

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

安部 彩優

大阪公立大学 修士課程1年

01 研究背景

背景重力波

様々な起源を持つ弱い重力波の重ね合わせ

- * 天体物理起源(連星合体など)
- * 宇宙論起源(初期宇宙の現象など)

直接観測によって、初期宇宙物理の検証や天体形成史などの全容解明に貢献



KAGRA: 日本の重力波望遠鏡
金属製真空ダクト内にレーザーが通過している
Credit: KAGRA 大型低温重力波望遠鏡

地上干渉計を用いた探索

振幅・位相がランダムで、特定の波形が存在しない

→ 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: $s_i(t) = h_i(t) + n_i(t)$

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

重力波信号の相関

相関のあるノイズ → シューマン共振

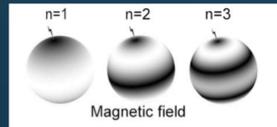
シューマン共振

雷により励起された電磁波が地表-電離層間を共振する現象

- * 励起源(雷)と共振磁場の位置関係

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

$M_C(\omega)$: 雷の電流モーメント
 θ : 雷源からの角度



C. Price, Atmosphere 2016, 7(9), 116

目的①

雷活動の頻度: スペクトルの大きさ // 電離層状態の時間変化: スペクトルの形状
→ 雑音の強度や時間変動の基礎データを取得し、背景重力波探索への応用を目指す

目的②

KAGRA: 神岡地下200~450mに設置されたマイケルソン干渉計
地下トンネル内の金属製ダクト円周方向の磁場が地上に対して100倍近く増幅
→ 地上と地下の同時観測を行い、地下磁場の増幅を定量評価する

02 日周,季節変動

データ期間 start: 2023年5月1日 end: 2025年10月6日

強度

ピーク時刻は以下に集中

NS: 08 & 15 UTC EW: 08 & 21 UTC

成分により異なる

→ 雷源と、観測所(神岡)の位置関係

共振周波数

NS: モードが増加すると、波の数も増加

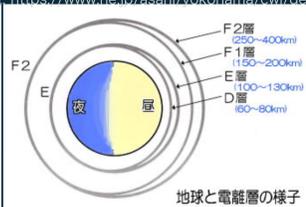
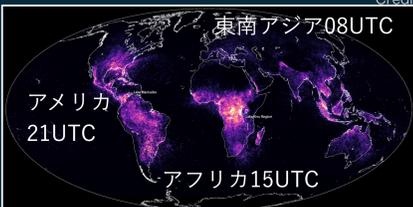
EW: 08 & 21 UTCでの減少(特に5次以上)
伝播方向とターミネーターが揃う

Q値

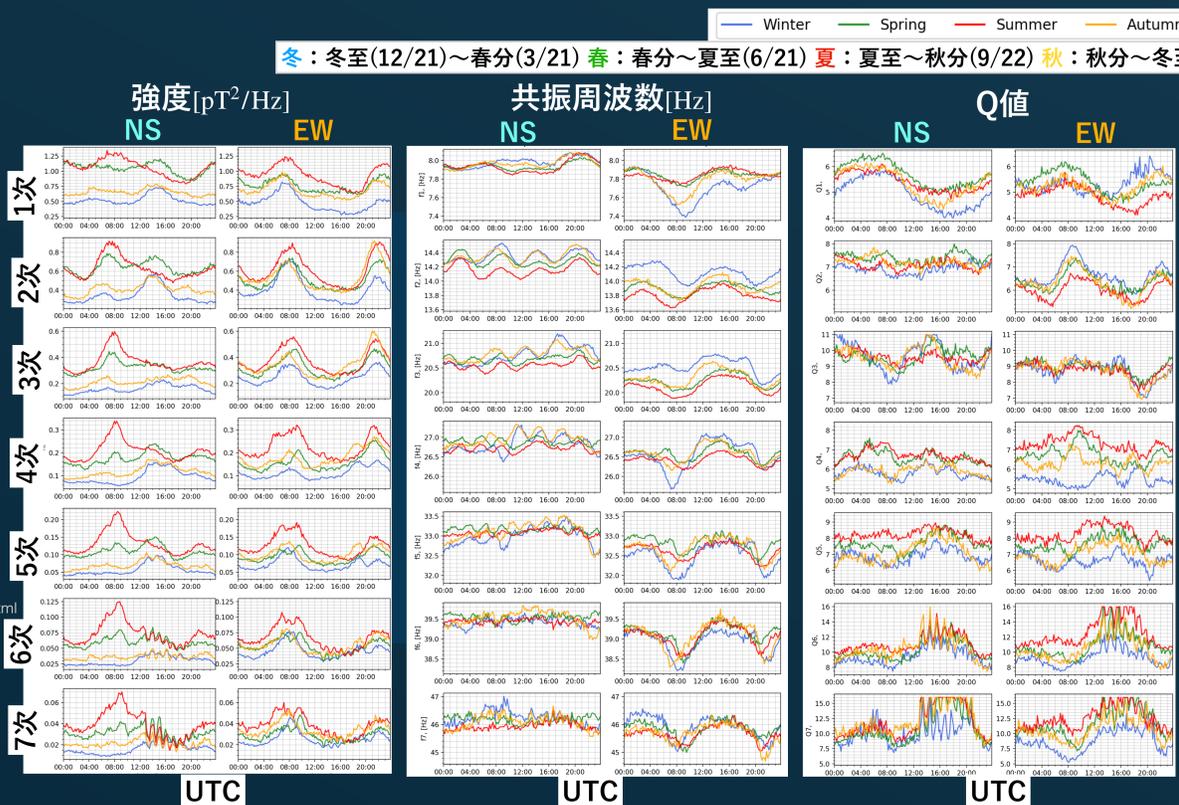
1次: 1日周期性

モードや方向により変動がバラバラ

→ 原因を調査中



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



03 地下同時観測

水平方向の観測ではz軸に、鉛直下側ではy軸に増幅する
→ 真空ダクトの円周方向に増幅している

伝達関数 測定済み 未知

$$H_{\text{地下}}(f) = T(f) \times H_{\text{地上}}(f) + \tilde{n}(f)$$

$T(f)$: 伝達関数 $\tilde{n}(f)$: 地下内の雑音

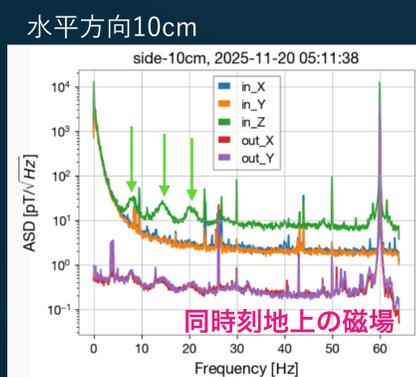
$$\therefore T(f) = \frac{\langle H_{\text{地下}}^*(f) H_{\text{地上}}(f) \rangle}{\langle H_{\text{地下}}^*(f) H_{\text{地下}}(f) \rangle}$$

ダクトから10cmの距離において、伝達関数の増幅率は20~40倍

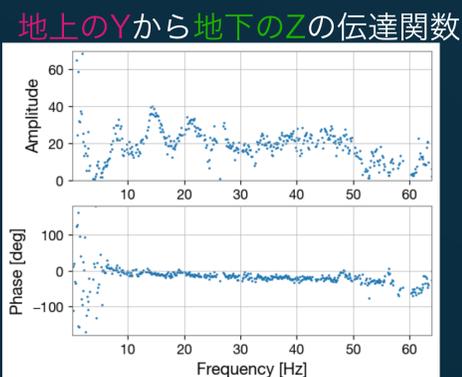
伝達関数の増幅率にシューマン共振の構造が見られている原因は不明



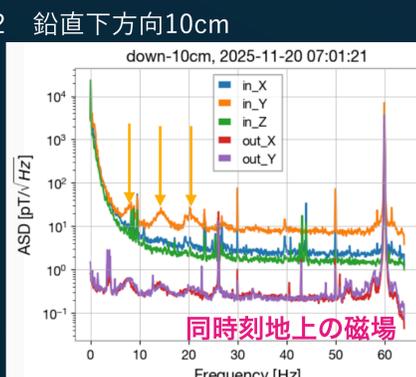
x: ダクトにそう方向
y: xに直行する方向
z: 鉛直方向



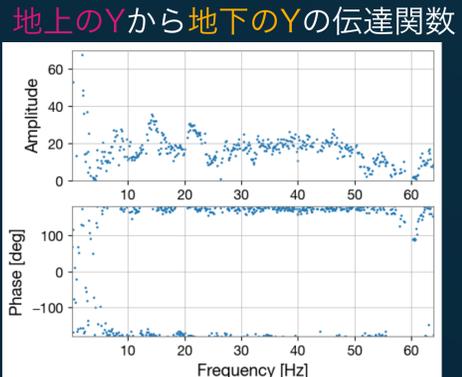
Z軸にシューマン共振の構造!



地上のYから地下のYの伝達関数



Y軸にシューマン共振の構造!



04 結論 & Future work

- ・シューマン共振のパラメータが日周, 季節変動することを確認した
- ・強度は、雷活動の時刻と対応し、08, 15, 21 UTCにピークが見られた
- ・共振周波数のEW成分は電離層の昼夜境界の影響を受けている可能性がある
- ・地上, 地下の同時観測を行い、磁場が真空ダクトの円周方向に20~40倍増幅していることがわかった

- ・既知の磁場を注入し、どのくらいの雑音が入るのかを確認
- ・背景重力波探索におけるシューマン共振の影響を評価
- ・アクション探索