

GAMMA10 における ICRF 波動の固有モード形成

筑波大学プラズマ研究センター 山口裕資

1. 研究背景と目的

複合ミラー型装置 GAMMA10 では電位による閉じ込め改善に加え、プラズマの更なる高密度化が課題となっている。プラズマ生成、維持には、ICRF(Ion Cyclotron Range of Frequency)の電磁波を利用する。現在 RF1(～10MHz), RF3(～40MHz), の2系統の高周波発振器を用い、プラズマ生成、維持に関する研究を進めている。

GAMMA10 においては、プラズマの径や長さが励起波動の波長と同程度である為、波動励起は、境界条件に起因する固有モード形成に影響を受ける。RF1 の周波数帯では、プラズマ中に励起しうる径方向境界条件を満たす固有モードが一つである為、密度上昇に伴って軸方向に境界条件を満たすモードが存在できなくなり、密度が飽和することが指摘されている。更なる高密度化のためには、同時に複数の径方向固有モードが励起でき、どの密度領域においても軸方向境界条件を満たして強く励起されるモードが存在する周波数が有効であると考えられ、イオンサイクロロン高次高調波領域の発振器(RF3)が導入された。RF3 を用いることで、これまでに顕著な密度上昇が観測されている。本研究は、ICRF 波動の固有モード形成、及びそのプラズマ生成への影響を調べることを目的とした。計算コードを使用した ICRF 波動伝播の数値解析、及び磁気プローブを用いた励起波動計測による計算結果の実験的評価を行った。

2. 計算コードを用いた波動伝播解析

GAMMA10の軸対称ミラーセントラル部におけるプラズマ生成を解析する為に、有限要素法による2次元波動伝播コードを使用した。解析にはGAMMA10の磁場、プラズマ密度の空間分布、そして現在のアンテナ形状等を取り入れ、励起される波動電場の空間構造を調べた。

図1は励起波動の軸方向波数、及び各波数成分の電場強度を、プラズマ密度を変化させて調べた結果である。RF1(9.9MHz)の場合、現状の実験密度範囲で、一度に励起できる径方向固有モードが1つだけであることがわかる。波動電場強度が極大となるところで、軸方向に固有モードが形成されている。固有モードの形成は、密度変化に対して離散的に起こり、またその間隔は密度の上昇に伴って大きくなる。したがって密度の上昇に伴い波動強度が小さくなると、損失等の条件により次の極大点に届かなくなることが予想される。密度飽和が実験的に観測されている密度近傍で、固有モード形成が起こることが数値計算により確認された。

RF3(高次高調波：41.5MHz)の場合、広い密度範囲で一度に複数の径方向固有モードを同時に励起できることが明らかとなった。それぞれの固有モードは、径方向の電場構造が異なっており、高密度側で出現するモードほど、径方向波数の大きい高次の構造を持つことを確認した。RF1の場合と比べ周波数が高い為、個々の固有モードで極大点の間隔が狭く、また複数の径方向固有モードが極大点間の間隙を互いに補うように励起される。したがって、固有モード形成に起因する密度拘束による飽和が起こり難く、高次高調波は高密度プラズマ生成に有効であると考えられる。

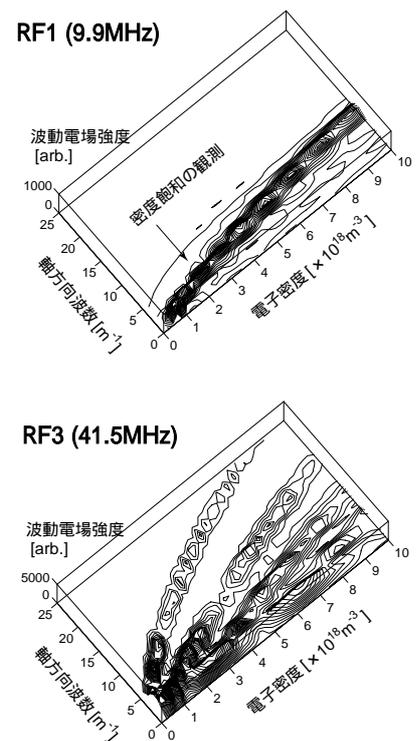


図1 セントラル部の分散関係

3. 磁気プローブを用いた励起波動計測

計算を実験的に評価する為、磁気プローブを用いて、励起波動強度の密度依存性を計測した。その結果、密度上昇に伴って励起波動の強度は大きく変化し、固有モード形成に起因すると思われる強度の極大点、極小点が観測された。計測結果と計算結果には良い一致が得られ、計算結果の妥当性を確認することができた。

4. まとめ

計算コードを用いた GAMMA10 セントラル部の波動解析、磁気プローブ計測との比較の結果、プラズマ密度は波動の固有モード形成に影響を受け、固有モードが形成されるところで拘束されやすいことを明らかとした。