

2022年度 名古屋大学 HPC 計算科学連携プロジェクト 成果報告

研究課題名 : 太陽活動領域に関するデータ駆動型MHDシミュレーション

代表者 : Kang Yeongmin (カン ヨンミン、康 永玟)

所属 : 名古屋大学 理学研究科 博士後期課程1年 ・ 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

共同研究者 : 草野 完也 (名古屋大学)、

金子 岳史 (Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory, USA)

研究背景

太陽では様々な爆発現象が起こっている。その中でも太陽フレア (solar flare) という現象は太陽コロナ (solar corona) の磁場に蓄積されたエネルギーを解放する一つの現象である。解放されたエネルギーはプラズマ粒子を加速させ、加速された粒子は太陽コロナの外へ放出されることになる。この現象をコロナ質量放出 (Coronal mass ejection; CME) と呼ばれていて、その過程で放出された高エネルギー粒子は地球の磁気圏に様々な影響を与えていると知られている。すなわち、地球への影響による被害を予防するためにはまず、太陽フレアの発生とエネルギーの蓄積・解放に関するメカニズムを理解することが重要である。観測によると、大規模の太陽フレアは主に太陽表面で磁場が強い活動領域 (active region; AR) で発生していると知られているが、そのメカニズムは未だに十分に理解されていない。

研究目的

本研究では、磁気流体力学 (Magnetohydrodynamics; MHD) に基づく数値シミュレーションを行い、シミュレーションで再現された3次元のコロナ磁場を解析し、太陽フレアの発生過程とその過程でのエネルギー蓄積・解放に関するメカニズムを理解することを目的とする。シミュレーションのターゲットは典型的な大規模フレアである2011年9月6日01:59 (UT)頃、AR 11283で起きたM5.3クラスフレアで、手法としてはKaneko et al. (2021)¹で紹介されている $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -driven法を利用する。

¹ Takafumi Kaneko et al, "Data-driven MHD Simulation of Successive Solar plasma eruptions", 2021, ApJ 909 155

研究成果

シミュレーションの結果としてM5.3クラスの太陽フレアが起きるときに当たる3次元のコロナ磁場の時間変化が再現され、M5.3フレアに対応していると思われる爆発現象が起きた。本研究では、可能性のある爆発メカニズムとして、ねじれた磁力線の束である磁気フラックスロープ (magnetic flux ropes; MFRs) が周りの弱い磁場と相互作用してどんどん不安定化した結果、爆発したというシナリオを考えている (図1)。また、本研究では、MHD不安定性に基づいた3次元磁場構造の解析を行い、MFRsが不安定化した理由について調べた (図2)。

図1はシミュレーションで再現された爆発現象を表している。まず、爆発現象の原因を探るためにコロナ磁場の3次元分布を調べる必要があるため、磁力線のねじれ度を表す磁気ツイスト数 (magnetic twist number) の3次元分布を計算した。その結果、太陽表面磁場の磁気中性線 (表面磁場が0になる線) 付近に、MFRsが生成され (図1のMFRs)、それが爆発することが再現された。また、separatrixと呼ばれる磁場が非常に弱くなっている面が3次元的にMFRsの西側 (図ではMFRsの右側) に2箇所 (図1のS1とS2) も存在することがわかった。ここでMHD不安定性の一つのモードであるトーラス不安定性 (torus instability) を考慮すると、MFRsの爆発を抑制する外部磁場が弱くなっているS1とS2に向かって爆発するという一つのシナリオを考えることができる。つまり、MFRsはトーラスモードにより不安定化し、S2とS1を次々と通過しながら爆発するいわゆる breakout (弱い磁場を突き抜く) によるものだと考えられる。図1の水色の磁気ツイスト数の等値面は黄色いMFRsでの値と反対の符号を持ち、爆発しているMFRsと周りの磁力線がつながり変わる磁気リコネクション (magnetic reconnection) によって生成されたものだと考えられる。また、プラズマ粒子の鉛直速度の分布を表すボリュームレンダリングの時間変化をみると、プラズマ粒子がMFRsの爆発によって加速されることがわかる。

図2はトーラス不安定性でその成長を評価する指数である崩壊指数 (decay index) ²の分布を表す。ただし、通常の崩壊指数 ($n = -\text{dlog}B_{\text{ex}}/dz$) は太陽表面に対して鉛直方向 (z) で計算されていたが、本研究では、鉛直方向だけでなく、MFRs (トーラスプラズマ) が爆発するすべてのラジアル方向 (r) を考慮したラジアル崩壊指数 ($n_r = -\text{dlog}|B_{\phi}|/dr$) を計算した。ここで B_{ex} は外部磁場の強さ、 B_{ϕ} はMFRsをトーラスプラズマだと仮定し、それを基準とするときの外部磁場のポロイダル成分を表す。通常、その臨界値は1.5だと知られている³。図2を見ると、通常の崩壊指数よりラジアル崩壊指数の方が爆発するときのMFRsに関する不安定性の成長をより明確に説明していることがわかる。

