

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340184

研究課題名(和文) 2層同時イメージング測定による核融合プラズマの周辺揺動の研究

研究課題名(英文) Simultaneous imaging diagnostics at two layers of the edge region of the fusion plasma for studying edge instabilities.

研究代表者

大館 暁 (Ohdachi, Satoshi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00270489

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円、(間接経費) 2,940,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマの周辺領域を、2種類のエネルギー領域を対象としたイメージング計測、VUVイメージングと可視イメージングにより2つの層において同時計測を行った。よりプラズマ内部に近いVUV光のイメージング計測装置の改良により6kHz程度までの計測が行えるようになった。大型ヘリカル装置の周辺部で観測されている周辺局在化モードの観測を行った結果、不安定性がプラズマの局所的な弱磁場側にポロイダル数 $m=2$ の構造をもって大きく広がることが観測された。このプラズマの変形から磁力線の構造を思わせる長い構造にそってプラズマが吐き出されることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Edge region of the magnetically confined fusion plasma is studied by the simultaneous two imaging diagnostics at two layers. One is using visible light and the other is using VUV light. By the improvement of the diagnostics for VUV light, measurement with higher frequency, up to 6k frame /sec has been achieved. In the edge localized mode study, deformation of the magnetic surface with poloidal mode number of $m=2$ has been observed. The phase of the deformation is fixed to the locally magnetic weak location. After the modification of the flux surface, expulsion of the plasma piece has been observed from the deformed position has been observed.

研究分野：プラズマ物理学

科研費の分科・細目：プラズマ物理学

キーワード：MHD不安定性 イメージング測定

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマの輸送は揺動による異常輸送であることは古くから信じられているが、具体的なメカニズムについては不明な点が多い。その理由はプラズマ中の揺動の時空間的な構造を計測することが難しいことにある。可視光を使ってプラズマの揺動の2次元構造を詳しく調べることができるSOL領域では、近年、輸送の理解が大幅に進んだ。これはガスパフイメージング(GPI)という手法でプラズマの密度揺動を直接に可視化した成果であり、プロブとよばれる高密度の塊の間欠的な移動が輸送を担っていることがわかってきた。SOLよりやや内側のプラズマ周辺部の揺動・不安定性には不明な点が多く残っており、当該領域の情報を含むより高いエネルギーの放射光を使ってイメージング測定による実験的な研究が有効と考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、核融合プラズマの周辺領域の揺動を高い空間分解能で可視化し、SOL領域の可視化と組み合わせることで、周辺からSOL部のプラズマの揺動と輸送を総合的に調べる理解するための計測機器の開発であった。周辺部の揺動の重要性は言うまでもない。ITERなどの次世代トカマク装置においては、高い閉じ込め特性を実現するために周辺部に輸送障壁を形成するが、第一壁やダイバータの損傷を招くEdge Localized Mode(ELM)と呼ばれる不安定性が問題となる。ELMを理解し制御することはプラズマの輸送研究の中心テーマの一つといえる。ELM制御にはペレット入射を使った手法なども研究されてきたが、現在では周辺プラズマに摂動磁場を加えてELMを小型化する手法(RMP)がもっとも有効と考えられており、RMPが不安定性にどのように作用して安定化に寄与するかを調べることは喫緊の研究課題となっている。大型ヘリカル装置においても周辺部は高ベータ化したときに不安定な磁気丘部として残るために、この領域の不安定性がどのようにふるまうのかを調べることはヘリカルタイプの核融合炉の実現性を左右する重要な問題である。

3. 研究の方法

本研究で構築する2種類の計測装置のうち一つはVUVカメラと呼ぶもので、プラズマの不純物のCVIの放射イメージを2次元かつ高速で測定するものである[2]。CVIのイオン化エネルギーは500eV程度であり、電離平衡を仮定した場合にはCVIのイオンは電子温度が100eV程度の領域からコアよりの領域に局在化している。CVIの放射強度は局所的な電子密度に比例するので、測定信号は主として電子密度揺動を反映する。この放射

