

平成 21 年 5 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2005年～2008年度
 課題番号：17360446
 研究課題名（和文） 高速度軟 X 線カメラを用いたトーラスプラズマ周辺部の MHD 不安定性の研究
 研究課題名（英文） Study of edge MHD instabilities in torus plasmas using fast soft X-ray camera
 研究代表者
 大館 暁
 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：00270489

研究成果の概要：環状の磁場閉じ込め装置の周辺プラズマの揺動の空間構造を検出する新しいタイプの計測器の開発した。多層膜反射鏡を使った軟 X 線領域の反射望遠鏡タイプの計測器を構築し、揺動計測に十分なフレーミングレートでの計測に成功している。大型ヘリカル装置での初期計測では、周辺 MHD 揺動に対応する磁力線に平行なモード構造の検出に成功しており、今後、解析プログラムの整備を行って詳細なモードの空間構造とその発展についての研究を行う。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	4,200,000円	0円	4,200,000円
2006年度	1,400,000円	0円	1,400,000円
2007年度	1,100,000円	330,000円	1,430,000円
2008年度	900,000円	270,000円	1,170,000円
年度			
総計	7,600,000円	600,000円	8,200,000円

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：核融合、MHD 不安定性、イメージング計測、X 線分光

1. 研究開始当初の背景

環状の磁場閉じ込め装置の輸送は乱流による異常輸送が支配していると考えられ、異常輸送が低減すると局所的に圧力勾配が急な領域が出現する。プラズマのコア部では ITB (Internal Transport Barrier)、周辺部では ETB (Edge Transport Barrier) などと呼ばれている。ETB の形成により上昇した圧力勾配の限界は MHD 不安定性で決まることが多く、トカマク装置ではピーリング・バルーンモード、ヘリカル装置では交換型

の不安定性が限界圧力を決めていると考えられる。この種の不安定性の非線型の発展はコンピュータシミュレーションでも予測しがたいため実験的に検証することが必要となる。モード構造はポロイダル異方性が高く 2 次元計測が必要とされる。MHD 不安定性が発展する場合に局所的な圧力勾配の限界がどのように決まっているかを調べることは、物理的な興味のみならず経済的な核融合炉が可能かどうかの成否を左右する重要なテーマである。

2. 研究の目的

背景で述べたような周辺プラズマの MHD 不安定性の非線型発展を解析するために揺動を可視化して測定する装置の開発をめざした。環状の閉じ込め装置においては接線方向から観測することで、磁場の方向と視線の方向を近づけることができるため、接線方向からの直接の可視化によりポロイダル断面像にかなり近いイメージが得られる。研究代表者はこれまでピンホールを使って接線方向からのプラズマの X 線像の計測を実現し、コア部の MHD 不安定性の測定法として活用し、高いモード数まで良好な測定結果を得ている。周辺プラズマに対しても同様の手法の適用をめざしていた。しかしながら、ピンホールを使った計測ではフレーミングレートを上げるために光量を上げるにはピンホールの口径を大きくするしかない。この場合イメージの解像度が劣化してしまうという問題があり、コア部より光量の小さな周辺プラズマの計測法としては改良が必要であった。本研究ではピンホールに代えて、軟 X 線領域で最近入手可能になってきた X 線光学素子を使うことで光量の問題を解消し、周辺プラズマの温度に適した波長の 2 次元カメラを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

高速の揺動測定を行うために解像度を維持したまま、光量を得るため、ピンホールを使わない光学系を構築する必要がある。軟 X 線領域ではレンズとして使える素子は無く、金属も入射角を極端に浅くしないと反射しない。しかしながら最近の半導体の露光用に EUV 光を集光する多層膜反射鏡が広く使われるようになっており、波長を選ぶことでプラズマの計測としても応用が可能である。多層膜反射鏡は二つの物質を互い違いに堆積させた層状構造で、膜厚から決まる特定の波長の光を反射する。現状では Mo と Be の多層膜が理論値・達成値ともに高く、60%程度の反射率を得ることができる。半導体の露光用に 13.5nm のものが商用に入手可能であり、核融合プラズマ中に不純物として存在する CVI の 4p-2s の遷移時に観測されるラインエミッション光を観測しうる。多層膜反射系では入射角が 90 度に近い垂直入射の時のみ性能を発揮するため、逆シュヴァルツシルド光学系を採用し、プラズマのイメージを 1/70 に縮小する光学系を構築した(図 1)。

