

奥は深いと感じたのは、筆者だけではないでしょう。これがPLANET-Bをはじめ将来の衛星計画に生かされ、また一段とすばらしい観測が出来る

事を信じています。

(向井 利典)

### 3. 磁気リコネクションとは何だろう

#### 磁場とプラズマの運動

磁気圏尾部で起きる磁気リコネクションのお話をする前に、まず高温低密度のプラズマ中での磁場とプラズマの動きから説明しようと思います。

磁場の接線方向を繋いでできる仮想的な磁力線はゴム管にたとえてイメージすることができます。地球磁場の磁力線は太陽風プラズマの風圧によって引き延ばされていますが、磁力線が引き延ばされていることは磁場の張力が強くなり磁場のエネルギーが磁気圏尾部にため込まれていることに相当しています。小学校の理科実験でエナメル線に電池で電流を流して電磁石を作ったことを思い出してみてください。太陽風が電池の役割を果たし磁気圏尾部に磁場を発生させてエネルギーを蓄えています。そして、そこでは磁場とプラズマが相互作用して様々な物理現象を生み出します。

磁場とプラズマの運動をゴム管にたとえてお話ししましたが、今度はプラズマ物理の言葉で言い換えてみます。まず、荷電粒子は磁場の回りを運動しています。その運動方向は荷電粒子の回転運

動によってできる電流が元の磁場を弱める方向になるよう運動し、プラスの電荷をもったイオンとマイナスの電荷を持った電子は磁場の回りを逆方向に回転します(図3-1)。磁場の回りの運動は、エネルギーの高い粒子ほど速い速度で回転します。温度が高いプラズマは速い速度で、冷たいプラズマはゆっくりした速度で回転します。そして、磁力線方向には粒子の持つ熱速度に応じて行ったり来たりの手気ままな複雑な運動しています。しかし、プラズマは磁力線を横切って運動することは禁じられています。プラズマが磁場に直角方向に運動するときは磁力線も同時に運動すると考えます。これはプラズマ物理では「磁場とプラズマの凍結運動」と呼び大切な概念の一つです(図3-2)。太陽風によって磁力線が引き延ばされたのも、磁場とプラズマの凍結運動の結果の現れです。

しかし、時々プラズマが暴れてこの凍結運動の掟を破ることがあり、磁力線を溶かしたり切ったりすることがあります。暴れん坊のプラズマが磁気圏尾部で引き延ばされている磁力線を切断してしまうと、磁力線というゴム管が急激に縮み、磁

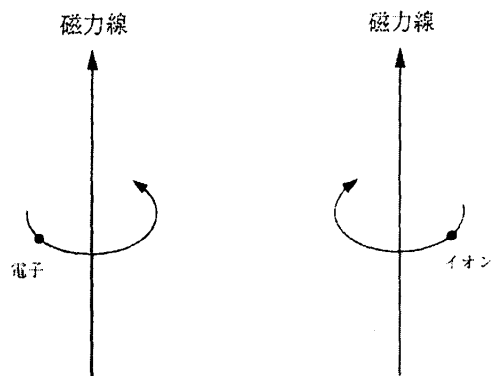


図3-1 磁場中でのプラズマの運動

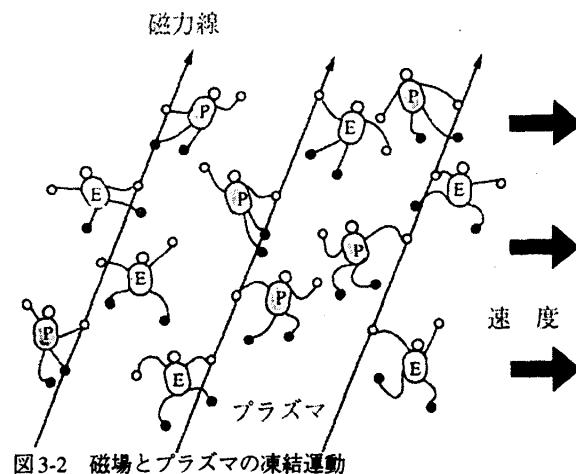


図3-2 磁場とプラズマの凍結運動

気圏尾部に蓄えられていた磁場のエネルギーは一気に解放されてしまいます。そして、エネルギーを得たプラズマは地球に向かって飛んできて北極や南極で色艶やかに輝くオーロラ現象を導くことになります。

