

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06653

研究課題名(和文) 微視的乱流と大域的揺らぎの同時計測による磁場閉じ込めプラズマにおける熱輸送の研究

研究課題名(英文) Study on the heat transport in magnetically confined plasmas by simultaneous measurement of micro-scale turbulence and macro-scale fluctuation

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込めプラズマの粒子及び熱輸送を決定づけている微視的乱流と、それに影響を及ぼす可能性のある大域的揺らぎ同時測定を行うために、高温プラズマ内部における揺動計測が可能なHIBPの高性能化のための検出器の開発を行った。開発した検出器は、十分なビーム位置検出性能を有することは確認されたが、検出効率の向上は2割程度にとどまった。このためプラズマ実験はHIBPが適用可能な低密度プラズマに限られたが、大域的揺らぎである高速イオン励起GAM(EGAM)による微視的乱流の変調が観測された。またEGAMの空間非対称性や突発的励起などイオンの熱輸送に影響及ぼす可能性のある新しい現象が発見された。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the mechanism of the particle and heat transport in magnetically confined plasmas by measuring micro-scale turbulence and macro-scale fluctuations which may affect the turbulence, we have developed a position sensitive detector with high detection efficiency for the heavy ion beam probe on the Large Helical Device. It was confirmed that the developed detector could measure the beam position, sufficiently. However, the improvement in the detection efficiency was only 20 %, compared with the previous detector. Although the plasma experiment was performed under low density plasmas, the modulation of micro-scale turbulence by the macro-scale energetic-particle-driven GAM (EGAM) was observed. In addition, the spatial asymmetry and abrupt excitation of the GAM, which may affect the ion heat transport, were also found.

研究分野：核融合学

キーワード：磁場閉じ込めプラズマ 乱流 高速イオン励起不安定性 重イオンビームプローブ HIBP 重イオン検出器 GAM

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマの閉じ込めの物理機構の理解は、核融合炉心プラズマの設計、制御において必要不可欠であり、核融合研究の重要な課題として研究が進められてきた。磁場閉じ込めプラズマの熱・粒子輸送を支配しているのはプラズマ中に発生する微視的乱流であると考えられ、その特性が調べられてきた。微視的乱流はその空間スケールから、従来は局所的なパラメータに基づき議論されてきた。しかし、乱流渦よりも大きな空間広がりを持つ帯状流や、プラズマ小半径程度に広がる大域的揺らぎの存在が明らかになり、このような大域的な揺らぎと微視的な揺らぎの相互作用がプラズマの輸送にとって本質的に重要であることが指摘されるようになった。

このような観点で研究を進展させるには、プラズマ内部において、広範囲に渡って揺らぎの振る舞いを明らかにする必要がある。我々が開発している重イオンビームプローブ(HIBP)は、磁場閉じ込め高温プラズマ中でプラズマに影響を及ぼすことなく電位およびその揺らぎ、密度の揺らぎを同時に直接測定できる計測器であり、かつプラズマの中心から周辺まで広い空間領域で測定できる可能性を持つため、上記のような観点から実験研究を進める上で決定的に重要な役割を果たせる。しかしながら、プラズマ中でのプローブビームの減衰により、信号強度が低下することが弱点であり、微視的乱流計測のためには信号強度の増加が必要であった。

2. 研究の目的

本研究は、高効率と高位置分解能を有する重イオン用検出器を開発することにより HIBP の性能を向上し、大型ヘリカル装置(LHD)において生成される磁場閉じ込めプラズマ中の揺らぎの特性を明らかにすることを目的として実施した。特に本研究では、高速イオンによって励起される巨視的な揺らぎに注目し、その特性とともに、微視的乱流の振る舞いに及ぼす影響を調べるための研究を行った。

