

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007 年度～2008 年度
 課題番号：19560831
 研究課題名（和文） 高温プラズマ中における高密度プラズモイドの非拡散的輸送の観測
 研究課題名（英文） Observation of non diffusive transport of high density plasmoid in high temperature plasmas
 研究代表者
 坂本 隆一 (SAKAMOTO Ryuichi)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授
 研究者番号：10290917

研究成果の概要： 本研究では、「高速カメラによる観測」と「フォトダイオードアレイを用いた計測」を相補的に用いた「高時間分解能 3 次元イメージング手法」を開発し、高温プラズマ中へ入射された固体水素ペレットが溶発して形成される高密度プラズモイドの非拡散的輸送の詳細観測を行った。その結果、これまでは時間的または空間的に平均されてしまい、限定的にしか観測され得なかった溶発プラズモイドの分離加速現象（すなわち、非拡散的輸送現象）を定性的に明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：磁場核融合

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め方式の核融合炉において核燃焼制御を行う上で、燃料供給は最も重要な制御要素であり、核融合炉心プラズマへの高効率な燃料供給手段の確立が必要である。高温プラズマへの高効率な燃料供給手段として固体水素の高速入射（ペレット入射法）があり、高温プラズマ中における固体水素の溶発特性について実験的、理論的側面から多くの研究がなされてきている。これらの研究によって、固体水素ペレット入射法の有効性が

示されている一方、将来の核融合炉における大容量・高温プラズマでは固体水素ペレットがプラズマ中心部へ到達する前に溶発してしまうことが懸念され、燃焼プラズマへの燃料供給手段とするためにはさらなる研究が必要である。最近の研究で、固体水素ペレット入射による高温プラズマへの粒子供給特性を理解する上で、固体水素の溶発に伴ってプラズマ中に生成される高密度プラズモイドの挙動解明の重要性が示されてきている。すなわち、実効的な粒子デポジションは固体

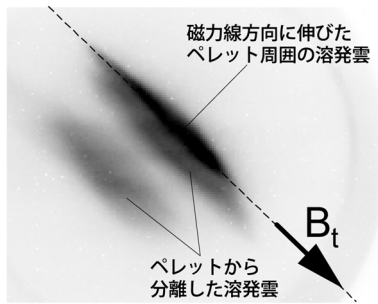


図1 高速カメラで撮影したペレット溶発プラズモイド像(露光時間 10 μ s). 固体水素ペレットが溶発して磁力線上に伸びたプラズモイドの他に、分離したプラズモイドが観測されている。

水素の高温プラズマ中での溶発位置のみならず、溶発プラズモイドと閉じ込め磁場との相互作用に起因する粒子の非拡散的輸送が無視できないことが実験的、理論的に示されている。すなわち、溶発プラズモイドの非拡散的輸送機構を理解することによって、核融合炉心プラズマへの燃料供給を可能とするような固体水素ペレット入射法の最適化の指針が得られる可能性がある。私がこれまで行ってきた固体水素ペレット溶発観測においても、溶発位置と実効的なプラズマ密度増加位置のずれが観測されており、非拡散的な粒子輸送の存在を示唆している。また、高速カメラを用いた2次元イメージング計測では溶発プラズモイドの分離加速を示唆する観測結果も得られており(図1)、非拡散的粒子輸送の存在を傍証している。しかしながら、これまでの観測は時間的な分解能が十分ではないために、非拡散的粒子輸送の一面を観測しているに留まっている。溶発プラズモイドの挙動は sub- μ s 程度の現象であり、その運動の方向も重要な情報であることから、今後の研究には、高時間分解能の3次元観測手法が必要である。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、固体水素ペレットが高温プラズマ中で溶発して形成される高密度プラズモイドの非拡散的輸送の詳細観測を行い、高温プラズマへ散逸してゆく機構を明らかにすることによって、固体水素ペレット入射による粒子供給法の最適化の指針を得ることである。その中で今回は、高時間分解能3次元イメージング手法を用いて溶発プラズモイド挙動の直接観測を行い、その

非拡散的輸送現象を明らかにする。

3. 研究の方法

固体水素ペレットが溶発して形成されるプラズモイドの挙動を観測するために、(1) 高速カメラと2分岐イメージングファイバを組み合わせた『ステレオ三次元計測システム』、および(2) 8 \times 8 マトリックスのバンドル光ファイバ光学系と高速 Si-PIN フォトダイオード検出器を用いた『ペレット溶発発光高速計測システム』を開発した。

これらの観測システムを用いて、大型ヘリカル装置(LHD)で生成した高温プラズマ中へ高速入射した固体水素ペレットの溶発現象を高時間分解能 (> 1 MHz) かつ高空間分解能(~ 80,000 pixels)で観測した。

4. 研究成果

(1) ステレオ三次元計測システム

3次元空間点 $\mathbf{M}=(X, Y, Z)$ と、それを観測したカメラ画像上の座標 $\mathbf{m}=(u, v)$ は射影行列 \mathbf{P} (3 \times 4 の行列) を用いて

$$s\mathbf{m} = \mathbf{P}\mathbf{M},$$

と関連付けられる。しかしながら、1点からのカメラ観測では奥行き方向の情報が欠落するため、空間点の座標を一意に知ることにはできない。そこで、異なる観測点から同一空間点を観測し、空間座標を推定するのが、ステレオ法である(図2)。異なる観測点から観測したカメラ画像上の座標 $\mathbf{m}'=(u', v')$ 、その射影行列を \mathbf{P}' とすると以下の連立方程式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} P_{11} - uP_{31} \\ P_{21} - vP_{31} \\ P_{14} - uP_{34} \\ P_{24} - vP_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} uP_{31} - P_{11} & vP_{32} - P_{12} & uP_{33} - P_{13} \\ vP_{31} - P_{21} & vP_{32} - P_{22} & vP_{33} - P_{23} \\ uP_{34} - P_{14} & uP_{32} - P_{12} & uP_{33} - P_{13} \\ vP_{34} - P_{24} & vP_{32} - P_{22} & vP_{33} - P_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

すなわち、異なる2点から観測するカメラの射影行列が既知ならば、2つの画像座標から空間点を特定することが可能である。射影行列を求めるためには、既知の空間点を観測し、上式から射影行列を求め、2%程度の誤差で3次元位置を同定できることを確かめた。また、観測対象である溶発

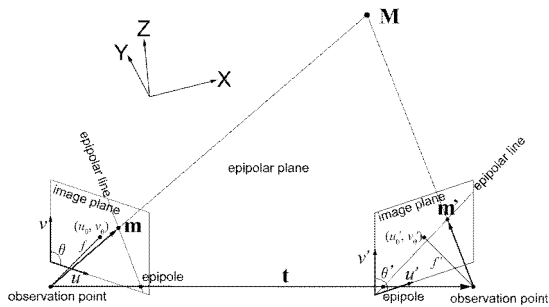


図2 ステレオ観測による3次元空間位置推定の原理.

ラズモイドの挙動はsub- μ s程度の高速度現象であり、2点からの観測の同時性が重要であることから、図3に示す様な2分岐イメージングファイバを用いて、2点からの画像を一つの高速度カメラに結像して、同時性を確保した。

(2) ペレット溶発発光高速計測システム
高速カメラによる2次元計測によって、固体水素ペレットの溶発現象の構造を明らかにすることができた。しかしながら、高速カメラのフレームレートは固体水素ペレット溶発現象のダイナミクスを観測するには不十分である。高速カメラの時間分解能を補うために、8x8マトリックスのバンドル光ファイバとSi-PINフォトダイオードを組み合わせたペレット溶発発光高速計測システムを構築した。このシステムでは、高速カメラと同じ視野角で固体水素ペレットの溶発現象を観測しており、高速カメラに比すると空間分解能は1/20以下に減少するものの、sub- μ sの時間分解能を有しているため、溶発挙動のダイナミクスを観測することが可能となった。

(3) 固体水素ペレット溶発現象の観測
ステレオ三次元計測システムとペレット

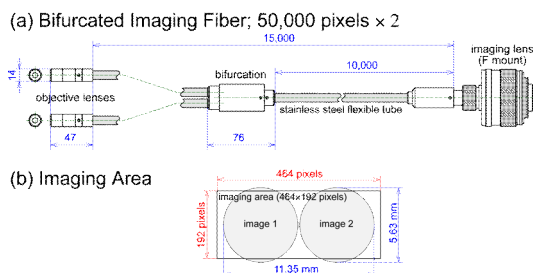


図3 高速現象観測の同時性を確保するために開発した、(a) 2分岐イメージングファイババンドルと、(b) 高速カメラ撮像素子上の結像領域。

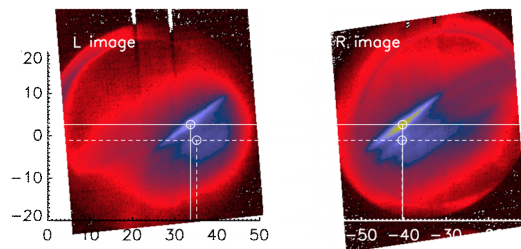


図4 ペレット溶発プラズモイドのステレオ対画像。奥行き方向距離は各々の画像の対応点の横座標の視差の逆数に比例する。

溶発発光高速計測システムを相補的に利用することによって、これまでは時間的または空間的に平均されてしまい、限定的にしか観測され得なかった溶発プラズモイドの離散的分離挙動が明らかになった。図4はペレット溶発プラズモイドのステレオ対画像を示す。発光強度の弱い部分の分布も明確にするために、疑似カラーにて示した。磁力線に沿って伸びたペレット溶発プラズモイドの最も明るい部分(白実線の交点)を固体水素ペレットの存在位置として、その空間位置を推定した。図5は固体水素ペレットの存在位置を時刻に対してプロットした図である。赤線はプラズマに入射したペレットが初期速度を保ったまま飛翔する場合に予測される存在位置、青点はステレオ観測によって推定されるペレット溶発位置を示した。赤線と青点が一致することから、ペレットは入射速度を維持したまま溶発し、プラズマ中心部へ向かって飛翔していることが示される。また、図4の高速カメラ画像を見ると、ペレット溶発プラズモイドから分離したプラズモイドも観測されている。その空間位置(白点線の交点)を図5に緑点としてプロットした。緑点は青点よりも15 cm程度ペレット入射側で観測され

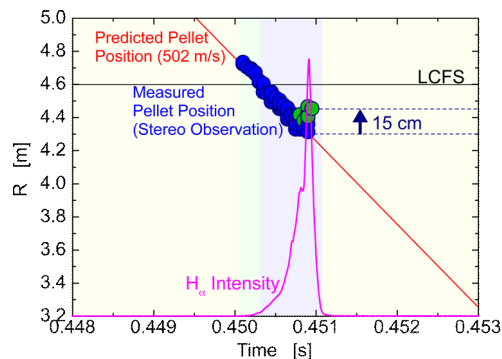


図5 固体水素ペレットの存在位置の時間変化。

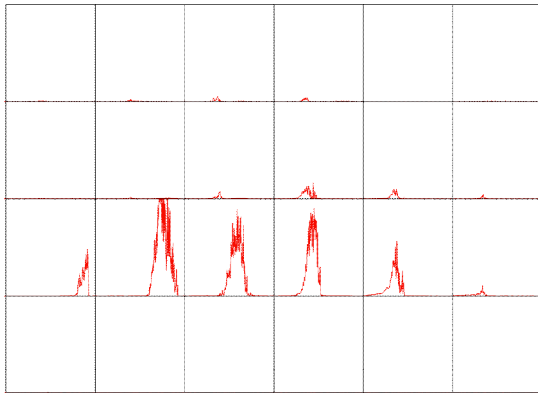


図 6 固体水素ペレット溶発時の発光強度変化。各マスはマトリックス状のファイバアレイの各チャンネルで観測された溶発発光の 1.5 ms 間の強度変化を示している。

ることから、分離プラズモイドはペレット溶発位置から外側に向かって吐き出されていることが示される。この現象はペレット溶発プラズモイドが背景プラズマに吸収される前に供給粒子が非拡散的に外側（低磁場側）へ輸送されていることを示している。

分離プラズモイドの分離周波数を調べるために、ペレット溶発発光高速計測システムを用いて、固体水素ペレット溶発時の発光強度変化を測定した結果を図 6 に示す。各チャンネルに観測されるスパイク状の発光強度変化は高速カメラ観測との比較により、プラズモイドの分離現象を示していると考えられ、その典型的な発現周波数は 100~150 kHz 程度であることが分かった。各チャンネル間の発光強度変化の時間差を計ることによって、プラズモイドの輸送速度を知ることができるが、現状では異なるチャンネル間でのスパイクの同定が困難であり、分離プラズモイドの速度を推定することはできていない。

(4) まとめと今後の課題

高速カメラと 2 分岐イメージングファイバを組み合わせた『ステレオ三次元計測システム』、および、8x8 マトリックスのバンドル光ファイバ光学系と高速 Si-PIN フォトダイオード検出器を用いた『ペレット溶発発光高速計測システム』を構築した。これらの観測システムを相補的に用いて、大型ヘリカル装置 (LHD) で生成した高温プラズマ中へ高速入射した固体水素ペレットの溶発現象を高時間分解能 (> 1 MHz) かつ高空間分解能 (~ 80,000 pixels) で観測した。その結果、これま

では時間的または空間的に平均されてしまい、限定的にしか観測され得なかった溶発プラズモイドの離散的分離挙動を明らかにした。プラズモイドの分離周波数は 100~150 kHz 程度であることが『ペレット溶発発光計測システム』によって、そのプラズモイドが低磁場側へ加速されていることが『ステレオ三次元高速計測システム』によって明らかとなった。本研究によって、ペレット溶発プラズモイドの分離加速現象（すなわち、非拡散的輸送現象）によって輸送されるプラズモイドの移動が明らかになり、固体水素ペレット入射を用いた高温プラズマへの粒子供給特性の定性的理解を進めることができた。しかしながら、これらの溶発プラズモイドの非拡散的輸送が、高温プラズマへの実効的な粒子供給特性に及ぼす影響は未だ明らかではない。今後は分離加速される溶発プラズモイド中に含まれる粒子数や温度を明らかにすることによって、定量的に理解する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

①坂本隆一, 「核融合実験装置におけるペレット入射による燃料供給」, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 83 (2007) 560-566.

〔学会発表〕 (計 2 件)

②坂本隆一, 「LHD における固体水素ペレットの溶発挙動と粒子供給特性」, 第 7 回核融合エネルギー連合講演会, 2008 年 6 月 19 日, 青森県青森市

①R. Sakamoto et al., "Pellet injection and internal diffusion barrier formation in LHD plasmas", 11th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers, September 26-28, 2007, Tsukuba (Japan).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 隆一 (SAKAMOTO Ryuichi)

自然科学研究機構・核融合科学研究所・准教授
研究者番号: 10290917