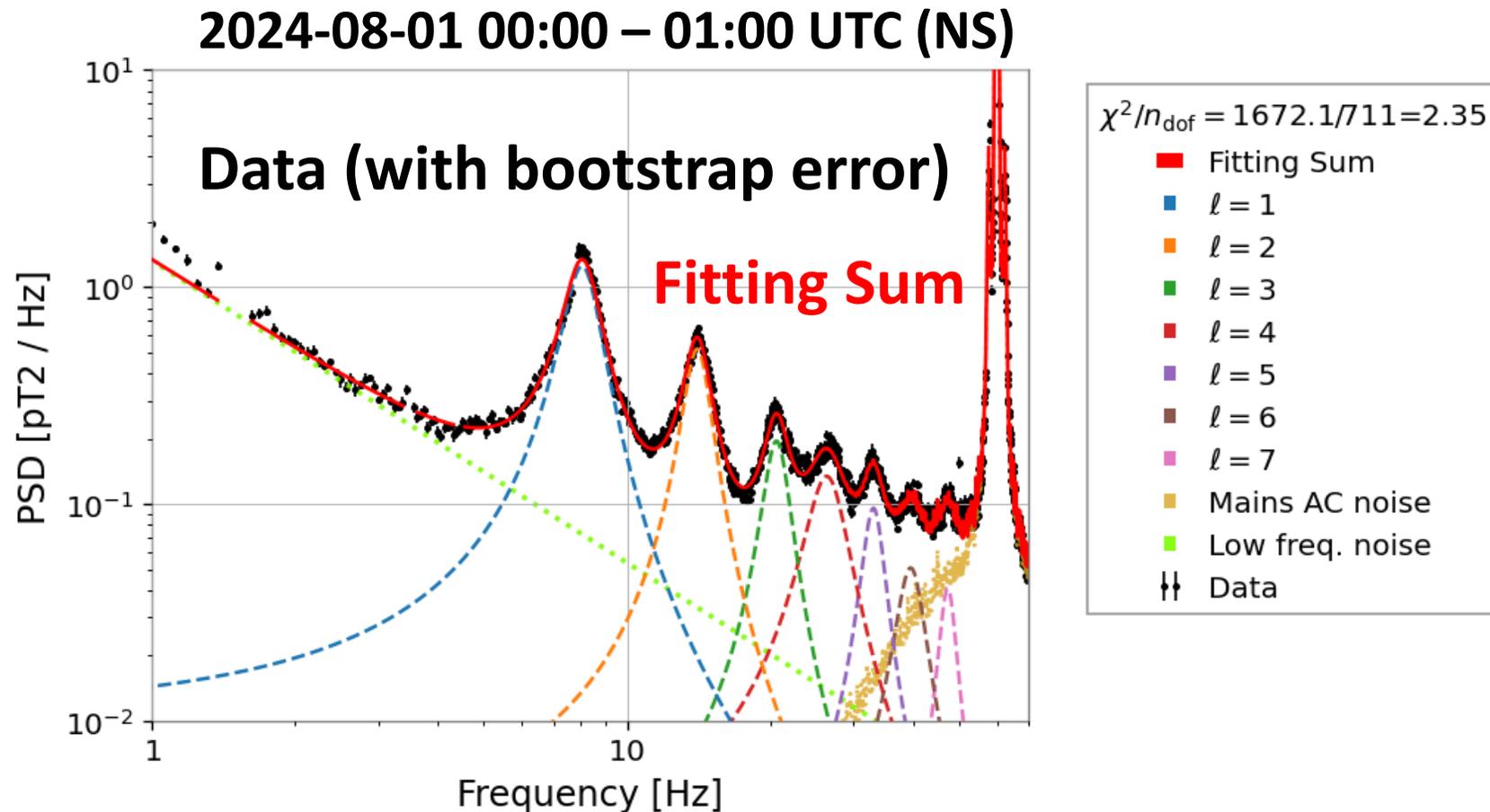
Schumann resonance

$$M_{\ell}(f) = \frac{A_{\ell} \cdot (f_{\ell}/2Q_{\ell})^2}{(f - f_{\ell})^2 + (f_{\ell}/2Q_{\ell})^2}$$

