

3 磁気圏

3 Magnetosphere

3-1 磁気圏の形成とプラズマ領域の発生

3-1 Formation of the Magnetosphere and Magnetospheric Plasma Regime

小原隆博

OBARA Takahiro

要旨

磁気圏が形成される理由は、太陽風の動圧によって地球磁場が押し込められることにある。理想 MHD 過程だけが成立すれば、太陽風プラズマは磁気圏には侵入しないが、実際は非理想 MHD 過程を通じて、太陽風プラズマは磁気圏に侵入する。地球磁気圏に侵入したプラズマは、磁気圏内に一様に分布するわけではなく、プラズマシート、環電流領域などの特定の領域に集まる傾向を示すが、それは、磁気圏の大規模な対流運動に起因する。対流の促進は、磁気圏のトポロジーの変化(構造変化)を生み、磁気圏に嵐を引き起こす。磁気嵐は、高エネルギー粒子も製造する。そこでは、非常に効率のよい粒子の加速が行われている。本稿では、宇宙天気予報の学問的基礎である磁気圏物理学の現状を述べる。

The Earth's magnetosphere is formed by the plasma flow from the Sun; i.e. solar wind. This solar wind particle can enter the magnetosphere through non-MHD processes and produces specific regions of plasma. This is due to the convection motion seen in the magnetosphere. An enhancement of the magnetospheric convection causes storms and substorms in the magnetosphere. Highly energetic particles can be produced through very efficient acceleration processes during the storms. In this paper we describe the fundamental physics of the magnetosphere, aiming a transition of researches to the Space Weather forecast.

[キーワード]

磁気圏, プラズマ, 対流, 嵐, エネルギー粒子

Magnetosphere, Plasma, Magnetospheric convection, Storms and substorms, Energetic particles

1 磁気圏の形成と磁気圏のプラズマ構造の概観

地球は磁気圏とよばれる独自の空間を、地球周辺の宇宙空間に持っている。この磁気圏の構造は、これまで数多くの人工衛星によって詳しく究明されてきた。図1に、磁気圏の手前と上半分切り取った形で、その構造を示す。中心にあるのは地球で、左から、太陽風が吹き付けてい

る。磁気圏は、その前面が圧縮されるが、地球の夜側は、太陽風によって引き伸ばされて磁気圏尾部(磁気圏テール)を形成する。磁気圏を解説するにあたり、各部に付けられている名称について触れる。まず、磁気圏境界面、この内側が磁気圏である。赤道面の南北両側の広い空間は、ローブと呼ばれる。ここには、地球の極域から伸びている磁力線が、夜側に長く引き伸ばされている。磁力線の向きは、北半球では地球

向き、南半球では反地球向きである。

ローブ領域には、太陽風のプラズマ粒子が侵入している。磁気圏境界面に近いローブは、マントルと呼ばれている。北側のローブと南側のローブが接する赤道面付近は、磁場が弱くなる。この領域には、熱いプラズマがたまっていることから、プラズマシートと呼ばれている。地球近傍の領域には、特徴のあるプラズマ領域が存在する。プラズマシートのプラズマよりも更にエネルギーが高いプラズマが、地球を取り囲むようにして存在している。磁気嵐を起こすリングカレントや、バンアレン帯として知られている放射線帯である。さらに地球に近い領域には、電離層プラズマが上方に拡散していて、プラズマ圏を形成している。プラズマ圏には明瞭な外側境界が存在し、プラズマポーズと呼ばれている。

プラズマ領域という観点から整理してみると、(1) 太陽風に似た粒子が存在する境界層領域、(2) 中程度 ($\sim \text{keV}$ 程度) のエネルギー粒子が存在するプラズマシート領域、(3) 高エネルギー (数 10 keV 以上) の粒子が存在する内部磁気圏領域、そして (4) 冷たいプラズマが存在しているプラズマ圏領域が、本章で扱う範囲である。オリジンの観点からは、(1) から (3) は太陽風起原のプラズマで、統一的な性質として、地球に近づくほど、エネルギーが高くなる。これに対して (4) は地球起源のプラズマである。それらは、完全に分離されたものではなく、互いに影響を与えつつ共存している。

磁気圏の物理に先立って、用語について触れておく。磁気圏の太陽に面した側を昼側の磁気圏、太陽と反対側を夜側の磁気圏ということが多く。これは、地球を基準とした言い方である。同様に、朝方側、夕方側という言い方をする。図1は、夕方側から磁気圏を見た図である。夜側の磁気圏の特徴は、非常に遠方まで磁気圏が伸びていることで、特に磁気圏尾部と呼ぶ。

2 太陽風粒子の侵入と外部プラズマ領域

2.1 マグネトシース粒子

太陽風は超音速の流れである。太陽風に乗っ

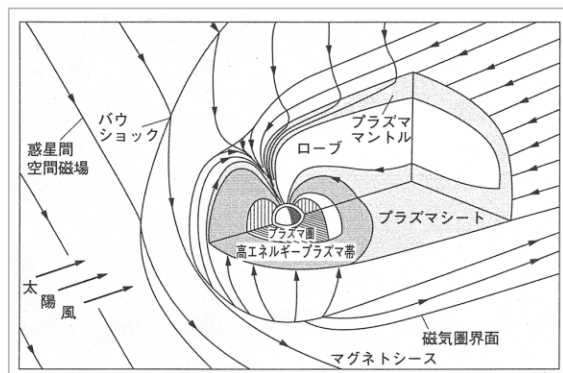


図1 地球磁気圏の構造

た系で考えると、地球は超音速で太陽風プラズマ中を移動している。太陽風が磁気圏にぶつかるために起きる減速と圧縮の効果は、音速として太陽風をさかのぼって上流に伝わることはできない。したがって、衝撃波が形成されることになり、実際、人工衛星は磁気境界面の外側に衝撃波が存在していることを確認した。この衝撃波はバウショックと呼ばれているが、船の舳先（バウ）にできる波に似ていることによっている。

バウショックと磁気境界面に挟まれた領域が、マグネトシースである。この領域のプラズマは、太陽風プラズマの性質に近いが、バウショックの通過に伴い加熱される。マグネトシース内のプラズマ流は、太陽風速より若干速度が落ちるが、大局的には磁気境界面に沿ってその方向を変えていく。太陽風磁場がシースでどの方向を向くかについては、ガスダイナミクス理論による計算、MHD (電磁流体力学) に基づく計算が行われているが、いずれのモデルも実測とよく合っている。

2.2 マグネトポーズ領域

地球の磁場は、双極子的に広がっている。太陽方向から超音速のプラズマの流れ（太陽風）が押し寄せてくると、地球の磁場は、前面（昼側）で圧縮され、明瞭な境界を形成する。太陽風の動圧と磁気圏の磁気圧がつり合う面がこれで、磁気圏境界（マグネトポーズ）と呼ばれる。その距離は、地球中心から 11 倍 R_e (R_e は地球半径) 程度である。太陽風の動圧が大きくなると、磁気圏境界は地球に近づく。