3. 研究の方法

(3-1) 検出器開発

HIBP に適用して計測精度を向上させるためには、検出効率の改良と同時に 10 マイクロメートル程度のビーム検出位置精度を必要とする。この要求を満たすものとして微細金属メッシュを用いた検出器を新たに設計した。阻止能が高く 2 次電子放出係数が高いと考えられる金属メッシュを用いて重イオンを 2 次電子に変換し、この 2 次電子を MCP に引き込みさらに増幅することにより、高効率化を目指した。また、必要な位置分解能を確保するために、メッシュの格子間隔が 10 μm 程度の微細メッシュを使用することとした。設計・製作した検出器が HIBP に適用可

能かどうかを調べるために、2 次電子変換による増倍率、2 次電子ビームの広がりや位置分解能、入力に対する出力の線形性を調べる実験を行った。

(3-2) 高速イオン励起不安定性の特性の解明

本研究を実施する LHD においてはプラズマの生成および加熱のために、プラズマの熱速度より高いエネルギーを持つ粒子が入射される。この高エネルギー粒子は巨視的な空間スケールを持った不安定性を励起することがあり、この不安定性により高速イオンの損失が引き起こされることが知られている。それに加え、近年発見された高速イオンによって励起される測地線音波(EGAM)と呼ばれる帯状流は電位揺動を伴っており、高速イオンだけでなくプラズマの閉じ込めにも影響を及ぼす可能性がある。本研究において、HIBP を用いて EGAM に伴う電位揺動及び密度揺動の計測を行うことにより、EGAM の特性、及び EGAM が乱流に及ぼす影響を調べた。

4. 研究成果

(4-1) 検出器開発

(4-1-1) メッシュによる増幅率

メッシュの材質として、メッシュの格子寸法として 10 μm 程度のものが製作可能で、イオン衝突時の阻止能が MCP よりも高い銅及びニッケルを選択した。またメッシュの開口寸法に関しては 3 種類のメッシュを準備した。メッシュの枚数、メッシュ間に印加する電圧を制御することにより、2 次電子放出係数の測定を行った。この結果、ニッケルメッシュでは 7 ± 2 、銅メッシュでは 9 ± 2 となり、同じ材質の金属プレートによる 2 次電子放出係数より 2~3 倍高い値が得られた。これはメッシュが平面でないため、2 次電子放出係数に対するイオンの入射角依存性が表れたためと考えられる。

開発した検出器は、発生した 2 次電子をバイアス電圧によりメッシュを通過させて検出プレート側に引っ込む構造であるため、上記の増倍率とメッシュの通過率によって最終的な信号の増倍率が決まるが、メッシュ 2 段設置時の実験の結果、ニッケルメッシュは 3 倍、銅メッシュは 4 倍となった。

(4-1-2) 位置検出性能

HIBP に用いるためには、ビームの位置検出ができることが必要である。メッシュを用いて 2 次電子変換することによって危惧されることは、2 次電子の放出速度及びメッシュ近傍の電場構造によって 2 次電子ビームが広がり、ビーム位置が検出できなくなることである。そこで、2 次電子ビーム径の測定と、ビーム掃引時のビーム位置検出試験を行った。その結果、メッシュに印加するバイアス電圧を調整することにより、幅 3mm のイオンを検出器に入射した場合、2 次電子ビーム幅は 3.9

mmまで抑えることができることが分かった。HIBPで用いる場合、検出プレートは5mmであるため、この広がりは許容範囲である。

ビーム掃引時のビーム位置測定の結果を図1に示す。検出器によって測定されたビームの位置はビーム掃引の制御値に比例しており、較正実験が必要ではあるが、計測に使用できるものであることが確認された。

