

平成22年 5月31日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20740321

研究課題名（和文） 高ベータプラズマ衝突実験における粒子混合過程の研究

研究課題名（英文） Particle mixing process in high-beta plasma collision experiment

研究代表者

井 通暁（INOMOTO MICHIAKI）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00324799

研究成果の概要（和文）：

内部アンテナ型回転磁場法によって形成、維持される高ベータプラズマについて、その平衡が周方向に非一様性を有していることを明らかにし、駆動される電流や安定性との関連性を示唆する結果を得た。プラズマ衝突によって発生する低周波揺動を検出することに成功し、伝搬後に圧縮性波動に変換される可能性を示唆する結果を得た。特に強いガイド磁場下のプラズマ衝突においてシート電流放出現象を観測し、従来の定常リコネクションとは異なった物理現象を観測することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

It is found that the high-beta equilibrium formed and sustained by the rotating magnetic field has significant azimuthally non-uniform component, which possibly affect the driven current and stability of the entire plasma. Low frequency fluctuation excited by the plasma collision was detected and its propagation property was investigated. Plasma collision under strong guide field involves current sheet ejection event which provides impulsive fast magnetic reconnection.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ物理、磁気リコネクション、核融合、磁気圏・電離圏、宇宙物理

## 1. 研究開始当初の背景

太陽コロナや地球磁気圏プラズマ、あるいは核融合プラズマにおける急激なエネルギー解放や高エネルギー粒子の生成、自発

的な構造形成といった現象を解明する基礎過程として、磁気リコネクションに関する研究が天体観測、実験、理論計算を通して盛んに行われている。これを実験的に解明

する手段としてプラズマ合体という手法が有効である。プラズマ合体とは、スフェロマックと呼ばれる閉じた磁場構造を持つプラズマの塊を2つ生成し、それらを衝突・合体させた際の過渡現象を観測するものである。プラズマ合体実験では磁場構造がプラズマ内部で閉じているため、他の一般的な基礎プラズマ実験手法と異なって装置壁や装置幾何形状の影響が小さく、プラズマ内部で自律的に発展する磁気リコネクションや自己組織化、緩和過程といった現象の観測に適しているという点が際立った特徴と言える。これまでのプラズマ合体実験では、磁気リコネクションにおける運動論的効果や二流体効果に関する成果が得られているが、その結果は多くのシミュレーション研究や天体観測結果、特に太陽フレアの高速リコネクション機構や地球磁気圏尾部のリコネクションにおけるホール効果の発見等と一致しており、プラズマ合体実験が自然界のプラズマ現象を模擬する手法として優れていることを示すものである。

## 2. 研究の目的

本研究では特に、合体するプラズマの有する熱・運動エネルギーを高くすることによって新たな物理現象の発現を期待するものである。プラズマの熱圧力を磁場の圧力で割ったものをベータ値と呼び、従来のプラズマ合体実験に用いられているプラズマのベータ値は典型的には10%以下であった。2つのプラズマを合体させる際の相対速度もアルヴェン速度の10%程度であることから、初期プラズマの有するエネルギーの大部分は磁場のエネルギーである。そのため、磁気エネルギーが発端となる磁気リコネクション現象を発生させる上で非常に都合がよい構成となっていた。磁気リコネクションとは、言い換えれば「磁場を伴った2つのプラズマ塊がどのように混合するか」という過程において、特に磁場が支配的となる場合に相当すると考えられる。より一般的には、プラズマの熱・運動エネルギーが問題となるような領域、例えば天体プラズマにおける太陽風と地球磁気圏前面との間に発生するショック構造や、超新星爆発におけるX線リングでのショックといった物理現象が存在しているが、プラズマ合体実験はこのような現象の解明には不向きであった。そこで本研究では、衝突させる初期プラズマとして、80%以上という高いベータ値を有する磁場反転配位プラズマを使用し、これらを高速で衝突させることによ

て、初期の磁気エネルギーと、プラズマの熱・運動エネルギーが全て衝突現象に寄与するような新しい実験を提案する。これによって、プラズマ合体時の過渡現象において、磁気リコネクションだけでなく、ショック構造や乱流の形成、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性の発現等が予想され、より一般的な状態におけるプラズマ混合問題を模擬することが可能になると期待できる。