磁気境界面を3次的に解こうとするとき、太

陽風側の圧力分布を正しく見積もる必要がある。太陽風は、基本的に地球を回避して流れていくとする。境界面に垂直な方向及び平行な方向のストレスを正しく評価して、計算した磁気境界面の様子を図2に示す。ここには、興味ある構造が示されていた。それは、南北に1か所ずつあった。すべての磁力線が1点に集中し、磁場強度が0になる中性点がそれで、この領域はカスプと呼ばれた。以下の章で詳しく述べるが、カスプは磁気圏対流のドライバーとして重要である。

地球の磁場は、太陽風粒子の侵入を拒んでいる。ほとんどの太陽風粒子は、地球をかすめて吹き抜けていくが、太陽風磁場が南を向くと、大量のエネルギーが、磁気圏に注入される。このことは、Dungy (1963) が最初に指摘し、多くの注目を集めた。図3に示すように、太陽風磁場が南を向いていると、地球前方の境界面で、磁力線同士の結合が起こる。太陽風の磁力線とつながった地球磁力線は、開いた磁力線となり下

流(夜側)へと運ばれる。太陽風の運動量が、磁気圏に注入されるとともに、太陽風粒子は、磁気圏に侵入する。こうして磁気圏の夜側に、大量の運動量と磁場のフラックスが蓄積される。

では一体、どのようにして磁力線の再結合が起こるのだろうか。図4は、紙面に垂直な平面(磁気中性面)の上下2本ずつの反対向きの磁力線を示している。これらを近づけていくと、アンペールの法則により、境界に電流が発生する。この電流を磁気中性面電流と呼ぶ。電気伝導度が無限大と仮定すると、いくら磁力線が近づいても、強い電流の壁ができるだけで、磁力線は隔たったままである。もし、中性面のどこかで、電気抵抗が生じたとすると、そこでは、磁場のエネルギーが消費される。周囲の磁場は、この消失を補うように、その領域に向かって拡散していく。図4(c)には、X点として磁力線の集中が起こる場所が示されているが、そこで新たなつながり換えが起こる。図4(d)で示された新しいペアの誕生が磁力線の再結合といわれるものである。

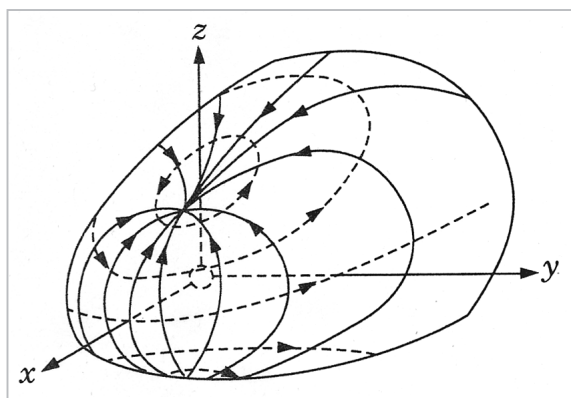


図2 磁気圏境界面の3次元表示。実線は磁力線を、点線は境界面を流れる電流を示す(Midgely, 1963)

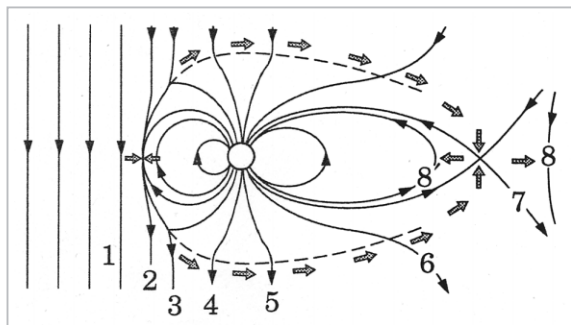


図3 磁気圏の境界(太陽側)で、磁力線は切断され、惑星間空間磁場とつながって磁気圏尾部が形成される。下に示す数字(1～8)に従って、磁力線が運動する

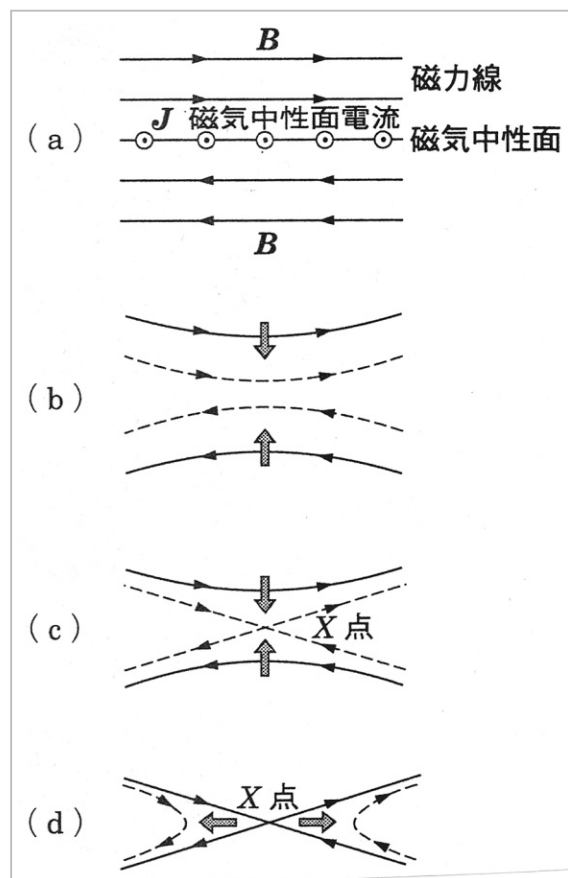


図4 磁力線の再結合を示す模式図

2.3 カスプ粒子

磁気圏の前面、高緯度の領域に特徴的な磁場の配位が見られる。磁気圏の前面の閉じた磁力線と、太陽風の磁場と再結合して尾部のほうに流されている磁力線の境界に見られるこの構造は、カスプと呼ばれている。図5(a)で黒く塗られた領域(カスプ)には、太陽風プラズマが直接地球目掛けて降下している。カスプ領域の磁力線を地球にたどると、昼側の磁気緯度75度付近に対応する。

カスプ粒子はマグネトシース粒子とよく似た性質を持っているが、最大の特徴は磁力線に沿って下向きに加速を受けていることである。人工衛星が電離層上空で降下してくる電子を観測しているが、約100ボルト程度の加速を受けている。また、ロケット実験の結果、電子は間欠的に降下していた。降下電子は、エネルギー分散(高いエネルギーほど、先に落ちる)を伴っており、詳しい解析から、電子群の注入領域は、磁気圏前面の赤道域(磁力線の再結合領域)付近であることが判明している。

カスプを南北に切って飛翔する人工衛星は、降下しながら高緯度にドリフトしていくイオンを観測している。降下エネルギーが低い程、高緯度まで流れていくこの現象は、極冠域(オーロラで囲まれた領域)を夜側に向かう対流で説明される。

2.4 マントル粒子

図5に示したように、マグネトシースのプラズマはロープに侵入し、マントルと呼ばれる領域を形成する。表1に、磁気圏各領域におけるプラズマパラメータを示すが、マントルプラズマは、密度がほぼ0.01/cc、イオン温度 300 eV、電子温度 50 eVで、ロープの磁場強度がシースに比べて大きいことから、粒子のエネルギーの磁場のエネルギーに対する比である β 値は 0.003程度になる。マントルプラズマの一部は、その後更に移動を続け、プラズマシートに入っていく。

