

(別紙様式 7 - 2)

## 高精度サブストームシミュレーション High-resolution substorm simulation

田中高史・九州大学・国際宇宙天気科学・教育センター  
藤田 茂・情報システム研究機構・データサイエンス共同利用基盤施設  
西谷 望・名古屋大学・宇宙地球環境研究所

### 研究目的

本研究では、グローバルシミュレーションでサブストームを再現し、その機構を明らかにすることが目的である。まず成長相では、北向きの IMF 下で出来たヌルがテイルに後退し、新たに南向き IMF に対応したヌルが昼側にでき、全体として4ヌル構造となるというモデルを考える。これまで成長相でヌルを考えるモデルは無かったが、本研究ではこの様なモデルによって得られる結果が、観測からどのように検証されるかを調べたい。成長相は磁気圏対流の進展として理解する時、これに対して、電離圏結合がどのような影響を与えるか、特に thinning の進展に与える影響を明らかにしたい。電離圏上で、成長相の現象として顕著な、quiet arc および Harang 不連続の発生を再現できるかどうか、モデルの検証に重要であろうと予想される。オンセットは、対流遷移が FAC によって電離圏へ伝達される過程であると考えられる。サブストームは、成長相から拡大相まで、広く非 MHD 現象であると認識されることが多いが、これに対してこの研究のモデルでは、他の磁気圏現象と同じ様に、サブストームでも FAC による運動の伝達がダイナミクスの主要要素であろう。散逸は拡大相の進展など、一部で必要になるが、オンセットの主役ではないと思われる。このモデルでは CW は誤りと予想される。

### 研究方法

計算に用いているのは、REPPU (REProduce Plasma Universe)コードです。このコードは格子集積点が発生しないような12面体分割格子を用いるので、解像度を上げることができます。と言っても現実には分割を上げれば定式化に乗らないような困難も発生します。現在分割回数7(レベル7)まで開発されています。今年度は、レベル7SuperFineモデルが開発されています。これはレベル7の範囲で、解像度を極限まで上げたモデルです。レベル7SFでは、太陽風-磁気圏相互作用で、FTE、KH、ヌル構造などが、これまでに無い解像度で、再現できます。プラズマシートの数値散逸を減らすことができ、オンセット後も thinning が継続し、拡大相にならない解も作れます。当然これは現実ではありませんが、数値散逸が現実より小さいことを示します。このようなモデルによって、磁場構造、対流、電離圏電流を再現する。数値解を解析し、ダイナモ、電流、FAC、シア-、O/C境界の分布を調べる。このコードは並列化されており、コア数は、千程度で計算します。計算結果の検証が重要ですが、これはなかなか難しいところです。磁気圏観測は直接的ではありませんが、全体は見えません。対流やFACの問題は、全体構造の問題であって、部分を取り出しても良く理解できません。我々は、電離圏の全体観測を検証に用いています。それは、REPPUコードでは磁気圏だけでなく、電離圏も詳細に計算できるので、可能となりま

す。磁気圏計算で見れば、他のコードも REPPU とそれほど変わりませんが、電離圏の解では、REPPU コードが格段に優れています。

## 成果発表

[1]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2021), Formation and release of the Harang reversal relating the substorm onset process, *J. Geophys. Res.*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA028170>.

この論文は、発見以来半世紀に亘って未解決であった、Harang 不連続 (HD) を解明するものです。シミュレーションでは、quiet arc の発達と共に HD が成長し、オンセットで解消される様相が再現されます。その成因は、ヌルを經由するローブ/プラズマシート境界のシアー流が、電離圏に投影されているためです。HD はプラズマシート中で、対流が偏向するのが原因とされてきましたが、この場合、HD は南北で対照になるはずですが、シミュレーションでは反対称になり、観測に一致する。

[2]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, and R. Kataoka (2021), Global simulation of the Jovian magnetosphere: Transitional structure from the Io plasma disk to the plasma sheet and electromagnetism of auroral generation, *J. Geophys. Res.*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA028897>.

この論文は、Io プラズマの輸送と木星オーロラの発生を再現するもので、JGR 誌の表紙になっています。Io プラズマ拡散における不安定の役割、オーロラ発生における共回転の役割を再現しています。

[3]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2021), Development of the substorm as a manifestation of convection transient, *JGR*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA028942>.

この論文は、FAC とシアーは一体で生成されることを示すもので、JGR 誌の表紙になっています。成長相では、quiet arc に上向き FAC が接続され、オンセットでは電離圏にオンセット FAC が接続されますが、これらは磁気圏から電離圏へのシアーの接続と同期して発生することを示しています。すなわちサブストームでは、磁気圏の対流擾乱が電離圏に投影されており、これは FAC が運動を伝達するという一般原則に沿った変動です。CW の様に、電流系の変動として一面だけを捉えるのは、間違いです。

[4]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, N. Nishitani, and R. Kataoka (2021), Roles of the M-I coupling and plasma sheet dissipation on the growth-phase thinning and subsequent transition to the onset, *JGR*, 126, <https://doi.org/10.1029/2021JA029925>

この論文は、M-I 結合によって thinning が促進され、プラズマシート散逸が拡大相を進展させることを示しています。両者が揃わないと、AU/AL は再現されません。オンセットはヌルーセパレーター構造中で起こる、2段階ガイド磁場リコネクションです。これを正確に見ないと、inside-out か outside-in かと言うような無意味な言い争いになってしまいます。またオンセット FAC は地球近傍ダイナモで生成され、CW は誤りとなります。