

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ソ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ソ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 24 年度の計画

磁場閉じ込めプラズマの周辺部の輸送障壁形成に代表されるように、周辺プラズマの特性はプラズマの閉じ込め性能に重大な影響を与える。これまで、ヘリオトロン J 装置においては、周辺の乱流と輸送の関係を静電プローブを用いて周辺プラズマの計測が行われてきたが、最近高速イオン励起不安定性が周辺揺動や周辺ポテンシャル構造に対して影響を与えていることが見出された。高速イオンとプラズマの相互作用によって励起される高速イオン励起不安定性は、高速イオン損失によるプラズマ閉じ込め特性の悪化、或いは壁への損傷を与えるという観点からこれまで研究されてきたが、それに加え、乱流やポテンシャル構造に影響する過程を経てバルクのプラズマの閉じ込め特性に影響を与えるという新しい視点で研究を進めることは重要である。本年度の研究では、高速イオン励起不安定性が周辺プラズマに与えている影響を明らかにすると同時に、その物理機構の解明を目指した。周辺プラズマ計測用プローブを用いて、高速イオン励起不安定性の発現時の周辺のプラズマの構造、揺動特性、高速イオンの挙動について明らかにし、また最近導入された Beam Emission Spectroscopy (BES) 計測器などのプラズマ内部揺動が検出可能な計測器を用いることで、内部と周辺部の構造変化を解明することを目指した。

また将来的に高温プラズマ内部の揺動計測を目的として、散乱計測への拡張を前提として多チャンネルの遠赤外 (FIR) レーザー干渉計システムの開発を進めた。カットオフ密度の高い波長 $337 \mu\text{m}$ の HCN レーザーを用いて、5 チャンネル以上の視線を有する電子密度分布計測システムの構築を進める。周辺揺動計測用プローブと内部揺動を計測する BES、多チャンネル干渉・散乱計を相補的に用いることでヘリオトロン J プラズマ全域の揺動の特徴を解明することを目指す。

4) 平成 24 年度の成果

ヘリオトロン J 装置では、現在異なるトロイダルセクションに四組の周辺計測用静電プローブを有している。本研究では揺動の構造・特性を詳細に調べる為、径方向アレイプローブ(図 1 (a))、磁気プローブ内臓プローブ(図 1(b))、ポロイダルアレイプローブ(図 1(c))の三組のプローブを周辺揺動計測に用いた。特に周辺部のプラズマ径方向アレイプローブを新たに設計・導入している。プローブのヘッド部は、高温プラズマからの熱負荷に備えるた

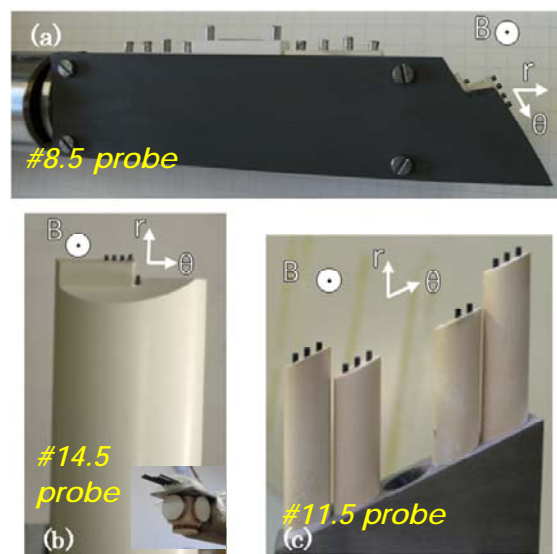


図 1. 実験に用いた(a)#8.5、(b)#14.5、(c)#11.5 セクションの位置に設置されたプローブヘッドの写真。

めに熱負荷・熱衝撃性に強いボロンナイトライドとカーボンから基本的に構成されているが、新規径方向アレイプローブに関しては、堅牢化の為に金属(Mo)で基本的に支持し、熱負荷に耐えるためカーボン、モリブデン、ボロンナイトライドから構成する複雑な構造となっている。

実験は、線平均密度 $Ne \sim 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の比較的低密度の中性粒子ビーム加熱プラズマをターゲットとして、上述したプローブを用いて最外殻磁気面周辺の揺動計測を行った。この時、60-80kHz に高調波を伴う高速イオン励起不安定性 MHD バーストが観測された。このモードは、ヘリオトロン J における NBI 加熱プラズマにおいて観測される高周波を伴う高速イオン励起によるアルヴェン固有モードの一種である。