2.5 LLBL 粒子

図5にLLBLと示されている領域は、低緯度境

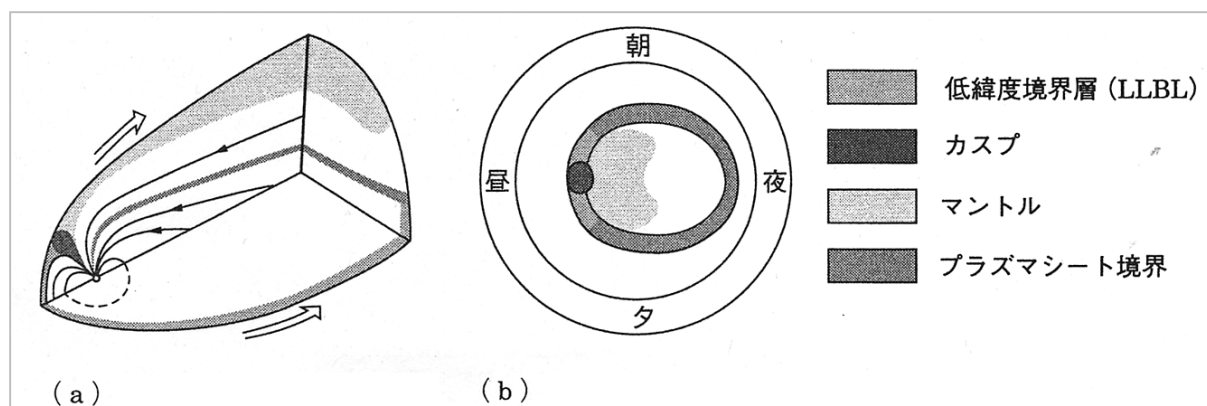


図5 (a) 磁気圏の断面図。北半球の子午面、夕方側の赤道面で切っている。(b) 各領域の極域電離層への投影

表1 磁気圏各領域におけるプラズマパラメータ

	マグネトシース	ロ ー プ	プラズマシート 境 界 域	プラズマシート 中 心 部
密 度 [cm ⁻³]	8	0.01	0.1	0.3
イオン温度 [eV]	150	300	1 000	4 200
電子温度 [eV]	25	50	150	600
β 値	2.5	0.003	0.1	6
磁束密度 [nT]	15	20	20	10

界層と呼ばれている領域である。この領域を人工衛星で横切ると、外側には太陽風プラズマが磁力線を後ろに引き伸ばしながら流れる層があり、内側には太陽風と磁気圏プラズマの混合層がある。内側では、ほとんど流れがなく、プラズマの加熱が起こっている。前述のマントルは、ローブとの間に明瞭な境界を形成していないのに対し、LLBLは極めてはっきりとした境界を持っている。極域電離層にLLBLを投影するとカスプの低緯度側になり、昼側を中心に朝夕方向数時間にわたり広がっている。シースで約100 eVであったイオン温度は、LLBL内で次第に上昇しプラズマシートとの境界では2 keVに達する。

典型的に約1 Re(地球半径)の厚さを持つLLBLの成因については、境界面付近に存在する速度勾配(外は速い流れがあり、内は止まっている)が、境界を波立たせ、大きく発達した波がプラズマを混合すると説明されている。この混合過程により、太陽風プラズマはLLBLに侵入できることになる。

2.6 ポーラレイン

太陽風プラズマの磁気圏への侵入という観点で見えてきているが、極冠域(オーロラに囲まれた領域)に降下してくる電子が観測されている。これをポーラレインと呼んでいる。これまでに研究で、ポーラレインの起原として、太陽風中の高エネルギー部分(ストロールと呼ばれる)が同定されている。具体的には数百 eV 程度のエネルギーを持つ電子で、太陽から外向きに磁力線に沿って運動していく性質がある。衛星によるこれまでの観測から、ポーラレインは北半球(南半球)では、惑星間空間磁場(IMF)がaway(toward)の時に見られることが見いだされた。IMFと地球磁場の磁気再結合を考えると、北半球の磁力線は、IMFがawayのときは太陽に根を持つ磁力線と結合する。これによって、ストロール成分の供給を受けることになり、ポーラレインが観測されることになる。これに対して、南半球の磁力線は、太陽とは切り離され、ストロール成分は入らない。

以上はIMFが南を向いている時の説明であるが、近年の研究でIMFが北を向いている時も、極冠域には電子降下が起こっていることが分か

っている。この場合の電子降下は、スパイク的に起こっていて、前述のポーラレインが極めて一様に起こっていることと対照的である。スパイク状に降下する電子は若干の加速を受けていて、注意してみるとオーロラを発生させていた。このオーロラは、sun-aligned arc(太陽に向かったオーロラの筋の意)と呼ばれ、磁気圏に入ったマントル粒子が、北向きIMF条件下で極冠域に降下してくると考えられている。これは、従来、ポーラシャワーと呼ばれている降下電子群であるが、その発生メカニズムは、まだ確定していない。

3 磁気圏対流とプラズマ領域の形成

3.1 磁力線の循環

図3に戻って考える。磁気圏前面で再結合した磁力線2は、その後太陽風の流れとともに3→4→5→6と後方に流れていく。前章で述べたように、太陽風プラズマは、磁気圏に侵入(マントル)し、後に述べるプラズマシート粒子の起原となる。これらの磁力線の移動で重要な過程は、7番の磁力線で起こる。北半球のローブから赤道に接近した磁力線と、南半球のローブから赤道域に近づいた磁力線は互いに逆向きであり、磁力線は再結合を起こす。その結果、一つは完全に閉じて地球側に向かい(番号8')、一つは完全に開いて地球と反対方向に切り離されていく(番号8)。磁気圏尾部の磁力線は、太陽風によって引き伸ばされている。この力が弱くなる、あるいは消滅すると、磁力線はもとに戻ろうとする。8'番の磁力線は、磁力線の張力により、地球に向かって動き出す。

3.2 プラズマシート

磁気圏尾部において、赤道面付近は特殊な領域である。すなわち、熱いプラズマがシート状になっていて、プラズマシートと呼ばれている。密度は、1/cc以下ではあるが、平均温度はイオンで数keV、電子で数百 eVであり、粒子の総エネルギーは3 keV/cc程度である。このプラズマシートの領域は、磁場が弱く、磁気的には中性に近い領域である。プラズマシートのプラズマ圧は、大局的には、ローブの磁気圧と釣り合っ

