

# 水星磁気圏の 3 次元大域的完全

## 電磁粒子シミュレーション

Global 3D EM full particle simulation for Mercury Magnetosphere

**研究代表者**：蔡東生（筑波大学システム情報工学研究科CS専攻）

[dongscai@gmail.com](mailto:dongscai@gmail.com)

**研究分担者**：Sri Ekawati（筑波大学システム情報工学研究科CS専攻）

[ekawati@cavelab.cs.tsukuba.ac.jp](mailto:ekawati@cavelab.cs.tsukuba.ac.jp)

担当：シミュレーション, データ解析, 可視化

### **研究目的 (Research Objective):**

水星は太陽に一番近い軌道を回り、月と火星の中間のサイズしかないにもかかわらず地球と同様、惑星固有の磁場を持っている惑星。その灼熱の環境、周回軌道投入に必要な燃料の多さから直接観測がほとんどできなかったのが水星である。「BepiColombo(ベピコロンボ)」とは、日本とヨーロッパ(European Space Agency (ESA): 欧州宇宙機関)が共同で計画中の水星探査ミッションである。平成30年10月19日(金)22時45分28秒(現地時間)(10月20日(土)10時45分28秒(日本標準時))に、フランス領ギアナのギアナ宇宙センターから打ち上げられた。国際水星探査計画「ベピコロンボ」(BepiColombo)は、ESAとJAXAの共同で、観測目的に合わせた2つの周回探査機を水星周回軌道に送り込んで水星を観測する計画で、水星の磁場・磁気圏の観測を行う水星磁気圏探査機「みお」(MMO)と、水星の表面・内部の観測を行う水星表面探査機(MPO)から構成されている。2025年12月に予定される水星到着までの総航行距離は(太陽中心座標系で)約88億kmである。BepiColomboは、水星の公転周期と自転周期が3:2となることを示し、水星にゆかりの深いイタリアの応用数学者ジュセッペ・コロンボ博士(ベピは愛称)に因んでこの名前がつけられた。固有磁場と地球よりはるかに小さい磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星のみであり、初の水星の詳細探査は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらすと期待できる。われわれの経験では、グローバルシミュレーションを行う上での最大の困難は、ポストプロセス、即ち、データ処理、可視化である。そのため、実際よりかなり小さいシミュレーションモデルで計算を行い、大規模シミュレーションを行った場合の知見を得ることが本研究の第一目的である。

### **計算手法 (Computational Aspects) :**

本研究では大域的三次元完全電磁シミュレーションコードを用いる。計算領域、IMF 磁場の時間変化を図 1 にしめす。太陽方向の境界から、IMF 磁場をもった太陽風を流し、GSM 座標中心にダイポール磁場をおき、地球の磁気圏を形成する。電磁場境界条件は、Lindman の吸収境界条件の一次近似を用いる。この場合、45 度以上で入射する電磁波は吸収され、45 度以下の電磁波は反射される。粒子に関しては、境界を離れる粒子は、一旦取り出され、再度、境界領域に Knudsen 流として注入される。本シミュレーションでは、粒子の運動論的振る舞いはモデル化せず、電子とイオンの 2 流体モデルとしてシミュレーションを行う。現実的には、space charge effect、ビーム不安定性、粒子の加速機構などがシミュレーションの効果を入れる。

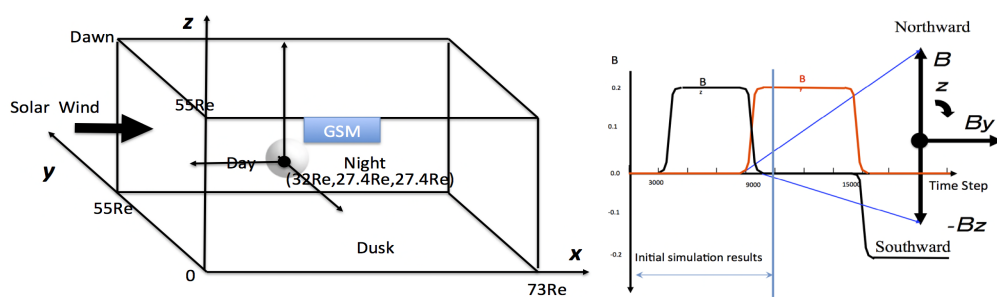


図 1：シミュレーションの設定と IMF の時間変化

### 水星磁気圏の作成

水星の磁気圏にはいくつかの特徴があり、大きさに関連しては、magnetopause までの距離が小さい、ion inertia ratio が大きいという特徴があり、これらを踏まえて、磁気圏を作成する。

