

論文内容の要旨

論文題目 Density Fluctuation Measurements in TST-2 Spherical Tokamak (TST-2 球状トカマクにおける密度揺動測定)

氏名 山田 琢磨

東京大学の TST-2 実験装置は中心密度が $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 程度の球状トカマクプラズマ(ST)である。この実験装置では現在、High Harmonic Fast Wave (HHFW) を用いた Radio Frequency (RF) 加熱実験が行われており、HHFW の周波数は 21MHz、最大加熱パワーは 400kW である。HHFW を用いた RF 加熱は、ST の加熱で用いられる有効な加熱方法であると期待されている。通常のとカマク装置で加熱に利用される電子サイクロトロン波や Lower Hybrid 波などの波は誘電率が高い ST プラズマでは中心付近まで伝播することができないのに対し、HHFW は誘電率が高いプラズマ中でも深く伝播することができ、電子によって効率的に吸収されることでプラズマの加熱を行うことができる。HHFW による ST の加熱はプリンストンプラズマ物理研究所 (米国) の CDX-U 実験装置で初めて行われ、続く NSTX 実験装置でも重要なテーマとして実験が行われている。プラズマの RF 加熱による効果を確かめるためには、RF 加熱によって励起されるポロイダル電場が引き起こす密度の揺動を検出することが非常に重要である。図 1 は、TASK/WM コードによって TST-2 の RF 加熱による効果をシミュレートした結果であり、励起された電場の強度分布を表している。この図から、励起される電場の分布は、プラズマの半径方向に節を持っていることが分かる。これらの節の間隔は、HHFW の波数ベクトルの垂直方向成分と一致する。

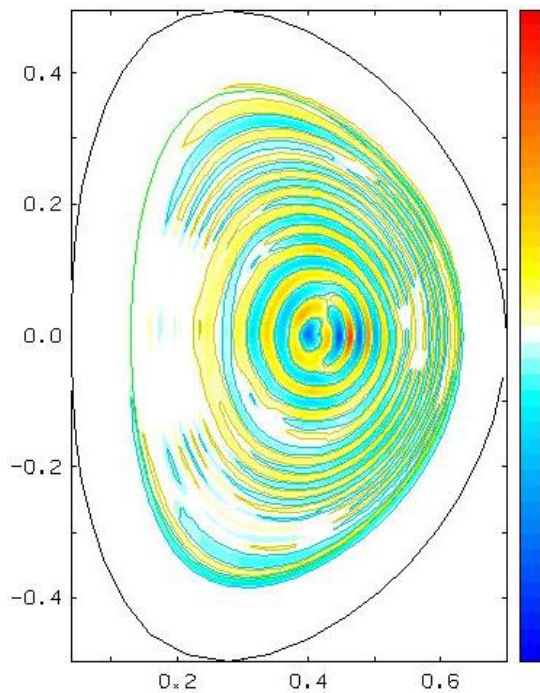


図 1. TASK/WM コードで予測される励起電場の強度分布。

マイクロ波反射計はプラズマの電子密度分布や電子密度の揺動を計測するのに非常に適しており、多くのプラズマ装置で用いられている。また、時間分解能が早いことから、RF 加熱による周波数の高い振動も検出することができる。入射したマイクロ波は、その周波数に依存する密度に相当するカットオフ層によって反射される。反射計はこの性質を用い、反射波の位相の変化からカットオフ層の径方向の振動を検出する。また、周波数を掃引することでプラズマ中の測定位置を時間的に変化させることができ、密度分布をもとめることができる。反射計を用いた RF 加熱による密度振動の検出は、GAMMA10 (茨城) などの多くの実験装置で行われてきた。また、NSTX でも反射計による密度分布と密度揺動の測定が行われている。しかし、ST において反射計を用いて密度分布と密度振動を同時測定し、

HHFW による加熱が引き起こす密度振動の径方向分布を測定した例は未だない。そこで TST-2 での密度分布と HHFW 加熱によって生じる密度振動を同時測定するために、26.5GHz から 40GHz の周波数帯の反射計装置を設計し実験を行った。この研究の目的は、RF 振動を検出するための反射計を設計し、その性能を数値計算により確かめること。反射計の製作、組み立て、試験を行い、TST-2 に取り付けること。実際に TST-2 においてプラズマ実験を行い、RF による密度振動の径方向分布を測定することである。