² G. Bateman, "MHD instabilities", 1978, Cambridge, Mass., MIT Press 270p

³ B. Kliem & T. Török, "Torus instability", 2006, Physical Review Letters, vol. 96, Issue 25, id. 255002

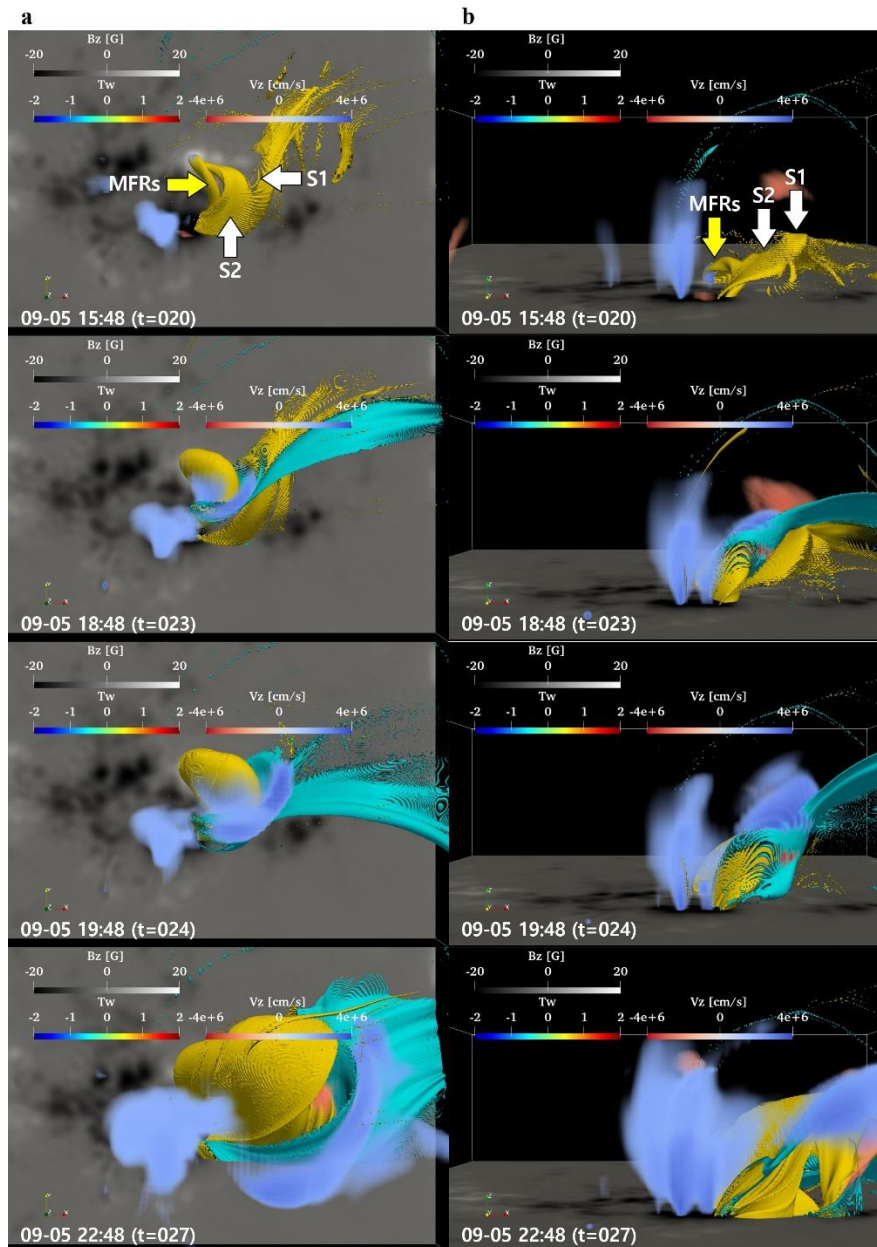


図1) シミュレーションで再現された爆発現象 (M5.3フレア)。a (太陽表面に鉛直な視線)、b (aを横から見たもの)。aの背景は太陽表面磁場。3次元の黄色い等値面は磁気ツイスト数が0.60になる面を、水色の等値面はこの量が-0.60になる面を表す。黄色い矢印はMFRsを、白い矢印は2つのseparatrix (S1とS2)を表す。ボリュームレンダリングは鉛直速度を表していて、青は太陽表面から離れる方向、赤は太陽表面に向かう方向を表す。

