

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540544

研究課題名(和文) ECRプラズマ中に発生する間欠的電子流束の統計的性質に関する実験研究

研究課題名(英文) Experimental study on statistical properties of intermittent electron flux in an ECR plasma

研究代表者

吉村 信次 (YOSHIMURA, Shinji)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：50311204

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマは様々な間欠的な振る舞いを示す。ここで“間欠的な振る舞い”とは時間的に不規則な間隔で繰り返される突発的な現象を指す。我々は実験室円柱プラズマの局所的な電子温度が間欠的に増加することを観測した。電氣的・光学的2次元計測と統計解析を駆使することで、この現象がプラズマ直径の1/10程度の広がりをもっていることおよび定常ポアソン過程である(一定確率でランダムに発生している)ことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Plasmas exhibit various intermittent behaviors, where the words “intermittent behaviors” indicate irregularly repeated abrupt changes of the plasma. We have observed an intermittent increase of local electron temperature in a laboratory cylindrical plasma. Electrical and optical 2D measurements and statistical analyses have revealed that the region of electron temperature increase has a finite size of about 1/10 of the plasma diameter and the phenomenon is characterized by a stationary Poisson process, which is a random process that the occurrence probability is constant over whole period of time.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：ECRプラズマ 間欠性 電子流束 浮遊電位揺動 統計解析 ポアソン過程 2次元分布計測

1. 研究開始当初の背景

近年、実験室プラズマ中の間欠的現象の統計解析が国内外において強い関心を集めている。核融合を目指した磁場閉じ込め実験装置におけるプラズマ乱流と乱流起因の間欠的粒子輸送 (“blob” と呼ばれるプラズマの塊の周辺プラズマからの吐き出し [1]) の普遍性が、このような研究の駆動力となっている。確率密度分布関数、イベント発生間隔 (waiting-time) 統計、条件付き平均化法等、様々な統計解析ツールによって間欠的な現象 (時系列) がもつ性質を特徴づける試みがなされている。

我々は、核融合科学研究所の HYPER-I 装置において、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) プラズマ中に自発的に発生する間欠的な高エネルギー電子流束を観測した。このような電子流束の発生について、これまで報告された例はなく、複雑系であるプラズマ中の間欠現象研究に新たな展開をもたらす可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、電子サイクロトロン共鳴プラズマ中に自発的に発生する高エネルギーの電子流束を対象としている。この現象は、当初 1 本のプローブの浮遊電位揺動として観測された (図 1)。一見ランダムな時間間隔で様々な振幅の揺動が発生していることがわかる。しかしながら、この計測では、電子流束の空間的な広がりやの情報を得ることができない。

我々は、電気的・光学的 2 次元計測と統計的手法を駆使することで、その時空間構造および統計的性質を明らかにすることを目的としている。

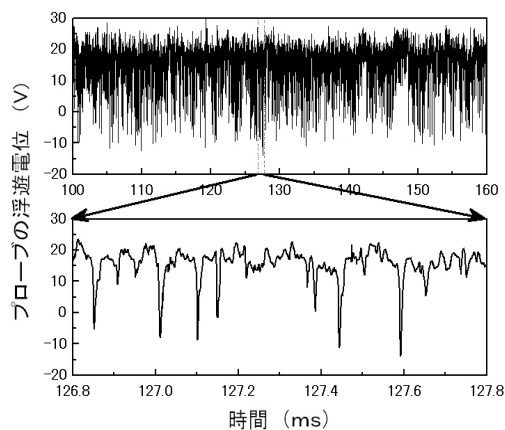


図 1 HYPER-I 装置で観測される間欠的な高エネルギー電子流束の発生

3. 研究の方法

浮遊電位変化の空間構造を計測するために、多電極格子状プローブ (High-Impedance Wire Grid: HIWG) を開発した (図 2)。縦 8 本、横 8 本の計 16 本の電気的に独立なタングステン電極を間隔 1cm の格子状に配置し、それぞれの浮遊電位変化の時系列を高速オ