層は周辺プラズマ中に存在し、接線方向から可視化することで周辺部たとえばペダスタル領域の揺動の2次元構造を直接可視化することができる。これにSOL領域を測定する可視高速カメラの計測を組みわせ、周辺領域のMHD不安定性がどのようにプラズマの閉じ込め劣化とつながっているかを調べる。またVUVカメラの2次元計測から周辺MHD揺動の空間構造を直接的に計測することができる。

4. 研究成果

VUVカメラの改良を行い計測可能なパラメータ領域を広げることができた。第一ミラーの大型化と、設置位置をプラズマに近づけることで、より広い視野の観測ができ、最大で5kHz程度までの揺動計測が可能になった(図1)

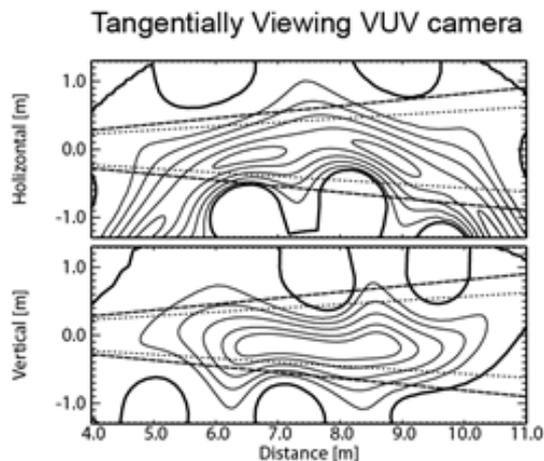


図1 大型ヘリカル装置における視野。太線部が新しい視野を示す。

このようなイメージング測定によりいくつかの新しい発見があった。一つはプラズマのコアに近い領域に発見された新しいMHDモードである[10]。大型ヘリカル装置はプラズマのコア部では磁気井戸の形成、プラズマの周辺部では強い磁気シアの形成によってMHD不安定性の成長を防ぐ戦略をとった磁場閉じ込め装置である。 β の上昇とともにプラズマのコア部はより深い磁気井戸に入ること、回転変換分布の上昇により $iota = 1/2$ の有理面がプラズマ中から消失することからコア部の不安定性は問題にならないと考えてきた。図に示すのは $m=2$ の回転モードの計測例で、コア部 $\Delta \rho \sim 0.3$ 程度のかかなり大規模なモードが成長していることがわかる。プラズマのコア部に近い領域で発現する不安定性のため、磁気プローブに観測される信号は非常に小さくこれまであまり注目されなかったが、イメージング計測によればかなり大規模な構造を持つ不安定性であることがわかる。これは、 $iota=1/2$ の有理面が無くとも、磁気

シアが弱まり $\text{iota}=1/2$ に近接した回転変換分布の場合に生じるインファナルモードではないかと考えている。インファナルモード単体では閉じ込め特性などに大きな影響はないようだが、大振幅 ELM、CDC などの周辺部の MHD 不安定性とカップルすることで大規模な崩壊現象を起こしている可能性があり、詳細な解析を進めている。

Topos

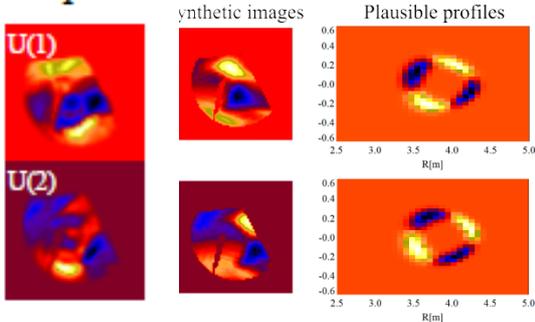


図2 接線 VUV カメラで観測された $m=2$ の接線像 (TOPOS) と、接線像の模擬イメージ (Synthetic Images)、模擬イメージを作るためのポロイダル断面像を示す。

大型ヘリカル装置ではプラズマの磁気軸を外側に移動させると、遷移後に揺動が完全に抑制させるクリアな H-mode 放電が観測される。しかし H-mode 遷移に伴う閉じこめ改善により圧力勾配が急峻化したのちに大規模な ELM が観測されるようになる。逆に内寄せの場合には遷移直後から MHD 不安定が観測されるために分布の改善は小さいが ELM もまた小規模となる。外寄せでの安定な遷移は MHD 安定性の改善で説明できるが大規模 ELM の原因については、まだ明解に理解できていない[6]。イメージング計測により大規模 ELM を初めて観測した。動画データの特異値分解した結果からは、大規模な ELM 的な揺動が観測されるときには、特異な接線像の変化が観測されている (図3) [14]。

