

サブストームの研究: 第1編: 昭和基地での観察から シミュレーションの発想へ

田中高史^{1,2*}

Study of the substorm: Part 1: From the observation at Syowa Station to the motivation for simulation

Takashi Tanaka^{1,2*}

(2013年11月5日受付; 2014年4月8日受理)

Abstract: I had an opportunity to observe the auroral substorm at Syowa Station through the participation in the 24th JARE, and got a strong motivation to study the substorm. Since then, I have been trying to reproduce the substorm from the numerical simulation. My intention was to start from the reproduction of whole magnetosphere-ionosphere (M-I) system and then realize the substorm observations as parts in the reproduced whole. For this purpose, I developed the finite volume TVD scheme, magnetohydrodynamic (MHD) equations with potential field subtraction, and a triangular grid system made from a dodecahedron. These studies enabled the reproduction of the field-aligned current (FAC) and M-I coupling convection. Recently, initial intention is achieved from the high-resolution version of simulation that adopts a large-scale mpi-omp hybrid simulation. From these calculations, we can reproduce local substorm perturbations and developments of the whole system, self-consistently. Looking at these results, we can reconsider the magnetospheric physics so far believed. In the traditional magnetospheric physics, the whole is estimated from the analysis of parts. The simulation results show that many misleadings are included in the whole structure estimated from parts.

要旨: 私は第24次日本南極地域観測隊に参加し、昭和基地でのオーロラ観察から、サブストームを学んだ。以来30年、そのとき観察したサブストームのイメージを数値シミュレーションで再現する研究を続けてきた。この研究では、まずM-I (magnetosphere-ionosphere: 磁気圏 - 電離圏) 結合系全体を自己無どう着的に再現し、その部分としてサブストームの再現をめざした。はじめは観察されるサブストームの具体的な様相までは再現できなかったが、最近の高精度並列シミュレーションにより、当初の目標が達成された。これまでの磁気圏物理学の限界は、部分を見て全体を連想する点であったが、シミュレーション結果は3次元プラズマ、磁場、電流構造をすべて保持しており、それらの解析から、これまで連想していた磁気圏の全体構造と、それを反映するサブストームメカニズムのどこに誤りがあるか、わかるようになった。このためのキーワードはダイナモである。な

¹ 九州大学名誉教授。

² 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター 学術研究者。International Center for Space Weather Science and Education (ICSWSE), Kyushu University 53, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581.

* E-mail: tatanaka@serc.kyushu-u.ac.jp

お学術的な詳細は第2編に述べる。

1. 昭和基地での観察

本報告の研究は、第24次日本南極地域観測隊（^{まえ}隊長）に参加して、サブストームを観察したことに始まる。ダイナミックなサブストームの様相は、宇宙プラズマの可視化であり、それを見ればその起源を考えざるを得ない。学術的な用語としてのサブストーム（Akasofu, 1964）は、それほど簡単に説明できないが、まずは磁場の急激な変動に伴いオーロラが突然明るくなる現象と思っていただきたい。オーロラが輝く空間は高度100 km 辺りの電離圏E層と呼ばれる領域である。サブストームの研究においては、極域電離圏で観察されるこれらの現象が、さらに上空の磁気圏と呼ばれる宇宙空間で発生する磁場プラズマ構造の変化と、どう対応しているかが問題になる（Lui, 2001; Akasofu, 2004）。

サブストームを解説するため、舞台となる空間をもう少し説明する（図1）。ここでは磁気圏物理学の慣習に倣い、 X 軸は太陽向き、 Y 軸は公転と逆方向、 Z 軸は北向きとしている。太陽風は高温のコロナガスが真空に近い惑星間空間に流出しているもので、ラバーノズルで亜音速流が超音速流になると同じようなメカニズムで、超音速流となったものである（Parker, 1958）。これが地球の双極子磁場に衝突すると、太陽風はショック（バウショック）を形成して亜音速となり、高圧プラズマに変わる。この高圧プラズマが満ちた地球周りの空間を、マグネトシースと呼ぶ。マグネトシース中では、双極子磁場はすい星のような形に変形され、太陽風の圧力と双極子磁場の磁気圧が力学的なバランスの取れた形状になる（Chapman and Ferraro, 1931）。この磁場の領域を磁気圏と呼ぶ。磁気圏は磁気圧が卓越した空間で、昼側では10倍の地球半径付近まで分布する。磁気圏の内部にもプラズマ構造があり、カスプ、マントル、ローブ（磁気圏尾部低プラズマ圧領域）、プラズマシート、内部磁気圏などのサブ領域が形成されることが知られている。このうちカスプ、マントル、プラズマシートは比較的高圧のプラズマで満たされている。またサブストーム時には過渡的にプラズモイドが生成されたりする（Hones *et al.*, 1984）。図1から、このような磁気圏プラズマの分布が見て取れるが、オーロラが発生するには、このプラズマが静止しては不十分である。本研究での中心課題は、磁気圏プラズマがどのような対流運動を行うかである。

磁気圏の根元には電離圏があり、磁気圏と電離圏は磁場でつながった状態にある。電離圏は、上層大気が太陽極端紫外線と磁気圏からの降下粒子によって電離された領域で、図1で見ると、ほぼ黒い球の表面に相当する。磁気圏に比べると電離圏は小さな領域に過ぎないが、本研究ではその対流運動への力学的な寄与は磁気圏と対等であるという観点で、M-I結合系を考える。カスプは昼側地磁気緯度（電離圏） 80° に磁気圏から電離圏まで貫通するような構造を持った領域で、太陽風のプラズマとエネルギーが流入する場所である。磁気圏と電離圏の他のサブ領域同士の対応関係では、ローブには極冠（磁極の周辺の電離圏）、プラズマシー

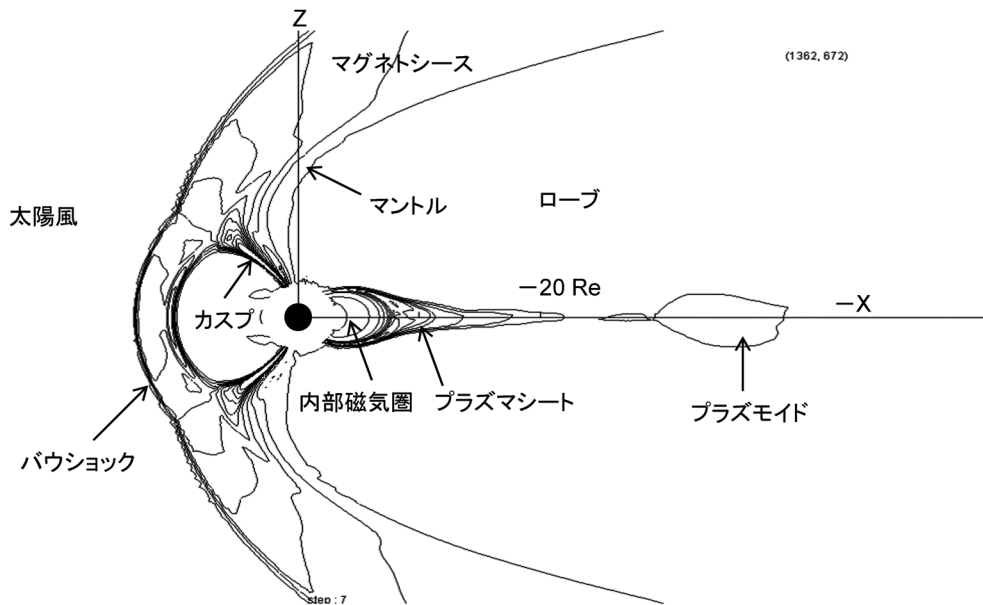


図 1 圧力分布で見た磁気圏構造の概観. この図はサブストームオンセットの前後の様相を表す. IMF の向き, 磁気圏対流の進行状態によって, 磁気圏構造は変化するが, 基本的な領域は変わらない. 等値線の間隔は 0.15 nPa. 磁気圏内部にはプラズマのサブ領域 (カスプ, マントル, ローブ, プラズマシート, プラズモイド, 内部磁気圏) があることは古くから知られおり, これらの領域間では圧力バランスが成り立っているとは考えられているが, 対流を含めた動力学的な構造と領域形成の相互関係についてはあまり認識されていない. この図に示されている圧力分布は, 磁気圏内のエネルギー変換と密接に関連しており, それは対流の励起と一体であるというのが本論文の主題である. 電離圏は, ほぼ黒い球の表面にあたる.

