

地球の磁気バリアの破れを X 線で診る

松本 洋介

Matsumoto Yosuke

1. ダイナミックな宇宙環境

地球周辺の宇宙空間は静かな真空が広がっているように思われるが、実際には太陽から絶え間なく流出する超音速のプラズマ流である太陽風によって支配されている。太陽の最外層大気であるコロナは100万℃を超える高温状態にあり、その熱膨張圧が太陽の重力による束縛を振り切ることで、電離した粒子が惑星間空間へと流出しているのである。この太陽風は、秒速400 kmの速さを持ち、時には秒速1000 kmにも達する。地球の公転軌道においても一定の動圧を維持しながら常に吹き付けている。

地球はこの太陽風に常に晒されているが、地球が持つ固有磁場がバリアとなり、太陽風プラズマが大気を直接剥ぎ取ることや、高エネルギー宇宙線が地表に到達することを一定程度防いでいる。この磁気的な勢力圏を地球磁気圏という。地球磁気圏は、太陽風の動圧と磁気圏の磁気圧が釣り合う磁気圏境界を太陽側に形成し、太陽風を受け流す磁気バリアとして機能している。しかし、このバリアが存在しても地球磁気圏は完全に閉じられた閉鎖系とはならない。磁気リコネクションと呼ばれる物理プロセスによって磁気バリアは破られ、太陽風の磁気エネルギーやプラズマ粒子の一部が磁気圏内部を経て地球へと輸送されるのである。

このプロセスにより流入した太陽風エネルギーは、オーロラの発生や放射線帯の形成・変動、あるいは大規模な地磁気嵐を誘起し、人工衛星の運用障害や通信・電力インフラへの影響を及ぼす等、いわゆる宇宙天気現象の主因となる。現代の高度情報化

社会において宇宙空間の安全・安定的な利用を継続するためには、磁気圏境界を介したエネルギー流入の実態を正確に把握し、人類の勢力範囲の宇宙空間—ジオスペース—の電磁環境を理解・予測することが重要な課題となっている。

2. 磁気リコネクションの役割と観測の難しさ

磁気リコネクションは、向きが互いに反対方向の成分を持つ磁力線が局所的に繋ぎ変わる現象である。この繋ぎ換えによって、蓄積された磁気エネルギーがプラズマの運動エネルギーや熱エネルギーへと変換される爆発的な物理過程であり、宇宙におけるエネルギー解放の根源的なメカニズムの1つである。この現象は地球磁気圏の太陽側境界において頻繁に発生し、地球磁場と太陽風磁場が結合することで、本来は独立していた両領域間での物質・エネルギー輸送を可能にする。

この物理過程を特徴づける重要な指標が「リコネクション率」である。リコネクション率は、磁気エネルギーがプラズマの運動へと変換される効率を定義するものであり、磁気圏へのエネルギー流入の総量を決める鍵となる物理量である。この値を正確に見積もることができれば、ジオスペースの変動規模を予測する精度向上に貢献できる。

これまでのジオスペースの主要な観測手法は、特定の空間点における物理量を精密に計測するその場観測(in-situ observation)であった。現在も日本の「あらせ」や米国の「MMS (Magnetospheric Multiscale)」といった科学衛星が、極めて高い時間分解能で電磁