反射計の設計と性能のシミュレーションは、Kirchhoff 積分を用いて行われた。Kirchhoff 積分は 3 次元配位におけるマイクロ波の電波を計算するのに有効な方法であり、スクリーン上の電場をスカラー量として仮定することで高速に計算を行うことができる。反射計で用いられる凹面鏡やホーンアンテナの配置や曲率・方向などは、この Kirchhoff 積分を用いて最適化された (図 2)。設計結果は特定の条件で反射波のパワーが最大になる配位ではなく、周波数が用いられる周波数帯域内にあり、カットオフ層が予想される位置の範囲内にあるという広い条件で反射パワーが大きくなるような条件を導き出した。反射計は密度揺動に敏感であるが、大振幅、小波長の揺動が存在すると反射波は著しく回折され、測定が不可能となる。そこで、正しい測定ができるための条件を計算した。揺動のポロイダル方向の波長が 5λ 以上 (λ はマイクロ波の波長)、また揺動の径方向の振幅が 4 rad 以下ならば

(図 3) 揺動を検出することができることがわかった。RF による密度振動のレベルはプラズマ内の誘電率テンソルの計算から 0.1%程度と予測されており、これに相当するカットオフ層の揺動の径方向振幅は約 0.3rad であり、設計された反射計によって充分検出することができる範囲内にある。