Fig. 1. Configuration of the magnetosphere shown by the pressure distribution. Contour interval is 0.15 nPa. A central black sphere shows the earth. Some plasma sub-structures are formed inside the magnetosphere. However, their mechanical roles in the convection are not sufficiently recognized.

トと内部磁気圏にはオーロラオーバル (極冠を取り巻く円状の領域で, オーロラが強く光る領域) がつながる. サブストームで重要な電離圏 E 層では, 電子とイオンが (中性粒子とのほどよい衝突のため) 違った動きをするので, Pedersen 電流, Hall 電流と呼ばれる散逸的な電離層電流系が形成され, 後述の FAC (field-aligned current: 沿磁力線電流) を介して磁気圏電流と結びつき, M-I 結合電流系を構成する. E 層電流は地上磁場変動を引き起こす (Kamide *et al.*, 1996). サブストームのときにオーロラが輝くのも, オーロラオーバルに沿った E 層の領域である.

昭和基地はオーロラオーバルの真下で, サブストームの観察にとっても適した位置にあり, サブストームをオーロラの活動, 磁場の変動として観察できる. サブストームを実際に見ると, 話に聞くオーロラやカメラ記録で見るオーロラと, 現場の様相とは何か異なる点があることに気づく. 現場では, 時間的, 空間的に広い範囲が一貫して見渡せるのが利点である.

それは臨場感の違いであり、自然の躍動と人間の思考本能を直結させる度合いの違いである。この違いは研究の当初ではなく、ずっと後の完成域に達したときに、よみがえるように鮮明になった。その理由は、臨場感が無意識のうちに、めざす領域の高さを上昇させているからであろう。

まず昭和基地でサブストームを観察した印象を述べる。よくサブストームのときのオーロラの変動を見て、何もかもでたらめなくらい複雑になるという人がいるが、私にはそう見えなかった。個々にはでたらめではあるが、全体を通して見れば、意外とシステマティックに推移するとの感じを受けた。まず始めに見えたのは、quiet arc（カーテン型のオーロラが輝く前から存在する、飛行機雲のような細長く薄いオーロラ）である。東京大学永田研究室のゼミで、諸先生方（小口高先生、國分征先生、平澤威男先生、金田榮祐先生など）が quiet arc について激論を交わしていたのを思い出し、このことだったのかと感激した。同時に、やはり見なければわからないと実感した。quiet arc はゆっくり静かに変動するオーロラであるが、その動きは思わせぶりで、これを見たら確かに growth phase（成長相と訳されカーテン型オーロラが光る前の準備期間と連想されている）なるものを考えたくなる（McPherron *et al.*, 1973）。quiet arc が赤道方向へ徐々に移動していく様子は、オンセット（サブストーム変動の急始）に向けてエネルギーを蓄えているように見える。この変動は、まさに永田研究室で習ったとおりであった。quiet arc の生成機構は、じつは今でも解明されていない。

サブストームでは、いろいろなオーロラの名前が出てくるが、名前は物理的なメカニズムというよりは、形状から付けられている。これは、研究がまずは観測を整理し、系統立てることから始まったからである。これらの経緯については、小口高著「オーロラの物理学入門」（名古屋大学太陽地球環境研究所）に完璧にまとめられている。各オーロラの時間的、空間的、形状的な特徴が、どのような物理メカニズム、どのような磁気圏構造に対応しているかがわかれば、サブストームの解明といえる。これまでの研究で、オーロラは大きく分けて、arc 型と diffuse 型になるとされている。arc 型には sun-aligned arc, quiet arc, discrete arc（明るいカーテン型のオーロラ）がある。このうち sun-aligned arc は IMF（interplanetary magnetic field, 太陽風中の磁場）が北向きのとき、極冠内に現れる。サブストームの基本的な原因は IMF が北向きから南向きに変わり、S-M（太陽風 - 磁気圏）相互作用が（より密に）変化することで（Fairfield and Cahill, 1966）、一般には南向きに変わってから 1 時間程度は quiet arc が観測され、その後、オンセットになるといわれている。この quiet arc が観測される期間が growth phase に対応するとされている。しかしながら、quiet arc だけで終わってしまうことや、quiet arc が延々と何時間も出ていることもある。地上から見ていると、quiet arc に続いて、しかし偶発的に discrete arc が発生するように見えるが、その発生は急激で、これをオンセットと呼ぶ。オンセットでは同時に電離圏電流系、特にオーロラジェット電流が発達する（Kamide *et al.*, 1996）。これに対応して、FAC で繋がっている磁気圏のどこかでも、電流が増

加しているはずである。オンセット後には diffuse aurora（全天を覆いつくす薄く広がるオーロラ）が現れる。それが明滅するものを pulsating aurora と呼ぶ。以上のようなオーロラの出現は、個々のサブストームを見れば必ずしもそのようにはなっていないが、多くの観察を総集するとそう見えるというものである。この個々と総集の違いは、磁気圏物理学の困難の一角をなすものである。

2. サブストームに対応する磁気圏過程の推定

NENL（near earth neutral line、夜側磁気圏 $X = -20 Re$ 辺りで発生する近尾部中性線）はサブストームを理解しようとして磁気圏尾部に当てはめられた物理過程で、サブストームを説明するモデルの一例となっている（Baker *et al.*, 1996）。それは、物理的には磁場の繋ぎ換えの過程である。この理解は、一般的な磁気圏物理学の出発点をなす Dungey 対流（Dungey, 1961）の、自然な延長にも見える（図 2）。Dungey 対流の解釈では、IMF が南を向くと、昼側リコネクションが活発となり、それによって開磁場（一方の端が太陽風に、もう一方の端が地球に接続された磁場）が生成され、その開磁場の磁気張力が磁気圏内に及ぶことによって対流が強化されることとなる。図 2 を見ると、開磁場が磁気圏内部のプラズマを引っ張っているように描かれているのがわかると思う。この構造を力学的に理解し直すとどうなるかは、第 2 編でさらに詳しく述べるが、現在普及している磁気圏物理学は、この図 2 を出発点としている。例として、國分征著「太陽地球系物理学」（名古屋大学出版会）があげられる。

Dungey 対流では還流がなければ、開磁場はロープにたまることになる。夜側リコネクションは還流を生成する磁気張力の発生過程と理解される。growth phase では夜側リコネクションは遠尾部で起こり、その結果還流はまだ少なく、これが（特殊な物理過程の発動の結果であろう）NENL の形成で急増するとオンセットになると理解される。このオンセットモデルをもう少し正確に解説すると、還流の急増を促す NENL は $X = -20 Re$ 辺りで起き、そこからの流れがオンセット領域である $X = -8 Re$ 辺りに到達すると discrete arc が発生する、ということになる。この場合は流れの影響で $X = -8 Re$ 辺りの磁気圏構造が変わると想定されているので、電離圏電流の増加に接続される磁気圏電流の変動は、慣性電流（プラズマの減速に伴う電流）ということになる。このような予測が、後述のシミュレーションの結果として再現されるかどうか本報告の主題である。結論を先に述べれば、再現はされない。シミュレーションでは、FAC に呼応する磁気圏電流は、すべてプラズマ圧力の増加に対応する磁化電流（この論文では grad P current の意味で用いる）という結論に至り、普及モデルとは異なる結果となる。オンセットで静止軌道にプラズマが注入される（インジェクション）という観測は、流れが $X = -8 Re$ 辺りに到達することに対応するように思われるが、シミュレーションの結果では、インジェクションは磁気張力によって発生する。プラズマシートのプラズマは基本的に磁気張力との釣り合いで閉じ込められているのであり、主要構造の変動は、

