

令和元年6月4日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14425

研究課題名(和文) 速度空間を通してみる遷移プラズマの流れ構造形成

研究課題名(英文) Study on flow structure formation of intermediate plasma using a kinetic approach

研究代表者

寺坂 健一郎 (Terasaka, Kenichiro)

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：50597127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はイオンが非磁化状態となる遷移プラズマ領域の流れ形成の物理素過程を最先端の光科学技術を用いて速度空間の階層から詳細に調べたものである。九州大学のHYPER-II装置に大容量の遷移プラズマを生成することに成功し、高精度レーザー誘起蛍光システムを用いてイオンや中性粒子の流れを調べた。イオン非磁化領域における電場形成とイオン加速の性質が磁化領域とは異なるスケールリングを持つことや中性粒子輸送の重要性に関する新しい知見を得ることが出来、Experimental Kineticsの有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果を国内外の学会で発表し、遷移プラズマ領域の流れ形成の重要性を積極的に発信した。特に速度空間から流れ形成を調べる新しい手法と不均一磁場領域のプラズマ流れ形成に対する中性粒子輸送の重要性に関する新しい知見については2件の学術誌に研究成果が掲載されており、当該研究分野の発展に貢献した。得られた研究成果の重要性については非専門家にもわかりやすいように、ウェブサイトを通じて情報を発信した。また、研究や学会発表を通じて大学院教育に積極的に関わり、学術的な発展だけでなく人材育成にも貢献した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the characteristics of flow structure formation in the intermediate plasma region where ions are unmagnetized was investigated using high-accuracy laser induced fluorescence (LIF) spectroscopy. A large volume of intermediate plasma in the HYPER-II device at Kyushu University by a newly developed vacuum chamber was successfully generated in the HYPER-II device at Kyushu University, and the flow of ions and neutral particles was measured using a movable LIF collecting optics. We have obtained some new findings on the importance, such as the transport of neutral particles and the characteristics of electric field formation and ion acceleration in the intermediate plasma region which are clearly different from the characteristics on flow field structure formation in the magnetized region. These results show the effectiveness of "Experimental Kinetics".

研究分野：プラズマ科学

キーワード：プラズマ 速度分布関数 プラズマディタッチメント 中性粒子流れ 高精度レーザー分光計測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

不均一磁場中のプラズマは、電子・イオンがともに磁化された状態から、電子は磁化されているが、イオンは非磁化状態となる中間相を形成する。遷移プラズマと呼ばれるこの中間状態のプラズマは流れの発生起点であり、磁場中のプラズマの構造形成を統一的に理解する意味で重要な研究対象であるが、従来の研究は磁化プラズマに集中しており、詳しいことは明らかにされていない。申請者は、核融合研の HYPER-I 装置を用いた先行研究において、発散磁場領域でイオン流線が磁力線から乖離（デタッチメント）することや乖離の発生に伴うイオンの直進性と回転の駆動の発現など、遷移プラズマ特有の性質が存在することを示し、この領域のプラズマの性質を理解することの重要性を主張してきた。本申請課題は遷移プラズマ中で生じる特有の流れ形成の物理過程を明らかにするものである。

2. 研究の目的

本研究は、イオンが非磁化状態にあるプラズマの中間相（遷移プラズマ）における流れの発生機構を解明するものである。遷移プラズマは天体環境やプラズマ推進器中の磁気ノズルにも発生する普遍的なプラズマの中間相であり、プラズマ流発生の原因であるが、その振る舞いは十分に理解されていない。そこで、遷移プラズマ発生装置 HYPER-II（九州大学）中に大容量の遷移プラズマを生成し、最新の光科学を用いて速度空間から流れの起源を探ることで、遷移プラズマの未解決課題を解明する。本研究で開発する高精度レーザー誘起蛍光分光システムは速度空間から物理を調べる実験的運動論（Experimental Kinetics）を可能にし、新しいプラズマ実験研究領域を開拓するものである。

3. 研究の方法

九州大学の HYPER-II 装置中に大容量遷移プラズマを生成し、イオンの高精度速度分布関数計測が可能な高精度レーザー誘起蛍光ドップラー分光（LIF）システムを構築することで、不均一磁場中のイオン流れを調べる。Lamb-dip を用いた高精度絶対イオン流速計測システムの構築、高精度化のための 2 周波数ロックイン検出法の検討、Lamb-dip を LIF スペクトルに生成し Zeeman 分裂幅から磁場を決定するシステムの構築など、光科学を用いたオールインワンの計測システムの実装可能性を目指す。また、イオン計測に加え中性粒子の LIF 計測を併せて行うことで、遷移プラズマ領域のイオン加速などの流れ形成に対する中性粒子の効果を調べる。本研究は九州大学大学院・修士課程の学生と協力して行い、研究の効率化を図るだけでなくシステム開発や遷移プラズマの流れ構造形成に関するテーマを通して大学院教育に貢献する。

