

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14688

研究課題名（和文）プラズマ乱流がマイクロ波伝播に及ぼす影響の実験的解明

研究課題名（英文）Experimental investigation of the effect of plasma turbulence on microwave propagation.

研究代表者

矢内 亮馬（Yanai, Ryoma）

核融合科学研究所・研究部・助教

研究者番号：40824743

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：大型ヘリカル装置（LHD）のプラズマ中の乱流によって生じる密度揺動がマイクロ波に与える影響について、電子サイクロトロン共鳴加熱に用いられている77 GHzのマイクロ波を対象として調査を実施した。LHDでのプラズマ実験では密度揺動のマイクロ波への影響を確認することはできなかった。また、実験データに基づいて行なった電磁界解析結果からも観測されたイオンスケールの密度揺動レベルが、背景密度の1%未満と小さいことからほとんど影響しないことが確認された。しかし、電磁界解析の計算結果から、揺動レベルが増加するとマイクロ波ビームが散乱され、ガウシアンビームの形状に影響を及ぼす可能性があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマ中を伝播する77 GHzのマイクロ波が、乱流によって駆動される密度揺動で受ける影響について検証した結果、大型ヘリカル装置で計測されたイオンスケールの密度揺動での影響はほとんどないことが電磁界解析によりわかった。しかしながら、より大きな密度揺動の存在下では、77 GHzのマイクロ波が影響を受ける可能性を示す結果が得られた。また、イオンスケールより大きな空間スケールの密度揺動の方が、77 GHzのマイクロ波に与える影響が大きい可能性があることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：The influences of density fluctuations caused by the plasma turbulence in the Large Helical Device (LHD) on microwaves were investigated focusing on a 77 GHz microwave, which is used for electron cyclotron resonance heating in the LHD. No clear effect on the microwave from the density fluctuations was observed in the LHD experiments. The results of electromagnetic field analysis based on the experimental data from the LHD also revealed that the fluctuations had little effect due to their small magnitude, which was less than 1%. However, the simulation results of the electromagnetic field analysis indicated that the microwave beam was scattered as the fluctuation level increased and could affect the shape of the Gaussian beam.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：マイクロ波 プラズマ乱流 電子サイクロトロン共鳴加熱

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて 300 MHz から 300 GHz 帯の電磁波であるマイクロ波やミリ波は、低域混成周波数共鳴や電子サイクロトロン共鳴によるプラズマの局所的な加熱・電流駆動、また、反射計や干渉計等の高精度なプラズマ診断に広く利用され、磁場閉じ込め核融合炉の実現のために不可欠である。プラズマ中を伝播する波の屈折率は密度、温度、磁場の影響を受けるため、空間的にパラメータが変化するプラズマでは屈折しながら伝播する。特にトカマク型やヘリカル型の核融合プラズマ周辺部に存在するような乱流環境下においては、空間・時間的に不規則なプラズマのパラメータ変化が生じることによってマイクロ波が不規則に散乱されてしまう。そしてプラズマ乱流に伴う密度揺動により散乱され、マイクロ波ビームの幅が広がってしまうことが、数値計算で予想されており、また実験的にもビーム幅の広がりが起こることが確認されている。乱流によりビームが散乱されてビーム幅の広がりや焦点位置からのずれが生じることは、様々な問題を引き起こす可能性がある。加熱・電流駆動の面では、狙った位置での最適な加熱・電流駆動が困難になり、プラズマの制御に問題を引き起こすばかりでなく、入射位置のずれによりプラズマに十分に吸収されずにすり抜けた高パワーのビームが真空容器内部を損傷する可能性がある。また、計測の面では、予想と異なるマイクロ波の伝播・広がりによって、計測位置のずれや空間精度の悪化をもたらす可能性がある。そのため、核融合プラズマ研究において乱流がマイクロ波の伝播に与える影響を解明し、乱流の影響を考慮したマイクロ波入射を可能にすることはプラズマの物理的理解のみならず加熱・電流駆動、計測、内部機器の保護などの工学的な面からも重要である。

2. 研究の目的

本研究では、プラズマ乱流による密度揺動の存在下でマイクロ波が散乱されることによって、マイクロ波のビーム形状、プラズマ中での伝播および吸収にどのような影響を与えるかについて、大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマと電子サイクロトロン共鳴加熱装置(ECH)を用い、数値的・実験的に調査し、乱流中での波動の物理解明に役立てる。そしてその結果を乱流における波動の伝播モデル構築に役立てることによって、乱流の存在するプラズマへの最適なマイクロ波入射の実現に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)当初はマイクロ波検出器を用いての観測を計画していたが、真空容器への設置と予算の制約から、LHDの真空容器保護板に熱電対アレイを設置し、ECHのマイクロ波ビームプロファイル計測の実施とECHのパワーモジュレーション入射を行い、トムソン散乱計測と電子サイクロトロン放射計測により得られるプラズマの電子温度変化を用いたパワー吸収分布推定から、マイクロ波ビームへの影響の検証を試みた。

