

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740367

研究課題名(和文) 高速偏光分光法を利用した ECR プラズマ生成過程における非等方電子計測法の開発

研究課題名(英文) Development of a fast polarization spectroscopy technique for measurements of anisotropic electrons in ECR plasma start-up processes

研究代表者

四竈 泰一 (Shikama, Taiichi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：80456152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000 円、(間接経費) 1,020,000 円

研究成果の概要(和文)：非等方に運動する電子の衝突励起により生じる原子発光線の偏光を利用することで、電子速度分布関数の非等方性に関する情報を得ることができる。本研究では、ECRプラズマ中に入射したリチウム原子ビームから生じるリチウム原子2s-2p発光線の偏光を測定し、加熱で生じる非等方に運動する電子成分の運動方向および運動エネルギーの推定を試みた。偏光の空間・時間分布を測定するための計測システムを開発し、カusp磁場中で生成したプラズマに対して測定を行った結果、低電子密度領域で磁力線に垂直方向に非等方に運動する電子成分の存在が示唆された。方向性プローブを用いた測定を行い、偏光計測と定性的に一致する結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Anisotropy in the electron velocity distribution function (EVDF) can be deduced by using polarization in the atomic emission induced by the anisotropic electron-impact excitation. In this project, we have observed polarization in the lithium atom 2s-2p emission, which originates from the lithium atom beam injected into an electron cyclotron resonance plasma, and evaluated the kinetic energy and anisotropy in the motion of the electrons produced by the micro-wave heating. We have developed diagnostic systems to detect the polarization with spatial and temporal resolutions. By applying the developed diagnostic systems to plasmas produced in a cusp magnetic field, we have found electrons which move in direction perpendicular to the magnetic field in low electron density region. Anisotropy in the EVDF measured by a directional Langmuir probe is qualitatively consistent with the result of the polarization spectroscopy.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ 分光 偏光分光 ECR ヘリウム 方向性プローブ ストークスパラメータ トカマク

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマ核融合実験装置において電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) は主要な加熱手法の1つであるが、特にプラズマ生成に ECRH を利用した際の電子の加熱や電流駆動のメカニズムに関しては未解明な点も多い。トカマク型装置では、超伝導磁場コイルの採用により誘導電流駆動時のトロイダル周回電圧の低減が求められており、この対策として ECRH を利用した予備電離プラズマ生成の有効性が確認されている。予備電離を利用したプラズマ立ち上げでは、マイクロ波を入射する際の磁場配位や中性粒子ガス圧力により電流の特性が大きく左右される、すなわち初期電子の軌道や速度分布関数が重要である、ことが報告されている[1]。しかし、現状ではこのような電子の特性を直接測定するための適当な手段が無く、結果として生じるマクロなプラズマ特性をもとに最適な放電条件が模索されている。類似の実験結果は球状トカマク型装置における ECRH を利用した非誘導電流駆動においても見られ、ピッチ角に応じて磁場に捕捉された非等方に運動する電子により、初期電流が生成されることが報告されている[2]。この実験結果は幾つかの条件下で電子の軌道計算により説明されているが、さらに電子速度分布関数の空間・時間変化に関する情報を直接得ることができれば、プラズマ生成過程のより詳細なモデル化や制御につながると期待される。

プラズマ生成過程の研究における上記の課題を解決するためには、磁力線に平行または垂直方向に生じる電子速度分布関数の非等方性を空間・時間分解して測定することが可能な手法を開発することが有効である。

[1] J. Stober, *et al.*, *Nuclear Fusion* **51**, 2011, 083031.; [2] T. Yoshinaga, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 2006, 125005.

2. 研究の目的

プラズマ中の電子速度分布関数の測定法は従来幾つか存在するが、速度分布関数の非等方性に関する情報を得ることは容易ではない。そこで、本研究ではプラズマ中の原子発光線の偏光を利用し、速度分布関数の非等方性を測定可能な手法の開発を試みた。非等方に運動する電子の衝突により励起された原子やイオンは特定の角運動量状態に励起されやすくなるため脱励起発光に偏光を生じる。この特性を利用して、発光線の偏光方向 (磁場中では磁力線に平行または垂直) と偏光度から非等方電子成分の運動方向とエネルギーを推定することができる。この方法により速度分布関数の等方性からの“ずれ”を担う非等方に運動する電子を測定することで、速度分布関数の非等方性を観測するこ