この釣り合い状態の変更でもあるはずである。これらは、図2から推定された全体と、再現された全体の違いの例である。この不一致の原因は、図2を出発点にすること自体がすでに誤りであるということで、その理由を明確にするのが第2編の主題である。

上述の推定モデルでは、quiet arc の成因はあまり考えられていないようである。quiet arc は薄いオーロラだからさして重要でないという人もいる。しかし、もしオンセットが夜側リコネクションの波及なら、quiet arc からオンセット前にもリコネクションがチョロチョロ起こっているということになるので、物理機構上はこれらの関連は重要である。リコネクションのようにあるキーププロセスを持ってサブストームを理解しようとするのが、伝統的な磁気圏物理学で、部分を解析して全体を連想する典型的例である。磁気圏対流は電離圏にも伝えられ、電離圏対流が発生する（図2）。

これも後述の研究の結果であるが、シミュレーションから定量的に調べると、じつは S-M 相互作用では、開磁場の磁気張力は弱く、かつそれが及ぶのは磁気圏の皮の部分（マグネトポーズの表面近く）だけである。そして皮と唯一繋がっているのがカスプである。マグネトシース中ではプラズマのエネルギーが圧倒的で、対流は侵入したプラズマのエネルギーによって引き起こされる。侵入したプラズマはそれ自体運動エネルギーを持っており、またカスプ近辺に大きな $\text{grad } P$ （圧力傾度）を生成し、対流運動を励起する。開磁場の生成は、このプラズマが地球磁気圏の中（主にカスプ）に侵入する過程として重要である。

quiet arc からオンセットに至る様相を実際に見ていると、前述のような Dungey 対流と NENL によるサブストーム発生は、最も直線的に理解したいがための急ぎすぎた推論のように見える。この辺が臨場感の違いであろう。オンセットは明るいカーテン型オーロラすなわち discrete arc によって特徴づけられ、その躍動する姿は感動的である。しかし discrete arc は何もないところに急に輝くわけではない。何本かある既存の quiet arc の、最も赤道側から開始する。驚いたことに、discrete arc は非定常現象で、磁場水平成分が減少しつつあるとき（上空の西向きの電流が増えるとき）に短期間発生するだけで、じっと上空に留まって、サブストーム（拡大相）の最中にずっと光り続けることはなかった。磁場水平成分が底をついている最中、すなわち電流がたくさん流れているときは、diffuse aurora が主役である。この discrete arc の非定常性（動き）もずっと気になっている部分である。このような経過はもっと複合された力学構造を連想させる。実際、シミュレーションによる研究が進めば進むほど、その結果は NENL からの流れとオンセットの単純な対応による理解から遠のいていった。diffuse aurora をよく見ると、パッチ状の明滅が含まれている。これが、小口高先生が熱っぽく語っていた pulsating aurora だと気づき、先生がなぜあのような研究に没頭されたかがわかった。昭和基地で冬の間サブストームを観察した後、夏になって平澤威男先生が第25次隊長として昭和基地にやってこられた（なんと永田武先生もやってこられた）。両先生からサブストームについて多くのご意見を拝聴し、問題点の認識を深めることができた。

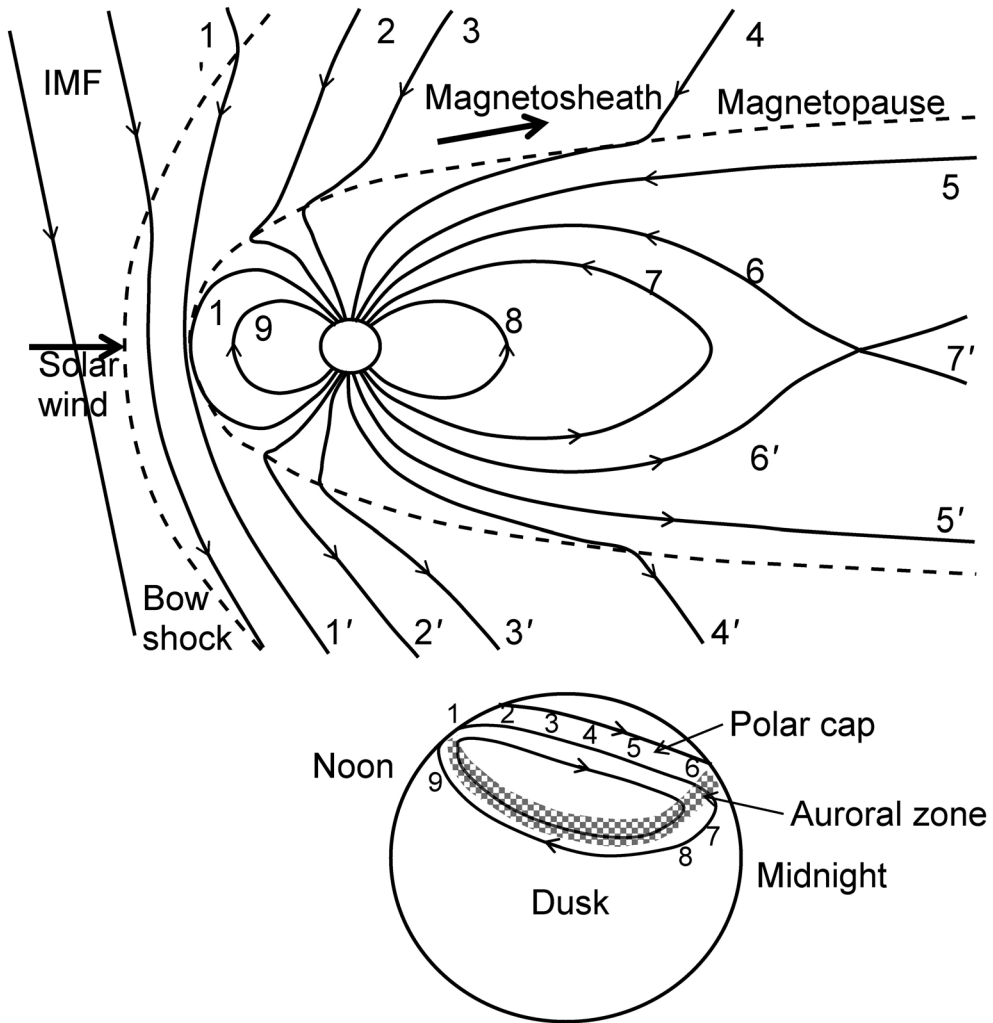


図 2 リコネクションと Dungey 対流. この図は IMF が南向きを想定している. 数字は磁力線が対流に運ばれていく順序で, 対流は電離圏にも伝えられる. この電離圏の対流は, その形状から 2 セル対流と呼ばれる. この図で, growth phase では夜側リコネクションは遠方にあるが, 新たに $X = -20 R_e$ にも形成されるとオンセットになると考えるのが, NENL モデルと呼ばれるサブストームモデルである. Dungey 対流はよく参照されるモデルではあるが, 開磁場の張力を過大に捉えており, 力学的には正しくないと思われる.

Fig. 2. Dungey model for M-I convection, showing the concept of open magnetosphere. It is not necessarily a correct mechanical structure.