(2)LHDにおけるプラズマ実験において、トムソン散乱計測によって得られた電子密度・電子温度の空間分布と、位相コントラストイメージング(PCI)計測によるイオンスケール乱流の波数スペクトルおよび空間分布に基づいてプラズマモデルを作成し、その中を伝播する 77 GHz ECHのマイクロ波ビームについての電磁界解析を実施し、マイクロ波ビームの形状が受ける影響について検証を行なった。

4. 研究成果

(1)真空容器のモリブデン保護板に熱電対アレイを設置し、照射試験を実施したが、熱電対間の感度の差が大きく、ビームの到達位置の計測には役立てられるが、正確なビームプロファイルを同定するのは困難であると判断し、熱電対アレイによる計測を断念した。

一方で、実験による検証についてはプラズマの応答から、マイクロ波ビームの広がり

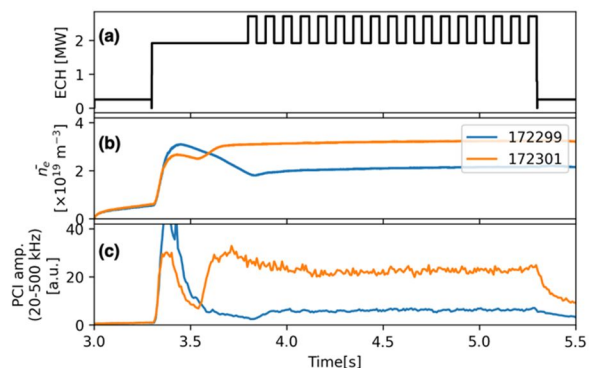


図1 (a)ECH パワー、(b)線平均電子密度、(c)PCI 計測による密度揺動振幅の時間発展、(b)、(c)の線の色はショット番号に対応する。

の推定を試みた。図 1 に LHD において実施したプラズマ実験における入射した ECH パワー、線平均電子密度、PCI 計測による電子密度揺動振幅の時間発展を示す。線平均電子密度が $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のケースを比較すると、密度揺動振幅が増加していることが確認できた。このときに ECH のパワーモジュレーションを実施し、トムソン散乱計測から求めた電子圧力の時間変動の径方向分布を求めると図 2(a) のようになった。レイトレース計算による ECH のパワー吸収の径方向分布は、図 2(b) のようになることがわかった。実験により得られた電子圧力変動の径方向分布は、レイトレース計算のパワー吸収分布より広がっている様子が確認されたが、これらプラズマ中での熱輸送による影響なのか、密度揺動による散乱による影響なのかを判断するのは困難であった。

(2) プラズマ実験でのマイクロ波への密度揺動の影響の評価が困難であったため、実験で得られたプラズマパラメータに基づく冷たいプラズマモデル中でのマイクロ波伝播の電磁界解析を実施した。図 3(a) に解析対象とした密度揺動分布の一例を示す。この密度揺動分布は、図 1 のショット番号 172301 のプラズマ放電中に PCI 計測によって得られた波数スペクトルの空間分布を基に作成している。また、背景の電子密度分布はトムソン散乱計測によって得られた密度を用いている。このプラズマモデル中を伝播する 77 GHz のマイクロ波ビームの波動電場の絶対値の空間分布を図 3(b) に示す。図 3(b) の右方向から図中の黒矢印方向に入射されたマイクロ波ビームが左方向に向かってプラズマ中を

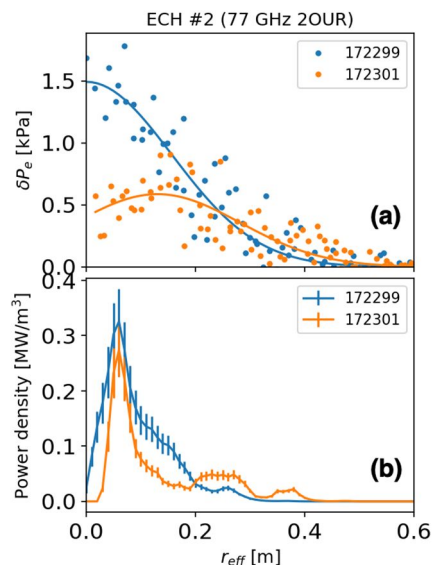


図 2 (a)ECH のパワーモジュレーション入射による電子圧力変動の径方向分布、(b)レイトレース計算によるパワー吸収の径方向分布。プロットデータの色はショット番号に対応する。

