

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860037

研究課題名(和文)核融合炉心プラズマ中水素原子密度計測のための高ダイナミックレンジ分光法の開発

研究課題名(英文)Development of ultra-high dynamic range spectroscopic method for evaluation of neutral hydrogen density distribution in fusion core plasmas

研究代表者

藤井 恵介 (Fujii, Keisuke)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10637705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：分光計測のダイナミックレンジは、計測に用いるCCDカメラのダイナミックレンジと、分光器内での光の回折による像の広がりにより制限されることを明らかにした。まず、読み出しノイズが小さく読み出し速度の大きいCMOSカメラと信号の平均操作を組み合わせることで光検出器のダイナミックレンジを向上した。次に、刻線数・実効面積の大きな回折格子を用いて、回折による像の広がりを抑制し、併せて6桁のダイナミックレンジの分光計測システムを開発した。本分光システムを核融合科学研究所で生成される高温水素プラズマからの発光計測に適用し、計測した水素原子線スペクトルからプラズマ中の中性水素原子密度を導出する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The dynamic-range of a conventional spectrometer is determined by the dynamic range of a CCD camera used as a photo detector, as well as the image broadening due to the diffraction of light inside the spectrometer. In this work, we adopt a CMOS camera which has smaller readout noise amplitude and faster readout rate than those of CCD cameras. By averaging 1500 signals taken by the CMOS camera, we achieve the dynamic range of 10<sup>6</sup> in photo detection. Additionally, by adopting a large transmission grating with high ruling density, we suppress the image broadening due to the diffraction. The dynamic range of 10<sup>6</sup> of the spectrometer is achieved by these approaches. We apply this spectrometer to the observation of high temperature plasmas produced in National Institute for Fusion Science. We develop a technique to estimate the hydrogen atom density distribution in the core plasma from observed hydrogen atom spectra.

研究分野：核融合学

科研費の分科・細目：工学・核融合学

キーワード：プラズマ分光 核融合プラズマ 中性粒子輸送

## 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め高温プラズマでは、周辺の領域からプラズマ内に侵入した中性水素分子や原子が、電子衝突によりイオン化されプラズマへ陽子・電子が供給される。また、プラズマから漏れ出した荷電粒子はプラズマ対向壁で再結合し、中性の水素となって再度プラズマに侵入する。このように、中性水素の輸送はプラズマの粒子バランスやエネルギーバランスと密接に絡み合っている。プラズマの閉じ込め性能の向上のためには、プラズマ内外での中性粒子輸送の計測が求められる。

典型的な磁場閉じ込め高温プラズマ（電子・陽子温度： $\sim 2$  keV，電子・陽子密度： $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ，小半径 1 m）において、外側の低温の領域からプラズマに侵入した水素原子のほとんどが、境界から 5 cm 程度内側の表層の領域で発光・イオン化する。一部の水素原子はさらに内側に侵入し、そこでイオン化されることでプラズマ内部での荷電粒子生成源となるが、このようなプラズマ内部の原子からの発光強度は表層部のものに比べ 3 桁以上小さく、これまでは検出できないと考えられてきた。

磁場閉じ込め高温プラズマから計測される Balmer- $\alpha$  線を対数スケールの縦軸を用いて表示すると、マクスウェル分布関数で表せない高速の水素原子の発光による指数関数的な形状の裾を有していることを、我々は近年報告した。1次元輸送モデルから、このような高温水素原子はプラズマ閉じ込め領域に侵入し、加熱された水素原子によるものであることを明らかにした。

プラズマ炉心領域に存在する水素原子からの発光は、スペクトル中心の  $10^5$  倍小さい強度の裾部で支配的になると上記モデルから予想された。しかし、一般的に分光計測に用いられる CCD (Charge Coupled Device) カメラのダイナミックレンジが  $10^4$  程度であることもあり、 $10^5$  以上のダイナミックレンジを持つ分光法は確立されていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、炉心プラズマに存在する微量の水素原子密度を計測するための高ダイナミックレンジ分光法を開発することである。そのため、(1)  $10^6$  以上のダイナミックレンジを持つ分光計測の実証、(2) LHD 炉心プラズマにおける原子密度計測の実証を行う。さらなる応用として(3)  $10^7$  オーダーのダイナミックレンジを持つ超高ダイナミックレンジ分光への挑戦も行った。