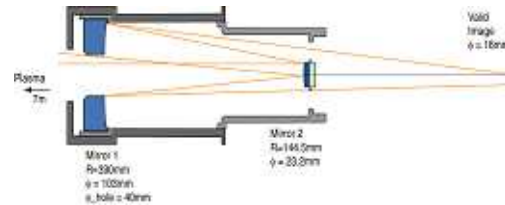


図 1 多層膜反射鏡を用いた望遠鏡の概念図

4. 研究成果

図 1 の逆シュヴァルツシルド光学系で結像したイメージをマイクロチャンネルプレート (MCP) で可視光に変換し高速カメラで測定している。MCP の印加電圧を制御して像の明るさをコントロールしてプラズマの放射光の変化に対応している。MCP は本来 2 段式の高ゲインのものを準備していたが、故障のため使用できず、本年度までの実験ではややゲインの低いものを使用している。

環状閉じ込め装置の接線方向からの可視化という意味では、回転変換角とそのシアーが小さい領域での測定が適している。トカマクの周辺プラズマと、LHD のようなヘリカル装置のコア部での測定が最も適切であり、周辺プラズマの測定としてはトカマクでの測定を行いたかった。JT-60U 装置、ドイツのテキサトル装置、中国の HL-2A 装置への実装をめざして交渉を行ってきたが、JT-60U 装置は装置のシャットダウンにより実装できず、テキサトル装置は接線ポートの使用が困難であること、中国の HL-2A 装置については輸出規制の問題と、検出器の故障が重なり本補助金の期間内での実験を行うことはできなかった。HL-2A 装置での測定については今後も努力し、カメラの性能を最も活かせる対象での測定を行うことを予定している。

そのため本機を使った測定は大型ヘリカル装置でのみ行った。図 2 に LHD に実装したときの視線を示す。接線に近い視線ではあったが周辺プラズマを対象とした測定という意味ではやや角度がたりず、また、ポート開口部の狭さから観測可能な領域が狭くなっている。今後実装位置の最適化を行う予定である。図 3 に測定例を示す。最下段に示すのは本計測器で測定した中心部の信号の時間変化で、プラズマの放電条件の変化に対応して、CIII の計測とほぼ同様の波形を示していることから、ほぼ正常な動作を示しているものと思われる。放電終了直前の信号の増大は迷光を受光している可能性を示唆し、今後計測器に低エネルギーの光をカットするフィルターを挿入し対処する予定である。

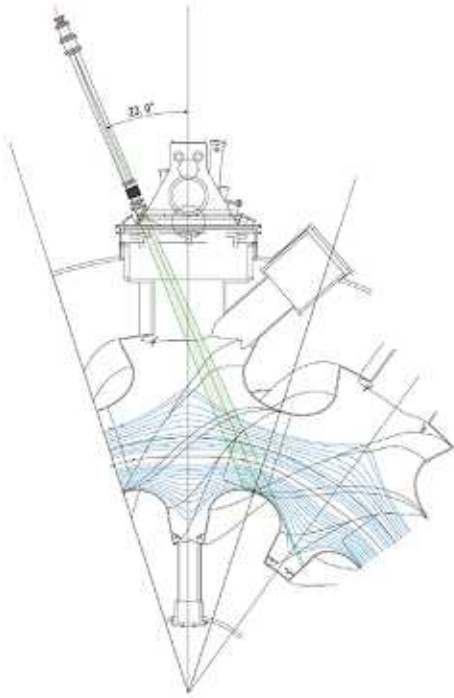


図2 LHDでのカメラの視線

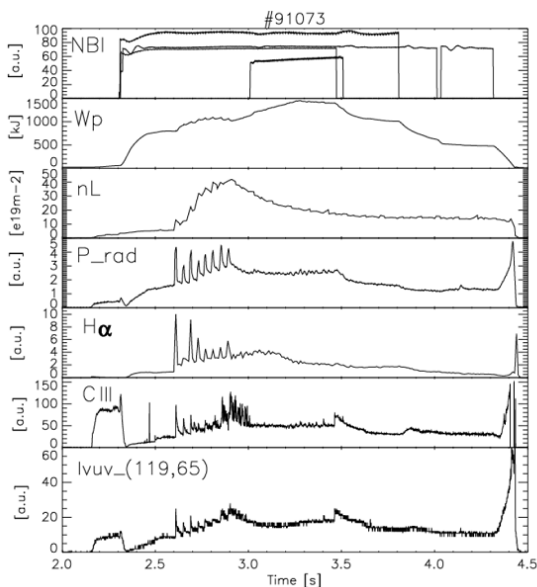
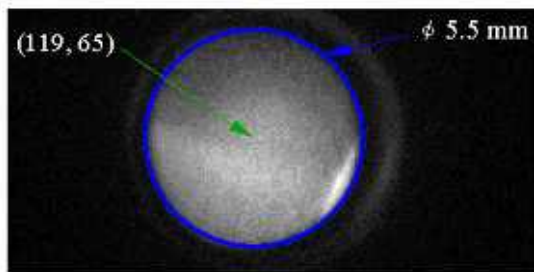


