

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820441

研究課題名(和文) プラズマ電位の二次元計測による構造形成と乱流輸送に関する研究

研究課題名(英文) Research of structure formation and turbulence transport with two-dimensional plasma potential measurement

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) 2,600,000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)を用いて二次元電位計測を行うための改良をまず行った。二次元計測の実施にはプローブビームのエネルギーを変更しビーム軌道を調整する必要がある。これを自動的に実施するPCベースのシステムを開発した。このシステムを適用することによって、電位の二次元平衡電位分布の計測に成功した。電位揺動に関しては、MHD由来の200 kHzの揺動について、磁気プローブの信号との相関解析によりS/N比を向上することによって電位揺動振幅及び位相の二次元分布計測に成功した。乱流由来の揺動に関してはS/N比は不十分であり、更なる向上が望まれる。

研究成果の概要(英文)：For two-dimensional spatial potential profile measurements, automatic adjustment system is developed for the heavy ion beam probe (HIBP) on the Large Helical Device (LHD). The probe beam energy is changed shot by shot, and this automatic adjustment system is used to optimize beam trajectory on the beam transport line. Equilibrium 2D potential profile is successfully measured with the LHD-HIBP system. As for the fluctuation measurements, by analyzing correlation analysis between HIBP and magnetic probe signal, the noise level of the power spectrum of potential fluctuation is reduced. 2D structures of potential phase and amplitude of the 200 kHz MHD instability mode are successfully obtained. However, as for the turbulence measurements, signal to noise ratio is not enough and further improvement is expected.

研究分野：プラズマ計測

キーワード：電場構造 重イオンビームプローブ 二次元計測 ヘリカル 乱流 帯状流

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)では説明できないことがこれまでの実験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(異常輸送)は、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。

異常輸送が支配的となるプラズマ中において、小半径方向の電場(径電場)が、閉じ込め性能に大きな影響を与える。例えば、プラズマ中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。これによって異常輸送が低減され閉じ込め性能の改善が期待される。最近の研究では、非線形結合により、マイクロ乱流が磁気面方向に大域的かつ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、層状の流れを駆動することから帯状流と呼ばれており、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)や、帯状流構造によるせん断流の乱流抑制効果は装置の閉じ込め性能を正確に予測する上で重要な物理機構である。また、乱流の非線形結合により、磁気面方向にはマイクロだが小半径方向には大域的となる構造(ストリーマー)が形成され、異常輸送が促進される可能性も理論研究から予想され、それを示唆するような実験結果も得られている。

これらのプラズマ中の流れは、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトを通して、電場と密接な関係にあり、電場の二次元計測を、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、乱流とのエネルギーの移送・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すことを第一の目的とする。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の影響を調べることが第二の目的とする。

3. 研究の方法

HIBPは、高時間/高空間分解能の特性を持ち、高温プラズマ中の電位を直接的に測定できる特徴を有している。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

