

# 渦モデルを用いた太陽活動領域コロナ 定常 X 線の放射起源の解明

Revealing the Origin of Steady X-ray Emission from the Solar Active Region Corona  
Using a Vortex Model

研究代表者：国吉秀鷹 (Northumbria 大学)

研究分担者：なし  
担当：なし

## 研究目的 (Research Objective):

太陽コロナは表面より 100 倍以上高温な 100 万度を超える高温プラズマからなる最外層大気であり、定常 X 線放射の起源となっている。その加熱機構は太陽物理学における最大の未解決問題の一つである。表面で発生する渦から駆動されたアルフベン波によって輸送される磁気エネルギーがコロナ加熱のメカニズムとして有力だと考えられているが、その波動エネルギーがどのようなメカニズムで熱として散逸されるかも不明瞭であり、複数の候補機構が提唱されている。本研究では、対流層上部からコロナまでを一貫して扱う 3 次元輻射磁気流体 (RMHD) シミュレーションを実施し、アルフベン波の支配的な散逸機構を特定することを目的とした。

## 計算手法 (Computational Aspects):

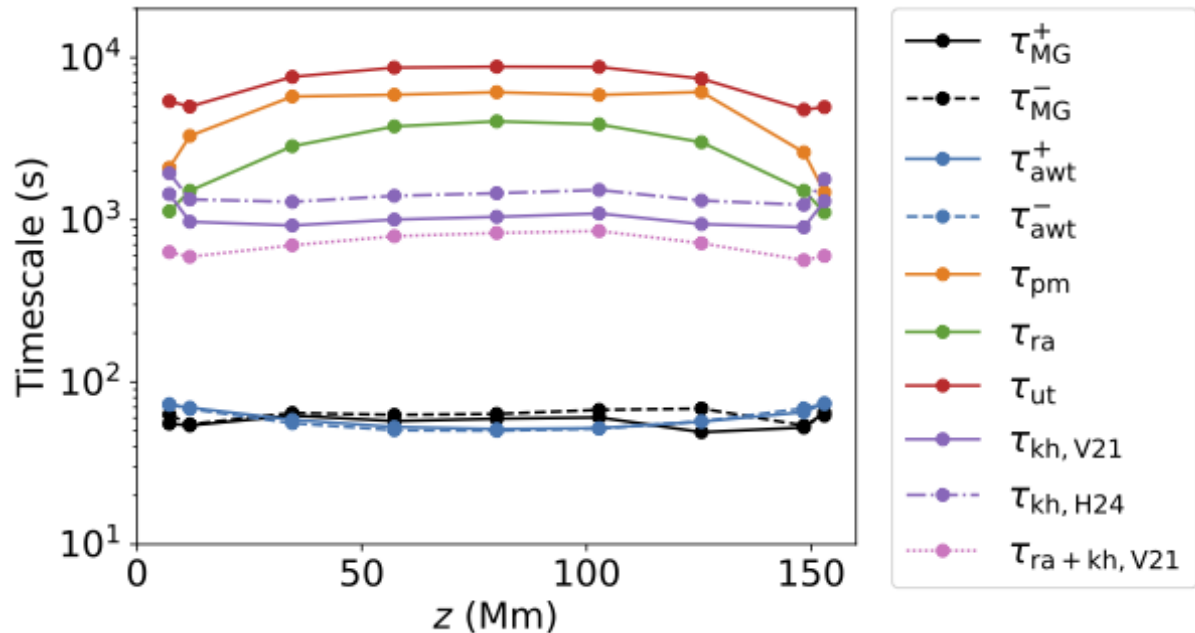
3 次元 RMHD シミュレーションを用いた MPI 並列計算を行った。この計算では太陽表面直下の対流層から上空のコロナまでを一貫して計算しており、コロナ加熱のエネルギー源である表面对流が自発的に発生するように設定されている。従って表面での渦の発生・表面からコロナへのアルフベン波エネルギー供給・コロナ中でのエネルギー散逸によるプラズマ加熱までを一貫して自己整合的に扱うことが可能である。