ている。

プラズマシートが非常に明瞭な境界(プラズマシート境界)を持つ理由は、磁気圏尾部～120 Re程度のところにXポイント(磁気再結合の起こるところ、図3の7番に当たる)があることによる。ローブの磁力線は開いており、太陽風プラズマは基本的に流れ去る。これに対してプラズマシートの磁力線は閉じていることから、いったん侵入したプラズマは磁場に捕捉されることになり、密度が増加する。プラズマシートの圧力は中心(赤道面)にいくに従って高くなる。この圧力勾配により、プラズマシートには電流が流れる。北半球のローブと南半球のローブでは、磁力線の向きが互いに逆であるので、プラズマシートを流れる電流は、共に夕方側を向く。遠方のプラズマシートでは、ローブの磁気圧とプラズマシートのプラズマ圧が釣り合っている。地球に近い領域では、X方向(太陽と地球を結んで貫く方向)の釣り合いについて考えると、プラズマシートの磁力線は、磁気張力により地球向きに力を受ける。これが、プラズマ圧の勾配(∇p)と釣り合うため、プラズマシートは地球側にいくほど、圧力が高くなっている。

図3において、遠尾部で結合した磁力線8'は、地球に向かって運動を始める。もとの安定な双極子磁場に復元しようとして、地球向きの運動が起こり、プラズマシートの中には絶えず地球向きの流れが存在することになる。プラズマシートの地球向きの流れは、速い時で秒速数百kmである。この速度は再結合の効率や、それまでのプラズマシートの伸び具合など(尾部電流の発達具合)によって決められていると考えられている。先の説明と合わせて考えると、プラズマシートの流れは、プラズマ圧の低い方から高い方に向かう流れである。張力がポンプのように作用し、磁気エネルギーがプラズマの内部エネルギーに変換され、内側プラズマシートに高压部が生成される。

3.3 プラズマ圏

磁気圏には、図3で示すような大規模な対流運動があることは、プラズマポーズの発見(1965年)により実証された。地球の超高層大気は、太陽紫外線により電離され、電離層を形成する。こ

の電離プラズマは、地球の重力に逆らって、上方に拡散していく。拡散は地球を囲む非常に広い範囲にわたり起こるが、地球半径4倍程度のところで、急激に密度が減少する。これがプラズマポーズであり、その内側はプラズマ圏とよばれる。プラズマ圏を構成する粒子は、電離層起源であり、エネルギーが数eVと非常に低い。

プラズマ圏のプラズマの運動には、二つの成分がある。一つは地球の回転に追従する運動(共回転運動)で、もう一つは、太陽に向かう磁気圏の対流運動である。以上の運動を基に、粒子軌道を赤道面で計算してみると図6のようになり、これでプラズマ圏の成因の基本が理解できる。地球から遠いところでは、粒子は一樣に太陽方向に流れていく。地球に近づくと、粒子軌道が変えられ、図6に示すような2種類の軌道を分離する境界線(面)が涙状にできる。外側の軌道は閉じていて、磁気圏境界面に接続する。一方、地球に近い側は、軌道が閉じていて粒子は外に漏れ出ていかない。この境界面がプラズマポーズであり、内側のプラズマ圏は電離層からの常なるプラズマの補給で、高い密度になる。外側のプラズマは、磁気圏境界面(マグネトポーズ)に流れ出していくので、密度は低い。

プラズマ圏の実際の形は、完全な涙状ではない。これは、磁気圏電場(対流電場)が完全に一

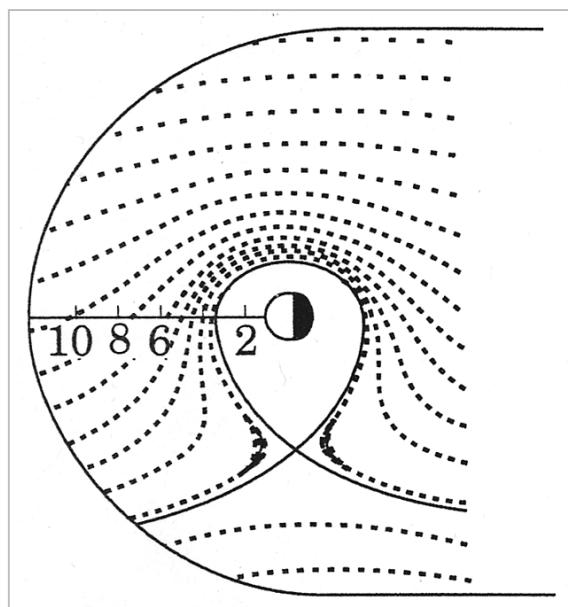


図6 ゼロエネルギーのプラズマの磁気圏赤道面での軌跡。磁気圏の対流電場を、0.3 mV/mとして計算してある

様ではないことによっている。プラズマ圏の実際の形状にマッチする幾つかの電場モデルが提出されているが、共通して、夕方側に張り出した構造（バルジと呼ばれる）や、朝方側で地球に接近するプラズマポーズの構造が見られる。磁気圏の電場が急に増大した場合、境界面は地球に近づき、プラズマ圏は小さくなる。

4 サブストーム

4.1 プラズマシートの変化

プラズマシートが時間と共に非常に薄くなっていくことがある。と同時に、磁力線が夜側に非常に引き伸ばされた状態になる。磁気テンション、プラズマ圧が増加していくが、あるタイミングで、急激にリラックスし、磁場は双極子化し、プラズマ圧が減少する。サブストームがトリガーされた瞬間である。サブストームとは、歴史的に命名された名前であり、実際はオーロラ嵐と呼ぶべきである。太陽風磁場が南を向くと、磁気圏対流が強化される。これに伴い、オーロラオーバルが拡大し、プラズマシートは薄くなって、その磁場はより“尾”らしくなる。これを成長相と呼び、1時間くらい続く。しかし、この状態はある程度以上は続かず、爆発相が始まる。ここで、オーロラの急激な輝きが始まるが、同時に引き伸ばされたプラズマシートの磁力線が元に戻ろうとして、プラズマシート中に速い地球向きの流れが発生する。この後、プラズマシートは厚くなり、プラズモイドと呼ばれるプラズマの塊が、反太陽方向に放出される。

4.2 サブストーム理論

サブストーム研究は、長い歴史を持っている。しかし、何がサブストームをトリガーするか、どのようなメカニズムなのか、といった基本的な問題については、まだ十分に答えられていない。しかし、近年の人工衛星観測やコンピュータシミュレーションによって明らかになってきた点も多い。以下、現在試みられている幾つかの説明を紹介する。

* 電流寸断モデル

磁気圏夜側赤道域の磁場は、非常に引き伸ばされた形状をしている。この磁場の変型は、赤

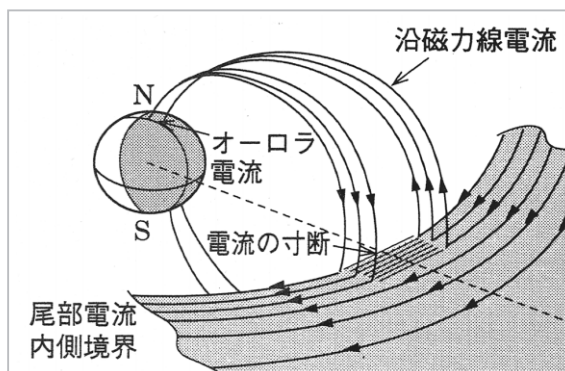


図7 サブストーム発達相における磁気圏尾部の電流構造。赤道域を夕方側に向けて流れる電流が寸断され、極域に流れ込んでいる (Clauer, 1974)

