

地球をとりまく宇宙空間のプラズマ

宇宙科学研究所名誉教授
日本学術振興会 監事 西田 篤弘



ただ今ご紹介いただきました西田です。本日は宇宙空間科学の新展開というテーマで、上出教授、松本教授と一緒に宇宙空間科学研究の最近の話題をご紹介したいと思います。

トップバッターの私の講演は、イントロダクションの意味を兼ねた「地球をとりまく宇宙空間のプラズマ」です。この題目には三つキーワードが入っており、一つが地球、二つ目が宇宙空間、三つ目がプラズマです。地球は説明の必要はないと思いますが、ほかの二つについてまず簡単に紹介させていただきます。

宇宙空間科学という言葉はいろいろな意味で使われて、衛星とか探査機などの飛翔体を用いて行う研究を全部宇宙空間科学という場合もあります。そういう場合には宇宙空間科学、つまりスペース・サイエンスには宇宙の果てに迫る天文観測まで含まれます。しかし今日の講演ではもっと限られた意味で、地球の周辺の空間から太陽系の空間を対象にします。1957年に人工衛星が初めて打ち上げられて以来、宇宙空間の探査はいろいろな国の科学衛星あるいは探査機で行われ、非常に複雑な構造があり、多彩な現象が起きているということがわかってきました。その最新の知見をお話するというのが講演の趣旨です。

宇宙空間はプラズマで満たされ、磁場が存在します。プラズマとは電離したガスのことです。電離するということは、原子または分子がイオンと電子に分かれるということです。つまり電気を持った粒子からできたガス

のことをプラズマといいます。

たとえば、この部屋にある空気はプラズマとはいいません。地表の大気は中性の原子や分子、ほとんど分子ですが、それからできているガスです。それがどんなときにプラズマになるかという、電子ビームを浴びたり紫外線を浴びたりしますと、原子核のまわりを回っている電子のうちのいくつかが飛び出してイオンと電子に分かれます。正確に言えば、正イオン、ポジティブイオンになるわけです。地球周辺の宇宙空間には太陽の紫外線がいつも照射していますし、さまざまな原因でつくられる電子ビームが存在することも多いので、ガスが電離されてプラズマになっている。ですから宇宙空間の研究はプラズマの性質を理解することが基礎になります。

図1は宇宙科学研究所（ISAS）が1998年に打ち上げた「のぞみ」という名の火星探査機が、地球を去っていく直前に地球を振り返って撮った写真で、地球と月が写っています。この地球を見ますと、青い大気がありますが、一見、大気のあるところは地球の周辺の非常に限られたところだけであるように見えます。地球と月の間は暗黒の世界で真っ暗闇である、何もない。地球と月の間に限らず、宇宙空間というのは何もないところだというのが常識的なイメージでしょう。太陽系というのは真ん中に太陽があって、そのまわりを惑星など様々な固体物質がまわっているだけだと考えられていたと思います。しかし、ヘリウムイオンが発する弱い光を測定すると、プラズマ



図1 火星探査機「のぞみ」が撮影した地球と月 (ISAS)

大気の大きなかたまりが地球を取り巻いていることが分かります。図2はそうして撮った写真です。真中にあるのが地球で、左上が太陽の方向です。極域にオーロラの環が見えていますね。その地球の縁が明るくなっているのは大気光であり、電離層の大気が光っているのです。しかし明るいところはそこだけではなく、かなり遠くまで明るいところが広がっています。実はもっと遠くまであるのですが、光があまりに弱いので写真にとることができません。地球はプラズマに囲まれているのです。

一方で太陽はどうかというと、これは言うまでもなく、太陽にはコロナがあり、コロナは温度の非常に高いプラズマです。図3は

「ようこう」衛星がX線で撮影した太陽のコロナです。なぜX線で撮るかということ、別に透かして見るためではない。病院でX線を使うのは人体を透かして見るためですが、コロナ観測にX線を使う理由はまったく別です。コロナは何百万度という非常に温度が高いガスなので、そこから出てくる光はX線なのです。温度が高くなるに従って発生する光の波長が短くなって、X線の領域にくる。ですからX線で見るとコロナの写真が撮れる。普通の可視光で見えるのは太陽の光球です。「ようこう」が撮影した画像を見るとコロナには高温のプラズマがあるだけでなく、それが極めて活発に活動していることが分かります。ときには大きなプラズマの塊が放出されるの

も観測されます。実はコロナからはいつもプラズマが流れ出していて、太陽風と呼ばれています。

地球周辺の宇宙空間に構造があり、その中でオーロラや磁気嵐などの現象が起きるのは、地球のプラズマと太陽のプラズマがぶつかってお互いに作用しあうからです。この相互作用では、太陽に

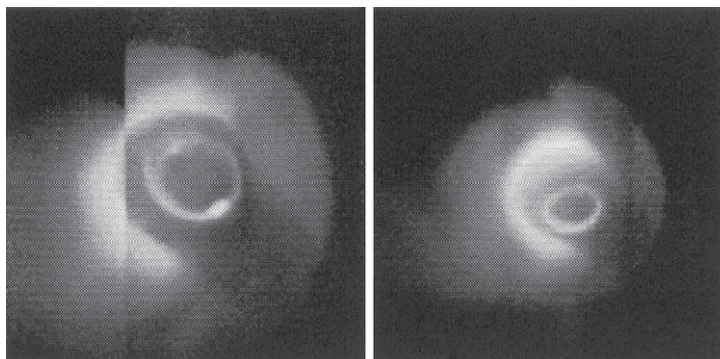


図2 地球をとりまくプラズマ圏 (NASA)

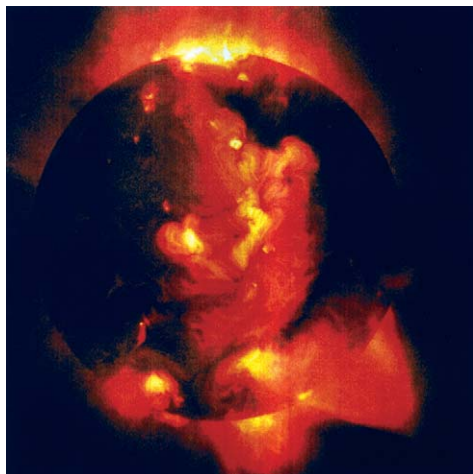


図3 「ようこう」が撮影した太陽コロナのX線写真 (ISAS)