ところがこの暴れん坊のプラズマでも守らなければならぬ厳しい掟があります。それは、磁力線はどこまでいっても途切れることなく一本の繋がった線になっていなくてはいけないという決まりです。それはN極だけ又S極だけのモノポールと呼ばれる素粒子が存在しないからです。そして磁力線を切断するときは、切断後すぐに磁場の極性も合うように必ず別の磁力線に繋ぎ変えなくてはなりません。

### 磁気圏尾部での磁気リコネクション

暴れん坊のプラズマが、磁力線を溶かしたり、また磁力線の一部を溶かして別の磁力線と繋ぎ変えたりする性質は、ゴム管に火を近づけて溶かしたり、一部を溶かしたゴム管を即座に別のゴム管と繋げ直したりすることに対応させてもよいでしょう。確かに磁場が溶けるときは暴れん坊のプラズマは高温になっています。磁場が溶けることをプラズマ物理では「磁場の拡散」といいます。磁場の拡散領域では、ジュール加熱により磁場のエネルギーが熱エネルギーに変換されています。「磁気リコネクション」または「磁力線再結合」とは、磁力線を溶かして別の磁力線への繋ぎ替える過程のことです。図3-3に示してあるのが磁気リコネクション過程の模式図ですが、図3-3aの2本の異なった磁力線のゴム管チューブが、ある時一部で磁場の拡散が起きて繋ぎ換えを起し図3-3bのようにトポロジーを変えます。図3-3aの異なった磁力線のチューブに詰まっていたプラズマは、磁気リコネクションによって混合されます。磁気リコネクションは、磁気圏尾部だけでなく、地球の昼間側

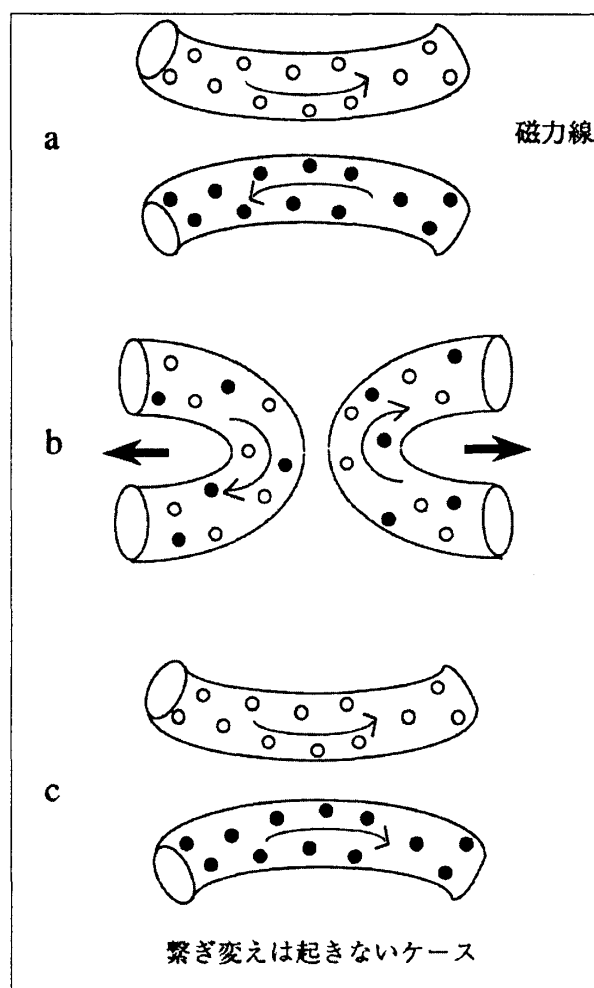


図3-3 磁気リコネクション過程

で太陽風プラズマ領域と地球磁気圏領域の境界層でも重要になります。そこでは、地球磁気圏起源のプラズマと太陽風起源のプラズマの混合という過程が大切になります。図3-3cのように、もし2本の磁力線が同方向の磁場を持っていたときは、磁気リコネクションは起きません。この基本的概念は、1960年頃に Giovanelli 教授や Dungey 教授が提唱したもので、宇宙プラズマ現象では非常に重要な役割を果たしています。例えば、「ようこう」でお馴染みの太陽コロナでのフレアに伴う現象も、磁気リコネクションと深く関わっていることが知られています。