道面を夕方側に向かって流れているプラズマシート電流によっている。尾部電流とも呼ばれているこの電流は、サブストーム時、流れが寸断されて地球の極域に流れ込み、オーロラ西向き電流として夕方側に回り込んだ後に、再び磁気赤道面に戻ることが観測されている（図7参照）。この3次元的な電流構造は、カレントウエッジと呼ばれ、「くさび」の幅は70度程度、地球半径6倍程度にあり、総電流量は100万アンペア以上ある。この説明は、電流寸断モデルと呼ばれ、電流の寸断がオーロラ爆発を開始させるとするものである。

この説明は、オーロラ爆発が最も赤道側のアークから起こることに着目したもので、観測をよく説明している。ただ、赤道電流がなぜわざわざ迂回しなければならないかを理解することは難しい。赤道域プラズマシート中の電気抵抗が異常に高まり、赤道域には電流が流れることができなくなり、電気抵抗の小さい極域電離層を迂回するという説明がなされている。電流の切断では、大きな磁場振動も観測され、理想MHDの範囲を超えた過程が起こっていることを、これは示唆している。

* NENLモデル

前述の電流寸断モデルと異なった考えがある。地球に近いところに磁気再結合は発生し、新しいX点を作り、これがサブストームを起こすというモデルである。このX点は、NENL (Near Earth Neutral Line) と呼ばれ、衛星の観測によって、地球の夜側 20 Re (地球半径) 以上の遠方で形成されることが明らかになっている。NENL

は、反地球方向にプラズモイドを放出するのではなく、地球向きに速いプラズマ流を生成する。このプラズマの速い流れが地球近くに達すると、オーロラの爆発が起こると考える。この流れが、同時に磁場も運び、磁場の双極子化が発生する。

NENL が突然激しく発達する原因は、やはり理想 MHD の範囲を超えた現象である。NENL は、サブストームを引き起こす基本要素として重要である。NENL による地球向きの速いプラズマ流を制止することで、サブストームはトリガーされるものと思われる。X = -10 Re 付近での減速による速度シアあるいは渦の生成が、磁気圏尾部電流の寸断を引き起こすものと思われるが、理論的な説明はこれからである。

* 状態遷移モデル

引き伸ばされた磁気圏尾部の状態は、極度の緊張状態であり、基底状態である双極子磁場の状態に戻ろうとする傾向がある。ある瞬間に起こるトポロジーの変化(状態遷移)がサブストームの開始であり、これによって磁気圏は引き伸ばされた状態から、双極子化した状態に移行する(田中、2000)。この考えは、状態遷移モデルと呼ばれているが、形状の変化だけではなく、対流構造が変わることが重要である。この理論では、サブストームのオンセットでは、内部磁気圏での圧力上昇と双極子化、地球に近いプラズマシートでの地球向きの速い流れ、NENL の形成が見られ、サブストームの回復相では、プラズマシートの厚さが増す様子が見られる。

ほかにも、太陽風磁場が急に北向きに転じたことによる対流減速過程が、サブストームをトリガーするという議論や、磁気圏-電離圏の結合の不安定に起因する説明もある。現在のサブストームの説明は、一つの統一されたシナリオに向けて収束を始めているが、ここで述べた NENL の発生、尾部電流の寸断は共に説明されなければならない。

4.3 オーロラ粒子

1957 年に始まる人工衛星の時代に入って、オーロラを起こす粒子に関する研究が著しく進んだ。オーロラは、比較的はっきりと光るオーロラ(地上のカーテン状オーロラに対応)と、ぼん

やり光るオーロラに大別されるが、前者をディスクリットオーロラ、後者をディフューズオーロラと呼んでいる。図8に模式図を示すが、昼側には放射状に伸びるディスクリットオーロラがある。夜側の真夜中より少し前の時間帯を中心に、カーテン状オーロラが出現する。これに対して、ディフューズオーロラは、真夜中から朝側にかけての時間帯ではかなり明るいオーロラになるが、夕方側では暗いという特徴がある。

磁力線に沿った上向き電流域では、磁気圏の電子が電流を担うが、密度が少ないことから、それらを加速することによって電流をまかなっている。加速は時には 10 kV にも達することがある。衛星で、加速の起こる様子をくまなく調べた結果、加速は非常に空間的に狭い領域で起こっていることが分かり、加速域と名付けられた。図9に模式図を示す。加速域の高さ方向の幅は、100 km 程度であり、地上 6,000 km を中心に、3,000 km から 12,000 km まで広がっているのがほとんどであるが、これが 5~10 km/s の速度で、下方に向かって移動しているケースが多い。この加速の特に強まる領域からは、強い電波が放射されており、オーロラキロメートル電波として観測されている。図9(右)は、この領域の電場の様子を、ポテンシャルで示している。地球に近づくにつれて、ポテンシャルは大きくなり、磁気圏側の電子はこのポテンシャルによって大きく加速され、地球大気に突入する。ディスクリットオーロラを起こす電子は、これらの加速された電子である。磁力線方向に電場を発生させる機構として、以下のような異常抵抗モデルが提案されている。沿磁力線電流があるしきい値を超えると、プラズマに電流駆動不安定が起こり、この波動により異常抵抗が発生する。次に、この抵抗によって、沿磁力線電場が作られ、それによって電子が加速される。オーロラ電子がこのような仕組みで加速されているという観測的証拠は幾つかあるが、まだその完全な解明には至っていない。

これに対して、ディフューズオーロラを起こす粒子は、プラズマシート粒子(~数 keV 程度の温度を持ったマックスウェル分布)に酷似していて、ほとんど加速を受けていない。ディフューズオーロラのもう一つの特徴は、降下プロトンもし

