

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03796

研究課題名(和文) 小型トカマク装置でのプラズマ流直接計測による外部共鳴摂動磁場の伝搬機構の解明

研究課題名(英文) Study of propagation mechanisms of external resonant magnetic perturbations by measurement of plasma flow profile in the small tokamak device.

研究代表者

岡本 征晃 (Okamoto, Masaaki)

石川工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：60508290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：トカマク型核融合炉において、共鳴摂動磁場(RMP)によるプラズマの安定維持を期待して様々な研究が行われており、本研究では、プローブによるプラズマ内部の直接計測が可能な小型装置を用いて、トロイダル・ポロイダル流速、RMP磁場強度や位相の関係を計測し、理論計算と比較することで、プラズマ流のRMP伝搬に対する影響を定量的に評価することを目的として研究を進めた。実験結果から、プラズマとRMPの回転方向が同じ場合にRMPの浸透が確認され、同程度の電子温度分布とポロイダル回転速度分布を持つ放電データの比較から、RMPの浸透がRMP回転速度に依存する結果が得られ、理論計算でも同様の結果が得られている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小型装置を用いることでプラズマ内部に計測器を挿入し、各種物理量の直接計測ができるため、RMP伝搬のキーパラメータである磁場揺動分布とプラズマ流速、温度、密度を計測し、その応答と理論モデルに基づく因果関係を直接比較できる点が学術的意義として挙げられる。理論モデルの検証を通して、汎用的なモデルの確立まで期待されるので、ITERや原型炉でのRMPを用いたELMやMHD制御の有用性を検証し、実用炉への実現に貢献できることが社会的意義として挙げられる。

研究成果の概要(英文)：In tokamak fusion reactors, various studies have been conducted with the expectation that the resonant magnetic perturbation (RMP) field will maintain plasma stability. The purpose of this study is to quantitatively evaluate the effect of plasma flow on RMP propagation by comparing the results with theoretical calculations. Experimental results confirm RMP penetration when plasma and RMP rotation directions are the same, and comparison of discharge data with similar electron temperature and poloidal rotation velocity distributions shows that RMP penetration depends on RMP rotation velocity, with similar results obtained from theoretical calculations.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：トカマク MHD RMP プローブ計測 プラズマ流

1. 研究開始当初の背景

トカマク型核融合プラズマ実験装置において周辺プラズマ制御を目的として、外部から摂動磁場を印加し、周辺磁場構造を統計化する実験が提案されたのは1980年前後のことである。提案当初はリミタからの不純物がプラズマに混入することが問題となっていたため、不純物発生の下と不純物の遮蔽を目的として、プラズマとプラズマ対向機器の間に統計的磁場領域を形成し、低温高密度の周辺プラズマ領域を保持するエルゴディックダイバータ(ED)と呼ばれる実験が行われた。さらに、ED配位では摂動磁場コイル近傍に局所的に熱・粒子負荷が集中するため、摂動磁場を回転させることにより熱・粒子負荷が集中する領域を掃引し、時間平均として負荷軽減を図る動的エルゴディックダイバータ(DED)が提案され、名古屋大学のトカマク装置やドイツのTEXTORにおいて精力的に実験が行われ、プラズマ回転と摂動磁場との相対速度に依存して共鳴面近傍において摂動磁場の遮蔽と増幅が観測されることが報告されている。ダイバータ配位の実験装置においても、ELM(Edge Localized Mode)時のダイバータ板への熱負荷の低減を目的として、プラズマの外部から共鳴摂動磁場(Resonant Magnetic Perturbation, RMP)を印加する実験が行われ、一定の成果を上げている。近年では、RMPを回転させることでロックドモードを制御する実験も行われ、RMPによるMHD制御の有用性が示されている。しかしながら、物理機構が解明されていないため、RMPの遮蔽、浸透条件の定量的な予測ができていない。主な理論モデルには、二流体モデルと一流体モデルに基づくものがあり、2つのモデルでは、特にトロイダル流速の役割が異なる。二流体モデルでは、トロイダル流速はイオン音波を通してRMPの位相に影響を与えるが、一流体モデルでは、プラズマの回転速度に影響を与える。大型トカマク装置では、プラズマ内部のRMP磁場やプラズマ流の直接計測ができないため、上記のモデルのいずれが妥当かの検証ができていない。国際熱核融合炉ITERや実用炉でのRMPによる熱負荷の緩和やMHD制御の有用性を検証するためには、プラズマ中へのRMPの伝搬過程の十分な理解が極めて重要となる。