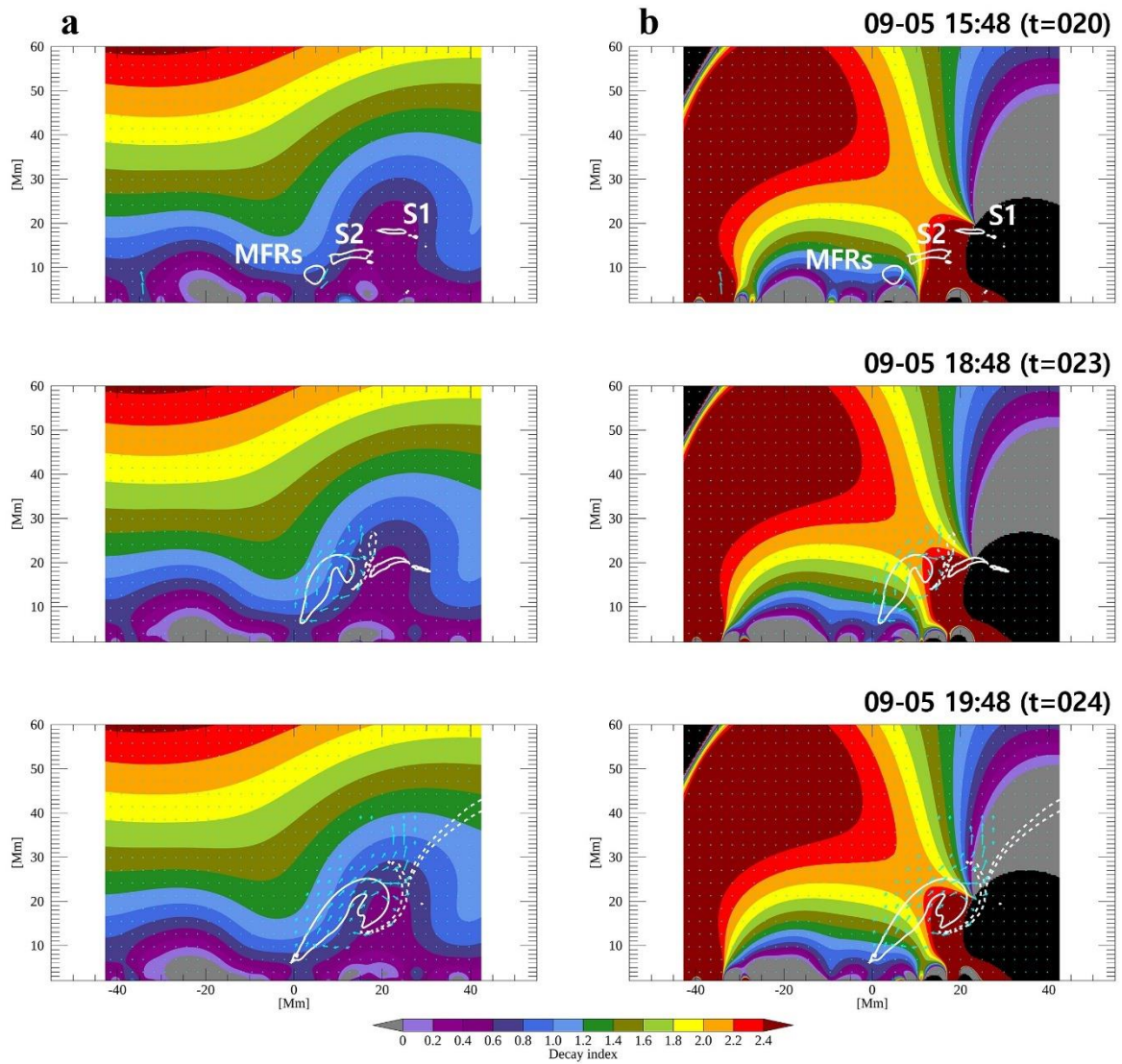


図2) 崩壊指数分布の断面図。横軸はMFRs (トーラスプラズマ) の中心点、S1、S2を繋ぐ方向、縦軸は鉛直方向である。背景 : a (通常の鉛直の崩壊指数; n)、b (ラジアル崩壊指数; n_r)。黒色でマーキングされている領域はMFRsの爆発を抑制するポロイダル磁場の方向が反対になっているため、計算から排除している。白い等高線は磁気ツイスト数を表し、実線は0.60、破線は-0.60に対応する。水色の矢印はこの断面での速度分布を表す。MFRsは崩壊指数が1.5を超える領域で崩壊しやすくなると考えられるので、bの方が爆発のメカニズムをより明確に説明している。