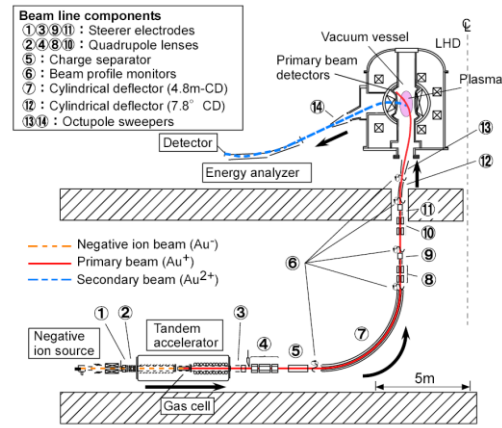


図1 LHDにおけるHIBPのシステム図

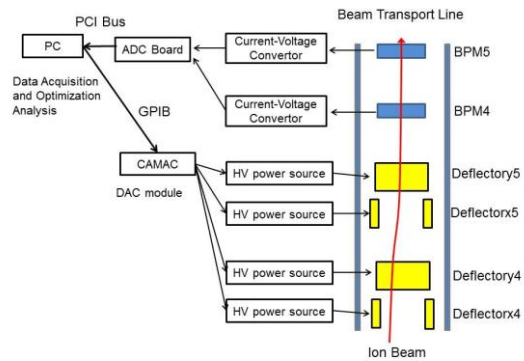


図2 自動ビーム軌道調整システム

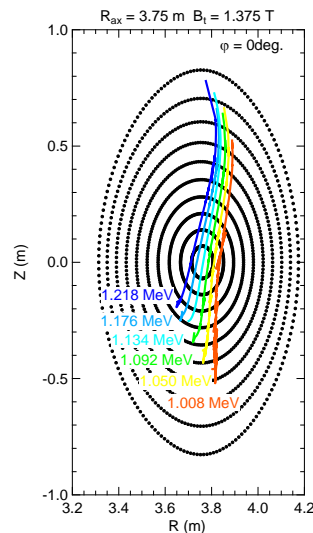


図3 HIBPの計測領域

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。

HIBPの観測点は、通常プローブビームのプラズマへの入射角(及びプラズマからの出射角)を変更することにより、電位の一次元分

布を計測する。更に、プローブビームのエネルギーを変更することにより観測領域を広げることが可能となる。

プローブビームのエネルギーを変更するために、加速器の電圧を変える必要があるが、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から、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。図 1 に LHD における HIBP の概要を図に示す。基本的に、静電偏向器の電圧をプローブビームのエネルギーに比例させて変更すれば良いが、LHD からのリーク磁場はプローブビームエネルギーとは関係がないため、特に LHD から距離が近い領域において微調整が必要となる。

この調整を自動的に行うためのシステムを、PC を用いて構築した。図 2 にこのシステムの概略を示す。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ー (BPM) で計測され、PC の Peripheral component interconnect (PCI)バスに接続さ

れているアナログデジタルコンバータ (ADC)から BPM のデータが収集される。これを解析し、ビームラインの中心部にビームを通すために必要な偏向器電圧を計算し、General purpose interface bus (GPIB)で PC に接続された Computer automated measurement and control (CAMAC)システムのデジタルアナログコンバータ(DAC)を通じて、静電偏向器の高圧電源に必要な電圧が印加される。

基本的に、偏向器電圧に対するビーム位置への依存性は線形となる。例えば、位置 i の偏向電圧を ΔV_i 動かしたとき位置 j においてビーム位置が Δx_j 動くとする、その関係は以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V_{x1} \\ \Delta V_{y1} \\ \Delta V_{x2} \\ \Delta V_{y2} \end{pmatrix} \quad \dots (1)$$

行列 A_{ij} は、輸送行列と呼ばれる。 A_{ij} は理論的に得ることが可能であるが、校正実験により実験的に得られたものを実際使用する。 A_{ij} の逆行列を用いることによって $\Delta \mathbf{V} = \mathbf{A}^{-1} \Delta \mathbf{x}$ と表すことができ、ビーム軌道をビームラインのチェンバの中心に位置するように最適化するための電圧を求めることができる。この手法を繰り返し適用することによってビーム軌道を最適化する。

この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ができ、放電ごとにプローブビームエネルギーを設定することが可能となった。

既に述べたように、プローブビームの入射角に加えて、プローブビームエネルギーを変えることにより、HIBP の観測領域を広げることができる。図 3 に HIBP の観測領域を示す。例えば、プローブビームエネルギーを 1.134 MeV に固定し、入射角を 10 Hz でスキャンすると、観測点は図中の 1.134 MeV と書かれた線上を 10 Hz でスキャンする。プローブビームエネルギーを変えることによって測定領域を広げることができる。この手法を用いて、LHD において HIBP を用いて 2 次元電位分布を計測した。

