

令和元年6月26日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06946

研究課題名(和文)重イオンビームプローブの高精度化による二次元電場構造形成と乱流輸送に関する研究

研究課題名(英文) Research of two dimensional structure formation of radial electric field and turbulence transport with improved high accuracy Heavy Ion Beam Probe

研究代表者

清水 昭博 (SHIMIZU, AKIHIRO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：00390633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：大型ヘリカル装置(LHD)において、重イオンビームプローブ(HIBP)を用いた電位・密度揺動の二次元計測を実施した。まず、計測におけるS/N比を増大させるため、銀の負イオンビームを生成できるように負イオン源を改良し、これを用いて揺動計測を実施した。しかしながら、想定したプローブビーム電流量及びS/N比を得ることができなかった。そのため、方針を変更して新しくイオン源を製作し、テストスタンドで試験運転を行っている。電位・密度揺動の二次元計測は、従来のイオン源を用いて実施し、アルヴェン固有モード由来の200 kHzの揺動及び高エネルギー粒子駆動による測地線音響モードの二次元構造の計測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LHDにおいて、HIBPにより電位・密度揺動を同時に二次元で計測できることを証明し、物理研究へ適用すれば非常に有用であることを示した。層状流の一種である測地線音響モードの二次元構造の計測に成功し、密度揺動について $m=1$ の構造だけではなく、 $m=0$ の構造への変化も示唆されるデータを取得した。S/N比をもう少し向上できれば、乱流と層状流について更に踏み込んだ研究が実施でき、異常輸送の解明への可能性につなげられることを見出した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is two-dimensional measurement of potential and density fluctuation with good accuracy by heavy ion beam probe in the Large Helical Device. At first, in order to improve S/N ratio, we improved the negative ion source to extract negative ion beam of Ag. However, we were not able to obtain sufficient probe beam current of Ag as expected. Therefore, we designed and made a new negative ion source to increase the negative ion current. Now, we are testing it in the test stand device. As for two-dimensional measurement of potential and density fluctuation, we used the existing negative ion source. Two-dimensional fluctuation structure of 200 kHz Alfvén mode and geodesic acoustic mode driven by energetic particle were successfully measured by HIBP.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：電場構造 二次元構造 乱流揺動 乱流輸送 重イオンビームプローブ ヘリカル

1. 研究開始当初の背景

トーラス磁場閉じ込め装置のプラズマ閉じ込め性能は、ランダムな衝突による拡散(新古典拡散)では簡単に説明できず、そこから見積られる拡散よりも大きくなるのが、これまでの実験研究から明らかになっている。このような、プラズマ中の輸送の増大は、異常輸送と呼ばれドリフト不安定性に代表されるようなプラズマ中のマイクロな乱流によって引き起こされると考えられている。

このような異常輸送に支配されるプラズマにおいて、小半径方向の電場(径電場)構造が閉じ込め性能に大きな影響を与えることが実験から見出されている。例えば、プラズマ中に小半径方向に電場勾配が生成されるとせん断流が駆動され、乱流が抑制される。これは、プラズマ中に異常輸送の原因となる乱流渦構造が、せん断流によって歪められて相関長が短くなり、乱流駆動による輸送が抑えられることによる。ところで、最近の研究では、非線形結合により、マイクロな乱流渦構造が磁気面方向に大域的だが小半径方向にマイクロな構造(メソスケールと呼ばれる)を形成することが理論的に予測されている。この構造は、帯状の流れを駆動することから帯状流と呼ばれており、帯状流構造によるせん断流の乱流抑制効果や、乱流と帯状流の間のエネルギーの移送・散逸(捕食者/被食者の関係)が、装置の閉じ込め性能を正確に予測する上で重要となっている。

これらのプラズマ中の流れは、 $E \times B$ ドリフトを通して、電場と密接な関係にあり、電場又は電位の二次元計測を、揺動計測と同時に実施することで、流れの構造と乱流揺動及びそれに伴う輸送を調べることができる。

