

トラス型非中性プラズマを用いた高速流プラズマの高ベータ平衡と安定性の実験的検証

Experimental Studies on the High-beta Equilibrium and Stability of Rapidly Flowing Plasma Produced in Toroidal Non-neutral Plasma Trap

吉田 善章 (Yoshida Zensyo)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授



研究の概要

強い流れをもつプラズマの自己組織化現象を理論的および実験的に解明し、宇宙空間や天体に見られる高速プラズマ流の基本構造と安定性を明らかにした。高速流の動圧によって高い圧力をもつプラズマが閉じ込められるという基本原理を先進的核融合の概念に応用する可能性を示し、磁気圏型閉じ込めシステムのための要素技術の開発を行った。

研究分野 / 科研費の分科・細目 / キーワード

数物系科学 / プラズマ科学 / 先進的核融合、プラズマ宇宙物理学、磁気圏型プラズマ閉じ込め、プラズマ流、渦構造、自己組織化、高ベータプラズマ閉じ込め

1. 研究開始当初の背景・動機

木星磁気圏に極めて圧力が高い(磁場の圧力に比して)プラズマが閉じ込められていることが知られている。我々は、これを高速回転プラズマ流の効果であると考えている。この理論的予測が実験的に検証され、高速回転流が高い圧力のプラズマを閉じ込めるという基本原理が確立すれば、これを先進的核融合の概念に応用する可能性が拓かれる。

2. 研究の目的

高速プラズマ流の流体力学的効果およびHall効果について(1)理論的解析を進め、(2)それを実験的に検証し、(3)高ベータプラズマ閉じ込めの新たな可能性を科学的に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

磁気圏型プラズマ閉じ込め装置Proto-RTを用い、非中性プラズマおよび準中性プラズマ中の電位分布を制御して、超高速(マッハ数 $\gg 1$)で回転する安定なプラズマ平衡状態を実現する。そのプラズマ内部の電場(流速に対応する)と磁場の構造を詳細かつ精密に計測・分析し、理論的に予測される構造(プラズマ中で自己組織化される渦構造)との比較・検討によって、基本的な物理を明らかにする。

この実験のために、本補助金によってProto-RTの磁場を増力しECHで十分電離度が高いプラズマを生成できるよう改造を行った。

4. 研究の主な成果

強い流れをもつプラズマの自己組織化現象を理論的および実験的に解明し、宇宙・天体現象で見られる高速プラズマ流の基本構造と安定性を明らかにした。高速流の動圧によって高い圧力のプラズマを閉じ込めるという基本原理を先進的核融合の概念に応用する可能性について検討した。

私たちは、高速プラズマ流による動圧によって高いベータ値をもつプラズマを閉じ込めるdouble Beltrami配位の自己組織化を理論的に予測した。Double Beltrami場は、渦方程式がもつ幾何学的特異性に関連する渦の基本構造として捉えることができるが、その非正準的構造を無限次元関数空間で分析することは容易ではない。流れをもつプラズマの安定性は、従来の解析方法が使えない非エルミート作用素を扱うこと必要とし、数学的にも新しい領域を提示している。実験的にも、高速プラズマ流を安定的に生成し、高温プラズマを閉じ込めることは、幾多の技術的イノベーションを必要とする。このように、本研究は、理論的にも実験的にも新たな方法論の開発を必要とするチャレンジであった。

(1)Proto-RT実験装置(磁気圏型高速回転プラズマ閉じ込め)

Proto-RTは、天体が普遍的に有する双極子磁場に模したプラズマ閉じ込め装置である。まず非中性プラズマ(純電子プラズマ)を生成し、その自己電場で高速回転する平衡を形成して良好な閉じ込め特性を実証した[7]。次に、磁場を増強する改造とECHプラズマ加熱装置を導入し、準中性プラズ

マの内部電場を制御して、超高速回転流を生成する実験を行った。この配位は、木星の磁気圏に似た構造をもち、高速流の動圧で高いベータ値が得られると予測される。

(2) 超高速流の安定的な生成とプラズマの内部構造

準中性プラズマに対して内部導体の表面にバイアス電位を与えて径方向の電場を生成し、超高速プラズマ流（流速 $> 10^5$ m/s、イオン音速比のマッハ数が 5~10）を安定的に駆動することができた。これは、当初の目標を達成するものである。

