

REPPU コードレベル8の開発

トポロジーを取り込んだ複合系磁気圏物理学の創出

田中 高史

九州大大学名誉教授

REPPU コードレベル8の開発によって、より詳細な磁気圏トポロジーが再現可能になった。トポロジーは、観測では知ることが出来ない。REPPU によって、これまでのリコネクションだけに依存した磁気圏変動から、トポロジー変化を取り込んだ磁気圏変動に進化することができる。

1 導入

REPPU (REProduce Plasma Universe) コードは、太陽風の変動がどのようにして地球に伝えられるかを計算する、シミュレーションプログラムです。地球に伝えられた太陽風変動は、地磁気の変動、オーロラ現象などの地球電磁擾乱の原因になる。太陽風変動は太陽風に発し、磁気圏を通り、電離圏に達する。従って、地球での電磁的変動を再現するには、3つの領域と、それらの間の相互作用が考慮されなければならない。第1図にこれらの領域の概観を示す。磁気圏物理学では、X 軸は太陽向き、Y 軸は公転方向の反対側、Z 軸は北向きに定義される。

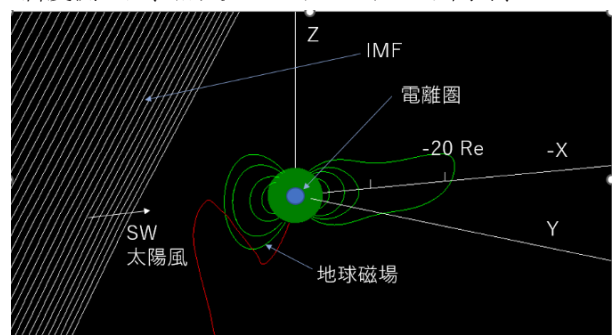
太陽風は高温のコロナプラズマが真空の惑星間空間に向かって熱膨張し、超音速となった磁化プラズマ流である。地球付近での平均的構造は、密度 5AMU/cc 、 $-X$ 方向速度 400km/sec 、惑星間空間磁場 (IMF) 強度 5nT である。

地球には地心の流体コアで生成される固有磁場が存在する。磁場の形状は、地表より上空では、双極子に近い。地球磁場の強度は、赤道地表で、 $30,000\text{nT}$ となっている。太陽風、磁気圏領域では、凍結の原理が成立する。ここでは、電流は磁場の捻れ ($\mathbf{J}=\text{rot}\mathbf{B}$)、電場は速度に等価 ($\mathbf{E}+\mathbf{V}\times\mathbf{B}=0$) となる。地球に到達した太陽風は、地磁気の閉じ込めに作用し、磁気圏が形成される。

電離圏は地球上層大気が太陽紫外線で電離した領域で、下からD、E、F層で構成される。F層ではまた凍結の原理が成立するが、E層(高度 100km)ではこれが破れ、伝導電流が形成される。伝導電流

は、沿磁力線電流 (FAC) を介して磁気圏電流と接続され、磁気圏と電離圏には電磁的な結びつきが発生する。

太陽風、磁気圏、電離圏の間には、相互に結合がある。太陽風—磁気圏(S-M)相互作用では、まず磁気圏の閉じ込めに付随して、重要な構造の形成がある。超音速の太陽風は、地球前方のボーショックで亜音速となる。従って昼側地球磁気圏の周りは圧縮された亜音速太陽風流であり、この領域はマグネトシースである。マグネトシースと地球磁場の境界はマグネトポーズである。その生成場所は、地球前方で、 10Re の距離になる。太陽風と磁気圏は、異なった起源を持つ磁化プラズマ同士の接触でもある。両者の境界面はセパラトリックスである。セパラトリックスは複数発生し、それらの交線をセパレーターと呼ぶ。セパレーターの両端にはヌルが存在し、此处ではプラズマの交換を伴う S-M 相互作用が発生する。交換によって磁気圏に侵入したプラズマは電離圏プラズマと一部混合し、尾部赤道面(XY 面 $Z=0$)にプラズマシートを形成する。プラズマシートの南北高緯度側では、磁気圧がプラズマ圧より高く、ローブ



