

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610191

研究課題名(和文) Balmer- $\alpha$ 線をを用いた超高温プラズマ中陽子温度揺動の時空間構造の計測

研究課題名(英文) Measurement of ion temperature spatial structure in high temperature plasmas based on Balmer-alpha spectrum

研究代表者

藤井 恵介 (Fujii, Keisuke)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：10637705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：Balmer- $\alpha$ 線スペクトルを高いダイナミックレンジ・高い時間分解能・複数観測視線で計測できるシステムを開発した。具体的には、高いダイナミックレンジと高い時間分解能を有する64チャンネル光電子増倍管を光検出器として採用した。信号を高速に読み出すための多チャンネルアンプシステムと、信号読み出しシステム、さらに読み出し時間短縮による光量減少を補うための高いスループット・高い波長分散を持つ高ダイナミックレンジ分光器を組み合わせることで開発した。本システムを核融合科学研究所の磁場プラズマ閉じ込め装置LHDに適用し、イオン温度・電子密度の変動に起因すると考えられるスペクトル形状の変化を検出した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a spectroscopic system that can measure hydrogen Balmer- $\alpha$  spectrum with high-dynamic-range, high-temporal-resolution and multiple line-of-sights. In particular, we adopted a 64-ch photomultiplier tube as a photo detector. We combined it with multi-channel current amplifiers and multi-channel analog-digital converters, as well as high-throughput spectrometer that compensates exposure time by high-temporal measurement. We applied this system to Large Helical Device plasma in National Institute for Fusion Science, Toki, Japan. We detected a fluctuation of the spectral shape, which is possibly caused by temporal variation of electron density or ion temperature.

研究分野：高温プラズマ計測

キーワード：プラズマ分光 高ダイナミックレンジ分光

1. 研究開始当初の背景

核融合を目指した磁場閉じ込めプラズマでは、プラズマ中の陽子温度勾配や陽子の流れが励起する乱流が閉じ込め性能を悪化させていると言われていたが、これまで陽子温度の空間構造の変化が直接計測された例はない。これまで実用化されている陽子温度計測法では光量が不足するため、高い時間分解能での計測ができなかった。

申請者は近年、陽子温度やその平均流速が Balmer- $\alpha$  線プロファイルに反映されることを見出した。本研究の目的は、上記知見を利用し Balmer- $\alpha$  線プロファイルを高時間分解・高空間分解で計測することで、陽子温度やその流れの変化の空間構造を検出することを提案する。十分な光強度が得られる Balmer- $\alpha$  線を用いること世界で初めて陽子温度の速い時間変化の検出を目指す。

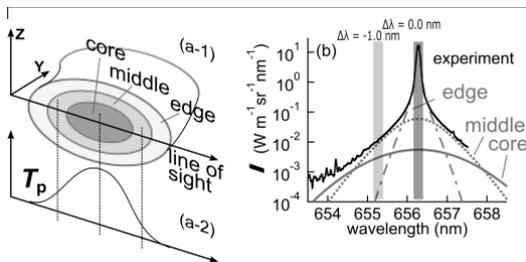


図1 (a) 高温プラズマの模式図と、(b) 観測される Balmer- $\alpha$  線スペクトル。スペクトルエッジ部がプラズマ周辺部に、スペクトル裾部がプラズマコア部の発光に対応する。

2. 研究の目的

本研究を実現するためには、時間分解能・波長分解能・ダイナミックレンジが高い分光計測システムが必要である。市販の分光計測用カメラでは、これらが不足するため、多チャンネル光電子増倍管を光検出器として用いた新たな分光計測システムを構築する。

本システムにより核融合科学研究所のプラズマ実験装置 LHD からの発光を観察する。スペクトル周辺部・裾部の発光の時間変化からプラズマ中の陽子温度・流速の変動についての知見を得ることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

3.1. 高スループット・高波長分散分光器の開発

高い時間分解能で光量の小さなスペクトル裾部を計測するためには、スループットの高い分光計測システムが必要である。さらに、多チャンネル光電子増倍管(図2)の素子ピッチでスペクトルを計測するためには、高い波長分散が必要である。

研究室所有の光学部品を活かしつつ、高いスループット・高い波長分散の分光システムを構築した(図3(b))。

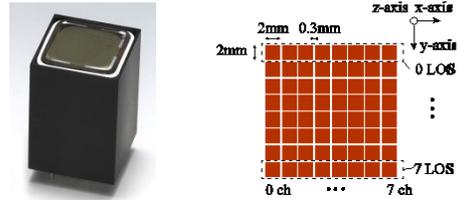


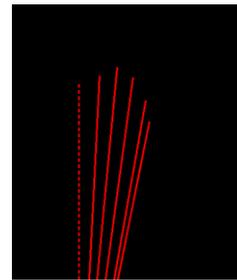
図2 光検出器として用いた多チャンネル光電子増倍管の(左)外観図と(右)素子配置の模式図。