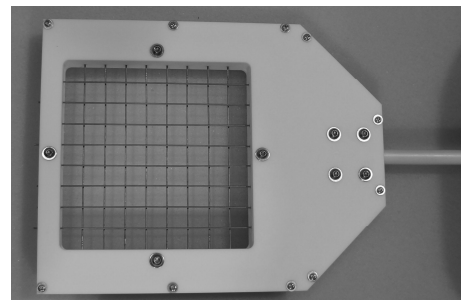


図 2 高インピーダンスワイヤーグリッド (HIWG) 検出器

ペアンプ回路によって計測する。得られた 16 本の時系列を組み合わせると幾何平均を計算することで、64 の格子点における浮遊電位を評価し、2 次元分布を再構成する。HIWG を用いることで、電子流束の空間サイズと発生位置、発生時間間隔が得られる。また、多くのイベントについて統計解析を行うことで、発生確率の評価を行う。(HIWG の詳細は 5. の論文を参照)

浮遊電位を変動させる電子流束の増加は、局所的な電子温度の増加によって引き起こされている可能性がある。電子温度依存性をもつプラズマからの発光を計測することで、間欠的な電子温度変化の有無を評価する。HYPER-I 装置の終端フランジを全面石英窓とすることで、装置の軸方向に線積分した発光分布が計測できる。局所的な電子温度が増加することで、電子流束発生領域の発光のみが増加することが予想される。間欠的に発生する現象をとらえるために、ラングミュアプローブの浮遊電位信号をトリガーとして ICCD カメラをゲート動作させる。条件付き平均化法を用いることで、鮮明な画像が得られる。

この現象が、電子とマイクロ波との相互作用のみで決まるのか、イオンや中性粒子といった重たい粒子が関与しているのかは、異なるガス種を用いた放電における現象の統計的性質を比較することで明らかにできる可能性がある。ヘリウム、ネオン、アルゴン、キセノンの 4 種を用いて実験を行うことで、発生時間間隔の統計、1 イベントの持続時間を比較する。

4. 研究成果

平成 24 年度は多電極格子状プローブを用いた 2 次元浮遊電位揺動計測を行った。直径 3cm のプラズマ断面において、直径 3cm 程度の円形領域内で浮遊電位の間欠的变化が生じていることが観測された (図 3)。様々な強度の浮遊電位変動が様々な位置に発生していることがわかった。発生位置は直前の発生位置に依らずランダムであった。10 万回以上のイベントについて統計解析を行った結果、発生間隔の確率密度関数 (PDF) が指数分布をしていることがわかった。これにより、この現象が一定生起確率の定常ポアソン過程で特徴づけられることが明らかとなった。ラ

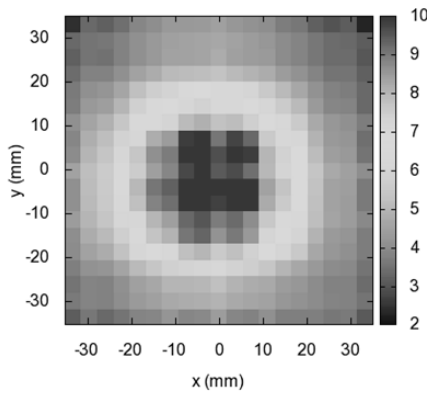


図3 再構成された浮遊電位揺動の2次元分布

ンダムな現象の背後にある数学的構造を見出すことができた。また、持続時間のPDFは長時間側で-5乗程度のべき分布を示していた。このべき分布の形成機構については、今後の課題となった。

平成25年度は、ICCDカメラを用いた2次元発光分光計測を行った。ラングミュアプローブの浮遊電位信号をトリガーとして用いることで、HIWGの場合と同様の円形領域において、間欠的に発光強度が増加していることがわかった。上準位の寿命が短いネオン中性粒子からの585.2nmの発光を様々な時間遅れで計測することで、現象の時間発展を観測することができた。また、励起エネルギーの閾値が高いヘリウムイオンからの468nmの発光を同様に計測した。現象が起こっていない場合は、このラインからの発光は検出限界以下であったが、条件付き平均化法を用いて間欠現象と同期した発光を撮影することで、円形領域での発光強度の増加が観測された。この結果は、電子流束の増加が局所的な電子温度増加によって引き起こされていることを示唆する。発光の増加と同時にプローブの電流電圧特性を取得して電子温度の評価を行った。間欠的電子流束発生時の実効的電子温度が発生前の3倍から4倍まで増加していることがわかった。条件付き平均化法によって、電子流束のエネルギーと励起原子からの発光強度に良い相関があることがわかった。

