

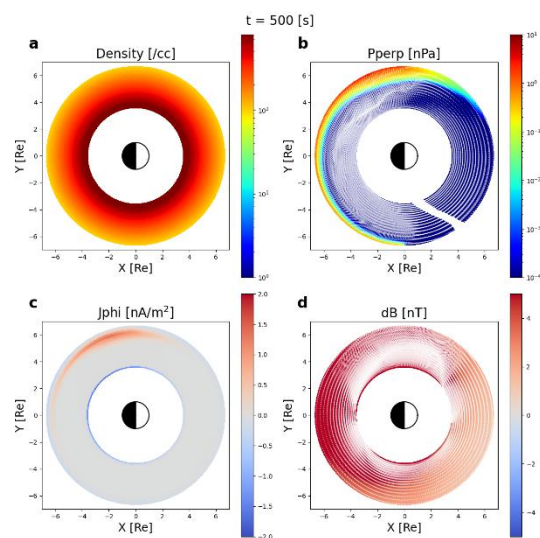
研究目的・手法

地球磁気圏で観測される数 mH から数十 mHz の超低周波数 (ULF) 波動の励起にはリングカレントイオンの空間勾配が重要であると指摘されている。本研究の目的は、ドリフト運動論的 5 次元ブラソフ方程式とマクスウェル方程式を自己無撞着に解くリングカレントイオンの物理モデル (GEMSIS-RC) を用いて RBSP 衛星で観測された ULF 波動の再現実験を行い、衛星では把握することが難しいイオンの空間勾配の波動励起における役割を明らかにすることである。

GEMSIS-RC のコードは CPU を用いた並列計算が想定されていたため、使用したシステムは名大 HPC (不老) Type I subsystem である。GEMSIS-RC モデルの設定は次の表 1 のとおりである。

表 1. 数値シミュレーションの設定

空間グリッド数	$N_1 = 48$ (磁力線方向) $N_2 = 32$ (動径/L 値方向), $L = 3.6\text{--}6.6$ $N_3 = 1024$ (方位角方向)
分布関数のグリッド数	$N_v = 32$ (磁場平行速度), $-4,500\text{ km/s}$ から $4,500\text{ km/s}$ $N_m = 32$ (磁気モーメント), 10^{-5} keV/nT から 1 keV/nT
時間ステップ	$\Delta t = 0.05\text{ s}$ $\Delta t_{M-I} = 100 \Delta t$ (電磁気圏結合計算の時間ステップ)
境界条件	R1FAC 電流 (AMPERE 衛星の観測データをガウスフィットした分布) 夜側境界 (18–6 MLT) に GOES 衛星の観測を κ 分布でフィットしたエネルギースペクトル



研究結果

図 1 に表 1 の設定で得られた GEMSIS-RC のシミュレーション結果の例を示す。シミュレーション時間にして 500 秒間の計算結果であるが、計算に 3 日を要した。表 1 の設定は方位角方向のグリッドが極めて細かいため、もとより計算速度を出すのが難しい側面があった。しかし、当初想定していた計算速度に対して実機での計算速度が遅かったほか、計算資源の消費速度もかなり速いことが判明した。そこで、グリッド数の違いによる影響などを調べることを目的として、比較的方位角方向のグリッドが粗い run を試す

図 1 (a) プラズマ密度、(b) リングカレントイオン圧力 $P_{\perp}$ (c) 東西電流 (d) 磁場強度変化の時空間発展。

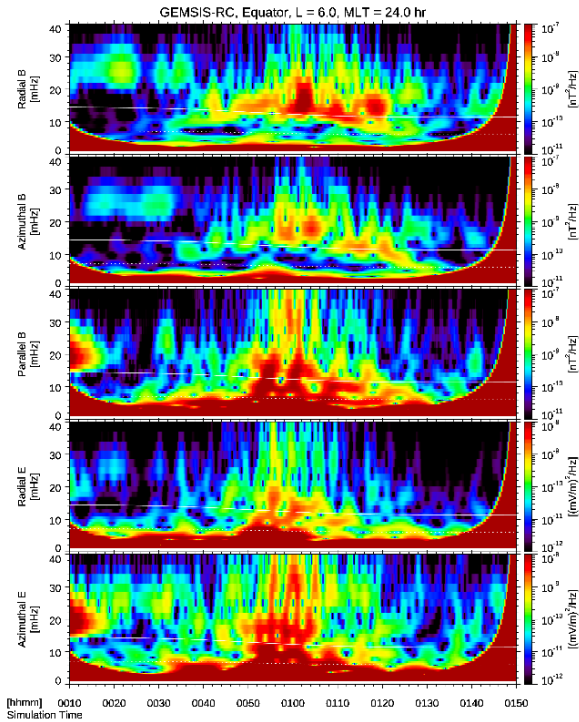


図 2 L=6.0, 24 MLT の赤道における電磁界 wavelet パワースペクトル。白の実線は fundamental cavity mode の固有振動数、城の点線は fundamental Alfvén 定在波の固有振動数を示す。