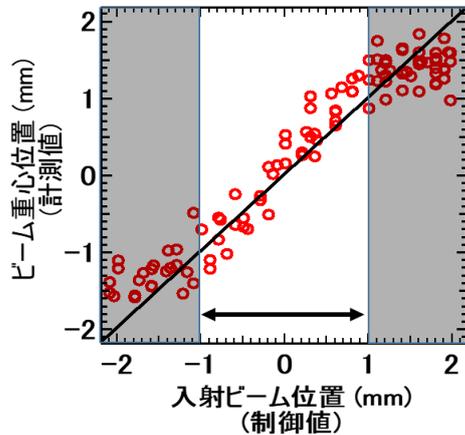


図1 ビームを掃引した時のビーム重心位置の測定結果。ハッチしていない領域ではビーム全幅が検出器の有効領域に入っている。

(4-1-3) メッシュ付き MCP 検出器の改善度

上記のメッシュによって変換した2次電子ビームをMCPに引き込み信号量の改善度を調べた。メッシュによる2次電子変換を行った場合の信号強度は、行わなかった場合に比べ1.2倍程度にとどまった。今回製作した検出器は、メッシュで生成した2次電子をそのメッシュを通過させて背面のMCPに引き込むことによって、2次電子ビームの広がりを抑える構造とした。しかしこの場合、メッシュの通過率でMCPに引き込める2次電子数が制限される。このため(1-i)で示したように、発生した2次電子数としては向上するが、その半分程度しか検出できない。メッシュによって高い2次電子放出係数が得られているので、今後はその2次電子を十分に引き込み、かつ位置検出のできる機構を検討することが必要である。

なお、ここで述べた結果は学会発表(3)(10)にて報告した。

(4-2) 高速イオン駆動不安定性の特性と乱流の応答

(4-2-1) 高速イオン駆動帯状流(EGAM)に対する乱流の応答

EGAMは巨視的な空間スケールを持つ電場揺動をともなっているため、この電場揺動によって駆動される速度揺動が微視的不安定性の振る舞いに影響を及ぼす可能性がある。そこで、EGAMに伴う電位揺動と、微視的不安

定性を反映している密度揺動の振幅の時間変化との相関を調べた。その結果、EGAMと微視的乱流の振幅の変動の間に有意な相関があることが確認された。揺動の位相差の解析からは、EGAMに伴う電位揺動が正に振れた時に乱流の強度が下がることが明らかになった。この現象の解釈の一つとして、電場による乱流捕捉(M. Sasaki, et al., Scientific Reports, 16767 (2017))が考えられ、本実験で観測された電位揺動の極性と乱流振幅の増減の関係は、理論予測と一致している。ただし、観測結果はドップラーシフトによる周波数スペクトルの変形によっても定性的には説明できる。本研究では乱流の波数の測定ができていないためドップラーシフトの評価ができない。今後物理メカニズムを明らかにするには、多チャンネル計測による波数の評価が必要である。

本研究結果は学会発表(1)(2)(4)(5)にて報告を行った。

(4-2-2) EGAMの空間構造の非対称性

LHDにおいては、EGAM励起時にバルクイオンのエネルギーが上昇する場合があることが報告されている[M. Osakabe, et al, Proc. 25th IAEA Fusion Energy Conference, Ex/10-3 (2014)]。この上昇量の定量的な評価から、このエネルギーの上昇は閉じ込め改善では説明できず、イオンへの直接的なエネルギー注入量の増加であることが示されている。ただし、EGAMは高速イオンと共鳴する程度の位相速度を持っており、バルクイオンによる直接吸収は十分ではないと考えられる。この現象を説明できる理論モデルとして、EGAMに伴う揺動振幅のポロイダル断面における非対称性の出現により、EGAMとバルクイオンの相互作用が増大する可能性を示すモデルが提案されている[M. Sasaki, et al., Phys. Plasma, 23, 102501 (2016)]。そこで、この理論モデルの検証を行うため、EGAMに伴う電位揺動と密度揺動の空間構造の計測を行った。その結果、バルクイオンのエネルギー増加がみられる際、図2に示すように、密度揺動を反映するHIBPの信号強度揺動に赤道面に対して上下で非対称性が現れる場