も地球にも磁場があるということが非常に重要です。地球は磁石で、地球のまわりには地球の磁場が広がっています (図4 a)。磁場というのは残念ながら目に見えないので、私たちが研究費をいただくために説明するときにも大変困るのですが、この部屋にもいたるところに磁場があって、コンパスを使うとこのことが分かります。

磁場は太陽にもあり、内部からコロナに伸びています。図5は「ようこう」が撮影したコロナの写真の上に太陽の磁場の磁力線を重ねて描いたものです。コロナの写真で暗くなっているところは黒点の領域であり、非常に活発な活動が起きているところです。そのような領域の磁力線は閉じたアーチの形をして

いますが、その間の領域や極地方から磁力線が外に向かって伸びていますね。こういうところからプラズマが流れ出していて、太陽系の空間を太陽起源のプラズマと磁力線で満たしています。プラズマの性質の一つに、磁場とプラズマがいつも行動をともにするということがあるために、太陽風プラズマが流れ出すとき太陽の磁力線を引っ張り出すのです。

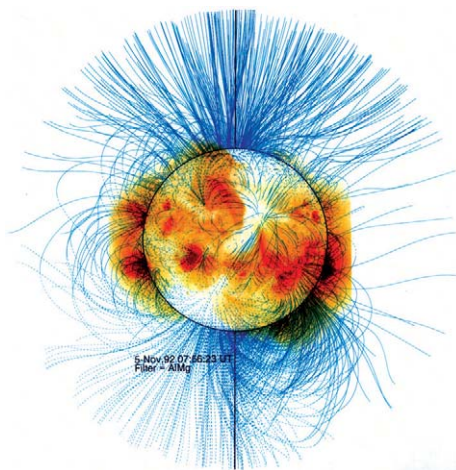


図5 太陽コロナと磁力線 (ISAS)

太陽風の速度は毎秒数百キロメートルという速さで、ジェット機が1時間近くかけて飛ぶ距離を僅か1秒で通過します。地球のプラズマと磁場にはこのような高速の太陽風が吹きつけ、それと同時に、コロナの磁場も押し寄せています。

太陽風のイオンや電子は、地球に近づいて

地球の磁場の中に入ると、もはや真っ直ぐに走ることはできません。電気を持っている粒子の運動は磁場に影響され、磁力線の回りを周回するという性質があるからです。回転運動の半径は磁場の強さ、粒子の質量と速度で決まりますが、地球までの距離に比べるとはるかに小さいものです。地球磁場のあるところとない

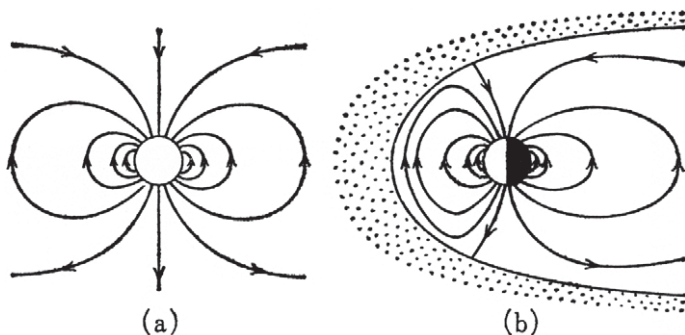


図4 (a) 元来の地球磁場
(b) 磁気圏に閉じ込められた地球磁場

ところの境界で、ない側からある側に入った粒子は地球磁場のもとで半回転して、ない側に戻るようになります。太陽風のイオンや電子は地球の磁場によって反射されるのです。一方、イオンや電子は反射されるときに磁場のある側に圧力を及ぼして、地球の磁場を押し縮めようとします。そのため、地球の磁場はどこまでも広がることはできず、磁気圏という領域に閉じ込められます（図4b）。太陽風と磁気圏の境界面の位置は、太陽の真下にあたる正午の赤道面では、地球の半径の10倍ぐらいのところですが、すなわち約6万4千キロメートルです。これは太陽風の密度と速度から求まる圧力と地球磁場のモーメントとで決まる値ですが、それがたまたま10倍という覚えやすい数になっているのです。太陽風があることによる効果の第一は、このようにして地球磁場を閉じ込め、磁気圏を作ることです。

しかし、太陽風が反射されるということだけがすべてであるとする、これは何もおもしろいことはないわけで、太陽風の入ってこない空洞ができるという話で終わりにしてしまいます。幸いにしてそこで終わるのではなく、太陽風のエネルギーは磁気圏の中に入ってきます。

そのことは昔から気付かれていました。太陽にはフレアという爆発現象があります。この現象が起きると2～3日経って、地球で磁気嵐という現象が起きることが昔から知られていました。磁気嵐というのは世界中で磁場が弱くなる現象で、磁石を使って航海する人達が難儀するので気付かれていました。磁場が弱くなるのは地球の回りに電流の環ができるためですが、それがフレアの2～3日後に起きることから、太陽フレアから光だけではなく、イオンや電子が飛び出しているのだらうと推測されていたのです。これは、今使っている言葉を使っていえば、太陽風のエネルギーが何かのメカニズムで磁気圏の中に入ってきて、そこで電流を流すということを意味しています。従って太陽

