

2024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）

所属：名古屋大学宇宙地球環境研究所・名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程3年

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）は太陽で起きる爆発現象の一つであり、太陽大気的主要部分である太陽コロナ（solar corona）の磁場に蓄積されている自由磁気エネルギーの解放によって発生すると考えられている。太陽フレアが発生する前に出現する観測的な構造の一つとして、シグモイド

（sigmoid）が知られている。シグモイドはコロナ領域で観測されるS字（もしくは逆S字）型の放射構造であり、コロナ磁場の複雑性を示していると考えられている。コロナ磁場の複雑性は基本的には、太陽表面もしくは光球面（photosphere）磁場の特徴からある程度は推定できるが、必ずしも光球面磁場の複雑性がコロナ磁場の複雑性と直接対応しない場合もある。例えば、NOAA 活動領域（Active Region; AR）12665では、光球面ではシンプルな磁気中性線（Polarity Inversion Line; PIL）が観測された反面、同じタイミングで上空では明るいコロナループの重ね合わせとして逆S字型のシグモイドが観測された（図1と図2）。このように、光球面磁場の情報だけでは、コロナ磁場の構造や特性を十分に理解できない場合もある。

さらに、現状ではコロナ磁場を直接観測することは困難である。こういった観測的な限界を克服するために、磁気流体力学（Magnetohydrodynamics; MHD）に基づいた数値シミュレーションを利用してコロナ磁場を再現し、その磁場を解析する方法が、太陽フレアと関係ある磁場構造を研究する一つの手法として採択されている。コロナ磁場の数値シミュレーションにはいくつかの手法がある。その中の一つは、非線形フォースフリー磁場（Nonlinear Force-Free Field; NLFFF）で、コロナ中にローレンツ力が働かない仮定の上、観測可能な光球面磁場から上空のコロナ磁場を外挿

（extrapolation）する手法である。しかし、この手法は独立した一枚の光球面磁場からその時刻でのコロナ磁場を外挿する手法のため、その連続的で、ダイナミックな変化までは推定できない。もう一つの手法はデータ駆動型シミュレーション（data-driven simulation）である。この手法では、時系列の光球面磁場が連続的に境界条件として使われることにより、光球面の変動に対応するコロナ磁場の再現が可能となっている。すなわち、より現実的なコロナ磁場の再現と共に、そのダイナミックな変動も推定できると期待されている。

研究目的

本研究では、データ駆動型MHDシミュレーションを利用してAR 12665で現れたシグモイドの形成過程を再現し、シンプルな光球面磁場とシグモイドの関係性を理解する。

研究手法

本研究では、[Kaneko et al. \(2021\)](#)で紹介された手法を利用し、3次元のMHDシミュレーションを行う。この手法ではまず、Faradayの法則を逆問題として解き、光球面磁場の時間変化から光球面電場を推定する。その後、適切なゲージ変換を行い、磁場と電場を垂直にさせる。最終的に、磁場と電場を利用して光球面速度場を計算し、境界条件として利用することで、上空のコロナ磁場が再現・更新される。インプットデータは、NASAのSolar Dynamics Observatory/Helioseismic and Magnetic Imager (SDO/HMI) から得られた光球面磁場データを利用する。シミュレーション期間は、2017年7月8日16:48 UTから2017年7月10日19:48 UTまでであり、活発な光球面運動が始まる時点とその期間中におけるシグモイド形成の初期過程に注目する。

結果と議論

シミュレーションでは、新しい光球面磁場の出現 (flux emergence) よりも、その移流及び回転運動が再現され、同時にPILの上空には逆S字の形をしたねじれた磁力線の束である磁気フラックスロープ (Magnetic Flux Rope; MFR) が再現された (図3)。観測されたシグモイド (図2) とその形を比較すると、その位置と逆S字という特徴が一致していることがわかった。磁力線のねじれ度を表す磁気ツイスト数 (magnetic twist number) も-1.0以下となった。こういったシミュレーションの結果は、主に光球面の平行運動によって上空のMFRが形成されたことを示唆している。

