

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420888

研究課題名(和文)境界領域模擬プラズマにおけるイオン温度の精密測定

研究課題名(英文)Precise Measurement of Ion Temperature in Boundary Simulated Plasmas

研究代表者

江角 直道 (Ezumi, Naomichi)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：20321432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉実現に向けた重要課題のひとつである境界領域プラズマ中の熱・粒子輸送制御に関わるイオン温度の精密測定を行った。境界領域プラズマを模擬可能な直線型定常プラズマ装置および大型タンDEMミラー型プラズマ装置GAMMA10/PDXにおけるプローブを用いたイオン温度計測を行い、イオン温度の磁場異方性とその計測への影響を明らかにした。今後、本研究で整備したレーザー誘起蛍光計測システムをGAMMA10/PDX装置に適用し、プローブ法と併用しながら境界領域プラズマ中のイオン温度やその空間分布を詳細に計測し、高イオン温度プラズマによる非接触プラズマ形成過程の解明やその制御手法に関する研究等に展開する。

研究成果の概要(英文)：Boundary plasma has an important role for controlling heat and/or particle load to the plasma facing components of magnetic fusion devices. In this study, precious ion temperature measurements which contribute to understand the boundary plasma property have been done by using probe techniques in a linear steady plasma device and the large tandem mirror plasma device GAMMA 10/PDX. The investigation has revealed the influence of anisotropy of ion temperature in magnetized plasma on the measurement. The new diagnostics system for laser induced fluorescence measurement which is constructed in this study will be adopted to the divertor simulation experiment in GAMMA 10/PDX. Investigation of detached plasma formation for high ion temperature plasma and exploring its control technique have been planned.

研究分野：プラズマ工学、核融合学、プラズマ計測

キーワード：プラズマ 核融合 境界領域プラズマ ダイバータ イオン温度 プローブ計測 レーザー誘起蛍光法  
異方性

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在建設が進められている国際熱核融合実験炉(ITER)では、ダイバータ板への熱・粒子束負荷を低減するために、プラズマと中性ガスとの相互作用によりプラズマ熱流を周囲へ散逸させる非接触プラズマを利用したダイバータ運転モードが採用されている。また近年、非拡散的なプラズマ輸送過程や摂動磁場に伴う粒子閉じ込めの変化が観測される等、周辺・ダイバータを包括した「境界領域プラズマ」においては、多様な振る舞いをするプラズマの理解と、その熱・粒子制御が必須である。図1は境界領域プラズマにおけるエネルギー損失経路を模式的に示しているが、イオン挙動の理解、特にその温度の把握は、境界領域プラズマのエネルギーバランスの理解につながり、第一壁やダイバータ板等のプラズマ対向機器への熱・粒子負荷の観点だけではなく、その安定性やコアプラズマ閉じ込め改善の観点からも重要な課題と位置づけられている。

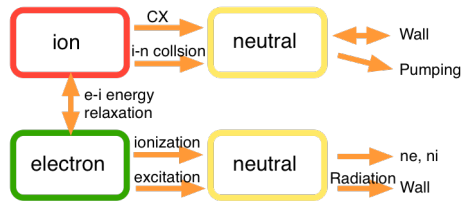


図1: 境界領域プラズマにおけるエネルギー損失経路の概略図

(2) 境界領域プラズマのイオン温度に関する情報は、発光スペクトル線のドップラー広がりやそのドップラーシフトから高い精度で得られるものの、計測ポートの制約や積分視野が問題となる場合が多い。一方、局所計測に適するプローブ法は、空間分布計測に優れていることから、境界領域プラズマの計測法として、有効な手段のひとつである。近年では、従来からのシングルプローブ、ダブルプローブ等による電子温度、電子密度の空間分布計測に加えて、磁力線に沿ったイオン流を観測するトンネルプローブやプラズマ電位計測に用いられるボールペンプローブ等、境界領域プラズマにおいて多様なプローブ計測が展開されている。

(3) これまで本研究代表者による直線型境界領域模擬プラズマ発生装置におけるイオンセンシティブプローブ(ISP)計測では、円柱状磁化プラズマ周辺部でイオン温度の上昇が観測され、イオンのラーマ運動を考慮した解析モデルとも定性的により一致を示す結果を得ている[1]。このことは、プラズマ対向壁への熱負荷を評価する上での、プラズマ周辺部でのイオンの振る舞いの重要性を示唆しており、より精密なイオン温度分布の測定により、高エネルギーイオンの影響を正確に予測すること