平成26年度は、これまで主として計測してきたヘリウムプラズマから、ネオン、アルゴン、キセノンといったガス種の異なるプラズマへと実験を拡大した。各プラズマの浮遊電位時系列の統計解析によって、全てのガス種に対して、この現象は定常ポアソン過程であることがわかった。一方、電子流束発生イベントの平均持続時間は放電ガスの質量数の平方根に比例することが明らかとなった。この事実は、ECRプラズマ中の高エネルギー電子発生現象にイオン・中性粒子といった重たい粒子が関与していることを示唆している。これらの特徴を記述できる数理モデルの構築は今後の課題として残ったが、本研究を通して、ECRプラズマ中の間欠的電子流束発生現象について、その時空間構造と統計的性

質を明らかにすることができた。

<引用文献>

J. R. Myra *et al.*, Phys. Plasmas **13**, 092509 (2006).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、Intermittent behavior of local electron temperature in a linear ECR plasma, Plasma and Fusion Research, 10巻、3401028、2015年、査読有、DOI: 10.1585/pfr.10.3401028

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、岡本敦、永岡賢一、田中雅慶、Exploration of spontaneous vortex formation and intermittent behavior in ECR plasmas: the HYPER-I experiments, Journal of Plasma Physics, 81巻、345810204、2015年、査読有、DOI: 10.1017/S0022377814001147

寺坂健一郎、吉村信次、加藤祥行、古田和也、荒巻光利、森崎友宏、田中雅慶、High-impedance wire grid method to study spatiotemporal behavior of hot electron clump generated in a plasma, Reviews of Scientific Instruments, 85巻、113503、2014年、査読有、DOI: 10.1063/1.4901096

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、Localized Intermittent Electron Flux in an ECR Plasma, IEEE Transactions on Plasma Science, 42巻、pp. 2554-2555、2014年、査読有、DOI: 10.1109/TPS.2014.2329699

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、Probability density functions of floating potential fluctuations due to local electron flux intermittency in a linear ECR plasma, JPS Conference Proceedings, 1巻、015030、2014年、査読有、DOI: 10.7566/JPSCP.1.015030

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、Intermittent Electron Bursts in a ECR Plasma, The Papers of Technical Meeting on Plasma Science and Technology, IEE Japan, PST-13-092, pp. 29-33、2013年、査読無

吉村信次、寺坂健一郎、加藤祥行、荒巻光利、田中雅慶、2D Measurement of field-aligned intermittent high-energy electron flux in an ECR plasma, Europhysics Conference Abstracts, 36F巻、P2.181、2012年、査読無

〔学会発表〕(計20件)

吉村信次、田中瑛貴、寺坂健一郎、荒巻光利、田中雅慶、ECRプラズマで観測さ

れる局所電子温度の間欠的变化、第 30 回九州・山口プラズマ研究会、2014 年 11 月 26 日、ラグナガーデンホテル（沖縄県・宜野湾市）

吉村信次、Intermittent behavior of local electron temperature in a linear ECR plasma、第 24 回国際土岐コンファレンス (ITC-24)、2014 年 11 月 5 日、セラトピア土岐（岐阜県・土岐市）

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、Intermittent Generation of Localized Higher Electron Temperature Regions in a Weakly-Ionized Electron Cyclotron Resonance Plasma、第 17 回プラズマ物理に関する国際会議 (ICPP2014)、2014 年 9 月 18 日、リスボン（ポルトガル）

吉村信次、田中瑛貴、寺坂健一郎、荒巻光利、田中雅慶、HYPER-I で観測される間欠的な電子エネルギー変化の ICCD 画像計測、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 30 日、東海大学（神奈川県・平塚市）