4. 研究成果

二次元計測を行った時の典型的な放電波形を図 4 に示す。プラズマは中性粒子ビーム入射加熱 (NBI#1(Counter-Injection), NBI#2(Co-Injection)のバランス入射)によって生成、維持し、2 秒間の入射後、NBI#3(Counter-Injection)にスイッチする。最初のバランス入射時において、電子サイク

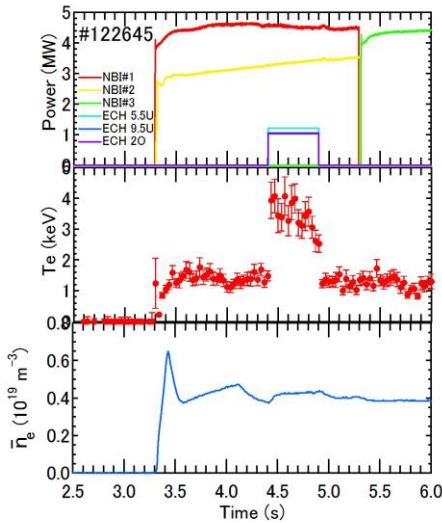


図 4 - 放電波形

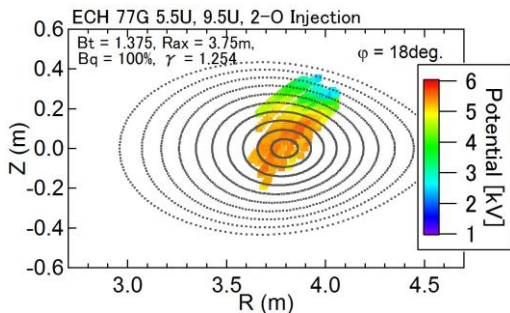
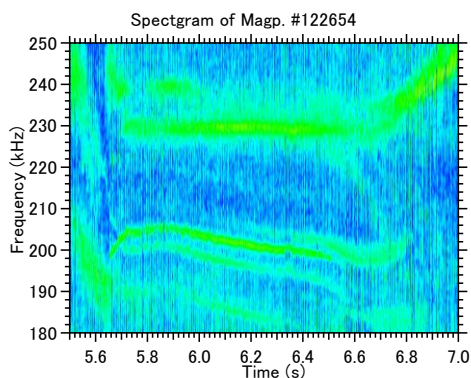


図 5 二次元平衡電位分布

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。ECH 入射時における二次元平衡電位分布を計測した(図 5)。計測された電位分布は、中心部($\rho < 0.2$)でフラットであるが、これは中心部の電子温度分布がフラットであるためだと考えられる。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、得られたデータの電位揺動を解析した。LHD-HIBP は、低密度放電において中心部からの二次ビーム電流量が多いが、端の領域は密度の減少及びポートの制約もあり電流量は少ない。このため、中心部に局在した不安定モードが計測される。HIBP の電位揺動計測は S/N 比が磁気プローブと比較してそれほど良くない。図 6(a)に時刻 5.5~7.0 秒における 180~250 kHz の磁気プローブのスペクトログラム、(b)に同時刻、同周波数の電位揺動のスペクトログラムを示す。磁気プローブには多くの不安定モードが計測されていることが分かるが、電位揺動には、200~210 kHz 近傍のモードしか観測されていない。このモードの揺動データについて S/N 比を改善するため、次の手法を用いた。

(a)



(b)

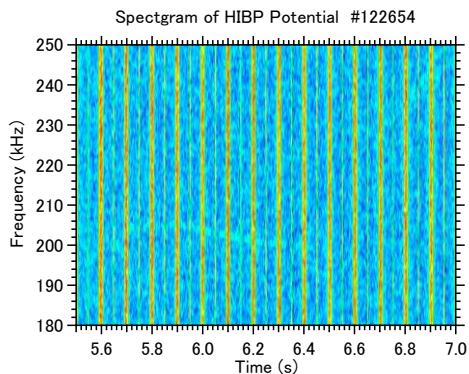


図 6 (a) 磁気プローブ信号のスペクトログラム、(b) 電位揺動信号のスペクトログラムを示す。

信号 x, y のフーリエ変換が X, Y と表されるとし、更にそれぞれモード成分とバックグラウンド成分の和として表されると仮定する。この時、

$$X = X_{\text{mode}} + X_{\text{bg}}, \quad Y = Y_{\text{mode}} + Y_{\text{bg}}$$