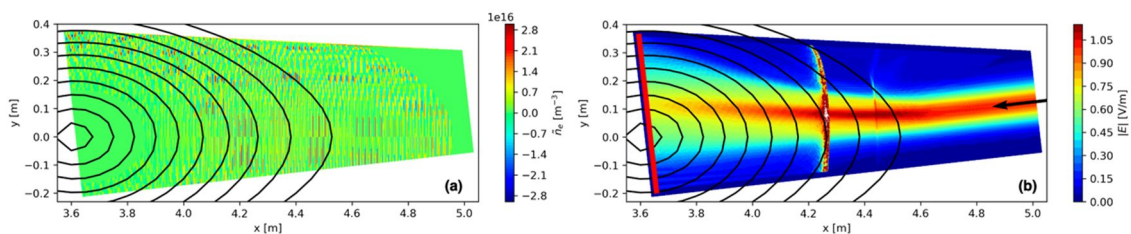


図 3 (a)電磁界解析を行なったプラズマモデルの密度揺動の空間分布、(b)解析結果の波動電場の絶対値の空間分布、図中の黒線はプラズマの磁気面を表す。

伝播する様子が確認できる。このプラズマ中を伝播するマイクロ波ビームのパワープロファイルを、密度揺動レベルを実験値からその 100 倍まで変化させ、図 3(b) の赤線に沿って評価した結果を図 4 に示す。図 4 中のエラーバーは密度揺動の波数ベクトルの位相を変化させた 100 個の異なる密度揺動分布での解析結果についての標準偏差を表す。実験値で得られた密度揺動では、密度揺動がない場合に比べてほとんど変化がなく、実験での密度揺動レベル (< 1%) ではマイクロ波ビームに与える影響はほとんどないことがわかった。一方で、密度揺動レベルを上げていくに従い、標準偏差が大きくなることが確認でき、より大きな密度揺動の存在下ではマイクロ波ビームが影響を受ける可能性があることが明らかになった。また、今回対象とした密度揺動の空間スケールより大きな空間スケールの揺動の方がマイクロ波への影響が大きいことが電磁界解析によりわかったため、その空間スケールの密度揺動を対象として解析を実施することも重要であることがわかった。

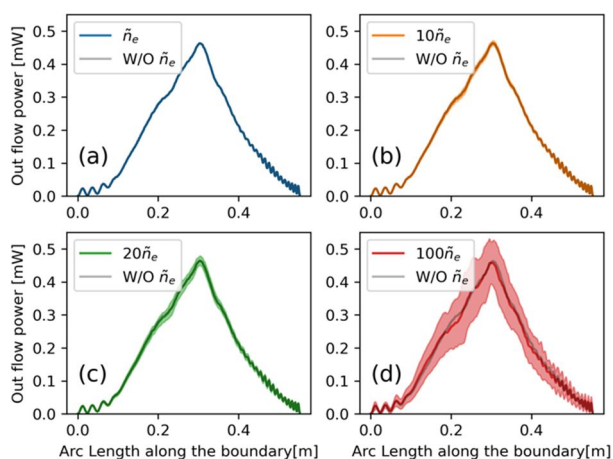


図 4 図 3(b)の赤線に沿った異なる密度揺動レベル (a)実験値および実験値の (b) 10 倍、(c) 20 倍、(d) 100 倍) でのマイクロ波ビームパワープロファイルの比較。灰色線は密度揺動がない場合でのビームプロファイルを表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 矢内 亮馬、木下 稔基、田中 謙治、酒井 彦那、久保 伸
2. 発表標題 電磁界解析を用いたLHDにおける密度揺動によるECHビーム広がり の推定
3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Yanai, T. Kinoshita, K. Tanaka, H. Sakai, S. Kubo
2. 発表標題 Investigation of Density Fluctuation Influence on ECH Microwave Propagation in LHD
3. 学会等名 65th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Yanai, T. Kinoshita, K. Tanaka, H. Sakai, S. Kubo
2. 発表標題 Full-wave Analysis for Estimation of Microwave Beam Broadening by Turbulent Density Fluctuations in LHD
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Yanai, T. Ii Tsujimura, K. Tanaka, Y. Yoshimura, M. Nishiura, H. Igami, H. Takahashi, N. Kenmochi
2. 発表標題 Study of ECH Beam Broadening Influenced by Density Fluctuations in LHD
3. 学会等名 31st International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢内 亮馬、辻村 亨、田中 謙治、吉村 泰夫、西浦 正樹、伊神 弘恵、高橋 裕己、鈿持 尚輝
2. 発表標題 LHDにおける密度揺動によるECHビーム広がりの影響の検討
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------