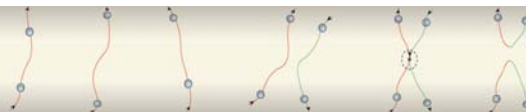


Breaking through the lines

Xラインの謎を解く

Götz Paschmann



プラズマ中の磁力線は自発的に再編成を起こし、磁気エネルギーを粒子の運動エネルギーに変換する。太陽風中で得られた観測結果から、こうした現象の規模が従来考えられていたよりも大きいことが示された。

Nature Vol. 439(144-145)/12 January 2006

プラズマとして知られるイオン化したガス中で起こる磁場のリコネクションは、魅力的で不思議な現象である。リコネクションによって磁場の形状が変わり、磁場に蓄えられていたエネルギーはプラズマを構成する荷電粒子の運動エネルギーに変換される。太陽大気中での爆発的なエネルギーの放出から核融合炉での突発的なプラズマの崩壊に至るさまざまな場面で、この現象の存在を示す直接的・間接的な証拠が得られている。Nature 1月12日号で、Phan たちは太陽風（太陽から連続的に放出されるプラズマの流れ）における磁気リコネクションに関する最新の観測結果について報告し、この過程を支配する空間スケールと時間スケールを明らかにした¹。

プラズマは、宇宙空間では主に陽子と電子から成り、その中に磁場が広がっている。プラズマと磁場は、あたかも一緒になって凍結しているようにふるまう傾向がある。すなわち、プラズマ粒子は磁力線のまわりを旋回することで磁力線の物理的形狀を借りていて、粒子が動くとき磁力線も粒子とともに動くのである。このことから、ボールに入ったスパゲティをかき混ぜたときの1本1本のスパゲティにいくぶん似た感じで、同じ磁力線は、絶えず位置と形状を変えてはいても、同じプラズマ粒子を常に結びつけているということになる（図1a）。

しかし、プラズマの動きが逆方向に向いている2つの磁力線を引き合わせたら、何が起こるだろうか。凍結画像では、どんなに強く押しつけられても、すべての粒子は対応する磁力線上にとどまるであろう。しかしこの画像は近似にすぎず、現在未解明のある状況では、磁力線はプラズ

マに対してすべり、分裂して「Xポイント」で交差し結合する（図1b）。こうなると、磁力線は鋭く湾曲し、ゴムで石を飛ばすパチンコのような働きをして、蓄えられているエネルギーを粒子に分け与え、粒子を高速ではじき出す。これが磁気リコネクション（磁力線のつなぎ変わり）として知られる現象である^{2,4}。

隣接した面内にある磁力線もつなぎ変わる可能性があり、その結果、多数のXポイントを結びつける「Xライン」ができる（図1c）。つまるところ、これが、太陽風が地球の磁場に遭遇するときに起きている現象である。太陽風は太陽の磁場を惑星間空間に運ぶので、凍結原理が守られるならば、太陽風は地球磁場内に侵入できない。しかし、直接的・間接的な観測によって、凍結状態は太陽風と地球磁場を分ける磁気圏界面で破れることが示されている⁵⁻⁷。このため、地球の磁力線は太陽の磁力線と直接結びつくようになり、太陽風のプラズマは結合した磁力線に沿って地球の磁気圏に流れ込むのである。

しかし、リコネクションは太陽風の中でも起こりうるのだろうか。太陽表面の近くの状態は空間的・時間的に複雑に変動しているため、太陽風の密度と速度は急激に変化し、これに伴って太陽風の磁場の方向が回転する。凍結原理が破れなければ、このような遷移の両側にあるプラズマが混じり合うことはないであろう。凍結原理が破れれば、必然的に磁気リコネクションが起こる。太陽風内に配置された宇宙機は、プラズマと太陽風の急激な特性変化だけではなく、リコネクションに特有の高速プラズマ流によっても遷移領域の通過を調べられると考えられる。NASAのACE

