

2020年度 名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト 成果報告書

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が発生する。フレアは、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。フレアのエネルギー源となる磁場は、対流により太陽内部から表面へ輸送されると考えられている。強い磁場が表面へ輸送されると黒点が形成され、フレアは基本的に黒点上空で発生する。長年の観測により、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。一方、磁場分布とフレアの規模を関係づける物理メカニズムは完全には解明されていない。黒点形成(太陽内部から表面へかけての磁場の輸送)とフレア(太陽表面から上空コロナにかけての磁気エネルギーの蓄積・解放)は現象の時空間スケールが異なるため、これまで別々に研究されてきた。今後の研究では、両者を結びつける必要がある。

研究目的

本研究の目的は、黒点形成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

2020年度は、主に数値手法の開発と実用性の検証を行なった。

1. 観測データ駆動型磁気流体シミュレーション研究

フレアのメカニズム解明や事前予測のためには、観測された磁場データから磁場の不安定性条件を評価する必要がある。太陽表面の磁場は、図1(a)のような詳細な2次元観測データが得られる。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磁場の3次元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を再現する研究が行われている。特に近年は、非常に精度の良い観測データが公開されており、計算機の性能も日々向上しているため、観測データとシミュレーションを組み合わせた研究の機運が高まっている。データ駆動型磁気流体シミュレーションとは、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境界条件として用いる手法であり、現実的な3次元磁場構造の時間発展を追跡することが可能になる。本研究では、新たなデータ駆動手法の開発を行った。本研究で考案した手法は、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。これにより得られるインバージョン速度場を境界条件として順問題を解くことで、観測磁場が磁気流体方程式の数値解として再現される。本手法を用いることで、従来手法で発生していた速度場と磁場の物理的不整合を解消することができた。

本手法を実際に発生したイベントへ適用し、1つの領域から連続して2度発生したプラズマ放出現象を再現することに成功した(図1)。結果は査読付き論文として出版した(参考文献1)。

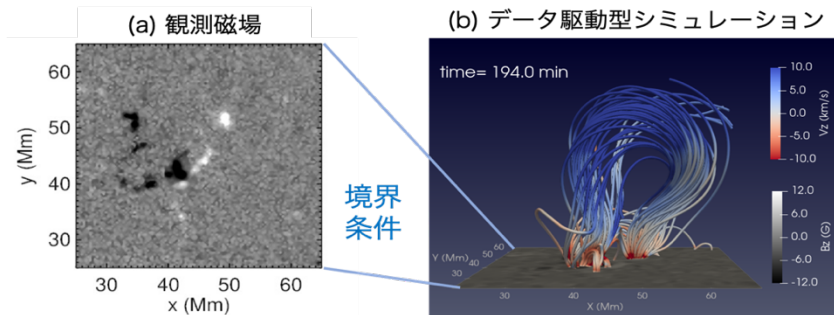


図1: データ駆動型シミュレーションの結果。(a)太陽表面の観測磁場。白が正極、黒が負極を表す。(b)シミュレーションにより物理法則に基づき復元された3次元磁場。線が磁力線、線の色は速度を表す。

2. 黒点形成からフレアまでのシミュレーションによる再現

輻射磁気流体シミュレーションとデータ駆動型シミュレーションを組み合わせ、黒点形成からフレアまでを再現する研究を開始した。まず、輻射磁気流体シミュレーションにより太陽内部の対流を再現する(図2(a))。対流層内の適当な位置に磁場を配置すると、磁場が対流により表面へ輸送され、現実的な黒点磁場が再現される(図2(b))。再現された太陽表面の黒点磁場を境界条件とし、データ駆動型シミュレーションによって上空のコロナ磁場を時間発展させたところ、フレアが発生した。再現された黒点磁場は、これまでに観測された最大の磁場強度に匹敵する強度であった。一方、再現されたフレアの規模は、観測される最大規模のフレアよりエネルギーが1桁小さかった。この結果は、フレアの規模が単純に磁場の強度では決まらないことを示唆しており、観測とは整合的であると言える。今後、パラメータを変え、黒点の磁場分布が異なるケースを複数例計算し、大規模フレアの再現を目指す。

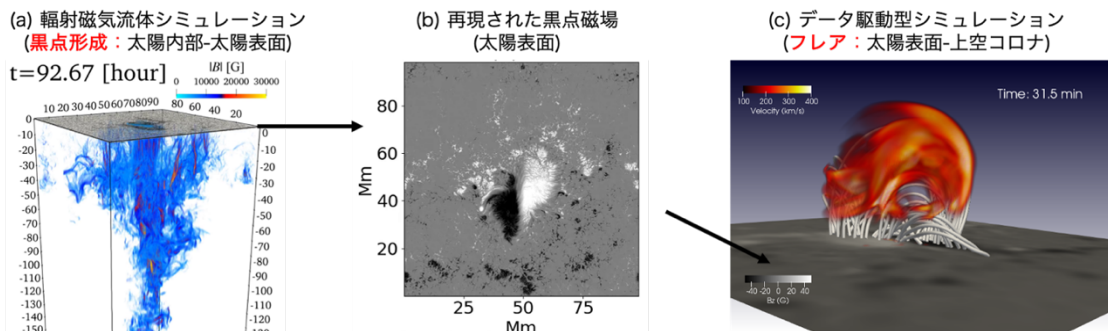


図2: 黒点形成からフレアまでを再現する連続シミュレーションの例。(a), (b)は輻射磁気流体シミュレーションの結果。カラーは対流層内部の磁場強度、グレースケールは太陽表面の鉛直磁場強度を表す。(c)はデータ駆動型シミュレーションの結果。線は磁力線、カラーは速度場を表す。

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, 査読あり