

Dynamics of Flare Shocks and Propagation of Coronal Mass Ejections (博士論文)

コロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection: CME) は、太陽コロナでの突発的な磁気エネルギー解放に伴い、大量のプラズマが惑星間空間に噴出する現象である。特に、噴出速度の大きな CME は、その前面に衝撃波を伴い惑星間空間を伝搬していく。その際、CME の前面には、衝撃波に圧縮されたプラズマが蓄積し、シーブと呼ばれる高密度プラズマ領域が形成される。高速の CME およびその前面のシーブが地球に到達することが、地磁気の強い擾乱（巨大磁気嵐）や宇宙放射線の大規模増加といった宇宙嵐の原因であることが知られている。一方で、近年、太陽に似た星で、太陽で観測されたことのある最大のフレアの 10 倍–10000 倍の規模を持つ巨大なフレア（スーパーフレア）が発生していることも明らかになってきた。

巨大な太陽フレアに伴う CME の形成・伝搬と地球への影響を解明することは、宇宙プラズマ擾乱の理解の基礎となるだけでなく、宇宙嵐の影響を強く受ける我々の文明社会の維持に直接貢献する点で社会的にも重要な意義を持つ。学位論文では、巨大フレアに伴う CME および衝撃波の地球への影響を議論するための理論的基礎の構築を試みた。

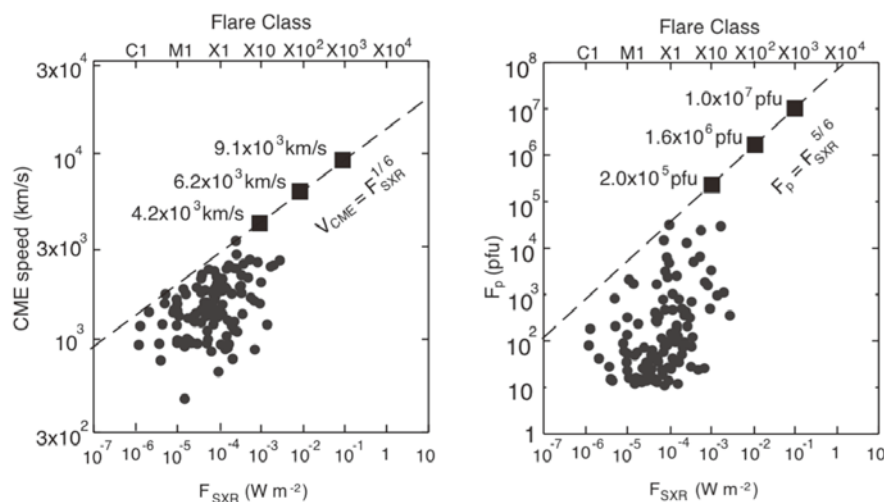


図: 巨大フレア (X10, X100, X1000 クラス) に伴う CME 速度 (左) と地球近くでの $E > 10$ MeV 陽子流束 (右) の評価 (黒四角)。破線は理論的に導いたスケーリング則、黒丸は観測データ点。(Takahashi, Mizuno, Shibata 2016)

第 2 章では、太陽フレアの規模と、それに伴う CME の質量・速度、さらに CME 前面の衝撃波で加速された高エネルギー粒子フラックスとの関係を記述するスケーリング則を、簡単な物理的仮定から導いた。また、観測統計解析の結果と導いたスケーリング則とを比較し、整合性を確かめた。

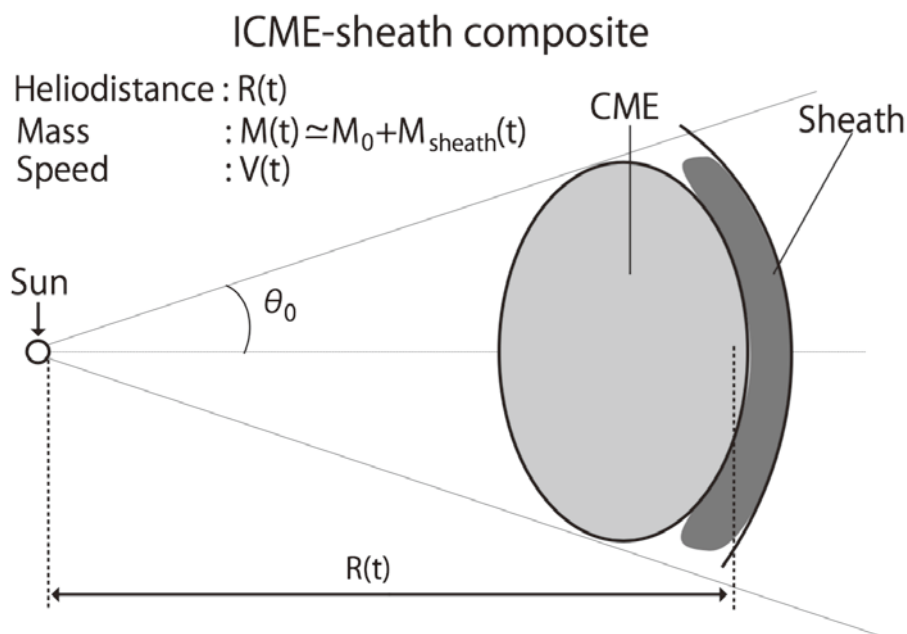


図: SAP モデルの概念図。(Takahashi & Shibata 2017)