2. 研究の目的

上記に述べたように、トーラスプラズマ中における流れの構造を計測し、乱流と電場構造の相互作用によるエネルギーの移送・散逸機構を検証するためには電場の二次元計測が重要となる。本研究は、これらの課題に取り組むために、大型ヘリカル装置(LHD)において、開発研究が進められている重イオンビームプローブ(HIBP)において、二次元電位計測を行うための改良を施し更に S/N 比を改善することを第一の目的とする。改良点としては、ビーム起動調整システムの改造と、イオン源の改造の二点を計画していた。これにより、プローブビームの制御性を高め、更に S/N 比を改善して効率的に電位・密度揺動データを取得することを目指す。これらの改良を施した後、二次元電位データを取得する。同時に電位揺動及び密度揺動を計測し、流れの構造と乱流揺動の大きさや、シア流による乱流抑制・閉じ込め特性への影響を調べて、異常輸送の解明を目指すことを第二の目的とする。

3. 研究の方法

HIBP は、プラズマ中の局所的な電位を、プラズマに擾乱を与えずに直接的に測定でき、更に高時間/高空間分解能であるという特長を有している。一荷の電荷を持つプローブビーム(一次ビーム)をプラズマ中に入射し、プラズマ中の電子及びイオンと衝突して生じた二荷のビーム(二次ビーム)を、プラズマ外部で検出しエネルギー分析することによって、イオン化点での電位を計測する。この時のイオン化点が即ち観測点となる。観測点は、プローブビームの入射角を変更することによって時間的に変更することができる。LHD では、10 Hz で入射角を変更し、観測点をスキャンすることができる。プローブビームの入射角に加えて、プローブビームのエネルギーを変更することにより、更に観測領域を拡げて二次元分布を計測することができる。

図 1 に、LHD における HIBP の観測領域を示す。図中の数字は、プローブビームのエネルギーを表している。例えば、1.134 MeV のラインは、プローブビームのエネルギーを 1.134 MeV として、入射角を 10 Hz で変更した時に、観測点はこの水色のライン上を 10 Hz でスキャンできることを表している。観測点のサイズは、おおよそ 2~3 cm 程度のオーダーとなる。

プローブビームのエネルギーを変更することは、加速器の電圧を変えることを意味するが、LHD における HIBP ではこの変更は容易ではない。というの

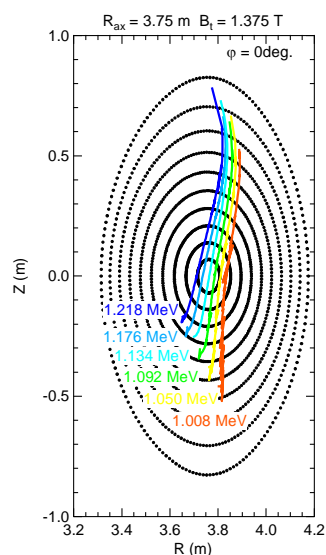


図 1 HIBP の計測領域

は、LHD における HIBP はプローブビーム入射側のビーム輸送ラインが長いこと、プローブビームのエネルギーを変更すると、ビーム輸送ラインにおいてビーム軌道の調整が必要となるからである。ビーム輸送ラインの長さはおおよそ 20 m であり、多数の静電偏向器が存在する。これらすべての設定電圧を連携して変更・調整する必要がある。

この調整を自動的に行うためのシステムを、PC を用いて構築している。ビーム位置と静電偏向器の電圧の関係は、基本的に線形なので、行列を用いた線形システムで最適化アルゴリズムを設定し、制御システムを構築した。ビームラインにおけるビーム位置は、ビームプロファイルモニタ(BPM)で計測される。LHD では、重水素実験が 2017 年に始まっている。これに伴い、機器の遮蔽を強化する必要があり、BPM における計測タイミングモニタ装置について改良を行っている。これらの改良を施した自動制御システムを用いることによって、3 分以内にプローブビームエネルギーを変更することに成功した。2次元の電位分布は、おおよそ3分ごとに生成される LHD の放電ごとに、HIBP のプローブビームエネルギーを変更して取得した。

