

グローバル内部磁気圏モデルに基づく 固有磁場強度が磁気嵐に与える影響の研究

Effects of the intrinsic magnetic field strength on magnetic storms
based on global inner magnetospheric simulations

研究代表者：関 華奈子 （東京大学大学院理学系研究科）

研究分担者：長田 知大 （東京大学大学院理学系研究科）

担当：数値シミュレーションの実行、データ解析

研究目的 (Research Objective):

地球磁気圏における最大規模の変動現象である磁気嵐時には、環電流が発達し、静穏時には双極子磁場がしっかりしてあまり変動のない内部磁気圏に至るまでダイナミックな変動が引き起こされる。磁気嵐時の環電流の発達、磁気圏の磁場構造を変化させるだけでなく、Pc5 波動などに代表される ULF 波動を励起することで、放射線帯電子の変動にも寄与すると考えられているが、電離圏と磁気圏の間の領域間結合の影響や ULF 波動の空間分布の支配要因には不明な点も多く、定量的な理解を得るには至っていない。また、この数百年にわたり地球の固有磁場が現象傾向にあるが、固有磁場強度が弱まった際に磁気嵐の発達がどのように変化するかについてもよくわかっていない。本研究の目的は、独自のドリフト運動論近似に基づく 5 次元内部磁気圏グローバルモデルを用いた数値シミュレーションに基づき、固有磁場強度が磁気嵐時の内部磁気圏ダイナミクスに与える影響を明らかにすることにある。現在の地球磁気圏で実証的に検証されたモデルを、固有磁場強度が現在の地球の 2/3 と弱い場合について応用する計画である。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究で用いる内部磁気圏モデルは、現在の地球における静止軌道よりも内側の内部磁気圏におけるイオン分布関数と電磁場の時間発展を自己無撞着に説くドリフト運動論近似のグローバルシミュレーションをコアモジュールとし、内側境界では電離圏の電場ポテンシャルソルバーと結合するとともに背景低温プラズマの運動を同時に解くモデルとなっている。イオン分布関数は 5 次元位相空間で解くことになるため、空間解像度を上げると必要となる計算リソースが大きく増える。境界条件については、プラズマシート側の外部境界条件については、グローバル MHD シミュレーション結果からプラズマシートのパラメータを抽出して用いた。

また、シミュレーション設定としては、現在の地球(Case 1)、弱い固有磁場(現在の地球の 2/3)で固有磁場の変化に対応して電離圏電気伝導度を高くした惑星(Case 2)、弱い固有磁場だが電離圏電気伝導度を Case 1 と同じにした惑星(Case 3)の数値実験を行った。各 Case の設定とグローバル MHD シミュレーション結果から抽出した外部境

界条件(温度・密度・圧力)と極冠電位差は Table 1 の通りである。

	Dipole magnetic moment [10^{22} Am ²]	Ionospheric conductivities	Simulation box L value [R_E]	Plasma sheet temperature [keV]	Plasma sheet density [$/cc$]	Plasma sheet pressure [nPa]	Cross polar cap potential [kV]
Case 1	7.76	Standard	3.6–7.6	8.4	1.3	1.7	75
Case 2	5.17	$\Sigma_P \propto M^{-1}$ $\Sigma_H \propto M^{-4/3}$	3.1–6.6	8.8	1.4	2.0	57
Case 3	5.17	Standard	3.1–6.6	7.7	1.5	1.9	72

Table 1 シミュレーションの設定

研究成果 (Accomplishments) :

各 Case に対して Dessler-Parker-Sckopke(DPS)関係式から SYM-H 指数を計算し、リングカレントの発達の規模を比較した(Figure 1)。その結果、系全体を積分した総エネルギーは Case1 > Case3 > Case2 の順で大きくなった。リングカレントの総エネルギーは概ね対流電場の大きさと夜側外部境界での圧力の積によって決定されていると考えるとこの結果は理解できる。一方で、地表で見られる磁気嵐の規模の指標である SYM-H 指数の最終状態での値は Case3 < Case1 < Case2 の順で小さくなった。SYM-H の減少率(磁気嵐の発達速度)は、磁気嵐主相の開始当初は Case1 に比べて磁場の弱い Case2, 3 が大きい(主相後半では Case2 よりも Case1 が大きくなった)。Case2, 3 で Case1 よりも早く SYM-H 指数が減少した理由として、弱い双極子磁場では、磁場強度に対して地球中心からの距離が近くなるため、ドリフトによるリングカレントの方位角方向への発達が早くなることが考えられる。

こうした SYM-H 指数の大きさの違いは、対流電場の大きさと固有磁場強度の関係に依存していると考えられる。DPS 関係式によれば、SYM-H 指数はリングカレントの総エネルギーを双極子磁場のエネルギーで規格化して求められる。Case2 では Case1 より電離圏伝導度が強く、クロスポーラーキャップポテンシャルが小さくなることで、リングカレントの総エネルギーも小さくなっている。