## 3. 研究の方法

### (1) $10^6$ 以上のダイナミックレンジを持つ分光計測の実証

CCD カメラなどの光検出器のダイナミックレンジは、計測可能な最大光強度と読み出しノイズの比で決まる。ダイナミックレンジを向上させる方法の一つに、複数の計測結果を平均することが挙げられる。例えば、10000 回計測した信号を平均すると、ノイズの大きさは 100 分の 1 になるため、ダイナミックレンジを実効的に 100 倍向上することができる。低ノイズ CCD カメラの読み出し速度は一般的に 1 フレーム / 秒程度と遅く、10000 信号の平均は現実的でないが、高速・低ノイズの CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) カメラが近年実用化されてきた。

CMOS カメラによる高ダイナミックレンジ分光計測を実証するため、研究室保有のツェルニ・ターナー型分光器 (THR1000, Jobin-Yvon 社製, 焦点距離 1000 mm; 回折格子の刻線数: 2400 本/mm) に CMOS カメラ (Orca Flash-4.0, 浜松ホトニクス社製, 2048 x 2048 ピクセル; 量子井戸深さ 30000 e $^-$ ; 読み出しノイズの大きさ 1.3 e $^-$ ) を取り付け、線幅が十分狭いと考えられるヘリウム・ネオンレーザの光を計測した。実験装置の概略図を図 1 に示す。

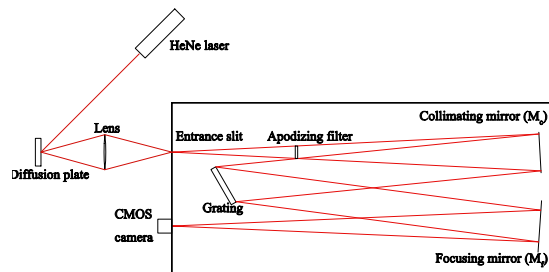


図 1 実験装置の概略図

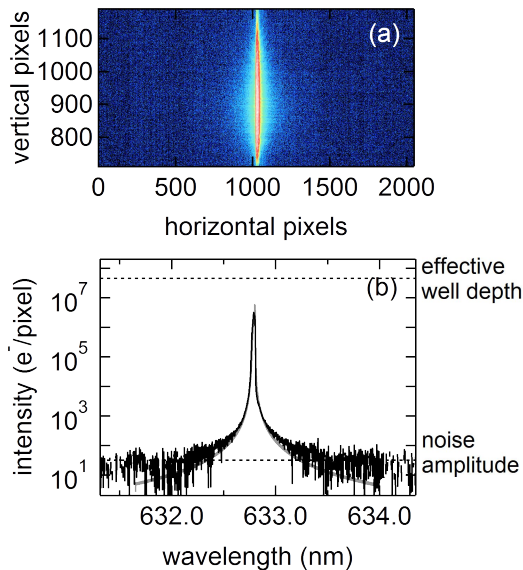


図2 (a) CMOS カメラで得られたヘリウム - ネオンレーザの分光計測イメージ。5 枚の計測結果の平均を示す。(b) 計測イメージ縦方向 300 ピクセルの計測結果を足しあわせて得られたスペクトル(黒線)。点線は、信号の足しあわせを含めた計測可能な最大光強度および読み出しノイズの大きさを示す。灰色線は Huygens-Fresnel の原理から計算した装置関数。

ヘリウム - ネオンレーザの光を 5 回計測し、平均したものを図 2(a)に示す。水平方向が波長分散方向であり、縦方向が入り口スリットと平行な方向である。なお、光を入射しないもとで計測した背景信号をすでに差し引いたものを示している。

今回の場合、入り口スリットに平行な方向には高い解像度が不要でないため、この方向の光強度を足し合わせる(ピンギング)ことで、ダイナミックレンジの向上が可能である。図 2(a)の光強度分布を縦方向に 300 ピクセル分足しあわせたものを図 2(b)に示す。計測された光強度の最大値は  $1 \times 10^7$  e-/pixel であった。このとき計測可能な最大光強度は  $6 \times 10^7$  e-/pixel である。計測スペクトルの中心から 1 nm 離れた裾付近の信号のばらつきから、計測信号のノイズが 30 e-/pixel であると評価された。計測可能な最大光強度との比から、この手法で  $10^6$  のダイナミックレンジを達成できることが確かめた。一方で、図 2 (b)のスペクトルは広がっており、特に中心から 0.3 nm 以上離れた裾部分に有意な強度を持っていることが明らかになった。これは分光器装置関数による影響と考えられる。

