

高解像度 MHD シミュレーションによる磁気圏散逸分布の研究

Estimation of magnetospheric dissipation through the high-resolution MHD simulation

研究代表者： 田中高史

(九州大学名誉教授)

研究目的 (Research Objective):

REPPU (REProduce Plasma Universe) コードは、レベル 6 から実用化され、現在はレベル 8 の開発が行われている。レベル 8 は解像度が高くなっているため、まずこれを IMF (Interplanetary magnetic field) が斜め北向きの時の磁気圏に適用して、この時の極めて複雑な構造を持つ磁気圏を再現し、レベル 8 が有効であることを検証したい。北向き IMF 下の対流における電離圏セルの構造として、今までにローブセル、round merging セル、夜間 (nightside) セルが検証されている。しかし電離圏セルの朝方側には、まだよく理解されていない構造も見られる (島状閉磁場領域など)。電離圏対流セルから磁場トレースを行い、磁気圏内での対流の構造を調べることが出来る。このような過程で、テイルには交差磁場が発生するのが見られる。レベル 8 での再現によって、これらのような未知の対流構造は対流セル間の相互作用として理解できることを示したい。このような構造に対しては散逸の影響も重要となるであろう。この報告では IMF By が負の場合を扱うが、正でも朝夕を入れ替えれば、同じような構造として理解できる。ここでは北半球から見た場合を記述する。

計算手法 (Computational Aspects):

REPPU コードは、太陽風の変動が地球上にどのように伝えられるかを計算するためのシミュレーションプログラムである。このため、太陽風、磁気圏、電離圏とそれらの間の相互作用を計算する。REPPU コードは北向き IMF 下で起こる様々な現象を再現するに当たっても、非常に高精度な解を再現し、問題解決に有効なことが示されている。

太陽風—磁気圏相互作用は、起源の異なるプラズマ同士の接触であり、ヌルーセパレーター構造を通して相互作用が行われる。両者の境界はセパトリックス、セパトリックスの交線はセパレーター、セパレーターの両端にヌルが発生する。この相互作用は IMF の向きに大きく依存する。太陽風—磁気圏領域は MHD (Magnetohydrodynamics) を適用する。ただし、ポテンシャル磁力線成分を除いた MHD 方程式を用いる。ここでは非 MHD 過程 (散逸) は磁気拡散で近似している。レベル 8 では数値散逸が小さくなるので、より正確な磁気拡散モデルが要求される。MHD を解くスキームは有限体積 TVD (Total variation diminishing) スキームを適用する。MHD を解く格子は、球面上に 12 面体分割三角格子を造り、これを重ね合わせて 3 次元格子としたものを用いる。12 面体の各面を 5 つの三角に分け、60 三角を作成した構造をレベル 1 とし、以後 1 つの三角を 4 つに分割してレベルを上げていく。この格子により、格子の集積点を避けつつ電離圏との結合を十分確保することが出来る。レ

ベル 8 の総格子数は 383, 387, 160、内部境界上の格子数、すなわち電離圏とカップルする格子数は、491, 522 となる。

太陽風からのエネルギー流入に伴い、磁気圏では対流が発生する。対流はエネルギーの排出過程であり、このことは、地球惑星科学で広く成り立つ原理であろう。このような対流の作用に伴って、磁気圏対流ではダイナモ、FAC（沿磁力線電流）が生成される。FAC は電離圏中の伝導電流と結びつき磁気圏—電離圏相互作用が発生する。REPPU コードの 1 2 面体分割格子はこのような過程を十分捉えるために設計されている。結果として太陽風から流入したエネルギーの一部が、電離圏にも排出されることになる。地上で観測される地磁気変動やオーロラ現象はこのエネルギーが原因である。

電離圏 (1 Re) では、磁気圏からの FAC を与え、電流 (FAC+Hall current+Pedersen current) 保存則からポテンシャルを求める。電気伝導度は、圧力、温度、FAC の関数とする。ポテンシャルは電離圏対流と等価である。良く知られているように、ポテンシャルの等高線は電離圏対流の流線と見なすことが出来る。