2. 研究の目的

本研究では、RMPの伝搬過程の理論モデルの実験検証を目的とし、名古屋大学が所有する小型トカマク装置HYBTOK-IIを用いてプラズマ内部のRMP磁場強度、プラズマ流の直接計測を行うものである。具体的には、 $m/n=6/1$ のモード構造を有するヘリカルコイルでRMPをプラズマに印加し、プラズマ内部の磁場揺動分布、トロイダル・ポロイダル流分布、電子温度・密度分布の直接計測を行い、理論モデルとの比較を行うことを予定している。温度計測は、プラズマパラメータの評価以外に、流速の絶対値評価に用いる。実験条件としては、プラズマ表面の安全係数 q_a が7程度放電に対して20kHz程度までポロイダル方向に回転させたRMPのプラズマ中の伝搬過程の計測を行う。また、ガスパフ量を調節し、温度を変化させ、異なるプラズマ抵抗の放電データの取得も行う。

3. 研究の方法

図1に示すマッハプローブとトリプルプローブ、小半径方向の磁気プローブアレイを各トロイダルセクションポートから挿入して同時計測することで、HYBTOK-II装置のトカマクプラズマへのRMP印加時のプラズマ内部の径方向RMP揺動の振幅と位相分布、電子温度・密度分布、ポロイダル・トロイダル流速分布を計測する。電子温度・密度分布はトリプルプローブアレイ計測から求める。マッハプローブからはマッハ速度で規格化された流速が取得できるので、トリプルプローブで得られる電子温度のデータと組み合わせて流速分布を求め、ポロイダル方向、トロイダル方向のプラズマ回転周波数を評価する。また、既設のポロイダル磁場プローブアレイで q 分布の評価を行い、共鳴面位置を特定する。

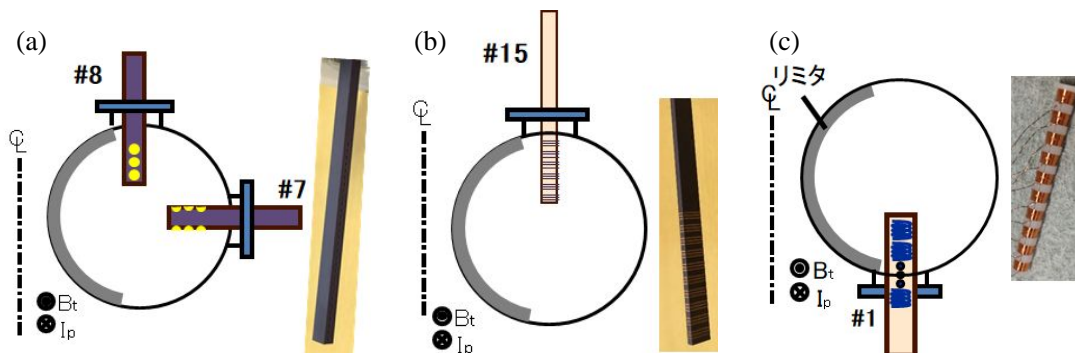


図1 (a)マッハプローブアレイ、(b)トリプルプローブアレイ、(c)磁気プローブアレイの設置図

本研究では MHD 不安定性による影響を分離するために、テリングモードが安定と予想されるプラズマ表面の安全係数 q_a が 7 程度の放電に対して、 $m/n=6/1$ のモード構造の RMP を印加した際のプラズマ内部計測を行う。 $m/n=6/1$ のモード構造を有する RMP コイルを図 2 に示す。真空容器表面に 2 対のコイル (A, B コイル) が取り付けられ、それぞれが別電源に接続されているので、通電電流の位相を変えることにより、RMP を正負のポロイダル方向に回転させることが可能である。印加する RMP コイル電流の周波数は 5 ~ 20kHz まで変化させた。本研究の実験条件を用いた理論モデルによる計算結果との比較を行い、RMP 伝搬過程の物理機構を明らかにする

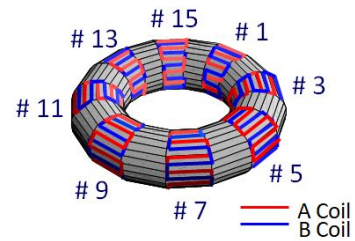


図 2 RMP コイルの概略図

4. 研究成果

図 3 に本研究の典型的な放電波形を示す。プラズマ表面の安全係数 q_a が $t=8-17$ ms の時間帯でほとんど変化しないように、プラズマ電流 I_p とプラズマ中心位置を制御している。RMP コイルには $t=10-17$ ms の時間帯で電流を流しており、図 3(d) から RMP が印加されているときには、径方向磁場揺動に RMP 印加周波数成分が確認される。RMP 印加による電子温度や電子密度の時間変化はほとんど見られず、ポロイダルとトロイダル方向のマッハ数も RMP 印加によって大きく変動することは観測されていない。ここで、マッハ数が正の場合は、ポロイダル方向はイオン反磁性方向、トロイダル方向はプラズマ電流の方向を表している。