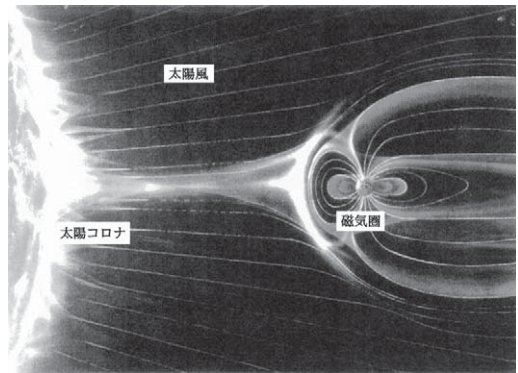


図6 太陽コロナ、太陽風、と磁気圏の関係

風が存在することの効果の第二は、そのエネルギーが磁気圏に侵入してさまざまな現象を起すということです。

太陽と地球の磁気圏の関係を、要点だけ簡単に描いたのが図6です。太陽コロナから太陽風プラズマが流れてくる。その速度は太陽風の中の音速を超えていて、超音速です。それが地球の近くまで来ると、衝撃波面で急激に遅くなってから地球の磁場にぶつかり、地球磁場を閉じ込めて磁気圏をつくります。昼間側は地球の半径の10倍ぐらいのところに境界があるのですが、夜側には長く伸びた尻尾ができています。夜側には太陽風が直接ぶつかりませんから、夜側の磁気圏が昼間側のように狭いところに閉じ込められていないのはもっともといえますが、尻尾は非常に長く、地球の半径の何百倍というところまで伸びています。このように長い尻尾をつくるのも、磁気圏に侵入した太陽風エネルギーの働きです。

太陽系の中で尻尾があるということでは有名なのは地球ではなくて、彗星（コメット）ですね。ハレー彗星など、尻尾があるのがコメットの特徴だと思われています。地球の尻尾と彗星のプラズマ尻尾ができるメカニズムは同じではありません。地球には磁場がありますが彗星には磁場がないので、構造が違います。しかし共通点もあります。それは、どちらも太陽風があるということのためにできていることです。太陽風が力を及ぼすために尻

尾ができています。もう一つの共通点は、彗星の場合も地球の場合も、尻尾の中にあるプラズマは彗星なり地球の大気からのプラズマと太陽風のプラズマが混ざったものであるということです。

太陽風のエネルギーが磁気圏に侵入するのは、太陽風磁場の磁力線と磁気圏の磁力線とがつながるためです。太陽風はコロナの磁力線を運んでくるのですが、この磁力線が磁気圏の中とつながることによって、磁気圏内の磁力線とプラズマが太陽風によって動かされるようになり、夜側に引っ張られて尾部を作るのです。

図7は太陽風磁場が真南向きの場合についてこれを描いたもので、左から流れてきた太陽風磁場の磁力線1''と磁気圏の磁力線1'がつながって2''-2'になります。磁力線がつながることをリコネクションとよびます。単にコネクションではなく「リ」コネクションとよぶのは、二本の磁力線が接したところで一旦切れてつながるといったイメージを強調したものです。つながりかえられた磁力線は3''-3', 4''-4', 5''-5', 6''-6'のように動かされると共に引き伸ばされ、尾部を作ります。白抜き矢印はこの動きを示すものです。一端が地球にあり、一端が太陽風にある磁力線を「開いた」磁力線とよび、両端とも地球にある磁力線を「閉じた」磁力線とよびます。

リコネクションは尾部の中でもおきます。尾部の中央面に向かって北側から運ばれてき

た磁力線と南側から来たものがつながるので、尾部内でのリコネクションは「開いた」磁力線6''-6'を、「閉じた」磁力線8'と地球につながっていない磁力線8''に変えます。こうして作られた「閉じた」磁力線は太陽方向に9'から1'へと動いて、元の位置2'に達します。このように、リコネクションは尾部を作るだけでなく、磁気圏の中に大きな対流運動を発生させます。運動が太陽風から磁気圏内に伝えられるということは、運動エネルギーが供給されることであり、それが引き伸ばされた磁場のエネルギーと対流運動のエネルギーになるのです。また、つながった磁力線にそって太陽風プラズマの一部も磁気圏に侵入し、対流運動に乗って磁気圏の奥深くまで入ります。

図7では太陽風磁場が真南向きと仮定しましたが、実際には太陽風磁場は一定ではなく、大きさも方向も常に変動しています。コロナの磁場が一様でなく変動も激しいからです。リコネクションによって発生する対流運動の強さは、太陽風磁場の変化に伴って変わります。太陽風磁場が南向きの時にもっとも強く、北向きになるにしたがって弱くなります。私の若い頃の仕事の一つは、このことをデータ解析で示したことでした。1960年代に、まとまったデータが出始めたばかりの太陽風磁場（南北成分）変動を、地表で世界的に観測される磁場変動のデータと比較してみたのです。地表の磁場観測から磁気圏の対流運動を知ることができるのは、対流運動が電離層のプラズマを動かして電離層に電流を流し、この電流が磁場を作るためです。図8に示すように非常に良い相関があることが分かり、リコネクションが磁気圏対流を駆動していることの有力な証拠としてかなりの反響をよびました。

というのも、その当時はリコネクション説が確立していたわけではなく、磁気圏対流の原因は太陽風が何らかの流体的な粘性を及ぼすためである、という説も唱えられていたのです。私がこの解析をしたのも、リコネクシ

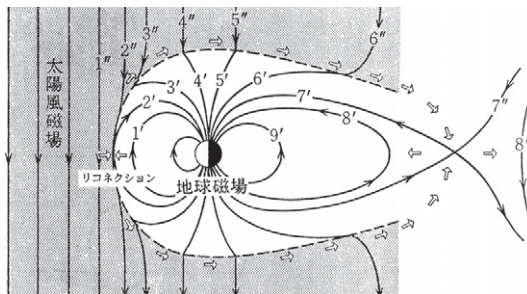


図7 リコネクションによる対流運動の発生と磁気圏尾部の形成

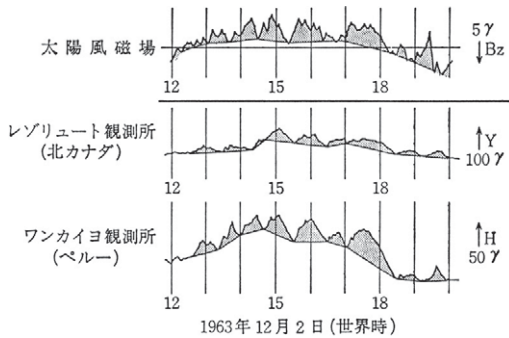


図8 地上と太陽風の磁場変動の相関
地上の磁場変動は、極域(中)でも赤道域(下)でも、太陽風磁場の南北成分の変動(上)と非常に相関が良い。

ジョン説を証明しようという意図からではなく、どちらかといえば反証を見つけてやろうという気持ちでした。予期しなかったこと、期待しなかったことが見つかることによって新しい展開が生まれる、ということが良く云われますが、私にとってこの解析はそのような経験でした。