一般的に分光計測では、単色の光を計測しても光学素子の収差、有限のスリット幅、光の回折により像が有限の大きさを持つ。これを装置関数という。特に装置関数の裾部分は主に効果により広がる。

我々は、回折による装置関数の裾部の広がりをフラウンホーファー回折の原理により

見積もった。一般的な分光器内では回折格子により最も光線が遮られる。矩形の回折格子に波長  $\lambda_0$  の平行光が入射し、回折され結像されるとき装置関数  $I(\lambda)$  を以下のように導出した。

$$I(\lambda) \propto \text{sinc}^2\left(\frac{(\lambda - \lambda_0)}{L_g N_g \lambda_0}\right) \quad (1)$$

ここで、 $L_g$ 、 $N_g$  はそれぞれ回折格子の刻線に垂直な方向の長さ、刻線密度である。sinc はシンク関数であり以下のように定義される

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x} \quad (2)$$

(1)式より、用いる回折格子の刻線密度・大きさが大きいほど、装置関数の裾部の強度が小さくなることわかる。

分光器内には、回折格子の他に凹面鏡があり、そこでも一部光線が遮られる。その効果を見積もるため、Huygens-Fresnel の原理から電場の重ね合わせを用いて本分光器の装置関数を計算した結果を図 2 に灰色線で示す。なお、計測スペクトル・計算スペクトルは強度で規格化して示している。スペクトル中心から 0.3 nm 程度離れた領域では計算値は計測値より少し小さいものの、両者はほとんど同じ形状となった。なお、両者の違いはレーザ光スペクトル自体の裾の広がりによるものと考えられる。

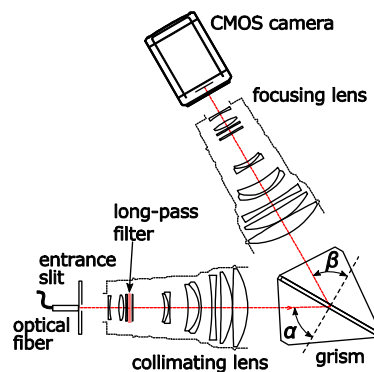


図 5 LHD プラズマの高ダイナミックレンジ分光計測に用いた分光システムの概略図

## (2) LHD 炉心プラズマにおける原子密度計測の実証

研究室保有の分光器のうち、最も刻線密度が高く大きな回折格子を有する分光器(図5)に CMOS カメラを取り付け、低圧水素放電管からの Balmer- $\alpha$ 線を計測した。計測にあたり、8枚の計測イメージの平均、縦方向 66 ピクセルのビニングのほか、横方向 10 ピクセル分の信号に対して移動平均を行った。計測結果および式(1)から見積もった装置関数を対数スケールで図6に示す。計測スペクトル(黒線)の裾部は装置関数(灰色線)より少し大きい。これは、計測した Balmer- $\alpha$ 線自体の広がりによるものと考えられる。カメラの読み出しノイズと光子ノイズを比較することにより、6桁のダイナミックレンジを有することを確かめた。

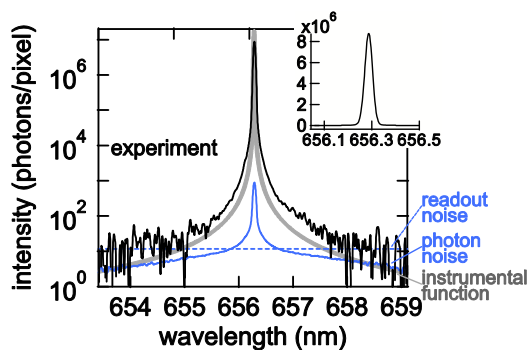


図6 計測スペクトル(黒線)と装置関数(灰色線)。読み出しノイズ・光子ノイズの大きさを灰色点線・実線でそれぞれ示す。挿入図は計測スペクトルを線形スケールで示したもの。

