

太陽大気におけるユビキタスかつフラクタルな磁気リコネクション (博士論文)

本博士論文は、磁気リコネクションの物理過程を、数値シミュレーションと多波長観測データの解析から明らかにしようとするものである。太陽コロナはフレアやジェットなどの爆発現象に満ちている。これらの爆発現象の起源は、プラズマ中の磁気エネルギーがプラズマの熱・運動エネルギーに変換されることによる。磁気リコネクションとは、磁力線のつなぎ変わりによる磁気エネルギーを高速に解放するメカニズムであり、太陽フレアだけでなく、恒星、降着円盤などの天体や地球・惑星磁気圏、実験室プラズマなど様々な現象で重要な役割を果たしていると考えられている。その基礎物理過程の理解は、太陽物理だけでなく広くプラズマ物理学一般の重要課題である。太陽コロナは磁気リコネクションに満ちているが、磁気流体プラズマは自己相似的であり、太陽大気中ではより小規模な磁気リコネクションも起きていると予想される。近年のひので衛星観測は、太陽彩層もまた微小なジェット現象に満ちたダイナミックな描像を明らかにした。

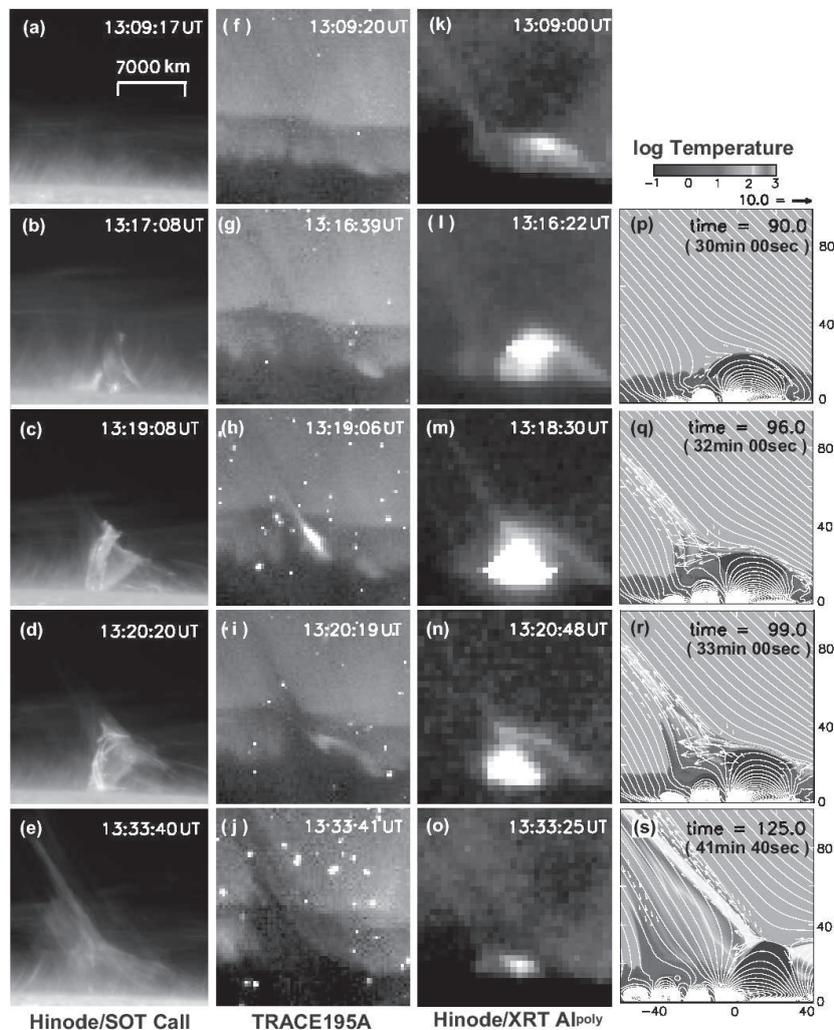


図 1: 多波長観測による X 線・紫外線・可視光ジェット (ひので衛星・TRACE 衛星) と磁気流体シミュレーションの比較 (Nishizuka et al. 2008, ApJ, 683, L83)。

