

宇宙プラズマの実験室「磁気圏」

藤本正樹

総合研究大学院大学教授宇宙科学専攻／宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部教授

地球を取り囲む磁気圏では、高温プラズマ粒子が加速されダイナミックな様相を見せている。Geotailをはじめとした磁気圏観測衛星の活躍によって、宇宙空間のいたるところに存在するプラズマガスの解明が進んでいる。

「その場」観測が可能な磁気圏

地球の周りには高温プラズマの世界「磁気圏」が広がる。磁気圏は、地球磁場に太陽コロナを源にする太陽風が衝突して形成される。極域の夜空を彩るオーロラも、その究極の起源を磁気圏のプラズマ活動にもつ。近年、数多くの衛星観測結果から、磁気圏物理としての知見が深まりつつある。それと同時に、磁気圏は「その場」観測が唯一可能な宇宙空間であり、そこで得られる精密な知見が磁気圏という枠を超えた普遍的価値をもつという意識が高まりつつある。

宇宙空間を満たすプラズマガスは、それを構成する粒子同士が衝突しないという、地上ではありえない高温低密度な状態にある。それ故に、宇宙空間ダイナミクスの理解には地上の常識を当てはめる

ことはむしろ危険である。「その場」で衛星観測を行って詳細な情報を集め、実証を伴って理解を進めるべきである。「その場」観測では、電磁場を波動成分まで観測し、荷電粒子を計測してその速度空間分布を決定する。粒子レベルのデータからの精密な議論が磁気圏観測の強みである。

従来の磁気圏研究は、他の天体プラズマ研究と同様、主に電磁流体方程式に基づいていた。宇宙プラズマでは、無数のイオンと電子が電磁場の影響の下で動き回り、それで生じる電流が電磁場の時間発展に影響する。そのままでは複雑だが、大規模ダイナミクスに興味を絞れば電磁流体力学(MHD)という方程式系で議論できる。実際、宇宙空間におけるマクロな空間構造の平均描像はMHD予測とよく合う。

一方、宇宙空間現象の魅力は、太陽フレアやオーロラ爆発のように、ダイナミックな様相にある。そして、宇宙プラズマにおいて爆発的現象が展開する真の原因は、全体としては大規模でも、その中に鍵となる小領域が出現し、そこで鍵となるプロセスが発動することにある。その鍵プロセスは粒子の振る舞いがMHDの制約から解放されることに関係することが見えてきた。

磁気リコネクションの物理

磁気リコネクション(MRX)を例に取ろう。MRXは磁場エネルギーが爆発的に解放される過程で、宇宙プラズマにおいて最も重要な過程の1つである。地球の夜側では双極子磁場が引き伸ばされ、反対向きの磁力線が電流層を挟んで対峙する。この反平行磁場はMRXを起こ

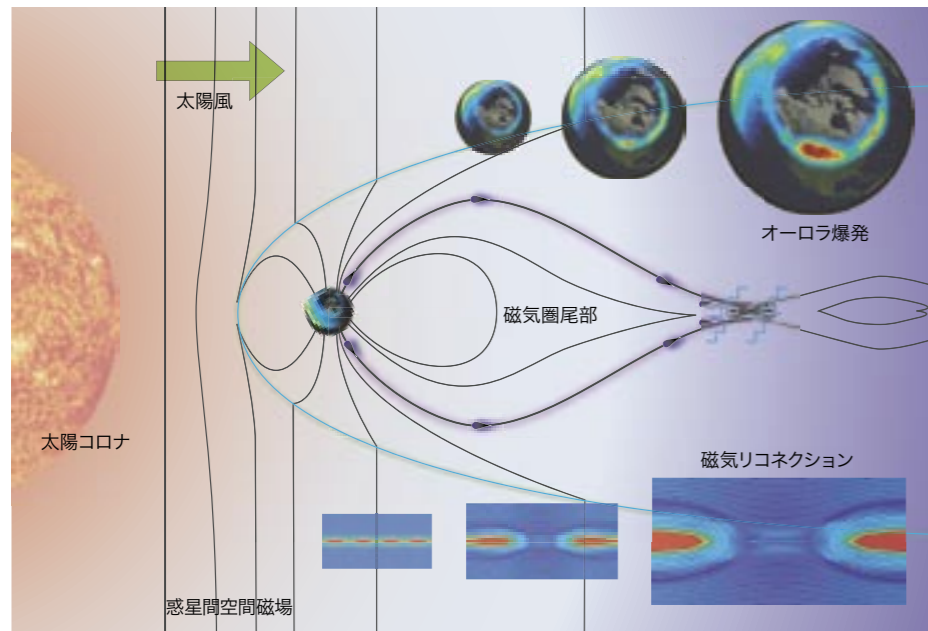


図1 地球磁気圏は太陽から噴出する太陽風と地球固有磁場の相互作用で形成される空間であり、そこは宇宙プラズマの実験室である。磁気圏夜側で引き伸ばされた磁力線は、磁気リコネクションを起こしてエネルギーを急激に解放する。これに伴い極域の夜空ではオーロラが乱舞する。これはオーロラ爆発と呼ばれる現象で、究極的には、太陽風中の磁場が南向きの極性をもった場合に磁気圏内のプラズマガス対流が強められることに原因がある。