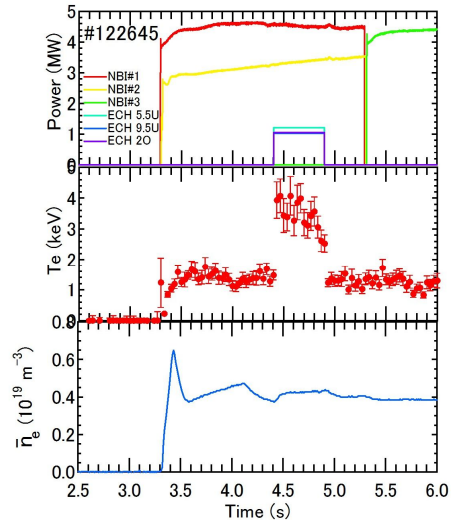


図2 プラズマ放電波形

4. 研究成果

図2に HIBP による二次元計測を実施した典型的な放電のプラズマパラメータの時間変化を示す。プラズマは接線入射中性粒子ビーム加熱により生成維持されている。電子サイクロトロン入射加熱(ECH)を 4.4 ~ 4.9 秒の時刻で重畳している。線平均電子密度は $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と低めである。まず、ECH 入射時の二次元平衡電位分布を計測した。電位分布に関して、新古典拡散の両極性条件から求めた計算値と実験値を比較した。得られた電位分布は、新古典拡散理論から見積もられた電位分布とおおよそ一致した。

次に、電位揺動の二次元分布について解析した。周波数は 190~120 kHz で、高エネルギー粒子によって駆動されるアルヴェン固有モードに伴う揺動であると考えられる。S/N 比が十分ではないため、磁気プローブで観測された磁気揺動と HIBP で観測された電位揺動のコヒーレンスを算出し、それを用いて電位揺動の S/N 比を改善した。図3に、5.5~7.0 s における、磁気プローブによって計測された磁気揺動(a)、HIBP によって計測された電位揺動(b)のスペクトログラムと、これらのコヒーレンス(c)を示す。電位揺動に見られる縞模様は、HIBP の計測点を入射角変更により 10 Hz でスキャンしていることによる。 $P[X]$ を、HIBP の時系列信号 X のパワースペクトラム、 $P[Y]$ を磁気プローブの時系列信号 Y のパワースペクトラムとする。 X について、今考えているモード成分 X_{mode} とバックグラウンドのノイズ成分 X_{bg} に分けられるとする。コヒーレンスは、 $\gamma^2 = (P[X_{mode}]P[Y_{mode}]) / \{(P[X_{mode}] + P[X_{bg}]) (P[X_{mode}] + P[X_{bg}])\}$ と表される。これを用いると、 $P[X_{mode}] \sim \gamma^2 P[X]$ と書ける。この式を用いて電位揺動のパワースペクトラム密度を算出したものを図4に示す。赤線が、HIBP の電位揺動データから直接パワースペクトラム $P[X]$ を算出したもの、青線は磁気揺動とのコヒーレンスを用いて、 $\gamma^2 P[X]$ を算出したものである。ノイズ成分が低減されて、周波数のピークが明瞭になっていることが分かる。この手法を用いて、190~200 kHz のモードに関して、ノイズ成分を低減して電位揺動の二次元振幅構造を計測した。図5(a),(b),(c)にその結果を示す。(a),(b),(c)は、参照信号である磁気プローブについて、別の計測位置のものを用いた時の解析結果を比較してある。参照信号の違いにより、若干変化があるが大きな構造は変化していないことが分かる。

