

# ドップラー反射計～プラズマの中の流れをしらべる～

徳澤 季彦

皆さんは、ドップラーレーダーという言葉をお聞きになったことはありませんか？最近夏場によく耳にする“ゲリラ豪雨”の予測などに活躍している気象観測装置のことです。“普通の”気象観測レーダーというのは、電磁波を空中に発射し、数キロ先の雲や雨滴によってはね返ってくる反射信号を計測して、何キロ先に雲がありますよというような情報を調べます。一方、ドップラーレーダーというのは、その場所の風の流れをも観測することができるというものです。これは、皆さんもよくご存じの“ドップラー効果”を利用した計測手法です。ドップラー効果とは、街中で救急車が走ってきた時に、近づいて来るにつれサイレンの音が高くなり、遠ざかるにつれ音が低くなるという、あの現象です。電磁波は音波とは違いますが、この現象が同じように生じます。今回、紹介する“ドップラー反射計”というのは、まさにこの計測手法をプラズマ診断に適用したものです。

ところで、大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマは、ホームページのビデオライブラリ(<http://www.lhd.nifs.ac.jp/other/limit/video.html>)で見ていただくことができますが、ご覧いただくとお分かりになりますように、プラズマが点くと少しボヤッと

いたしますが、真空容器の向こう側の壁が相変わらず見えています。レーダーを使って反射波を計測しようとした場合、このようなプラズマに電磁波を入射したとして、いったい何にはね返ってくるのでしょうか？実はプラズマは透明に見えますが、ある波長の電磁波に対してプラズマは鏡のような物体になるのです。これはプラズマを構成する電子とイオン(さらに磁場)の相互作用によって生じるものなのですが、この電磁波を入射し、鏡面ではね返ってくる現象を“カットオフ”現象と呼びます。同じ現象は地球大気の上層部、電離層と呼ばれる領域でも生じており、これを用いて短波放送による長距離通信などに一般でも活用されています。このカットオフ現象は、入射する電磁波の波長(波の山と山との間の距離)とプラズマの電子密度とに一对一の関係があり、この特性を用いたプラズマ計測手法“反射法”によって、電子密度の空間分布や揺動の計測が行われています。これは、いわゆる普通のレーダーに相当します。ドップラー反射計というのは、この普通のレーダーを上で述べたドップラーレーダーへとバージョンアップしたものだと言えます。ドップラー反射計の原理は次のようなものです。図1にありますように、ある

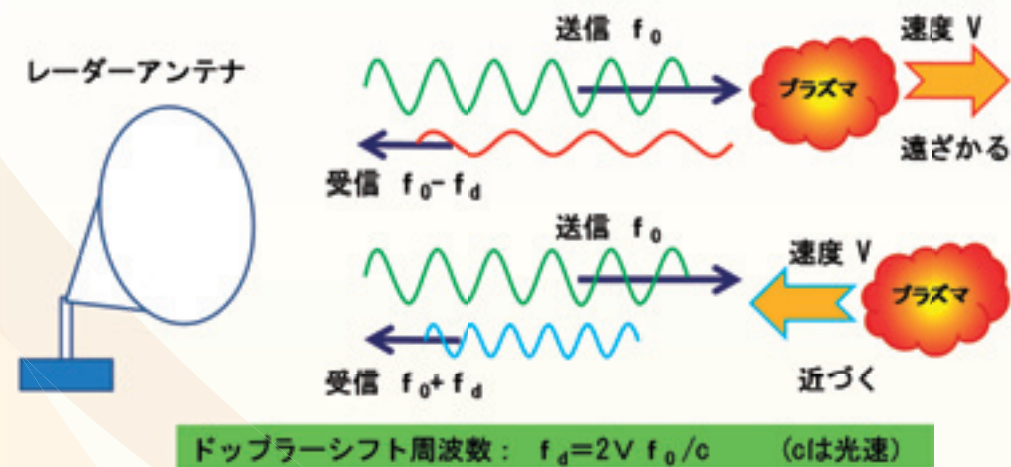


図1 ドップラーシフトの原理。プラズマの移動速度が、ドップラー周波数の変化として観測されます。

反射層がプラズマの流れに乗って動き、アンテナから遠ざかれば波長が長く(周波数が低く)、近づけば波長が短く(周波数が高く)なること(これをドップラーシフトと呼びます)を観測します。この時、観測する反射波のドップラーシフトした周波数の変化はプラズマの移動速度に比例しますので、これからプラズマの移動速度を求めることができます。