- $R_{MP} = 1.3 - 2.1 R_M$

- $R_M = 60 - 91$  ion inertia length

$R_{MP}$ : Distance from GSM center to magnetopause     $R_M$ : Mercury radii

今年度は、Alfven Mach Number=4.6 でシミュレーションを行った。

### 研究成果 (Accomplishments) :

#### 1. 粒子シミュレーションによる Small Mercury Magnetosphere でカスプ解析

今回水星の磁気圏パラメータにあわせて、565X375X375 のグリッドサイズで小さな水星磁気圏を作成した。水星の半径 50 グリッドサイズのものを作成した。太陽磁場は(1)北向から、(2)Dusk-Dawn、(3)南向き(Phase 1, Phase 2)に変化する

る。図 1 にシミュレーションのコンフィギュレーション、IMF の時間変化を示す。本シミュレーションでは、水星の双極磁場をゆっくり発生させ、太陽風を左から入れて、磁気圏を生成する。次に、図 2 に IMF 北向きの太陽風を入れた参照水星磁気圏を示す。

## 2. 水星磁気圏カusp領域解析

水星磁気圏シミュレーションのため、現在我々の使っている、大域的完全電磁粒子コードの物理的妥当性を検査、立証するため、IMF 北向きにおける CUSP 領域解析を行った。

Cai ら (2015) の詳細な解析により、図 3a に示したカusp領域の主な特徴(強い磁場振幅と弱いプラズマ密度)を復元することができた。つまり、この領域は磁場の空間プロファイルと低高度から高高度までの密度の空間プロファイルによって比較的よく定義することができるのです。CLUSTER 衛星による統計的観測(Lavraud et al., 2004a, 2005)に基づいて、典型的な SEC あるいは反磁性カusp領域が定義されるかもしれない。北向きの IMF の場合、SEC 領域は極域、上方、下方、赤道の 4 つのエッジを持ち (Fig 3)、Cai ら (2015) の数値シミュレーションで解析されている。Fig 5b は、今回の 3 次元 PIC シミュレーションで得られた電子密度振幅を示したもので、電子密度が非常に高いカusp領域(赤い「歯型」領域)を明確に特定することができる。また、磁気圏(高高度)からカusp(中高度)に向かって電子密度が減少する SEC 領域(青い台形)も示している。

特徴の一つは磁気シース領域から SEC 領域へ向かう際に、プラズマの流れが超アルフベニック領域から亜アルフベニック領域へと変化する遷移層(ATL)によって特徴付けられる。筆者らの知る限り、この ATL は Lavraud ら (2005) によって初めて実験的に観測され、Cai ら (2015) による北向き IMF かつ子午面のみの 3 次元 PIC シミュレーションで証明された。