さて、地球をとりまく宇宙空間を構成している太陽風と磁気圏についておおまかに話しましたが、この空間の物理には沢山の問題が含まれていて、それを解き明かすために世界中の研究者が努力しています。宇宙科学研究所 (ISAS) はNASAと共同でジオテイル衛星計画を企画し、1992年に打上げました。

この衛星は、名前の通り、磁気圏の尻尾を研究することを主な目的とするものです。研究課題は、(1) 太陽風磁場の変動に対して、尾部の構造はどのように反応するのだろうか、磁気圏対流のパターンはどのように変化するのだろうか。(2) 磁気圏尾部内でリコネクションが発生するのはどんな時だろうか、発生する場所はどこだろうか。(3) 磁気圏の中でイオンや電子はどのようにして加速されているのだろうか、リコネクションによる加速はどのように働くのだろうか、ということでした。

この衛星計画の特徴は、研究目的に則して最適の軌道を作ったことです。図9はジオテイル衛星の軌道です。ミッションの前期(左図)は、尾部の遠くの領域を調べるためになるべく遠くまで飛ばし、しかも遠地点がいつも夜側にあるようにしました。このために月の近くを通らせて月の引力で軌道を調整する「月スイングバイ」と呼ばれる技術を使い、地球から地球半径の約220倍に至る広い領域で尾部観測を行いました。その後は(右図)、昼間側では磁気圏の境界面、夜側では地球半径の30倍までの尾部を探索するようにしました。衛星は宇宙科学研究所が開発し、NASAがロケットを提供するという大規模な国際協力プロジェクトで、打上げから9年以上たっ

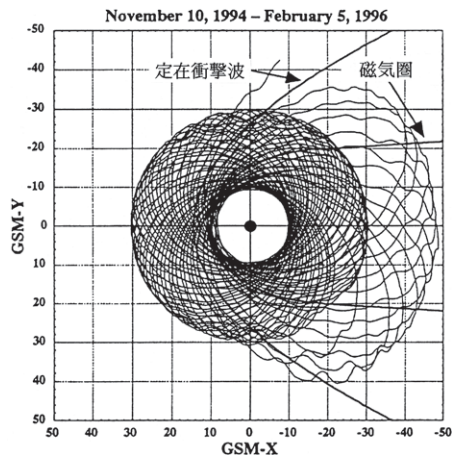
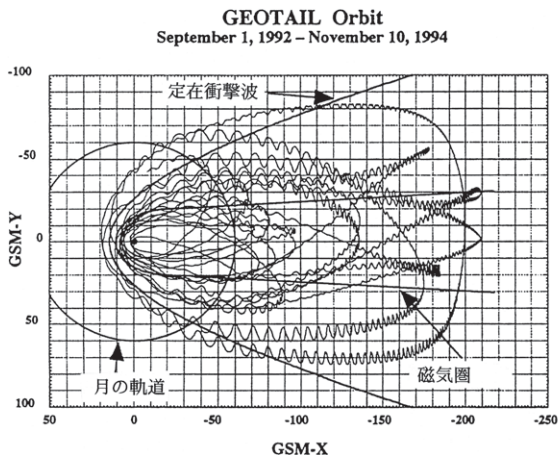


図9 ジオテイル衛星の軌道 (ISAS)
原点は地球、横軸は太陽方向で単位は地球半径。

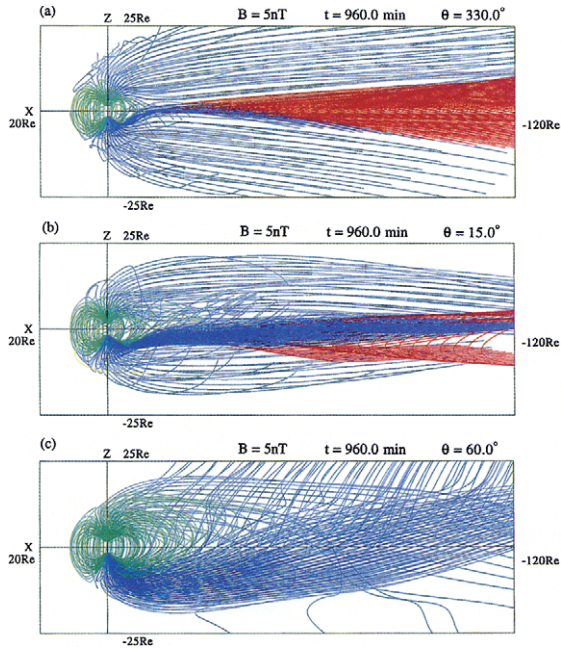


図10 磁気圏尾部の形は太陽風磁場の方向に支配される図は、太陽風磁場が赤道面となす角度が(a) 30度南向き、(b) 15度北向き、(c) 60度北向きの時の尾部の形。

た今も衛星は元気に観測を続けています。

ジオテイル衛星に搭載した機器が測定しているのは、まず磁場と電場です。磁場は磁気圏の骨組みにあたるものです。電場については、プラズマは磁力線と一緒に動くという性質がありますが、「ドリフト」とよばれるこの運動は電場に支配されます。また電場はイオンや電子を加速します。プラズマ観測には四種類の機器が用いられています。イオンや電子がいかにして加速されるか、ということ是最も重要な課題の一つですから、プラズマをしっかりと調べる。エネルギーの高いほうと低いほうでは測り方が違いますので、別の機械を使います。またプラズマというのは波が立ちやすいガスであり、その波があることによってイオンや電子のエネルギーが変わるとか、エネルギーが輸送されるということが起きますから、プラズマ波動も大事な観測項目で、そのための装置も載っています。