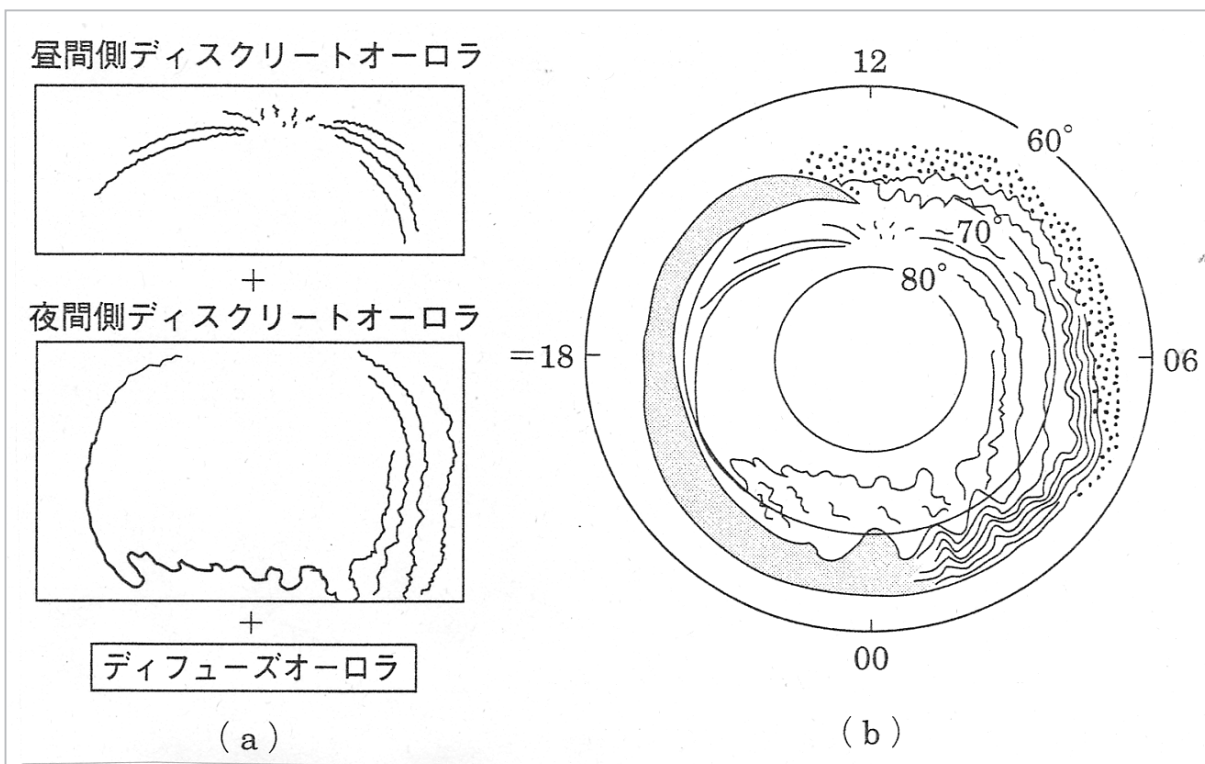


図8 オーロラオーバルを構成するディスクリートオーロラと、ディフューズオーロラ。磁力線に沿って上向きの電流が流れる領域で、ディスクリートオーロラは激しく輝く

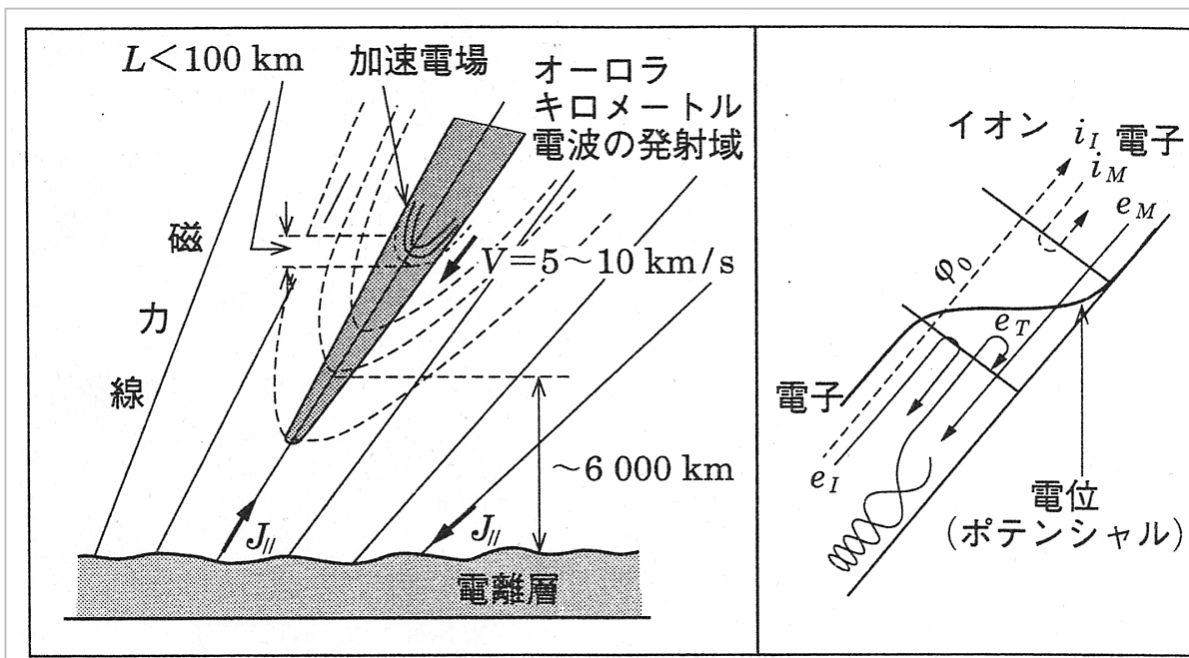


図9 オーロラ粒子の加速域の様相(左は空間分布を、右は電場のポテンシャルを示す)(大家、1984)

ばしば見られることである。降下プロトンのエネルギースペクトルも数 keV 前後の平均エネルギーを持つマクスエル分布で、プラズマシートの地球近傍で観測される粒子に近い。このことから、プロトンオーロラを含めたディフュー

ズオーロラは、プラズマシート中心部から降下してくると考えられている。粒子を降下させる機構としてピッチ角散乱がある。強い波動により、例えば磁場の強度が大きく変化すると、粒子のピッチ角は変化し、ロスコーンに入った粒

子は、磁力線に沿って降下する。この仕組みで、ディフューズオーロラが生成されているという観測的証拠が、これまでに幾つか得られている。

5 高エネルギー粒子の発生

5.1 磁気嵐

地球のほぼ全域にわたって発生する磁場の減少は、フンボルトにより19世紀の初頭に初めて報告された。図10は、赤道付近の世界の4か所の観測点のデータを平均して算出したDst指数を、太陽風の電場及び動圧とともに示している。Dstのマイナスは、磁場の減少を示すが、磁気嵐の主相が9時30分に起こっている。磁場の減少が起こっている期間を磁気嵐の主相、磁場強度が戻っていく期間を回復相と呼ぶ。磁気嵐の主相は、数時間から1日程度続くが、回復相は長いときでは1週間に及ぶこともある。磁気嵐は、太陽風の動圧及び太陽風の電場の異常増大による。

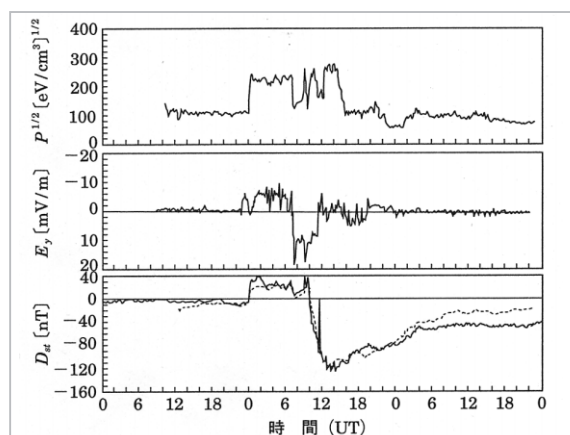


図10 磁気嵐の一例。上から太陽風の動圧、電場、そしてDst指数(Burton, 1975)