(第1図) 太陽風—磁気圏—電離圏系の概観

を形成する。ヌルーセパレーター構造とその上の S-M 相互作用は、IMF の向きに大きく依存する。

S-M 相互作用に伴い、磁気圏内では磁気圏対流が発生し、これに付随してダイナモ、FAC が形成される。この FAC が M-I 結合の主役である。

FAC は電離圏に供給され、衝突のある部分電離プラズマ中の伝導電流、Hall、Pedersen 電流系と接続される。これは電離圏対流の励起でもある。全体として対流の投影とも見えるが、FAC を省略し、単純に運動の投影とすると、磁気圏と電離圏のインピーダンスの違いを無視することになり、誤りに陥る。磁気圏と電離圏の間で発生するプラズマの交換では、磁気圏から電離圏にはプラズマの落下、その逆は極風がこれを荷う。地上からは（上向き）FAC はオーロラアークとして観測され、粒子落下は diffuse aurora として観測される。電離圏対流は単なる投影でない。磁気圏対流の境界条件であり、そのドライバーにもなり得る。

2 REPPU コードの構成

太陽風—磁気圏領域（3～300 Re）は、MHD 方程式を適用する。これを数値的に解くスキームには、TVD スキームを用いる。FAC の計算精度を確保するため、MHD 方程式を双極子とそれからのずれに分離する。これでも TVD スキームを構成するための、固有ベクトルの解析解がある。MHD には磁気拡散モデルを導入する。しかし同時に数値拡散も存在し、この部分には不確定性が残る。

電離圏（1Re）では、電流の保存則を適用する。1～3 Re は、双極子とする。解は共役残差法を適用し求める。ここで電気伝導度は圧力、温度、FAC の関数として与える。この関数系については、不確定性が残る。磁気拡散と電気伝導度は、MHD における 2 大不確定性であろう。

格子構造は 12 面体分割によって球面三角格子を作成し、これを高度方向に重ね、3D 格子を作成する。12 面体の各面を 5 つの三角に分割したもの（60 三角）をレベル 1 とし、以下三角を 4 分割してレベルを一つずつ上げる。これで格子の集積点は発生しない。レベル 8 では、数値拡散は与えた拡散と同程度かそれ以下になると予想される。レベル 7、レベル 8 の格子数は、以下ようになる。総格子数は、revel7 では 71,271,560、revel8 では

383,387,160 となる。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、レベル 7 では 122,882、レベル 8 では 491,522 となる。またレベル 8 では、重ね合わせる球の数も、球面上で格子間隔が狭くなることに合わせ、増加させている。重ね合わせの際、中心をずらしながら、テイルの格子数を確保する。

MHD の内部境界条件(3 Re)は以下のように与える (Tanaka, 2000)。B 地表平行成分はノイマン条件、B 地表垂直成分は $=0$ 、V 磁場垂直成分は電離圏ポテンシャルから決定、V 磁場平行成分はノイマン条件、密度、圧力は V 磁場平行成分下向きの時ノイマン条件、上向きの時、極風で近似とする。極風の近似に際しては、極風の密度、圧力は given とし、磁場平行速度は、ノイマン条件から得られた圧力傾度を摩擦と釣り合わせて決める。電離圏ダイナミクスを解いていないので、極風の与え方は近似的となるが、REPPU コードで可能な範囲では、最良の方法であろう。これらの境界条件の内、B 地表平行成分が、FAC を与える。