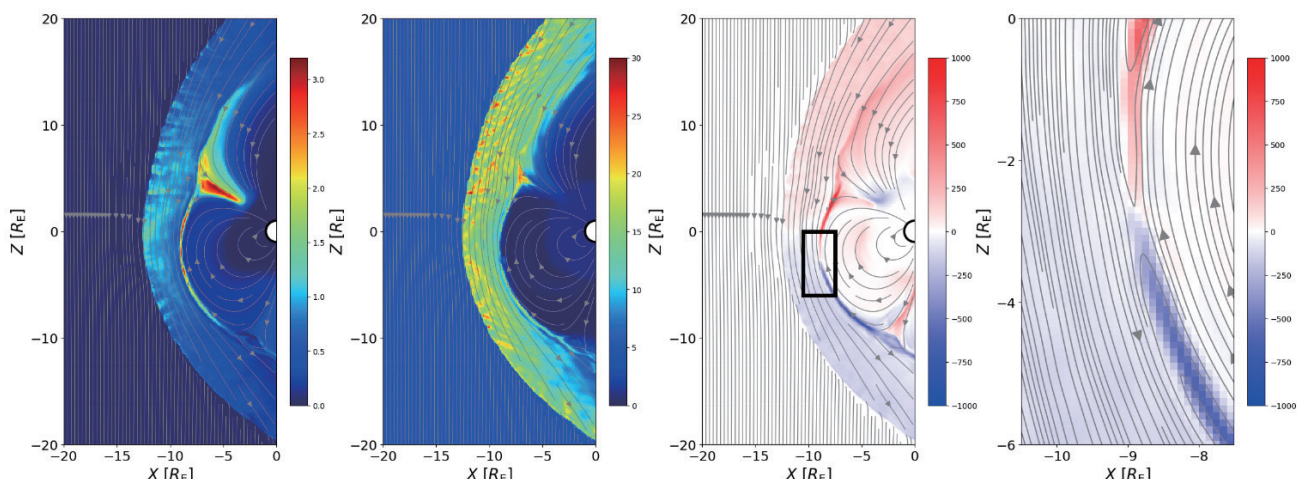


図1 「富岳」を用いたMHD計算による地球磁気圏層間側境界の構造

原点にある白い球体が地球を表し、左方向が太陽側。薄い実線が磁力線を表す。左から圧力 (10^{-9} Pa), 個数密度 (個/cc), 南北方向の速度 (km/s) と磁気リコネクション領域の拡大図

場やプラズマの計測を行っている。これらの衛星は広大なジオスペースにおいて、衛星が存在する一点のデータしか得られないという空間的な制約を抱えている。磁気リコネクションの発生現場は時間的・空間的に局在しており、特定の衛星がその中心部をピンポイントで通過し、現象の全体構造を捉える機会は極めて限定的であった。そのため、磁気圏全体のエネルギー流入プロセスを俯瞰的かつ連続的に監視することができなかった。

3. 太陽風電荷交換反応による X 線リモートイメージング

この空間的制約を克服する新たな手法として近年急速に注目を集めているのが、軟 X 線撮像によるリモートセンシングである。太陽風中には主成分である陽子の他に、電子がほとんど剥ぎ取られた高階電離状態の重イオン、例えば O^{7+} や O^{8+} の高階電離酸素イオン、 C^{6+} の高階電離炭素イオン等が微量に含まれていることがこれまでの太陽風その場観測で明らかになってきた。これらの高階電離重イオンが、宇宙空間まで広がる最外層大気（外圏）の中性水素原子と衝突する際、原子から電子を1つ受け取る電荷交換反応が起きる。その直後に電子がより低いエネルギー準位へと落ちる過程で、余分なエネルギーが軟 X 線として放射されることが X 線天文衛星の観測により明らかになった。これは、現在では「太陽風電荷交換反応 (Solar Wind Charge eXchange, SWCX)」

として知られている。

SWCX による X 線放射強度は、太陽風重イオンの密度と速度、外圏の中性原子密度、及び反応断面積の積に比例して決まる。昼側磁気圏境界周辺では太陽風プラズマが集積し、更に磁気リコネクションによって太陽風イオンが加熱・加速されるため、衝突頻度が局所的に増大する。この X 線放射を遠方の人工衛星から撮像することができれば、磁気圏の多次元的な構造や、まさにエネルギーが地球磁気圏に流入している様子をイメージとして捉えることが可能となる。この手法は、従来の点観測からイメージングという新たな次元を加えるものであり、宇宙天気診断における新たな可能性を秘めている。

