

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420896

研究課題名(和文) 高速イオンの乱流輸送機構の解明

研究課題名(英文) Study on fast-ion transport by turbulent field

研究代表者

鈴木 隆博 (SUZUKI, Takahiro)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・上席研究員(定常)

研究者番号：60354594

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)：米国DIII-D装置において、静電乱流を特徴付ける規格化温度と電磁乱流を特徴付ける規格化圧力が独立に変化する実験を見出した。高速イオンの輸送の増加と共に高速イオンの駆動する電流が減少することに着目し、実験的に評価した駆動電流と乱流輸送が無い場合の理論値の比較から、高速イオンの輸送を評価した。実験では規格化温度が0.014-0.027、規格化圧力が0.48%-0.88%の範囲で独立に変化したが、いずれのパラメータに対しても計測誤差を超える駆動電流の理論値に対する減少は観測されなかった。解析した実験データの範囲では有意な高速イオンの乱流輸送が観測されず、支配機構を同定できないことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have identified the DIII-D experiments independently scanning normalized temperature characterizing electrostatic turbulence and normalized pressure characterizing electromagnetic turbulence. Since the fast-ion driven current decreases with increase in the transport of fast-ion, we evaluated the transport of fast-ion from the ratio of the measured driven current in experiment to that in theoretical calculation without turbulent transport. Within the ranges of the normalized temperature (0.014-0.027) and the normalized pressure (0.48%-0.88%) in the experiments identified, we have not observed decrease in the measured driven current with respect to the calculation that exceeds the measurement error. Thus, it has been found that, in the DIII-D experiments we analyzed, the fast-ion transport by turbulent field has not been observed and that the dominant model of the fast-ion transport (either electrostatic or electromagnetic) has not been identified.

研究分野：核融合プラズマ物理

キーワード：プラズマ・核融合 トカマク 高速イオン 乱流輸送 電流駆動 中性粒子ビーム 国際情報交換 アメリカ

1. 研究開始当初の背景

高速イオンは核燃焼に至るための外部加熱源として、また核燃焼により生成した粒子として核融合炉で主要な役割を果たす。さらにトカマク型核融合炉では中制粒子ビーム(NB)入射により生じた高速イオンにより駆動される電流(NB 駆動電流)がプラズマ電流の維持のみならず、プラズマ電流分布の最適化による閉じ込め特性改善のためにも重要な制御手段と考えられている。このように高速イオンの輸送特性の理解は加熱・電流駆動の理解のみならずプラズマ性能向上の観点からも重要である。これまで、高速イオンはその高速さゆえに熱イオンよりも乱流輸送の影響を受けにくく、アルフベン固有モードなどのMHD不安定性が発生しなければ輸送係数は熱イオンのものより小さく古典的な衝突拡散により支配されると考えられてきた。しかし、本研究代表者をはじめとして独国 ASDEX Upgrade の Guenter 博士、Hobirk 博士及び米国 DIII-D 装置の村上博士、Park 博士ら国際研究チームの近年の研究により、MHD 不安定性が発生していない時でも高速イオンの拡散係数は古典的な衝突拡散よりも大きく、乱流輸送の影響を受けていることを示唆する実験結果が示されている。

2. 研究の目的

高速イオンの乱流輸送はプラズマ周辺部で顕著になると理論的に予想され、2つのモデルが提唱されている。静電乱流輸送モデルはビームエネルギー E_b で規格化した電子温度 T_e/E_b が高いほど、電磁乱流輸送モデルは規格化圧力 β_T が大きいくほど、高速イオンの輸送が大きくなると予想する。いずれのモデルがトカマクプラズマで支配的かを明らかにし、トカマクプラズマにおける高速イオンの乱流輸送機構を解明することが本研究課題の目的である。

3. 研究の方法

高速イオンを生成するNBをプラズマ周辺部に入射でき、高性能な計測器を有する米国DIII-D装置において実験データを調査・解析する。まず、NBをプラズマ周辺部に入射した実験のうち、静電乱流輸送を特徴付ける T_e/E_b と電磁乱流輸送を特徴づける β_T が独立に変化している実験データを調査・探索する。高速イオンの輸送の増加と共にNB駆動電流が減少することに着目し、NB駆動電流を実験的に評価して乱流輸送が無い場合の理論値と比較することで、乱流輸送のNB駆動電流への影響を定量的に評価する。先に探索した T_e/E_b と β_T が独立に変化している実験について乱流輸送のNB駆動電流への影響を調べることで、静電乱流輸送モデルと電磁乱流輸送モデルのいずれがトカマクプラズマにおける高速イオンの乱流輸送で支配的かを明らかにする。