し、放出されるエネルギーは、プラズマジェットを生成。プラズマ粒子を高エネルギーへと加速し、オーロラ爆発を引き起こす(図1)。

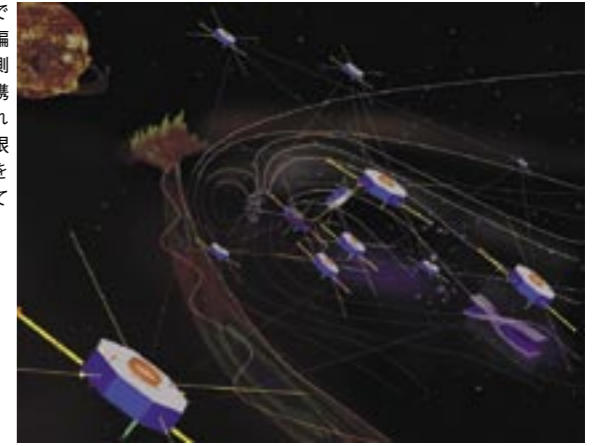
このようにMRXは全体としては大規模だが、実はMHDではその全貌はとらえきれない。粒子加速はもちろん、トリガー機構やジェットを駆動するエンジン部(「鍵領域」に当たる)の理解には、電子の粒子性があらわになる電子スケールに遡って物理過程を理解する必要がある。地球磁気圏の場合では、100kmから10万kmまでの3桁も空間スケールの異なる過程が連携する様相を、それも時間変化を伴って連携している姿が明らかにされて、はじめてMRXの全貌を解明したと言える。

では、衛星観測でMRXにどこまで迫れたのだろうか。粒子効果への興味は、日米共同計画Geotail(1992年打ち上げ)が先導した。日本チームの粒子観測器は、MRXエンジン部近傍で粒子速度空間分布がマクスウェル分布に程遠いこと、電子が強く加速され、それが大規模ダイナミクスから要請される電流構造を担うことなど、イオンスケール・ダイナミクスを明らかにした。

2000年に打ち上げられた欧州宇宙機関のClusterは、4機編隊で飛行し空間構造を把握するように設計された。衛星間距離がイオンスケール程度のときは上で述べた電流構造を捕捉し、電子スケールの数倍のときにはさらに薄い電流層が強烈に加速された電子で担われることを解明しつつある。これらの研究にはGeotailデータ解析で活躍した日本の研究者が参加している。2013年打ち上げ予定のNASAのMMS(日本から粒子観測器を搭載)は、電子スケールに特化した編隊観測を行い、鍵領域への「ズームイン」を進化させることを目指している。

「ズームイン」への期待は最新数値実験からも高まっている。ここでは、分厚い電流層において素早くMRXを駆動する過程はありえるか、という大問題に挑戦する日本チームの成果を紹介する。電流層が分厚く、従来の考えでは何も起こら

図2 CrossScale計画の予想図。日欧で共同して12機の衛星で3スケールの編隊を構成する。CrossScaleによる観測は、さまざまなスケールの過程が連携してダイナミックな現象が生み出されている様相を解明し、磁気圏物理の根源的理解を目指すとともに、磁気圏を自然の宇宙プラズマ実験室とみなして普遍的な枠組みにおいても貢献する。



ない場合でも、イオンが電子を引きずるような波動が発生。低減された電流量を補填するように電子が加速し、そこで生じる二次的電流層を舞台にした素早い磁気リコネクションが駆動、という異種スケールに跨るダイナミクスの連携(スケール間結合)が見いだされた。これは、ダイナミクスは階層ごとに独立し間接的にのみ階層間で連携、という従来の描像と大きく異なる。そして、この動的スケール間結合が常識破りの効果をもたらすのだ。

マルチスケールの同時観測へ

ここで注意すべきなのは「ズームイン」だけでは片手落ちだということだ。宇宙プラズマの魅力はスケール間結合に起源があり、鍵領域での電子スケール分解と同時に、大スケールにおいて、それへの境界条件やその波及効果の観測も行う必要がある。各スケールでの観測の重ね合わせではなくマルチスケールの同時観測を行う必要性は、興味の対象がダイナミックな現象であり定常構造ではないことに由来する。

この同時マルチスケール観測を狙うのが日欧共同CrossScale計画(2017年打ち上げ想定)である。3スケール(電子・イオン・MHD)の編隊を12機の衛星で構成、電子スケール編隊は日本が担当し、超高速電子計測、熱的・非熱的遷移エネルギー粒子計測、電磁波動3成分・精密電場計測という新規要素も搭載。磁気リコネクション、衝撃波、境界層乱流等、普遍的宇宙プラズマの枠組みにおいて重要な物

理過程の根源的理解を目的とする。

全体を把握しながら鍵領域も局所的に把握するCrossScale計画は、過去の衛星観測の制限を取り払い、磁気圏での精密「その場」観測から実証的に宇宙プラズマ物理の深化に貢献する。CrossScale計画の実行は、将来の水星磁気圏・内部太陽圏探査(日欧共同BepiColomboによる未知領域の探査、2013年打ち上げ予定)、および木星磁気圏探査(日欧共同による太陽系最大の粒子加速器の探査、2020年代前半打ち上げ想定)の成果を最大化し、宇宙プラズマの文脈で定着させるためにも必要である。世界中の研究者の期待を集めつつ、ミッションの検討が現在進められている。



藤本正樹(ふじもと・まさき) 大学院時代からプラズマの粒子シミュレーションを行ってきたが、1992年のGeotail衛星の打ち上げをきっかけに磁気圏観測衛星データの解析にも着手。現在は、それらの連携と、さらにCrossScale・水星探査・木星探査といった将来の観測から、宇宙空間を満たすプラズマガスの根源的理解を目指す。