

令和 3 年 5 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13524

研究課題名(和文) 低域混成波駆動トカマクプラズマの内部磁場計測による波動・電流分布相互作用の解明

研究課題名(英文) Studies of wave-particle interactions with internal magnetic field measurements in a lower-hybrid wave driven tokamak plasma

研究代表者

辻井 直人 (Tsujii, Naoto)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師

研究者番号：20707351

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)：低域混成波によるトカマクプラズマ生成機構を解明するために、波動によって駆動される電流分布を計測できる、マイクロ波偏光計の開発を行なった。また、より理論的なアプローチとして、高速電子を含む拡張電磁流体力学に基づく平衡解析コードを開発した。新しい平衡解析コードと磁気計測、トムソン散乱計測を組み合わせることで、波動が生成する高速電子が実際に平衡配位に影響を与えることを明らかにした。一方、偏光計測に関しては、プラズマ由来の微小な偏光変化を検出するには至らなかった。引き続き偏光計のノイズ対策と信号強度の改善を行なっていく予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低域混成波を含む高周波を用いたトカマクプラズマ生成においては、波動が高速電子を生成し、高速電子が作る電流が系全体の電磁流体力学的平衡を決める。さらに、プラズマの平衡配位は波動の伝搬・吸収や高速電子輸送に影響を与える。この波動・高速電子・プラズマの相互作用により、自律的にトカマク配位が形成されることが実験的には分かっている。この過程を定量的に理解することで、高周波によるトカマクプラズマ生成・駆動の効率を改善することができる。本研究では、高速電子とプラズマの相互作用の理解を進めることができた。トカマクの高周波駆動手法が確立できれば、核融合炉の効率を改善し、定常運転の問題を解決できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：We have developed a microwave polarimeter to measure the current profile driven by lower-hybrid waves, and understand how the waves generate a tokamak plasma. As a more theoretical approach, we have also developed an equilibrium analysis code based on the extended magneto-hydrodynamics including the fast electrons. We have found that the fast electrons generated by the waves indeed affect the equilibrium by using the new equilibrium analysis code together with the magnetic and Thomson scattering diagnostics. On the other hand, for the polarimetry development, we were not able to detect the small change of polarization induced by the plasma. We will continue to improve the diagnostic by reducing the noise and enhancing the signal intensity.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：トカマク 低域混成波 電流駆動 マイクロ波偏光計 拡張電磁流体力学

1. 研究開始当初の背景

トカマク型核融合炉においては、プラズマの閉じ込めに必要な電流を中心ソレノイド(CS)により誘導的に駆動するのが普通である。しかし、この方法はパルス運転しかできないため、商用炉には適さない。また、トカマクのアスペクト比を下げた球状トカマクは高ベータプラズマを安定に維持できるが、燃焼炉においては中性子遮蔽が必要になるため、CSの除去が必須と考えられている。高周波を用いて非誘導でトカマクプラズマを生成できれば、定常運転が可能となるだけでなく、CSを取り除くことでトカマクの性能を大幅に向上させることが可能となる。

本研究グループでは、TST-2 球状トカマク装置において、低域混成波のみを用いたトカマクプラズマの立ち上げ、維持に成功している。一方、波動によってトカマクプラズマが生成される過程を理解するためには、波動による非熱的な高速電子の生成、高速電子の輸送、バルクプラズマの力学平衡と平衡配位の波動伝搬と高速電子輸送への影響を、全て精密に記述することが必要である。特に、非誘導プラズマは特異な内部電流分布を持っているため、平衡磁場配位を実験的に正確に推定することが困難であり、波動による電流駆動計算の精度が低かった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マイクロ波を用いた偏光計測により、平衡計算の内部磁場再構成の精度を向上させ、低域混成波の伝搬・吸収を精度良く予測できるようにすることである。また、高速電子を含む拡張電磁流体力学(Magneto-Hydrodynamics: MHD)に基づく平衡解析コードを開発することで、高速電子がMHD平衡に与える影響を明らかにすることである。高い電流駆動効率を持つ低域混成波を用いたトカマクプラズマ生成過程を定量的に記述できれば、トカマクプラズマの効率的な非誘導立ち上げの手法を確立することが可能となる。

3. 研究の方法

内部磁場を直接計測するため、偏光計を開発した。偏光計は、光がプラズマを透過する際の、進行方向の磁場に比例した偏光角の回転(ファラデー効果)を計測するものである。プラズマ由来の数度の微小な偏光変化を計測する必要があるため、十分な精度を出すのが難しい。本研究では回転円偏光をプローブ光とする方式を採用した。透過光の磁場に垂直または並行な直線偏光の回転周波数成分を検出することで、コットン・ムートン効果を打ち消し、高精度の偏光計測を行うことが原理的には可能である。計測結果は拡張MHD理論解析と比較することで、高速電子がMHD平衡に与える影響を調べることができる。