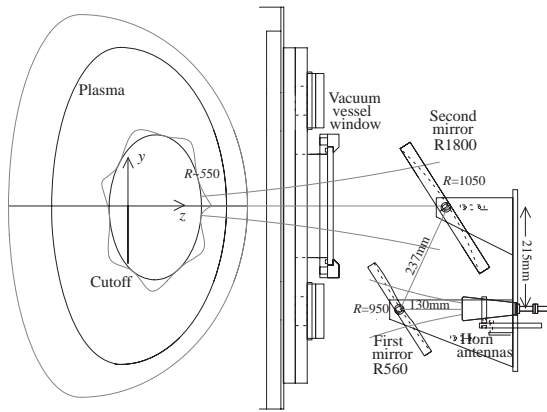


図 2. 反射計の光学系の配置図。

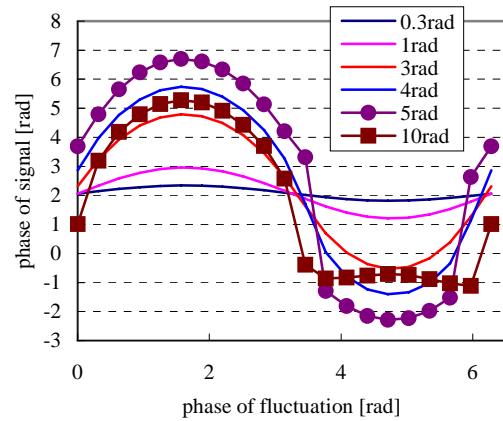


図 3. 密度揺動を仮定した場合の反射計の検出結果。

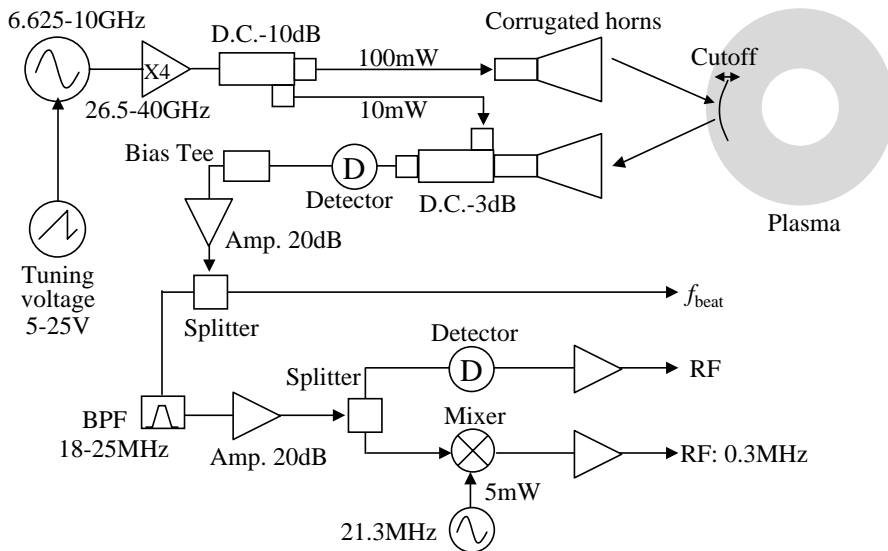


図 4. 反射計の構成

図 4 は反射計システムの模式図である。5-25V の駆動電圧によって 26.5-40GHz のマイクロ波が発振され、ホーンアンテナからプラズマに向けて放射される。マイクロ波のパワーは約 100mW である。マイクロ波は 2つの凹面鏡によって反射されることでプラズマ内のカットオフ面にスポットを作る。カットオフ層で反射された波は再び凹面鏡によって集め

られ、もう一つのホーンアンテナに戻る。戻った波は参照波と合成され、検出器で検出される。検出された波は密度分布の情報を持つ 1MHz 程度のビート周波数成分と、RF による密度振動によって変調された 21MHz の周波数成分を持つ。そこで検出波はアンプで増幅された後 3 つに分けられ、1 つはそのまま AD 変換し、密度分布を得るのに用いられる。残る 2 つの検出波は周波数 18–25MHz のバンドパスフィルターにかけられ、1 つはそのまま検波され、1 つは 21.3MHz の波とミキシングすることによって 300kHz の信号となる。

図 5, 6 は、反射計を用いた RF 加熱による密度振動を検出した結果である。図 5 はプラズマ電流と RF 入射のタイミング、軟 X 線の RF 入射に対する応答を示した図である。図 6 は、19.0–19.3ms における 3 回の周波数掃引によって RF による密度振動の径方向分布を求めたものである。同時帯での密度分布は、マイクロ波干渉計による線積分密度と、平衡計測から得られた磁気面を用い、さらに密度分布が放物型であると仮定して求められた値を用いた。この分布からプローブ周波数とカットオフ密度の関係を用いて密度振動の径方向分布を求めた。RF によって発生するノイズレベルも図中に示してある。図の密度振動の径方向分布にはいくつかの節を持つ構造が現れている。この節の間隔はおおよそ 30mm であり、TASK/WM コードのシミュレーション結果や、誘電率テンソルの計算から求められる HHFW の波数ベクトルの垂直方向成分とほぼ一致する。

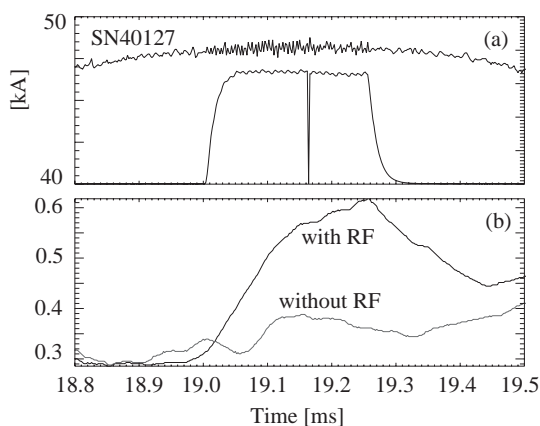


図 5. (a) RF の入射タイミングと軟 X 線の RF 入射に対する応答。

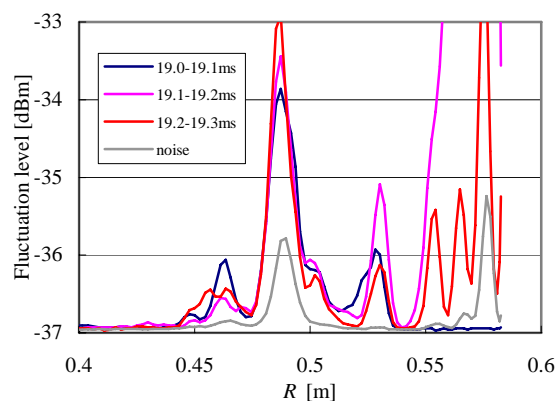


図 6. RF による密度振動の強度の径方向分布とノイズレベル。

本研究では、反射計を用いて TST-2 における RF による密度振動とその径方向の構造体を測定することが出来た。この成果は、HHFW による ST 加熱の有効性や TASK/WM コードの妥当性の検証につながると期待される。将来、本実験で使われた反射計によって密度分布が測定できれば、密度振動の正確な径方向分布が求められることになり、さらなる詳しい解析が可能となる。