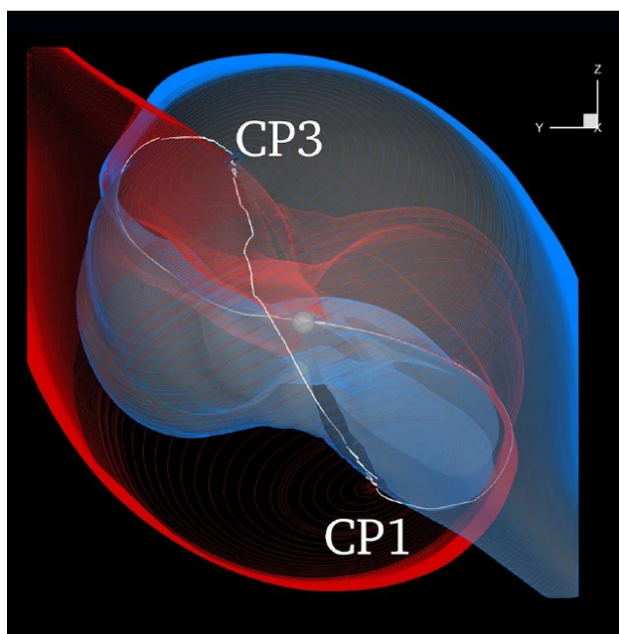
3 IMF 北の時の解

現在の REPPU コードでは、レベル 8 ままで稼働している。このうちレベル 7 までは、おおむね完成していると言える。レベル 8 はチェックのための計算量が多くなり、まだ十分にモデルは確立していない。今回の応募ではこのレベル 8 の開発を進めた。その結果、北向き IMF の時の静穏な磁気圏については、レベル 8 でもある程度確立した解が得られるようになった。しかし南向きの時の解、特にサブストームについては、レベル 8 はまだ確立するには至っていない。レベル 8 では数値拡散が少なくなるので、この影響が如実に表れる。逆に見ればレベル 7 までのモデルで得られたサブストーム解は、数値拡散に大きく影響されていると言える。

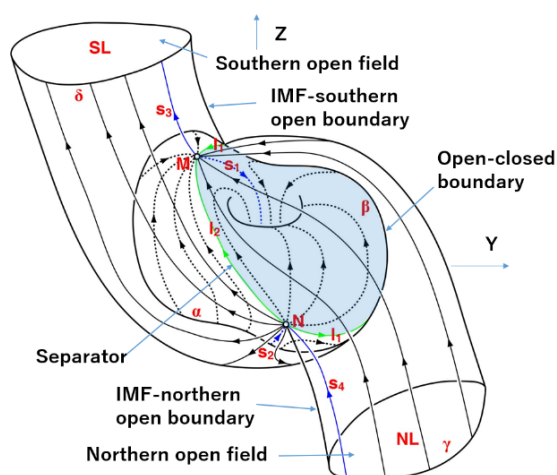
3.1 IMF 北の時の基本的なトポロジー

REPPU コードの主目的はサブストームの研究であるが、北向き IMF の時について、むしろ新しい解が多く得られている。北向き IMF の時に発生するオーロラには、sun-aligned arc (Tanaka et al.,

2017)、fan arc (tanaka et al., 2019)、theta aurora (Tanaka et al., 2022)があり、これらは REPPU コードレベル7で再現されている。中でもハイライトになるのが、テーターオーロラである。その説明のために、まず第2図に IMF 北の時レベル7で得られたヌルーセパレーター構造を可視化した例を示す。ここで CP3 と CP1 の2つのヌルから生成されるセパトリックスが、青面と赤面である。青面は北半球の太陽風-磁気圏境界と南半球尾ローブプラズマシート境界を形成し、南半球極冠境界につながる。赤面は同様に反対半球を形成する。これらはヌルから広がる Σ 面でもある。青面と赤面の交線が白で描かれているセパレーターである。