4. 研究成果

(1) マイクロ波偏光計の開発

TST-2 の低域混成波駆動プラズマをターゲットとし、プローブ光として 28 GHz のマイクロ波を用いる偏光計を開発した(図1)。2つのガン発振器で生成したマイクロ波を偏光が直交するように直交モード合成器(Orthomode transducer: OMT)で合成し、偏光子で左右円偏光に変換することで、発振器の差周波数で回転する直線偏光が得られる。これをプローブ光とし、透過光のトロイダル(ある

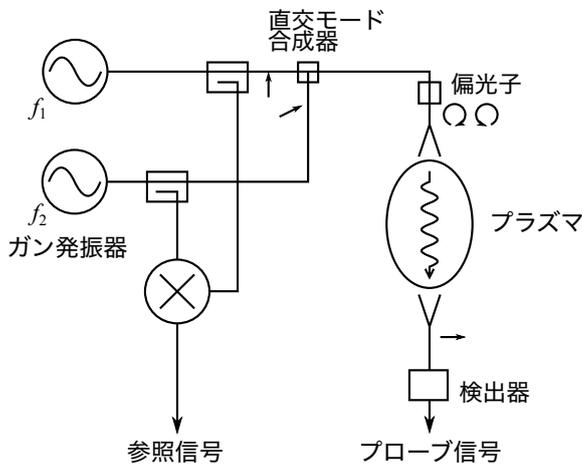


図1. マイクロ波偏光計の模式図。

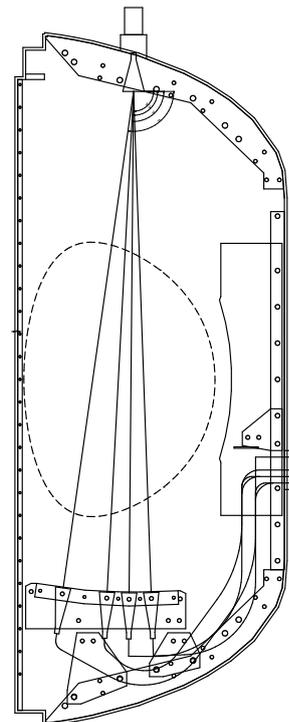


図2. 偏光計視線のポロイダル断面図

いは径)成分を受信する。プラズマによるファラデー回転角(の2倍の値)は回転周波数における変調信号の位相として検出される。ここで計測が必要なポロイダル磁場はトロイダル磁場に比べて1桁以上小さいので、場合によってはコットン・ムートン効果がファラデー効果よりも強くなってしまい、計測データの解釈が難しくなる。上記の構成で計測を行う場合、コットン・ムートン効果は打ち消されて観測されないことを理論的に示した [1]。

図2に設置した偏光計視線のポロイダル断面図を示す。プラズマ上側にプローブ光入射用の円形ホーンアンテナを設置し、プラズマ下部に透過光受信用の矩形ホーンアンテナを4つ並べた。プローブ光の自然な広がりにより、受信アンテナ4つとも十分な信号強度が得られることが確認できた。

図3はプラズマ放電のない時に計測された変調信号である。参照光、プローブ光共に発振器の差周波数での変調が明確に見えている。この時のプローブ光の位相信号を図4に示す。0.2 msの積算時間で雑音が0.2度となった。これは十分、電流分布計測として有用な精度である。一方、磁場コイル及びプラズマ放電中には位相雑音が一桁程増加してしまった。また、放電の時間発展のスケールで、プラズマ由来でない大きな偏光信号が乗ってしまい、微小なプラズマ由来の偏光変化を同定することはできなかった。今後もノイズ対策と信号強度の改善を続けていく予定である。