## 研究成果 (Accomplishments) :

本研究では、アルフベン波により加熱されるコロナを世界で初めて RMHD シミュレーションにより再現することに成功した。アルフベン波のダイナミクスを扱うにはボックスサイズを波長より十分大きく ( $>100,000$  km) 取る必要があり、また乱流的な散逸メカニズムを扱うためには高い空間解像度 ( $<100$  km) が求められる。これらの要件を満たす RMHD シミュレーションの実現には、従来トレードオフの関係にあったマルチスケール性の克服が不可欠であったが、A-KDK の潤沢な計算資源によりそれが可能となった。

これまで提唱されていた 5 つのアルフベン波散逸メカニズム (衝突駆動型乱流、位相混合、共鳴吸収、非一様密度駆動型乱流、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性) によるエネルギー散逸の時間スケールと、数値計算におけるアルフベン波の散逸時間スケールを比較した。その結果、衝突駆動型乱流の時間スケールは他のメカニズム

と比べて約 10 分の 1 と短く、かつ数値計算結果とも整合的であった。以上より、衝突駆動型乱流がアルフベン波の支配的な散逸メカニズムであることを明らかにした。なお、衝突駆動型乱流モデルは宇宙天気や恒星磁気活動の研究にも幅広く応用されており、本研究の結果はそれらのモデルの妥当性を強く支持する。この点で、本研究は太陽物理にとどまらず、隣接分野（惑星科学・恒星物理）にも広い波及効



果を有する。本研究結果は *Astrophysical Journal* 誌に投稿中である。

Fig.1 コロナ中の各高度における、アルフベン波エネルギー散逸時間スケールの比較。数値計算結果（黒）、衝突駆動型乱流モデル（青）、位相混合モデル（橙）、共鳴吸収モデル（緑）、非一様密度駆動型乱流（赤）、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性モデル（紫）、共鳴吸収+ケルビン・ヘルムホルツ不安定性モデル（桃）。

## 公表状況（Publications）：

### （論文）

1. Kuniyoshi, H., Imada, S., Yokoyama, T., A Unified Picture of Swirl-driven Solar Coronal Heating: Magnetic Energy Supply and Dissipation, *Astrophysical Journal Letters*, Volume 990, L71, 2025, doi: 10.3847/2041-8213/adfc61

### （口頭）

1. Kuniyoshi, H., Imada, S., Yokoyama, T., A Unified Picture of Swirl-driven Solar Coronal Heating: Magnetic Energy Supply and Dissipation, Solar Orbiter Atmospheric Heating WG Seminar (online), May 2025
2. Kuniyoshi, H., Imada, S., Yokoyama, T., A Unified Picture of Swirl-driven Solar Coronal Heating: Magnetic Energy Supply and Dissipation, SPINS Meeting, Sheffield U, UK, 2–4 Jun. 2025

3. Kuniyoshi, H., Imada, S., Yokoyama, T., A Unified Picture of Swirl-driven Solar Coronal Heating: Magnetic Energy Supply and Dissipation, Hinode18–IRIS16 Meeting, UCL, UK, 23–27 Jun. 2025
4. Kuniyoshi, H., Imada, S., Yokoyama, T., A Unified Picture of Swirl-driven Solar Coronal Heating: Magnetic Energy Supply and Dissipation, Waves and Instability in the Solar Atmosphere (WISA), INAF, Italy, 25 Sep. 2025

**(ポスター)**

1. Kuniyoshi, H., Imada, S., Yokoyama, T., A Unified Picture of Swirl-driven Solar Coronal Heating: Magnetic Energy Supply and Dissipation, IAU Symposium 400, EAFIT U, Colombia, 21–25 Jul. 2025
2. Kuniyoshi, H., Imada, S., Yokoyama, T., A Unified Picture of Swirl-driven Solar Coronal Heating: Magnetic Energy Supply and Dissipation, National Astronomical Meeting, Durham U, UK, 7–11 Jul. 2025