また、本研究では、データ駆動型シミュレーションがどれ程ダイナミックな磁場変動を正確に再現しているかを評価するために、従来のNLFFF ([Inoue et al. 2014](#)) との比較も行った (図4)。その結果、NLFFFでは磁気ツイスト数が約-0.30となり、観測されたシグモイドとは大きく異なることがわかった。この違いは、データ駆動型シミュレーションが動的なMHD方程式を解いていることに起因している可能性がある。

結論

本研究では、AR 12665で形成されたシグモイドの形成過程を、データ駆動型シミュレーションを通して理解した。シミュレーション結果から、光球の平行運動によって初期シグモイドが形成されることが示された。また、データ駆動型シミュレーションは、従来のNLFFFと比較してコロナ磁場の再現性に優れている可能性があることが示唆される。本研究に関する成果においては現在、日本天文学会ジャーナルへの投稿論文を準備中である。

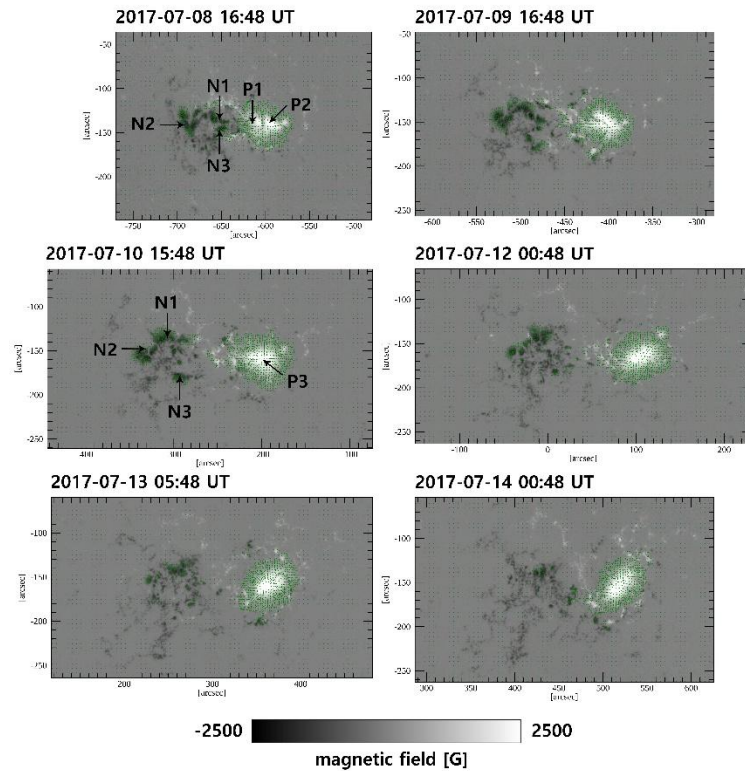


図 1) SDO/HMI 光球面磁場（背景：磁場の鉛直成分）。N1~P3は磁場の鉛直成分が特に強い場所を表す。緑色の矢印は磁場の平行成分を表す。7月9日までは、P1の移流が、7月10日以降は、P3の形成及び回転が著しく観測された。