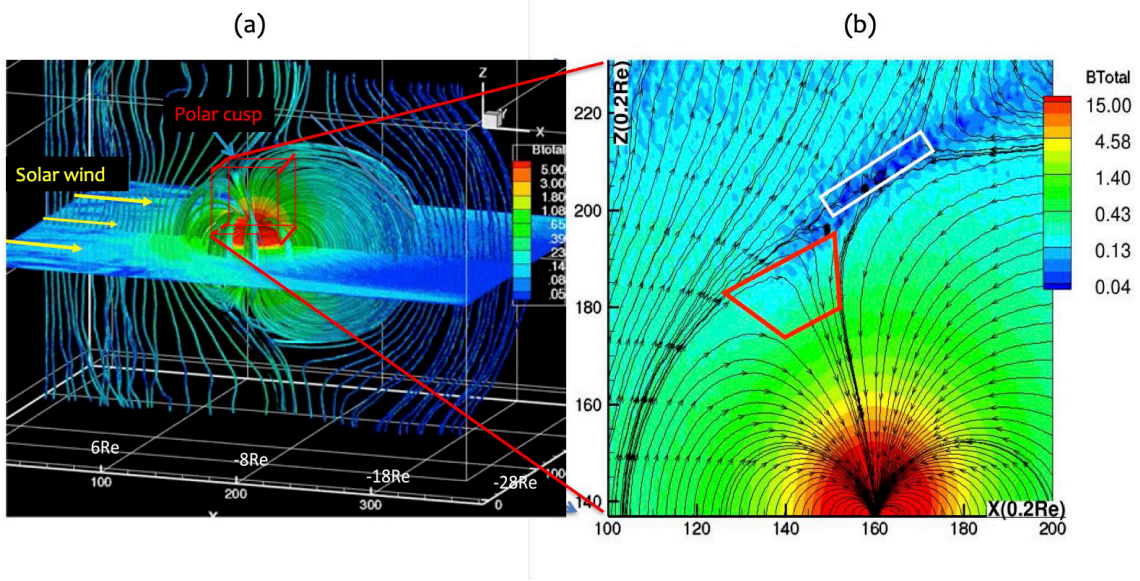


図 2 : 小さな参照水星磁気圏(左)と拡大したカusp領域 (右) . IMF は北向

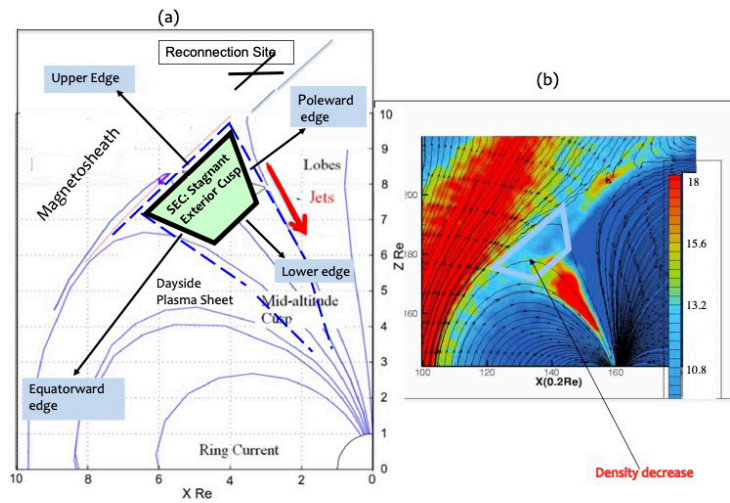


Figure 5

図 3: カusp磁場の境界

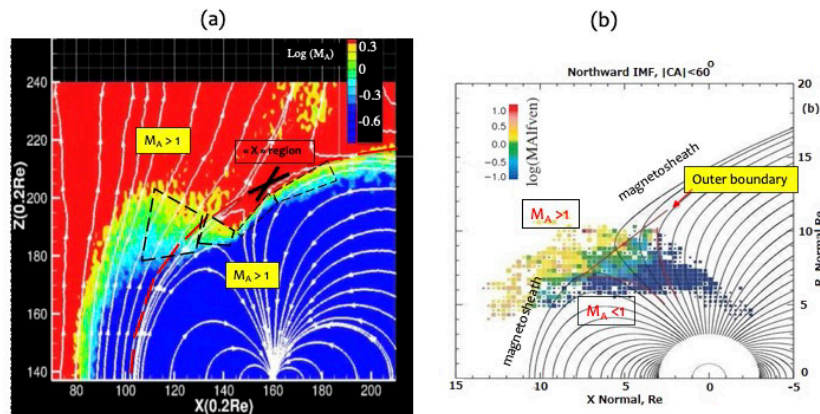


図 4 : IMF 北における、カusp領域における Alfvén Transition Layer のシミュレーション結果 (左) と、Cluster 衛星による観測結果 (b) の図は Lavraud et al. (2005) より)

Lavraud ら(2005)や Cai ら(2015)の先行研究に従い、ATL の正確な位置を証明する一つの方法は、地球位置を通る(x-z)子午線平面内に  $\text{Log}(M_A)$  のマップをプロットすることで構成される。北向きの IMF の結果は図 4 に示されており、シミュレーション結果 (パネル 4a) と実験測定 (パネル 4b) の間の良い一致を証明している。本シミュレーションをより詳細に解析することで、以下のように観測結果を拡張することができる。

