



5. 磁気圏プラズマ

小原隆博

独立行政法人 情報通信研究機構 電磁波計測研究センター 宇宙環境計測グループ

(原稿受付：2006年6月23日)

地球周辺の宇宙空間は決して真空の世界ではなく、地球磁場は広がっていて、プラズマや放射線粒子が独自の領域(磁気圏)を形成している。本説では、磁気圏の構造とダイナミクスを紹介し、太陽風から侵入するエネルギーの蓄積や解放のプロセスを概観する。宇宙の嵐が、この領域における重要な現象であるが、嵐の結果発生する放射線粒子は、磁気圏を飛翔する人工衛星に甚大な悪影響を引き起こす。宇宙天気予報について最後に触れるが、科学としての基礎にたった研究が進められている状況を解説する。

Keywords:

magnetosphere, magnetic storm, magnetic substorm, radiation belt, space weather

5.1 磁気圏の形成

地球に向かって吹き付けてくる太陽風は、超音速のプラズマの流れであるので、地球は障害物として認識されることになる。磁場や大気のない惑星であれば、惑星そのものが太陽風が感ずる惑星の大きさであるが、地球は磁場を持つ惑星である。このような場合は、周囲に広がっている惑星磁場も含んだ形で、惑星の大きさが認識される。模式的に描いたのが図1である。地球とその周辺の空間を、太陽に向かう方向を左に見て、手前と上半分を切り取った形で示している。地球起源の磁力線が非常に変形している。これは吹き付ける太陽風の圧力(動圧)によるもので、地球の昼側(前面)では、地球磁場が太陽風の動圧によって押し込められている。つりあう点は、太陽風の動圧とこれをさえぎる地球磁場の磁気圧がつりあう点で、具体的には、地球の半径の約11倍のところに境界ができる。これをマグネトポーズ(磁気境界面)と呼んでいる。太陽風は、地球半径にして10倍程度の大きさを障害物の大きさとして認識するが、先に述べたように太陽風は超音速(マッハ数で7~8)であるので、境界の外側に衝撃波が形成される。太陽方向にとんがった、丁度、船の舳先のような形をしていることから、バウ(舳先の意)ショックと呼ばれている。バウショックとマグネトポーズの距離は数千kmあり、この領域は遷移を意味するシース領域と呼ばれている。太陽風プラズマは、このシース領域を境界面に添って流れていくが、衝撃波を通過するときに加熱され、100万度近い温度になっている。

一方の夜側は、太陽風によって今度は引き伸ばされることになる。図1にその様子が示されているが、この夜側に伸びている部分を、総称して磁気圏尾部(マグネトテール)と呼んでいる。磁気境界面に囲まれた領域は、本節で扱う

磁気圏であるが、最初に各部に付けられている名称について説明する。磁気赤道には、薄くシート状にプラズマが広がっている。その形状にちなんで、プラズマシートという名前が付けられている。赤道を挟んで、北と南に伸びている空洞な領域をローブと呼ぶ。ローブは磁気圏境界面(マグネトポーズ)で、シースに接しているが、シースを流れる太陽風プラズマは、磁気圏の内部にしみ込んでくる。流れ込んできた太陽風プラズマを、プラズママンテルと呼んでいるが、プラズマの性質は太陽風プラズマに近い。ローブの領域は、プラズママンテルから後述する磁気圏対流によってプラズマが徐々に侵入する領域で、赤道面に向かって密度は下がっていく。赤道面付近では、磁場が反平行になっていて、磁場強度は非常に弱い。ここに高温(数keV)のプラズマが集積して、プラズマシートを作っている。