0時に地上磁場の上昇が見られるが、これは太陽風の動圧の上昇により、磁気圏が圧縮されたことによる。この磁場の急激な上昇はSCと呼ばれ、SCの発生から主相の開始までを初相と呼ぶ。主相の開始は、太陽風の電場の夕方向き(E_y)成分の急激な増加によって起こされる。初相の継続時間は0から24時間以上と幅がある。これは、太陽風磁場がいつ南を向くか(夕方向きの電場がいつ大きくなるか)によっている。

5.2 環電流

磁気嵐の原因は、赤道を環状に取り巻く電流(環電流)である。電流を担う粒子は、数10 keVのイオンと10 keV程度の電子であるが、ほとんどはイオンの作る電流によっている。磁気嵐が起きるメカニズムについて、多くの研究者が一致するところは、大きな西向きの電場によって、地球向きのプラズマシート対流を促進し、高エネルギー粒子を地球近傍の領域に注入するものである。図11に、その様子を模式的に示すが、イオン、電子ともにプラズマシートから地球近傍に輸送されている。地球に近づくにつれてプラズマシートの熱い粒子は、磁場勾配によって大きく軌道を変え、プラスの電荷を持ったイオンは、西向きにドリフトし、マイナスの電荷を持った電子は、東向きにドリフトするようになる。イオン、電子ともに、2種類の軌道を分離する境界線(面)が存在し、それより内側へは、プラズマシートのプラズマは侵入できない。この侵入限界が、プラズマシートの地球側境界である。図11において境界面の内側は、軌道は閉じている。磁気嵐を起こす環電流は閉じた軌道の

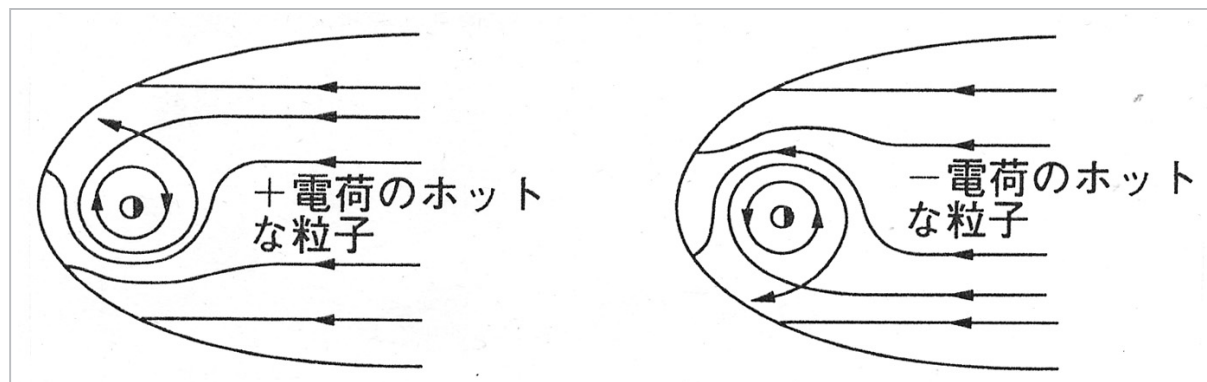


図11 +と-の電荷を持った粒子の磁気圏内でのドリフト。+の電荷を持ったイオンは夕方側で地球に近づく。電子は逆に、朝側で接近する

粒子が発生させる電流である。ここで、プラズマシートの粒子を境界面の内側に押し込む機構が必要になるが、多くの研究者は、対流電場の時間変化を考えている。激しく揺らぐ電場を感じて、粒子は環電流の領域へと輸送されていく様子が、シミュレーションで示され始めている。

図12は、環電流を発生させる高エネルギー粒子の空間分布を示す。横軸はL値で、縦軸は30～310 keV/qの粒子のエネルギー密度である。磁気嵐の大きさによって区別しているが、大きな磁気嵐では、通常の約10倍のエネルギー粒子が観測されている。そして、粒子の分布が、大きな磁気嵐ほど地球に近づくことを観測は示している。プラズマの運動が時間的に緩やかであると考え。この時、圧力勾配は、 $J \times B$ (電流×磁場)の力と釣り合う。図11から分かるように、プラズマ圧は $L > 3$ の領域では、地球から離れるに従い低下する。発生する環電流は、地球磁場が北向きであることから西向きになる。これが、磁気嵐時に赤道などの地球磁場を減少させる原因となる電流である。Lが小さな($L < 3$)領域では、圧力勾配が逆になり、東向きの電流を流すが、全体に規模が小さく、前述の西向き電流が勝る。その結果、Dstがマイナスになる。

この領域に注入された粒子(特にイオン)は不安定である。すなわち、中性粒子や電子との電荷交換によって、急速に消滅していき、磁気嵐は終息する(5参照)。

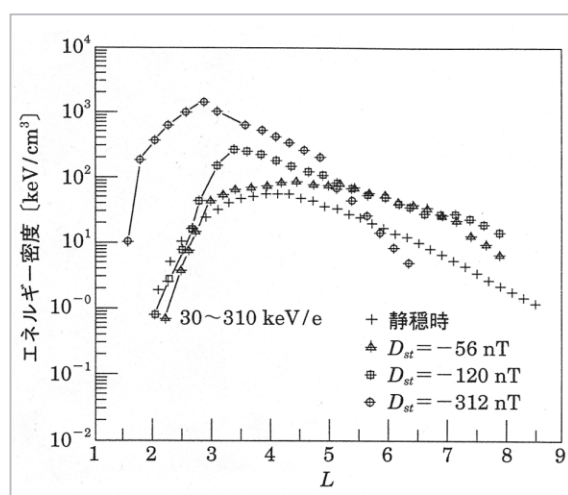


図12 30～300 keV/qのエネルギーイオンの動径方向の分布。大きな磁気嵐ほどイオンの分布は地球に近づく様子が顕著である(Chen 他, 1997)

5.3 放射線帯粒子

1958年に打ち上げられたエクスプローラ3号が、放射線帯の2重構造を明らかにした。地球に近い領域は内帯と呼ばれ、高エネルギー(>50 MeV)のプロトンが主成分である。これに対して遠方の外帯は、1 MeV以上の電子が主成分となっている。内帯にも1 MeV以上の電子が存在しており、電子の分布は内帯と外帯の間に明瞭なスロット(すき間)を有している。時間変動が激しいのが外帯で、上下に2桁以上変動することは珍しくない。特に磁気嵐が起これと、外帯電子のフラックスは増加することがある。図12に、一例を示しているが、この期間、数回の磁気嵐が起きている。共通した性質として、磁気嵐に伴って、フラックスの増大が起きている。特に、 $L = 3 \sim 3.5$ において、4月に起きた磁気嵐で顕著な増加が起きている。増加は1～2日で起こり、その後2週間程度のゆっくりした時定数で、フラックスは減少していく。

放射線帯外帯の更に詳細な変動は、最近の衛星観測から明らかになってきた。図14は、あけぼの衛星が観測した放射線電子分布の時間変化である。横軸は時間で、縦軸はL値である。その場の放射線電子フラックスをカラーコードで示している。11月3日23時に磁気嵐が始まり、4日12時に磁気嵐はピークに達し、Dstは-120 nTを記録した。あけぼのの観測は幾つかの興味ある事実を示している。主相の開始とともに、外帯が消失していること、磁気嵐の主相の終盤から回復相にわたり外帯電子フラックスは回復し、5日12時までに、磁気嵐の前の状態まで回復し、その後は前のレベルをしのぐまで回復している。

