

## 2023年度 名古屋大学 HPC 計算科学連携プロジェクト 成果報告

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3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 (新潟大学)

### 研究背景

太陽フレア (solar flare) は太陽で起きている爆発現象の一つであり、太陽コロナ (solar corona) 磁場に蓄積された磁気エネルギーを解放し、高エネルギー粒子を太陽コロナの外へ放出することがある。この現象をコロナ質量放出 (coronal mass ejection; CME) と呼ぶ。CMEが起きると、加速された高エネルギーは地球まで到達することがあり、到達した粒子は地球の磁気圏と反応し、通信障害や人工衛星の故障を引き起こし、こういった一連の現象及び過程を宇宙天気 (space weather) と呼ぶ。それ故、宇宙天気による被害を予防するためには、太陽フレアの発生と磁気エネルギーの蓄積・解放に関するメカニズムを理解する必要があり、重要な研究課題になっている。だが、太陽コロナ磁場を直接観測することができないため、太陽フレアの発生メカニズムは未だに明確に理解されていない。

### 研究目的

本研究の目的は、実際に起きた太陽フレアに関する数値シミュレーションを行い、その発生メカニズムを理解することである。本研究では磁気流体力学 (Magnetohydrodynamics; MHD) に基づくデータ駆動型シミュレーションをシミュレーションの計算手法として利用する。計算手法はKaneko et al. (2022)に紹介された $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -driven手法を用いる。この手法では、境界条件として時系列の太陽表面磁場の観測データが入力され、Faraday's lawを逆に解き、電場及び速度場を計算する。そうすると、下部境界 (太陽表面) で計算された速度場によって上空のコロナ磁場とその変動が再現される。シミュレーションのターゲットイベントとしては、2011年9月6日01:59 (UT)に太陽活動領域 NOAA 11283で起きたM5.3フレアを選択した。

## 研究成果

シミュレーションの中でM5.3フレアと思われる磁場の急激な変動が再現された。磁場構造の中でも、ねじれた磁力線の束である磁束管 (magnetic flux tube; MFR) が太陽表面近くに再現され、急激に不安定化し、太陽表面に対して傾いた方向に爆発した。また、運動エネルギーや磁気エネルギーの蓄積量を調べた結果、MFRの爆発がM5.3フレアに対応することがわかった (図1)。

本研究では、この傾いた状態で爆発するMFRの物理メカニズムを理解するためにMHD不安定性理論に着目した。この不安定性理論ではMFRのジオメトリーがトーラス (torus) だと仮定する。そうすると、MFRに流れる電流による浮上力とそのMFRの浮上 (爆発) を留める外部磁場 ( $B_{ex}$ ) によるローレンツ力の釣り合いによってMFRの浮上 (不安定化) が決まり、この不安定性をトーラスの形からトーラスモード (Kliem & Torok 2006) と呼ぶ。また、崩壊指数 ( $n = -d \log B_{ex} / d \log z$ , decay index; VDI; Bateman 1978) を計算することで太陽表面に対して鉛直方向 ( $z$ ) での外部磁場の減衰率がわかり、その空間分布を調べると、どの方向に向かってMFRが爆発するかが推定できる。ここでの崩壊指数の臨界値は  $1.0 < n < 2.0$  だと複数の先行研究から知られている。

だが、鉛直方向での減衰率だけ考慮すると、太陽表面に対して斜めになっている爆発については、崩壊指数を正確に計算することができなくなる恐れがある。本研究では、この問題を解消するために崩壊指数の計算方法を修正し、軸性崩壊指数 ( $n_r = -d \log B_\phi / d \log r$ , axial-radial decay index; ARDI) を計算した。ここで  $B_\phi$  は、MFRの中心点を原点とした時の外部磁場のポロイダル成分を表し、 $r$  はその中心点からの任意の爆発方向を表す。すなわち、ARDIを計算し、その空間分布を調べることで、MFRの爆発が斜めになっている状態だとしてもより正確に崩壊指数を計算することができと考えられる。図2の背景はARDIの空間分布を表し、実線はMFRの断面図、破線はMFRの爆発によってつなぎ変わった磁力線を表す。ARDIの空間分布とMFRの爆発方向の関係性を考えると、臨界値  $1.0 < n < 2.0$  の範囲に入る領域に向かってMFRが爆発していることがわかる。すなわち、本研究では、太陽表面に対して斜めになっているフレア発生に関する物理メカニズムを、崩壊指数を新しく計算することで説明することができた。また、太陽フレアの発生及びその爆発方向を説明できるこの新しいパラメータは、太陽フレアの爆発方向性の予測という観点から、今後の宇宙天気予報の研究にも貢献できると期待している。本研究に関する論文は2023年11月にアメリカのAstrophysical Journalへ投稿済みで、現在査読中である。

