

# サブストームトリガー機構のトポロジー構造

Study of growth phase topology inducing the substorm onset

**研究代表者：研究代表者名** (所属をご記入ください)  
田中高史 (九州大学)  
[takashi.tanaka.084@m.kyushu-u.ac.jp](mailto:takashi.tanaka.084@m.kyushu-u.ac.jp) (令和3年度報告)

**研究分担者：研究分担者名** (所属をご記入ください)  
無し

## 研究目的 (Research Objective):

この課題では、サブストームの研究を進めてきたが、サブストームも結局は磁気圏-電離圏結合系のダイナミクスを決める一般則の延長であるとの結論に達した。したがってサブストームオンセットにだけ特別な非MHD過程が働くというのは誤りとなる。このことは、サブストームの研究は太陽風-磁気圏-電離圏結合系の一般則に帰着されなければならないということになる。

太陽風-磁気圏-電離圏結合系の研究は、2つの流れにより進んできた。一つはオーロラの観測から始まった流れであり、もう一つはホイッスラー波の発見から始まる流れである。前者は全体構造の研究として、後者はマイクロ過程の研究として発展してきている。前者については、現在では様々な衛星観測が行われ、全体系の構造が分かってきた。しかしながらダイナミクス構造は依然として不明点が多い。この点では、衛星観測は余り役に立っていない。それは磁力線、電流線、流線のトレースが困難なこと、エネルギー変換構造とヌル構造が測定できないことが原因である。この困難を解決できるのが、グローバルシミュレーションである。この様な研究の効果を以下に示したい。

## 計算手法 (Computational Aspects):

太陽風-磁気圏-電離圏結合系のシミュレーションは、REPPU(REProduce Plasma Universe)コード・レベル7 super fine モデルを用いている。このコードは12面体分割三角格子を用いるのが特徴である。REPPUモデルでは、地球周りでは球座標に近い配置、ティールでは円筒座標に近い配置で、直交条件を保ったまま、両者をスムーズにつなぐ様になっている。この格子構造によって、電離圏の解像度を上げることが出来て、各種のトレースが可能になっている。

REPPUコードによるグローバルシミュレーションの解を、全体構造を研究の開始点であるオーロラ観測、特にアークオーロラと結び付け、ダイナミクス構造に基づいたオーロラ像を得ることをめざしたい。

## 研究成果 (Accomplishments) :

オーロラには、アークオーロラと diffuse オーロラがあることは、古くから知られている。この両者の違いはどこに由来するのか？この疑問に対する答えを以下の様にした。一般に diffuse オーロラより、アークオーロラの方が明るいと思われているが、アークオーロラでも、オンセットアークの様に極めて明るいものもあれば、quiet アークや sun-aligned アークの様に、それほどでもないものもある。アークオーロラと diffuse オーロラの決定的違いは、その形状であろう。全天カメラで見たとき、アークオーロラは視野の一方の縁から反対側に掛けて、紐の様に分布する。これに対して diffuse オーロラは、視野全体に広がっている。diffuse オーロラのもう一方に特徴は脈動である。これには波動-粒子相互作用の問題であろう。したがって、マイクロ過程の研究の流れに所属するものとなる。

発生のタイミングについても、2種のオーロラには違いがある。このタイミングの違いは、2種の間に留まらず、アークの中でもタイプによって、それぞれ異なる。北向き IMF では、fan アーク、sun-aligned アークが現れ、IMFBy スイッチがあれば、テーターオーロラが現れる。サブストームに対応して、成長相では quiet アークが現れ、オンセットではオンセットアークが現れる。Diffuse オーロラは、オンセット後の拡大相で発生する。

アークオーロラとは、上向き FAC の可視化である。FAC とは磁気圏の運動を電離圏に伝える作用である。アークオーロラが発生する時は、磁気圏に何らかの運動(対流)が発生しており、これに付随してアークオーロラが発生する。アークオーロラの種類とは、対流のトポロジーの種類である。FAC の発生は、ダイナモ ( $J \cdot E < 0$ ) とシアーに対応する。すなわち、FAC に付随するポインティングフラックスはダイナモのエネルギー変換作用で発生し、FAC はシアーに沿って電離圏に接続される。アークオーロラを定義づける形状とは、シアーの形状である。

IMF 北向きの時は、2スルー2セパレーター構造になる。これに伴う対流では、還流は高緯度であり、KH の影響を受けて変動する。この還流とさらに高緯度のテイル向き流の間のシアーに伴うのが sun-aligned アークである。まだマントルにテイル向き流があるので、カスプ-マントルダイナモが形成される。IMF が真北になると、高緯度は全て還流に覆われ、テイル向き対流はマントルから LLBL に移行する。LLBL は太陽風からエネルギーが侵入する領域という解釈は誤りである。ダイナモはカスプの低緯度側に移行する。この時のシアーは、カスプから始まりテイルに向け続き、fan アークになる。IMFBy スイッチがあれば、4スルー4セパレーター構造が実現し、それぞれの半球には新旧2つのローブができ、新旧ローブの間にテーターバーが発生する。拡大しつつある新たなローブ(極冠)に開磁場を供給する対流が発生し、テーターバーとの間にシアーを作る。このシアーによって、テーターバーに沿って FAC が発生する。

IMF 南向きでは、ローブは拡大し、還流は低緯度に広がる。成長相では還流は thinning 下のプラズマシートとローブの境界を通り、昼側に向う。このローブ/プラズマシート境界のシアーに対応するのが、quiet アークである。この流れが HD を生成する。HD はプラズ

マシー中の対流偏向の投影ではない。マンツルのテイル向き流で、カスプーマンツルダイナモが発生する。オンセツトでは NENL が発生する。これによって環流はプラズマシート境界からプラズマシート中心を経由する経路に変更される。これが HD の解消に対応する。この遷移は、NENL に接続する磁力線上で、ローブからプラズマシートに侵入する流れが発生することから開始する。この流れのシアアークがオンセツトアークを作り出す。NENL からの squeezing に伴う高压域で、地球近傍ダイナモが作られ、オンセツト FAC のエネルギーが供給される。

## 公表状況 (Publications) :

### (論文)

- [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>.
- [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>.
- [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>.
- [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>