このドップラー反射計は、2001年頃にドイツのWendelstein7-ASという核融合プラズマ実験装置で提案された比較的新しいまさに21世紀の計測器です。近年、世界各国の実験装置への適用が進み、LHDにおいても図2に示しますように専用のアンテナを真空容器内部に設置し計測を開始しました。このアンテナは、超音波モーターを用いたリモート制御によって、プラズマ中へと電磁波を入射する角度を変化させることができます。これにより計測する位置などを自在に変えることができます。また、この計測に用いる電磁波の波長は、現在のLHDの実験領域に合わせて、約4～10ミリメートル(周波数で言うと30ギガヘルツから70ギガヘルツ(ギガヘルツは1秒間に10億回の振動を意味します))のいわゆる“ミリ波”と呼ばれる電磁波を用いています。核融合科学研究所で開発を行ったこのミリ波を用いた反射計測システムは鏡面の約50ミクロンの変化も逃さずに測定することができます。これは髪の毛の太さ程度に相当します。

このドップラー反射計でLHDプラズマの周辺部を計測した実験結果について、以下に紹介します。



図2 真空容器内部に設置したドップラー反射計用アンテナの写真。複数枚の金属ミラーを用いた伝送光学システムで構築しています。ミラー部までは、コルゲート導波管という細かい溝のついた金属管の中を通して、ミリ波を伝送しています。金属バネを用いた回転機構によって真空容器の外側からミラーを動かすことにより、電磁波の入射方向を変化させることができます。

この実験では、主に中性粒子ビーム加熱を用いて約3千万度のプラズマを生成しました。この時にドップラー反射計で観測されたプラズマからの反射信号の周波数スペクトルを図3に示します。

この図では、横軸は中心周波数からのずれです。中心周波数がゼロで、右側の正の値は周波数が高くなっていること、すなわちアンテナの方向にプラズマが向かって来ていることを意味します。逆に負の値はプラズマがアンテナから遠ざかっていることとなります。縦軸はそれぞれの周波数成分における信号の強さを表します。この場合、正の方向にピークの位置がずれているのがわかります。これがドップラーシフトです。このドップラーシフト周波数からプラズマは秒速約6キロメートルで動いていることがわかりました。またその動く方向は、イオン反磁性ドリフト方向というプラズマの電場がプラスとなる状態で生じる運動の方向であることが確認され、これはプラズマの周辺部では、質量の軽い電子の方がイオンよりも先に移動するという理論モデルをよく説明できる結果となりました。このように求められたプラズマ速度の時間的あるいは空間的な変動を今後さらに詳細に計測することによって、LHDプラズマで発生している興味深い物理現象の理解を進めるべく研究を推進していきます。

(高密度プラズマ物理研究系 准教授)

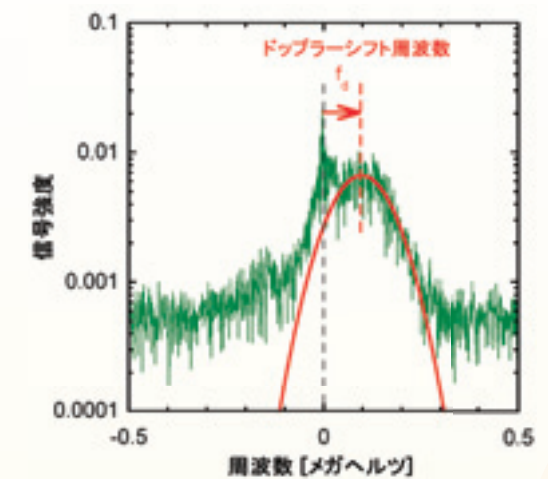


図3 プラズマ周辺部をドップラー反射計で計測した時の反射信号の周波数スペクトル。中心周波数がゼロで、正の値は周波数が高くなっていることを意味しています。赤線は、ドップラーシフト周波数を見積もるためのフィッティング曲線で、これからドップラーシフト周波数を求めることができます。