高速回転プラズマの平衡状態は、プラズマ流の動圧、シャー流のストレッチ効果、Hall 効果による特異摂動によって支配される、これまでの準静止系プラズマ平衡とは全く異なる状態である。本研究では、その内部構造をポッケルス電解センサーなど新しい計測方法を駆使して詳細に計測・分析した（図1参照）。

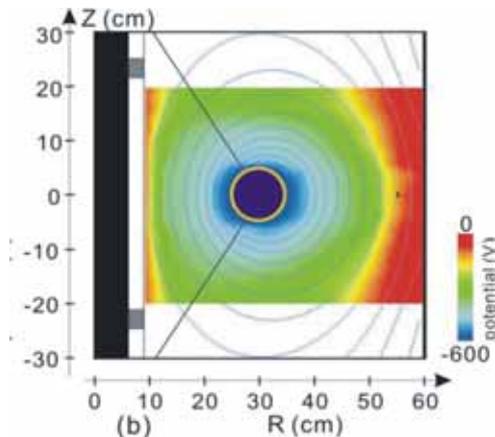


図1：プラズマ内部の電位分布（プローブ計測）と磁気面の関係

実験結果は理論的予測と良い一致を示した。とくに、高速流動圧効果と Hall 効果によって分岐する2つの異なる平衡状態を確認し、動圧効果で顕著な圧力勾配が生まれることを確認した。

(3) 磁気圏型高速流プラズマ閉じ込めによる先進核融合の可能性

本研究で確認された磁気圏型高速回転流プラズマの安定生成とその内部構造の解析によって、回転流の効果で超高ベータプラズマを閉じ込める新たな先進核融合概念の基礎が築かれた。

本研究では、この新しいプラズマ閉じ込め概念に基づく本格的な超伝導磁気浮上方式の実験装置 RT-1 の建設と平行して、その基盤技術の開発を行い、多くの技術革新を得た。RTは2006年に完成し実験を始めた。本研究の成果を発展させる計画である。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究の成果は、(1) 新たな方法論を開拓したという意味で学際的な波及効果をもち、(2) 世界的に先例がない新しいプラズマ閉じ込め方式の基礎を築いたという意味で世界に先駆けたものといえる。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

- [1] **Z. Yoshida** *et al.*; First plasma in the RT-1 device, *Plasma Fusion Res.* **11** (2006), 008-1-2.
- [2] M. Hirota, **Z. Yoshida** and E. Hameiri; Variational principle for linear stability of flowing plasmas in Hall magnetohydrodynamics, *Phys. Plasmas* **13** (2006), 022107-1-8.
- [3] **Z. Yoshida** *et al.*, First Plasma Experiment on RT-1 (Ring Trap 1) - a new concept of high-beta confinement (to be published in Proc. IAEA Fusion Energy Conf., China, 2006).
- [4] J. Shiraishi, M. Furukawa and **Z. Yoshida**; A New-Type Equilibrium of Flowing Plasma Dominated by the Hall Effect, *Plasma Fusion Res.* **1** (2006), 050-1-7.
- [5] H. Saitoh, **Z. Yoshida** and S. Watanabe; Stable confinement of toroidal electron plasma in an internal conductor device Proto-Ring Trap, *Phys. Plasmas* **12** (2005), 092102-1-7.
- [6] J. Shiraishi, S. Ohsaki and **Z. Yoshida**; Relaxation of a quasisymmetric rotating plasma: a model of Jupiter's magnetosphere, *Phys. Plasmas* **12** (2005), 092901-1-5.
- [7] H. Saitoh, **Z. Yoshida** *et al.*; Confinement of pure-electron plasmas in a toroidal magnetic-surface configuration, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004), 255005-1-4.
- [8] H. Saitoh, **Z. Yoshida** *et al.*; Potential structure of a plasma in an internal conductor device under the influence of a biased electrode, *Phys. Plasmas* **11** (2004), 3331-3334.
- [9] **Z. Yoshida**, S.M. Mahajan and S. Ohsaki; Scale hierarchy created in plasma flow, *Phys. Plasmas* **11** (2004), 3660-3664.
- [10] **Z. Yoshida** and S.M. Mahajan; Variational principles and self-organization in two-fluid plasmas, *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002), 095001.

ホームページ等

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