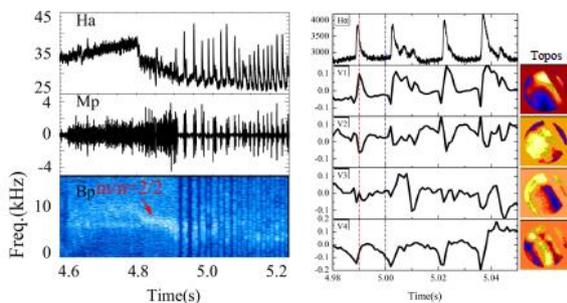


図3 大規模な ELM が観測されるときにの接線像の観測例

この大振幅 ELM の発現は磁気プローブで観測される $m/n = 1/1$, $m/n = 2/2$ の揺動と相

関があり $\text{iota} = 1$ の有理面上の MHD 揺動が原因と考えられる。接線像の逆変換イメージからすると磁気面に $m=2$ の変形が生じていることが分かった[13]。磁気プローブの測定と合わせて $m/n = 2/2$ の揺動が ELM 発現に関与している可能性がある。また、この変形は視野の中の局所的な弱磁場部 (図4の左右の領域) に発生しており、弱磁場側へのプラズマの変形が原因として考えられる。そのことから、単純な抵抗性インターチェンジモードというより、よりバルーニング性を持った MHD 安定性がこのような大規模な ELM の原因である可能性がある。

可視カメラの観測によれば、大半外側の変形した位置から、プロブ的なプラズマの掃出しが観測されており、モードの発展と、弱磁場側の磁気面の破れ、プラズマの掃出しというメカニズムが考えられるが、その直接の証拠を計測しているものと考えている。

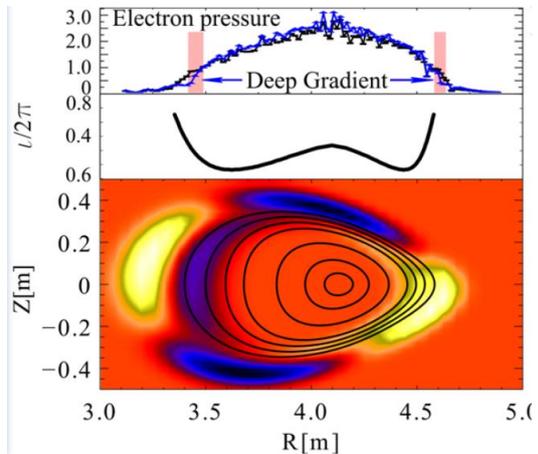


図4 図3の接線像の逆変換結果。ヘリカルコイルから遠い左右の領域 (弱磁場部) にプラズマが広がっていることがわかる。

外部摂動磁場をかけた時には、大振幅 ELM の振幅の減少が観測されている。これはトカマクで観測されている ELM ミティゲーションに近い現象である。この時のモード構造の接線像の計測には成功しているが、逆変換した場合の差異が非常に小さく現在解析手法の精度を向上させて解析を行っている段階である。今後モード構造の変化から、外部摂動磁場と MHD 不安定性の相互作用について詳しく調べ、非線形 MHD コードとの比較研究などを行い、外部摂動磁場が MHD 不安定性や ELM にどのようなメカニズムで影響しているかを詳しく調べる。

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 5 件)

1. “Development of an Array System of Soft X-ray Detectors with Large Sensitive Area on the Large Helical Device”.

DU, X., OHDACHI, S., TOI, K., others, 2012. Plasma and Fusion Research 7, 2401088.

2. “High speed vacuum ultraviolet telescope system for edge fluctuation measurement in the large helical device.”,

Ming, T.F., Ohdachi, S., Sakakibara, S., Suzuki, Y.,

Review of Scientific Instruments 83, 10E513 (2012).