図3 カメラによる測定例と測定信号の時間変化

図4には揺動データを検出した例を示す。プラズマ周辺部の $m/n = 1/1$ とされる揺動が発現した放電でカメラに2次元像を特異値分解した結果であり、右に示す空間構造からは磁力線に沿ったモード構造ができていることを示唆する。接線方向より観測視線がずれたことで信号の解釈が難しくなっており、このイメージを直接プラズマ中での空間構造と結びつけることはできていないが、線積分した信号の解釈プログラムの整備を行い計測データの解釈を行う予定である。

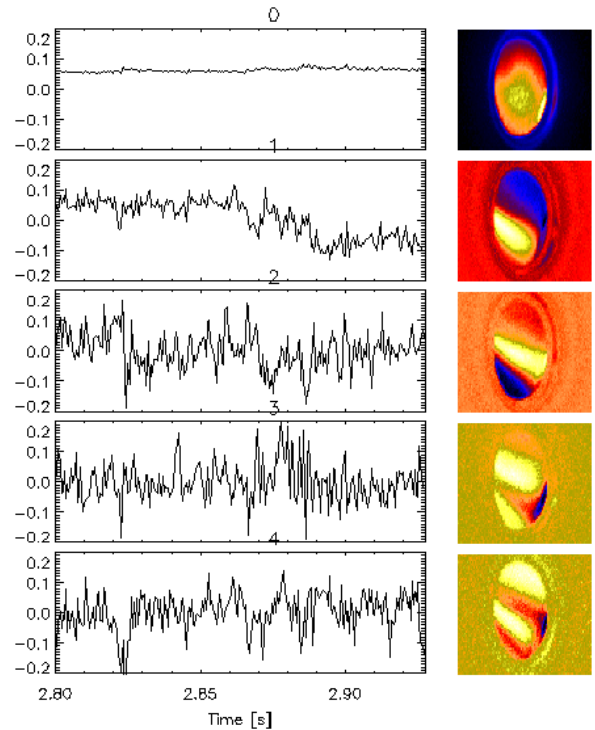


図4 MHD 揺動とそれによる緩和現象が観測されたときの2次元データの特異値分解したものを特異値の大きいものより表示した。

多層膜反射鏡を用いた、新しいタイプの2次元揺動計測器の開発に成功し、初期的なデータを大型ヘリカル装置上で得ることができた。周辺部に局在化している炭素のCVIのイオンの放射強度を2次元的に測定し、その時間変化を20kHz程度までの高い周波数で測定した。設置に使用した観測ポートが初期に想定したものと異なるためデータの解釈が難しい状態ではあるが、計測器そのものの性能は予定通り発揮できており、解釈用のプログラムの整備後は、揺動の2次元構造の同定を行うに十分なデータを得ることができたと考えている。このような手法で2次元構造の成長の可視化した後、MHD揺動がプラズマ

のエネルギーを吐き出す詳細な機構に付いての研究を行う予定である。また大型ヘリカル装置での測定に引き続いて、本カメラによるトカマク装置での測定を行い、環状の磁場閉じ込め装置の周辺 MHD 揺動とその非線型の発展についての研究を継続する予定である。

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 14 件)

M. Takeuchi, S. Ohdachi, et al., "Development of a High Speed VUV Camera System for 2-Dimensional Imaging of Turbulent Structure in LHD" Proceeding of 18th International Toki conference 2008, (2008)P2-28

S. Sakakibara, S. Ohdachi, et al., "MHD study of the reactor-relevant high-beta regime in the Large Helical Device", Plasma Phys. Control. Fusion, 50(2008)124014(10p)

S. Ohdachi, K. Toi, et al. "Tangential SX Imaging for Visualization of Fluctuations in Toroidal Plasmas" Plasma and Fusion Research, 2(2007)S1010 P1-6

F. Watanabe, K. Toi, S. Ohdachi, et al., "Soft and Ultra-soft X-ray Detector Array System for Measurement of Edge MHD modes in the Large Helical Device" Plasma and Fusion Research 2(2007)S1066 P1-4

Y. Takahashi, K. Toi, S. Ohdachi, et al. "Two-Dimensional Measurement of Electron Density Profile in the Edge Region of the Large Helical Device Plasma by a Sheet-Shaped Thermal Lithium Beam" Plasma and Fusion Research, 1(2006)013

F. Watanabe, K. Toi, S. Ohdachi, et al., "Radial structure of edge MHD modes in LHD plasmas with L-H transition" Plasma Phys. Control. Fusion, 48(2006)A201

