

プラズマ内部の揺らぎの大きさと速度分布を見える化する ～マイクロ波周波数コムを用いたドップラーレーダーの開発～

徳澤季彦

「出たー、165 キロ！」2016年に札幌ドームで日本プロ野球における球速の最高記録が更新された時のコメントです。ピッチャーの投げる野球ボールのスピードは、スピードガンという計測器を用いて測定されます。サイレンを鳴らして走る救急車などで皆さんもおなじみのドップラー効果、すなわち、車が近づくと音が高くなり、遠ざかると低くなる、この現象を応用した計測器です。研究所では超高温の大型ヘリカル装置（LHD）プラズマの回転速度の計測にこのドップラー効果を利用した計測器を適用しています。プラズマの速度？プラズマは閉じ込められてじっとしているのでは？と思われるかもしれませんが、実はプラズマはものすごい速さで真空容器の中を移動しています。その速さはプラズマ中の位置にもよりますが、例えばプラズマの周辺部では、秒速 10 キロメートル、時速に直すと 36,000 キロメートルという速さになります。超電導リニアの 600 キロ、超音速旅客機コンコルドの 1,000 キロ、人工衛星の持つ第一宇宙速度 28,400 キロをも超えるような速さです。実はこのプラズマの回転速度は、高温プラズマの閉じ込めに大きな影響を与えます。プラズマは通常中心部の温度が高く、周辺に行くにしたがってプラズマ圧力が小さくなります。そこで粒子や熱が外側に向かって流れ出ようとしませんが、速い回転が存在するとこれを抑制できる可能性があります。この研究のためには、速度の分布構造を調べる必要があります。

プラズマの速度を測るといっても、LHD プラズマは真空容器の中に閉じ込められており、かつ超高温ですから直接触るわけにはいきません。触らずに遠くから調べる。そう、まさにスピードガンのような方法で調べることが良さそうです。図 1 にその原理を示します。プラズマに

向かって少し離れたところから電磁波を照射します。するとプラズマの中の揺らぎによって電磁波が散乱されて戻ってきます。戻ってきた電磁波の周波数は、プラズマの動きにより生じたドップラーシフト（ドップラー効果によって周波数が変移すること）を受けた分、照射した元の電磁波の周波数からずれたものになります。実際に LHD プラズマへ周波数 30 ギガヘルツ（ギガは 10 億）の電磁波を入射したときに戻ってきた信号の周波数スペクトルを図 1 の右側に示しています。横軸の周波数 0 に相当するのが、元々の周波数で、この例の場合、左側にずれた信号が観測されています。ここで、左側がマイナスの周波数となっているのは、元の周波数よりも低くなったことを意味します。つまり、アンテナからプラズマが遠ざかっているということが分かります。このずれた周波数（ドップラーシフト周波数）の値はプラズマの速度に比例しますので、その場所のプラズマの速度を知ることができます。また同時に、この戻ってきた電磁波の強さから、その場所のプラズマの揺らぎの大きさも知ることができます。