(i) 子午面において、ATL はカuspの上端に限定されるのではなく、カusp領域の外側でも確認されることがある。(a)に示すように、赤道面では磁気圏界面のサブソーラー点まで、また夜側にも広がっている。

(ii) 参考までに、IMF が磁気圏に重なっている磁気圏界面の位置を図 4a の赤い破線で示したが、ATL と MP の対応はどこでも一直線ではないことがよくわかる。カusp領域から磁気圏の夜側へ移動すると、両フロンティアは同じ位置にあることがわかる。一方、サブソーラー点からカusp領域までの昼間では、両者は強く異なっている。サブソーラー点付近では、ATL は MP のかなり上流に位置するため、磁気圏シースでのプラズマ流の減速は非常に効率的であり、MP に到達する前に準平衡な流れが形成されていることがわかる。しかし、サブソーラー領域の上をカuspの方向に進むと状況は変わり、ATL の幅は大きくなるが、その位置は MP に近づく。カuspに近づく、ATL の幅は強く減少し (図 4a の濃い破線の台形の大きさが示すように)、非常に細くなり、ATL と



MP の位置が混在するようになる。

SEC の位置をより正確に定義するために、特に、L1、LB、L2 線が、(図 3a に示されるように) 尖点の高い高度で定義される SEC の異なる縁に対してどのように位置するかをより深く分析することができる。注意点として、SEC はより正確に以下のように定義された 4 つのエッジを持っている

(i) 上側の縁では、平行なイオンバルク流が、大きな尾部対流を伴う上向き ( $V_{\parallel} > 0$ , 磁気圏シース内、すなわち SEC の上方) から、非常に弱いほぼ「停滞した」尾部対流を伴う下向き ( $V_{\parallel} < 0$ , SEC 内) に変化しています。なお、上向き ( $V_{\parallel} > 0$ ), 下向き ( $V_{\parallel} < 0$ ) は、局所磁場と逆方向 (同じ方向) であることを忘れないように。

(ii) 極大端は、平行イオン束が  $V_{\parallel} > 0$  (SEC 領域外では強く上向き) から  $V_{\parallel} < 0$  (SEC 領域内では弱く下向きで太陽方向対流) に反転することによって特徴づけられる。

(iii) 一般に、赤道縁はカusp領域とデイサイドプラズマシートとの間のリンクのみを表す。Cai et al. (2015)は、極域と赤道縁は、より正確に、電子運動エネルギーが非常に高い (SEC の内側) と非常に低い (SEC の外側) フロントティアとしても定義できるかもしれないことを示している。

(iv) SEC の下縁については、まだ正確な定義が一般に提案されていない。しかし、現在の結果 (図 3b) は、電子密度が非常に低い値 (SEC の内側) から高い値 (下縁の下と上縁の上の高度) へと変化していることを強調しており、同様の変化がイオン密度にも見られる (Cai ら, 2015 の図 8c)。

SEC は、各集団の運動エネルギーが外側では高く、内側では弱いという特殊な遷移領域として現れ、また、密度は低いが磁場は高いという反磁性領域として確認された。これらの記述については、以下の 3 章でより詳細に分析する。

### 3, SEC と ATL

Cai ら(2015)は、カusp領域内でイオンと電子のダイナミクスが異なることを証明した。著者らは、イオン密度が高まる領域が、高エネルギーイオンが存在する領域よりもカusp領域の深部にまで広がっていることを強調した。このことは、多くのイオンが深いカuspに侵入するが、減速されていることを示唆している。このことは、図 5 に示すように、カusp領域近傍とカusp領域内の電子密度、電子運動エネルギー、イオン運動エネルギーの  $\text{Log}(MA)$  を、 $y=137.5$