3. M-I 結合シミュレーションと対流

サブストームが解明されたといえるためには, 電離圏で観測される各変動に対して, 磁気圏のどのような変動が起因しているかを対応付けなければならない. 通常サブストームの研

究は、観測を分析し、各部分を明らかにし、全体を推定していくというやり方である。しかしながら M-I システムは広大であり、キーとなる磁力線や電流線を実際にトレースすることはできない。磁気圏の全体は基本的に見えないものであり、全体構造を自己無どう着的に確定することは困難である。そこで私は、逆の手順をめざした。すなわち、まず全体を作り、その中の部分を取り出して観測と対応させるという研究方法である。全体を作るのは数値シミュレーションでのみ可能である。そこで、まずシミュレーションスキームの研究から出発した。しかし、その後 30 年にわたってこの研究を続ける羽目になり、いまだに完成には至っていない。それでも、最近になってようやく当初の構想が多少実現できた。

シミュレーションは基礎方程式から出発する。M-I 結合系の場合は電磁流体 (MHD: magnetohydrodynamics) 方程式である。これは双曲型方程式の一種で、古来より解析学で研究されてきたものである。一般的にこれらを含む偏微分方程式系の性質は、解析学からよく知られており、またそれらの研究は、変数分離、特殊関数、固有値、フーリエ変換などの、研究に携わる者が必ず身に付けなくてはならない基礎常識の体系と一体であることは、周知のとおりである。したがって、シミュレーションは数学的には解析学を超えるものではないが、決定的な違いは、シミュレーションは任意の形を扱うことである。部分から全体を連想する磁気圏物理学では、形を考慮するところが抜けてしまうのである。全体を再現する磁気圏物理学では、形を再現することが必須である。物理過程は同じでも、形によって見え方が違ってしまうのが、磁気圏物理学の困難である。これがシミュレーションでなくてはならない理由である。

研究は始めに有限体積 TVD (total variation diminishing) スキーム (双曲型方程式の特性曲線の性質を応用した計算法) による 3 次元 MHD シミュレーションをめざした。ここで特徴的なことは、始めから磁気圏と電離圏に同等数の格子を配置したことである。5 年程度を要して、磁気圏の全体像と磁気圏から電離圏へ流れる FAC を再現できるようになった (Tanaka, 1995)。その結果、有限体積 TVD スキームは、それまでのスキームをはるかにしのぐ安定性と解像度を与えることがわかった。しかしこのような段階では、観測と対応させることができるほど、部分に対する解像度は実現されなかった。それでもグローバルな電流線のトレースに成功し、それから FAC の生成と対流駆動との関連性がわかり、磁気圏物理学における対流の意義に対する認識が変わった。FAC の再現が可能になったのは、格子構造とポテンシャル磁場除去型 MHD 方程式の研究の結果である (Tanaka, 1994)。実際に FAC をトレースしてみると、今までの図 2 を基にした磁気圏物理学で推定された全体には誤りが多く、しかも全体が見えないということは、誤りを訂正する能力もないということがわかってきた。

FAC は region 1, region 2, NBZ に分類され (Iijima and Potemra, 1976; Iijima *et al.*, 1984), それぞれが特有のグローバル構造を形成しているというのは、飯島健先生の大業績であるが (図 3 は観測を総集した FAC モデル)、対流の研究においては、Dungey 対流でなく、この

Iijima 電流を出発点とするべきであるという道筋が浮かび上がってきた。電離圏は散逸領域であるので、対流（電場）が存在するということは、FAC によって常にエネルギーが電離圏に供給されているということである。そのためには磁気圏にダイナモが必要である。この様に、ダイナモとそれを駆動するエネルギー変換を主幹に据えたことが、私がおの後の研究を進展させることができた原動力になった。対流と FAC は同じ物理過程を別の面から見たものであるというのは、飯島健先生から習ったことであるが、数値解を解析して、先生が何をお考えになっていたかが、よくわかった。このダイナモの重要性については、前述の小口高先生の本でも中心的な問題として取り上げられている。また NENL からサブストームを理解しようすると、FAC とダイナモが抜けてしまうのが、致命的欠陥となるように見受

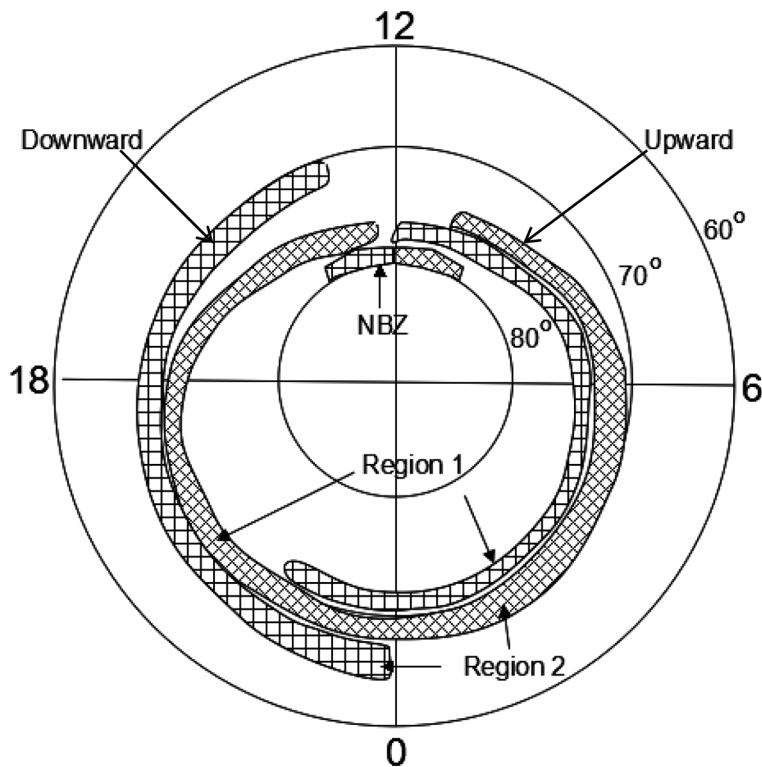


図 3 電離圏高度における FAC の平均的構造. region 1, region 2, NBZ の 3 種類からなる. FAC の整然としたグローバル構造は、FAC が磁気圏から電離圏へと、対流に伴うストレスを伝達する存在であることの反映である。しかし Dungey 対流に過度に依存する一般の磁気圏物理学では、対流と FAC を結びつけようとする機運は希薄である。その結果、物理学の根底であるエネルギー変換過程の理解があいまいになる。FAC の 3 次元構造（磁気圏への接続構造）は十分解明されていない。これらの FAC に付随するダイナモとシアアを明確にするというのが、本研究の方向づけとなっている。

Fig. 3. Iijima model of the FAC system. FAC distribution exhibits a definite global structure, indicating its central role as the driver of convection system.

けられる。FAC の中でも region 1 FAC の起源は磁気圏物理学の核心であり、同時に磁気圏物理学最大の不明朗問題である。私の磁気圏物理学が他と決定的に異なる点は、region 1 FAC の起源は（サブストームの場合を含めて）必ずカスプ-マントルであり、そのダイナモは内部エネルギーで駆動されるという構造で、これによって M-I システムと対流が力学的に矛盾なく理解できるという結論は、当初の FAC の研究から最近のサブストームの研究に至るまで、一貫して変わっていない。これに対して、region 2 FAC のダイナモは、プラズマシートにある。対流は開磁場の磁気張力によって駆動されるというのが誤りであるように、対流は電場で駆動されるというのも誤りである。電場は対流と等価なだけであり、そこに原因・結果の関係があると思うと、研究はそこで行き止まりになる。磁気圏物理学の多くの研究が、この行き止まりで吹き溜まっているように見受けられる。

