

# 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

田中高史（九州大学・名誉教授）

[takashi.tanaka.084@m.kyushu-u.ac.jp](mailto:takashi.tanaka.084@m.kyushu-u.ac.jp)

## 研究分担者：研究分担者名

無し

## 研究目的 (Research Objective):

昭和基地で、サブストームを観察した時、最も不思議に思ったのは、quiet arc であった。それは、オンセットの前に、必ず定位置にある。一般に考えられているオンセットのシーケンスは、NENL (near-earth neutral line)、フロー、CW (Current wedge) であり、この場合必ず定位置にある quiet arc は無視しても、サブストームはほとんど成立する。Quiet arc の発生理論は、オンセットと別個に考えられており、thinning 下での粒子散乱というのが有力な説のようである。quiet arc をオンセットに関連づけるには、“オンセット前でも、NENL は弱く進行している” と考えざるを得なかった。

オンセットが Quiet arc の赤道側から始まることは、サブストーム研究の初期から謎とされてきた。Quiet arc とオンセットの関係は、SuperDARN でも研究されている。オンセット点は quiet arc の分布と密接に関係することや、quiet arc にはシアアが伴うことなどが分かっている。また衛星観測では、多重 quiet arc に対する粒子降下の様相などが観測されている。これらをよく見て、その結果の合わせる必要があるであろう。しかし一般には、サブストームでは磁気圏観測衛星による研究とそれを運用する機関が主役であり、それ以外の存在は取るに足りないおまけであり、考慮する価値はないと思われているようである。

サブストームの研究では、地上観測、衛星観測のデータを用いて解析を進めるのが一般的である。これに対して私は、グローバルシミュレーションでサブストームを再現し、その解からサブストームを解明するという方法を考えた。昭和基地での観察から数えれば、この研究は40年に亘って続けたことになる。到達した結果では、サブストーム現象の原因は対流変動であり、この系で対流を電離圏に伝達するのが FAC であり、アークは quiet arc でも onset arc でも上向き FAC (field-aligned current) の可視化として理解できるというものである。この点については飯島先生の慧眼に脱帽するところである。

オンセットは対流の遷移過程である。FAC について重要な点は、これを電離圏に接続するには、電離圏に到達するシアア、すなわち電磁流体運動が必要であることである。菊池理論によれば、シアアの伝達とは電荷の伝達と等価でもある。この点は多くのサブストーム理論で見過ごされており、それゆえ間違ったサブストーム理論を信奉する羽目になっている人物が多い。

NENL は対流変動の重要要素である。しかしこれはもっと一般化され、対流形成における、ヌル点の役割として理解されなければならないことに気づいた。ヌル分布は、対流の基本構造となり、その全体変動を考えれば、なぜ北向き IMF (Inter-planetary magnetic field) で sun-aligned arc、fan arc、theta aurora が発生し、なぜ南向き IMF で Quiet arc、onset arc が発生するかも明確に理解できる。この点の詳細は以下にも述べる。

グローバルシミュレーションでは、電離圏を再現することが不可欠である。私が研究した REPPU (REProduce Plasma Universe) コードでは、(オーロラに結びつくように) 初めから電離圏の再現を組み込んで開発が進められた。その解像度は、格子構造で決まることを実感し、REPPU コードで特徴的な 1 2 面体分割三角格子を開発した。つぎにこれらをハイブリッド並列化したのが、現在の REPPU コードである。REPPU コードの適用で、今年度は、テーターオーロラの発生機構についてと、アークオーロラの発生機構についての 2 つの成果が得られた。

### 計算手法 (Computational Aspects):

REPPU コードは、ハイブリッド並列化した、高精度 M-I 結合系 MHD シミュレーションである。球面格子は 1 2 面体分割三角格子であり、始めの分割でできたもの (60 三角) をレベル 1、その後 1 つの三角を 4 つに分割したものをレベル 2 というふうに呼んでいる。3 次元格子は球を半径方向に重ね合わせる。ただし球の中心を順次ずらし、内側は球座標、反太陽方向の外側は円柱座標に漸近させる。

現在流通しているのはレベル 7 であるが、半径方向に球を増加し、中心のずらし方を最適化したレベル 7 Super fine、さらにレベル 8 が稼働している。レベル 8 では格子点は約 5 億である。これは計算に時間がかかり、次世代の高速計算機もしくは現在のトップクラス (富岳など) でないと実用化は難しいかもしれない。

M-I 結合シミュレーションでは、磁気圏変動を正確に電離圏に投影するため、磁気圏変動を内部境界まで不連続がないように接続するところが難関であるようだ。世界のシミュレーションを観察してみると、この M-I 結合の正確さが、REPPU の優位性のように感じられる。しかしこの点は論文の記述上は現れず、解