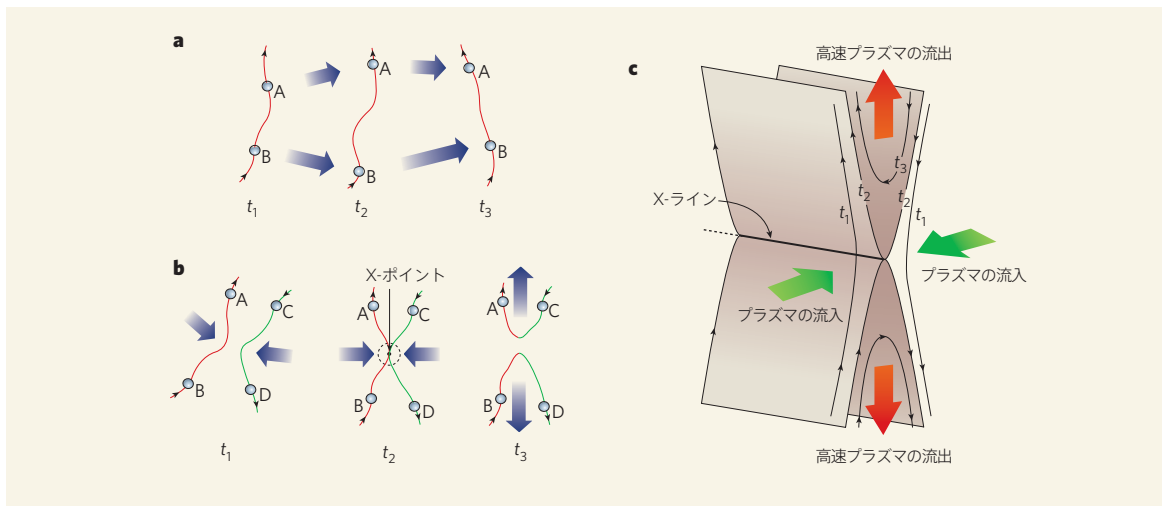


図1 磁気リコネクションの詳細。a. 磁力線は通常プラズマの流れ（青線）の中に凍結しているので、時刻 t_1 で磁力線によって結びつけられた2つの荷電粒子AとBは、その後も同じ磁力線によって結びつけられたままである。b. それぞれが粒子AとBおよび粒子CとDで識別される反対方向を向いた2本の磁力線は、時刻 t_1 で互いに近づく方向に動いている。時刻 t_2 で接触すると、いわゆるXポイントで2本の磁力線は分裂し、交差して結合（リコネクト）する。その結果、時刻 t_3 で粒子AとC、および粒子BとDが結びつけられる。大きく曲がった磁力線はパチンコ（ゴムを利用して石を飛ばす道具）のような働きをし、プラズマが高速でこの領域から流れ出る。c. Xラインに沿ってリコネクトした磁力線の透視図（緑の矢印がプラズマの流入、赤の矢印が高速プラズマの流出を示す）。時刻 t_1 から t_3 は、図bで示される過程の同じ段階に対応する。Phanたちは太陽風中のXラインの長さを調べた。

衛星（Advanced Composition Explorer）は最近、まさにこのような現象を観測した^{8,9}。

しかし、それはACE衛星1機のみによる観測だったため、プラズマ流を発生させるXラインの長さは測ることができなかった。また、リコネクション層が太陽風の速度で宇宙機を通り過ぎるのに要する時間は数分間だが、リコネクションが活動的であった時間がこれより長かったのかどうかも明確にはならなかった。Phanたち¹は、3機の宇宙機（NASAのACE衛星とWind衛星、そしてヨーロッパ宇宙機関の4つのクラスター衛星のうちの1つ）が思いがけない配置をして、広いベースラインでの測定が可能なることを利用し、これらの未解決問題に取り組んだ。2002年2月2日、3機の宇宙機は次々とリコネクション層の通過を記録したが、これらの宇宙機によって観測された特徴は基本的に同一であり、特にプラズマと磁場の正味の変化とプラズマ流に関してはまったく同じであった。

観測されたプラズマ流は、リコネクション層の前後での磁場の変化と局所的なプラズマの密度に基づく理論予測と定量的に一致していた。Phanたちは簡単な幾何学的な検討によってXラインの方向を推測し、Xラインの長さは少なくとも250万km、地球の直径のほぼ200倍になるはずだと算定した。さらに、3機の宇宙機を通過した時間の間隔から、リコネクションは爆発的ではなく、少なくとも2時間半は安定して起きていたことが明らかになった。

磁気リコネクションの空間的・時間的特性についてのPhanたちの観測結果¹は、この現象が何に似ているのか、この現象によって何が起こるかといったことについての、時として加熱しがちな議論を刺激することになるであろう。さらに、2006年後半に打ち上げ予定のNASAのSTEREO衛星によって、より広いベースラインが利用できるようになり、太陽風リコネクションの研究がより大きなスケールで展開できると期待されている。最も小さなスケールの現象については、2013年打ち上げ予定のNASAのMMS（Magnetospheric Multi-Scale）衛星によって、凍結した磁場を崩壊させてリコネクションを起こすXライン近傍における運動論的なプラズマ過程を調べることができるだろう。磁気リコネクションの本質、小さなスケールの現象と大きなスケールの現象を結びつける能力、そしてさまざまな宇宙環境で果たす大きな役割が最終的に解明されることに、大きな期待が寄せられている。 ■

Götz Paschmann、マックス・プランク地球外物理研究所（独）

1. Phan, T. D. *et al. Nature* **439**, 175-178 (2006).
2. Dungey, J. W. *Phys. Rev. Lett.* **6**, 47-48 (1961).
3. Petschek, H. E. in *AAS-NASA Symp. Physics of Solar Flares* (ed. Hess, W. N.) 425-439 (NASA, Washington DC, 1964).
4. Sonnerup, B. U. Ö. *J. Plasma Phys.* **4**, 161-174 (1970).
5. Paschmann, G. *et al. Nature* **282**, 243-246 (1979).
6. Sibeck, D. G. *et al. Space Sci. Rev.* **88**, 207-283 (1999).
7. Phan, T. D. *et al. Space Sci. Rev.* **118**, 367-424 (2005).
8. Gosling, J. T. *et al. J. Geophys. Res.* **110**, A01107 (2005).
9. Gosling, J. T. *et al. Geophys. Res. Lett.* **32**, L05105 (2005).