次に、高エネルギー粒子駆動による測地線音響モード(EGAM)について、HIBP を用いて電位・密度揺動を計測した。モードが EGAM であることは、磁気プローブによるトロイダルモード数が 0 であること、周波数の温度依存性から特定されている。理論的には、電位揺動は $m=0$ 、密度揺動は $m=1$ の構造が予想される。しかしながら、密度揺動に関しては $m=1$ だけでなく、 $m=0$ のモードが観測された。図6に、観測された EGAM に伴う磁気揺動(磁気プローブ計測による)と、電位揺動、密度揺動(HIBP 計測による)のスペクトログラムを示す。密度揺動は、40 kHz の低周波数領域では、空間構造から $m=0$ (または過モード)と判別される。時間的に、振幅がゼロになって途切れた後、 $m=1$ のモードとなる。その後、更にもう一度 $m=0$ のモードへと変化する。この遷移の理由については、現在の所不明であるが、バルクの電子密度揺動だけでなく、高速イオン密度の揺動も関係しているためであると考えられる。

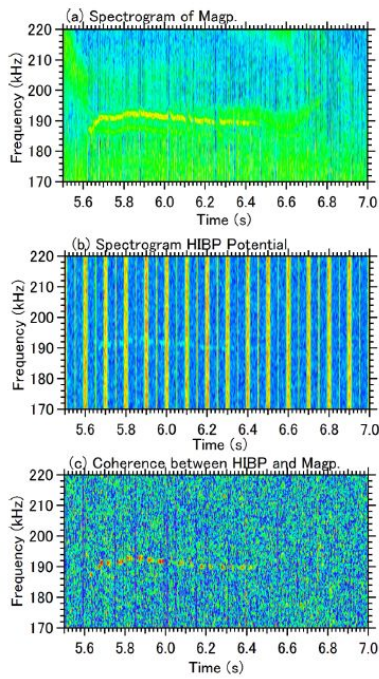


図 3 (a) 磁気プローブによって計測された磁気揺動、(b) HIBP によって計測された電位揺動、(c) 磁気揺動と電位揺動のコヒーレンスを示す。

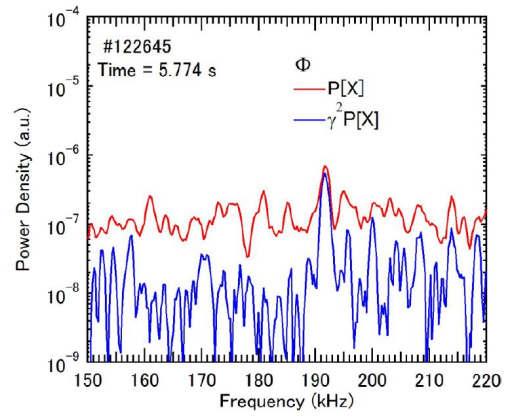


図 4 電位揺動のパワースペクトラム(赤)及び、磁気揺動とのコヒーレンスを用いてノイズを除去した電位揺動のパワースペクトラム(青)を示す。

HIBP の S/N 比向上を目指すために、新負イオン源を開発し、プローブ電流を増大させることを検討している。この新負イオン源については製作が終了し、テストスタンドに取り付け作業が完了した所である。図 7 に、新イオン源の概略図を示す。フィラメントをこれまでの 2 本から 3 本に増加している。テストスタンドにおける試運転で、運転パラメータを確認し性能評価試験を済ませた後、HIBP の実機に取り付ける予定である。