の様相から推定されるだけである。

## 研究成果 (Accomplishments) :

REPPU コードの適用で、今年度は、テーターオーロラの発生機構と、アークオーロラの発生機構についての2つの結果が得られた。

若いころにテーターオーロラを始めて (ビデオで) 見た時、世の中にこんな不思議なものがあるのかと驚愕した。これを発見した Frank という人を1回だけ見たことがあるが、世の中にこんな偉そうにした人物がいるのかと、これまた驚愕した。その威張り方は永田先生も真っ青であろう。しかしテーターオーロラがヌルの入れ替え過程の投影とは、想像だにできなかった。テーターオーロラはその奇怪さ故、極めて多くのモデルが提唱され、まさに百花繚乱である。しかし誰一人として、ヌルに結び付けた人物はいなかった。考えられたのは、カスプリコネクションの投影、プラズマシートの不安定、マグネトポーズの不安定、リターン磁場の停滞、などである。立ち止まって考察すると、これらは知られている要素の変形である。人間の思考は如何に枠内で留まるかを見ることが出来る。シミュレーションではヌルの分布が分かり、磁力線のトレースができる。今年度には、テーターオーロラはヌルの入れ替え過程であることを明確にした。なぜテーターオーロラが東西に移動するかも良く理解できた。シミュレーションは、既存の概念の具体化の範囲を超えることが出来ると感じた。

磁気圏物理学でヌルを考察することの意義を最初に唱えたのは、Dorelli et al. (2007) であろう。私はそれが実際に観測できることを示しただけである。エポック making は点から始まり、みんなの協力というような美しい世界は、その後の惰性である、というような良く言われる伝説を、実際に垣間見られた気がする。しかし実働の研究社会は、美しい世界の建前で運動しているのは、致し方ないことであろうか。

JGR のレビューワーは当然百花繚乱の一人であるはずで、対話には難航も予想されたが、意外にも“私はこれまでのテーターオーロラの理論は明確でないと思っていた”とのことであった。さて百花繚乱は今後どうなるであろうか。決定的なモデルを無視して、今後も百花繚乱を続けることも可能である。それは複合系の科学では、完全に間違いであることを証明するのもまた難しいからである。

オーロラはアークとディフューズに分類されることは古来より知られている。サブストームに関与する quiet arc とオンセットアーク、北向き IMF で観察される、sun-aligned arc、fan arc、テーターオーロラは、全てアークである。アークはそれぞれの発生条件も、明るさにも大きな幅があるが、それなのになぜ同

じアークなのか。その理由は、アークは上向き FAC の可視化ということである。今年度には、FAC とは磁気圏から電離圏への対流の伝達であり、アークの違いは、伝達する対流のトポロジーの違いの反映である、との結果を得た。

アークは上向き FAC の可視化であることは、当たり前であろうか。一般に流通している論文を読んだ感想として、たいていはアークは粒子落下、粒子加速であるという通念にこだわり、すぐには FAC とは理解しないであろうと予想していた。しかし、JGR のレビューワーの一人は、当たり前であると断言した。世界（米国）も一枚岩ではなく、多種の人種が混在しており、中には達人もいると感じた。世界から日本に伝来する際に、多数意見が平凡性のフィルターを通し、主流として再流通する仕組みがあるのかもしれない。

サブストームオンセットを特別扱いし、これぞ MHD の破れであると主張するのは、古来よりの常道である。オンセットアークは確かに異常である。これだと、CW、粒子効果など、自然に湧き出てくる。オーロラは粒子落下であり、粒子加速の結果となるのは自然である。このような既存路線ができると、それに逆行するのは極めて難しいようである。複合系では決定的な証明は難しいという困難は、この場合も当てはまる。これらに対し、グローバルシミュレーションの解では、サブストームは MHD であり、トポロジーと対流の変動である。これにより HD (Harang discontinuity) の成長と崩壊も自然に理解できる。HD もまた古来より知られていたにも関わらず、理解できなかつた問題である。MHD では、電離圏のグローバル変動、quiet arc から onset acc への移行、2段階オンセットなどを再現できるところが尤もらしい。観測がなければ、磁気圏シミュレーションは数学になるが、観測があると、複合系の科学になる。観測の全体像を見ずに、磁気圏シミュレーションの数学を研究してしまう学徒もまた多いようである。

## 公表状況 (Publications) :

### (論文)

- [1]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, S. Fujita, N. Nishitani, and R. Kataoka (2022). Interpretation of the theta aurora based on the null-separator structure, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, 2022JA030332.
- [2]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, S. Fujita, N. Nishitani, and R. Kataoka (2022). Unified theory of the arc auroras: formation mechanism of the arc auroras conforming general principles of convection and FAC generation, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, 2022JA030403.