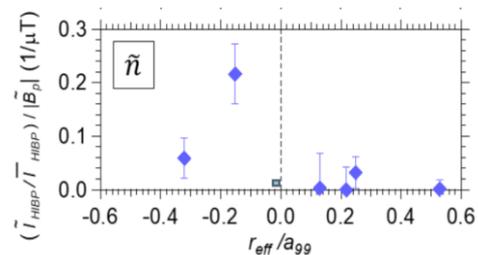


図2 EGAMに伴う密度揺動を反映するHIBPの信号強度揺動の空間分布。横軸は規格化小半径であり、正は赤道面より上、負は赤道面より下を表す。

合があることが観測された (論文(2)、学会発表(1)(2)(9))。これは、上記の理論モデルと定性的に矛盾しない結果である。ただし、理論モデルによって予測される電子密度揺動の非対称性では、定量的には説明できない。HIBP の信号強度揺動は線積分効果やイオンや高速イオンの密度揺動にも依存する可能性があり、今後定量的評価を進めるにはこれらの影響を考慮する必要がある。また、本研究では 2次元分布計測手法の開発も行ったので (論文 6)、今後 EGAM のポロイダル断面における非対称性の計測を進めることにより、ポロイダル断面非対称性を示す理論との、より詳細な比較が進むと考えられる。

(4-2-3) EGAM の突発的励起

EGAM は通常、周波数の速い上方掃引を伴う。これに加え、図 3 に示すように、EGAM の周波数が通常の GAM 周波数の 2 倍に近づいた時に GAM 周波数を持つ別の GAM が突発的に励起される現象が観測された。突発的に励起される GAM は元々存在する EGAM より 2 倍程度の大きな振幅にまで成長する場合がある。また、EGAM と突発的励起 GAM の位相関係はイベントによらず同じであり、このことは EGAM と突発的励起 GAM は独立した現象ではなく、モード間の結合が存在することを示している (論文(1)(7)、学会発表(7)(8)(9)(11-16))。

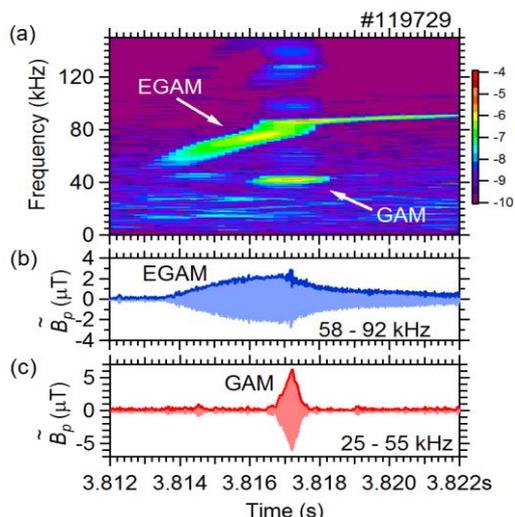


図 3 (a)磁場揺動の周波数スペクトログラム。バンドパスフィルターを用いて取り出した EGAM と突発的励起 GAM の波形を (b)及び(c)に示す。

この実験結果を受け、GAM の突発的励起現象を亜臨界不安定性の励起現象とする理論モデルが提案された (論文 2, 3)。この理論に基づけば、周波数掃引する EGAM がパラメトリック不安定性を引き起こし、それを種とした亜臨界不安定性として GAM が突発的に励起されたと理解される。これまで実験によって測定された GAM 励起の時定数、振幅、EGAM との位相関係等の特性はこのモデルによる予測と一致していることが確認された。

亜臨界不安定性は、中性流体やプラズマに普遍的に見られる現象であり、本研究における LHD での実験観測と理論モデル構築による亜臨界不安定性に基づいた突発性の理解の進展は、様々な分野で観測されている突発現象のより深く一般的な理解に寄与することが期待される。

また、実用的な面では、この現象は位相速度の速い EGAM が、位相速度が遅くバルクイオンと相互作用しやすい GAM をトリガーしていることを示しており、(2-ii)で述べたバルクイオンへのエネルギー輸送つまりイオン加熱の効率化につながる現象であり、核融合研究の面でも今後研究を進める価値のある現象である。

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 7 件)

