

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 27 日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740368

研究課題名(和文) 高速二次元画像計測を用いた三次元平衡プラズマの物理の研究

研究課題名(英文) Physics study on 3-D equilibrium plasmas with high-speed 2-D imaging diagnostics

研究代表者

三瓶 明希夫 (SANPEI, AKIO)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・講師

研究者番号：90379066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：A=2の低アスペクト比逆磁場ピンチ装置におけるヘリカル平衡RFP配位への遷移現象のダイナミクスを解明するために、軟X線画像を高速で二方向から同時撮像できる機構を構築した。撮像された結果から、平衡再構成と磁力線追跡及びCT技術を用いて内部構造の再構成を行い、周辺磁場揺動が単一モードの成長を示すRFP放電において、ヘリカル様の三次元構造が実現していることを示唆する結果を得た。吸収法と軟X線画像計測法を組み合わせる事で、新たに二次元電子温度分布計測システムを開発した。このシステムを用いて、ヘリカル変形時の二次元電子温度画像を撮像することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have developed an soft X-ray (SXR) imaging diagnostic system that uses multiple pin-hole SXR cameras together with high-speed cameras to record the time evolution of the SXR images from the tangential and vertical directions simultaneously for studying the dynamic structures of 3-D SXR emissivity in low-A reversed field pinch (RFP). By calculating the magnetic topology using equilibrium reconstruction, field line tracing and Computed Tomography from obtained experimental images during a single mode dominant phase, we identify the helically deformed nested flux surfaces. We have also developed a 2-D electron temperature diagnostic system, which consists of a SXR camera with two pin holes for two-kinds of absorber foils, combined with a high-speed camera. We have succeeded in distinguishing electron temperature image in quasi-single helicity from that in multi-helicity RFP states.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：画像計測 核燃焼プラズマ RFP 磁場閉じ込め 自己組織化 MHD緩和 トロイダルプラズマ

1. 研究開始当初の背景

トカマク系において、三次元 MHD 平衡や共鳴磁場摂動の効果をはじめとした、三次元磁場構造に関する議論が重要視されてきており、三次元 MHD 平衡・新古典粘性・不安定性に対する能動的制御といった、トラス系における MHD 三次元効果に対する研究が活発になりつつある。また、LHD などのトラス装置における三次元ヘリカル平衡配位において、磁気島が形成される配位とストキャスティック磁場領域が広がる配位の間の遷移現象が観測されており、三次元配位を有する高プラズマの物理特性を理解することが求められている。

逆磁場ピンチ (RFP) においては、単一ヘリシティー磁場配位、すなわち多数の共鳴モードが同程度の振幅で存在するためにストキャスティックな磁場構造となる中心領域で単一モードが大振幅まで成長して、それに伴う磁気島内部に磁気面構造が回復する磁場配位が自己形成される。極端な場合には周辺部の軸対称平衡構造中に三次元ヘリカル平衡配位が形成される。単一モードの成長に伴う磁気島領域が支配的な磁場配位への構造緩和に伴って閉じ込め改善が観測されて、ヘリカル変形した領域内で高プラズマが実現されている。このようなヘリカル配位の内部構造同定と遷移現象解明の為に計測方法が必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では、主に軟 X 線 (SXR) イメージング計測法を用いて、三次元磁気面構造の同定を試みる。視線の数よりも未知数が圧倒的に大きい三次元 CT を数学的に厳密に解くことは不可能であるが、磁力線に沿って分布が一樣である事、及び複数視線でプラズマを観測することで拘束条件が強く働き、安定に解くことができる。その手法を構築し、幅広いプラズマパラメータで三次元平衡の磁場構造の可視化を可能とする。

更に、ヘリカル構造形成時の閉じ込め改善について詳細に調べる為に、二次元温度計測法の開発を試みる。

3. 研究の方法

申請者の所属する京都工芸繊維大学に既設の低アスペクト比 RFP 装置 RELAX において実施した。特に SXR 画像を二方向から計測できるシステムを開発し、三次元磁場構造の再構成を試みた。SXR カメラは MCP と蛍光面及び高速カメラから構成されており、高い時間分解能を持つ。AXUV アレイを用いた SX 計測を行い、断面再構成結果と、画像からの三次元再構成を比較することで、再構成結果の妥当性の評価と高精度化を行う。RELAX 装置は接線ポートと、そこからの視野を臨む赤道面ポートを有しており同一空間を二方向から撮影することが可能である (図 1 参照)。

SXR に対して透過特性の異なる二種類の薄

膜を組み合わせて電子温度を求める吸収法と、前述の SXR イメージング手法を組み合わせる事で、ヘリカル変形時の二次元電子温度画像計測を行う。

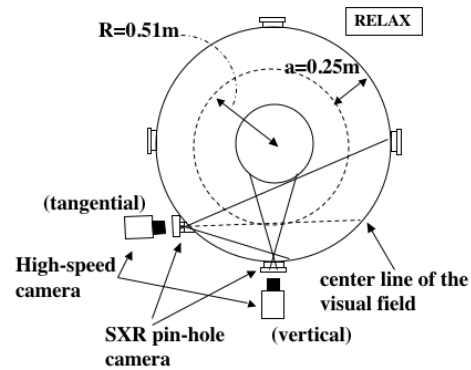


図 1: 二方向 SXR 撮像実験配置図。

4. 研究成果

RELAX において、二方向から SXR 画像が同時撮像できる機構を構築し、同時撮像実験に成功した。撮像された SXR 画像は放電条件によって SXR 源がトラス対称やヘリカル構造を形成することを示唆し、周辺磁場揺動と良い一致を示した。得られた SXR 画像のうち、垂直方向の信号を用いて、Cormack-Bessel 法による剛体 Computed Tomography (CT) を行い、周辺磁場揺動が単一モードの成長を示す RFP 放電において、SXR 源のポロイダル断面像を得る事に成功した。ここから、 $m=1$  テアリングモード起因の大きな磁気島構造が形成されていることを明らかにした。また、画像計測の結果や周辺計測結果を拘束条件として、平衡再構成を行った。これと磁力線追跡コード ORBIT を用いて、磁力線追跡を行った。その結果、周辺磁場揺動が単一モードの成長を示す RFP 放電は、ヘリカル様の三次元構造が実現していることが明らかになった。(図 2 参照)

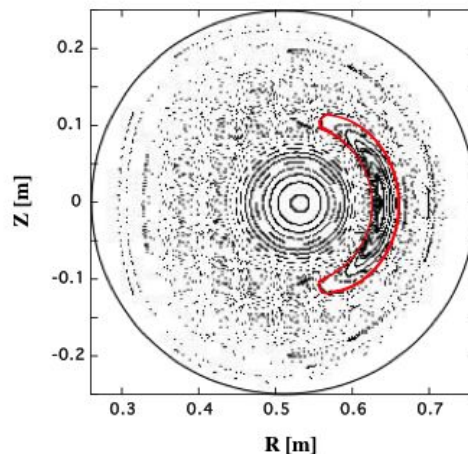


図 2: RELAX で単一モードが支配的な状態でのポアンカレプロット。

SXR に感度のある AXUV フォトダイオードアレイとアンプ・回路系からなる計測システムを作成し、アレイ二方向の信号からの CT による断面再構成結果と、SXR 画像からの再構成結果を比較することで、再構成結果の妥当性の評価と高精度化を行った。その結果、AXUV アレイからの信号と SXR 画像からの再構成結果は良い一致を示し、周辺磁場揺動が単一モードの成長を示す RFP 放電においては、 $m=1$  テアリングモード起因の大きな磁気島構造が形成されていることを結論づけることができた。

閉じ込め改善や輸送現象について調べる為に、従来の画像計測システムに改良を加え、吸収法と組み合わせる事で、新たに二次元電子温度分布計測システムを開発した。このシステムを用いて、二次元電子温度画像を撮像することに成功した。その結果、周辺磁場揺動が単一モードの成長を示す放電では、やはり高温部がヘリカル変形していることが判明した。(図3参照)RFP 放電の時間発展を詳しく調べた結果、ヘリカル遷移現象に伴う温度分布の変化を計測することに成功した。単一モードが支配的な状態では、高温部がヘリカル変形し、その際に輸送障壁の形成を示唆する結果が得られた。