3. "Estimate of the deposition of carbon pellets using a high-speed VUV imaging system in the LHD",

Ming Tingfeng, Satoshi Ohdachi, Yasuhiro Suzuki and LHD Experiment Group,

Plasma Science and Technology, Vol.15, No.12, (2013) p1178-1183.

4. “Behavior of MHD instabilities of the Large Helical Device near the effective plasma boundary in the magnetic stochastic region”

S. Ohdachi, et.al.

JPS Conf. Proc. , 015026 (2014)

5. “Spatial Mode Structure of Magnetohydrodynamic Instabilities Observed by a Tangentially Viewing Soft X-ray Camera in LHD”

Satoshi Ohdachi, Ting Feng Ming, Kiyomasa Watanabe, Kazuo Toi and the LHD Experiment Group

IEEE transactions on plasma science, in press

〔学会発表〕 (計 11 件)

6. “Stability analysis of the ballooning mode in H-mode discharges with outward-shifted configurations”

S. Ohdachi, K. Toi, K. Y. Watanabe, N. Nakajima, T. F. Ming, LHD Experiment Group

1st Asia Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference June 14 - 17, 2011, Toki-shi, Japan

7. ” Profile optimization against the pressure driven instabilities in the Large Helical Device”

S. Ohdachi, et. al,

8th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association,

Nov. 1-4, 2011, Guilin, China

8. “Retrieval of information of perturbed displacement of MHD instabilities from the tangentially viewing imaging data”,

S. Ohdachi, et. al.,

in proc. of 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics and 16th International Congress on Plasma Physics July, 2012, Stockholm (Sweden)

9. “Reconstruction of the phase information in the modulated ECH experiments measured by the tangentially viewing imaging system of the Large Helical Device”,

S. Ohdachi, et. al.,

in proc. of 23rd International Toki Conference., Nov. 2012, Toki-shi(Japan)

10. ” 大型ヘリカル装置の外寄せ配位で観測される MHD モード”

大館暁、杜曉第 他

日本核融合学会 2012 11/27-31, 春日 (福岡)

11 ” Study of the 2D structures of the ELM-like phenomena using a tangential VUV imaging system in LHD”

T. F. Ming, S. Ohdachi, et. al,

68th JPS meeting, 26-29, March, 2013, Hiroshima, Japan

12. “Determination of effective plasma boundary by existence of MHD instabilities excited in the edge stochastic layer of LHD”,

S. Ohdachi, Y. Suzuki, S. Sakakibara, K. Y. Watanabe, K. Ida1, M. Goto1, X. D. Du, Y. Narushima, Y. Takemura, H. Yamada and LHD Experiment Group

The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12) and The third Asia-Europe Physics Summit

July 14-19, 2013, International Conference Halls, Makuhari Messe Chiba, Japan

13. “MHD activities destabilized in the stochastic region of the Large Helical Device”,

S. Ohdachi, et.al.

The 19th ISHW and 16th IEA-RFP workshop September 16-20, 2013, Padova, Italy

14. “Observation of a distorted mode structure induced by using a tangentially viewing VUV imaging system in the LHD”

T. F. Ming, S. Ohdachi, et. al.,

The 19th ISHW and 16th IEA-RFP workshop September 16-20, 2013, Padova, Italy

15. “Investigation of the tomographic reconstruction methods for magnetically confined plasmas”

S. Ohdachi, T. F. Ming and M. Takechi

9th Asia Plasma and Fusion Association Conference (APFA2013)

Nov.5-8, kyonju, Korea

16. ” 磁場構造検出を目的とした熱パルス伝搬をつかった計測手法について”

大館暁、明廷鳳、他

日本物理学会，2014/3 東海大学（神奈川）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大館暁(OHDACHI Satoshi)

核融合科学研究所（ヘリカル研究部）准教授

研究者番号：23340184

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

渡邊清政(WATANABE Kiyomasa)

核融合科学研究所（ヘリカル研究部）教授

研究者番号：00249963,

鈴木康浩(SUZUKI Yasuhiro)

核融合科学研究所（ヘリカル研究部）准教授

研究者番号： 25420889