## 3. 研究の方法

高ベータプラズマ生成法として、逆バイアステータピンチ法、回転磁場法およびプラズマ合体法を採用する。高ベータプラズマ合体の際に起きる過渡現象を、磁気リコネクション、乱流、無衝突ショック、粒子加速といった物理過程に着目して分析する。高ベータプラズマ衝突実験を実施するに当たって、回転磁場法によって生成されるプラズマの捕捉磁束・密度・温度の増大が必須となる。本研究では、回転磁場法の改良を行った上で、種々の条件下でのプラズマ衝突実験を実施し、その際に生じる過渡現象を計測する。計測装置としては、背景磁場分布、磁場揺動、およびプラズマ発光の分光計測を用いる。

## 4. 研究成果

(1) 回転磁場法によって形成・維持される準定常高ベータプラズマにおいて、内部アンテナ構造によってもたらされる周方向非一様性を実験的に見出し、回転磁場圧力と電子回転速度分布との関連性を明らかにした。アンテナ直下では回転磁場の磁気圧が大きくなるため、圧力勾配が大きくなると同時にプラズマ径が小さく制限され、結果的に磁場および密度の径方向分布は周方向位置によって大きく異なることになる。このような状態で図1に示すような閉じた磁気面構造が維持されるためには、電子とイオンの周方向回転速度分布に差異が生じる必要があることを実験およびモデル計算を用いて示した。この周方向非一様性は、プラズマの巨視的な安定性に寄与していると考えられる。

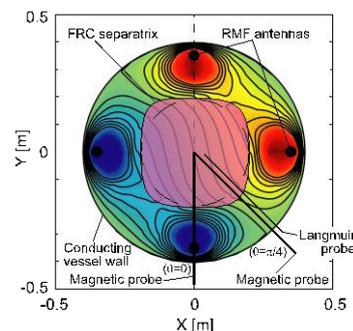


図1 高ベータプラズマの周方向非一様性

(2) プラズマ衝突の際の磁場揺動計測の結果、比較的低周波のMHD波帯の信号をプラズマ中の広範な領域で検出し、その伝搬の様子を観測した。X点および下流領域において計測した磁場揺動信号例を図2に示す。衝突後の時間帯に～数百kHz帯の磁場揺動が現れていることがわかる。衝突に際して背景の磁場構造そのものが時間変化することを考慮に入れて解析を行った結果、衝突地点から磁力線方向に伝搬を開始した低周波揺動が、短時間のうちに圧縮性のモードに変換されている可能性を見出した。これは、解放された磁気エネルギーが波動を介して伝搬され、波動とプラズマの相互作用によって効率的に熱化されている可能性を示唆する結果である。

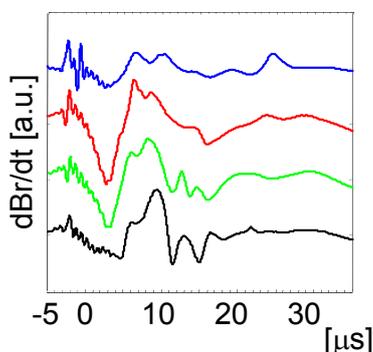


図2 プラズマ衝突時の磁場揺動信号

(3) 強いガイド磁場の存在下でのプラズマ衝突現象を、少数イオンスペクトル分光を用いて計測したところ、X点近傍においてイオンの非熱的な成分が現れている可能性を見出した。これはリコネクションによるアウトフローを捉えている可能性がある。

(4) 強いガイド磁場の存在下において、プラズマの衝突速度を増加させると、図3に示すようにプラズマ間に形成されるシート状電流が下流側に放出される現象が観測された。ガイド磁場が電流シートの非圧縮性をもたらした結果、排出しきれない粒子や磁束が

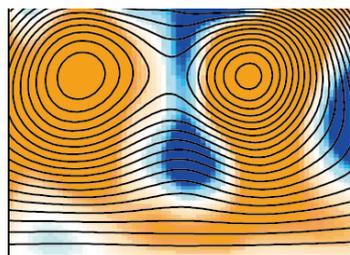


図3 電流シート放出の様子 (黒線：磁気面、カラーマップ：電流密度)

