

氏 名 中野 治久

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 927 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 重イオンビームプローブを用いた揺動分布計測と経路積分
効果の評価法の確立

論文審査委員 主 査 教授 佐貫 平二
助教授 藤澤 彰英
教授 岡村 昇一
教授 小山 孝一郎
教授 水内 亨（京都大学）

①研究目的

トラス磁場閉じ込めプラズマ中の異常輸送はプラズマの密度揺動と電場揺動の積であらわされる。したがって、異常輸送を実験面から理解するためには局所的な密度揺動と電場揺動を計測する必要がある。重イオンビームプローブ(HIBP)は、高温プラズマ内部の密度、電位(電場)、磁場などを原理的に同時計測できる現在唯一の装置である。HIBPは、高時間($\sim \mu\text{s}$)・高空間($\sim \text{mm}$)分解能を持ち、検出ビームの強度およびエネルギーからそれぞれ密度揺動および電位揺動を同時測定できる装置である。しかしながら、世界的にもHIBPを用いて高温プラズマ内部の密度揺動と電位揺動を同時計測した例は少なく、ISX-BおよびTEXTの2つのトカマクプラズマのみである。CHSではこれまでHIBPを用いて高温プラズマの密度や電位(電場)分布や遷移現象の観測を行ってきたが、揺動の同時測定へと発展させることを考えてきた。本研究の第一の目的はイオン源を改良し、CHSプラズマ全域の密度揺動と電位揺動を同時計測することである。

また、HIBPによる密度揺動計測はビームがイオン化する局所的な密度揺動とビームの経路上の揺動が含まれる。そのため、プラズマが高密度になるにつれて経路積分効果が大きくなるのが古くから計測上の問題として指摘されてきた。本研究の第2の目的はこの経路積分効果を除いて局所密度揺動を推定するための方法を確認し、経路積分効果を定量的に評価することである。

②研究内容

i. イオン源の改良

密度揺動および電位揺動の同時計測のためにイオンガンの一部であるイオン源ソケットの改良を行った。以前は図1(a)に示すようにフィラメントはセラミックを加熱し、その熱がイオン源(Csゼオライト)を間接的に加熱する市販のものを使っていた。この方式ではイオン源に十分な熱が伝わっていないと考えた。そこで、十分な熱をイオン源に加えるために図1(b)のようにフィラメントがイオン源を直接加熱する形状のものを手作りした。その結果、検出ビーム電流が以前の最大5倍程度($\sim 1\mu\text{A}$)の強度が得られ、電位揺動が検出可能な電流値になった。

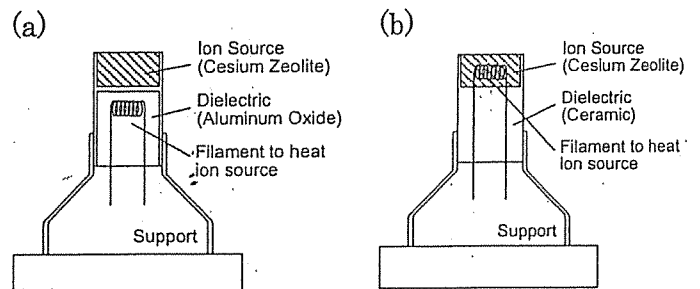


図1. イオン源ソケット。(a)旧型、(b)新型。

ii. 密度揺動と電位揺動の同時計測

このイオン源ソケットを用い、核融合科学研究所のヘリカル型磁場閉じ込め装置であるCHSにおいて高温プラズマの密度揺動(検出ビーム電流揺動)と電位揺動(検出ビームのエネルギー揺動)の同時計測を行った。CHSプラズマは大半径 $R=1\text{m}$ 、小半径 $a=0.2\text{m}$ である。今回はまず電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)により維持された平均密度 $\sim 5 \times 10^{18}\text{m}^{-3}$ 、中心電子温度 $\sim 2\text{keV}$ のプラズマを2mm間隔で計測した結果を図2に示す。ほぼ中心まで全域($0 < r < 0.18\text{m}$)の密度揺動と