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、2D imaging of optical emissions associated with intermittent enhancement of local electron flux in an ECR plasma、第 23 回国際土岐コンファレンス、2013 年 11 月 20 日、セラトピア土岐（岐阜県・土岐市）

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、Spatial structures of intermittent local electron flux in a linear ECR plasma、第 55 回米国物理学会プラズマ物理分科会、2013 年 11 月 15 日、デンバー（米国）

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、HYPER-I で観測される間欠の高エネルギー電子放出の持続時間に関する考察、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 27 日、徳島大学（徳島県・徳島市）

田中瑛貴、寺坂健一郎、吉村信次、荒巻光利、田中雅慶、間欠の高エネルギー電子放出に伴うイオン・中性粒子の発光分布の変化、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 27 日、徳島大学（徳島県・徳島市）

寺坂健一郎、吉村信次、荒巻光利、田中瑛貴、田中雅慶、HYPER-I で観測される間欠の高エネルギー電子放出現象の発生位置の評価、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 27 日、徳島大学（徳島県・徳島市）

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、直線 ECR プラズマにおける間欠的電子バースト、電気学会プラズマ研究会 (PST-13-091)、2013 年 9 月 6 日、長崎大学（長崎県・長崎市）

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻

光利、田中雅慶、Probability density functions of floating potential fluctuations due to local electron flux intermittency in a linear ECR plasma、第 12 回アジア太平洋物理学会議 (APPC12)、2013 年 7 月 15 日、幕張メッセ（千葉県・千葉市）

吉村信次、寺坂健一郎、田中瑛貴、荒巻光利、田中雅慶、Observation of intermittent field-aligned current generation in a laboratory ECR Plasma、第 12 回実験室と宇宙におけるプラズマ実験の関係に関する国際会議 (IPELS2013)、2013 年 7 月 4 日、白馬東急ホテル（長野県・北安曇郡）

吉村信次、荒巻光利、田中瑛貴、寺坂健一郎、田中雅慶、CR プラズマ中の間欠的電子群放出現象への二次元画像計測の適用、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学（広島県・広島市）

吉村信次、寺坂健一郎、荒巻光利、田中雅慶、Emergence of Intermittency in Local Electron Flux in a Laboratory Electron Cyclotron Resonance Plasma、International Scientific Spring 2013 (ISS2013)、2013 年 3 月 14 日、イスラマバード（パキスタン）

吉村信次、寺坂健一郎、荒巻光利、田中雅慶、ECR プラズマ中の間欠的電子流束の統計的性質に対するイオン種の効果、第 29 回プラズマ・核融合学会年会、2012 年 11 月 28 日、クローバープラザ（福岡県・春日市）

寺坂健一郎、吉村信次、荒巻光利、田中瑛貴、田中雅慶、コンディショナルアベレージングを用いた ECR プラズマ中の間欠的電子流束の評価、第 29 回プラズマ・核融合学会年会、2012 年 11 月 28 日、クローバープラザ（福岡県・春日市）

吉村信次、寺坂健一郎、荒巻光利、田中雅慶、Statistics of field-aligned intermittent electron flux in a linear ECR plasma、第 54 回米国物理学会プラズマ物理分科会、2012 年 11 月 2 日、プロビデンス（米国）

吉村信次、寺坂健一郎、荒巻光利、田中雅慶、ECR プラズマ中の間欠的電子群放出現象、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 21 日、横浜国立大学（神奈川県・横浜市）

寺坂健一郎、吉村信次、荒巻光利、田中雅慶、間欠的電子群放出現象へのワイヤーグリッドプローブ法の適用、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 21 日、横浜国立大学（神奈川県・横浜市）

吉村信次、寺坂健一郎、加藤祥行、荒巻光利、田中雅慶、2D Measurement of field-aligned intermittent high-energy electron flux in an ECR plasma、第 39 回欧州物理学会および第 16 回プラズマ物理に関する国際会議合同会議 (39th EPS & 16th ICPP)、2012 年 7 月 3 日、ストックホルム（スウェーデン）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 信次 (YOSHIMURA, Shinji)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号： 5 0 3 1 1 2 0 4

(2) 研究分担者

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： 5 0 5 9 7 1 2 7