ジオテイル衛星の観測によりますと、磁気圏尾部はいつも存在しています。図10はこ

のことをシミュレーションによって示すものです。三つの図が含まれていますが、これは太陽風磁場の方向によって尾部の形と構造がどう変わるか見るためです。一番上の(a)は太陽風磁場が赤道面から南に30度の角度をなすときのものです。地球の近くの磁力線は閉じていますが(緑)、尾部の磁力線は開いています(青)。尾部の中の赤い磁力線は、尾部内のリコネクションで作られた磁力線のうち、地球に根をもっていないものです。真中の(b)は太陽風磁場が赤道面から北に15度の角度をなすときのものです。(a)と比べてみると、三種類の磁力線があるのは同じですが、尻尾がひねられているのが特徴です。これは開いた磁力線を介して、太陽風磁場が引っ張る力を及ぼすだけでなく、ひねりも加えるためです。

磁力線の基本的な形態(トポロジー)

は、(a)も(b)も図7と同じであり、磁気圏内の対流運動の流線も図7と同じです。対流速度は磁場が北向きに近づくとともに弱まります。

一番下の(c)は太陽風磁場が赤道面から北に60度の角度をなすときのものです。この時、尾部のひねられ方は(b)よりももっと大きくなりますが、それだけではありません。(a)や(b)の場合と違って、昼間側の磁気圏境界面ではリコネクションが起きていません。すなわち、閉じた磁力線(緑)が開いた磁力線(青)に変わるというプロセスが起きていないのです。これは、太陽風の磁場も磁気圏の磁場もどちらも北向きで、殆ど平行だからです。リコネクションの進み方は、接し合う磁力線の間の角度によって決まり、反平行のときが一番速く、平行に近づくに従って遅くなって、ある程度以上平行に近いと止まってしまう。太陽風磁場が真北向きに近いときには、太陽風との境界面で磁場が「ほぼ反平行」になっているのは昼間側ではなく、

尾部の表面においてですから、この時は開いた磁力線と太陽風磁場とが尾部境界面でリコネクトします。開いた磁力線（青）の太陽風内の部分が、リコネクションによって別の太陽風磁力線にとりかえられ、更新されるのです。この場合には尾部の中でのリコネクションはおきません。

太陽風磁場が真北向きに近い時を除いて、尾部の中でリコネクションがおきるところは2ヵ所あって、地球半径の約25倍と約100倍の距離にあります。遠い方でのリコネクションは図7や図10の(a), (b)に描かれているもので、ほとんどいつも起きています。地球から近い方でのリコネクションは爆発的におきるもので、オーロラの活動と深い関わりを持っています。

図11は二つの衛星のデータを比べています。上の図はオーロラの画像で、ジオテイルではなく別の衛星（ポーラー）が北極の真上近くで、地球半径の数倍のところから下にカメラを向けて撮った写真です。パネル毎に時間が書いてありますが、だいたい3分おきに画像が撮られています。7枚の画像がありますが、どの絵でも右側が夜側です。ご覧のとおりオーロラが環になっています。オーロラというのは磁極をとりまく光の環で、磁気圏から高速の電子が降ってきて大気を励起させ

るために発生するものです。オーロラの光の環はいつでも存在しますが、その幅や明るさは変化します。この例では、左から4番目の写真の時刻から、オーロラの環が最夜中ごろ明るさを増しました。

図11の下図はジオテイル衛星が観測したデータです。ジオテイル衛星は地球の半径で測って約30倍もの遠くにいたのですが、オーロラが急に明るくなったところと同じ磁力線の上にありました。オーロラの明るさと幅が増したところを通る磁力線をずっとたどっていくと、ちょうどジオテイルのいたところだった、という意味です。上の最も左の図には、逆にジオテイル衛星の位置を磁力線に沿ってオーロラの起きる高度に投影した位置が丸（GTL）で記されています。ジオテイル衛星のデータには二つのカーブが描かれていますが、赤いほうは速度のデータで、黒いほうは磁場の南北成分のデータです。プラズマの速度の単位はkm/sec、毎秒何キロメートルです。速度のデータを見ると、約400km/secという大変に速い流れが地球と反対向きに急に成長しています。同じ頃、磁場も変わりはじめています。北向きの成分が短い間増えてから、南向きになります。磁場が南向きで速度が反地球向きになるというのは、図7の磁力線8”や図10の赤い磁力線と同じ性質ですから、このデータはジオテイル衛星の地球側でリコネクションが発生したことを示しています。しかもそれが始まった時間は、オーロラが光りはじめた時間に非常によく合っていました。

図12はリコネクションの起きたところと、二つの衛星（ポーラーとジオテイル）の位置関係を描いたものです。地球半径の約25倍のところ起きるこのリコネクションは、閉じた磁力線の領域で発生し、地球と反対の方向に磁力線のループを飛び出させます。これをプラズモイドとよびます。

このように磁気圏尾部でリコネクションが起きることと、オーロラを光らせる電子の発生には密接な関係があるのです。このことは、

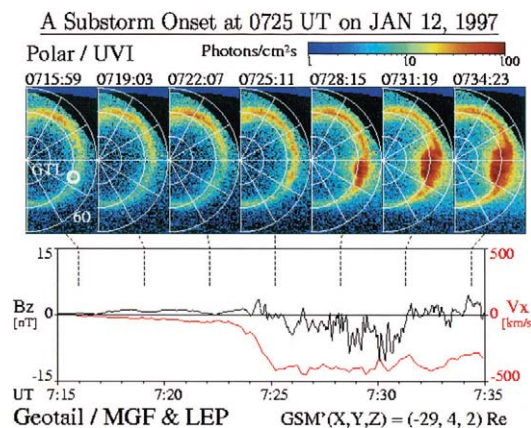


図11 オーロラの発達と磁気圏尾部におけるリコネクションの発生は密接に関連している (ISAS, NASA)