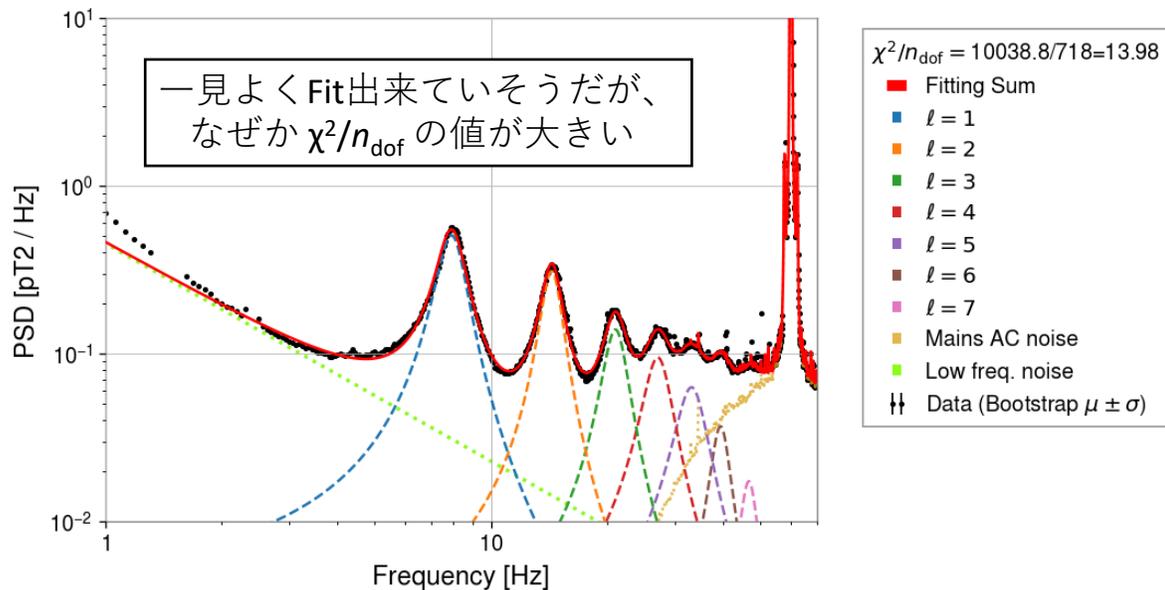
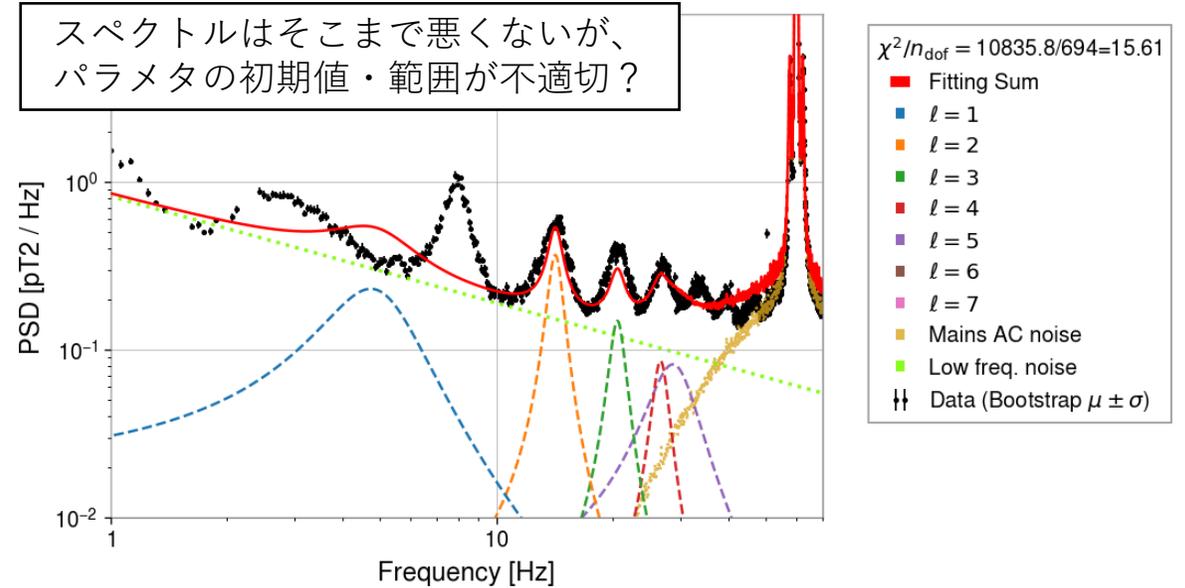