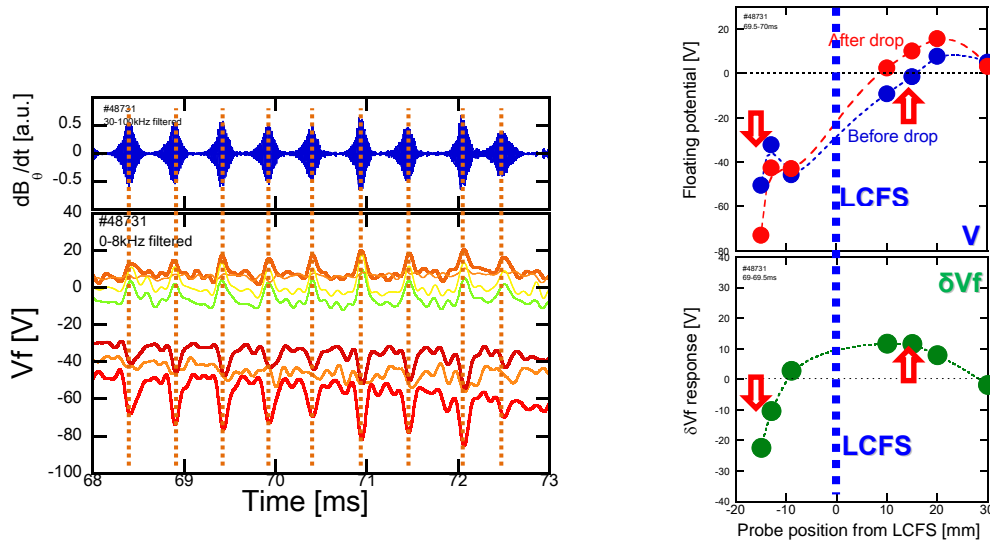


図 2. (a)磁気信号で観測されるバースト信号と(b)バーストに同期したポテンシャル応答。(c)典型的なバースト時の典型的浮遊電位(V_f)分布変化と(d)電位の変動成分(δV_f)分布図

このバースト現象と同期してプローブ計測によって周辺プラズマの電位構造が変化する現象を見出された。電位変動の大きさは、バーストの磁場揺動強度に明らかに比例し、図 1(a)-(c)のプローブを用いた相関計測によって Toroidal/Poloidal 方向に対称な構造を持っていることがわかっている。径方向アレイプローブによって、周辺部のポテンシャルのレスポンスを図 2 に示す。LCFS 内側で電位はドロップし、外側で上昇している (図 2(a-b))。尚、径方向にレスポンスのディレイは明確には観測していない。典型的なポテンシャル分布の変化を図 2(c-d) に示す。径方向にポテンシャル変動の大きさが違うことから、バースト時に電場構造が変化していることを多チャンネルプローブによって確認ができた。尚、浮遊電位の計測ではあるがトリプルプローブでの電子温度計測から、この変動は空間電位の応答にほぼ相当している。一方、ECE、および BES 信号にはバースト時の大きな応答は見えていないことから、密度/温度分布のレスポンスは小さく電場の変化を説明できない。更には、バースト時にはプローブ計測でのイオン飽和電流のレスポンスが径方向に伝搬していることが確認された。同様のイオン飽和電流の挙動は CHS でも確認できており、これは高速イオンの径方向輸送であると考えられ、バースト時には高速イオンの内部の分布が変動していることを示唆している。

またプラズマ内部の BES 計測でバースト時の揺動構造の変化を観測した。揺動の径方向の位相構造を明らかにするため、Hilbert 変換を用いた瞬時位相の評価法を提案し、実験結果に適用した。50-100kHz のバーストに相当する周波数領域の揺動をバンドパスフィルタで取り出し、Hilbert 変換によって瞬時位相と瞬時強度を評価した。MHD 現象のような背景乱流に対して強度が強い支配的な揺動である場合、支配的揺動の強度と位相の詳細な時間発展をこの手法を用いて評価が可能である。さらに何周期かのバースト時の振る舞いについて Conditional average 法を使うことで平均的な揺動強度と位相の振る舞いを抽出した。その結果バ

ースト一周期の間で揺動の空間構造が変化していることが確認された。この不安定性がバースト的ではなく連続的に発生している場合には空間構造の時間的変化は見られなかった。高速イオン励起不安定性の空間構造が変動していることは、その不安定性を駆動している高速イオンの分布が変化していると解釈できる。

本研究において、多チャンネルのプロブ計測器を用いて高速イオン励起不安定性時に起因して周辺ポテンシャルおよび電場構造が変化していること確認した。またイオン飽和電流の応答と BES 計測器の結果から、高速イオンの径方向輸送に起因することを確認できた。高速イオン励起不安定性が高速イオン励起不安定性によって内場構造に影響を与え得ることを初めて示した。

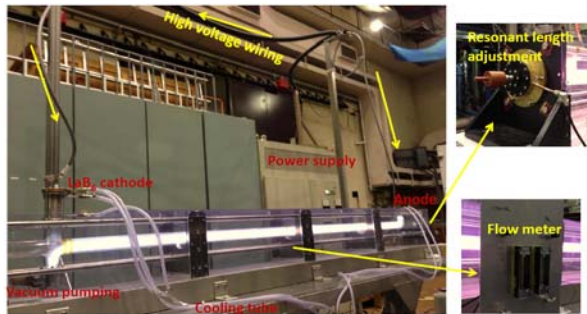


図3. 構築したHCNレーザー

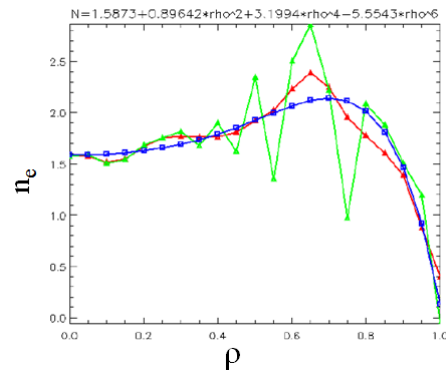


図4. 密度分布の再構成結果の一例。仮定した分布（青線）、slice&stuck 法により再構成した分布（緑線）と Phillips-Tikhonov 正則化法を適用して再構成した分布（赤線）。

