

高速回転する準軸対称プラズマの緩和モデル - 木星磁気圏への応用

Relaxation of a quasi-symmetric rotating plasma - A model of Jupiter's magnetosphere

白石 淳也 [1]; 大崎 秀一 [2]; 吉田 善章 [1]

Jun-ya Shiraishi[1]; Shuichi Ohsaki[2]; Zensho Yoshida[1]

[1] 東大・新領域; [2] IFS テキサス大学

[1] Grad. School Frontier Sci., Univ. Tokyo; [2] IFS, Univ. Texas

<http://www.ppl.k.u-tokyo.ac.jp/~shira>

木星磁気圏において、共回転流をもつ高ベータ・プラズマが観測されている [1]。回転に伴う遠心力により、プラズマは円盤の形状をしている。圧力は木星から離れるに従い小さくなっており、プラズマが閉じ込められている。本研究では、木星磁気圏に似た構造を形成するモデルを提案する。

これまで、幾つかの木星磁気圏の理論モデルが提案されている。例えば、磁場の観測結果の外挿から磁気圏全体の構造を決める経験則的なモデルや、トロイダル流を含む定常理想磁気流体力学 (MHD) 方程式の軸対称平衡方程式を解く円盤モデル [2] が挙げられる。圧力分布を得るためには、円盤モデルを採用する必要がある。しかし、平衡方程式を解くには、コーシー・データ (双曲成分の積分に対応している) を与える必要があるため、平衡方程式そのものでは、プラズマの平衡状態の構造を決定するには不十分である。完全に無散逸な理想プラズマにおいては、コーシー・データは任意の分布をとり得る。しかし、僅かではあるが有限の散逸をもつ現実のプラズマにおいては、コーシー・データは決まった分布をとり、「緩和状態」が形成される。流れをもたない無力磁場配位への緩和現象を説明するために、Taylor により変分原理が導入された [3]。コーシー・データは、圧力がゼロ、流れがゼロ、電流が磁場に平行という条件で与えられる。変分原理の基本的なアイデアは、ある束縛条件の元で、エネルギーを最小化するというものである。束縛条件は、エネルギー保存則よりもロバストな保存則により表される。Taylor の変分原理では、ロバストな運動の定数として、磁気ヘリシティが採られている。

本研究では、木星磁気圏における平衡をモデル化するために、同様のアプローチを用いる。ここで述べておくべき点は、剛体回転流と高ベータという木星磁気圏プラズマの特徴である。Taylor モデルでは、これらの特徴を説明できない。新たな運動の定数を導入することにより、違った種類の緩和状態を求めることができる。例えば、力学的角運動量の保存を束縛条件として課せば、剛体回転流が得られることが知られている。しかし、流れによる遠心力ポテンシャルにより、圧力は外側に向かって大きくなり、木星における観測結果と大きく異なる。そこで、限られた緩和過程でのみ保存される、fragile な運動の定数を考え、従来の変分原理を拡張する。

本研究では、「正準角運動量」を束縛した変分原理を提案する。力学的角運動量はロバストな保存量である一方、正準角運動量は、系が準軸対称性を保つ場合にのみ保存する。本研究では、正準角運動量の束縛により、プラズマ閉じ込めが達成されることを示す [4]。ここで興味深い点は、緩和過程における準軸対称性が、高ベータ・プラズマ閉じ込めの平衡状態形成に本質的であるということである。これは、正準角運動量の巨視的な保存が、木星磁気圏に似た構造の形成において本質的な役割を果たすことを示している。

最後に、本研究のモデルが対象としている領域を明らかにしておく。本研究では、理想 MHD 方程式を用いているため、非理想的な効果が重要となる木星近傍 ($r < \sim 6R_J$, R_J は木星半径) での現象を捉えることは出来ない。また、緩和過程における準軸対称性が重要となるから、非対称性が顕著になる外部磁気圏 ($r > 30R_J$) には応用できない。従って、本研究のモデルは内部磁気圏を対象にしている。

[1] L.A. Frank and W.R. Paterson, *J. Geophys. Res.* 109, A11217 (2004).

[2] G. Caudal, *J. Geophys. Res.* 91, 4201 (1986).

[3] J.B. Taylor, *Rev. Mod. Phys.* 58, 741 (1986).

[4] J. Shiraishi, S. Ohsaki and Z. Yoshida, *Phys. Plasmas* 12, 092901 (2005).