さらに、多チャンネル光電子増倍管からの信号を読み出すため、多チャンネルプリアンプと AD 変換器を組み合わせた光検出システムを構築した(図3(a))。開発したシステムの性能は、表1の通りである。

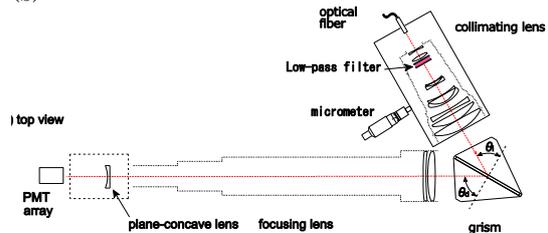
表1 開発した分光システムの性能

観測視線数	波長分解能	時間分解能	ダイナミックレンジ
6	0.2 nm	10 $\mu$ s	$10^4$

(a)



(b)



(c)



図3 (a) LHD のポロイダル断面図と、観測視線の模式図。(b) 開発した高スループット分光システムの模式図。(c) 光検出システムの外観図。図2に示した多チャンネル光電子増倍管と多チャンネルプリアンプから構成される。

### 3.2. LHD プラズマの計測

本分光システムを用いて LHD で生成される高温プラズマを計測した。図 4 に観測した LHD プラズマ中の電子温度・密度の分布を示す。

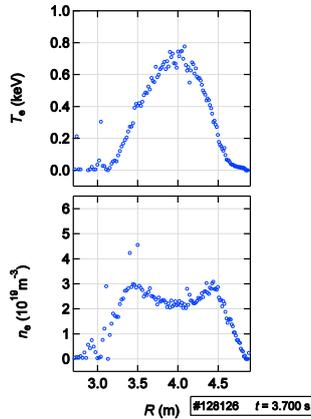
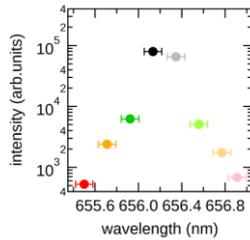


図 4 計測した LHD プラズマ中の電子温度・密度の大半径分布。

本プラズマに対して計測した結果を図 5 に示す。図 5(a) は本システムで計測した Balmer- $\alpha$  線スペクトルである。波長方向に 8 つの素子しか持たない光検出システムであるが、図 1(b) と比較してもスペクトル中心部から裾部までを計測できている。

(a)



(b)

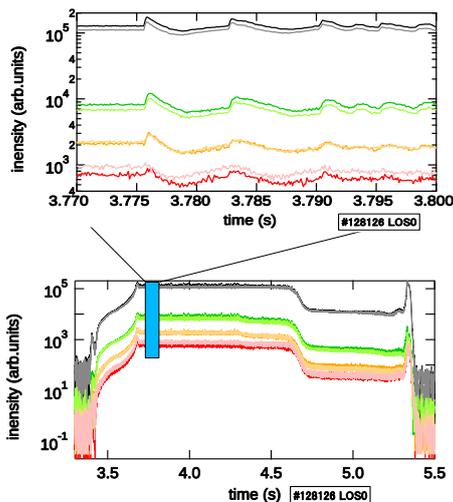


図 5(a) 本分光システムで計測した水素原子 Balmer- $\alpha$  線スペクトル。縦軸が対数スケールであることに注意する。(b) 上記スペクトル書く波長チャンネル強度の時間変化。挿入図に示すように、波長ごとにその時間変化が異なることがわかる。

図 5(b) は各波長チャンネルにおける発光強度の時間変化である。本放電では 3.8 秒付近に間欠的な発光の増大が起こった。図 5(b) 挿入図にその時間変化の詳細を示す。波長チャンネルごとに、その時間変化の様子が異なることがわかった。

### 3.3. 解析

得られた Balmer- $\alpha$  線スペクトルは、低温のプラズマエッジ領域から高温のコア領域にかけての発光のたし合わせであると考えられることができる。本研究では、得られたスペクトルを 2, 40, 200 eV の温度を持つ 3 つのガウス成分のたし合わせであると仮定し、それらの発光強度と平均流速が 0 でないことに由来するシフトをアジャスタブルパラメータとしてスペクトルをフィッティングした。その結果を図 6 に示す。3 成分近似により、計測スペクトルをよく説明できた。