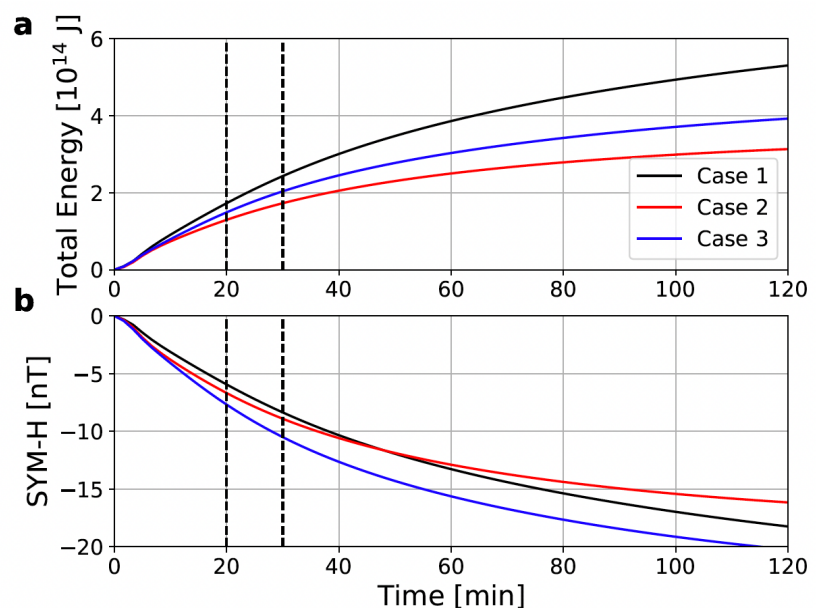


Figure 1. 各 Case について算出した(a)総エネルギーと(b) SYM-H 指数の時間変化

また、同じモデルを用いた
 先行研究 (Yamakawa et al.
 (2023))による報告と同様の、
 リングカレント粒子の波動
 粒子相互作用による ULF 波
 動の励起を各 Case で確認し
 た(Figure 2)。詳細な解析の結
 果、固有磁場が弱い Case2, 3
 では Case 1 と同じドリフト
 周波数を持つ低エネルギー
 イオンとのドリフト共鳴に
 よって ULF 波動がより地球
 に近い小さな L で駆動され
 る。また、この ULF は同は各
 Case で同様の MLT で現れる
 が、固有磁場が弱い場合に
 は、磁気嵐開始後のより早い
 時刻に現れることなどが明
 らかになった。これらの結果
 は、大学院生を主著者とした投稿論文として準備中である。

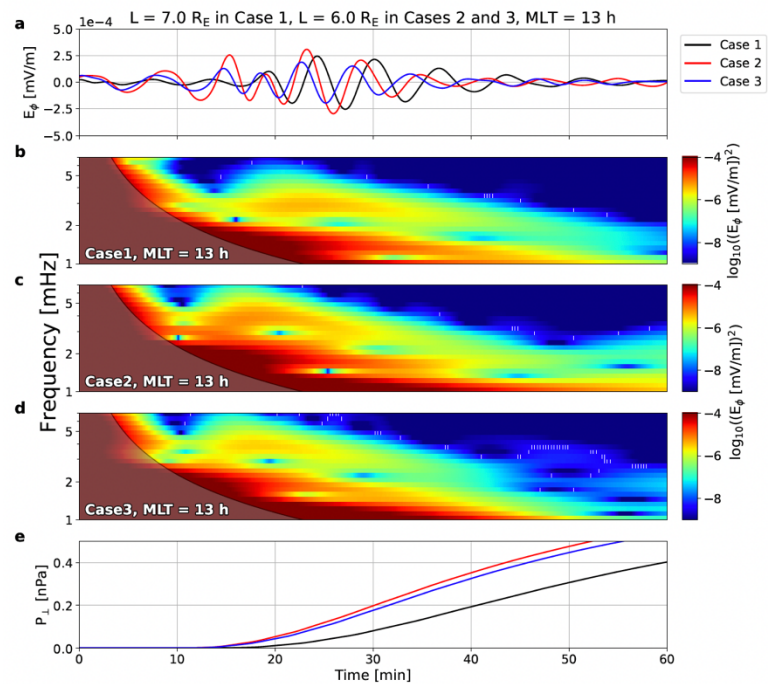


Figure 2. 各 Case での ULF 波動の比較。(a)電場の経度方向成分 E_{ϕ} と(e)磁場に垂直方向のプラズマ圧 $P_{\perp}$ の時間発展と(b) Case1, (c) Case2, (d) Case3 の各事例の wavelet パワースペクトログラムが示されている。

公表状況 (Publications) :

(論文)

該当なし

(口頭)

1. Kazuhiro Osada, K. Seki, et al., “Influence of the Weak Intrinsic Magnetic Field on the Development of Magnetic Storms Based on Global Drift-Kinetic Simulations”, 地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPs)2025秋季講演会, 査読あり, 神戸, 2025年11月

(ポスター)

1. Kazuhiro Osada, K. Seki, T. Yamakawa, K. Yamamoto, Y. Ebihara, et al., “Influence of the Weak Intrinsic Magnetic Field on the Development of Magnetic Storms Based on Global Drift-Kinetic Simulations”, AGU 2025 fall meeting, 査読あり, New Orleans (USA), 2025年12月
2. Kazuhiro Osada, K. Seki, et al., “Effects of intrinsic magnetic field strength on ring current development and associated ULF wave excitation”, 日本地球惑星科学連合2025年大会, 査読あり, 幕張, 2025年5月

受賞 (Award) :

日本地球惑星科学連合 2025 年大会 学生優秀発表賞 (長田和大)