4. 研究成果

(1) HYPER-II 装置の遷移プラズマ領域における大域的な LIF 計測を可能にするために、計測ポートを備えた水冷式真空チャンバー（図 1 左）と可動式 LIF 受光計（図 1 右）を開発した。特に、受光計に関しては真空導入型を採用することで、高い立体角の確保と径-軸断面での大域計測の条件を満足すよう工夫した。これによって遷移プラズマ領域の大部分を直接計測できるようになり、流速分布など不均一磁場領域の流れ構造を詳細に調べることが可能になった。

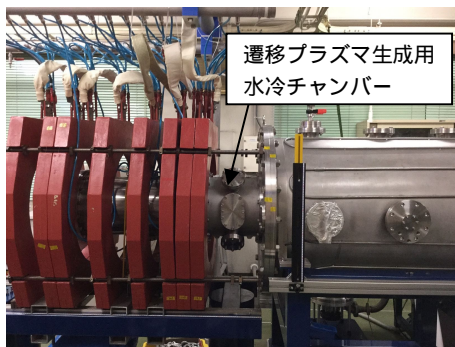


図 1: (左) HYPER-II に設置した遷移プラズマ生成用水冷チャンバー。(右) 真空導入型可動式 LIF 受光計。

(2) LIF システムを用いて遷移プラズマ領域におけるイオンと中性粒子の流沿磁力線流れ計測を実施した。HYPER-II に導入するプローブビームを利用した Lamb-dip LIF 計測を試みたが、自発光（プラズマ）の揺らぎに起因するノイズ成分の影響を強く受け、従来の目標精度を達成することが困難であった。そこで、HYPER-II とは別に参照プラズマおよびヨウ素セルを用意し飽和吸収スペクトルを計測した。特に精度が要求される中性粒子計測の場合には、図 2 に示すように、吸収スペクトル上に Lamb-dip を生成することで目的の精度を達成することが出来た。

(速度に関するシステムの計測精度は中性粒子で $\pm 3\text{m/s}$ 、イオンで数 10m/s である)。HYPER-IIにおけるプラズマ生成に用いる導入ガス圧力や入力マイクロ波パワーを変え、LIF計測の適用範囲を調べたところ $0.1 - 10\text{ Pa}$ 、 $0.5 - 8\text{ kW}$ の幅広いパラメータ領域で計測が可能であることが確認できた。これによって中性粒子との衝突が無視できる無衝突領域から、衝突が頻繁な領域まで実験的に衝突頻度を制御して流れ形成を調べる特徴的な実験が可能となった。

(3) 無衝突領域の遷移プラズマ領域の沿磁力線イオン流れを調べた結果、イオンは両極性の静電場によって力を受けてより弱磁場側に輸送されることが明となった。この時、形成される電場の大きさは磁化領域で観測されるスケージングよりも小さく、遷移プラズマ領域では電場によるイオン加速が磁化領域よりも弱い傾向が得られた。このような磁化領域と遷移プラズマ領域における電場形成に関する特徴の相違は、イオンが非磁化状態になることによって両極性電場の形成機構が質的に変化したものであると考えられる。このような遷移プラズマ領域の電場形成と流れ形成に関する物理機構の解明には課題が残るものの、本課題で開発したLIF計測システムを用いることができた。一方、ガス圧力を変えてイオン-中性粒子の衝突頻度を実験的に変えながら、イオンと中性粒子の沿磁力線方向流れを計測した結果、無衝突領域ではイオンと中性粒子の1次元的な質量保存則が成り立ち、衝突が存在する領域では中性粒子流れの不均一性が生じることが明らかになった。特に、条件によっては中性粒子の軸方向流れが0となる淀み点がプラズマ中心領域に形成され、プラズマと中性粒子がマルチ流体としての振る舞いを示すことで流れ場が形成されることを示唆する結果を得ることが出来た(図3)。従来の研究では、中性粒子流れを含めた遷移プラズマ領域の流れ形成を詳細に調べた例は少なく、中性粒子を含めた流れ形成や輸送を議論することが重要であることを示したことは、今後のプラズマ科学の発展に重要な意味を持つと考えられる。