プラズマ圏は、電離圏で作られたプラズマで満たされた低温高密度のプラズマ領域である。これに対して、プラズ

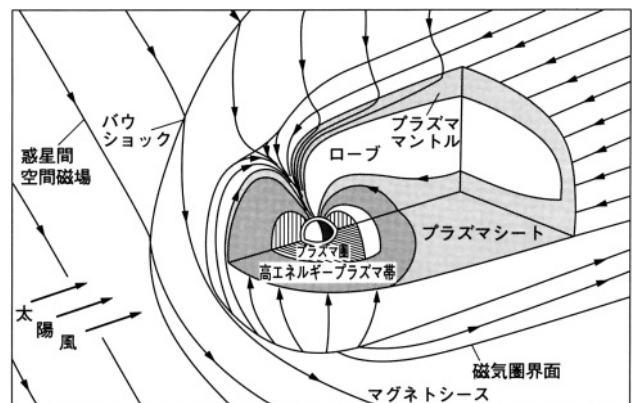


図1 地球磁気圏の構造図。

5. Magnetospheric Plasma

OBARA Takahiro

author's e-mail: T.Obara@nict.go.jp, obara.takahiro@jaxa.jp

マ圏の外側の高エネルギープラズマ帯は、プラズマシートから磁気圏対流によって地球周辺に向かって侵入し加熱された高温低密度プラズマ領域である。後述するが、これが磁気圏対流の発達時には、さらに地球に向かって押し込められ、通常のプラズマ圏位置まで侵入し、リングカレント(赤道環電流)の源になる。図1には、示されていないが、プラズマ圏の領域に、非常にエネルギーの高い放射線の帯(放射線帯)が存在する。主成分は、電子と陽子で、電子放射線帯は、2重構造をとっている。これに対して陽子の放射線はシングルベルトである。後述するが、ひとたび磁気嵐が発生すると、電子放射線帯は大きく変化する。静止軌道衛星は、電子放射線帯の外帯の裾野を飛翔しているが、放射線電子の量が著しく増加すると、衛星故障が電子の影響で発生することが多い。

以上、地球磁気圏の構造を概観したが、次節では、磁気圏のプラズマや磁力線の運動について述べる。

5.2 磁気再結合と磁気圏対流

磁気圏の構造と磁力線の運動について見るために、磁気圏を真昼と真夜中の子午面で南北に切った断面を図2に示している。ここでは、太陽風磁場は、南を向いている場合を考えているが、地球の前面で南向きの太陽風磁場と北を向いている地球磁場の磁力線同士の結合(磁気再結合)が起こる(図2の番号2)。太陽の磁力線と繋がった地球磁力線は、開いた磁力線となり下流(夜側)へと運ばれていく。太陽風の運動量が、磁気圏内部に運動を引き起こすのである。再結合により開いた磁力線は、一つは北極を回り一つは南極を回り、共に夜側へと運動していくが、十分に流れていった先で、これら2本の磁力線は再び巡り会うことになる(図2の番号7)。ここで、再び結合して1本の閉じた磁力線となり(図2の番号8)今度は、太陽側に向かって戻る運動を始めることになる。磁力線とともに、太陽風プラズマも磁気圏に侵入する。磁気圏の夜側には、大量の運動量と磁場のフラックスそしてプラズマが蓄積される。

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3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、

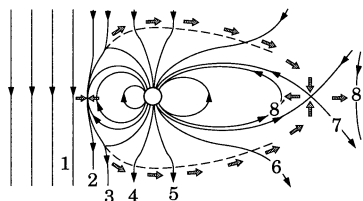


図2 磁気圏における磁力線の運動を示す。太陽風の磁力線は地球の磁力線と再結合して、磁気圏が形成され、数字(1~8)に従って磁力線は運動する。

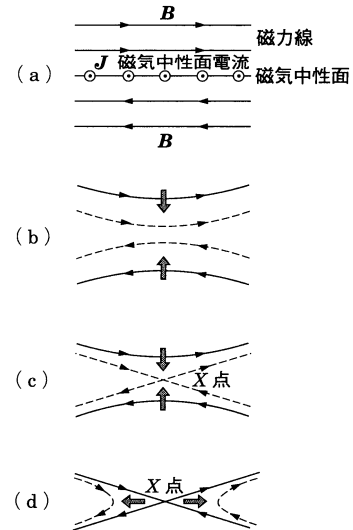


図3 磁力線の再結合を示す模式図。

磁場のエネルギーが消費される。周囲の磁場は、この消費を補うように、その領域に向かって拡散していく。図3(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、そこで新たなつなぎ換えが起こる。図3(d)で示された新しいペアの誕生が、磁力線の再結合と言われるものである。