外部境界条件は、上流では太陽風 ($\rho=7 \text{ amu/cm}^3$ 、 $V_x=-450 \text{ km/sec}$ 、 $V_y=V_z=0.0$ 、 $T=300,000 \text{ K}$)、下流 (300 Re) では流出条件を適用する。太陽風 IMF は斜め北向き IMF を与え、 B_y は負とする ($B_x=0.0 \text{ nT}$ 、 $B_y=-2.2 \text{ nT}$ 、 $B_z=4.2 \text{ nT}$)。内部境界条件 (3 Re) は磁力線平行 $V_{\parallel}$ はノイマン条件、磁力線垂直 $V_{\perp}$ は電離圏ポテンシャルから与える。 $V_{\parallel}$ の符号によって、粒子落下もしくは極風の条件を与え、これから密度、圧力を決める。B 地表水平成分はノイマン条件、B 地表垂直成分は固定とする。1 ~ 3 Re は双極子に沿った投影で近似する。

研究成果 (Accomplishments)

これまでの研究での電離圏セルの説明は、昼側はローブセルと round-merging (interchange) セル、夜側は夜間セルでなされている。この範囲では、朝方に島状の閉磁場領域が出来ることはない。リコネクションの回数は、ローブセルは 1 回 (北カスプリコネクション)、round-merging セルは 2 回 (2 回の南北カスプリコネクション)、夜間セルは 2 回 (南カスプリコネクションとセパレーターリコネクション) である。ローブセルは開磁場だけから成り立っている。北半球の朝方カスプリコネクションで駆動されている (図 1)。Round-merging セルを構成する閉磁場対流を考察すれば、昼側の閉磁場は夕方を通り夜に移動しても朝方には達しない。ローブにある開磁場の束をよぎることはできないからである。そこで南カスプのリコネクションを経て、開磁場となって北半球朝方に移動する。こうすれば北半球の朝方カスプリコネクションで昼に戻ることが可能となる (図 1)。

Nightside セルでは、(北半球で朝方、南半球で夕方にある) 2 つの開磁場からテイルのセパレーターリコネクションで生成された (北半球で朝方、南半球で夕方を占める) 閉磁場は、電離圏の低緯度側を通れば北半球で夕方側に移動可能である。これに続いてこの閉磁場は IMF と南半球でカスプリコネクションを起こし、2 つの開磁場になりテイルに移動してサイクル始めに戻る。これでサイクルが成立する。

Nightside セルにおいて南カスプリコネクションで IMF と夜間閉磁場から生成され

た2つの開磁場のうちの北半球に繋がるものが始め（カスプリコネクションの位置）に戻らず、北カスプでさらに IMF とリコネクションを起こし detached 磁場と別の開磁場になり、この別の開磁場がセパレーターリコネクションの位置に移動すれば、これでもサイクルが確立する。この変動は nightside セルとローブセルの結合として理解される。この結合サイクルでは朝方のセルの太陽向き部分に島状閉磁場領域が発生することになる（図2）。リコネクションは3回（セパレーター、南カスプ、北カスプリコネクション）となる。

夜間閉磁場が両カスプで同時に IMF とリコネクションを起こすと交差磁場（図2）が生成できる。これは Dual リコネクションサイクルとして知られている。このサイクルではリコネクションは2回（南カスプ1回、北カスプ1回）である。しかし同時に出来る昼側閉磁場が夜間閉磁場に戻るサイクルが困難である。ここで関与する夜間閉磁場は、北半球が朝方、南半球が夕方を通る必要がある。しかし昼側の閉磁場が夕方を通して夜側に移動しても、北半球部分は依然夕方である。これは round-merging セルの場合を考察する時と同じ状況であることが分かる。