とが可能である。

これまでに磁場閉じ込めプラズマ実験装置において O^{4+} , C^{4+} イオン線, H_{α} 線, ヘリウム原子線等の偏光が観測され、電子速度分布関数を定量化するための励起発光モデルの構築が試みられているが[3], プラズマ物理現象の計測法として確立するまでには至っていない。その原因として、上記のイオンや原子の発光線は偏光を観測する上で次の2つの問題点が存在することがあげられる: (1) 複数の励起準位間の電子衝突励起・脱励起過程を考慮する必要がある, (2) 測定値が観測視線上に存在する発光の線積分値となる。(1)に関しては、上記元素の発光線では上準位の占有密度を作る励起過程として、基底準位からの直接励起に加え他の励起準位を経る励起も考慮する必要がある。このため発光線の解析には複数の励起準位間における磁気副準位まで分離した電子衝突励起の断面積データが必要となり、それらの精度によって励起発光モデルの計算精度が制限されてしまう。(2)に関しては、線積分による空間分解能の低下に加え、プラズマパラメータの変化に伴い発光の空間分布が変化するため、意図した空間領域の測定を行うことが難しくなる。そこで本研究では、これらの問題点を原理的に解決可能な方法であるシート状リチウム原子ビームを利用した偏光分光法を開発することを目的とする。

リチウム原子は第1励起準位 (2p) から基底準位 (2s) への遷移が可視域の波長を持つ最も原子番号の小さな元素である。核融合プラズマのような電離進行プラズマ中の原子やイオンの第1励起状態は基底状態からの電子衝突励起により主に生成され、リチウム原子の場合も 2p 励起状態のうち約 85%以上が基底状態からの直接励起により生成される[4]。このため、2s-2p 発光線の偏光を利用することで、基底準位からの励起のみを考慮した偏光生成過程の解析が可能である。さらに、電子衝突励起による 2s-2p 準位間の偏光生成断面積については、実験および計算により多くの研究が行われており、信頼性の高い断面積を利用することができる。偏光解析に関するこれらの利点に加え、ビームを利用することで観測位置を能動的に選択することも可能となる。

本研究では、リチウム原子 2s-2p 発光線の偏光を利用した電子速度分布関数の非等方性計測法の有効性を実験的に検証する。このために、以下の2つの課題を実施することを目的とする。

- (1) リチウム原子 2s-2p 発光線の偏光分光計測システムの開発
- (2) 小型プラズマ実験装置を利用した計測法の有効性の検証実験

[3] T. Fujimoto and A. Iwamae Eds. "Plasma Polarization Spectroscopy" Springer (2008). ; [4] T. Nishioka, et al. Rev. Sci. Instrum. **84**, 2013, 073509.

3. 研究の方法

(1) リチウム原子 2s-2p 発光線の偏光分光計測システムの開発

発光線の偏光測定を制御した条件下で行うために、プラズマ中にシート状の熱リチウム原子ビームを入射し、リチウム原子がプラズマ中で電子衝突励起された際に生じる 2s-2p 発光線 (波長 670.8 nm) の偏光を観測する。

偏光の基準軸に対して角度 0° , 45° , 90° , 135° 方向の直線偏光強度をそれぞれ測定し、ストークスパラメータ I , Q , U を求めることで、観測視線に垂直な平面上での偏光方向及び偏光度を決定できる。観測視線と磁場ベクトルのなす角度は既知であるため、磁力線方向を基準とする非等方電子成分の運動方向及びエネルギーを求めることが可能である。トカマクや球状トカマク型装置では、プラズマ生成時にミリ秒からそれ以下の時間スケールで大域的な電流分布や磁場構造が変化する[1, 2]。このため、ストークスパラメータをミリ秒以下の時間分解能で測定可能な高速分光計測システムを開発するとともに、測定結果の検証のために、定常状態でストークスパラメータの空間分布を測定可能な分光イメージングシステムを開発した。