再び図2に戻ると、磁力線の再結合は、昼に1ヶ所(番号2)夜に1ヶ所(番号7)で起こっている。図2で点線で囲まれた領域を磁気圏と考えると、太陽風磁場との再結合により、磁気圏内部に磁力線の巨大な対流が発生していることがわかるが、夜側にもう1つ出現する再結合ポイントの存在により、昼側で消費された磁場のフラックスが夜側から補給されていくという図式が判明する。このような磁気圏の対流構造の存在は、1964年にダンジーが提唱[1]したもので、その後、40年以上も生き続けている息の長いパラダイムであるといえる。

5.3 MHD 発電と磁気圏電流系

図2が長い間、磁気圏の研究者のパラダイムであったことを、前節で紹介したが、磁力線の運動には実はMHD発電が強く関与していることを述べたい。MHD発電とは、電磁流体における発電であって、具体的には磁場が運動することで起電力が発生することをさす。図4を見ていただきたい。ここでは、昼側で再結合した磁力線が、北極域上空を通過していく様子を模式的に示している。簡単のために、朝側から出た磁力線と夕方側から出た磁力線を描いている。これらは、いずれも太陽風磁場と結合した磁力線であり、太陽風の運動量を得て夜側(向かって手前)に運動しようとしている。このとき2本の磁力線の間には、太陽風があたかも電位差を与えており、いわばダイナモの働きをしている状況が描かれている。このダイナモで、朝側の磁力線には地球に向かって電流が流れ(沿磁力線電流)、夕方側の磁力線には地球から外に向かう電流が流れる。説明は省略してきたが、極域も含めて地球の上層大気には、太陽紫外線により電離された電離圏と呼ばれる領域が存在す

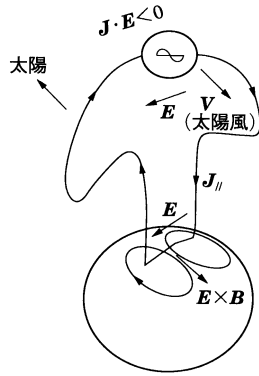


図4 磁気圏境界面ダイナモが沿磁力線電流とプラズマ対流を発生させる模式図。

る(6章で詳しく述べられる)。磁力線に沿って流れてきた電流は、今度は水平電流となって極域を朝夕に横断する。この電流が地球磁場から力を受けて、磁力線の根っ子も夜側に移動する。ダンジーが提唱した磁気圏の対流運動は、こうして電流を介在させることで、深い理解が得られることになったのである。

前節図2で、赤道に近い閉じた磁力線の領域に、大量のプラズマが存在していることに触れたが、図5にはその様子が更に正確に描かれている[2]。赤道に近い領域の磁場は、非常に引きのばされた形状を示している。赤道の北側の磁力線は地球の北極に向かう一方、赤道の南側の磁力線は地球の南極から外に向かっている。赤道域は、北側と南側の相反する磁力線が接している領域で、磁場がキャンセルされることで、非常に磁気圧が小さな領域が発生する。太陽風プラズマはこの磁場の弱い領域に入り込み、薄いシート状にプラズマのシートを形成する。これは、その名のとおりプラズマシートと呼ばれていて、図5で赤道付近に黒くハッチされたのがそれである。プラズマシートのプロトンのエネルギーは、太陽風の速度(約400 km)がそのまま熱化した約1 keV程度を少し上回るエネルギーを典型的に持っている。図5には、赤道を朝側から夕方側に貫く赤道電流(尾部電流と呼ぶ)が流れている。この電流は、その外側に磁気圏が夜に長くのびるために発生する境界面電流と接続しているが、尾部電流が流れることで、プラズマシートのプラズマと磁力線が太陽方向に運動することが可能になっている。

