

## 2021 年度 名古屋大学 HPC 計算科学連携プロジェクト 成果報告

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 金子岳史

### 研究の背景

太陽では、フレアと呼ばれる爆発現象やコロナ質量放出(CME)と呼ばれるプラズマ放出現象が発生する。これらは、太陽大気中に蓄えられた磁気エネルギーが、熱や運動エネルギーとして解放されることで発生する。磁気エネルギーの蓄積と爆発的解放のメカニズム解明は、太陽物理学の最重要課題の一つである。地球へも影響を及ぼすような大規模なフレアは、強い磁場が密集している黒点（活動領域）で発生する。観測により、大規模フレアを発生させる黒点には、特徴的な磁場分布があることが知られている。フレア発生型黒点の形成メカニズムや、フレアの規模を決める物理メカニズムは未だ解明されていない。

### 研究目的

本研究の目的は、黒点形成・進化からフレアまでを一貫した物理モデルで理解し、黒点磁場とフレアの規模の関係を明らかにすることである。

### 研究成果

#### 観測データ駆動型磁気流体シミュレーションによる大規模フレアの再現

フレアのエネルギー解放のメカニズムを解明するためには、磁気再結合（リコネクション）の可能性や、磁気流体不安定の臨界条件を評価する必要がある。観測では、太陽表面磁場の詳細な 2 次元データが得られる。一方、磁場の不安定化条件を評価するためには、表面だけでなく、上空まで含めた 3 次元的な磁場構造の情報が必要である。そこで、数値モデリングを用いて、太陽表面の観測磁場から上空の磁場構造を再現する研究が行われている。観測データ駆動型モデリングでは、観測された太陽表面磁場の時系列データを、磁気流体シミュレーションの下部境界として利用する。我々は、昨年度の研究により、新たなデータ駆動型磁気流体シミュレーション手法を開発した[1]。本手法では、まず観測磁場時系列データを用いて、磁場の時間発展方程式の逆問題を解く。得られたインバージョン速度場を境界条件とし、磁気流体方程式の順問題を解くことで、太陽表面では観測磁場が磁気流体方程式の数値解として再現され、同時に上空の 3 次元磁場をも再現することができる。今年度は本手法を、大規模なフレアを起こした活動領域へ適用し、再現性を確認した。

研究対象は活動領域 12887 とした。本活動領域では、2021 年 10 月 28 日 10:30 UT に比較的大規模な M クラスフレア、同 15:30 に最大クラスの X クラスフレアが発生し、その後 CME も発生した。本研究では、太陽観測衛星 SDO の磁場望遠鏡 HMI により 2021 年 10 月 28 日 9:00 UT から 19:00 UT までに観測された太陽表面磁場時

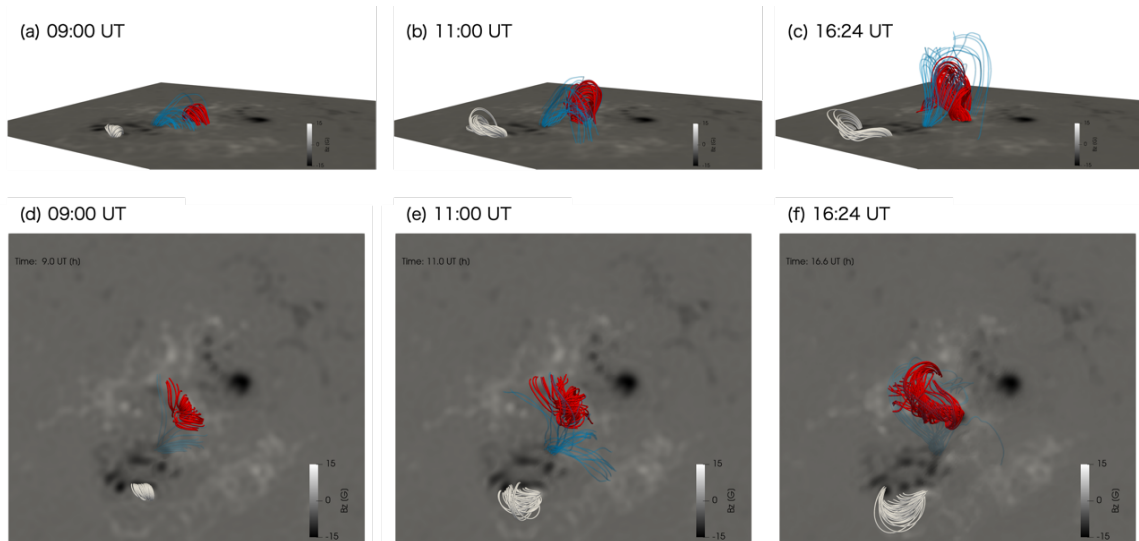


図 1 活動領域 12887 の観測データ駆動型磁気流体シミュレーションの結果。底面のグレースケールは太陽表面磁場の鉛直成分を表す。線は磁力線を表し、白は M クラスフレア発生領域の磁力線、赤は X クラスフレア発生領域の磁力線、青は X クラスフレア発生領域を覆う磁力線を表す。