にある子午面内に拡大プロットすることで確認できる。カスプを特定するための参考プロットとして用いた電子密度の図 5b では、電子侵入深さが長く（距離  $d1=8Re$ ）、角度範囲が大きい（距離  $d2=8Re$ ）ことが「漏斗型」の特徴であることが示されている。参考までに、SEC の位置（台形枠）をすべてのパネルで報告したが、SEC はサブソニックフロー領域（図 5a の青色部分）内にうまく位置していることがわかる。このプロットを比較すると、電子（及びイオン）は深く侵入することに成功していますが、プラズマ流が ATL (SEC の上端にほぼ隣接) を通ってサブハーフェニック領域になると減速されることが確認できます。また、カスプの形状や位置（図 5b）と ATL の特徴の関係を明らかにするために、基準線 L1, LB, L2 の位置も報告した。SEC の赤道側の端は線 L1 付近にあり、線 LB は SEC の極域側の端（図 3a で定義）にあることに注意しよう。ATL 幅の大きな変動(第 3 節)は、以下のような追加情報をもたらす。

(i) 図 3a は、SEC が主に ATL 幅の大きい線 L1 と LB の間の範囲に位置していることを示している。より正確には、プラズマの減速は線分 L1 付近の大きな空間 ATL 幅で漸進的に起こるが、この空間範囲（すなわち ATL 幅）は線分 LB、すなわち SEC の極方向端に近づくとき最小値に達するまで減少することがわかる。つまり、SEC の上端付近ではプラズマの減速が空間的に一様でないことがわかる。これは、図 5a、図 5b と同じスケールで対応する電子運動エネルギーを示した図 5c に示されています。一つは、線分 L1 周辺の SEC の部分（すなわち、SEC 内の緑色の領域）内の低エネルギー電子によって特徴付けられ、もう一つは、LB に近づく SEC の部分（すなわち、SEC 内の赤色の領域）内のいくつかの高いエネルギーをまだ持つ電子に相当する。最初の領域と 2 番目の領域は、それぞれ ATL 幅がまだ大きいところからかなり狭くなる場所に位置しています。このように SEC 内の電子運動エネルギーに強い不均一性があるのは、粒子がカスプ領域を通過する際に受ける 3 次元スパイラル効果によるものであると思われる。この点については、3 節で議論する。

(ii) 電子とイオン（ここでは示していない）の密度プロットは非常に似ているが、カスプ領域（L1-LB 間の領域）内の電子（図 5c）とイオン（図 5d）では、以下のように運動エネルギーが顕著に異なることがわかる。(i)イオンの運動エネルギーは電子とは対照的に SEC 領域内のほぼ全域で弱い。(ii)高エネルギー電子はイオンよりもずっと深くカスプ（SEC 下の赤い領域）に侵入することに成功し、実際に対応する電子運動エネルギープロットは、イオン運動エネル

ギーと対照的に電子密度カuspに似た「漏斗型」(赤い領域)を示している。これらの結果から、イオンは電子よりもカuspを通過する際に ATL (SEC の上縁の上/周辺) で減速されやすいことが示唆されます。

(iii) 図 5b は、電子の密度が高い(つまり粒子が SEC の下に溜まる)カusp領域と SEC 自体が主に線 L1 と LB の間に位置していることを明瞭に示している。また、LB-L2 間の角度範囲はリコネクション X 領域を含み、現在の子午面ではカusp領域の外側に位置している。この X 領域と、前述の LB 周辺に位置する SEC の領域、および SEC の下方の領域との間には、高エネルギー電子が連続して存在しているように見え、SEC 内で高エネルギーイオンの崩壊が観測されるイオンとは対照的である。しかし、図 5 は子午面上に限定されているため、一定の注意が必要である。子午面外での 3 次元分布が欠落しているのである。3 次元効果の重要性については、次の 3 節で議論する。

(iv) 次に、カusp領域 (L1-LB 内に定義) は、薄い ATL 幅 (LB-L2 範囲、L2 以上) で特徴付けられる領域と、日側に近づくと減少する濃い ATL 幅 (LA-L1 範囲) で特徴付けられる領域との間の角度推移領域として出現している。

(v) 子午線面外における電子とイオンのエネルギーを分析するために、より深い調査が行われた。この目的のために、子午線面に平行な(X-Z)面内で測定した運動エネルギープロットを Y 軸に沿って移動させたアニメーションが、明け方領域: 子午線面 ( $80 < y < 137.5$ ) と子午線面-夕方領域 ( $137.5 < y < 195$ ) のそれぞれで実行されるようになった。この手順を電子とイオンの運動エネルギーに別々に適用したところ、次のような結果が得られた。(i) 高エネルギー電子はまだ非常に深いカusp領域でよく観測される(最も深い位置は  $y = 138$  すなわち子午線面のごく近く); 対照的に高エネルギーイオンはカuspの中でそれほど深く観測されない; しかしこれらは子午線面の外側でより深い領域に達する ( $y = 140$  これはわずかに薄明領域である)。このようなイオンと電子の異なる振る舞いは、それぞれイオンと電子の 3 次元的な運動の違いに関連しているのかもしれない。この未解決の問題は、現在も調査中である。質量比の低下とグリッドサイズのスケージングは慎重に検討する必要がある。