4. スーパーコンピューター「富岳」による大規模数値シミュレーション

筆者らの研究グループは、この X 線放射分布から磁気リコネクションの物理的特徴をどの程度正確に抽出できるかを検証するため、日本のフラッグシップスーパーコンピューターである「富岳」を用いた大規模数値シミュレーションを実施した。この計算モデルでは、太陽風と地球磁気圏との相互作用を記述する磁気流体 (MHD) モデルに、SWCX 放射モデルを統合している。磁気圏全体のグローバルな構造を表現しつつ、磁気圏境界の磁気リコネクションの微細な構造を解像する必要があるため、計算格子数は膨大な数に上る。そのため、「富岳」の

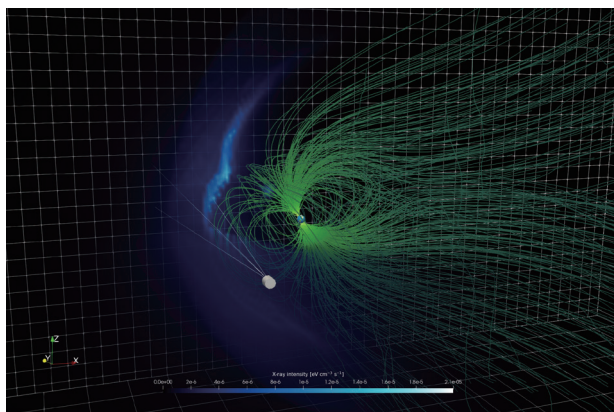


図2 モデル計算による昼側磁気圏周辺の X 線発光強度分布
中心の球体が地球、左方向が太陽側であり、磁気圏境界（磁気圏界面）に沿って強い X 線放射が確認される。円柱は仮想的に配置した X 線撮像衛星の概念図

計算資源を最大限に活用することで初めて検証が可能になった。

図1に太陽コロナ質量放出（CME）と呼ばれる激しい太陽風が到来した状況を模擬したシミュレーション結果を示す。太陽側の磁気圏境界ではプラズマと磁場が圧縮され、磁気リコネクションが進行している。磁気圏境界では磁気エネルギーが解放されるため、磁気圏境界に沿ってプラズマが加熱され、秒速 1000 km まで加速し南北方向に噴出するプラズマのジェットが確認された。

MHD モデルで得られたプラズマの情報を用いて SWCX による X 線放射強度を計算した。その結果、磁気リコネクション領域周辺で X 線放射が局所的に卓越する様子が得られた（**図2**）。計算で得られた放射強度の 3 次元分布に基づき、月軌道付近（地球半径の約 60 倍）に配置した仮想的な X 線撮像衛星から磁気圏境界を横から眺めた疑似観測画像を生成した。その結果、撮像された明るい領域はリコネクションが発生している磁場形状を反映して尖った等高線を持つ幾何学的な特徴を持つことが明らかになった（**図3**）。

筆者らは更に、X 線画像の幾何学的特徴である放射領域の尖りの先端の角度からエネルギー変換効率であるリコネクション率を定量的に推定することが可能であることを見出した。このアルゴリズムを用いて算出したリコネクション率は約 13% であった。この数値は、限定的ではあるが過去に太陽コロナの観測や地上での高出力レーザーを用いた実験で報告されていた約 10% という報告と整合的な結果と