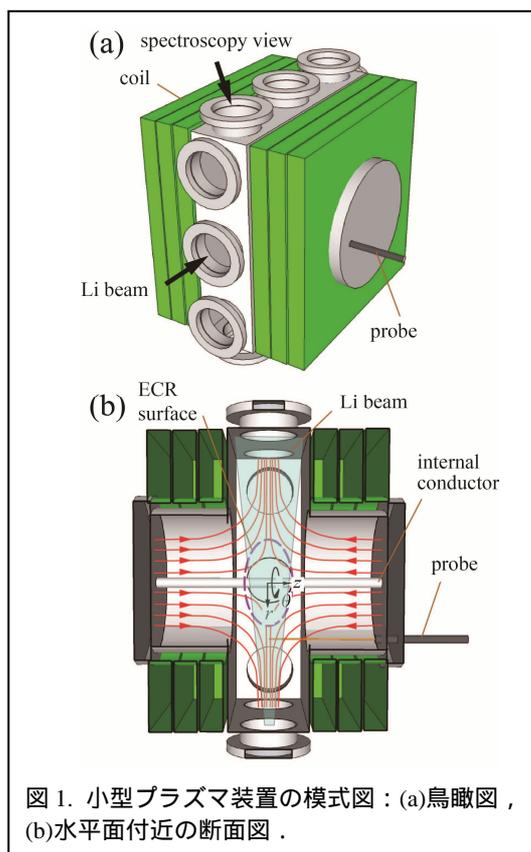


図 1. 小型プラズマ装置の模式図：(a)鳥瞰図，(b)水平面付近の断面図。

(2) 小型プラズマ実験装置を利用した計測法の有効性の検証実験

小型プラズマ装置を用いて実験を行った (図 1)。装置はカスプ型の磁場配位中で 2.45 GHz のマイクロ波により最大 10 秒程度定常でプラズマを生成する。ガスの圧力と種類を変えることで、電子温度、密度をそれぞれ 5-30 eV, 10^{14} - 10^{17} m^{-3} 程度の範囲で変化させることができる。カスプ型の磁場により電子サイクロトロン共鳴面が極小磁場配位となるため、共鳴面近傍及び面内に最大で keV 程度のエネルギーを持つ電子を生成できることが過去の研究で明らかになっている。装置には申請者がこれまでの研究で開発したビーム方向を掃引可能なシート状熱リチウム原子ビーム源が取り付けられている。シースヒータを巻いた円筒形のオープン内で単体のリチウムを加熱することによりリチウム蒸気を作り、後段の 3 枚のアーチャーにより蒸気をシート状ビームに整形する。最もプラズマ側に近いアーチャー位置を駆動することでビーム出射方向を掃引することができる。また、オープンの温度を変えることでビーム流束を変化させることが可能である。

4. 研究成果

(1) リチウム原子 2s-2p 発光線の偏光分光計測システムの開発

ストークスパラメータ I , Q , U を測定するために、2 種類の計測システムを開発した。システムは 8 本の視線を利用した離散的な空間点での時間分解計測、システムは空間分解計測が可能である。

高速偏光分光システム：8 ch 光電子増倍管 (浜松ホトニクス H11451-20) + 分光器 (Nikon G500) + バンドル型光ファイバ + 対物レンズ + 直線偏光板 (シグマ光機 SPF-30C-32) + 光弾性変調器 (Hinds Instruments II/FS42A; 変調周波数 42 kHz) + 1/4 波長板 (シグマ光機 WPQ-6700-4M)。

偏光イメージングシステム：冷却 CCD (FLI ML1109; 2048×506 画素, 画素サイズ $12 \mu m$ 四方) + カメラレンズ (Nikon Zoom-NIKKOR; 焦点距離 35-70 mm) + 狭帯域干渉フィルタ (CVI Melles Griot F03-670.8-4-50.0M; ピーク透過波長 670.8 nm, 半値全幅 3 nm) + 直線偏光板 (消光比 1.9×10^{-3})。

システム、ともに、偏光状態が既知の光源を利用し、偏光方向に応じた相対感度を校正した。また、システムでは、光電子増倍管の出力を 1.25 MS/s で測定した時系列信号を高速フーリエ変換し、DC 成分および変調周波数の偶数、奇数倍の成分の振幅から、 I , Q , U が測定できることを確認した。