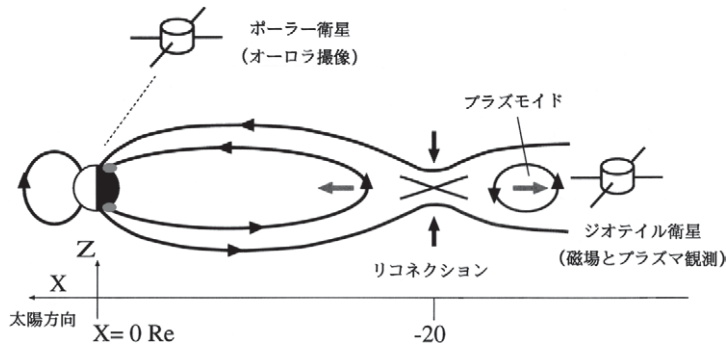


図12 図11が取得された時のポーラー衛星とジオテイル衛星の位置関係

リコネクションによって解放された磁場エネルギーが高速の電子を作り、オーロラを光らせるということを示唆しています。

どうしてリコネクションによってエネルギーが解放されるかということを簡単にお話ししましょう。力学的に言うと、磁力線というのはゴムひものような性質を持っているので、磁力線が引き伸ばされて尻尾の形になっているということは、ゴムひもが伸ばされていることに対応していて、そこにはエネルギーが蓄積されています。ゴムひもの場合には弾性エネルギーが蓄積されるのに対応して、磁力線の場合には磁場エネルギーが蓄積されます。

リコネクションが起きるということは、いわばゴムひもを二本ならべて伸ばし、その途中で二本を結び合わせてから、ちょん切るようなものです。そうすると、伸びていたひもは左右に分かれて縮んで行くという運動をします。動き始めるということは、運動エネルギーが増していることを意味しますから、ゴムひもの弾性エネルギーが運動エネルギーに変わったのです。磁気圏の場合には、伸びた磁力線が縮むことによって磁場エネルギーが運動エネルギーに変わります。摩擦のような何らかのエネルギー散逸機構があれば、熱エネルギーに変わります。このように磁気圏尾部は磁場

エネルギーの貯蔵庫であり、そこではリコネクションというエネルギー変換メカニズム（つまり加速機構）が働いているのです。

ジオテイル衛星は、リコネクションによって磁場エネルギーが解放されてオーロラが起きるということを観測したのですが、実は同じメカニズム

が太陽フレアの発生にも関わっていることがわかりました。

図13の左図は、同じころ宇宙科学研究所が打ち上げた「ようこう」衛星が観測した太陽フレアのX線画像です。これはちょうど太陽面の端のところ（リム）でフレアが起きた例であり、左下が太陽のリムです。明るく光っているところがエネルギーが解放されて温度の高いプラズマが作られているところですが、そこはどのようなところかということ、ループのてっぺんです。このループは、右側の図に描かれているように、磁力線を表すものです。リコネクションが起きているのは、衛星の画像に見えるループよりもすこし上の所で、そこで加速されたプラズマが太陽側に落ち込むところで高温になり、強いX線を放射しているのです。

したがって、太陽のフレアも、オーロラを含む地球の磁気圏の大規模な擾乱現象も、

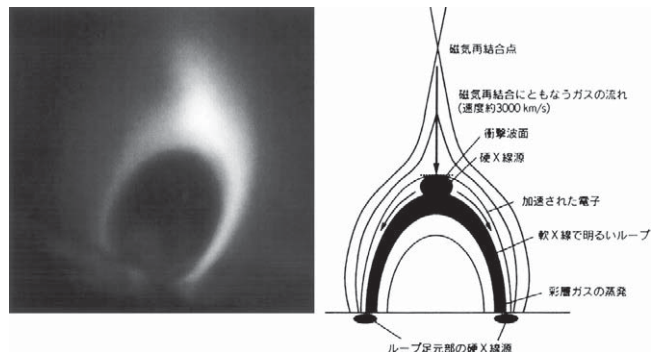


図13 太陽フレアの観測と磁力線リコネクションによる解釈 (ISAS)

どちらもリコネクションによって駆動されています。エネルギーの流れをまとめますと、地球の場合にはまず太陽風がエネルギーを運んで来、太陽風磁場と地球の磁場がリコネクションによってつながることによって、太陽風のエネルギーが磁気圏に入りこみ、磁気圏尾部の磁場のエネルギーとして蓄えられる。それが尾部の中で起きるリコネクションによって解放されて、オーロラなどの現象が発生するという順序です。太陽の場合は光球内で作られた磁場がコロナに広がり、激しい運動によって乱されて磁場エネルギーを蓄積している。そのエネルギーを解放しようとしてリコネクションが起き、フレアー現象が発生します。

さて、ここまでの私の話では、プラズマが流れている、それと共に磁力線が動いている、という表現をたびたび使いました。そこでは常識的な意味で速度という言葉を使っていたのですが、これからプラズマの加速を説明するためには、日常生活ではなじみのない概念、すなわち速度分布関数という概念を使わなければなりません。

速度分布関数というのは何かというと、いまここで1立方センチなら1立方センチの空気の塊を取ってみましょう。その中には約 10^{19} 個の分子がありますが、どの分子も止まっているわけではなくて、それぞれが異なる速度で飛び交っています。そのとき、それぞれの速度毎に粒子がいくつあるかということを示すものを速度分布関数といいます。グラフに描けば、横軸が速度で、縦軸が速度区分ごとの粒子数という格好になります。ある速度のものが一番多くて、それからはずれるに従って数は少なくなっていくというのが普通の分布です。

この速度を、1立方センチの中の分子すべてについて平均すると平均速度が出てくる。それが空気についていえば風速というものです。これまで使っていた「速度」はそういう意味の平均速度でした。空気の性質をあらわすには、この「速度」と共に温度も使います。

温度というのは、速度分布の幅を表すものです。つまり、1立方センチの中にある分子の速度にどれほどの広がりがあるかを示すのが温度です。空気が止まっていて平均速度がゼロのときには、右に行くものと左に行くものと、その速度の幅が温度に対応します。このように、中性の大気の場合には、風が吹いているか、空気が熱いか冷たいか、それだけで状態を表現できます。においがするというのがありますが、これは組成の問題で、今は忘れてください。組成の問題を忘れれば、大気のようなガスの性質は平均速度と温度、それに密度で表現できます。