4. 様々な条件下での対流

サブストームを再現するとき、計算の初期条件は当然北向き IMF のときの静穏磁気圏である。そこでまず北向き IMF のときの磁気圏を作った (Tanaka, 1999)。これは簡単に済むと思っていたが、実際にやってみると、北向き IMF の磁気圏は、南向き IMF の磁気圏よりはるかに複雑である。よく用いられている北向き IMF のときの遠尾部中性線概念は、簡便理解に過ぎないことがわかった。一方、少数ではあるが、ヌル-セパレータ構造を研究している人達がいて (Crooker, 1979)、こちらの考察はシミュレーション結果と一致することもわかった (図 4)。ヌル-セパレータ構造は一様な IMF と双極子磁場を重ねただけでできる簡単な構造であるが、3 次元トポロジーへの入り口となり、奥の深い問題である。Dungey 対流とリコネクションは 2 次元構造であり、これでサブストームが理解できれば、それはよほどの幸運のなせるところであろう。3 次元描画を行うと、無数にある磁力線の内側で磁気圏の形を決めているのは、極少数のヌル点を通る磁力線であることがわかる (図 4)。これはとても不思議なことである。多数が正しいとは限らないのが研究であるとよくいわれるが、まさにそのとおりである。北向き IMF の磁気圏の全貌は、現在でも解明されていない。さらにこの複雑構造は、テーターオーロラ (衛星から見ると極域全体でギリシャ文字のテーター (θ) のような形を示すオーロラ) の生成と大きく関わっていることも判明した (Tanaka *et al.*, 2004)。初めて衛星でテーターオーロラが観測されたとき、世の中にこんな不思議なものがあったてよいのか、と衝撃を感じた (Frank *et al.*, 1982)。しかし、IMF B_y (東西成分) がスイッチするという条件を与えて、シミュレーションでそれを再現してみると、それは磁気圏対流という基本原理の上に自然に出現した、氷山の一角であることがわかる (Tanaka *et al.*, 2004)。このように、IMF B_z のみでなく、IMF B_y もまた M-I 対流に大きな影響を与える。IMF B_y は 2 セル対流の朝夕非対称化を生むが、Hall 電流もまた非対称化を発生させるので、非対称であるからといって、すべて IMF B_y の影響と思うのも正しくない (Tanaka, 2001)。こ

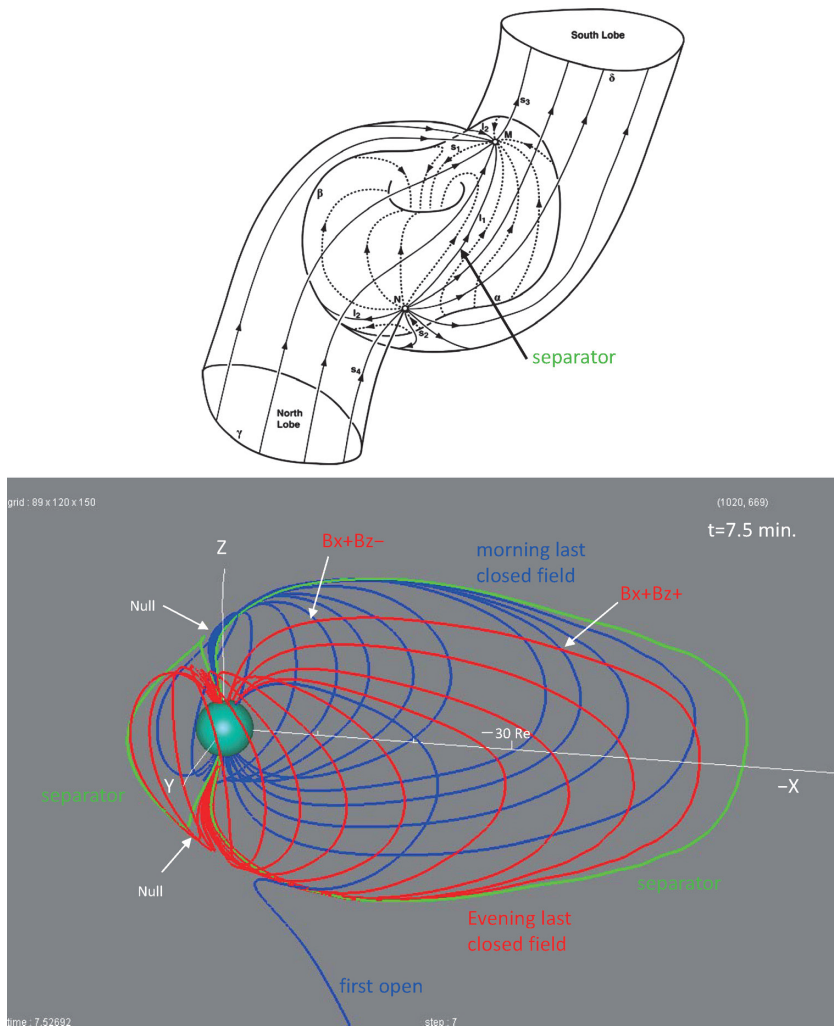


図 4 斜め北向き IMF と双極子磁場からできるヌル-セパレータ構造。真空場の重ね合わせモデル(上)と、シミュレーションによって再現されたもの(下)。二つのヌル点, 2本のセパレータライン(下の図では緑線)が形成される。セパレータラインは両方のヌルを通り, ヌル-ヌルラインとなっている。磁場には IMF, 開磁場, 閉磁場の3種類があり, それらの境界面(セパトロリックス)が2種類ある(上図)。セパレータラインは2種類の面の交線でもある。不思議なことに夕方の最も外側の閉磁場(赤)は, すべて南のヌル点に集まり, 朝方のそれら(青)は, すべて北のヌル点に集まる。これは真空場の重ね合わせモデルでも, シミュレーションでも同じように描かれる。ただし上図(渡辺, 私信)と下図では IMF B_y が逆なので, 東西(朝夕)が逆になっている。

Fig. 4. Null-separator structure generated from the superposition of dipole field and uniform northward IMF (upper) (M. Watanabe, private communication) and the corresponding structure obtained from the simulation (lower). A green sphere is at 3 Re. In the simulation result, last-closed field lines in the evening (red) concentrate to the southern cusp, and last-closed field lines in the morning (blue) concentrate to the northern cusp.

のような非対称化の問題もシミュレーションでないと正確な議論はできない。これらの結果を得た計算は、第1世代のシミュレーションといえる。このスキームではサブストームの観測をはっきり再現するのはまだ無理であった。それでもチラッとサブストームの影が見えた。そして、そこにサブストームの不連続性（オンセット）と位相空間状態遷移が結びつくような感触を得た（Tanaka, 2000）。しかしながらそれを確かなものにするため、さらに10年の歳月を要した。第1世代のシミュレーションは、惑星シミュレーション（Tanaka and Murawski, 1997）、太陽圏シミュレーション（Tanaka and Washimi, 1999）、超新星シミュレーション（Tanaka and Washimi, 2002）にも応用された。これら様々な条件を計算することは、シミュレーションの改良に大変役立った。

解像度をさらに上げるには、格子構造を密にしなければならないが、そのためには、格子を電離圏で密に、磁気圏で疎に作れること、格子に特異点・集積点・継ぎ目がないことが必要である。これを実現するために、12面体分割三角格子なるものを考案した（図5）。その結果、数値計算にまつわる負圧の発生、CFL数（計算の安定性条件）のばらつきなどのトラブルを大幅に軽減でき、計算の精度も改善された。これらを通じ、シミュレーションは格子構造の作り方がキーであることに気づいた。これらは第2世代のシミュレーションである。このスキームは太陽-太陽風シミュレーション、惑星シミュレーション、テスト粒子シミュレーションなどにも応用された。ここに至って到達した結論は、あくまで3次元空間の解像度を追及し、対流とFACを詳細に再現するという方針である。また不安定、リコネクション、異常抵抗などの部分構造ではサブストームは理解できないであろうという予想である。