(第2図) IMF 北の時のヌルーセパレーター構造



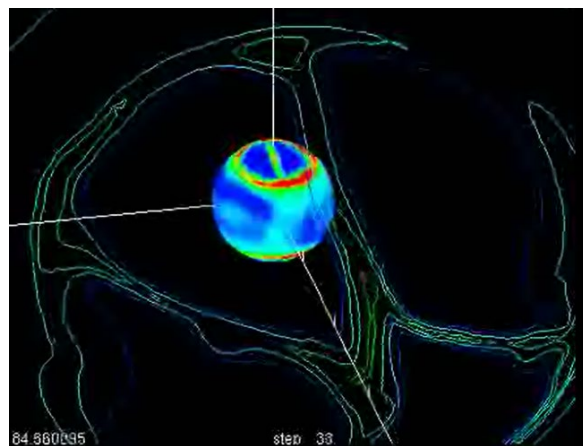
(第3図) ポテンシャル場の重ね合わせ

第3図に一樣な IMF と双極子磁場を重ね合わせ

た時に現れるトポロジーを示す(Dorelli et al., 2007)。このような簡単に作成された磁場構造に、基本的なトポロジー要素が全て現れるのは驚異的であろう。第3図 M と N は第2図 CP3 と CP1 に当たる。ここで、面上に磁力線が集まるヌルを+、発散するヌルを-とする。 $\alpha \sim \gamma$ はセパトリックス、s はヌルに接続する spine、SL と NL は南北ローブである。昼側と夜側に、2つのセパレーター (12, 11) が現れる。第2図のシミュレーションで再現したトポロジーは、この真空場のトポロジーと同一であることが分かる。

3.2 テーターオーロラのトポロジー

北向き IMF の時のトポロジーを示したが、このような思考が正しい決定的な証拠が、テーターオーロラである。テーターオーロラは地球規模で丁度ギリシャ文字の θ のような構造を示す、奇妙な非定常オーロラである。これは長い間ミステリーとして知られている現象であった。このオーロラの発生過程は、トポロジーから説明できる。

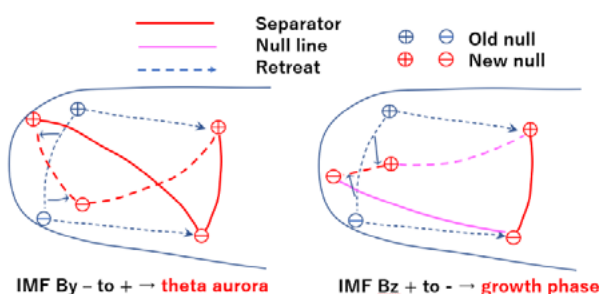


(第4図) 3 Re に投影したテーターオーロラ

IMFBy を切り替えることによって、テーターオーロラをシミュレーションで再現した例を第4図に示す。円環状の赤い部分はオーロラオーバルであり、これはプラズマシートの投影構造(粒子落下域)として、通常見られる構造である。定常状態では、極冠は開磁場で占められた単連結領域で、磁気圏ではローブ(第3図で β と γ の間の相当)に繋がる。IMFBy 切り替えを伴う第4図では、極冠(中央の青い部分)を貫くようにバーが出現して、全体が θ の形状を示している。テーターオーロラが(この場合

朝方から夕方) 移動して行く非定常構造として再現される。等高線は圧力分布の YZ 断面である。プラズマシートのキंक構造が見られる。

シミュレーションから、第4図のテーターオーロラは、第5図(左)に示した IMF が-Y から+Y にスイッチした時のヌルのダイナミクスから説明されることが示される。この図で、ヌルは、旧 IMF に対応する後退ヌルと、新 IMF に対応する新規ヌルの4つになっており、それに対応してセパレーターとヌルが生成するセパレーターリコクションも4つになる。ここでセパレーターは異符号のヌル同士を結ぶことが出来る。それゆえ極冠も片半球2つ、合計で4つになり、バーの上空は閉磁場になって、テーターオーロラの形成に繋がる。