しかし、ここで注意しなければならないのは、速度分布の幅を「温度」というパラメーターだけで表現できるためには、速度分布の形が何か決まったものでなければいけないということです。観測する場所ごとに、速度分布の形がまちまちだと、速度分布の広がりだけでは分布の性質を表現することはできません。実際には、空気の場合の速度分布関数は、平均値を中心にして「つりがね」のような形をしています。このように標準的な形のことをマクスウェル分布といいます。そのようになるのは、空気の密度が十分に高いので、分子同士が頻繁に衝突するからです。そうすると、あんまり速いやつは遅くされる、遅いものは速くしてもらえる、そういうことが頻繁に起きて、速度分布がある形にまとまります。そのようにしてマクスウェル分布という標準的な分布が実現されているので、「温度」というパラメーターで分布の広がりを表現することができるのです。

しかし、宇宙空間のプラズマでは、衝突はあまり起きてくれません。というのは、宇宙空間の粒子はそれぞれ速度が速く、密度が低い。そうすると、お互いにそもそもぶつかる確率が少ないし、衝突するコースに来てもあまり速度を変えずにすり抜けてしまう。だから宇宙空間のプラズマでは、衝突によって速度を調整しあって標準的な分布にするというメカニズムがあまり働かないのです。ちなみ

に、太陽風の中のプロトン（陽子）は太陽から地球までやってくる間に10回ぐらいしか衝突しない。これは途方もない少なさですね。そういうことがありますので、マクスウェル分布になりえないことが、しばしばあります。

速度分布がマクスウェル分布になっていないということは、宇宙空間の謎を解くためには、大変有難いことです。宇宙空間のプラズマにはいろいろな加速や輸送のメカニズムが働いていて、イオンも電子も、さまざまなメカニズムを経験しています。どの粒子も同じ経験をしてきたのではなく、たとえば、加速領域を一度だけ通ったことのある粒子と、二度、三度と繰り返して通ったことのある粒子とが、同じ場所に同時に存在していることがあります。そのような場合には、加速を何回受けたかで、当然、速度には違いがあり、速度分布はいくつかのグループが重なった形になります。グループ毎の性格や相違は、どのようなメカニズムで加速されたのかを反映しています。イオンや電子の速度分布が全体としてならされていず、マクスウェル分布になっていないということは、そういう貴重な手掛りが消されずに残っているということなのです。

しかし、マクスウェル分布と異なる速度分布は、いつまでも安定に存在し続けることはできません。マクスウェル分布が一番エントロピーの大きな状態ですから、マクスウェル分布でない分布は、なんとかマクスウェル分布に近づこうとします。衝突の効果は小さいのですが、ほかのメカニズムが働きます。そのうちの 하나가波を発生することです。波の話はあとで松本先生がなさいますが、波を介することによって、個々の粒子が相互作用するというよりは、ある程度まとまって相互作用しながら

エネルギーを散逸していくということがあります。ですから、速度分布がマクスウェル分布になっていない宇宙空間のプラズマでは、多彩な波動現象が起きます。たとえばオーロラから電波が出るというのもそういうメカニズムの一つが働いているからです。

衛星に搭載したイオンや電子の測定器は、あらゆる入射方向について、どんな速さの粒子が毎秒ごとに何個飛んできたかということ計測して、プラズマの速度分布関数を観測します。ジオテイル衛星は、予想にたがわず、非常に複雑な速度分布関数をしばしば観測しています。図14は、二つのピークを持つイオンの速度分布の一例です。（左の図では縦軸が磁場の方向、横軸は平均速度の方向であり、右の図では縦軸が電場の方向で、横軸が平均速度の方向です。）右の図でP1とP2と印をつけたピークは速度に相違があります。この違いは、P1周辺のイオンは加速領域を1回通っただけであるのに対して、P2周辺のイオンは2回通ったためであるとして解釈できるものです。矢印は全体をまとめて見たときの平均速度です。

また、宇宙空間のイオンや電子の速度分布には、エネルギーの非常に高い成分が存在することがあります。マクスウェル分布に比べると、エネルギーの高い成分が異常に多いということです。速度分布がマクスウェル分布に従っている粒子を熱的粒子とよび、マクス

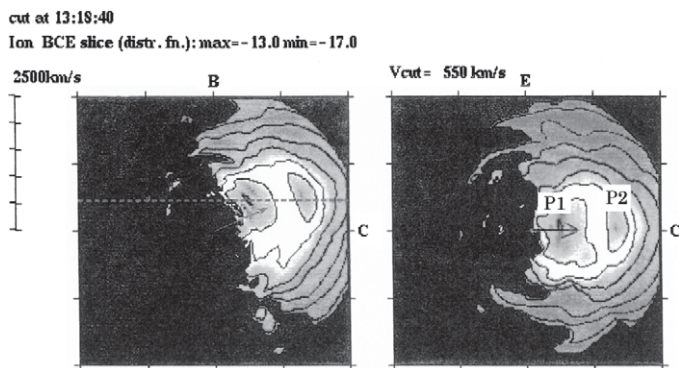


図14 ジオテイル衛星で観測された二つのピークを持つ速度分布関数の例 (ISAS)

ウェル分布の場合よりも過剰に存在する高エネルギー粒子成分を非熱的粒子とよぶことがあります。非熱的な粒子ができるためには、多数の粒子の中で一部分だけが特に効率的に加速を受けなければなりません。エネルギーの高いイオンや電子はさまざまな現象を引き起こす能力が高く、たとえ粒子数全体の中で占める割合が大きくなくても、目だった働きをします。従って、こういう成分がどうして作られるのかということは、物理として非常に興味ある問題であると共に、宇宙空間の現象を理解するために欠くことのできないものです。

リコネクションが起きる領域は、活発に加速が行われ、高エネルギーの粒子が作られる場所のひとつです。イオンや電子が加速されるためには、電場が及ぼす力の方向に粒子が移動できなければなりません。しかし磁場があるときのプラズマのドリフト運動は、電場に直角な方向を向いています。電場に直角に動いたのでは加速を受けることができません。ところがリコネクションが起きるところは方向の違う磁場が接しているところですから、磁場が弱いのが特徴で、そのために加速が起きうるのです。このことを図15を使って説明しましょう。