と表される。 x と y のコヒーレンスを γ と置き、 x と y のパワースペクトラムを $P[X], P[Y]$ とお

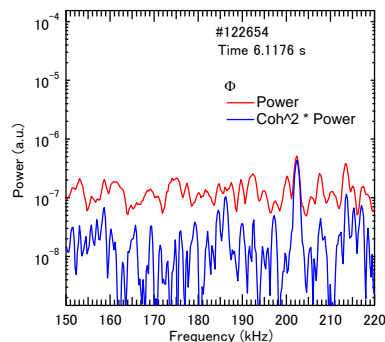
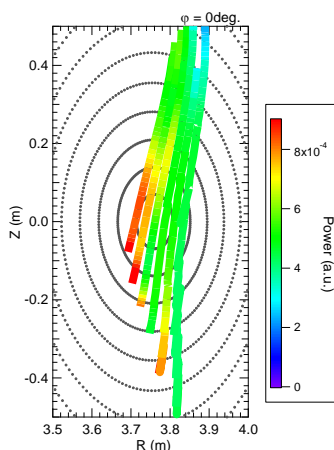


図 7 電位揺動のパワースペクトラム。Power は生信号のパワースペクトラム、Coh² Power はコヒーレンスの 2 乗を生のパワースペクトラムに乗じたものである。

(a)



(b)

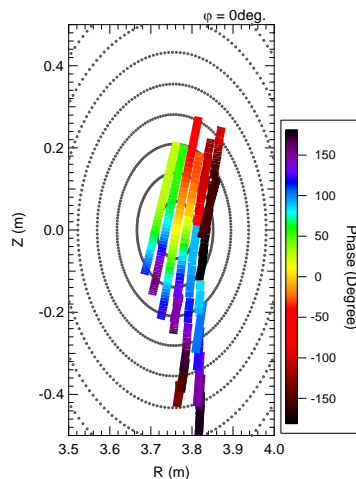


図 8 (a) 電位揺動振幅の二次元分布 (b) 電位揺動の位相の二次元分布を示す。

く。もしバックグラウンド成分がランダムだと仮定すると、アンサンブル平均により、モード成分とバックグラウンド成分のクロススペクトラム、および x と y のバックグラウンド成分のクロススペクトラムがゼロとなる。このとき、 $P[X_{\text{mode}}] = \gamma^2 (1 + \alpha) P[X]$ と表される。ここで、 α は、 $P[Y_{\text{bg}}] / P[Y_{\text{mode}}]$ である。ここで、 x, y をそれぞれ HIBP の電位揺動、磁気プローブの磁気揺動とみなす。磁気プローブは S/N 比が良いため、 α は 1 より小さい。そのため、 $P[X_{\text{mode}}] = \gamma^2 P[X]$ となり、生信号のパワースペクトルにコヒーレンスの 2 乗をかけることにより、モードのパワースペクトラムを、ノイズ成分を減らして算出することができる。図 7 にこの手法を用いて計算した電位揺動のパワースペクトラムを示す。コヒーレンスの 2 乗をかけることによってランダムノイズが低減され、205 kHz のピークが明瞭になることが分かる。

この手法を用いて得られた、200 kHz 周波数領域の電位揺動の 2 次元分布、及び位相分布を図 8(a), (b) に示す。位相分布は磁気プローブをレファレンス信号として用いて、電位揺動と磁気揺動(磁気プローブ信号)の位相差をプロットしている。位相構造からポロイダルモード数 $m = 1$ または $m = 2$ であると考えられる。このモードはアルヴェンモードの一種であると考えられ、物理的考察を進めている。