が可能になると期待できる。しかし、ISP計測では図2に示すようにプローブ電極に流入するイオンの軌道が電極近傍の電位分布と磁場の影響により、極めて複雑であることから、これまでISP計測で得られるイオン温度に対する磁場による温度異方性の影響は明確になっておらず、詳細なイオン輸送過程を議論する上で支障をきたしてきた。

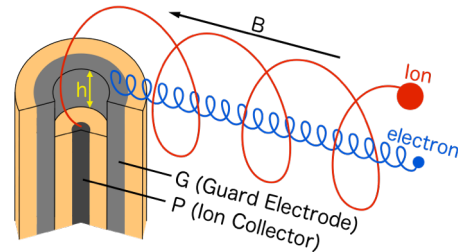


図2: イオンセンシティブプローブ概念図

温度異方性を明らかにする方法としては、「レーザー誘起蛍光(LIF)法」が有効である。LIF法は励起レーザーの入射方向と蛍光観測位置によって、イオン速度分布の異方性を明確に区別することが可能である。このことから、磁力線構造の単純な定常直線磁場中のプラズマにおいて、ISP計測とLIF計測を詳細に比較することによって、ISP計測により得られるイオン温度に対する温度異方性の影響を正確に把握でき、ISPを用いたイオン温度の精密測定が可能になると期待できる。ミラー閉じ込めプラズマ装置の開放端磁場配位において、ロスコーンを通過してくるプラズマは磁力線に平行、垂直方向の温度差が大きいことが知られており、磁力線に沿った温度分布を高い精度で予測可能であり、プローブで計測される温度異方性の評価が可能である。

2. 研究の目的

境界領域プラズマにおける熱・粒子輸送の理解と制御には、イオンの挙動を正確に把握することが重要である。本研究では、境界領域模擬プラズマ発生装置を用いて、イオン温度を測定可能なプローブであるイオンセンシティブプローブ(ISP)により得られるイオン温度に対する温度異方性の影響を明らかにし、ISPを用いたイオン温度の精密測定を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

当初は、長野高専に既設の直線型プラズマ発生装置において、レーザー誘起蛍光(LIF)計測システムを整備の上、イオンセンシティブプローブ(ISP)との同時計測を行い、ISPによるイオン温度の磁場に対する異方性の影響を調査すべく準備を進めていたが、平成27年度から本研究代表者の所属変更に伴い、筑波大学のタンデムミラー型核融合プラズマ装置 GAMMA10/PDX を本研究の推進に活用する

ことが可能となった。本装置ではミラープラズマの開放端磁場配位を活用した境界領域模擬プラズマを生成可能であり、磁力線に平行および垂直方向のイオン温度が大きく異なることを利用して、イオン温度計測の精密化(特に異方性)に関わる研究をより効果的に進展させることができる。また、本研究課題で整備してきた LIF システムの GAMMA10 への適用も進める。同システムはプラズマ軸方向に垂直に配置した観測ポート(テスト部中央、エンドプレート前面に設置)に光学系とともに光電子増倍管を設置し、LIF 計測による沿磁力線方向のイオン速度分布関数の計測を行うものである。LIF シグナルのドップラー広がりからイオン温度(平均エネルギー)、ドップラーシフトからイオンの平均速度(プラズマ流速)を評価するとともに、レーザー入射方向を径方向からも入射させ、磁力線に垂直方向のイオン速度分布関数の観測を行う。同時に、既設の径方向プローブ掃引システムを用いた複合型プローブの ISP によるイオン温度、MP によるプラズマ流速の計測を行い、LIF 計測との比較により、ISP 計測によるイオン温度における異方性の影響を詳細に解析し、温度の校正を行うことを計画している。

高いイオン温度を有するタンデムミラー型プラズマ装置 GAMMA10/PDX の開放端磁場領域に設置されたダイバータ模擬実験モジュール(D-module)内のプローブの解析結果について述べる。図3に本研究に用いた D-module 内のプローブ配置と磁場構造を示す。左端オリフィスから入射したプラズマは、V 字型ターゲット板で終端する。

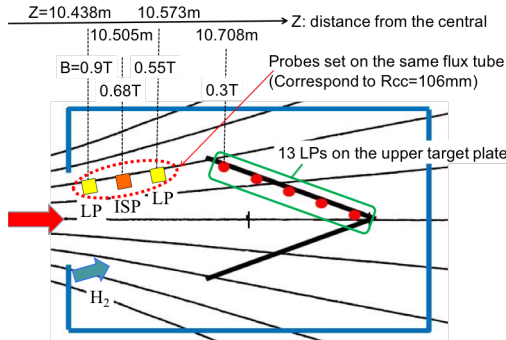


図3: GAMMA10/PDX 開放端磁場領域に設置された D-module 内のプローブ配置

今回の解析にはプラズマ流入部に近い、同じ磁束管上に配置された点線で囲まれた3つのプローブ(ラングミュアプローブ(LP)x2, イオンセンシティブプローブ(ISP)x1)を用いた。一般に、LP ではその電流-電圧特性から電子温度( $T_e$ )を評価するが、 $T_i \gg T_e$  の場合には、イオン飽和電流  $I_{is}$  は(1)式のように表せる。電子密度を電子飽和電流  $I_{e0}$  から見積もるとすると、(1)式は(2)式のように表すことができ、イオン飽和電流から  $T_i$  を見積もることができる。ここで、 $\gamma$ : 比熱比、 $m_i$ ,  $m_e$ : イオン、電子質量、 $S_i$ ,  $S_e$ : イオン、電子対

する実効的プローブ表面積である。

$$I_{is} = 0.6en_e \sqrt{\frac{k(T_e + \gamma T_i)}{m_i}} S_i \quad (1)$$

$$T_i = \frac{1}{\gamma} \left\{ \frac{1}{2\pi \cdot 0.6^2} \frac{m_i}{m_e} \left( \frac{I_{is}}{I_{e0}} \right)^2 \left( \frac{S_e}{S_i} \right)^2 - 1 \right\} T_e \quad (2)$$

#### 4. 研究成果

(1)高いイオン温度を有する筑波大学のタンデムミラー型プラズマ装置 GAMMA10/PDX の開放端磁場領域に設置されたダイバータ模擬実験モジュール(D-module)において、プローブを用いたイオン温度計測を行い、粒子輸送に大きな影響を与える磁場に対するイオン温度異方性の評価を行った。D-module 内に磁場中のイオン温度測定に用いられるイオンセンシティブプローブ(ISP)を設置するとともに、GAMMA10 プラズマのイオン温度が高いことを利用して、その上流側、下流側で ISP と同じ磁力線上に設置された静電プローブのイオン飽和電流の解析によるイオン温度の評価を行った。また、イオン速度分布関数を測定可能なレーザー誘起蛍光(LIF)法の GAMMA10 への適用の準備も進めた。ISP および静電プローブ計測の結果、得られたイオン温度には、各々のプローブで明確な差異が観測された(図4)。GAMMA10 端部プラズマはその開放端磁場配位により、磁力線に平行および垂直方向のイオン温度が大きく異なることが知られている。そこで、プローブ計測位置の磁場配位において、磁気モーメント保存、エネルギー保存則を考慮したイオン温度の異方性の解析を行い、実験結果と詳細に比較したところ、ISP では磁力線に垂直方向のイオン温度、静電プローブのイオン電流から評価したイオン温度は磁力線に平行方向成分を示していると考えるのが妥当であることが明らかとなった。これらの知見は境界領域プラズマの粒子輸送の理解に資するとともにイオン温度計測の精密化に寄与する重要な成果と言える。

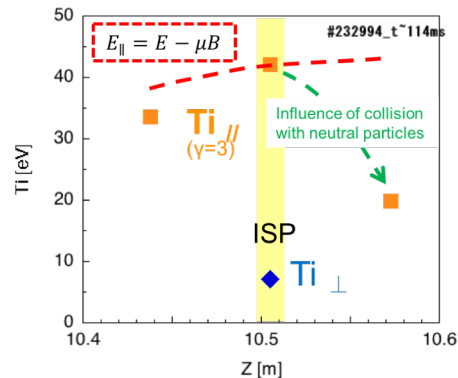


図4: プローブによるイオン温度測定によるイオン温度異方性に関する結果

今後、本研究で整備したレーザー誘起蛍光計測システムを GAMMA10/PDX 装置に適用し (図5)、プローブ法と併用しながら境界領域プラズマ中のイオン温度やその空間分布を詳細に計測し、高イオン温度プラズマによる非接触プラズマ形成過程の解明やその制御手法に関する研究等に展開する。

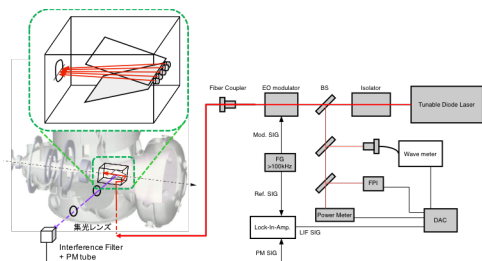


図5: GAMMA10/PDX における LIF 計測

#### <引用文献>

- ① N. Ezumi, Y. Hayashi et al., “Kinetic Effect of High Energy Ions on the Temperature Profile in the Boundary Plasma Region”, *Journal of Nuclear Materials*, 438 (2013) S472-S474.

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 9 件)

- ① N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Ichimura, M. Sakamoto, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S. Masuzaki, Y. Nakashima, “Evaluation of ion temperature and its anisotropy using an ion sensitive probe in the divertor simulation plasma of GAMMA 10/PDX”, 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (22nd PSI), 30 May - 3 June, 2016, P3-29, Rome, Italy.
- ② 江角直道, 野尻訓平, 寺門明紘, 成田昂平, 田中裕樹, 大久保克朗, 伊能俊太郎, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔, 澤田圭司, 大野哲靖, 田中宏彦, 小林政弘, 増崎貴, 「境界領域プラズマにおけるイオン温度異方性の評価」第32回プラズマ・核融合学会年会, 2015年11月24-27日, 24pC09, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- ③ N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Narita, M. Sakamoto, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S. Masuzaki, Y. Nakashima, “Anisotropy of Ion Temperature Measured by using Ion Sensitive Probe”, International Workshop on Electric Probes in Magnetized Plasmas (IWEP2015), Sozopol, Bulgaria, 16-18 Sep. 2015.
- ④ N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Narita, M. Sakamoto, K. Sawada, N.

Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S. Masuzaki, Y. Nakashima, “Ion temperature measured by probes in the D-module plasma of GAMMA 10/PDX”, 5th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF 2015), Juelich, Germany, 7-9 Oct. 2015.

- ⑤ 江角直道, 櫻井駿, ハニフ ザイヌディン, 畑田優馬, 吉田智貴, 澤田圭司, 大野哲靖, 田中宏彦, 小林政弘, 増崎貴「イオンセンシティブプローブとレーザー誘起蛍光法による再結合プラズマのイオン温度計測」Plasma Conference 2014, 2014年11月18-21日, 19pB-3, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市)
- ⑥ 江角直道, 櫻井駿, ハニフ ザイヌディン, 澤田圭司, 大野哲靖, 田中宏彦, 小林政弘, 増崎貴「イオンセンシティブプローブとレーザー誘起蛍光法による低温高密度磁化プラズマ中のイオン温度計測」平成26年電気学会 基礎・材料・共通(A)部門大会, 2014年8月21-22日, 21-E-p-3, 信州大学工学部 (長野県・長野市)
- ⑦ 江角直道, 澤田圭司, 大野哲靖, 田中宏彦, 小林政弘, 増崎貴, Zh. Kiss'ovski 「ISP と LIF による境界領域プラズマのイオン温度計測」第10回核融合エネルギー連合講演会, 2014年6月19-20, 20-132, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)
- ⑧ N. Ezumi, K. Imai, R. Ohta, Y. Hatada, T. Yoshida, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S. Masuzaki and Zh. Kiss'ovski, “Evaluation of ion temperature anisotropy on ion sensitive probe” 21th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 26-30 May 2014, P3-099, 石川県立音楽堂 (石川県・金沢市)
- ⑨ 江角直道, 今井希和, 太田良, 畑田優馬, 吉田智貴, 澤田圭司, 大野哲靖, 田中宏彦, 小林政弘, 増崎貴, Zh. Kissevski 「イオンセンシティブプローブ計測における温度異方性の評価」プラズマ・核融合学会第30回年会, 2013年12月3-6日, 05pB02, 東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都・目黒区)

[その他]

ホームページ等

<http://www.prc.tsukuba.ac.jp/~ezumi/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

江角 直道 (EZUMI, Naomichi)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号: 20321432