プラズマ中の RMP の浸透の評価は、径方向磁場揺動計測で行う。図 4 に磁気プローブアレイで計測した径方向磁場揺動強度分布を示す。図 4(a) は真空中の RMP の伝搬を表す。RMP の回転周波数が増加すると、真空容器による遮蔽の効果が大きくなり、真空容器内に浸透する RMP 強度が小さくなる様子が観測されている。図 4(b) では 5kHz でイオン反磁性方向に回転する RMP を印加したときの真空とプラズマ中の径方向磁場揺動強度の比較をしている。真空中に比べてプラズマ中の磁場揺動が減少していることから、プラズマによって RMP が遮蔽されていると判断することができる。プラズマ内部のポロイダル磁場分布計測から、 $q=6$ の共鳴面が $\rho=0.8-0.85$ にあることを確認しており、 $\rho=0.85$ より内側で RMP が遮蔽されていることがわかる。

図 5 に周波数が 5, 15kHz で電子、イオン反磁性方向にそれぞれ回転させた RMP を印加したときの、プラズマ内部の圧力分布とプラズマ流速分布を示す。ポロイダル流速が正の場合はイオン反磁性方向を、トロイダル流速が正の場合はプラズマ電流方向を示している。図 5(a) から 5kHz でイオン反磁性方向に RMP を回転させた場合に大きな RMP の遮蔽が確認され、その他の条件では RMP の浸透が確認される。トリプルプローブ計測より評価した圧力分布は放電ごとの違いはほとんど確認されないが、プラズマ流速分布はポロイダル、トロイダル方向ともに放電ごとに大きく変化していることが観測された。プラズマ流速と RMP の回転速度と RMP の浸透について定量的に評価するために、 $\rho=0.85$ 近傍のポロイダル流速が同程度の放電データを用いて、RMP の浸透を評価した結果を図 6 に示す。図 6 では $\rho=0.85$ 近傍のポロイダル流速がイオン反磁性方向に 2-6 km/s の速度を

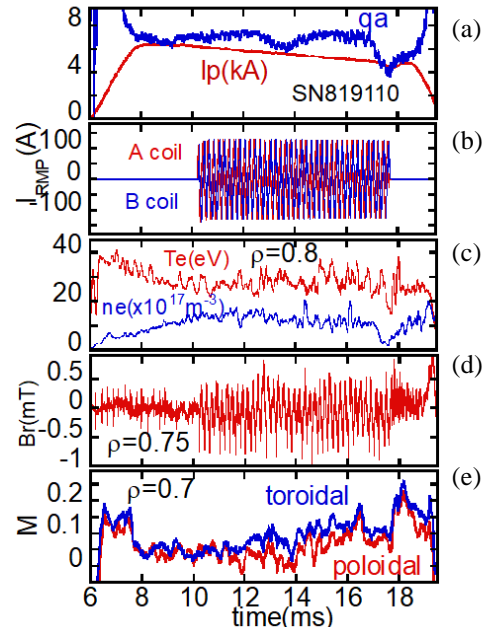


図 3 (a) プラズマ電流 I_p , 安全係数 q_a , (b) RMP コイル電流, (c) 電子温度 T_e , 電子密度 n_e , (d) 径方向磁場揺動, (e) ポロイダル, トロイダル方向のマッハ数の時間発展