(vi) 上で用いたアニメーションの手順により、子午面外でのカuspの開き角の推定値を得ることができる。子午線平面から移動する平面内のカuspの基準シグネチャとして高エネルギー粒子の位置を使用する。電子シグネチャ



はカスプの「漏斗」形状によく沿っているのが比較的正確であり（図 5c）、それは電子密度（図 5b）のそれと似ている。一方、イオンシグネチャについては、同様の方法が暫定的に適用されていますが、精度が低く、測定の不確かさの原因となっていることが分かっています。そこで、主に高エネルギー電子の結果に注目することにした(<https://www.youtube.com/watch?v=4O3bqd14v5g>)。夕暮れ時には、 $y=147$  の位置 ( $x=145$ ,  $z=170$ ) では高エネルギー電子は観測されなくなり、子午面からの開き角は  $28.6^\circ$  となった。明け方領域では、 $y=122$  ( $x=150$  et  $z=178$ ) で高エネルギー電子のサインが消え、子午面からの開き角は  $27.8^\circ$  となった。このことから、(a) カスプ軸の位置は主に子午線面の中央にあり（値は  $28.6^\circ$  と  $27.08^\circ$  でほぼ対称）、(b) 結果としてカスプの全開口角は  $55.68^\circ$  であることがわかる。この値は、同じ手順でイオン密度から推定された対応する値 ( $54.2^\circ$ ) とよく一致します。これらの値は、現段階でのカスプ角の予備的な推定値であり、さらなる解析が必要である。

イオンと電子の間でいくつかの違い ((i)SEC 自体の内部、(ii)カスプ内の侵入深さの違い) が観察されたが、これは本報告の範囲外であり、後の研究で分析する予定である。しかし、これらの違いは、次のような疑問を引き起こす：これらの「高エネルギー」集団が、イオンと電子のそれぞれについて、カスプの外側のどの領域から来るのかを決定することは可能か？この疑問については、さらなる研究が必要である。

#### 4. 結論

前年度に続き、3次元大域的シミュレーションにおいて、その正当性を検証するために、IMF 北の ATL とカスプ解析をさらに詳しくおこなった。本研究の目的は、カスプの特徴、SEC、ATL、カスプ内に析出する電子やイオンのフラックスとの関連性を確立することである。本研究は、北向きの IMF 配置に限定し、以前の研究(Cai et al., 2015)を拡張したものである。CLUSTER ミッションの実験観測により、ATL は主にカスプ領域と子午線面内で最初に証明・解析されているが、本シミュレーション結果は ATL の特徴を以下のように拡張している。

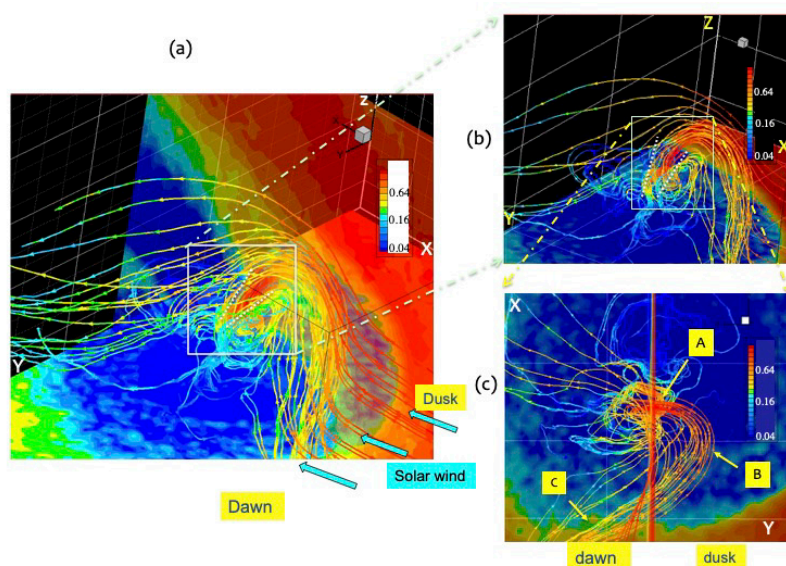
- (i) 子午面内では、ATL はより拡張されたスローモードパターンの中のサブレイヤーとして出現している。子午面内では、ATL はより拡張されたスローモードパターン内のサブレイヤーとして現れ、SEC の上縁にほぼ隣接して位置する。
- (ii) ATL はカスプの上だけでなく、サブソーラー領域や夜側へ移動すると外側