(第5図) IMF スイッチに伴うヌルの変動

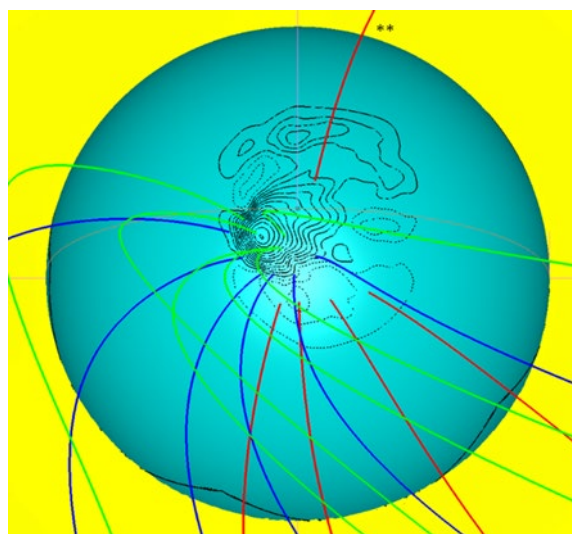
バーの移動を引き起こすのは、夜間セパレーター上でのセパレーターリコクションである。これによって旧極冠が縮小し、新極冠が拡大する。

3.3 レベル8によるトポロジーの高精度計算

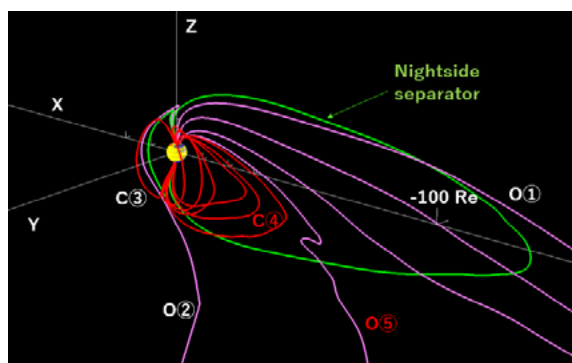
今回の応募研究では、レベル8により IMF 北の時の S-M-I 結合系の構造をさらに高精度で計算し、レベル8の有効性を追求した。第6図に3 Re に投影した、北半球電離圏のポテンシャルを示す。ここで実線は正、破線は負のポテンシャル等高線であり、等高線は流線と見なせる。太陽方向は左である。この図には5つのセルが現れている。それらは夕方中央のローブ+round merging セル(実線)、それより小さい朝方の reciprocal セル(破線)、夜側の夜間セル(破線)、低緯度側の2ルの粘性セルである。このうち、ローブセルはローブ+round merging セルの中心部分で閉磁場のみから構成される。Merging セル縁の部分で、閉磁場と開磁場がある。夜間セルも

同様に開磁場と閉磁場がある。reciprocal セルと粘性セルは閉磁場のみから成り立つ(Watanabe et al., 2018)。

このように北向き IMF の時の電離圏対流は IMF 南の時の2セルより複雑である。この複雑さは磁気圏構造にも及ぶ。ローブセルがカスプリコネクションによって駆動されるのは良く知られているが、round-merging セルが interchange reconnection により駆動される過程は複雑であり、良く知られてはいない(Watanabe et al., 2018)。一般に北向き IMF の時は磁気圏、電離圏は静穏であるので、構造も単



(第6図) 北向き IMF の時の電離圏対流

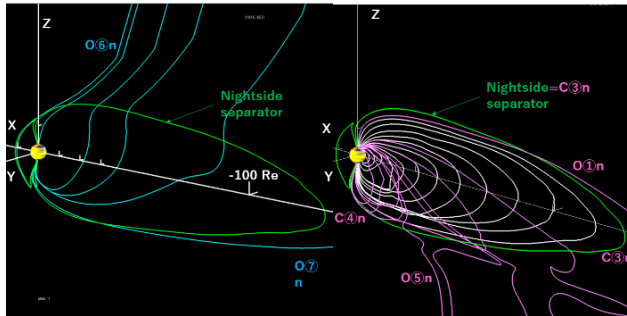


(第7図) round merging セルの励起メカニズム

純であろうと錯覚しやすい。IMF 北向きの時の複雑性は、トポロジーの複雑性に起因している。第7図に、round merging セルの駆動機構を示す。IMF は北半球で O①とカスプリコネクションを経て、O②となる。これがさらに夜間の閉磁場 C④と interchange reconnection を経て、O⑤と C③になる。C③が C④に閉磁場対流で、O⑤が O①に開磁場対流で移動すれば、過不足ない対流ループが構成される。ここ