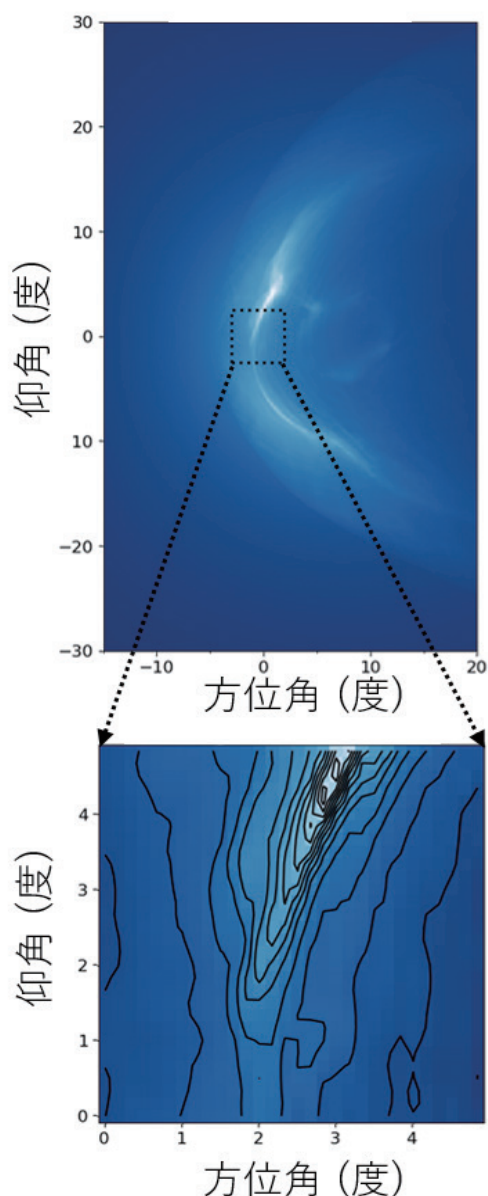


図3 シミュレーションモデル内に仮想的に配置した人工衛星から疑似観測した X 線撮像画像

上段は全体図で下段はリコネクション領域に着目した拡大図。画像内の等高線の尖り具合が、磁気リコネクションの物理的特徴を反映している

なっている。これまで地球の磁気バリアがどの程度の効率で剥ぎ取られているかを知る機会は限定的であったが、本研究によって、後述する将来の X 線撮像衛星から得られる画像データを用いれば、磁気圏への太陽風エネルギー流入率をリアルタイムで診断できる可能性が理論的に示されたのである¹⁾。

5. 次世代地球磁気圏撮像ミッションの展望

現在、SWCX による X 線放射を利用した地球磁気圏の撮像ミッションの計画が国際的に進められている。日本では超小型 X 線撮像衛星「GEOspace X-ray imager (GEO-X)」の開発が進められており、2027 年以降の打ち上げを計画している。GEO-X は高感度・広視野の X 線望遠鏡を搭載し、地球から月軌道と同程度まで離れた低緯度軌道から昼間側磁気圏境界を撮像する計画である。昼間側磁気圏を横から捉えることから、筆者らの研究が提案した磁気リコネクション領域の撮像とリコネクション率の推定の実証が期待される。

一方、欧州宇宙機関 (ESA) と中国科学院 (CAS) の共同ミッション「Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer (SMILE)」も同様の科学目標を掲げており 2026 年 5 月 19 日に衛星の打ち上げに成功した。世界初の地球磁気圏 X 線写真の報告が待たれるところである。SMILE は X 線撮像装置の他に、紫外線撮像装置やプラズマ計測器を搭載した総合的な観測衛星である。高緯度から極域を中心に撮像する軌道設計となっており、GEO-X と相補的なミッションである。

これらの次世代ミッションが軌道上に展開され、

広域的なリモートセンシングと、「あらせ」や「MMS」衛星等によるその場観測を組み合わせた協調観測が実現すれば、地球磁気圏の変動の理解に新たな展開がもたらされることが期待できる。また、磁気リコネクションは宇宙線加速や核融合プラズマの閉じ込め制御といった、幅広い分野にかかわる普遍的な基礎物理過程であるため、筆者らの研究で提案した磁気リコネクション領域の可視化・診断は、エネルギー技術の発展や宇宙物理学の理解に貢献することも期待される。ジオスペース変動を X 線で可視化する時代の到来はすぐそこまで来ている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (20K20945, 22K21345, 23K25925, 25K01012) 及び文部科学省スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションと AI で解き明かす太陽地球環境変動」の支援を受けて実施されました。

参考文献

- 1) Momose *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, 52 (12), e2024GL114342 (2025)

(千葉大学国際高等研究基幹)