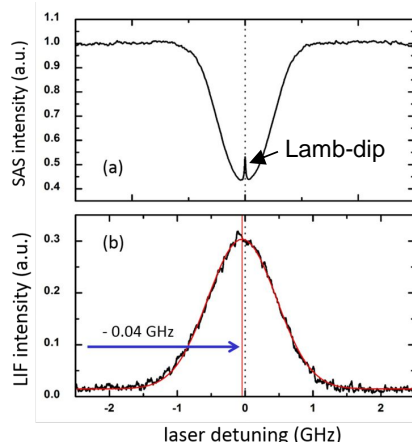


図2: (a)参照プラズマで計測した飽和吸収スペクトルと(b)典型的な準安定アルゴン原子のLIFスペクトル。

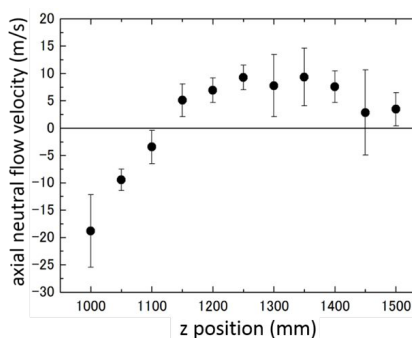


図3: HYPER-IIで観測された不均一な軸方向(沿磁力線方向)の中性粒子流れ構造。

(4) 本研究で得られた成果については学会発表や学術誌への投稿を通して、積極的な情報発信を行った。特に高精度LIF計測を用いた速度空間の計測や中性粒子流れ計測については4件の招待講演(2017年: 18th Laser Aided Plasma Diagnostics, Plasma Conference、2018年: 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics、プラズマ・核融合学会年会)を行っており、国内外で研究成果の重要性が認められている。また、本研究で行った計測システムの開発や遷移プラズマ領域の高精度流れ計測は、九州大学の修士3名(2017年度修了2名、2018年度修了1名)と協力して行い、大学院教育に貢献した。特に、中性粒子流れの不均一性と輸送に関する発表に関してはプラズマ・科学のフロンティア研究会 2018ポスター発表賞(安部瑛美夏)、2018年プラズマ核融合学会年会・若手学会発表賞(安部瑛美夏)を受賞しており、高い評価を受けている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

寺坂健一郎、吉村信次、田中雅慶、Observation of high-temperature bubbles in an ECR plasma, Physics of Plasmas、査読有、25巻、2018、052113-1-7
DOI: 10.1063/1.5027588

安部瑛美夏、寺坂健一郎、吉村信次、荒巻光利、田中雅慶、Observation of Axial Neutral-Gas Flow Reversal in an ECR Plasma, Plasma and Fusion Research: Rapid Communications、査読有、14巻、2019、1201066-1-3
DOI: 10.1585/pfr.14.1201066

〔学会発表〕(計 19 件)

安部瑛美夏、寺坂健一郎、松尾大地、川瀬亮太、田中雅慶、HYPER-II におけるプラズマ-中性粒子の相補的振る舞いと流れ形成、プラズマ科学のフロンティア 2017 研究会、2017

安部 瑛美夏、寺坂 健一郎、松尾 大地、川瀬 亮太、林 信哉、Flow Structure of Neutral Particles in an Inhomogeneous ECR Plasma、The 11th International Symposium on Applied Plasma Science (ISAPS' 17)、2017

寺坂健一郎、Asymmetry of velocity distribution function associated with neutral depletion structure、18th Laser Aided Plasma Diagnostics、2017

寺坂健一郎、不均一プラズマ中の速度分布関数計測と流れ形成機構、Plasma Conference 2017、2017

安部 瑛美夏、寺坂 健一郎、松尾 大地、川瀬 亮太、林 信哉、プラズマ-中性粒子の相補的流れ形成、Plasma Conference 2017、2017

松尾大地、寺坂健一郎、安部瑛美夏、田中雅慶、遷移プラズマ実験装置 HYPER-II 中のイオンの絶対流速の計測、Plasma Conference 2017、2017

川瀬亮太、松尾大地、安部瑛美夏、寺坂健一郎、田中雅慶、非一様磁場中のイオン流れ、Plasma Conference 2017、2017

寺坂健一郎、吉村信次、荒巻光利、田中雅慶、Asymmetry Velocity Distribution Function and Its Higher Order Moments in an Inhomogeneous ECR Plasma、59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics、2017

安部 瑛美夏、寺坂 健一郎、松尾 大地、川瀬 亮太、林 信哉、Flow Structure of Neutral Particles in the HYPER-II device、The 19th Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology、2017

安部瑛美夏、寺坂健一郎、吉村信次、荒巻光利、田中雅慶、プラズマと中性粒子のからみあう HYPER-II、プラズマ科学のフロンティア 2018 研究会、2018

寺坂健一郎、安部瑛美夏、吉村信次、荒巻光利、田中雅慶、HYPER-II におけるプラズマ-中性粒子相互作用と構造形成、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018

安部瑛美夏、寺坂健一郎、吉村信次、荒巻光利、田中雅慶、HYPER-II におけるプラズマ輸送に対する中性粒子流れ効果、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018

寺坂健一郎、安部瑛美夏、吉村信次、荒巻光利、Neutral flow field structure of partially ionized plasma in the HYPER-I and HYPER-II devices、60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics、2018

寺坂健一郎、Density and flow field structures of partially ionized plasma in laboratories、2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics、2018

寺坂健一郎、吉村信次、田中雅慶、プラズマ中に生成される高温バブルの観測、第 35 回 プラズマ・核融合学会 年会、2018

安部瑛美夏、寺坂健一郎、吉村信次、荒巻光利、田中雅慶、HYPER-II 装置におけるイオンと中性粒子の流れ構造形成、第 35 回 プラズマ・核融合学会 年会、2018

寺坂健一郎、安部瑛美夏、吉村信次、荒巻光利、HYPER-II における中性粒子軸方向流れの不均一構造、日本物理学会 第 73 回年次大会、2019

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:

発明者:

権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

[http:// plasma.kyushu-u.ac.jp/](http://plasma.kyushu-u.ac.jp/)

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。