

古典的なピンホールカメラを用いた 先進的なイメージング放射計測

向井清史

皆様は放射という言葉に耳にされたことはあるでしょうか？放射とは、物体がその温度に対応した光（電磁波）を放出する現象のことを言います。身近な放射の一つに、放射式の赤外線ストーブがありますが、このストーブによる暖房のように、放射は熱を四方八方へと拡がらせることができます。現在、研究開発が進められている核融合炉では真空容器内壁の局所的な熱負荷を低減させることが重要な技術的課題です。そのためにプラズマからの放射を有効利用する手法の研究が進められており、プラズマからの放射状態を詳細に調べる計測器が必要です。また、大型ヘリカル装置（LHD）のプラズマは複雑な形状をしているため、カメラで写真を撮るように広範囲の情報を細かく得ることのできる、イメージング計測が重要となります。今回は、このイメージング放射計測を行う、イメージングボロメータという計測器について紹介します。

ボロメータ (bolometer) の語源は、ギリシャ語の“bole(光線)” + “metron(測る)”です。したがって、イメージングボロメータは、プラズマからの放射(光)をイメージ(画像)として計測する装置になります。計測対象となるプラズマからの放射は幅広い波長帯域の光から構成されており、様々なプラズマの情報が含まれていますが、ボロメータ計測では、プラズマからの放射の総量とその空間分布を調べることを目的としています。NIFS ニュース No.218 (2014年6/7月号) では、特定の波長の光を取り出して計測する分光計測によって、プラズマ中の不純物の振る舞いを調べる手法が紹介されています。一方、幅広い波長帯域のプラズマ放射を検出するには、光を受け止めて温度が上がりやすい材料(金属薄膜)を炭素コーティングで黒色化した検出器が用いられます。ここで、イメージング計測をする際に問題となるのが、光学系です。一般的なカメラに使われているようなレンズは波長帯域によって特性が異なるため、プラズマからの放射のような広範囲の波長帯域の画像を撮影しようとする、波長によって像がずれてしまい(色収差と呼ばれる現象です)、詳細な画像を得ることができません。その解決策となるのが、ピンホー

ルカメラです。ピンホールカメラとは、図1に示すように小さな穴(ピンホール)のみを用いて撮影する、古典的なカメラです。牛乳パックやお菓子の箱の底に針で穴を開けて、反対側に写真用フィルムを貼って作った方もおられるかもしれません。このピンホールカメラはレンズを用いていないため、波長による像のずれ(色収差)の影響を抑えることができます。したがって、古典的な手法でありながら、実は最先端のイメージング放射計測に適した手法なのです。

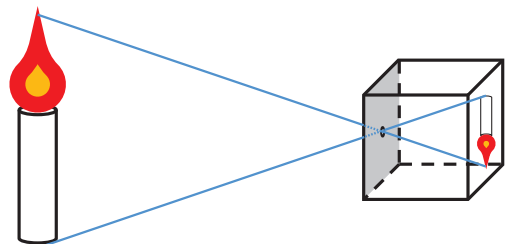


図1：ピンホールカメラの原理。物体はピンホールを通してフィルムに写し出される。

実際にLHDに設置されているイメージングボロメータの概観を図2に示します。装置は主にピンホールカメラ部と赤外線カメラ部から構成されています。プラズマからの放射は、8ミリメートル角の正方形のピンホールを通りフィルムに照射されます。ここで、フィルムには、大きさ13×11センチメートル、厚さ2.5ミクロン(1ミクロンは1000分の1ミリメートル、アルミ箔の厚さが10ミクロン程度)の白金の薄膜を用いています。先述のように、幅広い波長帯域の光から構成されているプラズマからの放射を計測するため、白金の薄膜の両面を炭素コーティングし黒色化することで、遠赤外～軟X線領域までの幅広い波長帯域からの光を検出しています。放射が強い部分はそれだけフィルムの温度が上昇するので、フィルムには温度分布が生じることになります。フィルムは十分に薄いので表裏で同じ温度をしていると考えられるため、フィルムの温度分布を裏側から赤外線カメラで計測します。ここでの光学系は赤外線カメラ用なので、赤外線用のレンズを用いることができます。このように、赤外線カメラでプラズマを直接計測

