

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月1日現在

機関番号：12601
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23654200
 研究課題名（和文）準定常トーラスプラズマを用いた弱電離磁気リコネクション室内実験装置の開発
 研究課題名（英文）Development of weakly-ionized magnetic reconnection laboratory experiments using quasi-steady torus plasmas
 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）：回転磁場を用いて準定常トーラスプラズマを維持するという手法によって、弱電離環境における磁気リコネクション現象を再現しうる実験装置の開発を行った。トーラスプラズマ維持中に、同軸コイルを用いて軸方向磁場を印加することによって磁気リコネクションを発生させることに成功した。軸方向磁場印加時にプラズマ端部付近で急峻な磁場勾配すなわちシート状電流層の形成を確認することができた。

研究成果の概要（英文）：We have developed a laboratory experimental facility using quasi-steady torus plasmas sustained by rotating magnetic field to simulate weakly-ionized magnetic reconnection. Magnetic reconnection condition was achieved by application of axial magnetic field generated from coaxial solenoid coil. Steep gradient of magnetic field, i.e. sheet current layer, was observed at the edge position of the torus plasma during axial field application.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：太陽地球システム・宇宙天気、磁気リコネクション

1. 研究開始当初の背景

100万度を超える高温の太陽コロナは、太陽大気中の磁気エネルギーの散逸によってその温度が維持されていると考えられており、最近では弱電離状態の下層大気である彩層における磁気リコネクションが寄与している可能性が指摘されている。磁気リコネクションに関しては、衛星観測、シミュレーション研究に加えて室内実験を用いてその妥当性を検証することによって物理的理解が深められてきたが、彩層のような弱電離・完全衝突プラズマにおける磁気リコネクションが直接的に観測された例はなく、これを実験室において再現することは太陽大気や原始惑星円盤、分子雲などの天体プラズマ物理

研究に大きな意義を持っていると考えられる。

2. 研究の目的

磁気リコネクション室内実験に関しては、これまでにパルス的なトーラスプラズマ合体手法により多くの成果が得られてきたが、本研究では準定常維持されたトーラスプラズマを用いる手法を新たに開発することによって、電離度の低いプラズマ中に準定常的に電流を駆動し、実験室内で自律的な弱電離リコネクション環境を再現することを目的としている。

3. 研究の方法

自律的な磁気リコネクション現象を実験室環境下で再現するためには、プラズマ中を流れる閉じた電流を形成し、その電流が作り出す磁場がつなぎ変わるような状況を実現することが必須となる。プラズマ中に閉じた電流ループを駆動する手段としては、トランスを用いた誘導方式が一般的であるが、低電離度を維持することが困難であることに加えて、放電形態が交流運転に限定されるため、準定常リコネクションの再現には適切でない。本研究では、円柱状のプラズマに回転磁場を印加することによって、モーターの原理でプラズマ中の電子のみを回転させ、閉じた電流の準定常維持を実現する。内径 80cm の金属製真空容器内部に、回転磁場生成用の 2 相 2 極アンテナを設置し、IGBT を用いた大電流インバータ回路によってこれらを独立に駆動した。インバータに使用している IGBT の定格は 1200V/600A となっており、これをチャンネル当たり複数個使用することによって大電流駆動を実現している。回転磁場の周波数は 100~120kHz 程度とし、放電には水素、重水素、ヘリウム、アルゴン等のガスを用いた。

4. 研究成果

(1) 図 1 (a) に、低圧の重水素ガスをあらかじめチャンバー内に封入した状態で回転磁場を印加し、プラズマ中を流れる周方向電流を準定常維持した場合の捕捉磁束の時間変化の様子を示す。封入ガス圧は 0.03~0.06Pa 程度であり、中性粒子密度は $1\sim 2\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と見積もられる。回転磁場アンテナ電流 I_{RMF} を 610A から 700A に増加することによって磁束 (プラズマ中に駆動される電流) が増加する傾向を示しているが、さらに回転磁場アンテナ電流を 780A まで増加させた場合には放電が不安定となり、初期の比較的磁束の大きな状態を維持できなくなっている。このよう

