

平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		よしだ ぜんしょう					
研究代表者氏名		吉田 善章		所属研究機関・部局・職		東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授	
研究課題名	和文	トー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					
	英文	Experimental Studies on the High-beta Equilibrium and Stability of Rapidly Flowing Plasma Produced in Toroidal Non-neutral Plasma Trap					
研究経費		平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計
16年度以降は内約額 金額単位：千円		19,300	16,900	9,200	7,400	8,000	60,800
研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
吉田 善章	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授	プラズマ理工学	研究の総括、実験の企画と実施、データ解析、理論解析				
大崎 秀一	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助手	プラズマ理工学	プラズマ平衡と安定性の解析、装置設計				
沼田 龍介	学術振興会特別研究員 (PD)	プラズマ理工学	プラズマ流の自己組織化の理論シミュレーション				
齋藤 晴彦	学術振興会特別研究員 (DC1)	プラズマ理工学	実験の遂行、データ解析				
廣田 真	学術振興会特別研究員 (DC1)	プラズマ理工学	プラズマ流中のゆらぎの理論解析				
小川 雄一	東京大学・高温プラズマ研究センター・教授	核融合学	実験装置の設計と製作、実験の遂行				
森川 淳二	東京大学・工学系研究科・助手	核融合学	実験装置の設計と製作、実験の遂行				
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>強い流れをもつプラズマの自己組織化現象を実験的および理論的に解明し、宇宙空間や天体に見られる極めて高い値をもつプラズマの生成原理と安定性を実験的に検証することを目的とする。高速プラズマ流による動圧によってプラズマを閉じ込める double Beltrami 配位の自己組織化が理論的に予測されている。この平衡が生成されるためには、高速プラズマ流が駆動・保持される必要がある。本研究では、我々が開発した内部導体トーラス型非中性プラズマトラップ Proto-RT および Mini-RT を用い、電子ビーム入射等によるプラズマの非中性化に伴う電場によって高速プラズマ流の駆動を試み、上記理論予測の検証を行う。この実験を現有設備 Proto-RT・Mini-RT 装置において実施する。Proto-RT は、内部導体コイルを有するトーラス閉じ込め装置であり、トロイダル磁気シヤー配位による電子プラズマの純磁場閉じ込めを世界で最初に実証し、ブリリュアン密度限界にいたる高密度（高電位）電子プラズマのトラップを達成している。Mini-RT 装置は、超伝導磁気浮上内部導体を用い、プラズマと構造物の接触によるプラズマ閉じ込め劣化を最小化した第2次装置である。これらの装置において ECR を用いて比較的密度の高温プラズマを生成し、そのプラズマに荷電粒子（電子およびイオン）を入射する等の方法により「プラズマの非中性化」を試み、自己電場によるプラズマの回転流を駆動する。</p>							

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

5年間にわたる本計画の前半2年間に、(1)実験を実施するため主要設備の製作と整備、(2)初期実験による基本的原理の妥当性の確認、(3)理論解析による計画の妥当性の確認と最適化を行った（(1)については学会（日本物理学会）において発表している。また(2)、(3)の主要な成果は、学術論文として発表している）。第3年目の16年度には、ECHによってプラズマを生成し、本格的な実験を開始する予定である。

(1) 実験主要設備の製作と整備

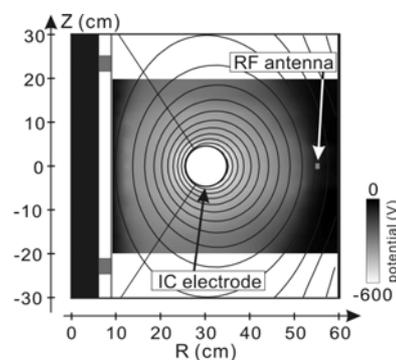
既設の非中性プラズマ実験装置 Proto-RT を改造し、ECR による中性プラズマ発生と従来の非中性プラズマ発生を組み合わせることで超高速流を発生する必要がある。このために以下の準備を行った。磁場発生コイルをパルス運転することで磁場強度を高め、2.46GHz マイクロ波で ECR の共鳴条件を得るようにする。そのコンデンサー電源、電流波形整形回路を製作し、動作を確認した。10kW の 2.46GHz マイクロ波電源と電力伝送器を設計・購入し、動作を確認した。プラズマ内部の電場構造（プラズマ流の構造）を実験的に解析するために、レーザー光とポッケルス素子を用いた電場計測システムを製作し、予備実験（下記）において計測を開始した。