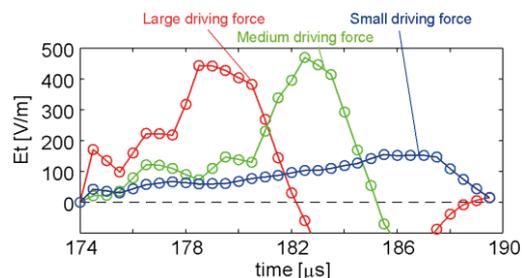


図4 電流シート放出時の電場波形

上流側に蓄積・圧縮され、最終的には電流シートの大域的な不安定性を引き起こしたものと考えられる。シート放出に伴い、発生する電場が増加する様子が観測された。図4にプラズマ衝突時に発生する電場の時間変化を示す。プラズマを押し出す力が小さいケース(青)に比べて、大きいケース(緑、赤)ではおよそ3倍強の電場が発生していることがわかる。これは、電流シートが放出されたことにより、過渡的な高速リコネクションが発生したことを示唆していると考えられ、粒子混合を促進しうるメカニズムと考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- (1) K. Yambe, M. Inomoto, S. Okada, "Equilibrium of Field-Reversed Configuration Plasma Sustained by Rotating Magnetic Field", Journal of Plasma and Fusion Research Series, 査読有, 8巻, 2009, 971-974
- (2) M. Inomoto, K Yambe, K Kitano, S. Okada, "Azimuthally non-uniform equilibrium of field-reversed configuration sustained by rotating magnetic field with spatial high-harmonic components", Nuclear Fusion, 査読有, 49巻, 2009, 055010

[学会発表] (計9件)

- (1) 井通暁, 桑波田晃弘, 田辺博士, 林由記, 小野靖, 「電流シート放出による高速磁気リコネクション」、日本物理学会第65回年会, 3月20日～23日, 2010年, 岡山大学(岡山)
- (2) 桑波田晃弘, 井通暁, 田辺博士, 伊藤慎悟, 小野靖, 「プラズマ合体装置における磁気リコネクションと低周波波動の励起」、日本物理学会第65回年会, 3月20日～23日, 2010年, 岡山大学(岡山)
- (3) 桑波田晃弘, 井通暁, 田辺博士, 伊藤慎

悟、小野靖、「プラズマ合体装置における磁気リコネクションと低周波波動の励起」、平成 22 年電気学会全国大会、3 月 17 日～19 日、2010 年、明治大学（東京）

- (4) 井通暁、桑波田晃弘、田辺博士、伊藤慎悟、小野靖、「TS-3 装置におけるコンパクトトーラスプラズマ合体と高ベータ化」、第 26 回プラズマ・核融合学会年会、12 月 1 日～4 日、2009 年、京都市国際交流会館（京都）
- (5) 桑波田晃弘、井通暁、田辺博士、伊藤慎悟、小野靖、「プラズマ合体装置における磁気リコネクションとアルヴェン波励起」、第 26 回プラズマ・核融合学会年会、12 月 1 日～4 日、2009 年、京都市国際交流会館（京都）
- (6) M. Inomoto, Y. Ono, TS group, “Fast magnetic reconnection with current sheet ejection in plasma merging experiment”, 2009 US-Japan workshop on magnetic reconnection, October 5-7, 2009, Fluno Center for Executive Education, WI, USA
- (7) M. Inomoto, Y. Ono, the TS group, “High-beta equilibrium produced by plasma merging in the presence of toroidal magnetic field”, Program and Abstracts of the US-Japan Workshop on Innovative confinement concepts based on self-organization and active control, September 8-10, 2009, Kusatsu, Gumma, Japan
- (8) 井通暁、小野靖、岡田成文、「高ベータプラズマにおけるアルヴェン波励起実験」、日本物理学会第 64 回年次大会、3 月 27 日～30 日、2009 年、立教大学（東京）
- (9) M. Inomoto, Y. Hayashi, Y. Ono, “Magnetic reconnection accompanied by current sheet / plasmoid ejection in TS-3 / 4 experiments”, Book of abstracts: US Japan mini-workshop on magnetic reconnection, March 2-4, 2009, Princeton Plasma Physics Laboratory, NJ, USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井 通暁 (INOMOTO MICHIAKI)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・  
准教授  
研究者番号：00324799

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし