

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20760586

研究課題名（和文） モーショナルシュタルク効果計測光学系を利用した ELM パルス伝搬機構の解明

研究課題名（英文） Understanding mechanism of ELM pulse propagation using optical system of motional Stark effect diagnostics

研究代表者

鈴木 隆博 (SUZUKI TAKAHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹

研究者番号：60354594

研究成果の概要（和文）：

核融合プラズマ内部の電流分布を測定するモーショナルシュタルク効果計測器を活用し、高閉じ込めモード(Hモード)において間欠的に放出されるプラズマ(ELMパルス)のスクレイプオフ層での伝搬を計測する手法を開発した。プラズマ電流が大きくELMパルスの持つエネルギーが大きいほど、大半半径方向へのELMパルスの伝搬速度が大きいことを明らかにした。さらにELMパルスが主プラズマ表面から離れていくほど伝搬速度が増加(加速)することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

A novel technique measuring the propagation of plasma ejected intermittently in the high-confinement mode plasma (ELM pulse) has been developed, utilizing the motional Stark effect diagnostics that measure current profile in the fusion plasma. With this new technique, it has been found that the propagation velocity of the ELM pulse in the major radius direction is faster for ELM pulses having larger energy ejected from plasma with larger plasma current. It has also been found that the velocity of the ELM pulse increases with increase in the distance from the plasma surface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
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：プラズマ・核融合、Hモードプラズマ、ELMパルス、モーショナルシュタルク効果、ビーム放射分光、プラズマ密度、スクレイプオフ層、背景光

## 1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉(ITER)やその先の原型炉では炉心プラズマに高閉じ込めモード(Hモード)が想定されている。Hモードプラズマでは主プラズマ周辺部にELMと呼ばれる不安定性が発生し、間欠的にプラズマを放出

する(ELMパルス)。放出されたプラズマは壁及びダイバータに向かい材料に損傷をもたらすため、放出機構や放出後のELMパルスの振る舞いについて世界的に精力的な研究が続けられていた。

従来、ELMパルスの伝搬は電磁気プローブ

と静電プローブを組み合わせるなどして比較的加熱パワー・低温のプラズマにおいて測定されていた。本研究課題では、核融合炉領域の高温でも適用可能なビーム放出光を用いて ELM パルスの伝搬を測定する手法を開発する点に特長がある。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、核融合に必要な H モードプラズマにおいて観測される ELM パルスのプラズマ外での伝搬を調べ、プラズマパラメータへの依存性から ELM パルスの伝搬機構の解明を目指す。

## 3. 研究の方法

モーショナルシュタルク効果(MSE)計測器は計測用中性粒子ビーム(NB)をプローブとし、信号光強度はプラズマ密度に比例する。このため、ELM パルスの伝搬をプラズマ密度の伝搬として測定できることが期待される。ただし、MSE 計測器は ELM パルスによる信号光以外の背景光も観測するため、この背景光を除去し ELM パルスの伝搬速度を評価する手法を確立することが肝要である。目的達成のために、以下の小課題を設定し課題に取り組んだ。

- (1) JT-60U トカマクに設置された MSE 計測光学系の背景光測定用検出器(図 1)に多チャンネル高速サンプリングデータ収集システムを設置し、既存の信号光測定系と同時に背景光を測定する。

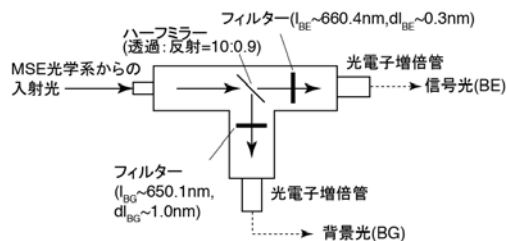


図 1: 背景光測定用検出器。ハーフミラーで分割した入射光を光の波長域によって NB からのビーム放出光(BE)と背景光(BG)に分け、同時に測定した。本研究課題では背景光(BG)測定用に高速サンプリングデータ収集システムを設置した。

- (2) 信号光から背景光の効果を除去する手法

を開発すると共に、H モードプラズマのスクレイプオフ層を伝搬する ELM パルスによる密度増加の時間遅れから ELM パルスの伝搬速度などを評価する手法を確立する。

- (3) この手法を用いて ELM パルスの伝搬速度等のプラズマパラメータに対する依存性を調べ、ELM パルスの伝搬を支配する物理を実

験的に明らかにする。

## 4. 研究成果

本研究課題を開始した H20 年度は、本研究を実施する JT-60U トカマクが 8 月に運転を停止することとなったため、上記の小課題(1)として設定した計測器の整備と H モードプラズマでの ELM パルス伝搬データの収集に専念した。

H21 年度には、ELM パルス伝搬測定のために位置形状を最適化したプラズマにおいて、背景光を除去する手法に加えて ELM パルスの伝搬速度を評価する解析手法も確立した。ELM パルスの伝搬速度を評価し論文を発表した。これにより、本研究課題の遂行にあたり特に重要な小課題(2)を達成した。

図 1 の背景光測定用検出器(P17-7)がプラズマ外を観測する様にプラズマの位置形状を図 2 の様に最適化し、ビームが短時間停止するタイミングで信号光と背景光用の光電子増倍管感度を相対校正した結果が図 3 である。ビーム停止中はビーム放出光が無いので、信号光は背景光のみを観測する。このタイミングで両者の光電子増倍管信号強度が一致する様に感度校正を行った。ビーム停止中は ELM も含めて信号光と背景光の時間変化が一致している(図 3 (c))ことから、背景光の時間変化は波長に大きく依存しないことがわかった。ビーム入射中には信号光と背景光の強度に差が生じ(図 3 (c))、この差が実効的なビーム放出光の強度である。背景光測定用検出器は数が限られるため、背景光は一部の空間点のみで実測し、背景光の時間変化がプラズマ外では空間位置に強く依存しないと仮定して他の計測点の背景光の除去にも使用した。なお、ビーム停止中の感度校正の残差が空間的にほぼ一様であることから、この仮定が妥当であると検証した。

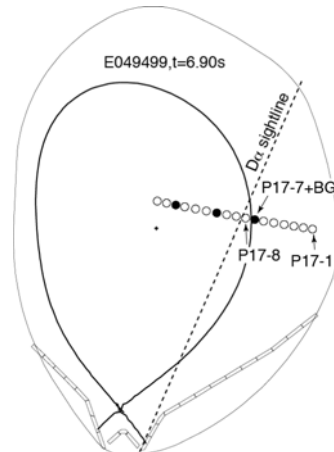


図 2: ELM パルス伝搬計測に用いた JT-60U プラズマの境界(太線)と MSE 計測点(白丸)。黒丸は図 1 に示した背景光測定用検出器の計測点。点線は外側ダイバータを見込む D $\alpha$  計測視線。

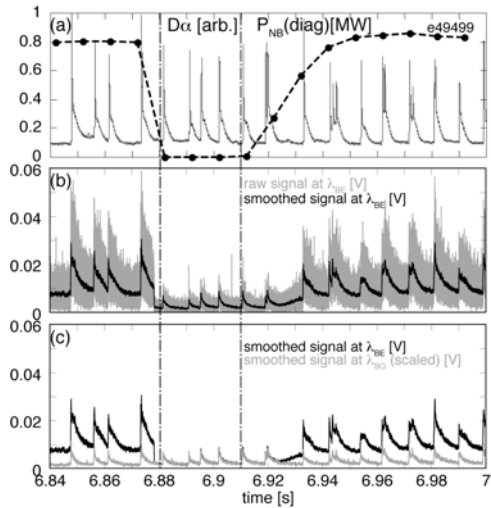


図3：ビームパワー停止を用いた検出器感度較正手法の開発。(a)外側ダイバータの D $\alpha$  発光強度と計測用ビームパワー。(b)信号光の生信号と±50 $\mu$ 秒での平滑化信号。(c)±50 $\mu$ 秒で平滑化した信号光(黒線)と背景光(グレー線)。背景光強度はビーム停止期間中で信号光強度に一致するように最小2乗法により較正した。黒線とグレー線の差が実効的なビーム放出光の強度である。

このようにして求めた実効的なビーム放出光の時間変化を、ダイバータからの D $\alpha$  光を基準にして一つの放電の 594 回の ELM について平均したのが図 4 (a)である。Ch6 は Ch7 より 62mm だけプラズマより遠い位置を観測

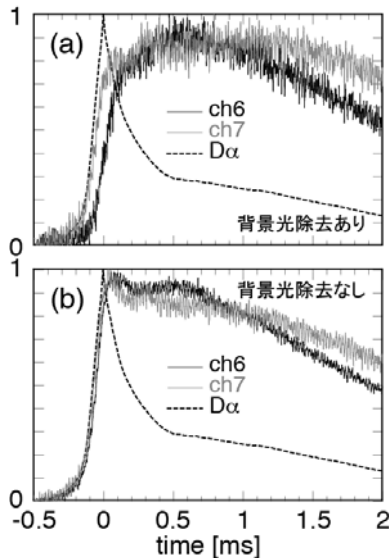


図4：ダイバータの D $\alpha$  光ピークのタイミングを用いて同期平均した ch6 と ch7 の位置の信号光。Ch6 は ch7 よりプラズマ表面から遠い(図 2)。(a) 背景光を除去した場合、(b)除去しない場合。Ch6 の信号が ch7 の信号より遅れている(図 4(a))ことは、ELM パルスが ch7 から ch6 の位置まで動くのにかかった時間を表している。ELM パルスの伝搬速度を正しく評価するには背景光の除去が不可欠である。

しており、信号の遅れは ELM パルスの伝搬速度を表している。一方、背景光を除去しなかった場合(図 4 (b))では ch6 と ch7 の信号に遅れが見られない。これは背景光が ch6 と ch7 に同時に入射するために ELM パルスの伝搬を表すビーム放出光の遅れが隠されてしまうためである。

各観測点の位置とそこでのビーム放出光の遅れ時間を図 5 にまとめた。ELM パルスの伝搬速度は 0.8-1.8km/s の範囲にあり、平均速度は 1.4km/s であることを明らかにした。以上の新しく開発した解析手法を用いることで、本来は主プラズマ中の電流分布計測用である MSE 光学系を用いて主プラズマ外での ELM パルスの伝搬を計測できることを原理実証し論文を発表した。

H22 年度は、小課題(3)の前段階として、上記の解析手法を様々な位置形状のプラズマに適用するための検討と解析を進めた。すなわち上記の解析手法では、背景光チャンネルがプラズマ外を観測するようプラズマの位置形状を最適化し、背景光の時間変化の空間位置依存性がプラズマ外で小さいという仮定の下に背景光を除去する。解析を進めたところ、背景光の時間変化の空間位置依存性はプラズマ外のみならずプラズマ内でも比較的小さいことがわかり、背景光チャンネルがプラズマ内を観測するような位置形状であっても ELM パルスの伝搬解析を行える見通しを得た。これにより ELM パルス伝搬解析の対象となる JT-60U プラズマの母集団数を増やし、ELM パルス伝搬速度等のプラズマパラメータへの依存性を広範囲に調べることが期待できる。さらに小課題(3)の一部として実施した解析において、ELM パルス伝搬速度はダイバータ部の D $\alpha$  光ピーク強度に強く依存しないという結果を得た。

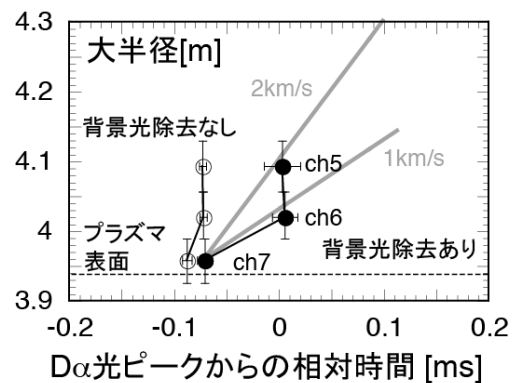


図5：計測点の大半径を縦軸に、D $\alpha$  光ピークに対する MSE 計測チャンネルにおける信号光増加の遅れ時間を横軸に取った図。傾きは ELM パルスの伝搬速度を表す。黒丸は背景光を除去した場合。白丸は背景光を除去しない場合。背景光を除去しない場合は、背景光の影響で伝搬速度が大きく評価されてしまう。