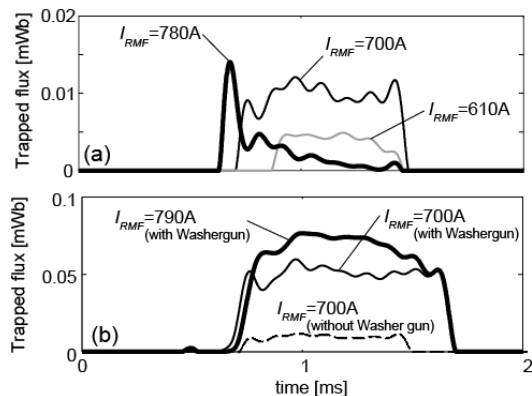


図 1 : 回転磁場による捕捉磁束波形

に、回転磁場アンテナ電流を増加した際に不安定となる原因としては、回転磁場を電流駆動だけでなくプラズマ生成のための高周波放電としても用いているためであると考えられる。放電が安定に持続するためには、回転磁場によって駆動されるプラズマ電流と、同じく回転磁場によって生成されるプラズマの圧力がバランスすることが必要となる。回転磁場アンテナ電流を増加させると、プラズマ中に駆動される電流はほぼ比例して増加する傾向があるのに対して、プラズマ密度はさほど増加しないため、圧力平衡が崩れてプラズマが収縮してしまうものと考えられる。このようなガス封入条件下での放電では、典型的な電子密度は $7\times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 程度となり、プラズマの電離度は数%程度と非常に小さくなる。プラズマ中の電子と中性粒子との衝突周波数 ($\sim 10\text{kHz}$) は電子-イオン間の衝突周波数と同程度の大きさとなることから弱電離条件が達成できているものと考えられる。

(2) 電流駆動効率を向上させるために、ワッシャーガンによる予備電離装置を中心面上に設置した。ワッシャーガンによって生成される高密度・高電離度プラズマに対して回転磁場を印加することによって、駆動されるプラズマ電流の増加が期待できる。図 1 (b) にワッシャーガンを用いた際の捕捉磁束の時間変化を示す。ワッシャーガンを用いない場合と比較して 5 倍程度大きな磁束が得られており、また回転磁場アンテナ電流を増加させても放電が不安定になる現象は観測されなかった。図 2 に回転磁場アンテナ電流と駆動されたプラズマ電流の関係を示す。ワッシャーガンを使用しない場合には、駆動できるプラズマ電流は 500A 程度が最大であったのに対して、ワッシャーガンを使用すること

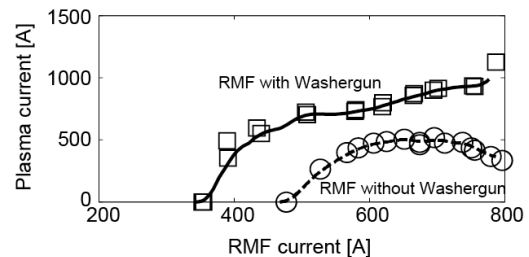


図 2 : アンテナ電流に対する駆動されたプラズマ電流の依存性

によって 1000A を超えるプラズマ電流が得られており、回転磁場アンテナ電流の増加に伴って増加し続ける傾向が確認された。ワッシャーガンを用いる場合には、用いない場合に比べて中性粒子密度を 1/20 程度まで下げることができるため、本方式を用いることによって電子-中性粒子間の衝突周波数を変化させながら弱電離リコネクション現象を検証することが可能であると考えられる。

(3) 準定常維持されたトーラスプラズマに対して同軸状に設置した中心ソレノイドコイルに電流を印加することにより、リコネクション環境を実現した。長さ 1.5m、直径 7cm のソレノイドコイルを製作し、装置中央部に設置した。巻き数は 65.5 ターン×2 系統となっている。インダクタンスは系統あたり 10 μ H 程度であり、10kV 充電、容量 4.4mF のコンデンサ電源によって駆動した。図 3 (a) にソレノイドコイルによる周回電圧の時間変化を示す。ただし、周回電圧の値はコイル端部で測定したものであり、中央部での値は端部の値の約 8 倍に相当することから、最大で 30V 以上の周回電圧を印加できているものと考えられる。図 3 (b) にソレノイドコイル電流の、図 3 (c) にプラズマ電流の時間変化を示す。周回電圧を印加しない場合に比べて、プラズマ電流が一時的に増加している様子が確認されたが、 $V_c = 2.5$ kV の場合には周回電圧が印加されている最中にプラズマ電流が減少に転じている。図 4 に、中心ソレノイドコイルの直上 ($r = 4$ cm) にて測定した軸方向磁場の軸方向分布を示す。形成直後 ($t = 1.5$ ms) のトーラスプラズマでは軸方向磁場は滑らかな分布をしており、 $z = \pm 400$ mm 付近の位置にヌル点 (X 点) が形成されている。その後、ソレノイドコイル電流を印加することにより、ヌル点付近の磁場勾配が増大し、最終的には放電初期に形成されている磁場強度差 (外部バイアス磁場と内部反転磁場の差) を上回る大きな空間勾配が形成されている ($t = 2.5$ ms)。これは、X 点の両側の磁場が増強されたことを意味しており、磁気リコネクションの駆動が実現されていると考えることができる。ただし、対抗する磁場の向きが $r-z$ 平面内で時間とともに変化することから、リコネクション現象そのものを観測するためには二次元磁場分布測定が必要になる。プラズマからの可視発光計測を行ったところ、間

