

# **高解像度 MHD シミュレーションによる磁気圏散逸分布の研究**

Estimation of magnetospheric dissipation through the high-resolution MHD simulation

**研究代表者：研究代表者名**      田中高史（九州大学）

## **研究目的 (Research Objective):**

本課題では REPPU コードレベル 7 とレベル 8 の開発・比較によって、磁気圏ダイナミクスが、散逸分布と電離圏結合にどのように依存するかを明確にしたい。またこれらの散逸分布が、サブストームの再現にどのような影響を与えるかを調べたい。

MHD シミュレーションでは散逸は磁気拡散の形で導入され、一種のパラメタリゼーションが行われる。従って散逸そのものは物理的不確定を含むが、一方でグローバル構造と M-I 結合に整合した構造を議論できるのがメリットである。パラメタリゼーションの評価は、観測の再現性から行う。研究目的は、最適なパラメタリゼーションを求め、それに依存したグローバルな磁気圏構造を探ることとも表現することが出来る。

本コードは地球磁気圏だけでなく、他の磁化惑星（木星、土星など）にも適用可能である。

## **計算手法 (Computational Aspects):**

REPPU コードはハイブリッド並列コードで、太陽風－磁気圏領域は MHD、電離圏は電流保存則で計算される。格子構造として、1 2 面体分割三角格子を採用し、コントロールボリュームは 6 角柱になる。この格子上で、MHD は有限体積 TVD スキーム、電離圏は共役残差法で解かれる。レベルの定義は、1 2 面体の各面を三角に分け、6 0 三角をレベル 1 とし、以下各三角を 4 分割してレベルを上げていく。現在はレベル 7 は完成、レベル 8 は開発段階にある。

## **研究成果 (Accomplishments) :**

(1) REPPU コードレベル 7 によって北向き IMF 下の対流を再現すると、これまでの磁気圏物理学に対する我々の思考が、まだ不十分であることが分かる。これはレベル 7 によって数値拡散の少ないシミュレーションが可能となってきたことで分かって来た。特に電離圏夜間セルの形成機構、プラズマシートの形成機構など、理解がされていないのではないかと。これについて（北向き IMF）は論文を発表した。

この北向き IMF に対応する磁気圏は、サブストームの初期状態としても重要である。従来は北向き IMF の時の構造はさほど考慮せず、反平行磁場、プラズマ分布を与えて、サブストームが再現されてきた。北向き IMF 下の磁気圏は我々の予想を超えて複雑であり、それを出発点としなければ、サブストームの理解もまた十分になら

ないと結論される。これに対しては、レベル7での研究を進め、論文をまとめたが、レベル8ではさらに複雑な構造が発生し、正確な散逸は必ずしも確定できない段階であるのが現状である。

更にレベル8も稼働する状態になった。しかし、レベル7と同じモデル拡散を与えても、レベル8は同一の解を与えない。これはレベル7ではレベル8に比べ、数値拡散がまだ効いていることを示しているのではないかと推定される。これから、レベル8では数値拡散の効果が推定されるようになるのではないかと予想される。

(2) 木星磁気圏ダイナミクスで一番よく知られている機構は、木星プラズマが遠心力で外に輸送され、それに伴って回転遅れ—FAC—メインオーロラが連鎖する機構であろう。これらは $20R_j$ より外側で働く。一方、Io軌道は $6R_j$ であるので、 $6R_j$ から $20R_j$ までは別の輸送が必要である。これは交換不安定によって実現される。シミュレーションでこの過程を再現すると、交換不安定は $20R_j$ 以内で発生する渦運動になることが分かった。しかしここは低ベータ領域であり、磁場変形を伴うような渦は発生しないはずである。この一見する矛盾を解消するのは、磁気圏内の渦運動に対応して電離圏でも磁場の足元が移動（対流）するという機構である。すなわち交換不安定はM-I結合でもなくてはならないということである。シミュレーションによって、このような渦運動、FAC、電離圏対流が矛盾なく構成できることが確かめられたので、論文を発表した。

さらに渦運動のうち東向き運動に伴うコリオリ力は、等価的遠心力（重力）を増加させるので、この部分がより不安定になり、その結果Ioプラズマは外に出てFinger構造を形成することも分かった。

## 公表状況 (Publications) :

Tanaka, T., M. Watanabe, S. Fujita, Y. Ebihara, and R. Kataoka (2024). Multiple convection cells induced by in-front and off-front interactions between the obliquely northward IMF and the geomagnetic field, J. Geophys. Res, 129, e2023JA031994. <https://doi.org/10.1029/2023JA031994>.

Tanaka, T., M. Watanabe, S. Fujita, Y. Ebihara, and R. Kataoka (2024). Formation Mechanism of Fingers That Protrude Eastward From the Io Plasma Disk During the Interchange, J. Geophys. Res, 129, e2024JA032559. <https://doi.org/10.1029/2024JA032559>.