磁場の極性が反転する「磁気中性面」で磁気リコネクションが起きると、「U」字型に曲がった磁

力線は丁度ゴム管が縮もうとするように、「磁場とプラズマの凍結運動」によりプラズマを引き連れて磁力線が縮む方向に運動し始めます。このときプラズマは加速されて速度を得るわけですが、磁気圏尾部ではその速度は秒速数百 km 以上にも達します。このエネルギーの源は磁気圏尾部で引き延ばされていた磁力線の張力であり、その張力は太陽風によって作られていたわけですから、磁気リコネクションのプラズマ加速のエネルギーは太陽風が源であると言えます。

さて、図3-3aから図3-3bにトポロジーが変化するとき、磁力線の形はちょうどアルファベットの「X」の形をしています。そして、その中心は磁場の拡散が起きて磁力線の繋ぎ換えが進行している場所で、「磁気リコネクションのX点」と呼びます。そこでは、ジュール加熱によりプラズマは加熱されているはずですが、もし「X点」が存在しないのなら磁気リコネクションは起きず、磁気圏尾部に蓄えられた急激な磁場エネルギーの解放に始まり、その高エネルギー粒子の地球極域への振り込み、そしてオーロラ現象へと繋がらないはずですが、「X点」は物理的にも非常に重要な領域にもかかわらず、これまでの衛星ではX点領域の詳しい観測はなくジオテイルでの成果が期待されます。

ところで磁気リコネクションが発達してくると、磁気中性面に向かって流れ込んでくるプラズマの速度が増してプラズマ中での音速を越えることがあります。すると超音速ジェット機の前面に形成される衝撃波と同じようにプラズマ中では「磁気音波の衝撃波」が発達して、そこでは激しいプラズマ加熱が起きます。図3-4に示したのは、磁気リコネクションが発達して衝撃波が出来た状態の模式図ですが、大きさはおよそ縦が地球半径の10倍程度で横が50倍程度で磁気圏尾部の一部を切り取りとった図とお考え下さい。図中央にあるのが磁場の繋ぎ換えを起こしている磁場の拡散領域の「X

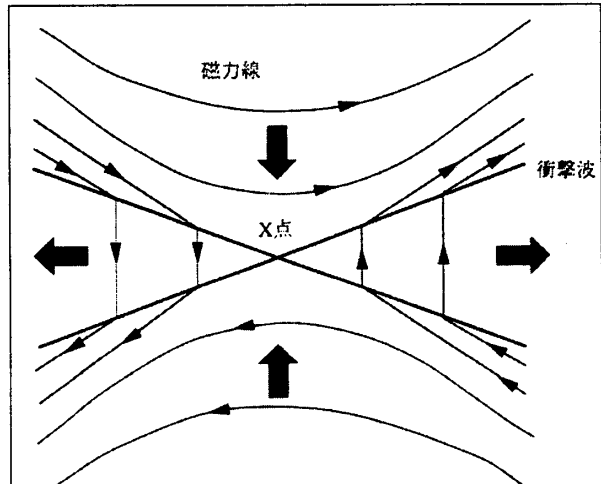


図3-4 磁気リコネクションと衝撃波

点」です。プラズマは上の方からまた下の方から磁気中性面の方向に向かって流れてきますが、流れ込んできたプラズマは方向を変え磁気中性面の近傍では左右の方向に向かって流れ出します。磁気リコネクションが発達してきて上下の境界から流れ込んでくるプラズマの流速がプラズマ中での磁気音波の速度を超えると図3-4に示してあるようなX点から延びる4つの衝撃波が形成されて、そこで急激な速度変化が起きます。その衝撃波面のところでは磁力線が鋭く「く」の字に曲がっているので磁力線の張力によるプラズマ加速も一段と効率を増します。磁気圏尾部に溜め込まれた磁場のエネルギー解放プロセスとして、衝撃波は非常に重要な役割を果たすでしょう。この衝撃波は実際ジオテイル衛星で観測されており、その詳細な構造は後で示します。