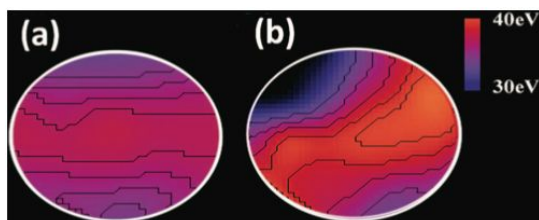


図 3:RELAX において得られた二次元電子温度分布。(a)複数モードが存在する状態。(b)単一モードが支配的な状態。

開発したシステムによって、SXR 二次元画像から三次元的な SXR 源構造及び熱的構造を明らかにできる様になったのは重要な成果であると考えられる。この手法を用いて、今後はヘリカル磁気面の内部構造の時間発展を詳しく調べると共に、ヘリカル構造への遷移現象を細密に検討することで明らかにする。他の閉じ込め配位における磁場構造の遷移現象との比較を行うことで、ヘリカル配位高プラズマにおける遷移現象の普遍的特性の抽出を目指す。

##### 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 13 件)

[1] T. Onchi, A. Fujisawa, A. Sanpei, "A Prototype Diagnostics System to Detect Ultraviolet Emission for Plasma Turbulence", Rev. Sci. Instrum. vol.85, 113502-1 - 113502-3 (2014). (査読有)

DOI:10.1063/1.4900660

[2] M. ITAGAKI, A. Sanpei, S. Masamune, K. WATANABE, "Reconstruction of the Eddy Current Profile on the Vacuum Vessel in a Fusion Device using only External Magnetic Sensor Signals", WIT Transactions on Modelling and Simulation. Vol.57, pp.149-162. (2014). (査読有) DOI:10.2495/BE370131

[3] H. Tanaka, S. Masamune, S. Nakaki, A. Sanpei, K. NISHIMURA, R. KODERA, R. UEBA, G. ISHII, H. HIMURA and R. PACCAGNELLA, "Effect on Plasma Performance of a Single MHD Mode Feedback Control in Low-Aspect-Ratio RFP RELAX", Plasma Fusion Res. vol.9, 1302057-1 - 1302057-4. (2014). (査読有) DOI:10.1585/pfr.9.1302057

[4] M. Itagaki, A. Sanpei, S. Masamune, K. Watanabe, "Reconstruction of the Eddy Current Distribution on the Vacuum Vessel in a Reversed Field Pinch Device based on the External Magnetic Sensor Signals", Plasma Fusion Res. Vol.9 pp. 1402464-1 - 1402464-13. (2014). (査読有) DOI:10.1585/pfr.9.1402046

[5] A. Sanpei, K. Nishimura, S. Masamune, H. Tanaka, H. Himura, S. Ohdachi, N. Mizuguchi, T. Akiyama "Measurement and Evaluation of 3-D Structure in Low-Aspect-Ratio RFP RELAX with Dual SXR Imaging System", JPS Conf. Proc. vol.1, 015027-1 - 015027-4. (2014). (査読有) DOI:10.7566/JPSCP.1.015027

[6] K. Nishimura, A. Sanpei, H. Tanaka, G. Ishii, R. Kodera, R. Ueba, H. Himura, S. Masamune, S. Ohdachi and N. Mizuguchi, "2D electron temperature diagnostic using soft x-ray imaging technique", Rev. Sci. Instrum. vol.85, 033502-1 - 033502-4 (2014). (査読有) DOI: 10.1063/1.4867076

[7] R. UEBA, S. MASAMUNE, Akio SANPEI, K. UCHIYAMA, H. TANAKA, K. NISHIMURA, G. ISHII, R. KODERA, H. HIMURA, D. J. Den HARTOG and H. KOGUCHI, "Electron Temperature Measurement by Thomson Scattering in a Low-Aspect-Ratio RFP RELAX", Plasma Fusion Res. vol.9, 1302009-1 - 1302009-4. (2014). (査読有) DOI: 10.1585/pfr.9.1302009