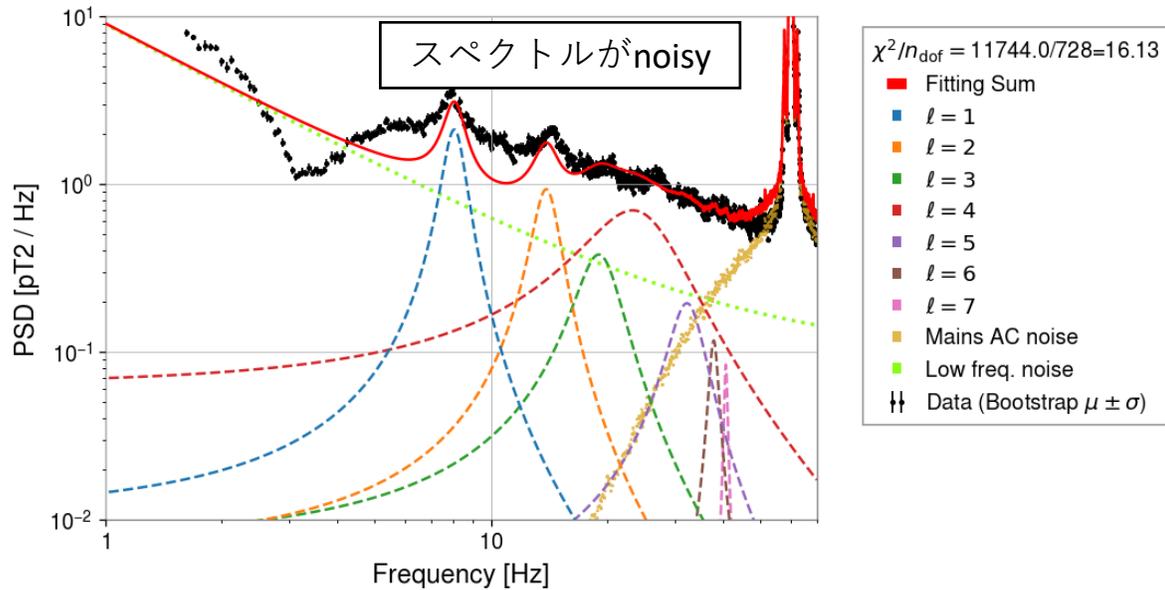
Background noises