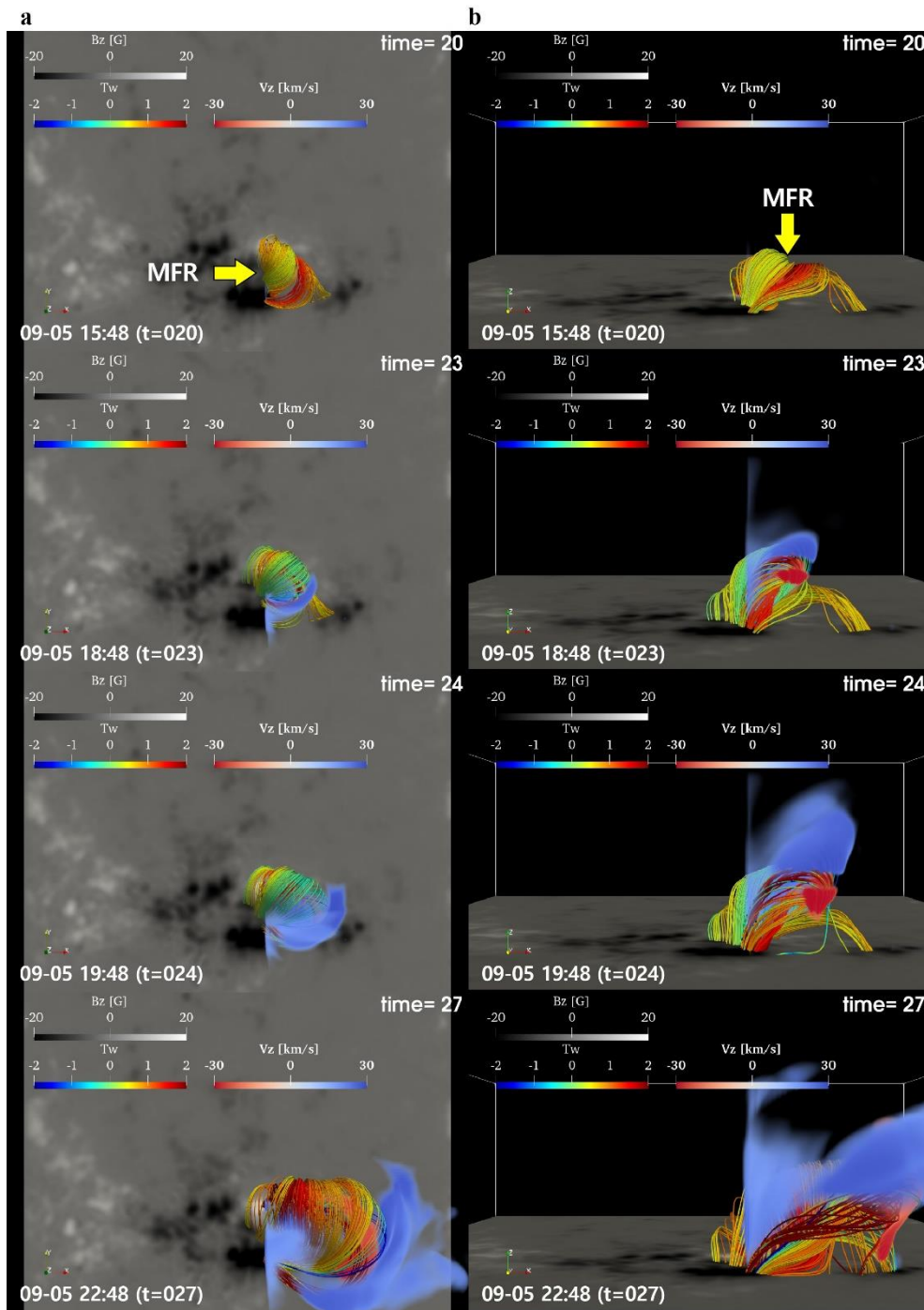


図 1 : シミュレーションで再現されたM5.3フレア (A : top view、B: side view)

背景はシミュレーションで再現された太陽表面磁場を、上空の線はコロナ磁場を表す。線の色は磁場のねじれを、ボリュームレンダリングは粒子の速度を表す。MFRの爆発はt=23から始め、t=27以降も続く。パネルBを見ると、爆発方向が太陽表面に対して斜めになっていることがわかる。