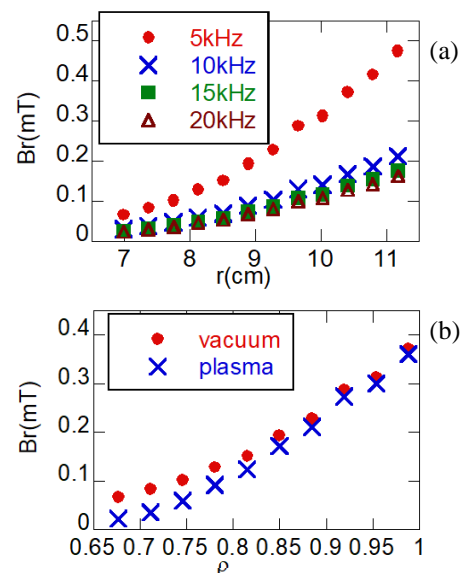


図 4 (a) 真空中の RMP 強度の径方向分布, (b) 真空とプラズマ中の RMP 強度の径方向分布の比較

持つ放電データを示しており、RMP の回転周波数がイオン反磁性方向に大きくなると、プラズマ中に浸透する RMP 強度が大きくなっていることを示している。この結果より、プラズマのポロイダル回転速度と RMP の回転速度が同程度になるにつれ RMP が浸透しやすくなると考えられる。図 7 に 3 場簡約化 MHD モデルによる磁力線の再結合の非線形応答の計算結果を示す。ポロイダル方向の $E \times B$ 速度と RMP 回転速度を変化させたときの共鳴面での磁場揺動強度を示している。実験結果と同様に RMP の回転速度とプラズマのポロイダル方向の回転速度が同程度になるにつれて、共鳴面での磁場揺動強度が大きくなる結果となった。以上より、本研究で用いた理論モデルは定性的に実験結果を説明することが出来ている。

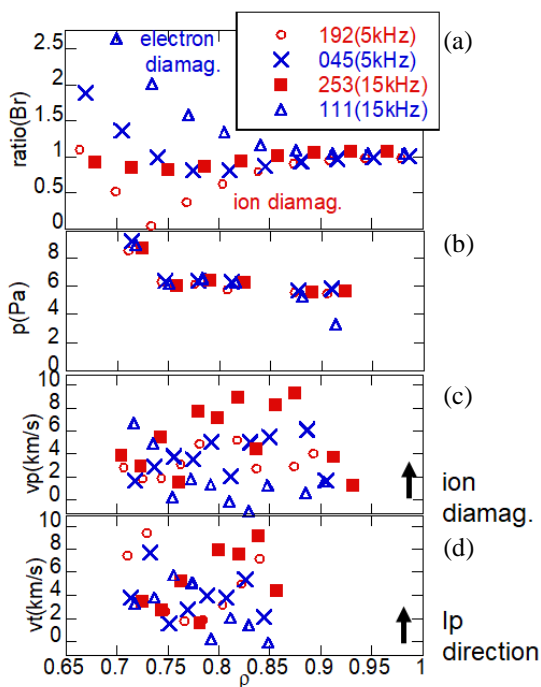


図 5 (a)真空とプラズマ中の RMP 強度比の径方向分布, (b)プラズマ圧力分布, (d)ポロイダル流速分布, (e)トロイダル流速分布

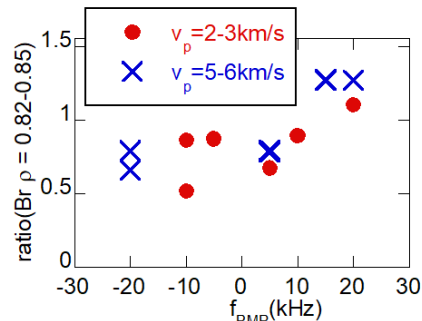


図 6 同程度のポロイダル流速の放電での RMP 回転周波数と共鳴面近傍での RMP 強度比の関係

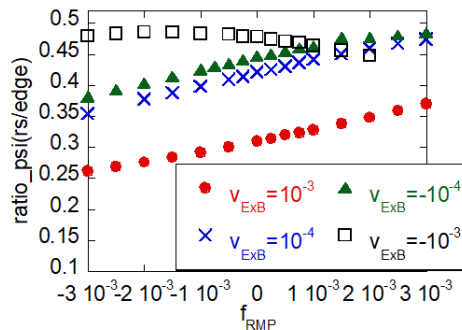


図 7 理論モデルで計算した共鳴面での磁場揺動強度と RMP 回転周波数の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡本征晃, 山越匡葵, 渡邊清政, 大野哲靖
2. 発表標題 小型トカマクHYBTOK-IIにおける外部共鳴摂動磁場印加時のプラズマ内部のプロープ計測
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

1. 発表者名 岡本征晃, 渡邊清政, 大野哲靖
2. 発表標題 HYBTOK- トカマクにおける外部共鳴摂動磁場のプラズマ中の伝搬に関する研究
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本征晃, 柴田欣秀, 渡邊清政, 大野哲靖
2. 発表標題 小型トカマクにおける積層セラミック製トリプルプロープアレイの試作と性能評価
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019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
---------	---------