ところで磁気リコネクションが磁気圏尾部で起きていることは確立された概念だといっていますが、現在の研究の焦点は、いつどのような条件が満たされたときにどこで磁気リコネクションが起きるのか、また磁力線を溶かす磁場の拡散過程はどのようになっているのか、という問題に移ってきています。とくに磁場の極性が反転する磁気中性面での磁場の拡散は暴れん坊の少数のプラズマ達の振る舞いによるもので、その暴れん

坊の不可解な行動を理解するのは非常に厄介で、プラズマ物理の大問題のひとつとなっています。

## 磁気リコネクションとプラズモイド

磁気リコネクションによって磁気圏尾部はどのようなダイナミックな構造変化をすることでしょうか。近年、地球物理学での観測研究方法は、複数の人工衛星や地上での観測網を利用した総合解析に移ってきていますが、それでも基本的には点と点での観測なので本当はグローバルな磁気圏の構造がどのように変化したかを論ずるのは非常に難しいところがあります。しかしこれまで蓄積されてきた多くの傍証により図3-5のような構造変化が起きているだろうと考えています。磁気圏尾部での活動が静かで特に激しい変化のない時は図3-5aのようにになっているプラズマシートが、ある時、地球の半径にして15倍から30倍程度の所で磁気リコネクションが起きて図3-5bのようなプラズマシートの構造変化を起こし、特に磁気圏の尻尾の方では磁気リコネクションによって吐き出された熱いプラズマが巨大な塊となって秒速数百 km 以上の速い速度で流れ出します。このプラズマの塊を「プラズモイド」と呼びます。このプラズモイドは磁気リコネクションの情報をたっぷり含んでいるので磁気リコネクションのメカニズムを知る上でも非常に大切な現象です。ジオテイル衛星で捉えたプラズモイドは後でまた述べます。

さて、磁気嵐と呼ばれる地上での激しい磁場の

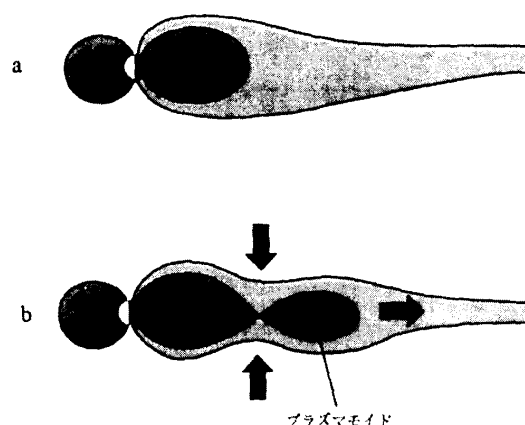


図3-5 磁気圏尾部でのプラズモイドの発展

変化からいつ磁気圏尾部で磁気リコネクションが起きたかを知ることが出来ますが、磁気圏尾部での人工衛星のプラズモイドの出現時刻と地上での磁気嵐の発生時刻とは非常によい相関があり、プラズモイドが磁気リコネクションによって作られているのはかなり確かな事だといってよいでしょう。

また、数分程度の短時間で急激に成長する磁気リコネクションによるプラズモイドは MeV 程度の高エネルギーの粒子を伴うこともあり、どのようにして通常のプラズマシートでの数 keV の温度から MeV まで粒子が加速されるのかは、磁気圏物理としてだけでなく高エネルギー天体プラズマ物理としても非常に面白い研究テーマです。

それでは、次の章ではいくつかのテーマに分けて実際のジオテイルの観測結果を眺めてみることにします。大自然の中での非常に不思議なプラズマの振る舞いを御覧頂けるかと思います。(星野真弘)

## 4. 地球の尻尾では何が起きているか

### 引き伸ばされた地球の尻尾

地球の磁場は太陽風を遮る役目を果たしています。昼間側では地球半径の10倍程度の距離で太陽風をせき止め、地球の大気は金星や火星のように直接太陽風にさらされる事はありません。一方夜

側の磁場は太陽風により変形され、彗星の尾と同じように太陽と反対側に長く引き伸ばされた尻尾を形成しています。この地球の磁場で支配される領域を「地球磁気圏」と呼んでいます(図4-1)。磁気圏という名称は、磁場がプラズマの運動を決め、いわばプラズマの運動に対して座標のような役割