S. Sakakibara, S. Ohdachi, et al., "Effects of Resonant Magnetic Fluctuations on Plasma Confinement in Current Carrying high-β Plasmas of LHD" Plasma and Fusion Research, 1(2006)003-1

S. Sakakibara, S. Ohdachi, et al. "Onset of Resistive Interchange Mode in the Large Helical Device" Plasma and Fusion Research, 1(2006)049-1

岩間尚文, 大館暁, "プラズマ計測のためのトモグラフィ解析法" 核融合学会誌 82(2006)399

S. Ohdachi, K. Toi, G. Fuchs, TEXTOR TEAM and LHD experimental Team "Magnetic Islands Observed by a Fast-Framing Tangentially Viewing Soft X-ray Camera on LHD and textor" Plasma Science & Technology, 8(2006)45

K. Toi, S. Ohdachi, F. Watanabe, K. Narihara, T. Morisaki, Gao Xiang, M. Goto, K. Ida, S. Masuzaki, K. Miyazawa, S. Morita, S. Sakakibara, K. Tanaka, T. Tokuzawa, K. W. Watanabe, Yan Longwen, M. Yoshimura, "LHD experimental Group Formation of Edge Transport Barriers by L-H transition and Large Reversed Plasma Current on LHD" Plasma Science & Technology, 8(2006)5

WATANABE Fumitake, OHDAKI Satoshi, TAKAGI Shohji, TOI Kazuo, SAKAKIBARA Satoru, WATANABE Kiyomasa, MORITA Shigeru, "Observation of Internal Structure of Edge MHD Modes in High Beta Plasmas on the Large Helical Device" J. Plasma Fusion Res., 81(2005)967

K. Toi and S. Ohdachi S. Yamamoto S. Sakakibara, K. Narihara, K. Tanaka, S. Morita, T. Morisaki, M. Goto, and S. Takagi F. Watanabe N. Nakajima, K. Y. Watanabe, K. Ida, K. Ikeda, S. Inagaki, O. Kaneko, K. Kawahata, A. Komori, S. Masuzaki, K. Matsuoka, J. Miyazawa, K. Nagaoka, Y. Nagayama, Y. Oka, M. Osakabe, N. Ohya, Y. Takeiri, T. Tokuzawa, K. Tsumori, H. Yamada, I. Yamada, K. Yoshinuma, and LHD Experimental Group "Observation of the low to high confinement transition in the large helical device" Phys. Plasma, 12(2005)020701

K.Y. Watanabe, S. Sakakibara, Y. Narushima, H. Funaba, K. Narihara, K. Tanaka, T. Yamaguchi, K. Toi, S. Ohdachi, O. Kaneko, H. Yamada, Y. Suzuki, W.A. Cooper, S. Murakami, N. Nakajima, I. Yamada, K. Kawahata, T. Tokuzawa, A. Komori and LHD experimental group "Effects of global MHD instability on operational high

beta-regime in LHD"
Nuclear Fusion 45(2005)1247-1254

〔学会発表〕(計 6 件)
大館暁 他、LHD における高密度放電で観測される MHD 不安定性
第 6 4 回日本物理学会年次大会 2009 年
3 月 28 日 立教大学

S. Ohdachi et.al. " Two approaches to the reactor-relevant high-beta plasmas with profile control in the Large Helical Device", 22nd Fusion Energy Conference(Geneve), 2008 年 10 月 13 日 ~ 19 日, ジュネーブ (スイス)

大館暁 他、LHD における高中心プラズマ
第 7 回核融合エネルギー連合講演会、2008 年
6 月 9 日、青森市男女参画プラザ AV 多機能ホール

大館暁、東井和夫、榊原悟他、LHD における
IDB プラズマの密度崩壊現象
核融合学会、2007 年 11 月 29 日、姫路

S. Ohdachi, et.al, Tangential SX imaging for visualization of Tangential SX imaging for visualization of fluctuations in toroidal plasmas fluctuations in toroidal plasmas、16th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion (Toki) 2006 年 12 月 5 日 ~ 8 日、土岐市

S. Ohdachi, et.al., Two-Dimensional Structure of MHD Instabilities and their Non-Linear Evolution in the Large Helical Device, 21th Fusion Energy Conference (Chengdu) 2006 年 10 月 16 日 ~ 22 日、成都(中国)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大館 暁 (OHDACHI SATOSHI)
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: 00270489

(2) 研究分担者

東井和夫 (TOI KAZUO)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授

研究者番号: 20093057

榊原悟 (SAKAKIBARA SATORU)
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: 90280594

武智学 (TAKECHI MANABU)
日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 先進プラズマ研究開発ユニット・研究員
研究者番号: 40370423

(3) 連携研究者