(2) 小型プラズマ実験装置を利用した計測法の有効性の検証実験

マイクロ波電力 830 W, ガス圧力 1.7 mPa の条件下でヘリウムプラズマを生成した。プラズマ中に熱リチウム原子ビームを入射し, 図 1(a) 中に示すように, ビームに垂直な方向から 2s-2p 発光線を観測した。システム を利用し, 同条件の放電毎に直線偏光板の方向を回転させて測定した定常状態の偏光イメージを図 2 に示す。下図は偏光板を 0° 方向に向けた場合のカスプ型磁場端部の磁力線に沿った発光強度の空間分布, 上図は下図の枠内において 0.4 mm 四方の領域で平均した偏光度と偏光方向を示している。装置の軸付近 ($z = \sim 0$) および周辺部では磁力線に平行に近い方向に 10% 程度の偏光が, それらの中間領域では磁力線に垂直に近い方向に 5% 程度の偏光が観測された。電子の運動エネルギーに応じた偏光度のデータ[4]から, 装置の中心および周辺部に, 磁力線に垂直方向に keV 程度のエネルギーで運動する電子が存在する可能性が示唆された。

本計測法では, 電子のラーマ運動により磁力線に対する軸対称性が生じるため, 原理的に磁力線に平行または垂直方向の偏光しか観測されないと考えられるが, 観測された偏光方向とこれらの方向の間にはずれが生じていた。測定時に放電の再現性を仮定したが, 放電毎のプラズマパラメータの変化により偏光の方位角測定に誤差を生じている可能性が考えられる。この点は, システム を用いた単一放電内での測定により改善できる可能性がある。

偏光分光測定の結果との比較のために, 同条件の放電で図 3 に示す平板型方向性プローブを用いて電子速度分布関数の非等方性を計測を試みた。速度分布関数の磁力線に平行・垂直な成分が独立であると仮定した場合, プ

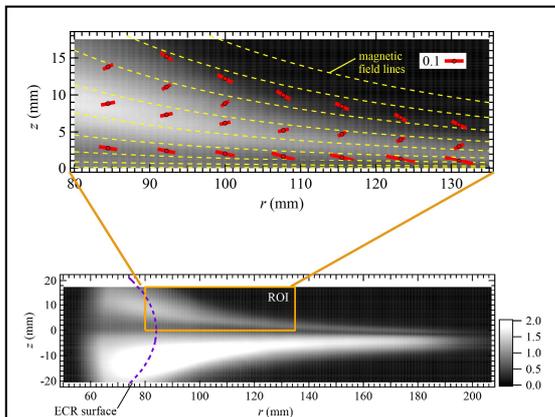


図 2. リチウム原子 2s-2p 発光線偏光イメージ。(下) カスプ型磁場 b 端部における 2s-2p 発光強度分布 (0° 方向)。(上) 下図の枠内における偏光の分布。マーカーの大きさと向きが偏光度と偏光方向を表す。

ローブ電極の法線方向を磁力線に平行・垂直方向に向けて電子を捕集することで, 速度分布関数の平行・垂直成分をそれぞれ観測することが可能である[5]。シース近傍における電子の軌道モデルにもとづき, この測定原理を定式化した上で測定を行った。プローブは図 1(b) に示すように, 装置中心から径方向に 102 mm, 軸方向に 10 mm 離れた位置に挿入し, 軸の回りに回転させて電流電圧特性を測定した。得られた電子エネルギー分布関数の方位角分布を図 4 に示す。図中, $\theta = 0^\circ$ が, 平板電極法線が磁場と平行な場合を表す。バルクプラズマの電子温度が 10 eV 程度であるのに対し, $\theta = 80^\circ$ 方向での測定結果から, 磁力線に垂直方向に約 20 eV 程度のエネルギーを持つ非等方に運動する高エネルギー電子成分が存在することが明らかになった。 $\theta = 80^\circ, 280^\circ$ での測定結果の非対称性は, 磁力線を横切る電子のドリフト運動に起因すると推測される。磁場方向を反転した条件下でも測定を行い, 高エネルギー電子成分が $\theta = 280^\circ$ 方向で観測されることを確認している。