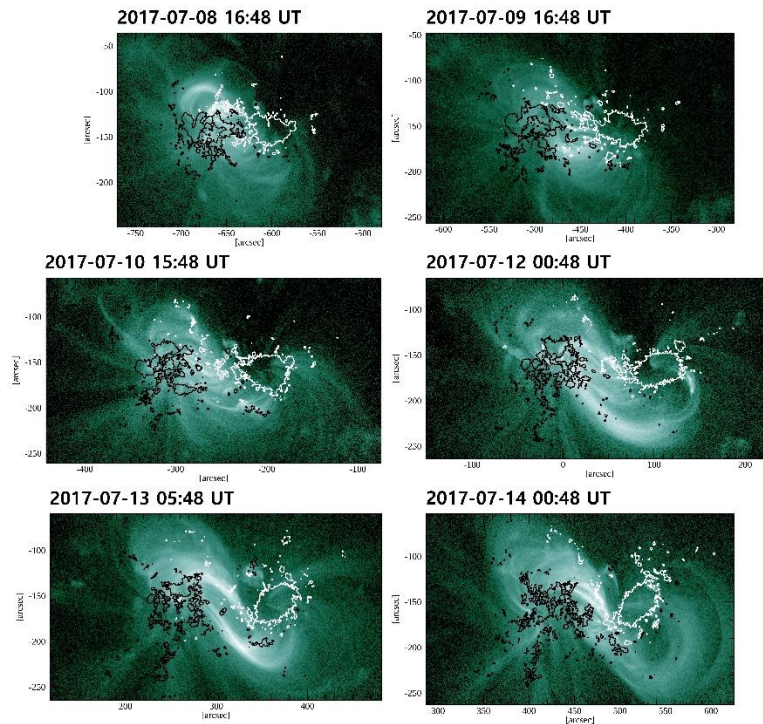


図 2) SDOから観測されたコロナの観測画像（背景）。線は光球面磁場を表す。7月10日から複数の明るいコロナループとして初期の逆S字型のシグモイドが現れ、7月12日以降は、その形がより明らかに見える。

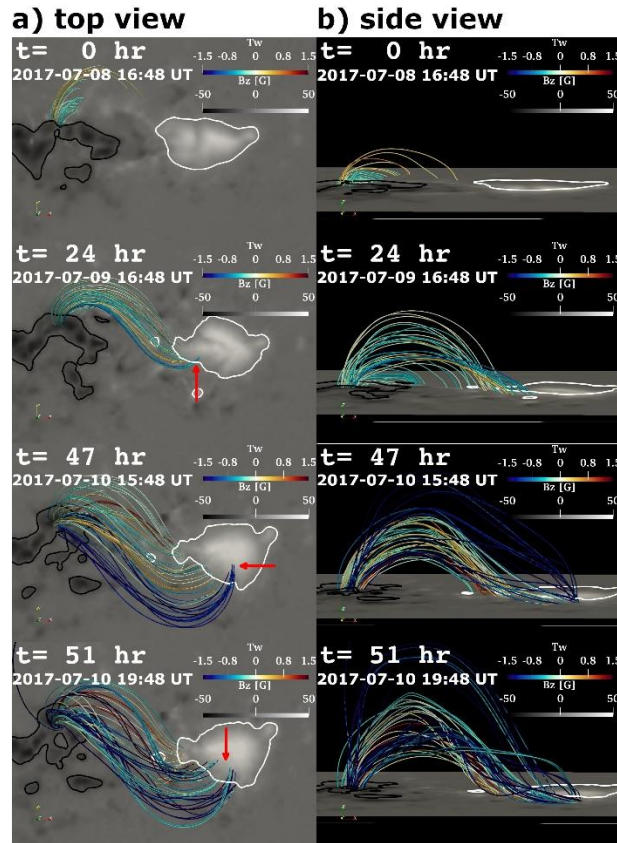


図 3) データ駆動型シミュレーションで再現されたコロナ磁場。背景は光球面磁場を表す。線の色は磁気ツイスト数を表す。赤い矢印は、正極側にあるMFRのフットポイントの位置を表す。パネル (a) : 上空から見たイメージ。パネル (b) : 横から見たイメージ。

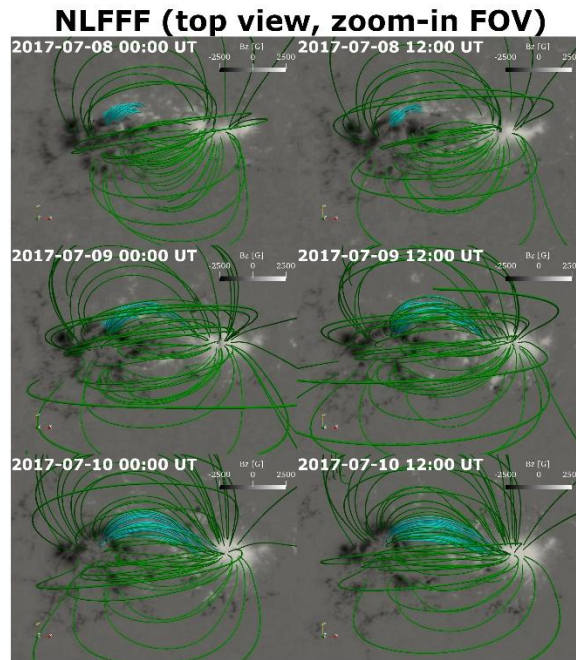


図 4) NLFFFの結果。線の色は磁気ツイスト数を表す。カラスケールは図 3 と同様。