$$M_{BG}(f) = A_{BG} \cdot \left(\frac{f}{1\text{Hz}}\right)^{-\alpha_{BG}} + C_{BG} + M_{AC}(f)$$

$$M_{AC}(f) = M(60\text{Hz} - f)$$



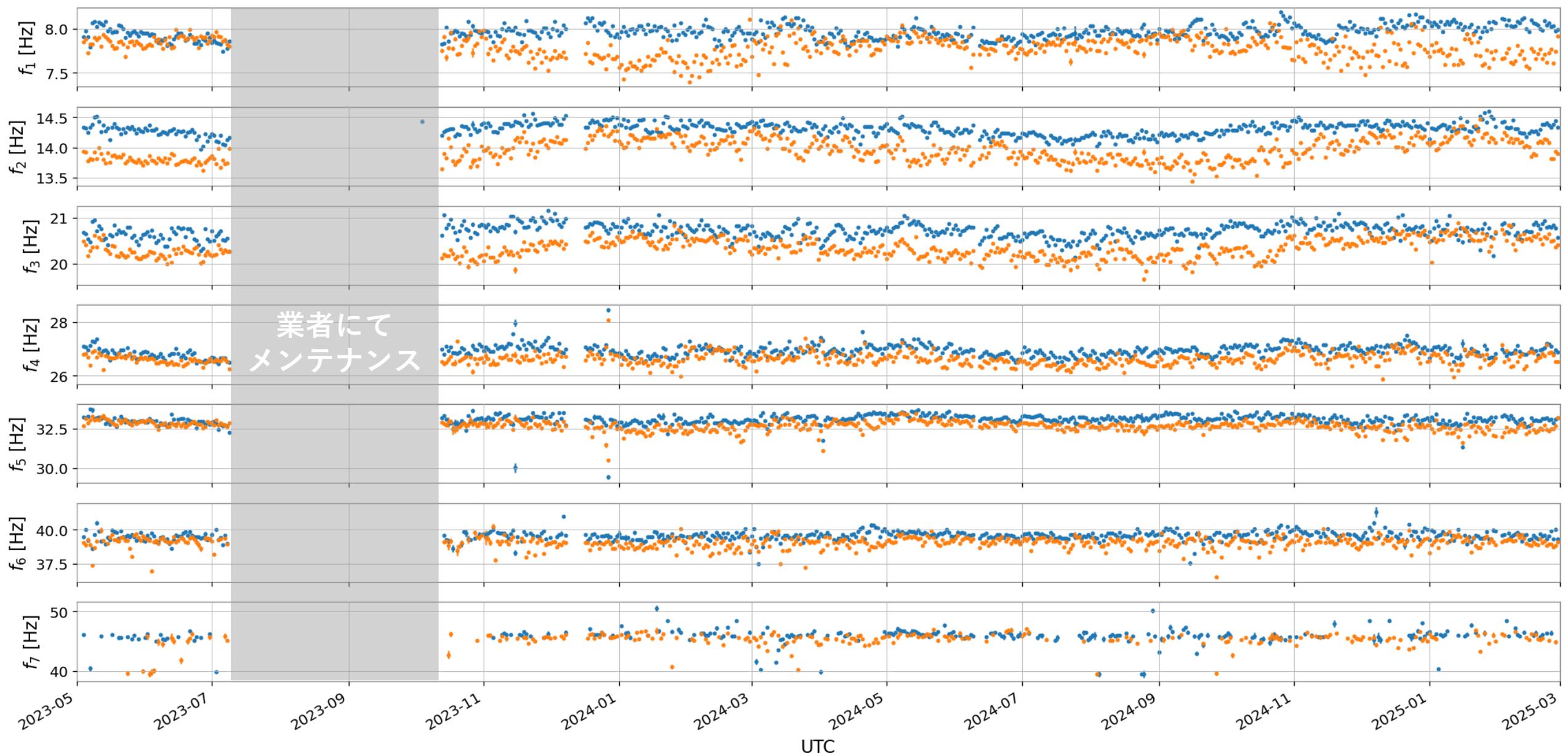
スペクトルFitが上手く出来ていない例



- とりあえず χ^2/n_{dof} やパラメタ相対誤差(error/best) に対してカットを行い、Fitが上手く出来ていないデータ点を除去した。
- 今後、改善を試みる
 - ノイズ成分の除去・モデリング
 - データ点の誤差の付け方
 - パラメタの初期値・範囲のアルゴリズム