純粋な dual リコネクションサイクルは困難である。しかし、Nightside セルでセパレーターリコネクションから出来る閉磁場が IMF と dual リコネクションを起こすと、昼側閉磁場と夜側交差磁場が生成される。この閉磁場は Round merging セルと同様に夜側に移動する。移動の後は nightside セルと同様に IMF とリコネクションを起こし、2つの開磁場となる。続いて2つの開磁場はセパレーターリコネクションの位置に移動し閉磁場となり dual リコネクションに戻る。従って全体は Round-merging セル、nightside セル、dual リコネクションセルが結合したものとなる。リコネクションは4回（セパレーター、南カスプ2回、北カスプ1回）である（図3）。

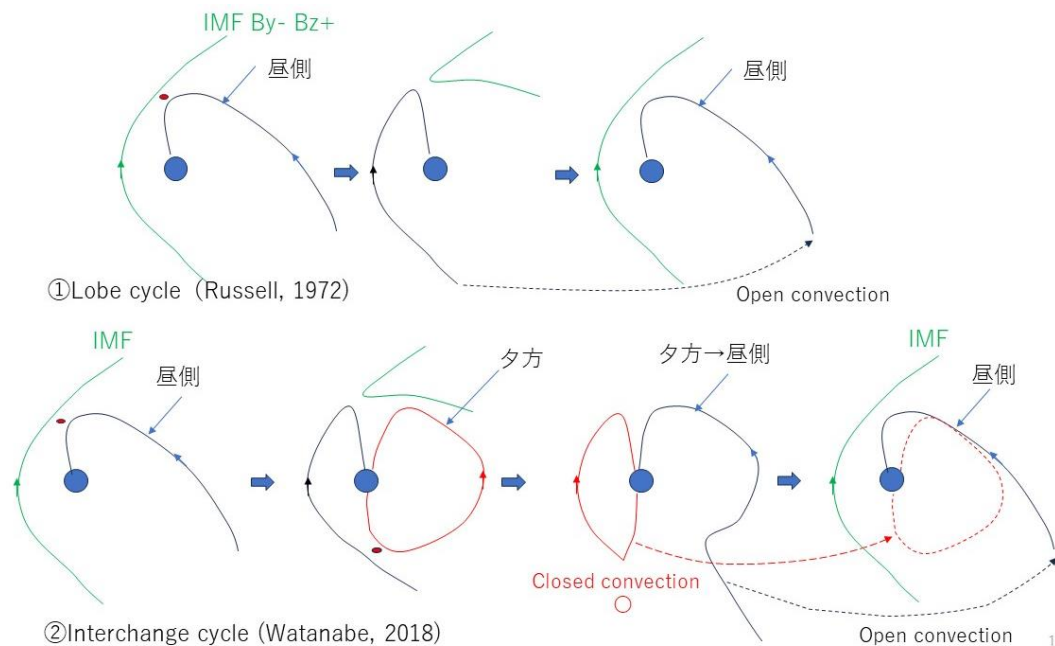


Fig.1 ローブサイクル（上）と round-merging サイクル（下）

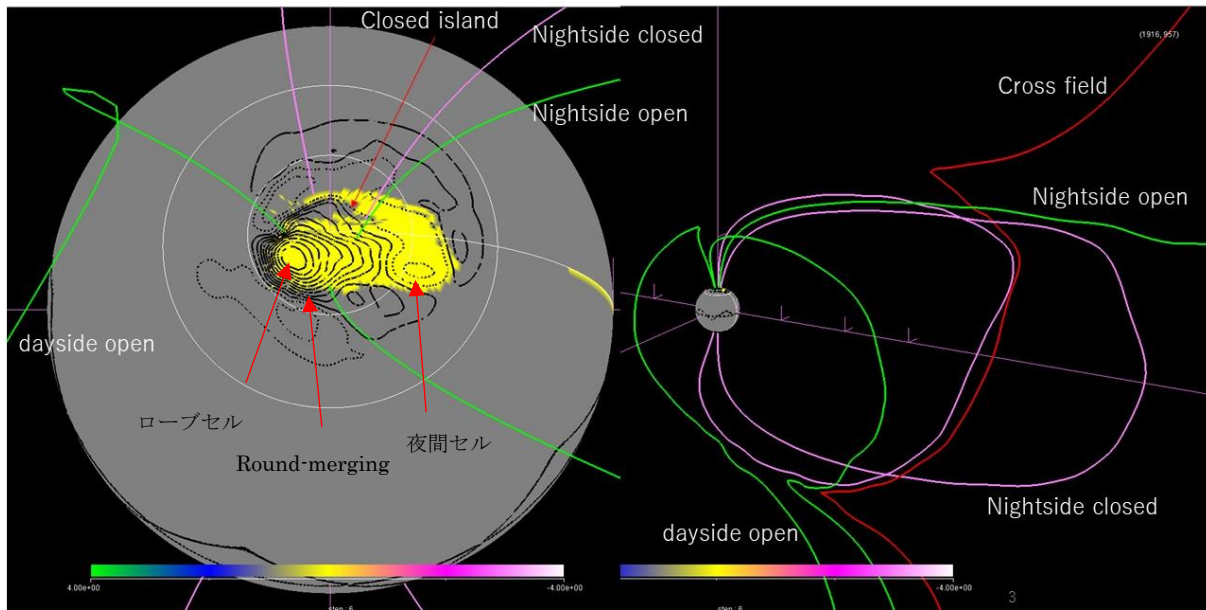


Fig. 2 電離圏対流（左）と磁気圏磁場（右）