5. サブストームの並列シミュレーション

最近、超並列計算機が主流となる時代が到来し、計算能力は大幅に向上してきている。これに対応するため、第3世代のシミュレーション開発をめざし、12面体分割格子を mpi-omp ハイブリッドシミュレーションに適合させる研究を進めた。この計算方式では、計算速度、解像度が大幅に向上するが、プログラムの複雑性が代償となる。そのため部分試験機能を備えたシステムを整備し、段階を踏んで、組織的にプログラミングを進める必要がある。ハイブリッド化には3年を要したが、最近ようやく全体が動くようになった。現在の計算速度は500 CPUで、500 Gflopsが達成されている。この第3世代のシミュレーションによって算出された結果を見れば、現在この数値システムに対抗できるシミュレーションは、世界のどこにも存在しないであろうことがわかる。このシミュレーションでは、計算された全体の中の部分に、サブストームの姿が見えるようになった。growth phaseでのオーバルの拡大と quiet arc、オンセットの重要な様相であるオーロラオーバルの赤道側から開始するオーロラ、オンセットの上向き FAC、WTS（westward traveling surge）、オンセットとともに開始する Pi2（地球磁場の不規則振動）と positive bay（中低緯度の磁場変動に現れる H 成分の増加）、

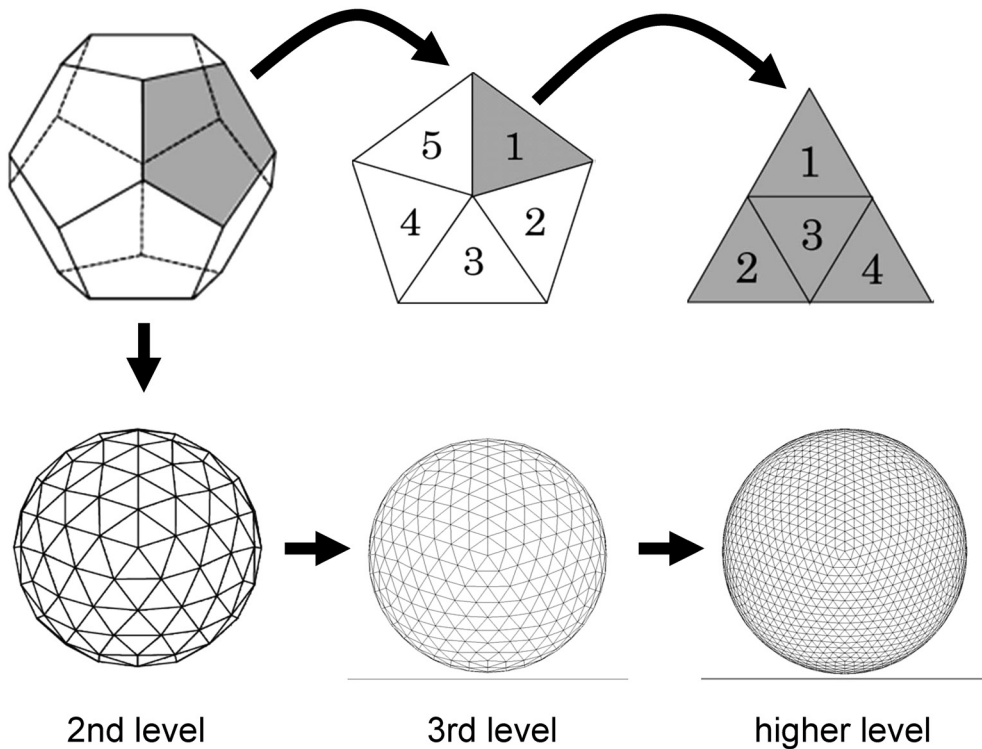


図 5 12 面体分割による三角格子の生成 (2 次元球面). 3 次元格子は, 同じような球面格子を高き方向に積み上げて作成する. 作成される 3 次元格子には特異点がなく, 格子数を増やしても, 計算の困難が発生しない. 最新のシミュレーションモデルでは, 12 個の 5 角形領域に加え高さ方向を 5 分割し, 計 60 ブロックとし (一例), 各ブロックを MPI 並列, ブロック内の高さ方向を OMP 並列とした, ハイブリッド並列計算をするようになっている.

Fig. 5. A spherical triangular grid system made from a dodecahedron. It has no singular point. A 3D grid is constructed by stacking spheres in altitude.

ダブルオーバル (サブストームの回復時に, 全球的にオーロラが 2 重輪に分布する) などが, 全体を再現した中の部分として現れるようになった (Tanaka *et al.*, 2010). これらはいずれもサブストームの核心を構成する変動であり, これらが数値解として再現されたということは, サブストームの全体像を得たことに等しいといえる.

赤道側から開始するオンセットをもう少し詳しく解説する. 電離層ではオンセットのときに, オーロラがまず始めに真夜中付近で光るが, それはオーバルの赤道側の一点から始まる (Rostoker *et al.*, 1980). このことから単純に連想する (単純に磁気圏に投影して考える) と, サブストームは静止軌道付近から始まり, 磁気圏尾部に広がっていくと思うのが自然である. したがってサブストームオンセットは内部磁気圏の自発的不安定 (電流切断) であり (Lui, 1996), 夜側リコネクションの波及ではないことになる (しかし, この結果もシミュレーショ

ンによって肯定されない)。磁気圏ではサブストーム変動はどのような順序で波及していくかは、全体構造がわかっていて初めて推定が可能である。3次元構造は意外と複雑で、単純な推定は要注意である。WTSは真夜中付近で発生したオーロラが、夕方方向に拡大していく構造である。オンセットではオーバルの赤道側でオーロラが開始するが、5分ほど後にはそれはオーバルの極側に達し、極冠の中に張り出すようにして夕方方向に広がっていく。このときWTSの先頭に上向きFACが集中するように流れる。第3世代のシミュレーションでは、これらの構造がすべて再現される。

観測が再現されたということは、計算に信頼性があるということである。重要なことは、計算結果は再現された部分だけでなく、すべての3次元構造を数値データとして保持しているということである。たとえば、quiet arcのFACは磁気圏のどこから流れてくるか、そのダイナモは磁気圏のどこにあるかが調べられる。そしてサブストーム最大の問題点、オンセット上向き電流の起源（ダイナモ）も、シミュレーションから解明される。quiet arc、オンセットarc、WTSヘッ드의FACを作り出すダイナモがどこにあって、電流がどのような経路をとって電離圏に達するかは、サブストームの核心であろう。シミュレーションの結果では、Dungey対流とNENLから予想されるような力バランスと電流は再現されず、これらのモデルは検証されない。これらは第2編の中心課題となる。電流系のトレースは観測からは解明できないが、シミュレーションはトレースを可能にし、エネルギーの流れを明らかにする。ここに至って磁気圏物理学は、部分から全体を推定する科学から、基礎法則に従って自己無どう着構造を決定する科学に、転換されることになる。

6. 対流とオンセットの力学

なぜサブストームではオンセットという不連続性が発現するかという、サブストーム最大の問題であるが、詳細は第2編で述べることにして、ここでは概略を説明する。オンセットの原因はプラズマシートの力バランスとその発展を調べるとわかる (Tanaka *et al.*, 2010)。これはシミュレーションの解によって可能になる。プラズマシートにプラズマが保持されているということは、磁場の力がプラズマの力と釣り合う状態が実現されているということである。核融合で出てくるプラズマの閉じ込めと同じである。Z方向では、よく知られているように、ローブの磁気圧とプラズマシートのプラズマ圧の均衡が成り立つ。growth phaseではプラズマシート全域で、X方向には磁気張力と圧力の静的力バランスが成り立ち、静止軌道以遠のプラズマ圧はX方向に単調増加している。これがよく知られているプラズマシートの基本的構造である。両端を考えなければ、力バランスはこれで済むかもしれない。しかし現実には、プラズマシートは地球側で双極子磁場と接続されなければならない。この接続過程には、region 2 FAC、ダイナモ、エネルギー変換、対流に関わる力学を考察することが必要になる (Tanaka, 2007)。すなわち、これまでの磁気圏物理学で独立事象であるとされて