で赤い磁力線の南半球の足元が **reciprocal** セルである。

夜間セルはプラズマシートと結びついた対流であるが、これもかなりの複雑性を示す(Tanaka et al., 2024)。これらの構造はシミュレーションでのみ考察可能な構造であろう。第8図に夜間セルの駆動機



(第8図) 夜間セルの励起メカニズム

構を示す。O①n と O⑦n は夜間セパレーターリコネクションを起こす。できた閉磁力線はプラズマシート（白線）を通過して、C④n に達する。C④n と IMF との南半球カスプリコネクションによって、O⑤n と O⑥n が生成される。このリコネクションは、ダンジェー型である。O⑤n は O①n に O⑥n は O⑦n に開磁場対流で移動する。

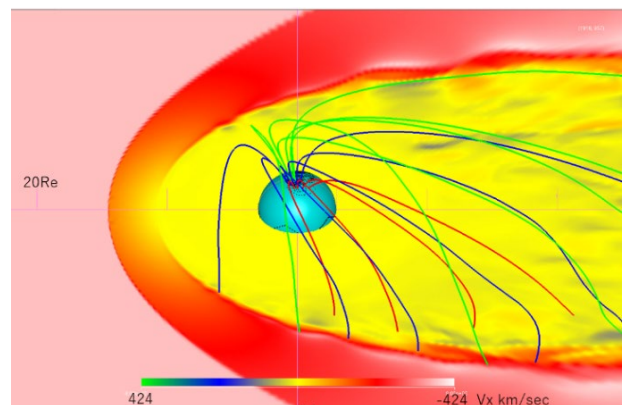
このように、北向き IMF 下の対流では、リコネクションについても、カスプリコネクション、interchange リコネクション、セパレーターリコネクションなどが多様に作用している。

第6図にカラーで描かれた線は、磁力線である。これらを磁気圏赤道面に投影した様相を第9図に示す。第9図で shading は V_x を描いている。ピンクの部分が太陽風、赤の部分がマグネトシース、黄色の部分が磁気圏内である。テイルの地球に向かう流れ（青）は細い構造となっているが、これは **BBF** (Bursty bulk flow) と呼ばれる構造である。

第9図で太陽風と磁気圏の間に太陽風よりやや低速の薄い領域があるが、これは **LLBL** (低緯度境界層) である。第6図と比べると、**LLBL** はローブセルと **round merging** セルの反太陽向き流の投影であることが分かる。このうち緑は開磁場、青は閉磁場である。第6, 9図から、**LLBL** はローブ、**round-merging** セルの投影であることが分かる。従って **LLBL** は反太陽向き対流の通り道である。**LLBL** についてはここでは **KH** (Kelvin-Helmholtz) 不安定がカスケードし、それによるプラズマ混合作

用によって、太陽風侵入領域を形成するという錯誤が広く出回っている。**REPPU** の結果では、**LLBL** は対流の通り道に過ぎない。観測にはこのような錯誤を訂正する能力がないことが、磁気圏物理学の限界を形成している。これは全体を見ずローカルを考えるからである。磁気圏物理学は要素の科学でなく複合系の科学であることが、錯誤の根本的要因である(Tanaka, 2007)。

粘性セルは赤の磁力線で分かるように磁気圏内部に投影される。旧来からこのセルは **LLBL** 内の等価的粘性によって励起されると信じられてきた。呼称はこれを引き継いだものであるが、この報告では、励起機構そのものは粘性でない。**LLBL** には確かに **KH** 波動が励起される。この波動は磁気圏内部まで深く浸透する。また波源は **-X** 方向に移動する。これらの要因で、粘性セルが励起されると推定される。



(第9図) 北向き IMF 時の赤道面流とセルの投影

4 IMF 南の時の解

昔から今に至るまで、サブストームは磁気圏物理学の最重要課題である。全てのシミュレーションモデルにとって、サブストームの再現が最終目標である。ここで報告される **REPPU** のサブストーム解についてはレベル7までの結果になるが、**REPPU** コードによって得られたサブストームは、これまで主流の理論とはかなり異なったものとなっている。