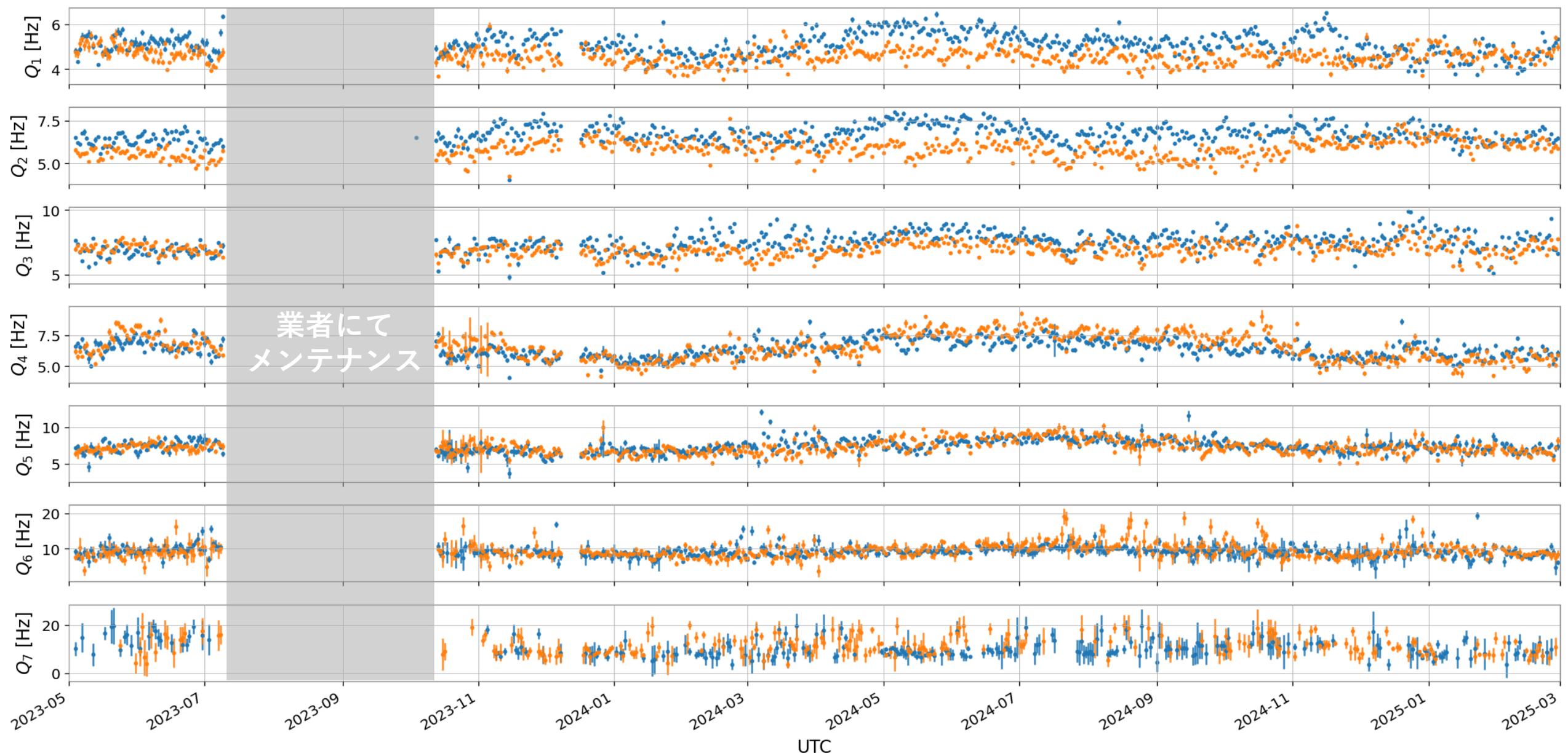
Fitパラメータの時間変動 (共振周波数)