きた対流とプラズマ領域の形成は、じつは表裏一体の結合した現象であることとなる。この結果、対流のない完全に静止した磁気圏では、プラズマシートは形成されないことになる。これらについての力学過程は、第2編でその詳細を述べる。

growth phase ではプラズマシート全体で上記の静的力バランスが卓越するが、region 2 FAC はまだ弱く、流れは遅く滞留した状態である。これに対し、ローブと極冠の間及び内部磁気圏とオーロラオーバルの間では M-I 結合対流は活発化し、プラズマシートだけが M-I 結合対流から（完全にではないが一部）取り残されることになる。このためプラズマシートから磁場とプラズマが運び出され、thinning (growth phase の期間にプラズマシートが薄くなっていく現象) が進行する (Hones *et al.*, 1984)。大局的には、この滞留を解消するのがオンセットである。

オンセットでは、内部磁気圏（環電流領域）では強化された静的力バランス、中尾部では動的力バランス（磁気張力と加速度のバランス）の二極に分離する。動的力バランスは BBF (bursty bulk flow, プラズマシートの $X = -20 \sim -10 R_E$ の領域に現れる突発的な慣性流) を励起し、滞留を解消する (Angelopoulos *et al.*, 1992)。一方、強化された静的力バランスは、内部磁気圏の圧力領域の形成であり、これはプラズマシートのプラズマを内部磁気圏に注入するように見える（インジェクション）。この変動で内部磁気圏に形成される電流系は、最も単純でよく知られている部分環電流である (Vasyliunas, 1970)。部分環電流によって region 2 FAC は激増し、この region 2 FAC が電離圏でカスプ-マントルからの region 1 FAC と結合して、サブストーム電流系を形成する。region 1 FAC に比べて、region 2 FAC は K_p （磁気活動度）に依存する変動が大きいというのは、飯島健先生が最初から出された観測結果である。上記のモデルにより、その理由がよく理解できる。非対称環電流は図6に示す。

オンセットの不連続性は、力バランスの変更と部分環電流の形成プロセスが、位相空間状態遷移であるということに因る。サブストームオンセットは、プラズマシートに内部エネルギーで駆動される region 2 FAC のダイナモが形成されることに対応する。注入されたプラズマは、このダイナモのエネルギー源になる。region 1 FAC のダイナモは、オンセット後もカスプ-マントルにある。電離圏 E 層の電気伝導度上昇に対応して、region 1 FAC も増加するが、これは一般的によくいわれる region 1 FAC は定電圧源である、という性質に相当する。サブストームにはダイナモがなくてはならないというのは、赤祖父俊一先生の言であるが、これらの解を見るとまさにそのとおりになっている。シミュレーション結果の示すところでは、サブストームの region 1 FAC、region 2 FAC はともにプラズマの内部エネルギーで励起されることになる。一般的にも M-I 結合系では、ほとんどの場合ダイナモの駆動エネルギーは内部エネルギーであり、運動エネルギー（フローブレーキング）がダイナモを駆動することはほとんどない (Tanaka, 2007)。

FAC が電離圏に接続される所には $\text{div} \mathbf{E}$ があるはずで、MHD ではそれはシア運動 ($\text{rot} \mathbf{V}$)

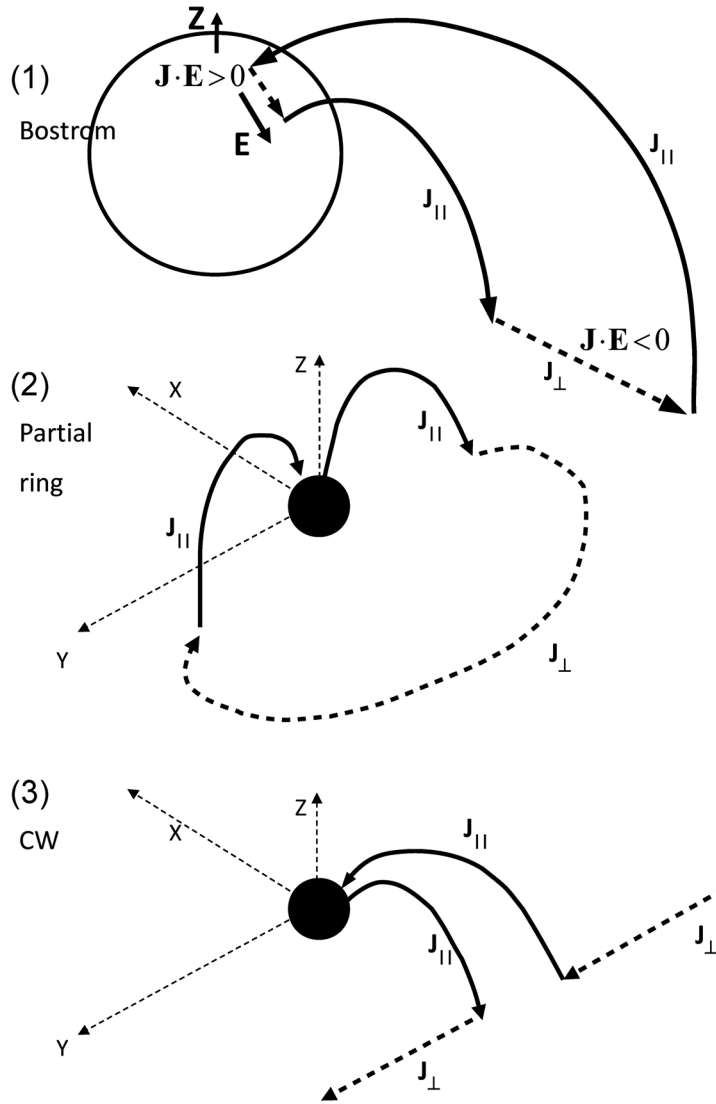


図 6 磁気圏物理学でポピュラーな各種の M-I 電流系. (1) は Bostrom type 2 電流, (2) は部分環電流, (3) は CW. 線画であるので $\text{div} \mathbf{J} = 0$ の条件だけは満たしている. しかしこれらが力学的に可能であるには, 力のバランス, 電離圏にエネルギーを供給するダイナモ, FAC を電離圏に接続するためのシアが揃っていることが必須である. シミュレーションでは, これらの条件を備えないものは再現できない. しかし線画では, これらの条件は必ずしもすべて考えられていないので, 線画の中には実在しないものもあり得る. この実在性があいまいなまま, 現象論だけを積み上げてきたのが, 現在の磁気圏物理学の限界となっている. 図 6 のうち, 現在のところシミュレーションで再現されているものは, 部分環電流のみである.

Fig. 6. Typical M-I current circuits appearing in the traditional magnetospheric physics. (1) Bostrom type 2 current, (2) partial ring current, and (3) current wedge. In order these structures to be true, they must be accompanied by the dynamo and shear flow. Among models in this figure, only the partial ring current can be reproduced from the simulation.

に置き換えられる。インジェクションに伴う対流の発展は、このシアー運動とも両立する。growth phase では対流はプラズマシートとローブの境界を滑るようにして、尾部の脇の方から地球方向に向かうが、オンセットでは、プラズマシートの中心部を貫通して、還流を形成する。このように、サブストームモデルでは、ダイナモ及びシアーの形成がともにそろう必要がある。よく参照される Bostrom 電流（サブストーム電流系モデルの一種）や CW（current wedge, 同じくサブストーム電流系モデルの一種）は、シミュレーションで主要電流系として再現されることはない（Boström, 1964; McPherron *et al.*, 1973）。これらは、ダイナモ及びシアーの形成の条件と両立しないため、実現されないと思われる。図 6 に、Bostrom 電流と CW を示す。両方の電流系とも、region 1 FAC と同じ向き（センス）の電流が、プラズマシートにつながる部分を含んでいる。シミュレーションではこのような構造の電流は再現されない。これら二つのよく知られているサブストームモデルを考え直してみれば、それらは観測から推定されたものではあるが、力のバランスやエネルギーの保存といった、力学法則を満たすように構成されているかといえ、必ずしもそうではない。当たり前の力学法則でも、3次元構造空間でこれらが満たされているかどうかを判定するのは意外と困難である。一方、これらの力学法則を満たす解のみを選び出すのがシミュレーションである。シミュレーションの解像度が上がり、サブストームの個々の観測を再現できるようになったことで、困難が乗り越えられるようになったといえる。