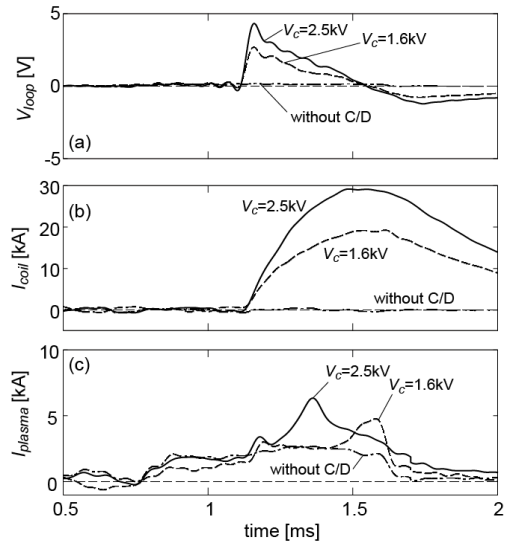


図 3 : 中心ソレノイドに電圧を印加した場合の集束電圧、コイル電流およびプラズマ電流波形

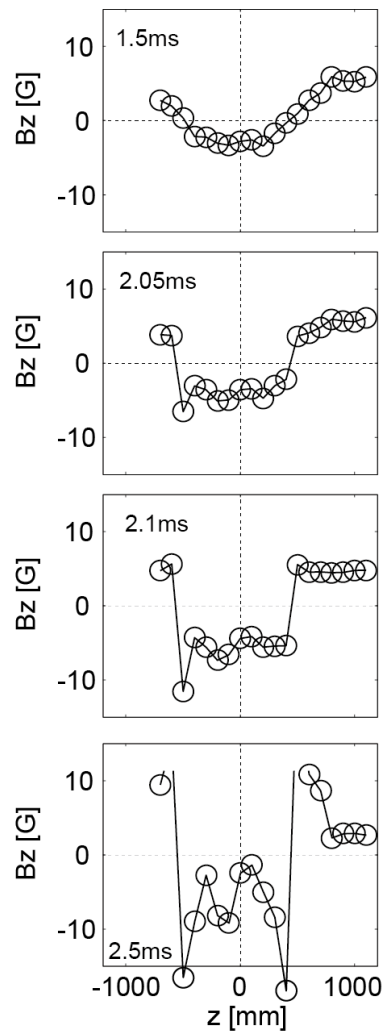


図 4 : 軸方向磁場の軸方向分布の時間発展

欠的な発光強度の増大が観測されており、リコネクション等に由来するダイナミクスが発生していることを示唆される。

以上、本研究で構築した回転磁場型実験装置は、リコネクションを含むプラズマ現象を弱電離環境下で再現可能なものであり、本装置を運用することによってプラズマ基礎物理の新たな室内実験の可能性を切り拓くことができると考えられる。

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)

[学会発表] (計2件)

- (1) M. Inomoto, Y. Hayashi, H. Tanabe, T. Ii, A. Kuwahata, T. Ito, K. Kadowaki, Y. Kaminou, T. Yamada, Y. Ono, "Initiation of impulsively fast magnetic reconnection induced by current sheet ejection", 22nd International Toki Conference "Cross-Validation of Experiments and Modeling for Fusion and Astrophysical Plasmas", 2012/11/19, セラトピア土岐 (岐阜県)
- (2) M. Inomoto, Y. Hayashi, Y. Ono, "Fast magnetic reconnection with plasmoid / current sheet ejection events in laboratory experiment", 39th COSPAR Scientific Assembly, 2012/7/18, Mysore, India.

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

小野 靖 (ONO YASUSHI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号：30214191

山田 琢磨 (YAMADA TAKUMA)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
研究者番号：90437773

岡田 成文 (OKADA SHIGEFUMI)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：40135661

北野 勝久 (KITANO KATSUHISA)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号：20379118

浅井 朋彦 (ASAI TOMOHIKO)
日本大学・理工学部・講師
研究者番号：00386004

清水 敏文 (SHIMIZU TOSHIFUMI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授
研究者番号：60311180

今田 晋亮 (IMADA SHINSUKE)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
研究者番号：40547965

西塚 直人 (NISHIZUKA NAOTO)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・プロジェクト研究員
研究者番号：10578933