

磁気圏プラズマの自己組織化

—磁場によって歪むメトリックの非線形効果

Self-Organization of Magnetospheric Plasma Confinement
--- nonlinear effect of space-time distortion cause by
inhomogeneous magnetic field

吉田 善章 (YOSHIDA ZENSHO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授



研究の概要

天体磁気圏はプラズマを自然に閉じ込めて渦を形成する。そのメカニズムを理解し応用する事ができれば、効率的で高性能なプラズマ閉じ込めが可能になり、先進的な核融合や反物質プラズマ生成に道がひらかれる。プラズマが棲む空間を双極子磁場が歪めることで、渦構造が自己組織化すると考えることができる。これを実験と理論を突き合わせることで証明する。

研究分野：プラズマ物理学，非線形科学，数理物理学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ物理学，自己組織化，渦，磁気圏，葉層構造

1. 研究開始当初の背景

天体磁気圏は宇宙に遍在する典型的な構造でありながら、そこに閉じ込められるプラズマには多様な構造や運動が現れ、未解明のものが多い。それらはしばしば通常の物理的常識に反する「奇妙な現象」として観測され、注目を集めている。私たちは、磁気圏をつくるダイポール型磁場の強い非一様性のために生じる「時空の歪み」によって、こうした現象が引き起こされると考えている。

2. 研究の目的

プラズマのマクロな運動と構造を支配する幾何学は磁場をメトリックに含む葉層上のハミルトン力学だと考える。ダイポール磁場は強い非一様性をもつことから磁気圏型配位においてメトリックの効果が顕著になる。本研究では実験と理論を付き合わせつつ、一様な磁場中では縮退しているプラズマの特性を明らかにし、プラズマが自己組織化する構造とメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

実験研究では東京大学において開発されたRT-1実験装置(図1)を用いて磁気圏型の超高ベータプラズマをつくり、その内部の磁場や流速の構造を解析して、プラズマの自己組織化メカニズムを明らかにする。理論研究では、プラズマのマクロ階層を位相空間の葉層構造として理解する理論に基づいてプラズマの熱平衡分布を解析し実験と比較する。

4. これまでの成果

本研究は、自然界において自発的に形成される天体磁気圏プラズマの自己組織化メカニズムと内部構造を明らかにすることを目的とした実験・理論の総合的なプロジェクトである。

(A) 磁気圏型プラズマの実験

RT-1は、真空装置内に磁気浮上させた超伝導マグネットでダイポール磁場を発生させ、天体磁気圏を模した配位でプラズマを閉じ込める。本プロジェクトの主題はイオンの高温化と、それによって生まれる新たな渦動現象の研究である。渦運動はプラズマの構造を維持するうえで重要な働きをする。

電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)系の増強によって、プラズマの閉じ込めパラメタが大幅に増加し、平均密度は $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ に達した。プラズマの局所ベータ値は1に達したと考えられるが(図2)、エネルギーの異方性を考慮した正確な解析を行っている。電子密度の空間分布を評価するために3コードの干渉計を設置した。これによって磁気圏型閉じ込めの特徴である密度分布の強いピーキングが計測され、後述する自己組織化理論に対する実験的検証が得られた[2]。プラズマ渦の反磁性効果をプラズマ全体の磁気モーメントから評価することで計測し、渦の自己組織化を磁気モーメントで葉層化された位相空間のグランドカノニカル分布として説明する理論モデルの妥当性を実験的に検証している[1]。



図1：RT-1 プラズマ実験装置。超伝導マグネットを磁気浮上させ、磁気圏型配位を形成して1億度を超える超高温プラズマを閉じ込める。

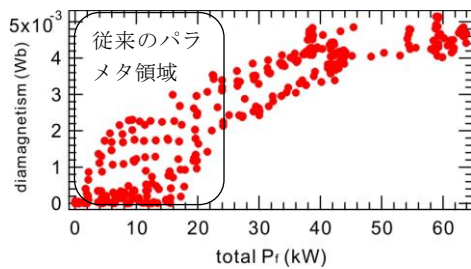


図2：プラズマの平均ベータ値を表わす反磁性磁束（縦軸）とECHパワーの関係。ECHシステム増強と改善によって従来のパラメタ領域から大幅に拡大した。局所ベータ値は1に達したと考えられる。