7. 結 論

本研究の結果として得られたことは、サブストームは物理過程（MHD の破れなど）ではなく、形（構造空間）を詳細に計算することによってリアルに再現できるという事実である。このための研究の方針は、計算格子の空間解像度を工夫し、FAC とダイナモを再現することである。解の力学的な解析から得られることは、シミュレーションで再現されたサブストームでは、全体構造について、当たり前の力学法則（力のバランス、エネルギーの保存、シアーと FAC の同一性）が正確に実現されており、逆に世に広く信じられているサブストームモデルでは、この当たり前の法則が守られていないという、驚がくの実事である。結果として、本研究によりこれまでに信じられてきたサブストームの多くの部分が覆され、新たなモデルが構築された。サブストームをリコネクションやプラズマ不安定の研究に置き換えることは、止めたほうがよいようである。これらの詳細については、第 2 編に述べる。

自己無どう着解を基に、力のバランスやエネルギー保存などの当たり前の構造を調べると、サブストームのときの Bostrom 電流、CW だけでなく、教科書の最初から出てきて誰もが疑わない Dungey 対流すら、闇雲に信じない方がよいとの結論に達する。一見確かな体系を築き上げているように見える磁気圏物理学は、じつは危うい科学であり、教科書が誤りから始まっている科学である可能性がある。この理由の根は意外と深いように感じる。それは、我々

は原理の科学はよく知っており、自然が原理の科学からすべて理解できると思ってきたが、じつは自然はもっと複合されており、(3次元)複合系の科学はあまりよく知らないという一般論に起因しているのではないだろうか。

謝 辞

本研究には、情報通信研究機構高速計算システム、国立極地研究所極域データセンター、京都大学学術情報メディアセンター(生存圏研究所共同研究)、名古屋大学情報連携基盤センター(太陽地球環境研究所共同研究)を利用させていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

文 献

- Akasofu, S.-I. (1964): The development of the auroral substorm. *Planet. Space Sci.*, **12**, 273–282.
- Akasofu, S.-I. (2004): Several ‘controversial’ issues on substorms. *Space Sci. Rev.*, **113**, 1–40.
- Angelopoulos, V., Baumjohann, W., Kennel, C.F., Coroniti, F.V., Kivelson, M.G., Pellat, R., Walker, R.J., Lühr, H. and Paschmann, G. (1992): Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet. *J. Geophys. Res.*, **97**, 4027–4039.
- Baker, D.N., Pulkkinen, T.I., Angelopoulos, V., Baumjohann, W. and McPherron, R.L. (1996): Neutral line model of substorms: past results and present view. *J. Geophys. Res.*, **101**, 12975–13010.
- Boström, R. (1964): A model of the auroral electrojets. *J. Geophys. Res.*, **69**, 4983–4999.
- Chapman S. and Ferraro, V.C.A. (1931): A new theory of magnetospheric storms, Part 1, The initial phase. *J. Geophys. Res.*, **36**, 77–97.
- Crooker, N.U. (1979): Dayside merging and cusp geometry. *J. Geophys. Res.*, **84**, 951–959.
- Dungey, J.W. (1961): Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys. Rev. Lett.*, **6**, 47–48.
- Fairfield, D.H. and Cahill Jr., L.J. (1966): Transition region magnetic field and polar magnetic disturbances. *J. Geophys. Res.*, **71**, 155–169.
- Frank, L.A., Craven, J.D., Burch, J.L. and Winningham, J.D. (1982): Polar views of the Earth’s aurora with Dynamics Explorer. *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 1001–1004.
- Hones Jr., E.W., Pytte, T. and West Jr., H.I. (1984): Associations of geomagnetic activity with plasma sheet thinning and expansion: a statistical study. *J. Geophys. Res.*, **89**, 5471–5478.
- Iijima, T. and Potemra, T.A. (1976): The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad. *J. Geophys. Res.*, **81**, 2165–2174.
- Iijima, T., Potemra, T.A., Zanetti, L.J. and Bythrow, P.F. (1984): Large-scale Birkeland currents in the dayside polar region during strongly northward IMF: a new Birkeland current system. *J. Geophys. Res.*, **89**, 7441–7452.
- Kamide, Y., Sun, W. and Akasofu, S.-I. (1996): The average ionospheric electrodynamics for the different substorm phases. *J. Geophys. Res.*, **101**, 99–109.
- Lui, A.T.Y. (1996): Current disruption in the Earth’s magnetosphere: observations and models. *J. Geophys. Res.*, **101**, 13067–13088.
- Lui, A.T.Y. (2001): Current controversies in magnetospheric physics. *Rev. Geophys.*, **39**, 535–563.
- McPherron, R.L., Russell, C.T. and Aubry, M.P. (1973): Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms. *J. Geophys. Res.*, **78**, 3131–3149.
- Parker, E.N. (1958): Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. *Astrophys. J.*, **128**, 644–676.
- Rostoker, G., Akasofu, S.-I., Foster, J., Greenwald, R.A., Kamide, Y., Kawasaki, K., Lui, A.T.Y., McPherron, R.L. and Russell, C.T. (1980): Magnetospheric substorms: definition and signatures. *J. Geophys. Res.*, **85**, 1663–1668.
- Tanaka, T. (1994): Finite volume TVD scheme on an unstructured grid system for three-dimensional MHD simulation of inhomogeneous systems including strong background potential fields. *J. Comput. Phys.*, **111**,

- 381–389.
- Tanaka, T. (1995): Generation mechanisms for magnetosphere-ionosphere current systems deduced from a three-dimensional MHD simulation of the solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling processes. *J. Geophys. Res.*, **100**, 12057–12074.
- Tanaka, T. (1999): Configuration of the magnetosphere-ionosphere convection system under northward IMF conditions with nonzero IMF B_y . *J. Geophys. Res.*, **104**, 14683–14690.
- Tanaka, T. (2000): The state transition model of the substorm onset. *J. Geophys. Res.*, **105**, 21081–21096.
- Tanaka, T. (2001): Interplanetary magnetic field B_y and auroral conductance effects on high-latitude ionospheric convection patterns. *J. Geophys. Res.*, **106**, 24505–24516.
- Tanaka, T. (2007): Magnetosphere-ionosphere convection as a compound system. *Space Sci. Rev.*, **133**, 1–72, doi:10.1007/s11214-007-9168-4.
- Tanaka, T. and Murawski, K. (1997): Three-dimensional MHD simulation of the solar wind interaction with the ionosphere of Venus: results of two-component reacting plasma simulation. *J. Geophys. Res.*, **102**, 19805–19821.
- Tanaka, T. and Washimi, H. (1999): Solar cycle dependence of the heliospheric shape deduced from a global MHD simulation of the interaction process between a nonuniform time-dependent solar wind and the local interstellar medium. *J. Geophys. Res.*, **104**, 12605–12616.
- Tanaka, T. and Washimi, H. (2002): Formation of the three-ring structure around supernova 1987A. *Science*, **296**, 321–322.
- Tanaka, T., Obara, T. and Kunitake, M. (2004): Formation of the theta aurora by a transient convection during northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, **109**, A09201, doi:10.1029/2003JA010271.
- Tanaka, T., Nakamizo, A., Yoshikawa, A., Fujita, S., Shinagawa, H., Shimazu, H., Kikuchi, T. and Hashimoto, K.K. (2010): Substorm convection and current system deduced from the global simulation. *J. Geophys. Res.*, **115**, A05220, doi:10.1029/2009JA014676.
- Vasyliunas, V.M. (1970): Mathematical models of magnetospheric convection and its coupling to the ionosphere. *Particles and Fields in the Magnetosphere*, ed. by B.M. McCormac. Hingham, Mass., D. Reidel, 60–71.