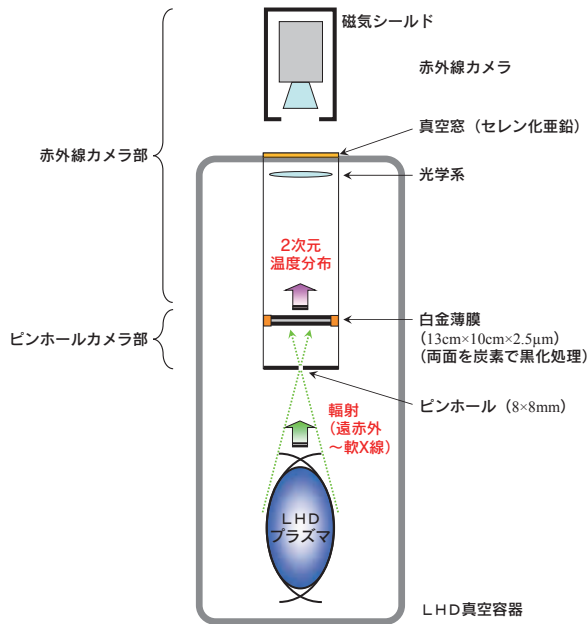


図2：イメージングボロメータの構成図。プラズマからの放射は、ピンホールを通して薄膜の温度分布として映し出され、赤外線カメラで計測される。

すると赤外線領域しか計測できませんが、ピンホールカメラと赤外線カメラとを組み合わせることで、幅広い波長帯域のプラズマからの放射状態を知ることができます。

さて、核融合発電を実現するためには、中心部で1億2千万度を超える高温のプラズマを閉じ込める必要がありますが、一方、閉じ込めている領域の外側では、周辺部に出てきたプラズマの温度を十分に下げて、あらかじめ決められた場所（ダイバータと呼んでいます）にプラズマを終端させる必要があります。このダイバータの熱負荷を低減することが、核融合炉実現のための最重要課題の1つとなっています。そこで、中心プラズマの性能を高めると同時に、周辺部に出てきたプラズマの熱をダイバータに至るまでの間に放射によって四方八方に分散させる（放射損失を増大させる）ことで、ダイバータへの熱負荷を低減させる運転方法の確立が求められています。この方法である「デタッチメント（非接触）プラズマ」については、NIFS ニュース No.213（2013年8/9月号）に詳しく書かれています。イメージングボロメータは、このデタッチメントプラズマの研究における放射分布計測として、重要な役割を果たしています。図3（a）のようにLHDプラズマを上から見

込む、イメージングボロメータの計測視野を図3（b）に示します。プラズマ中心部からの放射が強くなると磁気軸付近が、プラズマ周辺部からの放射が強くなるとヘリカルダイバータX点と呼ばれる場所の近くが、それぞれ高い値を示すと考えられます。図4（a）はLHDプラズマ周辺部に不純物ガスとしてネオン（Ne）を、図4（b）はクリプトン（Kr）をそれぞれ入射し、放射損失を増加させた実験の計測結果です。計測結果を見ると、クリプトンではネオンと比べてプラズマ中心部（磁気軸）付近での放射が強くなっていることが分かります。これは、クリプトンはネオンと比較して高い温度で電離するため、より温度の高いプラズマ中心部で放射が生じているためであると考えられます。

このように、LHDにおいてもプラズマに入射する不純物ガスの種類によって放射が生じる場所を制御できることが分かってきました。今後、イメージングボロメータ等のLHDにおける計測技術を利用して、不純物ガス入射条件を最適化することでデタッチメントプラズマ等の研究を進展させ、核融合プラズマの研究の発展に貢献することが期待されます。

（高温プラズマ物理研究系 助教）

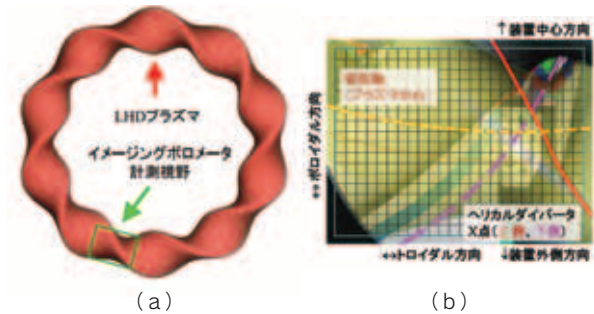


図3：(a) LHD プラズマの上面図と (b) イメージングボロメータの視野図。黄色の点線はプラズマ中心の磁気軸を、赤の実線とピンクの破線はプラズマ周辺部のヘリカルダイバータX点の線の上側と下側をそれぞれ表している。

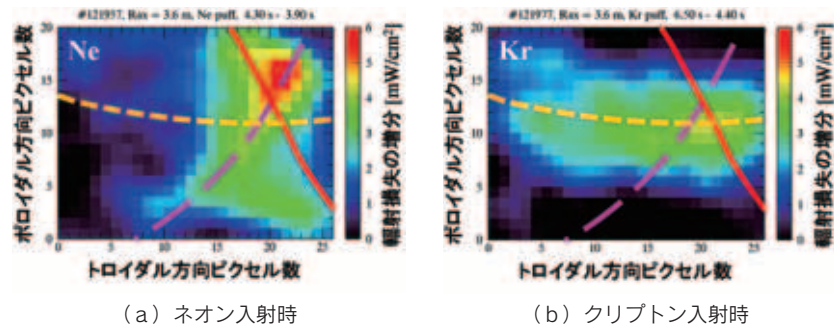


図4：図3の視野で計測した、不純物ガス入射時における放射損失分布の入射前からの増分。ネオン入射時はプラズマ周辺部から、クリプトン入射時はプラズマ中心部からの放射がそれぞれ強くなっていることが分かる。