Day average
NS, EW



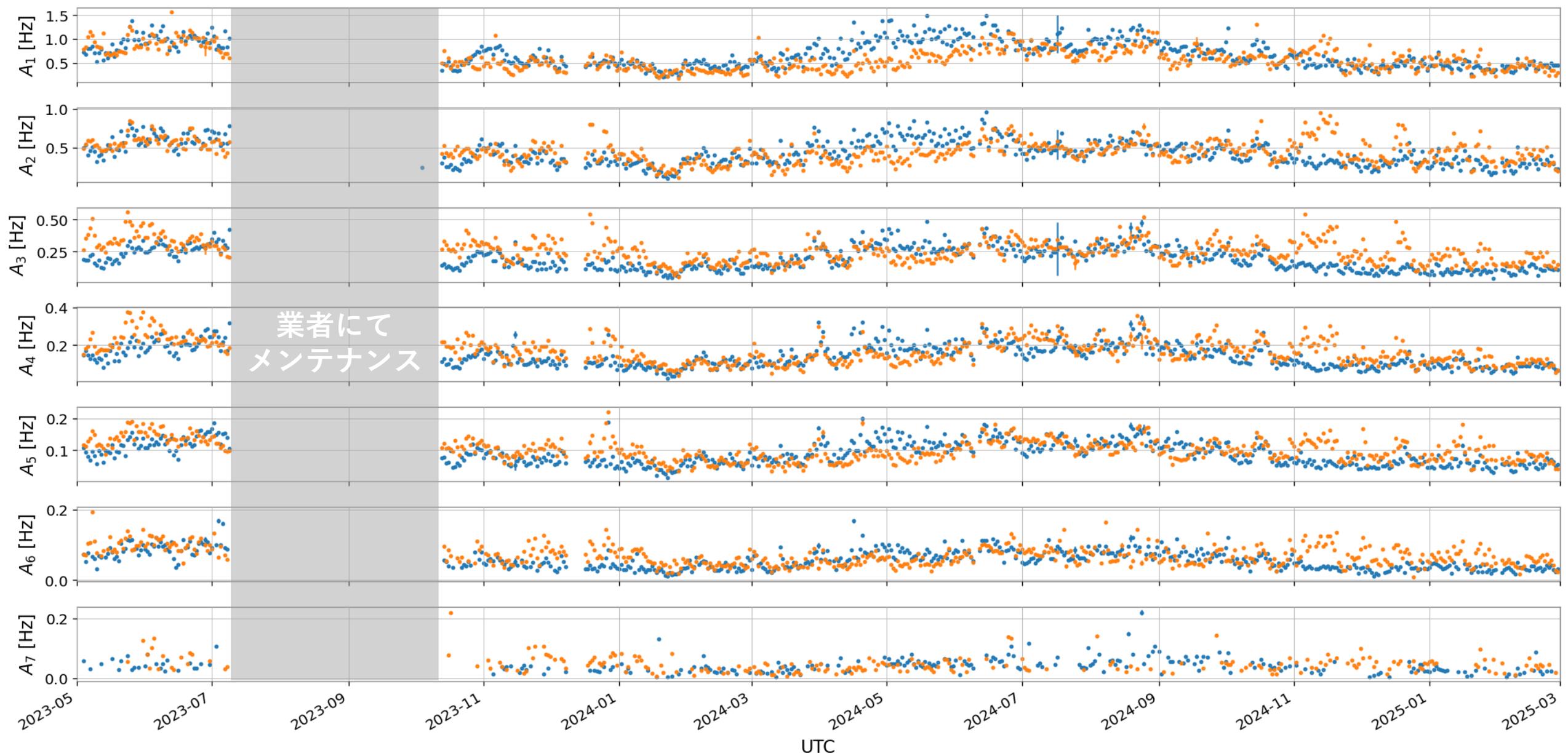
Fitパラメータの時間変動 (Q値)