電位の乱流揺動成分に関しては、残念ながら S/N 比が不十分であり、有意な信号は得られていない。乱流揺動成分は、MHD モードに比べて小さいと考えられ、今後更なる改善が必要である。

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 3 件)

1. T. Ido, M. Osakabe, A. Shimizu, T. Watari, M. Nishiura et al., "Identification of the energetic-particle driven GAM in the LHD" DOI: 10.1088/0029-5515/55/8/083024 Nuclear Fusion **55** (2015) 83024. 査読有

2. A. Shimizu, T. Ido, M. Kurachi, R. Makino, M. Nishiura, S. Kato et al., "2D potential measurements by applying automatic beam adjustment system to heavy ion beam probe diagnostic on the Large Helical Device" DOI:10.1063/1.4891975 Rev. of Sci. Instrum. **85** (2014) 11D853. 査読有

3. A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, R. Makino, M. Yokoyama, H. Takahashi et al.,

"Bifurcation-Like Behavior of Electrostatic Potential in LHD"

DOI: 10.1585/pfr.8.2402122

Plasma and Fusion Research **8** (2013) 2402122-1.

査読有

[学会発表] (計 10 件)

1. 清水昭博, 井戸毅, 西浦正樹, 高橋裕己, 伊神弘恵 et al., "LHD における HIBP を用いた 2 次元電位分布計測の進展" プラズマ・核融合学会第 32 回年会 名古屋大学, 24-27, 11 月(2015) 名古屋

2. A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, H. Takahashi, H. Igami et al., "The development of 2D potential measurement with Heavy Ion Beam Probe on the Large Helical Device" 25th International Toki Conference, 3-6, Nov. (2015) Ceratopia-Toki Toki Japan.

3. A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, M. Yokoyama, H. Takahashi, H. Igami et al., "Recent development of 2D potential measurement with Heavy Ion Beam Probe on the Large Helical Device" The 20th International Stellarator - Heliotron Workshop, 5-9, Oct. (2015) Greifswald Germany.

4. A. Shimizu, T. Ido, M. Kurachi, R. Makino, M. Nishiura, S. Kato et al., "Two dimensional potential structure measurement with HIBP on the LHD" Plasma Conference, 18-21, Dec. (2014) Toki-Messe Niigata Japan.

5. A. Shimizu, T. Ido, M. Kurachi, R. Makino, M. Nishiura, S. Kato et al., "Two-dimensional potential measurements with Heavy Ion Beam Probe Diagnostic on the Large Helical Device" 24th International Toki Conference, 4-7, Dec. (2014) Ceratopia-Toki Toki Japan.

6. A. Shimizu, T. Ido, M. Kurachi, R. Makino, M. Nishiura, S. Kato et al., "Two-dimensional potential measurements with Heavy Ion Beam Probe Diagnostic on the Large Helical Device" 20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, 1-5, Jun. (2014) Atlanta USA.

7. A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, R. Makino, M. Kurachi et al., "Temporal behavior of electrostatic potential in the LHD" 23rd International Toki Conference, 18-21,

Dec. (2013) Ceratopia-Toki Toki Japan

8. A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, R. Makino, M. Kurachi et al.,
"Temporal behavior of electrostatic potential measured with HIBP in the LHD"
9th Asia Plasma and Fusion Association Conference, 5-8, Dec. (2013) Gyeongju Korea.

9. A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, R. Makino, M. Kurachi et al.,
"The temporal behavior of electrostatic potential and bifurcation property in LHD"
Joint 19th ISHW and 16th IEA-RFP workshop, 16-20, Sep. (2013) Padova Italy.

10. A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, R. Makino, M. Kurachi et al.,
"The temporal behavior of electrostatic potential and bifurcation property in LHD"
The 12th Asia Pacific Physics Conference, 14-19, Jul. (2013) Makuhari-Messe Chiba, Japan.

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

井戸 毅 (IDO TAKESHI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：50332185

藤澤 彰英 (FUJISAWA AKIHIDE)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号：60222262