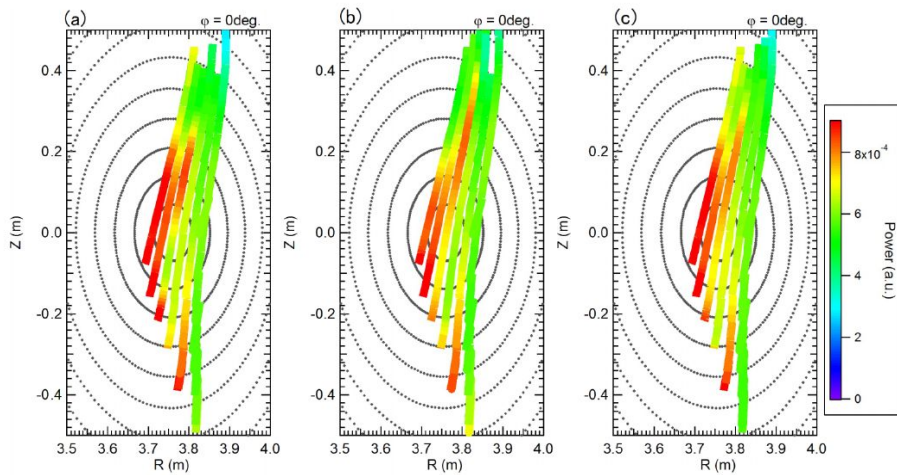


図 5 190~200 Hz のモード成分に関する電位揺動振幅の二次元構造を示す。磁気プローブを参照信号として用いてノイズ成分を除去している。(a)、(b)、(c)で異なる参照信号を用いている。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. A. Shimizu, A. Fujisawa, S. Ohshima, H. Nakano, T. Minami, M. Isobe, S. Okamura, K. Matsuoka, “Density profile measurement with a heavy ion beam probe in a toroidal plasma of the compact helical system”

DOI: 10.1063/1.5039571

Review of Scientific Instruments **89** (2018) 113507.

2. H. Liu, A. Shimizu, M. Isobe, S. Okamura, S. Nishimura, C. Suzuki, Y. Xu, X. Zhang, B. Liu, J. Huang, X. Wang, H. Liu, C. Tang et al.,

“Magnetic configuration and modular coil design for the chinese first quasi-axisymmetric stellarator”

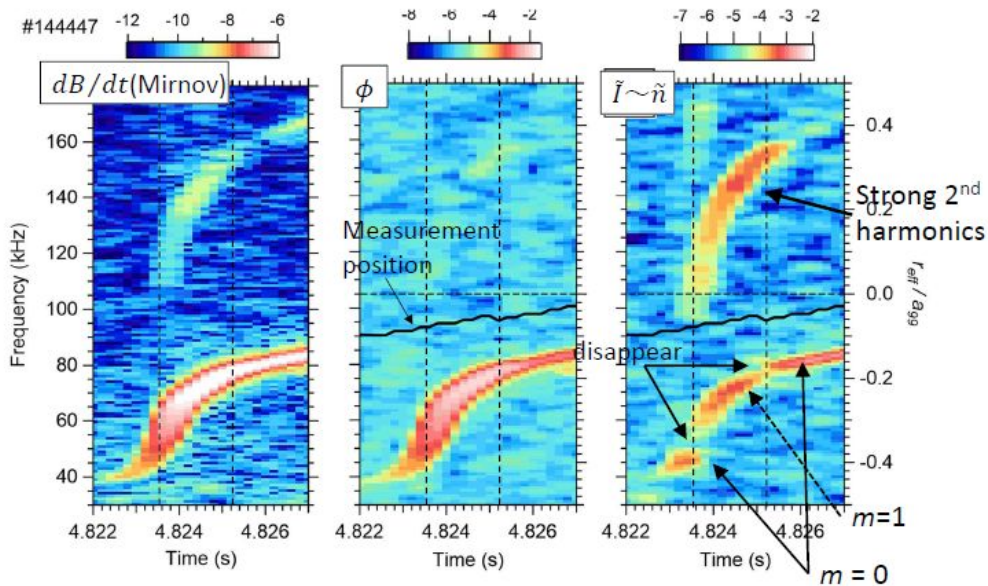


図 6 測地線音響モード(EGAM)に伴う磁場揺動(左)、電位揺動(中)、密度揺動(右)を示す。

DOI: 10.1585/pfr.13.3405067
 Plasma and Fusion Research **13** (2018) 3405067.

3. A. Shimizu, H. Liu, M. Isobe, S. Okamura, S. Nishimura, C. Suzuki, Y. Xu, X. Zhang, B. Liu, J. Huang, X. Wang, H. Liu et al., “Configuration property of the chinese first quasi-axisymmetric stellarator” DOI: 10.1585/pfr.13.3403123 Plasma and Fusion Research **13** (2018) 3403123.