サブストームについては、レベル8はまだ確立するには至っていない。これはサブストームについて、レベル7の解の延長に位置するようなレベル8の解がいまだ再現されていないということである。レベル8では数値拡散が少なくなるので、この効果が大きいと思われる。逆に見ればレベル7で得られたサブストーム解には、まだ数値拡散が影響している

ことになる。ただし数値拡散の効いた解を誤りと断定している訳ではない

4.1 成長相

サブストームオンセットは quiet arc の赤道側から始まる。Quiet arc (明るく輝くオーロラの前兆のような東西に長く薄いオーロラ) の理解なしでは、サブストームの理解もない。REPPU で再現される quiet arc は、上向き FAC からの置き換えであり、対流シアーと結合した quiet arc である。従ってこの quiet arc の発生には、成長相 (growth phase, オンセット前の準備期間のように見える) の対流の発展が不可欠である。第5図右 (IMF 南北成分の切り替えの場合) のトポロジーでは、ヌルの後退時に、成長相が再現できる。この時には、FAC を電離圏に接続するに必要なシアーも再現できる。quiet arc に対しては面状シアーが要求される (Tanaka et al., 2021a)。

一般に quiet arc は粒子散乱で発生すると思われるが、アークが散乱で発生するか? という疑問がある。quiet arc が内部磁気圏で粒子散乱によって発生するという思い込みは、その電離圏での発生位置が、内部磁気圏からの投影場所であるという観測的推定に基づく (+ 粒子異方性の解析)。ここでは成長相の進展における投影構造の変化は余り考えられていない。しかし、growth phase の thinning (プラズマシートが薄くなる) がもたらす投影の変化を軽視してはいけない。これは HD (ハラング不連続、成長相中に夕方で発生する特異な地磁気変動) の原因とも関連している。シミュレーションでは、quiet arc の equatorward shift、オンセットアークの poleward expansion に伴い、かなりドラスチックな投影構造の変化が起こることが示される。観測の解釈では、正確な磁力線トレースがなされているのかという点に疑問がある。

4.2 オンセット

サブストーム最大の謎は、オンセットの不連続性がなぜ生まれるかであろう。トポロジーは不変でも、磁気圏—電離圏対流によって磁気圏磁場は変形が進む。一定のトポロジー下では、変形は無限に可能

ではなく、トポロジー下の変形の限界が存在する場合もある。この時は成長相進展に伴い、トポロジーの変更が発生し、新ヌル (NENL) の発生、すなわちサブストームオンセットに至るというのが REPPU シミュレーションの結果である (Tanaka et al., 2021a)。

一般にはオンセット FAC には CW (current wedge) が想定されるが、REPPU ではオンセット FAC の起源は、地球近傍ダイナモである。プラズマシート中を伝搬する DF (dipolarization front) に続いて地上でオンセットスポットが出現するというシーケンスを再現するシミュレーションは、今のところ REPPU だけであろう。これには REPPU での正確な M-I 結合が効果を上げている。特に V 磁場垂直成分が、電離圏から磁気圏まで数値キンクなしに連続して伝搬することが必要である。オンセット FAC の電離圏接続には線状のシアーが必要である (Tanaka et al., 2021b)。これを REPPU で実現する理由は、CW に相当する電流 (= 磁場変動) が、対流遷移と同期して発生するという、MHD の必然性による。HD の崩壊はこれに関連するであろう。しかし対流遷移の詳細は、未だに知られていない。特に線状シアーの発生過程は未解決であろう。テイルでの NENL の開始とともに、電離圏まで到達する局所的な運動変化が必要になる。リコネクションの再現だけなら、グローバル粒子モデルでも可能になってきているが、これでは電離圏の様相や quiet arc との相対関係までは、まだ再現されていない。