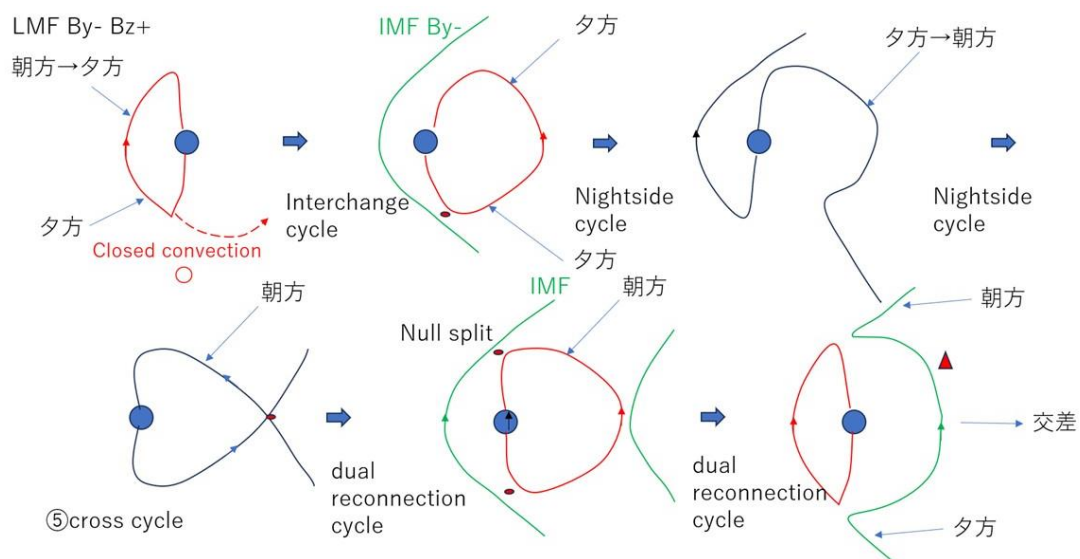


Fig. 3 交差磁場の生成機構

以上のような北向き IMF の場合の構造は、磁気圏散逸に対する依存性はそれほど severe でない。しかしながらこれを初期値として南向き IMF でサブストームを再現する場合は、そうはいかない。テイルの対流や交差磁場については、散逸の分布は重要であり、これがサブストームにも影響を与える。これは今後の課題である。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, S. Fujita, and R. Kataoka (2025). Roles of plasma sheet flow, plasma sheet dissipation and the M-I coupling in reproducing the substorm with the global simulation, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 130, e2024JA033606. <https://doi.org/10.1029/2024JA033606>