H23 年度(最終年度)は小課題(3)に取り組んだ。JT-60U 実験データの解析を継続し、異なるパラメータのプラズマにおいて ELM パルスの伝搬速度を評価して ELM パルス伝搬速度のプラズマパラメータ依存性を調べた。図 6 に ELM パルス伝搬速度と ELM パルスの平均熱エネルギーの関係を示す。同じトロイダル磁場 2.7T で異なるプラズマ電流の 2 つのプラズマを比較した。プラズマ電流が大きく ELM パルスの持つエネルギーが大きいほど、大半径方向への ELM パルスの伝搬速度が大きいことを明らかにした。さらに、これらの放電において図 5 と同様の解析を行ったところ、いずれの放電でも ELM パルスが主プラズマ表面から離れていくほど伝搬速度が増加(加速)することを明らかにした。ELM パルスの伝搬速度が ELM パルスの平均熱エネルギーに依存すると共に ELM パルスの加速機構が存在するという本観測結果は、ELM パルス伝搬機構の理論モデルの検証にとって重要な成果である。また、MSE 計測器は様々なトカマク装置で基幹計測になっており、本研究課題で開発した手法はそれらの装置で広く ELM パルスの伝搬計測を可能にした意義がある。

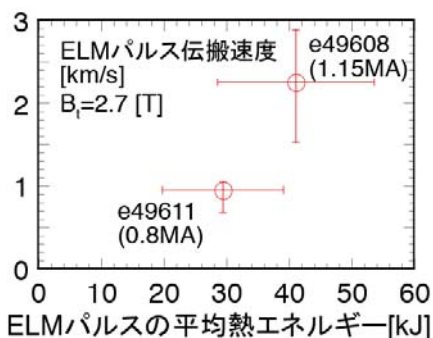


図 6 : ELM パルス伝搬速度と ELM パルスの平均熱エネルギーの関係。同じトロイダル磁場 2.7T で異なるプラズマ電流の 2 つの JT-60U プラズマ(放電番号 e49608 と e49611)を比較。E49608 はプラズマ電流 1.15MA、e49611 は 0.8MA。プラズマ電流の大きなプラズマでは ELM パルスの平均熱エネルギーが大きく、ELM パルスの伝搬速度が大きい。

## 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 2 件)

- ① T. Suzuki, N. Oyama, N. Asakura and T. Fujita, “Measurement of Type-I ELM Pulse Propagation in SOL Through BES Use of MSE Diagnostics in JT-60U and Impact of ELM on MSE Diagnostics”, Proceedings of 37th EPS Conference on

Plasma Physics, 34A, D4.516\_1 - D4.516\_4, 2010, 査読無し

- ② T. Suzuki, N. Oyama and N. Asakura, “Measurement of type-I edge localized mode pulse propagation in scrape-off layer using optical system of motional Stark effect diagnostics in JT-60U”, Review of Scientific Instruments, 81, 043502-1 - 043502-5, 2010, 査読有り  
DOI:10.1063/1.3378752

[学会発表] (計 3 件)

- ① T. Suzuki, N. Oyama and N. Asakura, “Measurement of Type-I ELM Pulse Propagation in SOL Using MSE/BES Diagnostics in JT-60U”, 第 53 回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会, 2011 年 11 月 17 日, 米国・ソルトレイクシティ
- ② T. Suzuki, N. Oyama, N. Asakura and T. Fujita, “Measurement of Type-I ELM Pulse Propagation in SOL Through BES Use of MSE Diagnostics in JT-60U and Impact of ELM on MSE Diagnostics”, 第 37 回ヨーロッパ物理学会, 2010 年 6 月 24 日, アイルランド・ダブリン
- ③ T. Suzuki, N. Oyama and N. Asakura, “Measurement of Type-I ELM Pulse Propagation in Scrape-Off Layer Using Optical System of Motional Stark Effect Diagnostics in JT-60U”, 第 51 回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会, 2009 年 11 月 2 日, 米国・アトランタ

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 隆博 (SUZUKI TAKAHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹

研究者番号: 60354594