また、干渉・散乱計測器用として、波長 $337 \mu\text{m}$ の遠赤外領域のレーザーを発振する HCN レーザー（図3）の開発を進めた。放電管としてはおよそ 3.3 m のパイレックスガラスの管を用いて、熱膨張性の低いスーパーインバーを用いたロッドで両端のミラー間の共振長を保つように支持する構造となっている。放電管一端を全反射ミラー、他端を半透過鏡として金属メッシュを用いて放電管内でレーザーを発振させる。金属メッシュは波長 $337 \mu\text{m}$ において透過率が数%程度の 400 line/inch のニッケル製メッシュを用いている。放電のためのカソード電極としては LaB6 を用いて、He および $\text{N}_2 + \text{CH}_4$ の混合ガスの 2 系統を独立に流量計で制御して放電管内に流入させて、電圧 $4\text{--}6 \text{ kV}$ で電流 1 A 程度の放電を行っている。放電管壁の温度をおよそ 180 度以上に保持すると、 CH_4 と N_2 から放電管壁での化学反応を経て、HCN 分子が生成され、それが発振に用いられる。ミラー付近にはタングステンワイヤを二本張ることで、偏光方向を固定している。全反射ミラーにはマイクロメータが取り付けられており、共振長を調整することが可能である。基本的に過去の WT-III や JIPP T-IIU, CHS などによって運用された実績のある HCN レーザーを参考にして機器は構成した。現在、開発したレーザーを用いて実際にレーザー発振の成功を確認しており、今後干渉計および揺動計測用散乱計測システム的设计・構築を進めていく。同時に、レーザーの出力パワーの、電圧、ガス圧、ガス比、管壁温度などへの依存性や半透過鏡の最適な透過率、レーザー発振の安定化などを進めていく。

また、干渉計は線積分計測であるため、密度分布の情報を得るためには例えばアーベル変換などを用いて再構成する必要がある。ヘリオトロン J 装置は磁気面形状が著しく円形とは異なるため、再変換は容易ではない。これを解決するため、再構成手法の検討を現在進めている。ヘリオトロン J 装置において予想される典型的な密度分布を仮定し、線積分情報からの密度分布を再構成するため、単純な slice and stuck 法を適用した例を図4に示す。この場合、再構成された分布では、明らかに不自然な歪みが確認される。特に周辺部密度が高い場合に、不連続性は激しくなることを確認しており、これは磁気面形状が周辺部で特に円形状からずれていることに起因すると考えられる。そこで、計算の仮定で Phillips-Tikhonov の正則化法を適用す

ることで、より現実に近い形状の分布を得ることが可能であることがわかった（図 4 赤線）。ただし、この手法では正則化の際の正則化パラメータの設定には任意性があり、実際の実験に適用する際には如何にそのパラメータを決定するかが問題となる。今後、この手法の実験データへの具体的な適用方法について検討を進める。

研究成果

(1) 論文、著書

S. Ohshima, K. Hashimoto, S. Kobayashi, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Konoshima, K. Kasajima, N. Shi, H. Y. Lee, L. Zang, Y. Nagae, K. Mukai, H. Matsuura, M. Takeuchi and F. Sano
"Edge Plasma Response to Beam-driven MHD Instability in Heliotron J", Proceedings of 24th IAEA Fusion Energy Conference 2012 (査読無)

(2) 国際会議における発表

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, L. Zang, M. Takeuchi and F. Sano
"Influence of Beam Driven MHD Instability to Edge Plasma Observed in Heliotron J" 2nd Asia Pacific Transport Working Group Meeting, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China May 15-18, 2012 (poster)

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, L. Zang, K. Kasajima, M. Takeuchi and F. Sano
"Structural Change of Edge Plasma Potential on Energetic Ion Driven MHD Burst in Heliotron J" Japan-Korea Seminar 2012 for Plasma Diagnostics, Seoguipo training center of Jeju National University, Jeju, Korea, August 23-25, 2012 (poster)

S. Ohshima, K. Hashimoto, S. Kobayashi, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Konoshima, K. Kasajima, N. Shi, H. Y. Lee, L. Zang, Y. Nagae, K. Mukai, H. Matsuura, M. Takeuchi and F. Sano
"Edge Plasma Response to Beam-driven MHD Instability in Heliotron J", 24th IAEA Fusion Energy Conference 2012, San Diego, California, USA, October 8-13, 2012 (poster)