(2) 初期実験の成果

Proto-RT 実験装置において非中性プラズマ（電子プラズマ）および弱電離・低密度プラズマを用いた基礎実験をおこない、高速プラズマ流生成と電場制御の基本的な関係について成果を得た。純電子非中性プラズマの長時間閉じ込め（閉じ込め時間 0.1sec 以上）を達成し、内部導体が形成する閉じた磁気面構造と電場構造の関係を調整する（磁気面と等電位面を一致させる）ことによって、自己電場によって高速回転するプラズマの良好な閉じ込めが可能となることを実験的に示した。

13MHz の誘導結合プラズマ生成を行い（最大電力 5kW）、低密度・低温ではあるがプラズマ中に高速流を形成する初期実験を行った。トーラスプラズマのポロイダル断面全体にわたって静電ポテンシャルの分布を計測し、電場（流れ場）の構造を明らかにした（図 1）。また、流速（電場強度）とトルクの関係などのスケージング則について実験的に解析した。

図 1：内部導体のバイアスによってプラズマ中に径方向電場を生成し、イオン音速を超える速さのプラズマ流を生成した。等電位面は磁気面と一致する傾向があり、非中性プラズマ閉じ込めとの類似性が確認された。



(3) 理論解析の成果

高速流プラズマの生成は、その平衡解の存在、安定性などが理論的に未知の領域へのチャレンジである。double Beltrami 解は、3次元でも一般的に存在する極めて robust な特解であるが、その基本的な性質について以下のことが明らかになった。

double Beltrami 場（流れをもつプラズマ平衡の特殊解）が、エンストロフィーを最小とるように自己組織化される構造であることを理論的に示した。また、この論文で展開された変分原理は、従来の研究で用いられてきた変分原理（選択的散逸の概念）の数学的な ill-posedness や物理的な任意性を解消する一般的な理論的枠組みを与えた。

あるクラスの double Beltrami 場（上記）が Lyapunov 安定性をもつこと（流れがあるプラズマの安定性はモード解析では不十分であり Lyapunov 関数を発見することで厳密な安定性が示される）を示した。

特記事項（これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。）

1. プラズマ流に関する基礎研究の重要性

流れを含むプラズマの平衡および安定性は、核融合研究のみならずプラズマ宇宙物理の極めて重要な研究課題である。たとえば核融合炉心プラズマ研究においては、閉じ込め特性に対する流れの影響（太陽コロナのアナロジーで「ストリーマー」と呼ばれる径方向の流れや、木星の惑星流のアナロジーで「帯状流」と呼ばれる周回流など）が中心的な課題となっている。本研究が推進している内部導体系は、プラズマ流の基本的な性質を精密に研究できる実験設備としてユニークである。すなわち、内部導体によって生成されるプラズマ閉じ込め磁場は、天体が普遍的にもつ2重極磁場と同様であり、単純であると同時に様々な特徴をもつ。

プラズマ流の平衡やその特異性（衝撃波に相当する）に関する2次元、3次元問題（特性曲線のカオスの問題が現れる）、安定性の解析（非エルミート性をもつスペクトル解析が必要となる）などは、ほとんど未解決の問題であり、数学的に新たな方法論を開発する必要がある。我々の研究では、特異摂動による構造の多様化と階層性[1]、新たな変分原理[1]、Lyapunov関数による非エルミート系の安定性解析[11,14]、佐藤超関数理論による特異固有関数とその縮退、永年挙動[6,8,9,12]などに関する解析など、あらたな数学の枠組みでプラズマ理論を展開している。

2. プラズマの階層性の理解

プラズマは、粒子（電子、イオン、ダスト）の運動が問題となるミクロの階層と、マクロ・スケール（天体や磁気圏などのスケールあるいは実験装置のスケール）の階層、さらに中間（メソ）スケールの階層が複雑に連関する系である。これらのスケール階層は容易に10桁を越えるスケールの隔たりをもつが、プラズマは自ら「構造」をつくることによって、階層の連関を生み出す[1]。たとえば、波と粒子の相互作用などである。double Beltrami 場は、非線形性と特異摂動の協調によって生み出される構造であり、これによって粒子（イオン）の運動とマクロな電磁場分布の構造とが結合する。この場の中で、粒子運動のカオスが起これると、たとえば無衝突磁気リコネクションが可能となる[3,13]。太陽のコロナ領域において磁場の全体構造を決めるマクロなスケールと、無衝突電気抵抗（これがないと、コロナ領域のプラズマが太陽磁場を引きちぎって太陽系へ飛び出すことができない）を生み出す粒子運動のミクロなスケールが連関することを理論的に示しており、これを実験的にも検証しようとして計画している。

3. プラズマの構造の多様性

プラズマは多様な構造の宝庫である。ただし、ここでいう「構造」は、量子論における電子軌道の構造（シュレディンガー作用素の固有関数）や結晶の原子配列などのような「ゆるぎない構造」ではなく、常にあいまいさと揺らぎをともなうものである。構造として記述される部分と、ランダムであるとして統計的記述へと捨象すべき部分を腑分けすること、これを無限自由度の空間でおこなう必要がある。自己組織化とは、一定の自由度が「構造を形成し保持するもの」としてランダムの相から分離することである。これを「運動の積分（保存則）」と関係付けて理解することが目標となる。double Beltrami 場の形成を説明する変分原理[1]は、様々な構造の形成を普遍的に表現する厳密な理論の枠組みを与えるものである。

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

1. 専門誌に発表した原著論文

- [1] Z. Yoshida and S.M. Mahajan; Variational principles and self-organization in two-fluid plasmas, *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002), 095001.
- [2] H. Saitoh, Z. Yoshida and C. Nakashima; Equilibrium of a nonneutral plasma in a toroidal magnetic shear configuration, *Rev. Sci. Instrm.* **73** (2002), 87-90.
- [3] R. Numata and Z. Yoshida; Chaos-Induced Resistivity in Collisionless Magnetic Reconnection, *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002), 045003.
- [4] S. Ohsaki, N.L. Shatashvili, Z. Yoshida, and S.M. Mahajan; Energy transformation mechanism in the solar atmosphere associated with magnetofluid coupling: explosive and eruptive events, *Astrophys. J.* **570** (2002), 395-407.
- [5] M. Hirota, T. Tatsuno, S. Kondoh, and Z. Yoshida; Secular behavior of electrostatic Kelvin-Helmholtz (diocotron) modes coupled with plasma oscillations, *Phys. Plasmas* **9** (2002), 1177-1184.
- [6] S.M. Mahajan, K.I. Nikol'skaya, N.L. Shatashvili, and Z. Yoshida; Generation of flows in the solar atmosphere due to magnetofluid coupling, *Astrophys. J.* **576** (2002), L161-164.
- [7] A. Ito, Z. Yoshida, T. Tatsuno, S. Ohsaki and S.M. Mahajan; Kelvin-Helmholtz instability in Beltrami fields, *Phys. Plasmas* **9** (2002), 4856-4862.
- [8] T. Tatsuno, Z. Yoshida and S.M. Mahajan; Despabilizing effect of plane Couette flow, *Phys. Plasmas* **10** (2003), 2278-2286.
- [9] T. Suzuki, A. Ito and Z. Yoshida; Statistical model of current filaments in a turbulent plasma, *Fluid Dynamics Res.* **32** (2004), 247-260.
- [10] Z. Yoshida, S. Ohsaki, A. Ito and S.M. Mahajan; Stability of Beltrami flows, *J. Math. Phys.* **44** (2003), 2168-2178.
- [11] M. Hirota, T. Tatsuno and Z. Yoshida; Degenerate continuous spectra producing localized secular instability --An example in a non-neutral plasma, *J. Plasma Phys* **69**, (2003), 397-412.
- [12] R. Numata and Z. Yoshida; Chaos-Induced Resistivity in Collisionless Magnetic Reconnection, *Phys. Rev. E* **68** (2003), 016407.
- [13] S. Ohsaki and Z. Yoshida; Lyapunov function of relaxed states in two-fluid plasmas: Stability of double-Beltrami flows, *Phys. Plasmas* **10** (2003), 3853-3857.
- [14] Z. Yoshida, S.M. Mahajan and S. Ohsaki; Scale hierarchy created in plasma flow, *Phys. Plasmas* (to be published).
- [15] H. Saitoh, Z. Yoshida, H. Himura, J. Morikawa and M. Fukao; Potential structure of a plasma in an internal conductor device under the influence of a biased electrode, *Phys. Plasmas* (to be published).

2. 学会誌に発表した解説論文

- [1] 吉田善章; フローイングプラズマ, 物理学会(解説).

3. 国際会議での発表 10件

(Nonneutral Plasma Physics; 2件、International Toki Conference; 5件、International Congress on Industrial and Applied Mathematics; 3件)

4. 国内学会での発表 24件

(日本物理学会)