この図は磁場の方向が逆転する面 ($z=0$) を中心として、イオンの軌道を描いたものです。磁場の方向は図の上半分ではこちら向き、

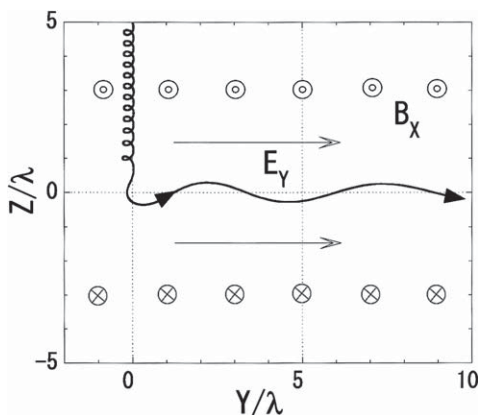


図15 磁気中性面の近くでのイオンの軌道

下半分では向こう向きで、真中の面は磁場がゼロの面、つまり磁気中性面です。電場は右向きです。図の上側から入ってきたイオンは、磁場の強いところでは、時計回りの回転運動をしながら磁場と電場に直角な方向にドリフトして、磁気中性面に近づきます。この面を通過すると、磁場の向きが反対になっていますから、回転運動の向きが変わります。反時計回りになります。イオンが半回転して中性面を再び通過すると、回転の向きはふたたび時計回りになります。このようにして、イオンは回転の向きを反転させながら磁気中性面に捉えられ、蛇行運動をすることになります。蛇行運動がイオンを電場の方向に移動させて行くので、イオンが加速されるのです。

高いエネルギーの電子がリコネクション領域で作られていることを示すシミュレーションをお見せしましょう。図16の上の図は、電子のグループが四つの時点でどこにあったかを示しています。それぞれの時点での位置を色の違いで区別しています。これらの電子は、ある単位で測って77.2という時間に図の左側のある点（黒丸）にかたまっていたものですが、それ以前の時間では広がっていました。下の図は、これらの四つの時点での電子のエネルギースペクトルです。77.2という時間のスペクトル（下左）を見ますと、電子の静止エネルギー mc^2 （約1メガ電子ボルト）を超える高いエネルギーを持つ電子が存在しています。この時エネルギーが静止エネルギーの1.015倍よりも低かったものは無視することにして、それ以外の電子がこれよりも前の時点で持っていたエネルギーを示すのが、ほかの三つのスペクトル図です。時間をさかのぼるほど高いエネルギーの電子は少ない、つまり時間が進むにつれエネルギーの高い電子が増えていることがわかります。

次に図16の上の図で時間順に粒子の群れの位置を追ってみると、65.9という早い時間では磁気中性面から離れたところで左右に広がっていたものが、時間がすすむにつれて磁気中性面に移動し、続いて磁気中性面の左の方

にひろがっています。磁気中性面を通るときに、静止エネルギーを超える高エネルギーの電子が作られているのです。前に説明に使った図15では磁場の構造が一次元でしたが、図16に示したシミュレーションでは二次元的なので、電子が何度も磁気中性面に戻ってきて、非常に高いエネルギーまで加速されています。

宇宙空間の研究は、科学衛星による観測が実現したために飛躍的に発展した分野です。磁気圏の尾部や太陽風にかぶる衝撃波面などの存在が衛星観測によって証明されたというだけでなく、これらの構造を作り、駆動するメカニズムを実証的に研究することが可能になったのです。今の講演の中でも、磁場とかプラズマの速度分布とかいう概念をたびたび使いましたが、宇宙空間の磁場やプラズマの速度分布関数は、地上から観測することはできません。衛星を飛ばして、宇宙空間のその場に観測装置を送ることによって、初めて観測できるものです。磁力線のリコネクションというメカニズムは現代の磁気圏物理学の要をなしていますが、もし衛星の観測がなかったら、決定的な証拠を欠いていたでしょう。衛星観測のデータが存在するからこそ、われわれはリコネクションが起きているかどうか

という疑問の段階を越えて、リコネクションの物理とその効果をもっと深く研究することができるようになっているのです。

宇宙にはほとんどどこでも磁場があります。ですから、磁力線のリコネクションというメカニズムは、宇宙のさまざまなところで発生し、プラズマを加速しているでしょう。太陽フレアもその例です。このように、地球周辺の宇宙空間の研究は、それ自体として面白いだけでなく、広い宇宙の現象を理解するための基礎としての意味も持っています。地球周辺の空間で起きている現象にくらべて、宇宙の現象は遥かに大きなエネルギーで駆動されていますが、そこに働いている素過程、たとえばエネルギーの高い電子をつくるメカニズムという点では、共通点があります。直接観測によって物理過程を確認することのできる地球周辺と太陽系の空間は、広く宇宙のプラズマ物理の実験室として、観測と比較しながら宇宙プラズマ素過程の理論を築いて行くことのできる場所としても重要なのです。

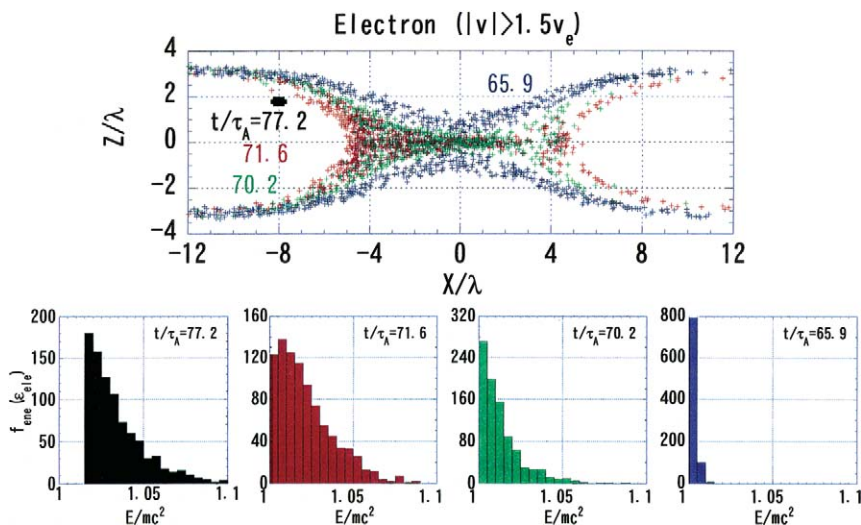


図16 リコネクションによる非熱的な高エネルギー電子の生成のシミュレーション