偏光分光法及びプローブ法による測定結果は, とともに装置軸付近で磁力線に垂直方向に大きなエネルギーを持つ電子の存在を示唆しており, 本研究で提案する偏光分光法に

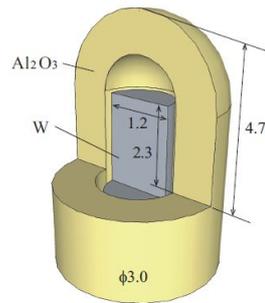


図 3. 平板型方向性プローブ先端部の模式図。

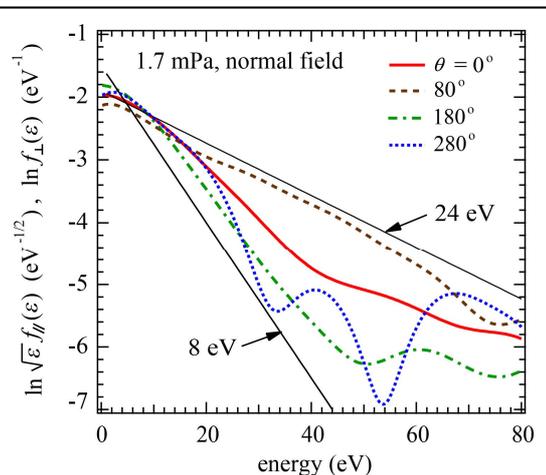


図 4. 電子エネルギー分布関数の角度分布。 $\theta = 0^\circ$ が平板電極法線が磁力線に平行な場合。

より、電子速度分布関数の非等方性を測定可能であることが確認された。しかし、推定された電子のエネルギーは偏光分光法(～keV程度)とプローブ法(～20 eV程度)で異なる結果となった。この点は、システムを用いた測定で放電の再現性が十分ではなかったことが原因である可能性があり、システムを利用した測定で改善できる可能性がある。

[5] T. Shikama, et al. submitted to *Phys. Plasmas*.

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 3 件)

T. Shikama, S. Ogane, H. Ishii, and M. Hasuo, Measurements of helium 2^3S metastable atom density in low-pressure glow discharge plasmas by self-absorption spectroscopy of HeI 2^3S - 2^3P transition, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, 掲載可 2014,

<http://jjap.jsap.jp/>

T. Nishioka, T. Shikama (責任著者), S. Nagamizo, K. Fujii, H. Zushi, M. Uchida, A. Iwamae, H. Tanaka, T. Maekawa, and M. Hasuo, Development of a compact thermal lithium atom beam source for measurements of electron velocity distribution function anisotropy in electron cyclotron resonance plasmas, *Rev. Sci. Instrum.* 査読有, **84**, 2013, 073509, doi: 10.1063/1.4815721

T. Shikama and P. M. Bellan, Development of a polarization resolved spectroscopic diagnostic for measurements of the vector magnetic field in the Caltech coaxial magnetized plasma jet experiment, *Rev. Sci. Instrum.* 査読有, **84**, 2013, 023507, doi:10.1063/1.4793403

[学会発表](計 4 件)

四電 泰一, 西岡 朋美, 永溝 聡士, 岡子 秀樹, 打田 正樹, 岩前 敦, 田中 仁, 前川 孝, 蓮尾 昌裕, カスプ磁場中の ECR プラズマにおけるリチウム原子発光線の偏光分光, 核融合科学研究所 プラズマ分光と素過程研究の深化と展開研究会, 2014 年 1 月, 核融合科学研究所。

四電 泰一, 永溝 聡士, 北岡 弘行, 藤井 恵介, 打田 正樹, 岡子 秀樹, 岩前 敦, 田中 仁, 前川 孝, 蓮尾 昌裕, カスプ磁場配位 ECR プラズマ中でのリチウム原子発光線の偏光分光計測, プラズマ・核融合学会年会, 2013 年 12 月, 東京工業大学。

S. Nagamizo, T. Shikama, K. Fujii, H. Zushi, M. Uchida, A. Iwamae, H. Tanaka, T. Maekawa, and M. Hasuo, Evaluation of electron velocity

distribution function anisotropy in an ECR helium plasma by polarization imaging of lithium and helium atomic lines, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), 2013 年 7 月, 幕張メッセ。

T. Shikama, T. Nishioka, S. Nagamizo, K. Fujii, H. Zushi, M. Uchida, A. Iwamae, H. Tanaka, T. Maekawa, and M. Hasuo, Development of a compact thermal lithium atom beam source for measurements of electron velocity distribution function anisotropy in ECR plasmas, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), 2013 年 7 月, 幕張メッセ。

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等
<http://oel.me.kyoto-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

四電 泰一 (SHIKAMA TAIICHI)

京都大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 8 0 4 5 6 1 5 2

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: