

# 先進ヘリカル磁場配位プラズマ中の乱流と輸送の物理機構の検証と

## 最適化のための実験的研究

次世代開拓研究ユニット 大島 慎介



### 1) 研究内容の要約

ヘリカル型磁場閉じ込め装置の高性能化の為に、乱流輸送と磁場配位との関連性を明らかにすることは重要である。本研究では、先進ヘリカル装置ヘリオトロン J において、周辺部の乱流、及び乱流によって形成されるメゾスケール構造を詳細に調べ、また磁場配位制御性の高いヘリオトロン J の特性を活かし、乱流およびその構造の磁場配位に対する依存性を実験的に検証する。乱流計測用多チャンネル計測器を開発し、プラズマ周辺部の乱流の基本的特性及び構造を明らかにした後に、磁場配位に対する乱流特性の依存性について検証する。更に、閉じ込め改善モードに与える影響や遷移時の乱流構造との関係についても検証する。

For optimization of helical magnetic configuration, it is important to clarify and characterize relevance between turbulent transport and magnetic configuration. In this study, turbulence and meso-scale structure, generated by turbulence itself, is investigated and the dependence of the turbulence and the structure on magnetic structure is also focused and studied experimentally in advanced helical device with wide controllability of magnetic configuration, Heliotron J. Multi-channel diagnostics are developed for the turbulence study and basic characteristics and structure of the turbulence are clarified, and then dependence of the turbulence characteristics on the edge magnetic structure is investigated. Moreover, influence and relationship of the magnetic structure on confinement improvement mode and meso-scale structure, such as zonal flow and GAM, are also investigated in detail.

### 2) 全体計画

先進ヘリカル磁場配位の乱流輸送低減を目指した最適化のため、乱流と磁場配位との関連性について基本的な知見を得ることは必須である。本研究では、粒子輸送及び MHD 不安定性について最適化されたヘリオトロン J 装置において、乱流の基本的特性、そしてその磁場配位依存性や閉じ込め改善モードとの相関について詳細に調べる。これは、核融合プラズマの乱流に起因する異常輸送の理解に寄与するのみならず、非線形物理として興味深い乱流の実験的検証という観点からも意義付けられる。ヘリオトロン J 装置における乱流計測用の揺動計測器を開発し、複数の計測器を連携して、高温プラズマ内部の乱流の時空間構造を明らかにする。得られた知見をもとに、乱流輸送においても優れた閉じ込めを実現する実験条件を探索し、ヘリカルプラズマ実験の最適化及び高性能プラズマの実現に必要な知見を得る。これにより、磁場閉じ込め核融合研究における先進ヘリカルの優位性を示し、ヘリカル型装置の将来的な指針を示すことができる。

これまで、ヘリオトロン J 装置では、プラズマ周辺部に設置された静電プローブによって、周辺乱流について調べられてきた (T. Mizuuchi *et al.*, J. NUC. MAT. (2005) 332)。本研究では、更に乱流の空間構造を詳細に調べる為、周辺乱流計測に特化した静電プローブを開発する。複数台のプローブを設置することで、乱流と乱流駆動輸送のトロイダル/ポロイダル方向対称性や、径方向及びポロイダル方向の波数分布、揺動間の相関等を評価し、微視的乱流と乱流によって形成されるメゾスケール構造について調べる。また、ビーム放射分

光計測器などのプラズマ全域の揺動を計測可能な装置と連携することで、周辺からコアプラズマまでの全域で乱流揺動の特性及び構造の解明を狙う。

上述した計測環境において得られた乱流揺動信号において、非定常信号や揺動間の非線形的結合を評価できるウェーブレット解析、バイスペクトル解析といった解析手法を有効に活用し、定量的に乱流を特徴づける。ヘリオトロン J 装置の多様な磁場配位や閉じ込め改善モードにおいて実現される巨視的物理量や電場構造について揺動と、既述した指標との関係を詳細に調べ、その特性を明らかにする。閉じ込め改善モードについては、プラズマ周辺部回転変換分布との関係が示唆されているが(F. Sano *et al.*, Nucl. Fusion. **45** (2005)1557)、その関係性についても乱流揺動の観点から解析を進める。先進ヘリカル装置において、乱流輸送においてもより優れた閉じ込めを達成する磁場配位及び実験条件を探索し、高性能なヘリカルプラズマの実現を目指す。

### 3) 平成 23 年度の計画

H23 年度の計画としては、平成 21, 22 年に取り組んできた多チャンネルの周辺乱流計測用静電プローブの構造の修正・改良に加え、プラズマとプローブとの相互作用を抑える為の高速掃引化を図る。並行して、新しく静電カメラと高速カメラとガスパフによるガスパフイメージング(Gass Puff Imaging)計測システムの整備を進める。また、周辺部だけでなくプラズマ内部の揺動の計測器として、HCN レーザー干渉計、そして本レーザーシステムを散乱計測として用いることで局所揺動計測が可能とするシステムの構築に取り組みを開始する。

図 1 に改良・製作する#11.5 及びセクションプローブヘッド構造の概観を示す。#11.5 プローブに関しては、磁気面に沿いポロイダル方向に複数のプローブピンが並んだ構造としている。ポロイダル方向に比較的離れたプローブを持つことで、長い相関長を有する揺動の波数計測に利用できる。また、トリプルプローブとしての使用や、揺動駆動粒子束  $\Gamma$ 、レイノルズ応力の評価が可能である。#14.5 プローブは、径方向及びポロイダル方向に 5 ピン並んでおり、同様にトリプルプローブとしての使用、揺動駆動粒子束  $\Gamma$ 、レイノルズ応力の評価が可能である。内部には、径・ポロイダル・トロイダルの 3 方向を向いた磁気プローブを有しており、静電揺動および磁気揺動との切り分けが期待できる。

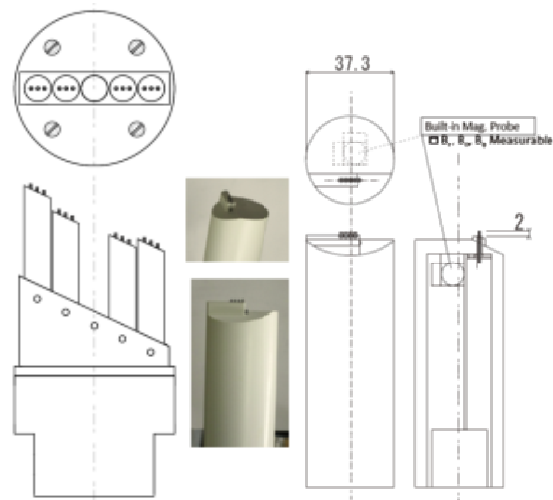


図 1. #11.5 プローブヘッド構造と #14.5 プローブヘッド構造

#14.5 プローブはガスパフ入射部を視野に入れた高速カメラを用いて、ガスパフイメージング(GPI)システムを構成する。プローブによる定量的計測とイメージングの揺動構造の可視化という両者の利点を組み合わせることにより、可視化された揺動構造の輸送への影響を定性的・定量的に評価することが期待できる。既に観測されているフィラメント構造と乱流輸送の関係、更にはメソスケール構造との関係性の解明に取り組む。

他に、径方向のプラズマの構造の計測するための、多チャンネルを有する径方向アレイプローブの開発も進める。並行して、イオン温度計測用の非対称プローブ、熱電対を用いた熱流束プローブも JAXA や大阪府立大学との共同研究として進める。

HCN レーザー干渉計の構築に関しては、京都大学 WT3 トカマク装置（吉田キャンパス）でかつて使われていた部品を流用する為、放電管、アノード・カソード部品、電源などの移設を行う。また、レーザー放電管用架台の製作を行う。またレーザーのガス割合（He, N<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>）やそれらの流量などの調査を行い、ヘリオトロンJ装置におけるレーザー構築の為の情報の探索を進める。

#### 4) 平成 23 年度の成果

本報告では、異なるトロイダル位置に設置された#11.5 プローブと#14.5 プローブを用いて得られた結果について特に述べる。高温プラズマ実験装置ヘリオトロンJ装置において、プラズマ密度  $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  ほどの中性粒子ビーム加熱プラズマ時において複数の静電プローブを用いて周辺揺動の計測を行った。