[8] K. Oki, A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune, "Dependence of Properties of Quasi-Single-Helicity States on Field Reversal Parameter in a Low-Aspect-Ratio Reversed Field Pinch", Fusion Science and Technology vol.63, Number 1T, pp.386 - 388 (2013). (査読有)

[9] R. Ikezoe, S. Masamune, K. Oki, A. Sanpei, H. Himura, T. Onchi, A. Hirose, "Asymmetric Toroidal Flux Generation due

to Phase Locking of Internally Resonant Tearing Modes in the RELAX Reversed-Field Pinch", Plasma Phys. Control. Fusion. Vol.55, 15005-1 - 15005-7 (2013). (査読有) DOI: 10.1088/0741-3335/55/1/015005

[10] R. Ikezoe, S. Masamune, K. Oki, A. Sanpei, H. Himura, T. Onchi, A. Hirose, "Phase Locking and Unlocking Associated with Transition to Quasi-Single Helicity State in the RELAX Reversed Field Pinch", J. Phys. Soc. Jpn., Vol.81 No.11, pp.115001-1 - 115001-2. (2012). (査読有) DOI: 10.1143/JPSJ.81.115001

[11] N. Mizuguchi, A. Sanpei, S. Fujita, K. Oki, H. Himura, S. Masamune, K. Ichiguchi, "Modeling of Formation of Helical Structures in Reversed-Field Pinch", Plasma Fusion Res., Vol.7 pp.2403117-1 - 2403117-4. (2012). (査読有) DOI: 10.1585/pfr.7.2403117

[12] A. Sanpei, K. Oki, D. Fukahori, K. Deguchi, S. Nakaki, K. Nishimura, H. Himura, S. Masamune, S. Ohdachi, N. Nishino, T. Onchi, "Design and Initial Result of Time-Resolved Vertical Soft X-Ray Imaging System in Low-A RFP", Plasma Fusion Res., Vol.7 pp.2402052-1 - 2402052-4. (2012). (査読有) DOI: 10.1585/pfr.7.2402052

[13] K. Oki, D. Fukahori, K. Deguchi, S. Nakaki, A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune, R. Paccagnella, "Characterization of Quasi-Single-Helicity States in a Low-Aspect-Ratio RFP", Plasma Fusion Res. Vol.7 pp.1402028-1 - 1402028-6. (2012). (査読有) DOI: 10.1585/pfr.7.1402028

〔学会発表〕(計 20 件)

[1] 三瓶明希夫, "非中性プラズマと RFP プラズマにおける乱流と構造形成", 「波動粒子相互作用による粒子加速・輸送及び乱流」研究会, 名古屋大学, 愛知県, 2015/3/5-3/6

[2] 三瓶明希夫, "RFP プラズマのヘリカル構造変化と MHD 不安定性", 平成 26 年度核融合科学研究所共同研究研究会「MHD と流体力学における共鳴・分岐・構造形成の理論・シミュレーション研究」, 核融合科学研究所, 岐阜県土岐市, 2014/12/25-26

[3] 三瓶明希夫, "Evaluation of time evolution of 3-D Structure in Low-Aspect-Ratio RFP RELAX with SXR Imaging Technique", 第 31 回プラズマ・核融合学会年会, 21PB-068, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2014/11/18-21

[4] A. Sanpei, "Properties of the equilibrium and the eddy current distribution in the vacuum vessel in a low-aspect-ratio RFP RELAX", 19th Workshop on MHD Stability Control, Auburn, USA, 2014/11/3-5

[5] A. Sanpei, "Evaluation of time evolution of 3-D Structure in RELAX RFP with SXR Imaging Technique", 56th Annual Meeting of the APS-DPP, New Orleans, LA, USA, 2014/10/27-31

[6] A. Sanpei, "Evaluation of time evolution of 3-D Structure in Low-Aspect-Ratio RFP RELAX with SXR Imaging Technique", Workshop on Exploratory Topics in Plasma and Fusion Research (EPR) and US-Japan Compact Torus (CT) Workshop, Madison, WI, USA, 2014/8/5-8