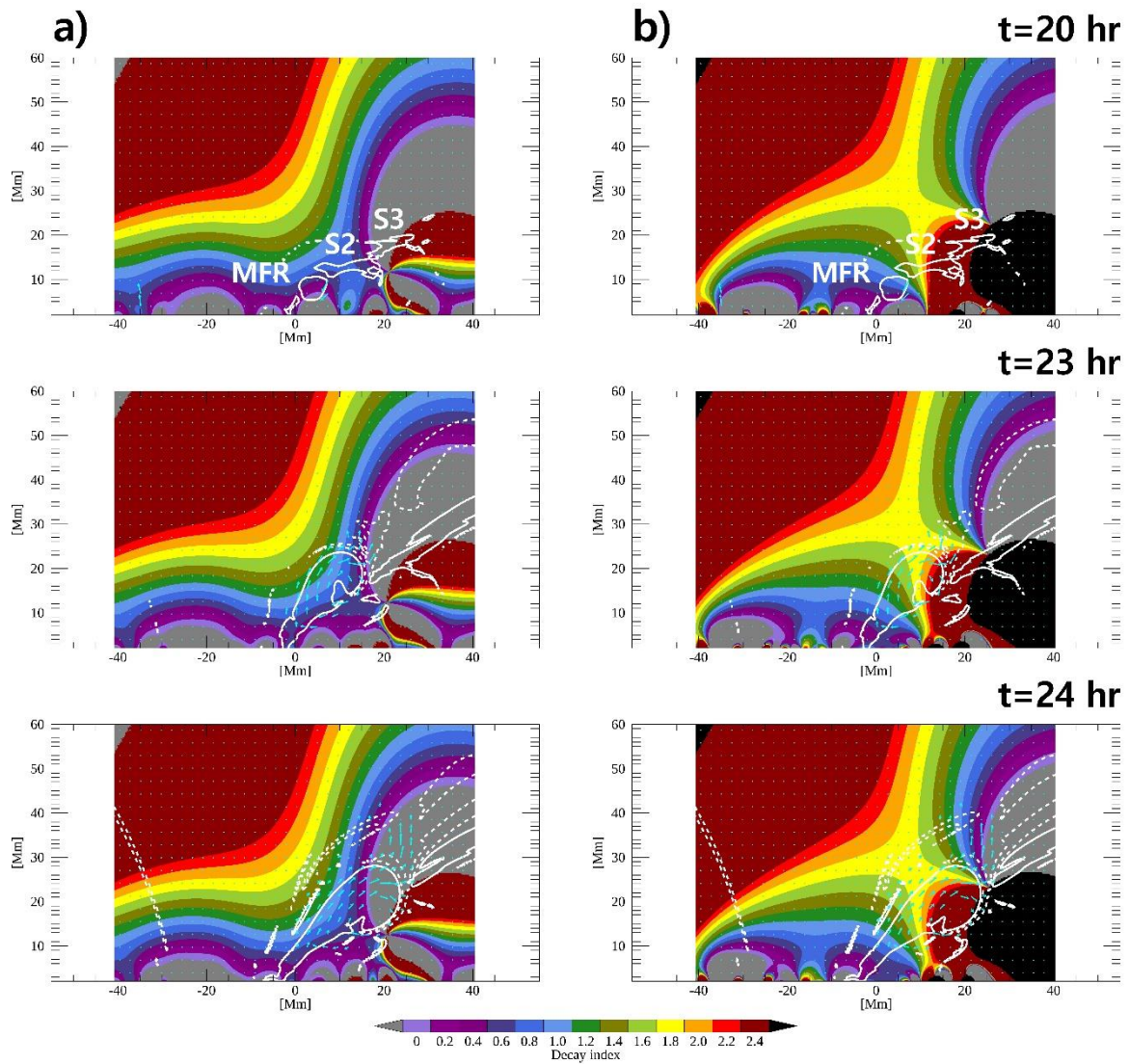


図2：通常のdecay index (VDI, A) とaxial-radial decay index (ARDI, B) の分布

背景は各崩壊指数の空間分布を表す。t=20の時に、パネルBのARDIでは既に臨界値の領域にMFRが位置し、その後、よりARDIの値が大きい（外部磁場の減衰率が高い）ところへ爆発していることが見える。一方、パネルAのVDIでは、t=20の時にMFRは臨界値より低い領域に位置しているが、その後の爆発方向も崩壊指数の値が小さくなる方向へ爆発していることが見える。すなわち、鉛直方向に対する爆発だけを考えているVDIでは、斜めの爆発が説明できない。