- (1) T. Ido, K. Itoh, M. Lesur, M. Osakabe, A. Shimizu, et al, Nuclear Fusion, **57**, 72009 (2017) (DOI:10.1088/1741-4326/aa665a) (査読有)
- (2) T. Ido, K. Itoh, M. Lesur, M. Osakabe, A. Shimizu, et al., Proc. of 26th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P8-13 (2016) (国際審査有)
- (3) A. Shimizu, T. Ido, et al., Rev. Sci. Instrum., **87**, 11E731 (2016) (DOI:10.1063/1.4963908) (査読有)
- (4) M. Lesur, K. Itoh, T. Ido, S.-I. Itoh, et al., Nuclear Fusion, **56**, 056009 (2016) (DOI:10.1088/0029-5515/56/5/056009) (査読有)
- (5) T. Ido, K. Itoh, M. Osakabe, M. Lesur, A. Shimizu, et al., Physical Review Letters, **116**, 15002 (2016) (DOI:10.1103/PhysRevLett.116.015002) (査読有)
- (6) K. Itoh, S. -I. Itoh, Y. Kosuga, M. Lesur, and T. Ido, Plasma Physics Reports **42** (2016) 418 (DOI:10.7868/S036729211605005X) (査読有)
- (7) M. Lesur, K. Itoh, T. Ido, M. Osakabe, K. Ogawa, A. Shimizu, et al., Physical Review Letters, **116**, 15003 (2016) (DOI:10.1103/PhysRevLett.116.015003) (査読有)

[学会発表] (計 16 件)

- (1) 井戸毅, 清水昭博, 長壁正樹, 佐々木真, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018)
- (2) Takeshi Ido, Akihiro Shimizu, Kunihiro Ogawa, Masaki Osakabe, 26th International Toki Conference (2017)

- (3) 新美 航、井戸 毅、清水 昭博, Plasma Conference 2017 (2017)
- (4) 井戸 毅、清水 昭博、徳澤 季彦、新美 航、竹村 圭司, Plasma Conference 2017 (2017)
- (5) T. Ido, A. Shimizu, K. Ogawa, T. Tokuzawa, M. Osakabe, 7th Asia Pacific Transport Working Group (APTWG2017) International Conference (2017)
- (6) Takeshi Ido, Akihiro Shimizu, Masaki Osakabe, et al., 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (2017)
- (7) 井戸 毅, 日本物理学会第 72 回年次大会 (招待講演) (2017)
- (8) Takeshi Ido, 1ST NFRI MINI-WORKSHOP ON ENERGETIC PARTICLES (招待講演) (2016)
- (9) T. Ido, K. Itoh, M. Lesur, M. Osakabe, A. Shimizu, et al., 26th IAEA Fusion Energy Conference (2016)
- (10) 井戸 毅, 清水昭博, 牧野良平, 加藤眞治, 塚田究, 谷池晃, 第 11 回核融合エネルギー連合講演会 (2016)
- (11) T. Ido, K. Itoh, M. Lesur, M. Osakabe, A. Shimizu, et al., 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas (2016)
- (12) T. Ido, K. Itoh, M. Lesur, M. Osakabe, A. Shimizu, et al., 18th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (2016)
- (13) 井戸毅, 伊藤公孝, 長壁正樹, M. Lesur, 清水昭博, 他, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016)
- (14) T. Ido, A. Shimizu, M. Osakabe, T. Watari, et al., 25th International Toki Conference (2015)
- (15) 井戸毅, 伊藤公孝, 長壁正樹, M. Lesur, 清水昭博, 他, 第 32 回プラズマ・核融合学会 年会 (2015)
- (16) 井戸 毅, 長壁正樹, 清水昭博, 他, 日本物理学会 2015 年秋季大会

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

- (1) <http://www.nifs.ac.jp/press/151209.html>
- (2) https://www.eurekalert.org/pub_releases/2016-01/nion-aep011116.php
- (3) https://www.eurekalert.org/pub_releases_ml/2016-01/aaft-_1011316.php

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

谷池 晃 (TANIIKE, Akira)

神戸大学・海事科学研究科・准教授
研究者番号：50283916