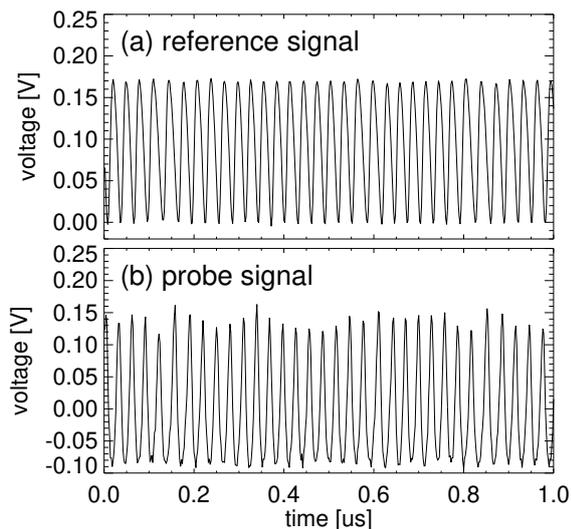


図3. (a) 参照信号。(b) 最も内側のチャンネルの偏光の変調信号。

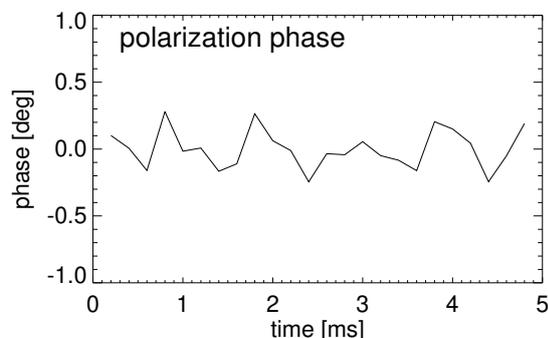


図4. 計測された偏光角。

## (2) 拡張電磁流体力学に基づく平衡解析コードの開発

内部磁場計測と比較するための理論的解析として、拡張 MHD に基づく平衡解析コードを新たに開発した[2]。通常の平衡解析においては、プラズマ周辺部に設置した磁気計測に対する誤差が最小となるような MHD 平衡を、フィッティングにより求める。ここでは、高速電子が MHD 平衡に与える影響を調べるため、無衝突高速電子の寄与を加えた拡張 MHD を考えた。高速電子の分布関数は、低域混成波の電流駆動解析を用いて少数のパラメータでモデル化し、MHD 平衡再構成のフィッティングパラメータに加えた。拡張 MHD 解析により再構成された内部電流分布は、従来の MHD に基づくものよりも強磁場側に偏った電流分布になることがわかった。これは高速電子が主に磁力線方向に長いテールを作ること、また、高速電子の軌道が磁気面よりも弱磁場側にシフトすることによって、電流のバルク圧力成分が減少したことが原因であった。トムソン散乱計測から得られた電子密度分布の磁気面関数によるフィッティングは、従来の MHD よりも拡張 MHD による平衡配位において改善した。これは拡張 MHD の磁気面関数がより真実に近いということであり、高速電子が従来の MHD では記述できないような影響を平衡配位に与えることを示唆している。今後、偏光計の内部磁場計測による、直接的な拡張 MHD 解析結果の妥当性検証が望まれる。

## <引用文献>

- [1] 辻井他、“TST-2 における低域混成波駆動プラズマの電流分布計測のためのマイクロ波偏光計開発、” プラズマ・核融合学会年会 (2020)
- [2] N. Tsujii et al., Plasma Fusion Res. 15, 2402010 (2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 TSUJII Naoto, YOSHIDA Yusuke, TAKASE Yuichi, EJIRI Akira, WATANABE Osamu, YAMAZAKI Hibiki, PENG Yi, IWASAKI Kotaro, AOI Yuki, KO Yongtae, MATSUZAKI Kyohei, RICE James H.P., OSAWA Yuki	4. 巻 15
2. 論文標題 Studies of a Lower-Hybrid Wave Driven Plasma Equilibrium with a Hybrid-MHD Model on the TST-2 Spherical Tokamak	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402010 ~ 2402010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.15.2402010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔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 N. TSUJII, Y. TAKASE, A. EJIRI, O. WATANABE, H. YAMAZAKI, Y. PENG, K. IWASAKI, Y. AOI, Y. KO, K. MATSUZAKI, J.H.P. RICE and Y. OSAWA
2. 発表標題 MODIFICATION OF THE MAGNETO-HYDRO-DYNAMIC EQUILIBRIUM BY THE LOWER-HYBRID WAVE DRIVEN FAST ELECTRONS ON THE TST-2 SPHERICAL TOKAMAK
3. 学会等名 IAEA FEC（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻井直人, 高瀬雄一, 江尻晶, 渡邊理, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, James Rice, 大澤佑規, 弥富豪, 山田巖
2. 発表標題 TST-2 における低域混成波駆動プラズマの電流分布計測のための マイクロ波偏光計開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Tsujii
2. 発表標題 Modeling of the lower-hybrid wave driven plasma equilibrium with a hybrid-MHD model on the TST-2 spherical tokamak
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, S. Yajima, Y. Yoshida, H. Yamazaki, Y. Iida, K. Iwasaki, Y. Kawamata, S. Sakamoto
2. 発表標題 Development of a microwave polarimeter for the measurement of the lower-hybrid driven current profile on the TST-2 spherical tokamak
3. 学会等名 アメリカ物理学会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻井直人, 高瀬雄一, 渡邊理, 矢嶋悟, 吉田裕亮, 山崎響, 飯田勇介, 岩崎光太郎, 川又裕也, 坂本将, 青井優樹, 高竜太, 松崎享平
2. 発表標題 TST-2の非誘導立ち上げプラズマにおける偏光計の開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018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