[7] Akio Sanpei, "MHD mode dynamics on the formation of helical structures in low aspect ratio Reversed Field Pinch plasmas", US-Japan JIFT Workshop on "Recent studies of extended MHD and MHD simulations", Kyoto University, Kyoto, 2014/6/5-6

[8] 三瓶明希夫, "非中性プラズマと RFP プラズマにおける自己組織化現象の画像計測", 2013 年度第 2 回研究会「微粒子・自己組織化プラズマの計測と解析・制御」, 京都工芸繊維大学, 京都市, 2014/3/15-16

[9] 三瓶明希夫, "イメージングを用いた球状 RFP 装置 RELAX における三次元構造計測", 平成 25 年度核融合科学研究所共同研究研究会「革新的高ベータ閉じ込め配位の先進制御と高性能化」, 核融合科学研究所, 岐阜県土岐市, 2013/12/26-27

[10] 三瓶明希夫, "RELAX における球状 RFP プラズマ研究の現状と今後の展開", 第 30 回プラズマ・核融合学会年会, 05pE56P, 東工大, 東京都, 2013/12/3-6

[11] A. Sanpei, "3D MHD simulation studies on the formation of helical structures in low aspect ratio Reversed Field Pinch plasmas", US-Japan JIFT Workshop on "Recent studies of extended MHD and MHD simulations", Denver USA, 2013/11/9-10

[12] A. Sanpei, "Characterization of low-A RFP configuration in RELAX with SXR Imaging Technique", Joint 19th ISHW and 16th IEA-RFP workshop, Padova, Italy, 2013/9/16-9/20, B4

[13] 三瓶明希夫, "球状 RFP プラズマにおける画像計測", 核融合科学研究所平成 25 年度一般共同研究「画像計測研究会 2013」, 核融合科学研究所, 岐阜県土岐市, 2013/9/5-9/6

[14] A. Sanpei, "Measurement and Evaluation of 3-D Structure in Low-Aspect-Ratio RFP RELAX with Dual SXR Imaging System", 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), 幕張メッセ, Chiba, 2013/07/14-19, D1-PTu-08

[15] 三瓶明希夫, "RFP の内部構造変化における MHD 不安定性の役割", 日本物理学会第 68 回年次大会, 26aEA-10, 広島大学, 広島市, 2013/3/26-29

[16] 三瓶明希夫, "軟 X 線イメージングを用

いた低アスペクト比 RFP における三次元構造の計測と評価”, 第 29 回プラズマ・核融合学会年会, 28E16P, クローバープラザ, 福岡県春日市, 2012/11/27-30

[17] A. Sanpei, "Evaluation of 3-D Structure in low-aspect-ratio RFP RELAX", ITC22 P4-43, Ceratopia Toki, Toki, Japan, 2012/11/19-11/22

[18] A. Sanpei, "Mode control with external fields in the low-aspect-ratio RFP", 17th Workshop on MHD stability control, New York, USA, 2012/11/5-7

[19] A. Sanpei, "Evaluation of 3-D structure in RELAX RFP with SXR imaging technique", 54th Annual Meeting of the APS-DPP JP8.00173, Providence, USA, 2012/10/29-11/2

[20] 三瓶明希夫, "軟 X 線イメージングによる低アスペクト比 RFP の三次元構造の評価", 日本物理学会 2012 年秋季大会, 19aFA-5, 横浜国立大学, 横浜市, 2012/9/18-9/21

〔その他〕

研究室ホームページ URL

<http://nuclear.es.kit.ac.jp/new/>

本研究による受賞

[1] 長野友幸, 青木陽祐, 「ポスターセッション特別賞」, 第 14 回未来エネルギー研究協会サマースクール, 2014/8/10-12, 核融合科学研究所

[2] 青木陽祐, 「Silver Award」, The 7th Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas, 2014/8/17-19, Kyoto

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三瓶 明希夫 (SANPEI AKIO)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・講師  
研究者番号: 90379066