4. A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, S. Kato, K. Ogawa, H. Takahashi, H. Igami, Y. Yoshimura et al., “2D spatial profile measurements of potential fluctuation with heavy ion beam probe on the Large Helical Device” DOI: 10.1063/1.4963908 Review of Scientific Instruments **87** (2016) 11E731.

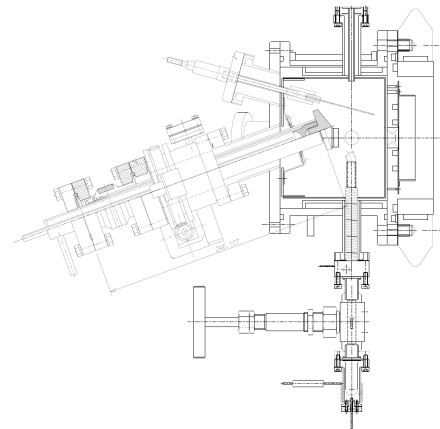


図 7 新負イオン源の概略図を示す。フィラメントを追加し、負イオン電流の増大を目指す。

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 井戸 毅、一ノ瀬 薫、清水 昭博、佐々木 真
 “LHD における高速イオン励起測地線音波の 2 次元構造の観測”
 日本物理学会第 74 回年次大会, 3 月 14~17 日(2019) 九州大学

2. 井戸 毅、清水 昭博、長壁 正樹
 “大型ヘリカル装置における高速イオン励起 GAM の空間構造”
 日本物理学会第 73 回年次大会, 3 月 22 日~25 日(2018) 東京理科大学

3. A. Shimizu, H. Liu, S. Kinoshita, M. Isobe, K. Ogawa, S. Okamura, G. Xiong, Y. Xu, H. Liu, X. Zhang, J. Huang, X. Wang, C. Tang, D. Yin et al., “Consideration of the influence of coil misalignment on the CFQS magnetic configuration” The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (ITC27 & APPTC2018), November 19-22 (2018) Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan. P1-44 (Poster).

4. A. Shimizu, H. Liu, M. Isobe, S. Okamura, S. Kinoshita, Y. Xu, X. Zhang, J. Huang, X. Wang, H. Liu, C. Tang, D. Yin, Y. Wan, and the CFQS team

“Design study of the magnetic field coils and configuration for the Chinese First Quasi-axisymmetric Stellarator”

45th EPS Conference on Plasma Physics, 2 - 6 July (2018) Prague, Czech Republic, Vol. 42A, P1.1053 (Poster)

5. A. Shimizu, H. Liu, M. Isobe, S. Okamura, S. Nishimura, C. Suzuki et al.,

“Configuration property of Chinese First Quasi-axisymmetric Stellarator”

The 26th International Toki Conference (ITC-26) & The 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference, December 5-8 (2017) Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan. P2-43 (Poster).

6. T. Ido, A. Shimizu, M. Osakabe, K. Itoh, M. Lesure, K. Ogawa, M. Nishiura, Y. Kosuga et al.,

“Energetic particle-driven geodesic acoustic mode in the Large Helical Device”

1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Sep. 18-23 (2017) Chengdu, China (Invited).

7. A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, S. Kato

“2D spatial profile measurements of potential and density fluctuation with heavy ion beam probe on the Large Helical Device”

21st Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics

5-9, Jun. (2016) Monona Terrace, Madison, Wisconsin (Poster).

8. 清水 昭博、井戸 毅、中野 治久、西浦 正樹、加藤 眞治

“LHD における HIBP の密度揺動計測の経路積分効果”

プラズマ・核融合学会第 33 回年会, 東北大学, 11 月 29~12 月 2 日(2016) 仙台

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

なし

取得状況(計 0 件)

なし

〔その他〕

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：井戸 毅

ローマ字氏名：IDO TAKECHI

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：高温プラズマ物理研究系

職名：准教授

研究協力者氏名：藤澤 彰英

ローマ字氏名：FUJISAWA AKIHIDE

所属研究機関名：九州大学

部局名：応用力学研究所

職名：教授