4. 研究成果

米国DIII-D装置において実験データを調査し、主要プラズマパラメータのデータベースを作成した。データベースの中には電子サイクロトロン波による電子加熱とガス入射による電子密度調節、さらにNBの加速電圧の変更によるビームエネルギー E_b の調節などにより、 T_e/E_b と β_T が独立に変化している実験(図1参照)があることを見出した。そこで、 β_T を固定し T_e/E_b を変化させた実験(A)と T_e/E_b を固定し β_T を変化させた実験(B)それぞれの実験データを詳細に解析した。

解析にはモーショナル・シユタルク効果(MSE)を利用してプラズマ内部の電流分布を計測する電流分布計測器を主に使用した。磁場の時間変化から電磁誘導により生ずる誘導電流とプラズマ圧力勾配により生ずる自発電流を他の計測も使用して評価し、これらを全プラズマ電流から差し引くことで実験におけるNB駆動電流を評価した。一方、NB電流駆動計算コードNUBEAMと輸送解析コードONETWOを用いて、高速イオンの乱流輸送が無い場合の理論的なNB駆動電流を評価した。高速イオンが担うNB駆動電流の実験値を理論値と比較することで乱流による高速イオンの輸送を調べた。

実験データから誘導電流量を求めるためにはMSE計測から得られるプラズマ電流分布の時間変化から誘導電場を求め、さらに、新古典拡散理論に基づく電気抵抗を求める必要がある。そこで、電子密度、電子温度、実効電荷数の分布を計測データから得た。電子密度はトムソン散乱計測で計測された密度

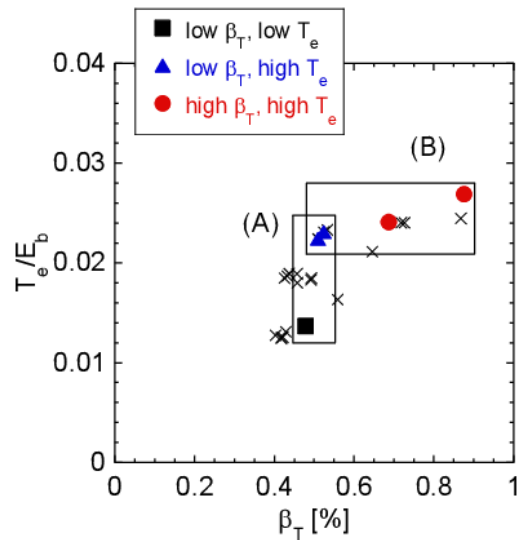


図1: DIII-D装置においてプラズマ周辺部にNBを入射した実験のうち、本研究課題で調査・探索した実験のパラメータ領域(x)。これらから、静電乱流の強さの指標である T_e/E_b と電磁乱流の強さの指標である β_T が独立に変化する実験を見出した。(A)で囲ったとは β_T がほぼ同じで T_e/E_b が異なる実験、(B)で囲ったとは T_e/E_b がほぼ同じで β_T が異なる実験である。

分布を、遠赤外レーザー干渉計で計測されたレーザー光路上での線積分密度と矛盾しないことを確認することで、信頼性の高いデータを得た。電子温度はトムソン散乱計測と電子サイクロトロン波放射計測の双方のデータから詳細な電子温度分布を得た。実効電荷数分布は DIII-D が炭素壁の装置であることから、プラズマ中の主な不純物が炭素であると仮定し、荷電交換分光計測による炭素イオンの密度分布計測から評価した。続いて、自発電流量を求めるために、電子密度、電子温度、実効電荷数に加えて、イオン温度の分布を荷電交換分光計測から求め、新古典拡散理論に基づく自発電流量を計算した。

解析した実験において NB 駆動電流は全プラズマ電流の 1 割程度である。また、これまでに存在が示唆されている最大 $0.5\text{m}^2\text{s}^{-1}$ 程度の高速度イオンの乱流拡散が存在する場合の NB 駆動電流の減少は 1 割程度であるため、乱流輸送による NB 駆動電流の減少効果を観測するためには全プラズマ電流の 1% 以下という非常に高い精度で誘導電流や自発電流を計測する必要がある。そこで、誘導電場、電子密度、電子温度、イオン温度、不純物密度等のそれぞれの計測データが高い精度で計測できているショットを選び出した。

これらの物理量の中で最も計測誤差が大きくなるのは MSE 計測によるプラズマ電流分布の時間変化から求められる誘導電場分布であるが、プラズマ電流分布にはそのプラズマ断面積分が別途計測された全プラズマ電流と一致するという制約があるため、プラズマ中の複数の MSE 計測位置における誘導電場の誤差を単純に足し合わせると NB 駆動電流の誤差を過大評価してしまう。一方、各点の誘導電場の測定誤差が完全に独立であると仮定した場合、各位置での誤差のキャンセルの効果が大きくなってしまい、NB 駆動電流の誤差を過小評価してしまうことになる。そこで、各測定点の空間的な相関を考慮に入れることで、物理的に妥当な誤差を評価した。