Day average
NS, EW

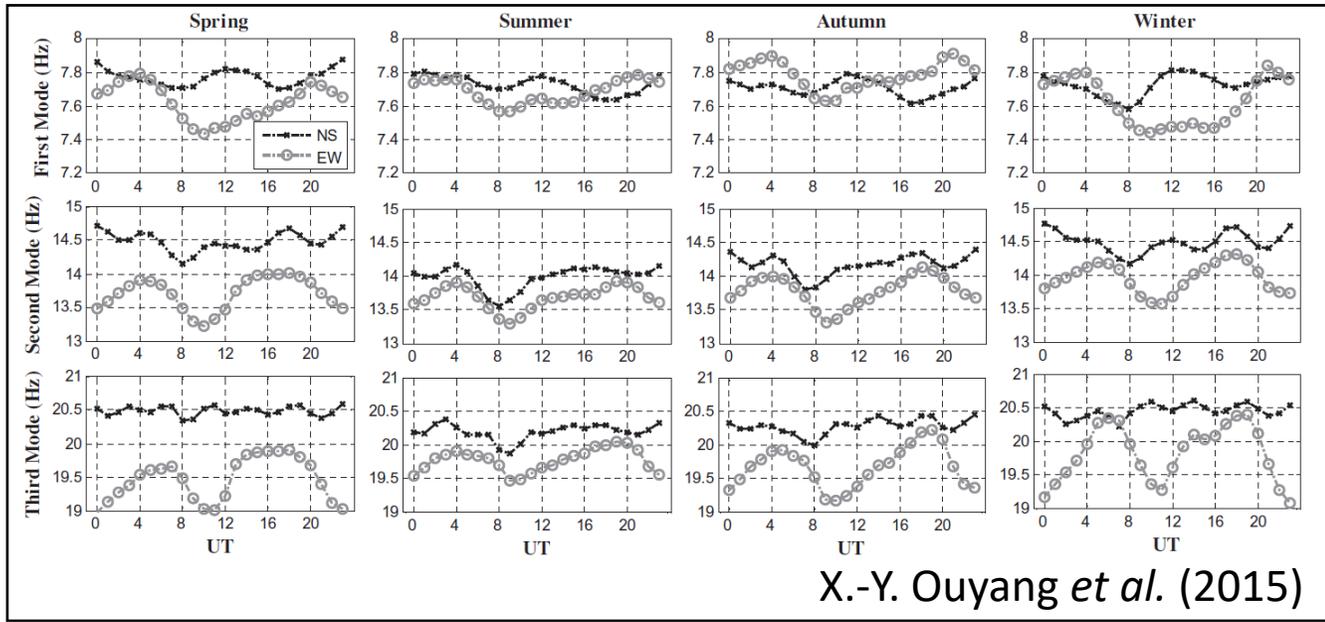
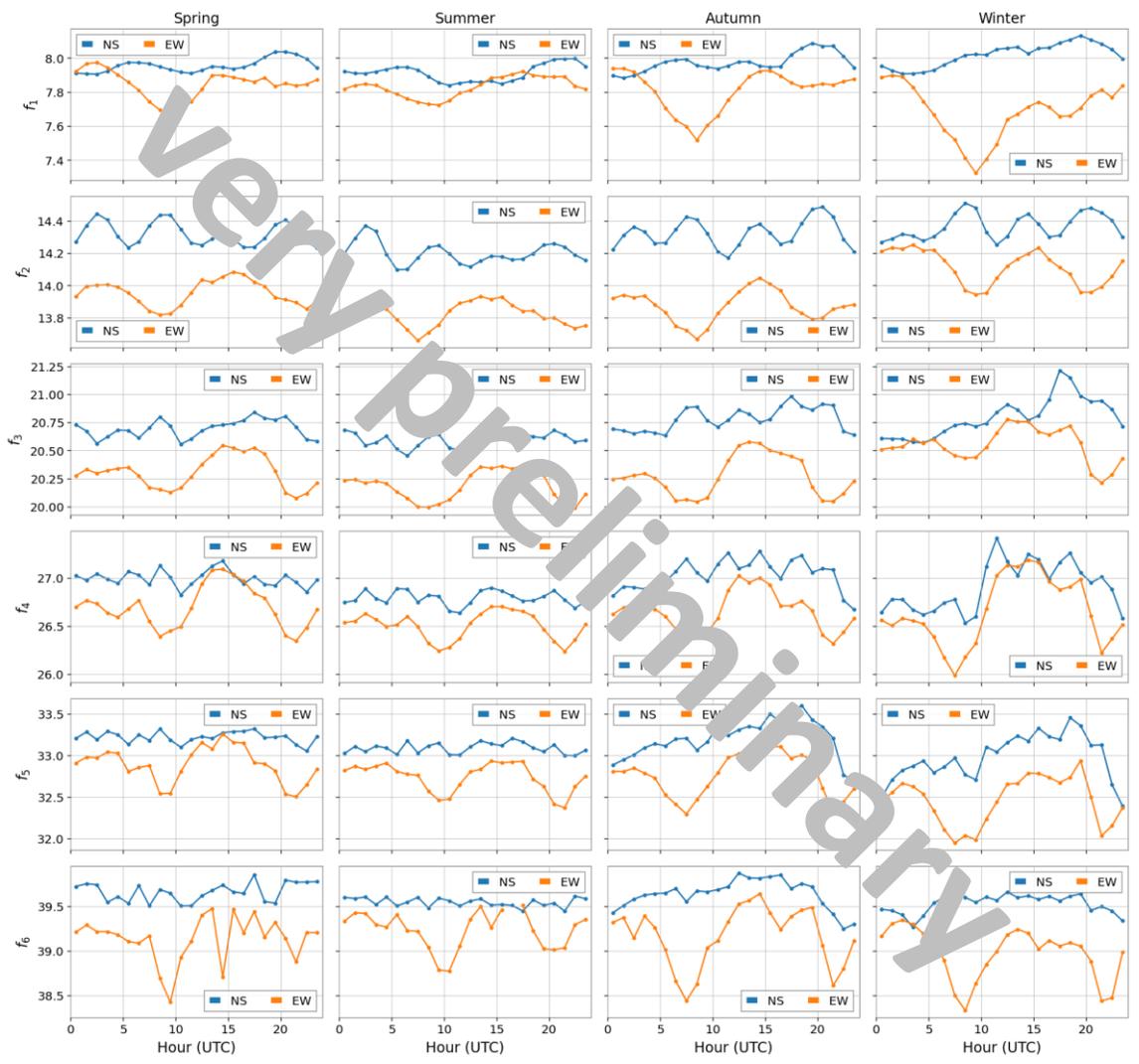


Fitパラメータの時間変動 (ピーク値)

Day average
NS, EW



共振パラメータの日周変動・季節変動



X.-Y. Ouyang et al. (2015)

シューマン共振パラメータは日周変動や季節変動をすることが知られている。他の場所での先行研究と比較できるデータが溜まってきた。(現在鋭意解析中)

まとめと展望

- ✓ 神岡地上(KAGRA坑口)にて、シューマン共振磁場の常時観測を行っている。
 - 2023年10月から現在まで、約15か月の連続運用
 - 積雪や台風のときも問題なし
 - 電源装置やネットワーク機器のメンテ・トラブルで、短時間の中断は生じる
- ✓ 磁場スペクトル(7次モードまで)と雑音成分(電源、低周波成分)をモデリングし、Fittingにより共振パラメーターを評価する手法を確立した。
 - 日周変動や季節変動も見えている

- 今後も観測を継続し、より長期データを取得
- 共振パラメーター評価手法の改善
- 他観測地点との比較
- パラメーター間の相関や、2軸成分間の関係性を評価
- 気象などの現象との相関を調査(雷、電離層、地震前兆、磁気嵐など)
- 重力波検出器との同時観測により、実際の磁場雑音の影響を評価
- 宇宙線・地下実験との相関を調査？