この分光器を用いて、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD で生成される高温水素プラズマ(中心イオン温度: 2 keV, 中心電子密度:  $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ )からの発光を計測した。計測スペクトルを図7(a)に細灰線で示す。LHD からは水素原子 Balmer- $\alpha$ 線のほか、図中縦矢印で示すような不純物イオンからの発光線や、図中灰色点線で示すような連続光が計測される。連続光強度を差し引いたスペクトルを黒線で示す。

計測した Balmer- $\alpha$ 線は、スペクトル中心波長から 1.5 nm 以上離れた波長でも、中心と比較して4桁以上小さい強度の裾部を有していることが明らかになった。このような裾の広がりにはドップラーシフトによるものである。例えば、観測視線方向に  $6 \times 10^5 \text{ m/s}$  で運動する水素原子(運動エネルギーにして 2 keV)からの発光が 1.5 nm の波長シフトに対応する。このような高温水素原子はプラズマコアで陽子と荷電交換衝突して生成したと考えられる。なお、計測された裾部は、装置関数裾部(灰色太線)より 1~2 桁大きく、装置関数の影響は無視できる。

イオンの速度分布が Maxwell 分布で表される場合、荷電交換衝突で生成する水素原子の速度分布も Maxwell 分布と近似できる。このことを用い、計測した高ダイナミックレンジ Balmer- $\alpha$ スペクトルを複数のガウス関数の線形和で近似し、プラズマ中のイオン温度・電子密度分布を利用することでプラズマ小半径方向の中性水素原子密度分布を導出する手法を開発した。スペクトルの近似結果を図7(b)に灰色線で、求めた中性水素原子密度分布を図8に示す。図7(b)の各色の線は、図8中小半径成分の水素原子からの発光に対応するスペクトルプロファイルを示す。

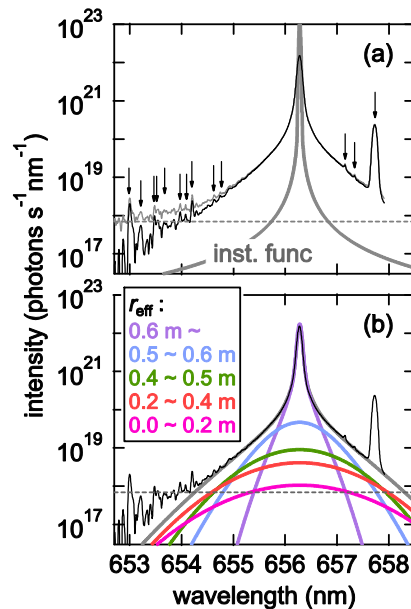


図7(a) LHD プラズマの計測スペクトル(細灰線)と装置関数(太灰線)。黒線は計測スペクトルから連続光強度(水平点線)を差し引いたもの。(b) 計測スペクトルとフィッティング結果(太灰線)。色線は、図8中各半径領域からの発光スペクトル。

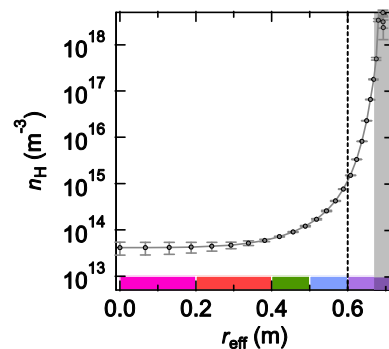


図8 スペクトルから導出した LHD プラズマ中水素原子密度の半径方向分布。

### (3) さらなる高ダイナミックレンジ計測への挑戦

式(1)の装置関数の広がりを小さくする方法として、大きな回折格子を使う以外に、回折格子に入射するビームプロファイルのコントロールする方法があげられる。模式図を図9(a), (b)に示す。我々はこの効果を実証するため、THR1000の入り口スリットと集光ミラーの間に、透過率の空間分布がガウス関数状のアポダイジングフィルタ (Raynard Corporation, Apodizing, Bullseye 0.04 - 1.0 OD, 25 mm) を挿入し、ビーム周辺部を減光することで、図9(b)のようなビームプロファイルを実現した。

アポダイジングフィルタによりビーム整形を行った分光器により得られたヘリウム-ネオンレーザの計測スペクトルを図9に灰線で示す。黒線はビーム整形をしないときの計測結果であり、両者は強度で規格化している。ビーム整形により、装置関数の裾部を3割ほど抑制することができることを確かめた。