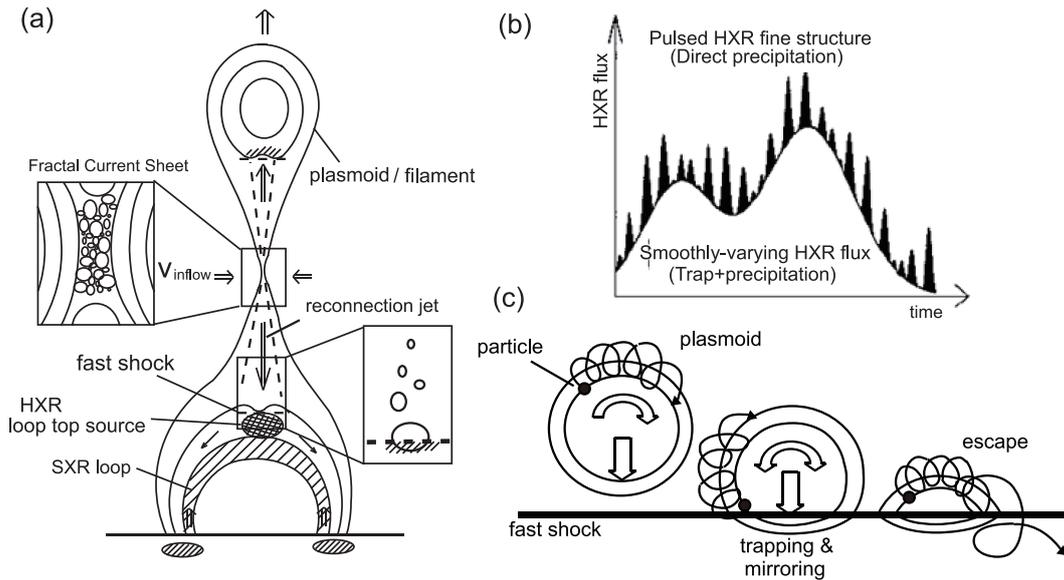


図2: 太陽フレアにおけるフラクタル電流シートと粒子加速モデル。プラズモイドがファーストショックと衝突する時、間欠的に粒子加速が起きる (Nishizuka et al. 2010, the Proc. of CAWSES-II Kick-Off Symposium in Japan, Kyoto, 2010, 92)

筆者は浮上磁場とコロナ磁場とのリコネクションの2次元磁気流体シミュレーションを行い、ひので衛星によって観測された彩層ジェットと定量的に比較を行った。太陽大気は光球からコロナにかけて密度が8桁も変化するため、現実的なシミュレーションは困難であったが、筆者らは計算技法の改善により観測結果との定量的な比較を初めて可能にした。その結果シミュレーションは観測をよく再現し、彩層中(弱電離衝突プラズマ)で「速い」磁気リコネクションが起きていることを示した。さらにジェットに伴いアルフヴェン波が発生し伝播していることを観測的に発見し、磁気流体シミュレーションによって定量的に再現することにも成功した。また彩層ジェットの統計解析から、彩層ジェットはスローショックによって加速されている可能性を示した。これらの波はコロナ加熱を説明するメカニズムとしても重要である。

一方で電流シートや粒子加速領域は微小なため、地球から直接観測することは不可能である。本博士論文では、多波長の観測データを用いてフレア輝点を詳細に解析することで、間接的に電流シートの情報を得る手法を確立し、統計解析によりフレア輝点の強度分布や発生頻度分布が冪であることを示した。フレア輝点の振る舞いはエネルギー解放メカニズムを反映しており、ミクロとマクロをつなぐ物理として、近年提唱されている電流シート中の乱流を考慮するモデルを観測的によく説明している。

また筆者らはフレア中に複数個のプラズモイド噴出を発見した。プラズモイド噴出と硬X線放射には時間的・エネルギー的により相関があり、磁気リコネクションが極めて非定常に起きており、プラズモイドと粒子加速との関連性を意味している。以上を踏まえ、筆者はファーストショックにおけるプラズモイド噴出に伴う粒子加速モデルを提唱した。プラズモイド噴出の2次元磁気流体シミュレーションとテスト粒子計算を行い、プラズモイド噴出のダイナミクスに伴って粒子は効率的に加速され、プラズモイドのフラクタル性から観測されるX線の冪分布が自然と説明できることを示した。

(西塚 直人 記)