静電プローブ信号、磁気プローブ信号等に $\sim 60 \text{kHz}$ の周波数を持つ特徴的なビーム駆動型MHD揺動が観測された（図2）。このモードは、磁気プローブアレイ信号からポロイダル・トロイダルモード数 1/1 のイオン反磁性方向に回転するアルヴェン固有モードに関連するモードであることがわかっている。上記モードに関し、静電プローブで計測した周辺プラズマにおいて二種類の反応が観測された。一つ目は、MHD揺動の広帯域揺動への影響である。MHD揺動が持続的に振動し、間欠的な挙動がない場合に広帯域揺動との位相関係を持っていることが観測された。図3(a)に最外殻より4mm内側に位置したプローブ信号にバイコヒーレンス解析を適用した例を示す。60kHzのMHD揺動に相当する信号が100-500kHzの広帯域揺動との位相関係を持っていることが明確に確認できる。これに関して、同様の広帯域揺動とのカップリングが観測された $\sim 90 \text{kHz}$ のMHD揺動を伴うプラズマにおいて、揺動駆動粒子束揺動の振幅との相関をとるエンベロープ解析を適用した。結果として、300-500kHzの揺動駆動粒子束の揺動成分のエンベロープと元信号との相関が観測された。これは、60kHzのMHD揺動によって300-500kHzの広帯域の乱流揺動が影響をうけていることを示唆している。

また、MHD揺動の間欠的なバーストが観測された場合において、周辺部においてプラズマポテンシャルの低周波応答が観測された。図4に

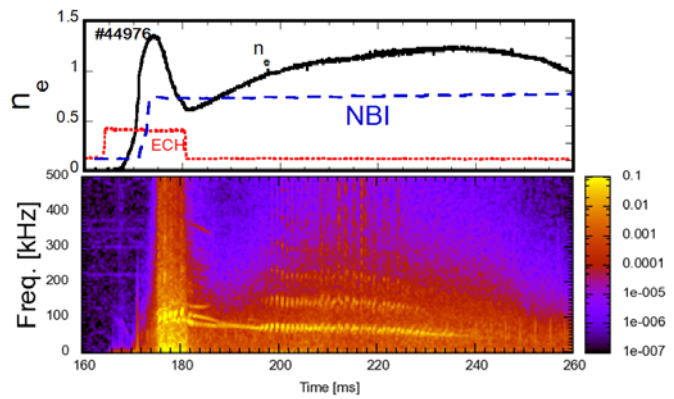


図2. 典型的放電波形と浮遊電位揺動のスペクトログラム。

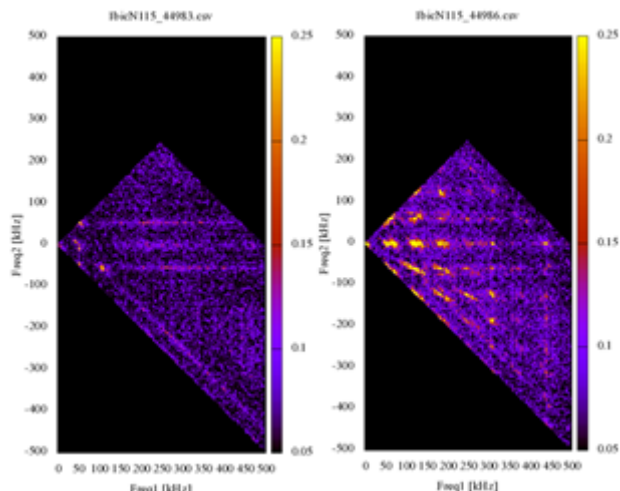


図3. 浮遊電位揺動信号へのバイコヒーレンス解析の適用結果

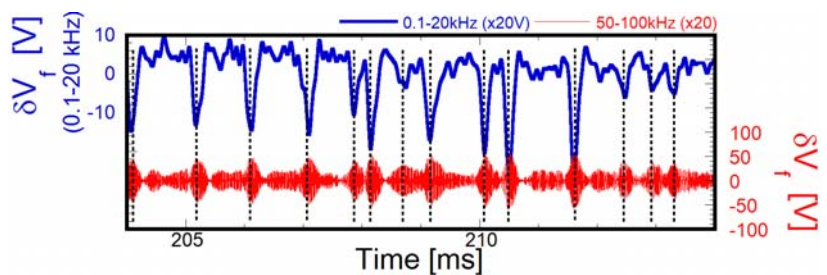


図4. MHDバースト（赤線）に応答するポテンシャルの低周波変動（青線）

バンドパスフィルタを適用した 0.1-20kHz および、50-100kHz の周波数領域のポテンシャル信号を示す。明らかに間欠的 MHD バーストと同期したポテンシャル変動が確認できる。これは、図 3 (b)の低周波領域に観測されるピークに相当している。この低周波数の変動は ECE や BES などの密度及び温度の計測結果には観測されていない。また、複数のプローブにおいてこの低周波ポテンシャル変動が観測されていることから、局所現象ではなくポテンシャル分布自体が変動していると考えられる。ビーム由来の高速イオンが MHD バーストによって損失されポテンシャル構造が変わっている可能性が挙げられる。今後より詳細な実験及び解析を進める必要がある。

## 5) その他

特になし。

## (別紙) 研究成果

### 発表論文 (査読有)

- [1] S. Ohshima, M. Takeuchi, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kobayashi, K. Hanatani, S. Konoshima, K. Mukai, H.Y. Lee and F. Sano, “*Edge Turbulence Study using Multiple Langmuir Probe System in Heliotron J*”, Proceedings of 38th European physics society on plasma physics, P4.134 (2011) (査読無)
- [2] H. Nishimura, R. Mishra, S. Ohshima, H. Nakamura, M. Tanabe, T. Fujiwara, N. Yamamoto, S. Fujioka, D. Batani, M. Veltcheva, T. Desai, R. Jafer, T. Kawamura, Y. Sentoku, R. Mancini, P. Hakel, F. Koike and K. Mima, “Energy transport and isochoric heating of a low-Z, reduced-mass target irradiated with a high intensity laser pulse”, Nuclear Fusion, 022702, **18** (2011) (査読有)
- [3] S. Ohshima, S. Yamamoto, M. Takeuchi, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kobayashi, K. Hanatani, S. Konoshima, and F. Sano, “Multi-channel Langmuir Probe for Turbulence Study in Heliotron J”, Review of Scientific instruments, 10E137, **81** (2010), (査読有)
- [4] S. Kobayashi, S. Ohshima, S. Kado, H. Y. Lee, T. Minami, T. Kagawa, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, S. Yamamoto, H. Okada, T. Minami, S. Murakami, Y. Suzuki, Y. Nakamura, K. Hanatani, S. Konoshima, K. Toshi and F. Sano, “Development of Highly Spectral-Resolved Charge Exchange Recombination Spectroscopy in Heliotron J”, J. Plasma Fusion Res. SERIES, 59 **9** (2010) , (査読有)
- [5] S. Kobayashi, S. Kado, T. Oishi, T. Kagawa, S. Ohshima, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, S. Yamamoto, H. Okada, T. Minami, S. Murakami, H. Y. Lee, T. Minami, Y. Nakamura, K. Hanatani, S. Konoshima, M. Takeuchi, K. Toshi, and F. Sano, “Application of beam emission spectroscopy to NBI plasmas of Heliotron J”, Review of Scientific instruments, 10D728, **81** (2010) , (査読有)
- [6] S. Ohshima, H. Nishimura, D. Batani, T. Desai, M. Veltcheva, H. Nakamura, M. Tanabe, T. Fujiwara, T. Kawamura, F. Koike, R. Mishra, Y. Sentoku, R. Mancini, P. Hakel and K. Mima, “Isochoric heating of low-Z, reduced-mass targets with high intensity laser pulse”, Journal of Physics: Conference Series, **244**, 022054(2010) , (査読有)

### 国際会議

- [1] S. Ohshima, K. Hashimoto, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kobayashi, K. Hanatani, S. Konoshima, K. Mukai, H.Y. Lee, M. Takeuchi and F. Sano “Edge Fluctuation Study using Multiple Langmuir Probes in Heliotron J” , 18th International Stellarator/Heliotron Workshop & 10th Asia Pacific Plasma Theory Conference, Australia, January 2012 (ポスター発表)
- [2] S. Ohshima, K. Hashimoto, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kobayashi, K. Hanatani, S. Konoshima, K. Mukai, H.Y. Lee, M. Takeuchi and F. Sano “Edge Fluctuation characteristics and behavior around last closed flux in Heliotron J” , International Toki Conference, Toki, Japan, December 2011 (ポスター発表)
- [3] S. Ohshima, K. Hashimoto, M. Takeuchi, S. Yamamoto, S. Kobayashi, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, K. Hanatani, S. Konoshima, H. Matsuura and F. Sano, “*Edge Fluctuation Measurement using Multiple Langmuir Probe in Heliotron J*”, 1st Asia Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference, Toki, Japan 2011 (ポスター発表)
- [4] S. Ohshima, M. Takeuchi, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kobayashi, K. Hanatani, S. Konoshima, K. Mukai, H.Y. Lee and F. Sano, “*Edge Turbulence Study using Multiple Langmuir Probe System in Heliotron J*”, European physics society 38<sup>th</sup> conference on plasma physics, Strasbourg, France, June 2011 (ポスター発表)

