

大規模 M-I 結合シミュレーションにおける MHD 系流速ヤコビアン固有ベクトル抽出可視化実験

#齊藤 慎之介¹⁾, 吉川 顕正²⁾, 田中 高史³⁾

⁽¹⁾九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻, ⁽²⁾九州大学 理学研究院 地球惑星科学部門, ⁽³⁾九州大学 国際宇宙惑星環境研究センター

The visualization experiment for extracting eigenvalue of MHD system velocity Jacobian from large-scale M-I coupling simulation

#Shinnosuke Saito¹⁾, Akimasa YOSHIKAWA²⁾, Takashi TANAKA³⁾

⁽¹⁾Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu university, ⁽²⁾the Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, ⁽³⁾the International Research Center for Space and Planetary Environmental Science, Kyushu University

The Earth's magnetosphere hosts diverse phenomena driven by solar wind interactions, yet many underlying mechanisms remain unresolved. To address this, we focus on Alfvén waves, fundamental MHD modes that transport information and energy along magnetic field lines. Alfvén waves can be categorized into shear Alfvén waves, oscillating perpendicular to the field and propagating along field lines, and magnetosonic waves, spreading within the magnetic plane. In the magnetosphere, they undergo mode conversion and resonance, contributing to auroral emissions, ionospheric current variations, and other phenomena observed by ground-based and satellite instruments. Thus, visualizing and analyzing Alfvén waves is crucial for understanding magnetospheric dynamics.

We employ the REProduce Plasma Universe (REPPU) code, a magnetosphere – ionosphere (M – I) coupled simulation developed by Prof. Takashi Tanaka at Kyushu University, to visualize Alfvén waves and examine their propagation. REPPU solves the MHD equations in the magnetosphere and the Hall – Pedersen current system in the ionosphere on a unique dodecahedral triangular mesh. The MHD calculations use a finite-volume scheme with TVD interpolation and Roe's method. A key point is that Roe's method inherently performs eigen-decomposition of the flux Jacobian, where the eigenvectors correspond to Alfvén wave modes. In this study, we extract these eigenvectors directly from the REPPU code and visualize them, enabling a direct analysis of Alfvén wave dynamics.

In this presentation, we validate the new visualization approach and demonstrate Alfvén wave propagation under southward IMF conditions as well as their response to high dynamic pressure IMF. These results provide new insights into energy transport and disturbance propagation in the magnetosphere, offering a pathway toward clarifying the generation mechanisms of geomagnetic activity mediated by Alfvén waves.

地球磁気圏では太陽風との相互作用により多様な現象が発生しているが、その詳細なメカニズムはいまだ未解明な点が多い。本研究は、これらの理解を深める手がかりとして Alfvén 波に注目する。Alfvén 波とは、磁場とプラズマの相互作用により生じる電磁流体波であり、磁場に沿って情報やエネルギーを伝搬する基本的な波動モードである。磁気圏においては、擾乱が生じた際にその情報が Alfvén 波として伝わり、磁力線に沿ったエネルギー輸送や他の波動モードとの相互作用を通じて多様な現象を引き起こす。特に Alfvén 波は、磁場に垂直方向に振動し磁力線に沿って伝搬する Shear Alfvén 波と、磁場面に広がる縦波の磁気音波 (magnetosonic wave) に分けて理解される。地球磁気圏で発生した Alfvén 波は、モード変換や共鳴を通じてオーロラ発光や電離圏電流系の変動などを誘発している。したがって Alfvén 波の可視化と解析は、磁気圏での現象理解の鍵を握っている。

本研究では、M-I 結合系シミュレーションである REProduce Plasma Universe (REPPU) コードを用いて Alfvén 波の可視化を行い、その伝搬過程を解析することで磁気圏現象の発生メカニズム解明を目指す。REPPU コードは九州大学名誉教授の田中高史によって開発され、地磁気変動やオーロラ活動の詳細な再現に特化したモデルである。その特徴として、磁気圏領域では MHD 方程式を、電離圏領域では Hall・Pedersen 電流系を解き、さらに空間格子には 12 面体分割三角格子を採用している。MHD 計算は有限体積法に基づき、TVD 補間と Roe 法を用いたフラックス計算により行われる。特に Roe 法においては、保存方程式系を変数ベクトルと流速フラックスで記述し、そのフラックスを固有値分解することで得られる固有ベクトルが Alfvén 波モードに対応する。本研究では、この固有ベクトルをコード内部から抽出し、Alfvén 波を直接的に可視化することを試みた。

本発表では、まずこの手法によって得られた Alfvén 波の可視化結果の妥当性を検証する。さらに、南向き IMF 条件下での Alfvén 波の伝搬の様子、そして動圧の高い IMF 条件下における波動挙動についても紹介し、磁気圏現象の理解に向けた展望を示す。