また、イオン温度と渦流速の関係を明らかにし、理論モデルのイオン圧力の効果が実験的に確定できるようになった。今後より高温の領域を調べる必要がある。そのための方法としてイオンサイクロトロン加熱（ICH）を目指している。

(B) 自己組織化する渦構造の幾何学理論：

天体磁気圏に自己組織化される超高 β プラズマの安定な渦構造は、磁化したプラズマ粒子が断熱不変量によって葉層化した位相空間上につくるグランド・カノニカル平衡として説明できる[2]。これは前述の実験結果と整合しており、本研究の中核となる物理的課題は（イオン圧力が比較的低い領域においては）ほぼ達成できたといえる。

端的に言えば「プラズマの渦構造を決めるのはハミルトニアン（エネルギー＝物質）ではなく時空の幾何学だ」というのが基本的な主張である。さらにこの観点を翻すと、葉層構造を与えるカシミール元は、それを断熱不変量と考えて共役な角変数を導入することで正準化できる。この考え方は無限次元ハミルトン系に通底する大きな文脈をもつ新しい理論的フレームワークを提示するものである[3-6]。

5. 今後の計画

これまでの研究で磁気圏型プラズマの自己組織化に関する基本的な理解が得られた。本研究ではイオンを直接加熱してその圧力を高め、イオンの圧力がプラズマの渦構造に与える影響を調べることを研究課題の柱の一つとしている。これまでにイオン圧力効果に関する初期的な実験データを得た。ICH系の改善は残された研究期間の中心的課題であり、プラズマ中の電磁波の直接計測を含めて最適化をはかる予定である。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- 1) Z. Yoshida, Y. Yano, J. Morikawa and H. Saitoh, *Thermo-magneto coupling in a dipole plasma*, Phys. Plasmas **19**, 072303 1-5 (2012).
- 2) Z. Yoshida, H. Saitoh, Y. Yano, H. Mikami, N. Kasaoka, W. Sakamoto, J. Morikawa, M. Furukawa and S. M. Mahajan, *Self-organized confinement by magnetic dipole: recent results from RT-1 and theoretical modeling*, Plasma Phys. Control. Fusion **55**, 014018 1-5 (2013).
- 3) Z. Yoshida, *Singular Casimir elements: their mathematical justification and physical implications*, Procedia IUTAM **7**, 141-150 (2013).
- 4) Z. Yoshida and E. Hameiri, J. Phys. A: Math. Theor., *Canonical Hamiltonian mechanics of Hall magnetohydrodynamics and its limit to ideal magnetohydrodynamics*, **46**, 335502 1-16 (2013).
- 5) Z. Yoshida and P. J. Morrison, *Unfreezing Casimir invariants: singular perturbations giving rise to forbidden instabilities, Nonlinear physical systems: spectral analysis, stability and bifurcation*, Ed: O. N Kirillov and D. E. Pelinovsky, (John Wiley & Sons), pp. 401-419 (2014).
- 6) Z. Yoshida, P. J. Morrison and F. Dobarro, *Singular Casimir elements of the Euler equation and equilibrium points*, J. Math. Fluid Mech. **16**, 41-57 (2014).
- 7) Z. Yoshida and Y. Kawazura, *Stability, and Entropy Production in a Self-Organizing Fluid/Plasma System, Beyond The Second Law: Entropy Production and Non-Equilibrium Systems*, Ed: R. Dewar et al. (Springer), pp. 291-307 (2014).

ホームページ等

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