以上のような詳細な実験データ解析により得た NB 駆動電流を NUBEAM、ONETWO を用いて計算した乱流輸送を考慮しない理論的な NB 駆動電流と比較を行ったところ、図 2 に示す通り、実験では T_e/E_b と β_T をそれぞれ $0.014 < T_e/E_b < 0.027$ 、 $0.48 < \beta_T < 0.88$ の範囲で独立に変化させていたが、いずれのパラメータに対しても計測誤差を超える NB 駆動電流の理論値に対する減少は観測されなかった。

また、NUBEAM と ONETWO を用いた高速イオンを含めたプラズマの輸送解析から、プラズマの閉じ込めエネルギー、プラズマ表面の周回電圧、重水素同士の核融合反応による中性子発生量を計算することができる。これらの物理量は実験において、反磁性ループ、フラックスループ、プラスチックシンチレータによって実測されているため、計算値と比較を行った結果、これらの物理量も高速イオンの乱流輸送がないと仮定した場合の計算値と

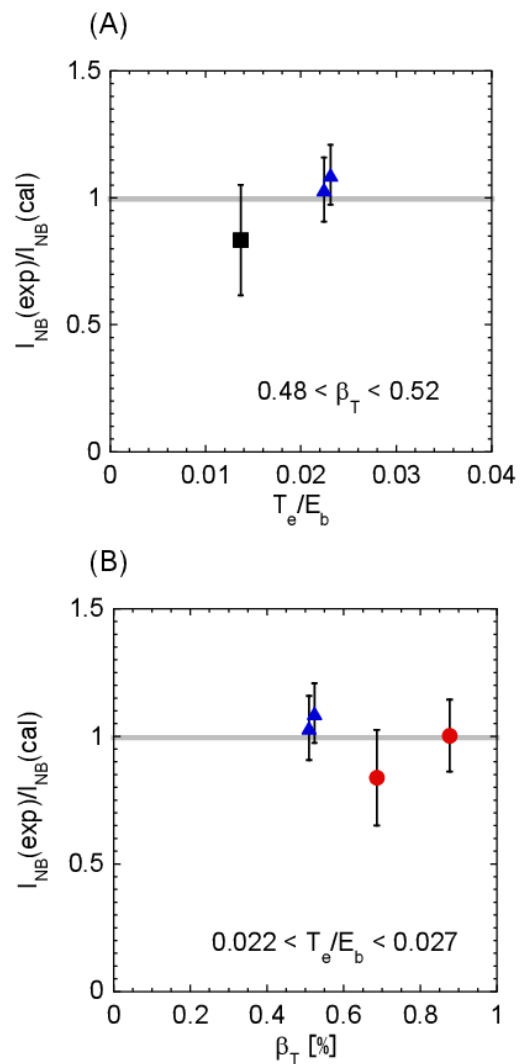


図 2 : 図 1 に示した β_T を固定し T_e/E_b を変化した実験 (A) と T_e/E_b を固定し β_T を変化した実験 (B) における、実験的に得られる NB 駆動電流 ($I_{NB}(\text{exp})$) と乱流輸送を考慮しない理論値 ($I_{NB}(\text{cal})$) との比。(A)、(B) のいずれのパラメータスキャンにおいても、計測誤差を有意に超える NB 駆動電流の理論値からのずれは観測されなかった。

一致することが明らかになった。

この結果から、解析した実験データの T_e/E_b 、 β_T の範囲では有意な高速イオンの乱流輸送が観測されないことを明らかにした。このことから、静電乱流輸送モデル、電磁乱流輸送モデルのどちらが支配的であるかは同定できなかった。

解析した実験では放電前半の L-mode の時間帯を解析した。同一の実験の放電後半では加熱パワーを増加させることで H-mode 遷移し、より高い T_e と β_T を持つプラズマが得られていたが、これらの時間帯ではプラズマ電流が中心部まで拡散してしまっているため、安全係数が 1 を下回り、鋸波状振動現象が発生していた。鋸波状振動現象が発生している状況ではプラズマ中の誘導電流量が新古典

拡散理論に基づく抵抗から評価できなくなるため、本研究で用いた手法では NB 駆動電流を評価できなかった。また、放電後半で β が高くなっている時間帯ではアルフベン固有モードも発生していたため、本研究の解析対象とすることができなかった。

本研究の結果からは核融合炉で予想されているようなより高い β を持つプラズマにおいて高速イオンの乱流輸送の効果が表れるか否かを明らかにすることはできなかった。しかし、そのような高い β を持つプラズマにおける乱流輸送の効果を研究するためには、加熱パワーを増加させながらもアルフベン固有モードの発生を抑制する運転が求められるため、プラズマの安全係数分布を適切に制御することが求められることが本研究より明らかになった。

5. 主な発表論文等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 隆博 (SUZUKI, Takahiro)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・上席研究員

研究者番号：60354594

(2) 研究分担者

若月 琢馬 (WAKATSUKI, Takuma)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・研究員

研究者番号：40734124