系列データを用いて、観測データ駆動型磁気流体シミュレーションを実施した。結果、M クラスフレアと X クラスフレアに対応する磁場の不安定化が再現された(図 1)。不安定化が発生した位置(白線と赤線の領域)は、実際にフレアが発生した位置と一致した。図 2 はシミュレーション内の運動エネルギーの時間変化(実線)と、実際に観測された X 線フラックスの時間変化を表す。シミュレーション内の運動エネルギーの急上昇は、磁場の不安定によるものである。また、観測で X 線フラックスが急激に上昇した時刻がフレア発生時刻となる。シミュレーション内で磁場が不安定化し始めた時刻は、観測でフレアが始まった時刻とほぼ一致した。さらにシミュレーション結果を詳細に解析したところ、M クラスフレア発生領域では、リコネクションは発生したものの、磁場は磁気流体不安定の条件を満たしていなかった。X クラスフレアが発生した領域は、四重極磁場に囲まれており、磁気流体不安定の条件を満たしやすい状況にあった。そのため、リコネクションを起こした後に磁気流体不安定が発生し、上空へ噴出した。本結果は、蓄積されているエネルギー量の大小だけでなく、(自由エネルギーを持たない)周辺磁場の構造・分布によって決まる磁気流体不安定の有無が、解放されるエネルギー量へ多大な影響を及ぼす可能性を示唆する。また、CME の有無も定性的には説明できる。一方、シミュレーション内の磁気流体不安定の成長率は、現実のエネルギー解放率より小さく、エネルギー解放量も現実より小さかった。今後、エネルギー解放量の定量的再現を目指して、数値モデルを改良していく必要がある。また、活動領域 12887 だけでなく、磁場の進化過程が異なる別の活動領域 11283 を対象としたデータ駆動型磁気流体シミュレーションも実施し、フレアに対応する磁場の不安定化の再現に成功している[2]。

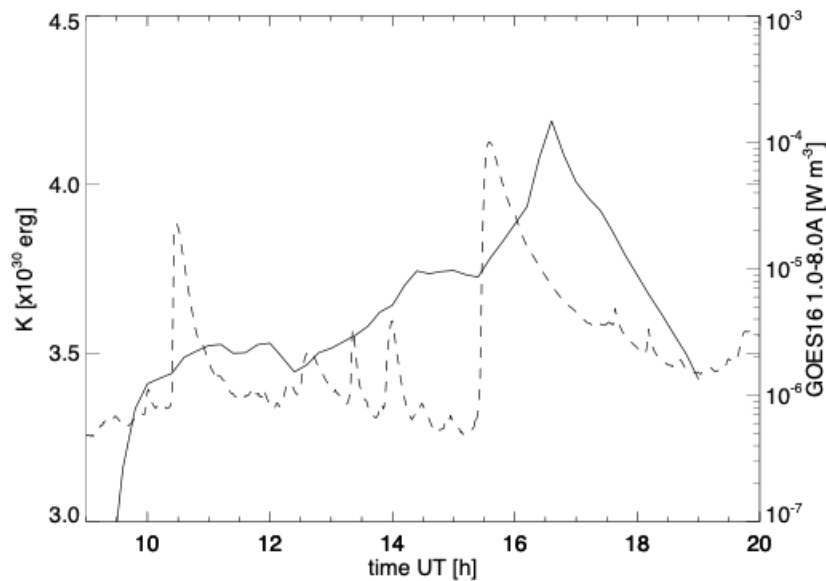


図2 実線：運動エネルギーKの時間変化（シミュレーション領域内積分）。破線：観測されたX線フラックス(1-8Å)の時間変化（太陽半球積分, GOES）。

### 今後の展望

今年度はさらに、輻射磁気流体コード R2D2[3]を用いて、黒点形成シミュレーションをスーパーコンピュータ富岳で実施した。異なる物理パラメータで100例近くのシミュレーションを実施し、さまざまな磁場分布を持つ黒点の再現に成功している。大規模パラメータサーベイの統計解析から、太陽内部対流層で下降流が卓越している領域と、太陽表面に磁気エネルギーが蓄積される領域に強い相関があることを発見した。この結果は、少なくとも太陽内部対流と太陽表面の磁気エネルギー蓄積に関係があることを示唆している（Kaneko et al. 査読付き論文を投稿中）。太陽内部対流とエネルギー解放の関連性は未だ明らかではない。今後、黒点形成シミュレーションで再現された100例近くの黒点磁場データをもとに、データ駆動型シミュレーションを実施し、太陽内部対流とエネルギー解放の関連を調査する。

### 参考文献

- [1] T. Kaneko, S.-H. Park, K. Kusano, “Data-driven MHD simulation of successive solar eruptions”, *The Astrophysical Journal*, 909, 155 (2021)
- [2] Y. Kang, “Data-driven MHD Simulation of Solar Active Region 11283”, 2021年度 名古屋大学修士論文
- [3] H. Hotta, H. Iijima, K. Kusano, “Weak influence of near-surface layer on solar deep convection zone revealed by comprehensive simulation from base to surface”, *Science Advances*, 5, 2307 (2019)