現在のサブストーム研究では、一般的にトポロジーの考察はなく、反平行リコネクションの発生がサブストームのオンセットとなっている。これに対して REPPU シミュレーションでは、対流システム全体の遷移がオンセットである。第5図右のサブストームを発生させるトポロジー変動では、4つのヌルをセパレーターのみでは結ばず、ヌルラインが必要となる。このため、第5図右を第5図左と比べた時、右ではテイルに新たなヌルが発生する可能性があるところが大きな相違である。対流の遷移、新たなヌル、オンセット FAC は同時に発生しなければならない。

レベル8でサブストームを再現することは、現在最大の目標である。これには、数値解析における散逸とその分布を理解することが必要であろう。

ここで問題にするサブストームは、あくまでも標

準的な IMF と太陽風でトポロジー変化によって励起される変動である。サブストームに対して似たような現象として地磁気嵐がある。地磁気嵐は強ドライバの生み出す現象で、サブストームとは通点もあるが、別の研究対象と思われる。REPPU では強ドライバに対する対応は余り考慮されていない。

5 結論

REPPU コードレベル8の開発を進めた。これから北向き IMF の時の磁気圏トポロジーについて、詳細な構造を再現することが出来た。電離圏では5つのセルが再現された。LLBL は round merging セルとローブセル上の、反太陽向き流が投影されている領域であることが分かった。粘性セルは、KH 不安定波の磁気圏内部への侵入によって励起される。IMF 南向きの時のサブストームの解については、レベル8ではまだ完全な解が得られていない。これには今後も挑戦していきたい。

参考文献

- Dorelli, J. C., A. Bhattacharjee, and J. Raeder (2007), Separator reconnection at Earth's dayside magnetopause under generic northward interplanetary magnetic field conditions, *J. Geophys. Res.*, 112, A02202, doi:10.1029/2006JA011877.
- Tanaka, T. (2000), The state transition model of the substorm onset, *J. Geophys. Res.*, 105, 21,081–21,096, doi:10.1029/2000JA900061.
- Tanaka, T. (2007), Magnetosphere-ionosphere convection as a compound system, *Space Sci. Rev.*, 133, 1, doi:10.1007/s11214-007-9168-4.
- Tanaka, T., T. Obara, M. Watanabe, S. Fujita, Y. Ebihara, and R. Kataoka (2017), Formation of the Sun-aligned arc region and the void (polar slot) under the null-separator structure, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, doi:10.1002/2016JA023584.
- Tanaka, T., Obara, T., Watanabe, M., Fujita, S., Ebihara, Y., Kataoka, R., & Den, M. (2019). Magnetosphere-ionosphere convection under the due northward IMF. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, https://doi.org/10.1029/2019JA026547
- Tanaka, T., Ebihara, Y., Watanabe, M., Den, M., Fujita, S., Kikuchi, T., et al. (2021a). Roles of the M-I coupling and plasma sheet dissipation on the growth-phase thinning and subsequent transition to the onset. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029925. m dehahttps://doi.org/10.1029/2021JA029925
- Tanaka, T., Ebihara, Y., Watanabe, M., Den, M., Fujita, S., Kikuchi, T., et al. (2021b). Development of the substorm as a manifestation of convection transient. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA028942. <https://doi.org/10.1029/2020JA028942>
- Tanaka, T., Ebihara, Y., Watanabe, M., Fujita, S., Nishitani, N., & Kataoka, R. (2022). Interpretation of the theta aurora based on the null-separator structure. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030332. <https://doi.org/10.1029/2022JA030332>
- Tanaka, T., Ebihara, Y., Watanabe, M., Fujita, S., & Kataoka, R. (2024). Multiple convection cells induced by in-front and off-front interactions between the obliquely northward IMF and the geomagnetic field. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129, e2023JA031994. <https://doi.org/10.1029/2023JA031994>
- Watanabe, M., Fujita, S., Tanaka, T., Kubota, Y., Shinagawa, H., & Murata, K. T. (2018). A magnetohydrodynamic modeling of the interchange cycle for oblique northward interplanetary magnetic field. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, <https://doi.org/10.1002/2017JA024468>