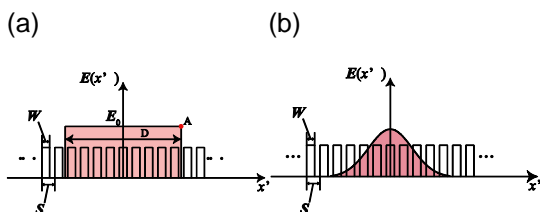


図10 回折格子に入射する光強度分布の概念図。(a): 一般的な分光器では、回折格子上的光強度分布は矩形になる。(b): アポダイジングフィルタにより、ガウス関数状の光強度分布に整形する。

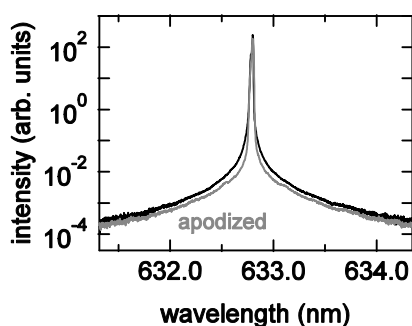


図10 アポダイジングフィルタ有り(灰線)、無し(黒線)で計測したヘリウム-ネオンレーザのスペクトル

### 4. 研究成果

- (1) ソフトウェアビニング・大型グリズムの組み合わせにより  $10^6$  以上のダイナミックレンジを持つ分光計測を実証した。
- (2) LHD から Balmer- $\alpha$ 線スペクトルを上記システムで計測することができた。そのプロファイルの解析により、プラズマコア領域における原子密度の評価方法を考案した。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

K. Fujii, S. Atsumi, S. Watanabe, T. Shikama, M. Goto, S. Morita, and M. Hasuo  
 「Development of a high dynamic range spectroscopic system for observation of neutral hydrogen atom density distribution in Large Helical Device core plasma」  
 Review of Scientific Instruments **85**, 023502 (2014) doi: 10.1063/1.4863650  
 (査読有り)

〔学会発表〕(計 7 件)

中井悠太, 篠原正季, 高橋佑理子, 後藤基志, 森田繁, 蓮尾昌裕, 藤井恵介  
 高イオン温度 LHD プラズマに対する高ダイナミックレンジ Balmer- $\alpha$ 線分光計測  
 日本物理学会 第 69 回年次大会  
 (2014 年 3 月 27 日 東海大学)

藤井恵介, 後藤基志, 森田繁, 蓮尾昌裕  
 高ダイナミックレンジ Balmer- $\alpha$ 線分光法による LHD コアプラズマ中水素原子密度のポロイダル分布の評価  
 プラズマ・核融合学会 第 30 回年会  
 (2013 年 12 月 5 日 東京工業大学)

K. Fujii, M. Goto, S. Morita, and M. Hasuo  
 Electron Density Dependence of the Neutral Hydrogen Atom Transport in LHD Core Plasmas Studied by Balmer- $\alpha$  Spectroscopy  
 9th Asia Plasma and Fusion Association Conference  
 (2013 年 11 月 5 日, Gyeongju City, Korea)

S. Atsumi, T. Shikama, M. Hasuo, and K. Fujii  
 Wing Suppression of Instrumental Functions by Beam Shaping for High Dynamic Range Spectroscopy  
 9th Asia Plasma and Fusion Association Conference  
 (2013 年 11 月 5 日 Gyeongju City, Korea)

渥美俊介, 四竈泰一, 蓮尾昌裕, 藤井恵介  
高ダイナミックレンジ分光計測のためのス  
ペクトル裾部装置関数の制御  
日本物理学会 2013 年秋季大会  
(2013 年 9 月 28 日 徳島大学)

藤井恵介, 渥美俊介, 渡辺翔, 後藤基志,  
森田繁, 蓮尾昌裕  
LHD プラズマ中 Balmer- 線の高ダイナミッ  
クレンジ高分解分光計測  
日本物理学会 第 68 回年次大会  
(2013 年 3 月 27 日 広島大学)

藤井恵介, 四竈泰一, 後藤基志, 森田繁,  
蓮尾昌裕  
LHD における中性水素ダイナミクスの分光  
研究 における中性水素ダイナミクスの分光  
研究 (招待講演)  
プラズマ・核融合学会第 29 回年会  
(2012 年 11 月 27 日 福岡県春日市)

〔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  
藤井 恵介 (Keisuke Fujii)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：10637705