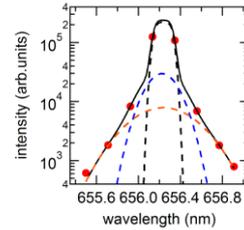


図 6 計測スペクトルの 3 成分ガウス近似の結果。低温・中温・高温成分をそれぞれ黒破線・青破線・橙破線で、その合計を黒実線で示す。

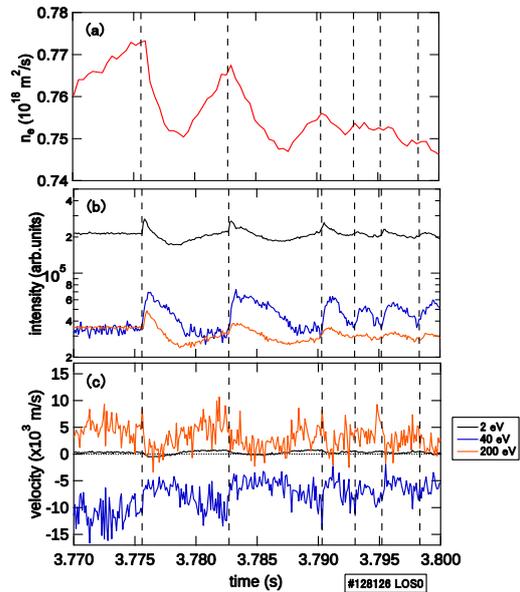


図 7 (a) 別計測により求められているプラズマ中電子密度の変化と、スペクトルフィッティングにより求めた各成分の (b) 発光強度と (c) 平均流速。

本フィッティングを全ての計測時間に適用した結果を図7に示す。図7(b)の発光強度、(c)の平均流速は各温度成分ごとに異なる挙動を示していた。

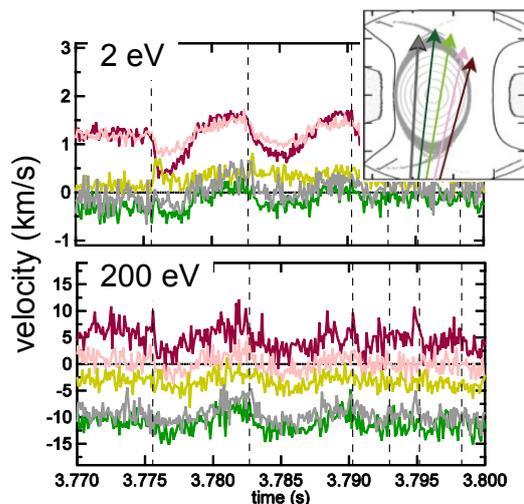


図8 平均流速時間変化の観測視線依存性

さらに、複数の観測視線による 2, 200 eV 成分の平均流速の時間変化を図8に示す。特に低温成分で平均流速の変化に観測視線依存性が顕著であることがわかった。プラズマエッジ部を観測する視線での変化が大きいことから、周方向の陽子温度流速に変化を表現していると考えられる。

#### 4. 研究成果

本研究の主な成果は以下の通りである。

- ・ 時間分解能・波長分解能・ダイナミックレンジが高い分光計測システムを開発した。それにより観測視線数が6、波長分解能が0.2 nm、ダイナミックレンジが $10^4$ 、時間分解能が10  $\mu$ sを達成した。
- ・ 本システムを核融合科学研究所のプラズマ実験装置 LHD に適用した。スペクトル中心部・裾部の発光強度の時間変化が異なることを初めて明らかにした。
- ・ 計測スペクトルの3成分フィッティング解析により、プラズマ中の陽子流速の時間変化を検出した。

#### 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 3件)

砂原優樹、藤井恵介、東野純平、後藤基志、森田繁、蓮尾昌裕

「LHD プラズマにおける水素原子 Balmer- $\alpha$  発光線の複数視線高速高ダイナミックレンジ分光計測」

日本物理学会 2015 年秋季大会 関西大学

中村紀彦、藤井恵介、砂原優樹、東野純平、後藤基志、森田繁、蓮尾昌裕

「水素原子発光線スペクトルを用いた LHD プラズマ中イオン流速変動の検出」

第 32 回プラズマ・核融合学会 年会

砂原優樹、藤井恵介、東野純平、後藤基志、森田繁、蓮尾昌裕

「LHD プラズマにおける水素原子 Balmer- $\alpha$  発光線の複数視線高速高ダイナミックレンジ分光計測」

プラズマ科学のフロンティア 2015

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井恵介 (Keisuke Fujii)

研究者番号：10637705

所属・職：京都大学工学研究科機械理工学専攻・助教