さて、図5で興味深いポイントは、地球に近いプラズマシートのプラズマが、磁力線に沿って南北の極域に到達していることであろう。南極や北極の夜空を美しく彩るオーロラは、古来多くの人々を魅了し続け、オーロラの科学研究も19世紀になってから盛んに実施されるようになった。オーロラは、超高層大気で発生する放電現象であることは、地上からの観測でわかってきていたが、図5に示したプラズマシートのプラズマが、オーロラを輝かせる原因であることがわかったのは、人工衛星による直接観測を待たなければならなかった。北極域について、オーロラ領域上空の磁力線を地球の尾部にマッピングすると、プラズマシートにいたる。図6にはその様子が描かれているが[3]、オーロラの発生にとって最も重要な要素は尾部電流であ

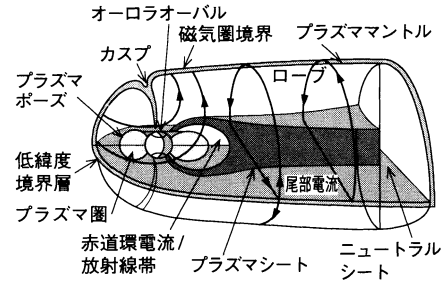


図5 磁気圏の構造と電流系[2].

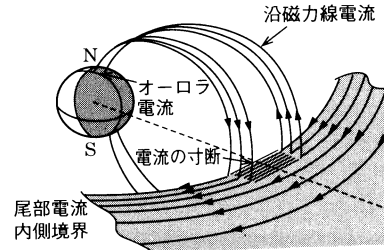


図6 サブストーム発達相における磁気圏尾部の電流構造[3].

る。先の図5にも示されていたように、プラズマシートを朝側から夕方側に向かって、尾部電流が流れている。通常の静穏な磁気圏状態の場合(オーロラ活動が見られない場合)尾部電流はプラズマシートを水平に流れている。太陽風の速度や南向き磁場成分が大きくなると、磁気圏に注入されるエネルギー量は増大すると同時に、磁気圏内の対流速度も増す。これは尾部電流から見ると、電流量の増大にほかならない。プラズマシートは、その性質(無衝突プラズマ)として、ある一定量の電流を超えると、電流を流さなくなる。抵抗が異常に増大し、これによって尾部電流は寸断される。行き場を失った尾部水平電流は、今度は磁力線に沿って極域電離層に流れ込む。真夜中過ぎの領域に流れ込んだ電流はそのまま電離層中を流れて、真夜中前の領域から磁気圏に流れ出す。極域電離層中を流れる電流の空間的広がり、尾部電流寸断領域の広がりに対応すると考えている。

5.4 オーロラの嵐

次に、オーロラの構造や謎について見ていくことにする。ここでもやはり、人工衛星は活躍をしている。オーロラは、非常にしばしば、急に輝きを増すことがある。オーロラ爆発(ブレイクアップ)と呼ばれているこの増光は、磁力線に沿った電流量の急激な増加と一致していた。図7は、オーロラブレイクアップと沿磁力線電流の関係を模式的に示す[4]。オーロラは東西にのびる構造を持っていて、よく見るとカーテン状になって出現する。現れる領域は、磁気緯度65度付近で、真夜中よりも少し前の時間帯を中心にして出現する。オーロラの輝く領域をアークと呼ぶことがあるが、アークの先頭(西側)では、強い上向きの沿磁力線電流が観測される。一方、後方の比較的広い領域では、下向きの沿磁力線電流が見られる。オーロラのブレイクアップは、明るい領域が周囲に向かって拡大していく状況

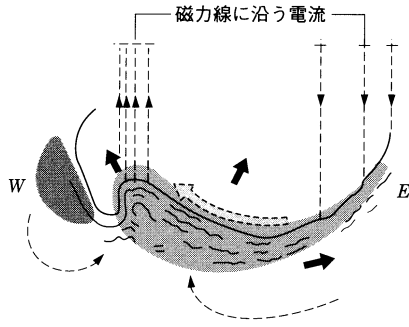


図7 オーロラブレイクアップと沿磁力線電流[4].

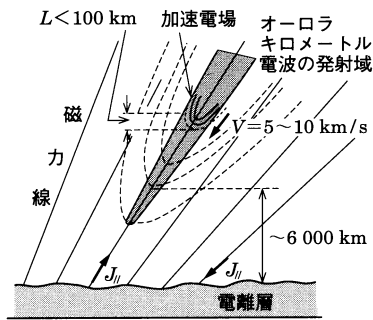


図8 オーロラポテンシャルの模式図[5].

を生む。東西にのびたアークの中には、西向き電流が流れている。この電流量も、オーロラの明るさと良い対応がある。

人工衛星の時代に入って、オーロラを引き起こす粒子の研究が著しく進んだ。磁力線に沿った上向き電流が存在する領域では、プラズマシートの電子が電流を担うことが判明してきた。図5で見たプラズマシートの粒子が極域のすぐ上空まで達している姿は、人工衛星によって明らかにされた。問題が1つ発生するが、これは磁気圏プラズマシートの電子密度が少ないことである。少ない電子で、大きな電流を流さなければならないことで、電子は磁力線に沿って加速されることになる。加速は時に10kVまで達することがあるが、人工衛星でくまなく探査した結果、加速の起こる領域は空間的に非常に狭いことが判明し、加速域と名づけられた。図8に模式図を示すが[5]、加速域の高さ方向の幅は、100km程度であり、地上6,000kmを中心に3,000kmから12,000kmまで広がっているのがほとんどであるが、全体に下に向かって5~10km/秒の速度で移動しているケースが多い。この加速が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。磁力線方向に電場を発生させる機構として、異常抵抗モデルが提唱されている。沿磁力線電流がある閾値を超えると、プラズマに電流駆動不安定が起これり、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というものである。

専門用語では、オーロラの嵐のことを、サブストームと呼ぶ。これは後述するストーム(磁気嵐)に対応する用語

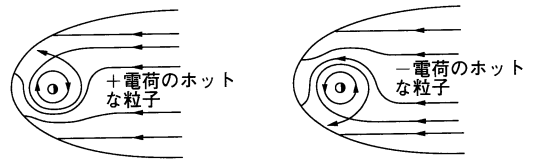


図9 磁気圏赤道面での電子と陽子のドリフトの模式図.

であるが、50年前はオーロラが磁気嵐を構成する要素であると信じられていた。ストームの基本要素というサブストームという言葉が用いられたのは、以上の経緯による。現在では磁気嵐(ストーム)とオーロラ嵐(サブストーム)は、異なった現象を対象とするという考えが主流である。

5.5 磁気嵐

オーロラ嵐(サブストーム)が、地磁気の高緯度(65度~75度)付近に発生するエネルギーの解放現象であることに対し、磁気嵐は中緯度から低緯度にわたって発生する磁気圏最大のエネルギー現象である。赤道域のプラズマシートのプラズマは、朝側から夕方側に電流を流しているが、赤道域には垂直北向きの地球磁場成分が存在するので、プラズマはローレンツ力を感じて、太陽方向に運動(ドリフト)する。この様子を図9に示すが、電子と陽子はともに磁気圏尾部を太陽方向にドリフトしている。地球に近づくにつれてプラズマシートの熱い粒子は、磁場の勾配と曲率によって大きく軌道を変え、プラスの電荷を持った陽子は西向きに、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。陽子、電子ともに2種類の軌道を分離する境界線(面)が存在し、それより内側の閉じた軌道には、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9において、境界の内側の軌道は閉じている。磁気嵐を起こす赤道環状電流は、実はこの閉じた軌道の粒子が発生させる電流である。

赤道付近に置かれた磁力計のデータが一斉に減少し、その減少は数時間から1日程度続くことがあり、回復するには1週間以上にも及ぶ現象がドイツのフンボルトにより19世紀の初頭に初めて報告された。この現象が地磁気嵐と呼ばれる現象であり、太陽風磁場が大きく南に向くことや動圧の増加によって引き起こされる。

太陽風の変動に伴う磁気圏対流速度や尾部電流量の時間変化により、プラズマシートの内側境界が大きく位置を変える。こうした変化は、図9において閉じた軌道領域に大量の熱いプラズマを注入する働きをする。地球半径の数倍の領域に、温度にして数十keV程度の陽子が集中する。図10は非常に模式的に描いた図であるが、地球を取り囲むように存在するプラズマが西向き電流を発生させている状況を示している。この赤道環状電流が作る磁場は、地球磁場を減少させる働きをする。大きな磁気嵐では500ナノテスラも地球磁場が減少することがある。

磁気嵐が発達する過程では、磁気圏対流が増加する。このことによってオーロラ嵐(サブストーム)は頻発することになる。磁気嵐中のオーロラは非常に活発で、磁極を中

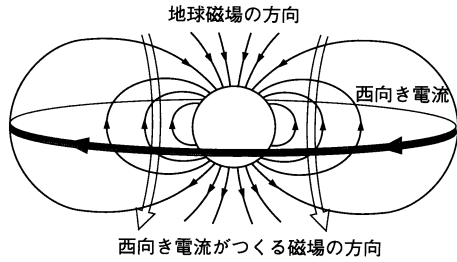


図10 赤道環電流の概念図.

心にぐるりと輪になって輝く特徴がある。図6で示した電流寸断が、主として夜側を想定して考案されたモデルであるが、磁気嵐中のサブストームは通常のモデルを超えた特別なモデルを必要としているといえる。現在、大きな磁気嵐の研究が、世界の各所で開始されているが、筆者のグループでも巨大磁気嵐とその関連現象について研究を進めているところである。

5.6 放射線帯の変動

1957年からの宇宙時代の最大の発見の一つに、地球を取り巻く放射能のおび(帯)である放射線帯の発見がある。放射線帯は、発見者の名前をとってバンアレン帯とも呼ばれる。我々のグループも、次節に述べる宇宙天気予報の観点から、このバンアレン帯の変動を詳しく調査している。これまでの理解を以下に記すが、総じて太陽や太陽風、時には銀河系の彼方からやって来て地球の磁場に捕獲された高エネルギー粒子(電子、陽子、アルファ粒子など)が、磁気圏内部にて更なる加速を受けながら、ゆっくりと地球の極近傍まで輸送されて放射線帯(内帯)になったと考えている。陽子、電子ともに内帯領域においては消失の時定数は非常に遅く、一度内帯に入った放射線粒子は数ヶ月から数年間存在し続けることになる。消失の時定数は地球からの距離が大きくなると急速に短くなる。すなわち短い時間にロスしてしまう。このような事情で、内帯のピークは、地球半径の1.5倍程度の所にできる。

電子については、外側に外帯が存在する。図11に電子放射線帯の概要を示しているが、図のように地球を2重に取り囲む姿が明白である。さらに断面を示しているが、外帯のピークは地球半径の4~5倍程度の所に存在している。内帯と外帯の間の領域は、スロット(谷間)と呼ばれていて、放射線電子がほとんど存在しない領域になっている。

外帯の成因について、我々が提案した新しい考えは、これを磁気圏のダイナミクスの視点から理解するものであった。我々は、電子放射線帯を、前述の赤道環状電流と同一のものであるとしたことにある。赤道環状電流の電子は、エネルギーとしては数十keVと低い。放射線帯電子は、数百keVから数MeVと10倍から100倍エネルギーが高い。いきなり1MeVの電子を放射線外帯領域に発生させることは、至難のわざであるが、我々は波動との相互作用を考えた。図12に外帯電子の軌道を書いているが、磁力線の周りを回転(サイクロトロン運動)しつつ、磁力線に沿って南北両半球をバウンスしている。さらに磁場の勾配と曲率により東向きに地球の周りを回転するという、3種類の運動

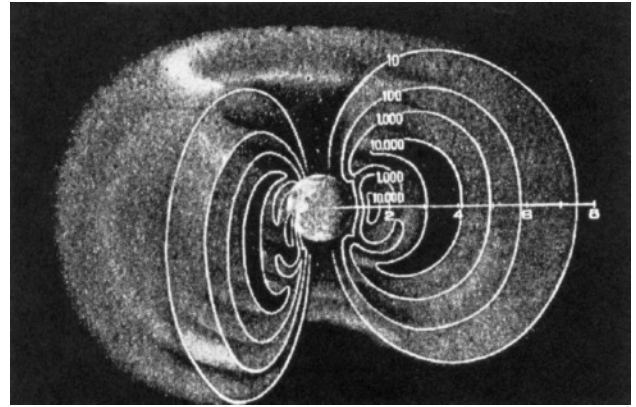


図11 電子放射線帯の模式図。地球に近いのが内帯で、その外側に外帯が存在する。内帯と外帯の間はスロットとよばれ、電子がほとんど無い領域がある。

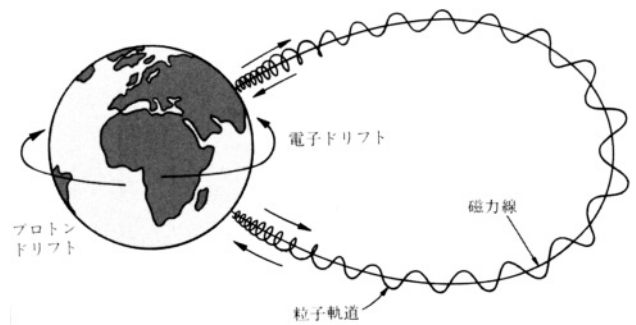


図12 放射線粒子の運動を示す模式図。

を行っている。我々は、この領域には、特に磁気嵐時には、強いプラズマ波動が発生することに着目し、波動による電子加速を提案し観測とコンピュータシミュレーションの両面から立証した。これは別名「内部加速説、2段加速説」と呼ばれている。この説に立つと、大きな磁気嵐では、より地球に近い領域に外帯が形成されることになるが、人工衛星による放射線帯電子の観測は、我々の説と符合した。

波動を用いての加速は、1~2日の時間を実際に要する。加速の条件が磁気嵐の比較的早い時期に整ったとしても、一定の時間遅れが発生し、実際にMeV電子が有為に増加してくるのは、磁気嵐が回復に移行した頃である。図13は、それぞれの距離でMeV電子数の時間変化を示したものである。下のパネルには、磁気嵐の指標である磁場の減少量(D_{st} と表記)さらにオーロラ活動の指標(K_p と表記)が示されている。 D_{st} の減少が磁気嵐の発生を示しているが、少なくとも4個の磁気嵐がこの期間、発生しているが、最も大きかった4月の磁気嵐では $L=3$ (地球半径の3倍)の領域まで、カウントが増加していた。小さな磁気嵐では、増加領域の距離(L)が遠くなっていた。注意してみると、増加の勾配が L が大きくなるほど緩やかになっている。我々は、 L が4付近に増加領域があり、生成されたMeV電子が周囲にゆっくりと拡散していくと考えている。

5.7 宇宙天気予報

磁気圏に嵐が発生すると、オーロラは激しく輝き、地球磁場は減少し、放射線帯は活性化することがわかってき

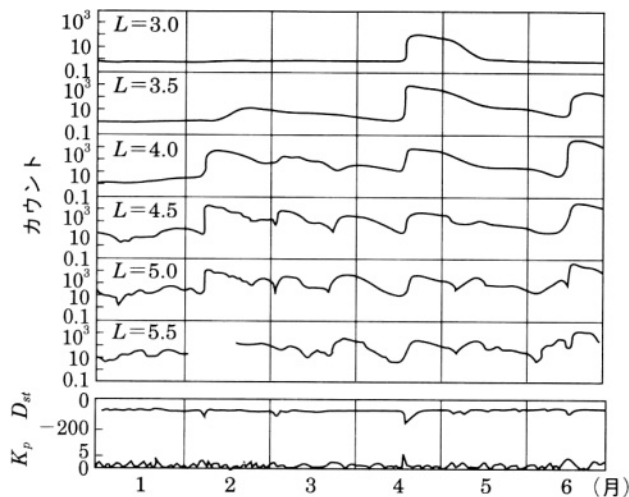


図13 放射線電子に対する磁気嵐の影響。4つの磁気嵐が、2月、3月、4月、6月に起こっている。

た。近年になって、特に放射線粒子の異常増加が、人工衛星に故障を発生させる事例が数多く報告されはじめています。これは一つには、耐放射線宇宙部品の開発が需要に追いつかず、放射線に十分に強いとはいえない部品が使われている事情による。宇宙空間で、性能の良い部品を多く使いたい事情は、宇宙で複雑な制御や計測を実現したいとする工学的・技術的要求による。しかし、高度な部品は一般的には放射線に弱い。一方、宇宙環境は常に劣悪な環境ではなく、宇宙の嵐が起るのは実時間にして数%以下である。ここに、嵐の起るタイミングを事前に察知して、危険な状況では複雑なオペレーションを避けるというアイデアが登場した。宇宙放射線環境の変動を予測するという「宇宙天気予報」のコンセプトである。

人工衛星の場合は、将来的には放射線に強い部品の開発に期待が寄せられるが、宇宙飛行士の場合は、そのような期待はできない。放射線環境が劣悪な時（場所）は、避難が原則である。これまで述べてきた、捕捉放射線についてのみならず、太陽放射線など外来放射線の変化にも注意する必要がある。外来放射線は、これまでは地球磁場によりかなりの部分が遮蔽できると考えられていたが、我々の研究などにより磁気嵐発生の瞬間時などには、地球に非常に近い領域まで危険が及ぶことが明らかになってきた。これは、磁気圏内に発生するパルス磁場の影響に依るが、詳細を述べることは紙面の都合で割愛する。

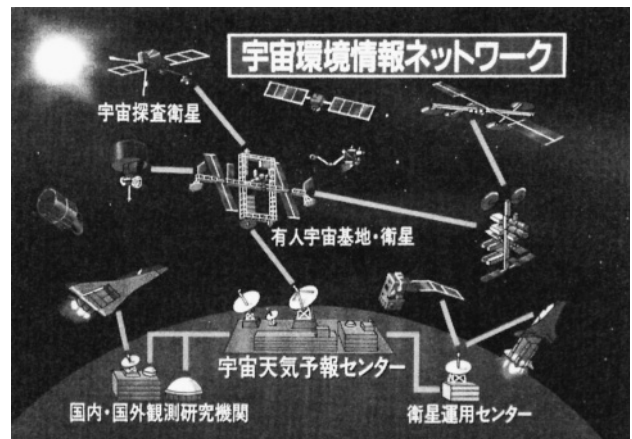


図14 NICTで進めている宇宙天気予報センターの概念図[6]。

現在、情報通信研究機構では、東京都小金井市の同機構本部内に、宇宙天気予報センターを開設し、図14に示すような、予報サービスを開始している[6]。昨年には、日本人宇宙飛行士が宇宙ステーションに滞在し、宇宙での活動を行った。この時、宇宙天気予報センターは、宇宙飛行士の安全のために、宇宙天気予報を非常に短い間隔で出した。日本やハワイ上空の静止軌道位置には気象衛星や通信衛星などの実用衛星が運用中である。地球を周回する低軌道人工衛星だいちも観測を開始している。そして来年度には、日本の月探査機も打ち上げられる。宇宙空間は決して安全な空間でないことは、これまでの調査で明白である。宇宙の安心と安全を守る努力は今後とも重要である。

参考文献

- [1] J.W. Dungey, J. Geophys. Res. **69**, 3913 (1964).
- [2] T.E. Cravens, *Physics of Solar System Plasma, Atmospheric and Space Science Series* (Cambridge University Press, 1997) p.477.
- [3] C.R. Clauer and R.L. McPherson, J. Geophys. Res. **79**, 2811 (1974).
- [4] 大林辰蔵：宇宙空間物理学（裳華房，1974）p.484.
- [5] 大家 寛：巨大惑星のオーロラ，現代の太陽系科学（下），大家 寛，大林辰蔵編（東京大学出版会，1984），p.140.
- [6] 恩藤忠典，丸橋克英，丸山 隆，富田二三彦，小原隆博：宇宙環境科学（オーム社，2000）p.302.