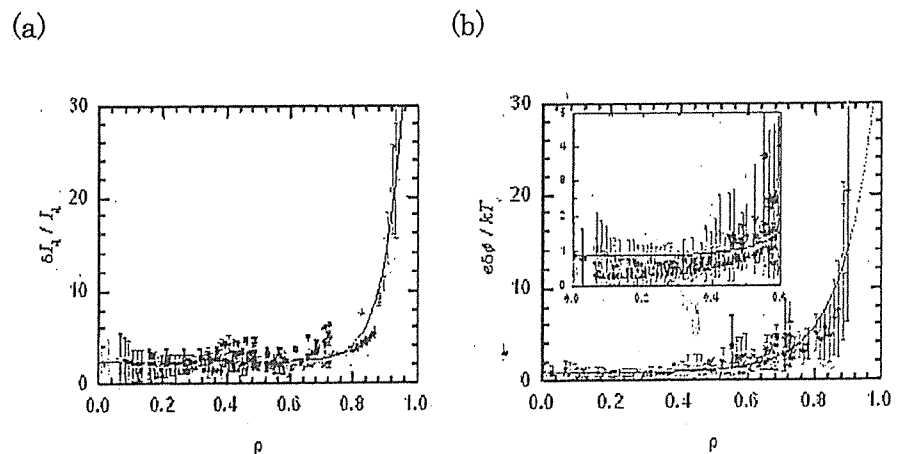


図2. 密度揺動と電位揺動の同時計測。色の違いは計測日の違い。
(a)密度揺動、(b)電位揺動

電位揺動の同時計測にトロイダルプラズマとして初めて成功した(H. Nakano, *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 75,3505 (2004))。揺動のパワースペクトルは全体として乱流を示す広帯域なスペクトルであり、密度揺動と電位揺動の間にはボルツマン関係がほぼ成立していることが示された。またTEXTおよびISX-Bと同様にプラズマ端に向かうほど揺動レベルが大きくなることが判明した。

iii. 局所密度揺動の推定法の確立

検出ビーム揺動強度は次式であらわすことができる。

$$\eta^2(\rho_*) = \xi^2(\rho_*) - 2 \sum_{i=1,2} \int_{V_i} \langle \xi(\rho_*) \xi(\rho_i) \rangle_E S_1(\rho_i) d\rho_i \\ + \sum_{i=1,2} \sum_{j=1,2} \iint_{V_{ij}} \langle \xi(\rho_i) \xi(\rho_j) \rangle_E S_i(\rho_i) S_j(\rho_j) d\rho_i d\rho_j$$

ここで、 $\eta = \tilde{I}/I$ 、 $\xi = \tilde{n}/n$ 、 S はそれぞれ検出ビーム電流揺動、イオン化点の局所密度揺動、イオン化率である。右辺第二項および第三項はそれぞれイオン化点周りの遮蔽効果およびビーム軌道上の積算効果をあらわす。イオン化率は電子密度および電子温度の関数であるため Thomson 散乱計測などのデータより実験的に計算できる。 $\langle \rangle_E$ の項は、空間2点の揺動の相関関数(アンサンプル平均)を示しており、揺動強度とそれらの相関項であらわされる。よって揺動の相関項が評価されれば、上式は未知量 ξ の絶対値の積分方程式となり、局所密度揺動はこの積分方程式を解くことによって推定される。

CHSのHIBPは3つの近接する点の同時計測をしているので近接点間の相関を求めることが可能である。相関項がガウス関数 $f(x) = \exp(-0.5(x/l_c)^2)$ であると仮定し、これを上式へ代入して局所密度揺動強度分布を求めた。図3にCHSの標準配位において密度 $\sim 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、電子温度 $\sim 1 \text{keV}$ のECHプラズマにCsビームを入射した時の局所密度揺動強度の推定結果を示す。局所密度揺動は検出ビーム電流揺動に比べて、周辺ではほとんど差はないが、中心付近では半分以下になっており、大きく変わっていることがわかる。

さらにこの局所揺動強度分布強度の推定法を発展させ、周波数ごとにこれを行うことで局所密度揺動スペクトルの推定した。この際、相関についても経路積分効果の補正法を考案し適用した。図4に図3と同一データの $\rho \sim 0.26$ におけるの検出ビーム電流揺動と局所密度揺動のスペクトルを示す。低周波で経路積分効果が大きいことがわかる。

以上より、本研究においてプラズマ内部の全半径領域に渡る電子密度揺動と電位揺動の同時計測がHIBPによってきわめて高い空間精度($\sim \text{mm}$)で実現した。またHIBPによる密度揺動測定において古くから知られていた経路積分効果を定量的に評価し、局所密度揺動を推定する方法を確立した。この局所密度揺動の推定法により、より正確な揺動と輸送の関係の研究が可能となる他、高密度プラズマや揺動密度限界にあるプラズマの研究が行えることが期待される。

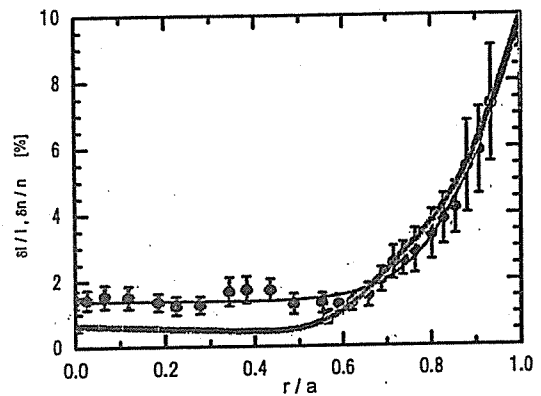


図3. 検出ビーム電流揺動と局所密度揺動。

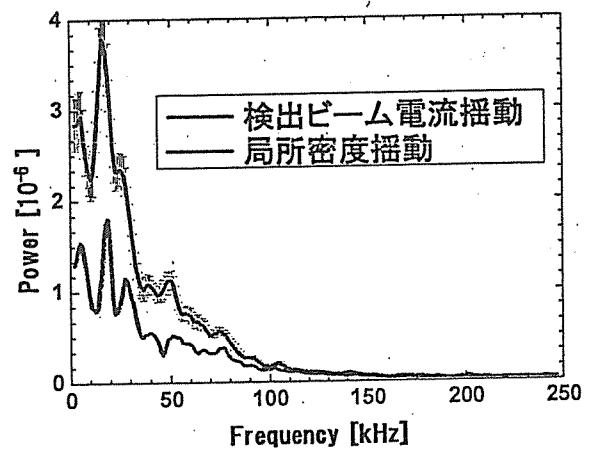


図4. 局所密度揺動スペクトル

論文の審査結果の要旨

磁場閉じ込めプラズマでは、密度や温度による不均一性により生じる乱流がプラズマの粒子やエネルギーの輸送を引き起こすことは長年の核融合研究で示されている。その詳細なメカニズムを理解するため、高温プラズマ乱流の精密な局所的観測を目指した実験研究がレーザーやビームなどの先進的な技術を用いて国際的に行われている。その中で、重イオンビームプローブは密度と電位の揺動を同時計測することが可能であり、直接、プラズマの粒子輸送を評価できる高い潜在性をもつ装置である。同計測法による同時計測は、これまで ISX-B や TEXT などのトカマクの周辺部分において行われ、周辺の揺動分布形状に関する重要な知見を与えている。一方で、ビーム軌道上の密度の揺らぎが混入する経路積分効果がその密度揺動計測上の問題点として知られている。

本研究ではこの重イオンビームプローブによるトロイダルプラズマの中心部分をも含む計測を CHS 装置にて行い、密度揺動に伴う経路積分効果を補正した局所的な密度揺動を評価することで、全半径に渡るより正確な密度および電位揺動分布を評価することに成功した。この結果は重イオンビームプローブの潜在能力を実証し、将来のプラズマの輸送と揺動の研究の基礎となる強力かつ精密な計測法を提示している。

以下は本研究の成果について詳述する。

1. 重イオンビームプローブでは一般に電子密度揺動に比べ電位揺動を計測するためにはより強いビームが必要となる。本研究では、イオン源を自作改良し一桁以上大きなビーム電流を得ることで、密度揺動のみの計測から密度・電位揺動の同時計測にまで発展させた。その結果全半径領域に渡る同時計測を成功し密度および電位揺動分布を得た。
2. 観測した密度揺動から局所的密度揺動の値を評価するために、観測値と局所揺動の関係を示す積分方程式を導いた。この方程式を系統的に考察し、経路積分効果を（観測される揺動が実際よりも過小評価される）遮蔽効果と（軌道上の揺動が局所揺動に加算される）積算効果の2種に分類した。
3. 上記積分方程式は、揺動の相関特性が与えられると解ける。本研究では近接3点の同時計測から揺動の相関特性を評価することで、局所的な密度揺動分布を評価した。その結果、周辺領域では遮蔽効果、一方、中心部分では積算効果が支配的であることが示されている。
4. 上記の方法を、密度揺動スペクトルに拡張し局所的な密度揺動スペクトルの評価を行った。この過程において、周波数ごとの相関特性（コヒーレンス）に対して経路積分効果の補正を行っている。
5. 分布計測の結果、（経路積分効果を除いても）、密度揺動／電位揺動の値が周辺 ($r/a < 0.9$) に向かい減少する傾向があることが示された。また、周辺に向かうに従って揺動の特性長が長くなる傾向があるなど、プラズマ揺動の全域的な特性に関する初期的な結果が得られている。

総じて、本研究は高温プラズマの計測技術の開発と発展に対して寄与した優れた仕事である。また、局所密度揺動の推定法は HIBP のみならず他のビーム計測に応用できる汎用性をもった成果である。以上より、本研究は博士論文として十分な価値のあるものとして審査委員全員一致で判断した。