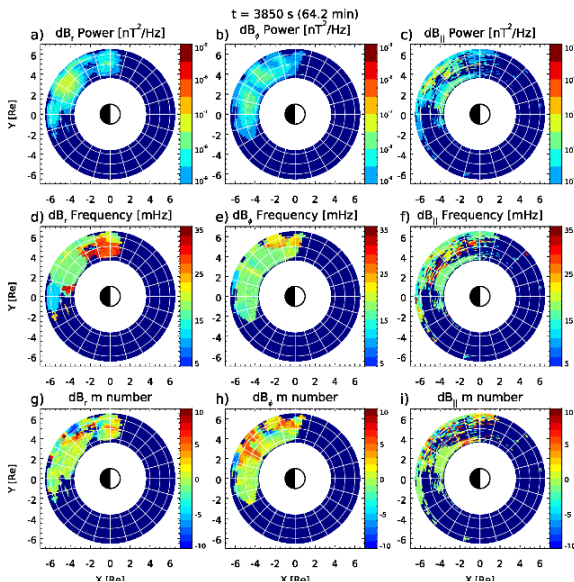


図 3 波動のパワーがピークになる時間帯（60 分前後）の波動パワー、波動の周波数、東西波数(m number)の赤道面分布。左端の列が radial 磁場、中央が azimuthal 磁場、右端が parallel 磁場振動の分布を示す。

こととなった ($N_3 = 128$)。また、新しい設定では、簡単のため R1FAC 電流を $0.3 \mu \text{ A/m}^2$ で固定している。

図 2 にシミュレーション内で検出された ULF 波動の例を示す。この run では、シミュレーションを開始してから 40 分経った以降、主に夜側から夕方側にかけて 10 mHz 以上の高周波の波動が頻繁に発生していた。特に radial 成分に顕著である一方で、波動のパワーはかなり低めに出ている。波形データを確認したところ、少し離れた場所の間 ($\Delta \text{MLT} \sim 0.1$) ではほとんど位相差はなく、波数が極めて小さいことがうかがえる。

波動のパワーが極大となる 60 分後前後の波動パワー、周波数、東西波数 (m number) の赤道面分布を図 3 に示す。図 3a に見られるように、radial な磁場 (B_r) の変動が 21 MLT ごろ最も高いパワーのピークを持つが、その周辺では azimuthal な磁場変動も同程度広がっている。azimuthal 方向に離れた二点の磁場変動から、この radial 振動の m number を算出したところ、 $L > 6$, 20–21 MLT 付近でスポット状に見えているものを除きほとんど 0 付近の波数を持つと判明した。

考察

今回のシミュレーション設定は Yamakawa et al. (2019) の論文で議論されている GEMSIS-RC の結果と同じグリッド数を採用している ($N_3 = 128$) ため、Yamakawa et al. (2019) と同じような ULF 波動が発生することが期待されていた。しかしながら、今回のシミュレーションではやや異なる位置や波数の波動が検出されている。Yamakawa et al. (2019) ではシミュレーションの比較的早い段階 (600–2,400 秒) で compressional-poloidal 波動が 15 MLT 付近に見えており、その m number はおよそ -20 程度であった。今回のシミュレーションは速度分布は同じながら、境界での空間分布のさせ方が違うため、イオンのドリフトの仕方によっては Yamakawa et al. (2019) で得られているようなエネルギー勾配による不安定性が生じていない可能性がある。また、図 3a で見られるような波動が励起した領域はリングカレントイオン圧力の地球方向勾配とよく一致しそうであるが、不安定の条件を満たすのか分布関数の解析が必要である。

過去に別の計算資源を用いて行った表 1 に似た設定の run と比べると、今回の run では波動の見え方として明らかに発生期間が長くなった。このことから、粒子の境界条件の対称性や R1FAC 電流の定常性が波動の励起（あるいは検出）に影響があると考えられる。