- [5] S. Ohshima, M. Takeuchi, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kobayashi, K. Hanatani, S. Konoshima, K. Mukai, H.Y. Lee and F. Sano, “*Edge Turbulence Study using Multiple Langmuir Probe System in Heliotron J*”, International Toki Conference, Toki, Japan, December 2010 (ポスター発表)
- [6] S. Ohshima, S. Yamamoto, M. Takeuchi, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kobayashi, K. Hanatani, S. Konoshima, and F. Sano, “*Multichannel Langmuir probe for turbulence study in Heliotron J.IBP*”, The 18th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, Wildwood, New Jersey, America, May, 2010 (ポスター発表)
- [7] S. Ohshima, “*Multi-channel measurement for MHD and turbulence study in CHS and Heliotron J*”, The China-Japan Workshop on Plasma Science and Nuclear Fusion, China, Chengdu, January 2010 (口頭発表)
- [8] S. Ohshima, H. Nishimura, D. Batani, T. Desai, M. Veltcheva, H. Nakamura, M. Tanabe, T. Fujiwara, S. Fujioka, T. Kawamura, F. Koike, and K. Mima, “*Isochoric heating of low-Z, reduced-mass targets with high intensity laser pulse*”, Inertial Fusion Science and Application, America, San Francisco, September, 2009 (ポスター発表)

#### 国内学会

- [1] 大島慎介他  
“Heliotron J 装置における高速イオン励起 MHD 不安定性に起因する周辺プラズマの挙動”, NIFS 共同研究 研究会、核融合科学研究所、2012 年 1 月 6-7 日
- [2] 大島慎介他  
“ヘリオトロン J 装置における静電プローブによる周辺プラズマ揺動計測とその構造の解明“, Plasma Conference 2011、石川県立音楽堂、2011 年 11 月 22 日-11 月 25 日
- [3] 大島慎介他  
“ヘリオトロン J プラズマにおける複数のプローブを用いた揺動計測  
NIFS 共同研究 研究会、核融合科学研究所、2011 年 1 月 6-7 日
- [4] 大島慎介他  
“ヘリオトロン J における複数の静電プローブを用いた乱流構造計測“  
プラズマ核融合学会第二十七回年会、北海道大学、2010 年 11 月 30 日-12 月 3 日
- [5] 大島慎介他  
“ヘリオトロン J における多チャンネル静電プローブを用いた乱流計測”  
プラズマ科学のフロンティア 2010 研究会、核融合科学研究所、2010 年 9 月 1-3 日
- [6] 大島慎介他  
“ヘリオトロン J における周辺乱流計測のための静電プローブ“  
日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学、2010 年 3 月 20-23 日
- [7] 大島慎介他  
“HIBP による CHS フィッシュボーン現象時の電場構造変化の観測“  
プラズマ核融合学会第二十六回年会、京都国際交流会館、2009 年 12 月 1-4 日
- [8] 大島慎介他  
“質量制限ターゲットを用いた高強度レーザー照射ターゲット等温加熱実験 “  
日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学黒髪キャンパス、2009 年 9 月 25-28 日

競争的資金

平成 23 年度

- [1] 関西エネルギーリサイクル財団 国際交流活動助成 100 千円
- [2] 京都大学エネルギー理工学研究所 ゼロエミッションエネルギー拠点 平成 23 年度共同利用・共同研 400 千円

平成 22 年度

- [3] 京都大学若手研究者スタートアップ研究費, 790 千円
- [4] 京都大学エネルギー理工学研究所 附属エネルギー複合機構研究センター 平成 22 年度共同研究, 70 千円