放射線帯外帯電子量の変動については、消失のメカニズム、再出現のメカニズムについての研究が、目下、精力的に行われている。消失について考えられていることは、磁気嵐開始時の巨大な対流電場で、この電場の発達により外帯粒子は、磁気圏前面(太陽方向)に運ばれ、消失すると考えられている。また、リングカレントの発達により、ローカルな磁場強度が減少して、断熱的にエネルギーを下げる効果も見積もられている。この場合、電子の速度分布関数が総体として、ゼロエネルギーに寄るので、高エネルギー部分のフラックスは減少する。電子の速度

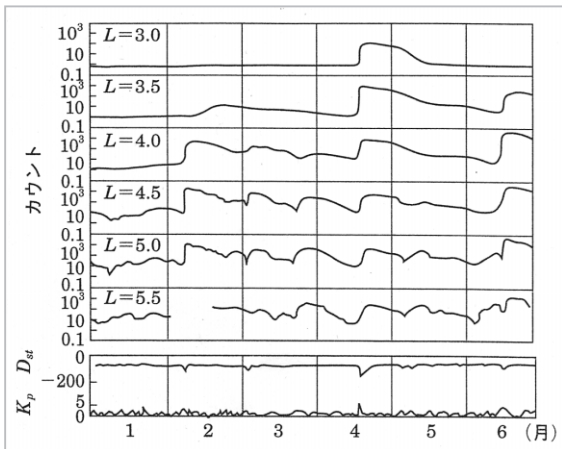


図 13 1 MeV 以上の放射線電子に対する磁気嵐の影響。地球からの距離を変えて、それぞれの場所でのフラックスの時間変動を示す (Walt, 1994)

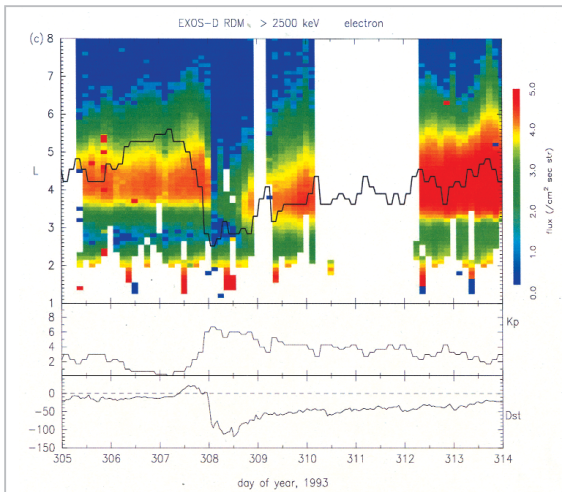


図 14 あけぼのが観測した放射線帯 MeV 電子分布の変化。上段は、電子の L-t ダイアグラム、中段は磁気活動度、下段は Dst 指数である (Obara, 2001)

分布がマックスウェル分布に近い状態であれば、高エネルギー成分 (例えば、1 MeV 以上) の減少が顕著である。ほかに、磁気嵐の発生に伴って外帯領域に発生するプラズマ波動により、放射線電子がピッチ角散乱を起こして大気に降下することも指摘されている。最近の研究の結果から総括すると、地球に近い外帯領域 (L 値が 3.5 程度以下の領域) では、断熱的にフラックスを減らすのが主たる要因であるのに対し、それ以遠の外帯では、発達した磁気圏対流により放射線電子が運びさらわれるのが、減少の主たる原因と考えられている。大気への降下は、磁気嵐の主相開始時に L 値が 4 付近の領域で見られるほか、磁

気嵐の回復相においても顕著に見られる。詳しくは後述するが、磁気嵐回復相において激しい波動粒子相互作用の結果、放射線電子が異常に増加する。この時発生するピッチ角散乱で、高エネルギー電子は大気に降下すると考えられている。

放射線帯外帯の再出現については、大きく二つの立場がある。一つは、外部供給説とも呼ぶべき説明で、プラズマシートから、中程度のエネルギー (数 10 ~ 100 keV 程度) の電子が拡散によって外帯領域まで達するという考え方で、この場合、 β トロン加速 (磁場強度増加による加速) によって MeV 電子が生成されるというものである。これに対して、内部で加速されるとする説明 (内部加速説) が、最近提唱されてきている。これは、磁気嵐を発生させるリングカレントの電子が、MeV 電子になるというものである。

以下、二つの立場を吟味する。プラズマシート粒子が拡散過程で、外帯領域まで侵入してくるためには、拡散係数が非常に大きな値をとる必要がある。現在の理論では、この大きな拡散係数を現出させることは難しい。再生する外帯の位置は大きな磁気嵐と小さな磁気嵐では、地球直系程度の距離の差があるが、磁気嵐回復時において、プラズマシート粒子がどこまで地球に近づくかという情報が、どのように記憶されているかが不明である。そして、プラズマシート領域で数 10 ~ 100 keV 電子を作り出す機構も解明されなければならない。説明がまだまだ必要な状況である。

内部加速説は、リングカレント電子がエネルギーを得て、MeV 電子になっていく過程を再現することが本質的な課題である。加速の機構は幾つか提案されているが、いずれも波動による加速である。既存の波動粒子相互作用理論を相対論のレベルにもっていき、確かに加速が起こることがシミュレートされている。加速効率は波動の強度に依存するが、磁気嵐回復相でサブストームが頻発すれば、波動を起こす種の粒子 (数 keV の電子) が補給されて、強い波動強度は持続する。外帯電子の再生の程度は、磁気嵐回復相の磁気活動度によって制御されている事実も見られている。再生放射線帯の位置は、リングカレントの位置と同じであるとの結果があ

り、この説は、外部供給説に比べて信ぴょう性が高いと思われる。

むすび

磁気圏は、太陽風から粒子とエネルギーを受け入れる。磁気圏に侵入したエネルギーは、磁気圏の尾部に蓄積されていくが、適当な間隔において、エネルギーは解放される。CMEなどに伴う大きな南向き太陽風磁場が地球を襲うと、磁気圏は荒れ狂い、磁気嵐状態になる。

本章では、太陽風の粒子の侵入過程に始まり、

尾部に蓄積されたエネルギーの解放の姿としてのオーロラ現象、サブストーム現象を粒子の観点から解説した。そして、磁気圏における最大のエネルギー現象である磁気嵐について述べ、その結果として誕生する放射線電子について解説した。本章で扱った宇宙空間は、今後更に多数の衛星・宇宙機が飛翔し、人類に積極的に利用・活用される空間である。この宇宙空間を扱う物理学を発展させていくことは、学術のみの視点からだけではなく、宇宙の安全な利用の面からも大きく期待されている。



おがひら たかひろ
小原隆博

電磁波計測部門シミュレータグループ
リーダー 理学博士
磁気圏物理学