第3章では、CMEの地球への伝搬を記述する新しい解析的モデル(SAPモデル)を構築した。惑星間空間における速いCMEの伝搬を記述するためには、CME前面の衝撃波の駆動とCMEの減速伝搬とを同時に扱うことが必要である。SAPモデルでは、シースプラズマの蓄積過程を考慮に入れることによりこの課題を解決した。コロナグラフで観測されたCMEの速度・質量をもとにSAPモデルに基づく地球への到達時間の予測を行い、観測と整合的であることを確かめた。さらに、SAPモデルに基づき、高速なCMEが速度を落とさず地球に到達するために必要なCMEの質量を初めて解析的に示した。

第2章で得たスケーリング則とSAPモデルとから、CMEが速度を落とさず地球へ到達するのに必要な質量は、観測された最大級の太陽フレアに伴うCMEの質量と同程度であることがわかった。このことにより、スーパーフレアに伴うCMEは、地球までほぼ減速を受けずに伝搬すること、その結果、観測史上最大の磁気嵐と同程度もしくはそれ以上の磁気嵐が発生することなどが予想された。

第4章および第5章では、巨大な太陽フレアに伴い観測されたコロナ中の衝撃波と、太陽プロミネンスとの相互作用を調べた。超新星残骸などの星間衝撃波と分子雲との相互作用の力学素過程は、衝撃波と重いプラズマの相互作用(shock-cloud interaction)として、星形成の根幹に関わる星間物理学の基本問題の一つと認識され広く研究されてきた。フレアに伴うコロナ衝撃波とプロミネンスの相互作用は、時間発展を追うことのできる唯一の天体shock-cloud interactionの例として重要であるにもかかわらず、これまでほとんど注目されていなかった。学位論文では、特に衝撃波からプロミネンスへの運動量輸送を3次元の磁気流体力学数値シミュレーションを用いて調べた。また、運動量輸送の磁気流体過程を記述する解析的なモデルを組み立て、3次元シミュレーションの結果と比較した。特に、衝撃波からプロミネンスへの運動量輸送は、衝撃波の透過と磁気張力の効果が決めることを示した。また、解析モデルが3次元シミュレーションによるプロミネンスの重心

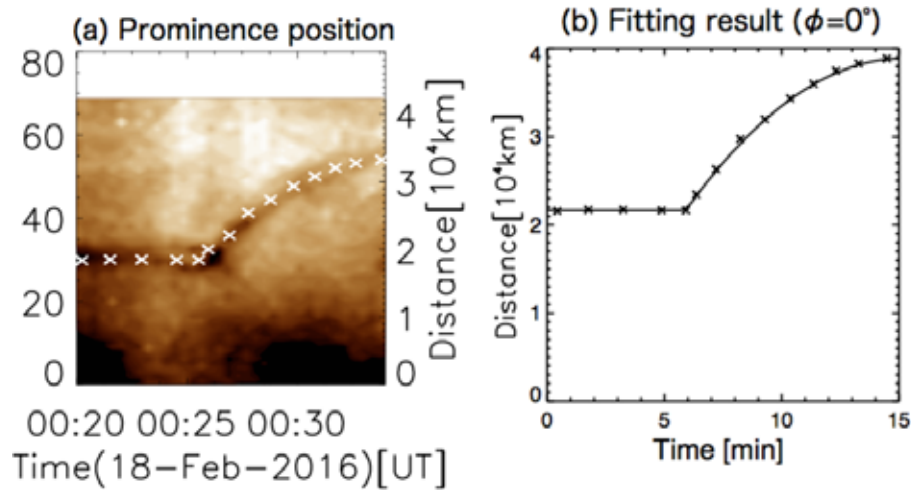


図: 衝撃波に叩かれたプロミネンスの位置変化の観測点 (X) を解析モデル (-) でフィットした結果。(Takahashi et al. 2015)

運動を定量的に再現することを、広いパラメータ領域で確かめた。さらに、衝撃波に叩かれたプロミネンスの位置変化の観測データ点を解析モデルでフィッティングすることにより、フレアに伴うコロナ中の衝撃波のすべての物理量の診断に応用できることを示した。

Reference:

Takahashi, T. et al. (2015) ApJ, 801, 37.

Takahashi, T., Mizuno, Y., Shibata, K. (2016) ApJ Lett, 833, L8.

Takahashi, T. and Shibata, K. (2017) ApJ, Lett, 837, L17.

Takahashi, T. (2017) ApJ 836, 178.

(高橋 卓也 記)