にも観測される。子午面上のカusp領域では、その厚さが最も薄いもの（0.25-0.5Re）から最も大きいもの（5.3Re）まで大きく変化しており、ATLを通るバルク流の制動がカusp内で均一ではなく、他の領域よりも優れた制動効率を持つ部分があることを示している。この厚みの変化は、カuspの角度範囲を特定するためにも用いることができる。

(iii) イオンフラックスの3次元流線は大きな渦巻き状の軌道を示し、その半径はカusp領域を通過する際に小さくなる。同時に、カusp内でのイオン降水時にフラックス強度が非常に強くなり、主にサブソーラー領域から、わずかに明け方側からのイオンに対応することがわかった。子午面におけるSEC以下の高エネルギーイオンの"見かけ上の"証拠は、サブソーラー/ドーン領域から放出され子午面を横切る大きな3次元スパイラル高エネルギーイオンのサインに過ぎないことが明らかになった。

まとめると、カusp領域での粒子降下において、イオンと電子の3次元構造とフラックスの局所的強度が自己無撞着に証明されたのは、著者らの知る限り初めてのことである。

これらの結果は、3次元の複雑なカusp特性を明らかにし、磁気圏物理に新たなる知見を与える。同時に、水星磁気圏シミュレーションコードの正当性の議論に寄与する。



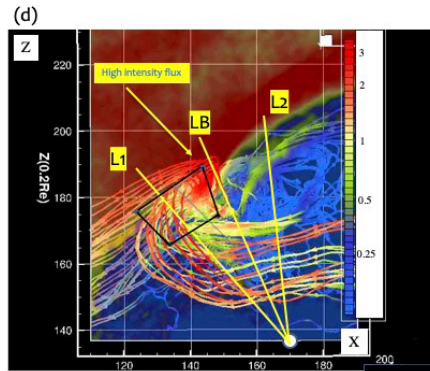


図 5 : IMF 北における、カusp領域におけるイオンフラックス流線の 3D 表示。  
 (a) 全イオンフラックスの 2 次元等値面を 2 つの異なる平面 ( $x$ - $y$  (赤道) 平面と  $x$ - $z$  (子午線) 平面) で表現し、カusp領域を透視しています。各流線に沿って色が変わり、イオンフラックスの局所的な強度を示している。太陽風は  $X$  軸に沿って流れている (青い矢印)。(b): (a)の白い四角の中のカusp領域を拡大したもの。(a)と(b)の白い点線は、漏斗状のカuspの境界を表している。3 次元イオンフラックスの流線は、フラックス強度が最大となるカuspに収束している (流線に沿って赤色) ; (c) パネル (b) の白い長方形内のカusp領域の拡大図。(d)カusp領域の拡大図 (夕方側から)。

**公表状況 (Publications) :**

**(口頭)**

Xiong, P. and D. Cai, Visualizing and Analyzing Magnetospheric Reconnection in a Northward IMF 3D Global MHD Simulation, AGU, 2021

Cai, D. and B. Lembege, Evidence of the Alfvén Transition Layer in the cusp region: Global 3D PIC simulation of the solar wind - Earth magnetosphere interaction, URSI GASS 2021, Rome, Italy, 2021. (Solicited and invited).

**(論文)**

Xinwei Lee , Yoshiyuki Saito , Dongsheng Cai , Nobuyoshi Asai, Parameters Fixing Strategy for Quantum Approximate Optimization Algorithm, IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, technical paper, 2021.