異なる場所の速度情報を知るにはどうしたらよ

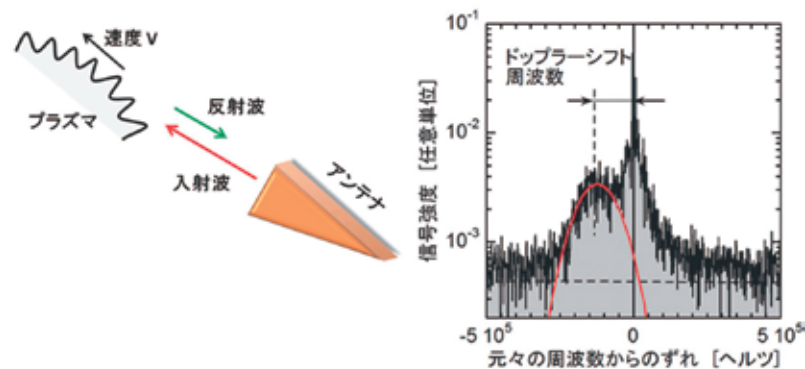


図1（左図）揺らぎのあるプラズマに電磁波を入射すると、プラズマの速度に比例した周波数のずれを伴った反射波が戻ってきます。（右図）その周波数は、プラズマの回転によりドップラーシフトを受けており、この例の場合はプラズマがアンテナから遠ざかる方向に動いているので、マイナス側に周波数がシフトしています。ドップラーシフト量は、得られた周波数スペクトルに赤線のようなカーブフィッティングを当てはめて求めることができ、この値からプラズマの速度を求めることができます。またこの信号の強度から揺らぎの大きさを知ることでもできます。

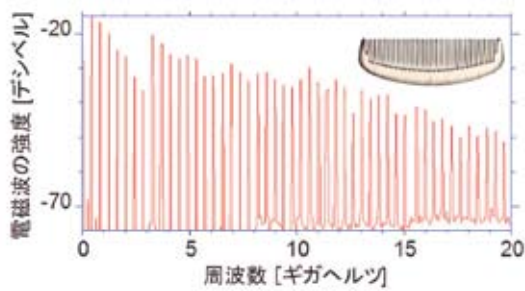


図2 周波数コムが発振スペクトルの例。規則正しく並んだ多数の周波数成分を同時に発生させることができます。(コムとは櫛のことです。)

いでしょう？ご安心ください。プラズマへ入射する電磁波の周波数を変化させると、プラズマの中に入って行く距離を変えることができます。具体的には高い周波数の電磁波を用いれば、よりプラズマ内部の情報を知ることができます。したがって、一度にたくさんの周波数の電磁波群をプラズマに照射すると、様々な場所のプラズマ速度の情報を得ることができるはずで。ではどうやって、色々な周波数の電磁波を発生させればよいでしょう？我々は様々な手法を検討し、周波数コムという技術（光分野で2005年ノーベル物理学賞受賞、マイクロ波帯域では情報通信の分野で開発されてきたもの）をプラズマ計測に適用することにしました。

周波数コムは、図2に示すように同時にたくさんの周波数成分を発生させることができます。これまで、一つの発振器の周波数を時間的に変化さ

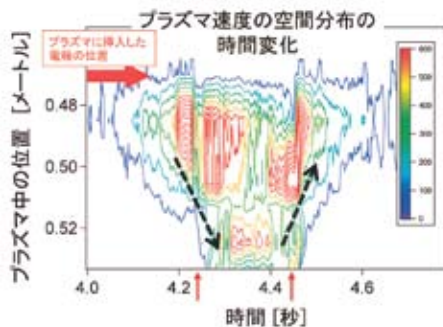


図3 プラズマ速度の空間分布が急に変化することを観測した例。左の赤矢印の時間(4.22秒)にプラズマの閉じ込め状態が変化します。すると速度の速い領域(赤色で表示)がプラズマの外側へ向かって黒矢印で示すように移っていくことがわかります。また逆に電位を変化させていくと、右側の矢印の時間に遷移して元の状態へと戻ります。このように、周波数コムを用いて同時にたくさんの周波数を入射することで、空間分布の速い時間変化を知ることができました。

せて異なる位置での分布を調査していたのに比べ、一度に広い領域の情報を得ることができるようになりました。現在、様々なLHD実験にこの計測器を適用しています。その成果の例として、図3に示しますのはプラズマの周辺部に特殊な電極を挿入してプラズマの電位を変化させた時のプラズマの回転速度分布の時間変化です。ゆっくりと電位を変化させていくと突然プラズマの閉じ込めが変化することがこれまで知られていましたが、この計測によって、速度分布構造も急激に変化していることが明らかになりました。急激な変化はまず挿入している電極のすぐ近くで発生し、その後、周辺部へと伝搬していきます。その後、逆方向に電位を変化させていくとまた元の状態へと遷移して戻ることなど、新しい物理情報が得られました。電位の構造変化が電場の変化を引き起こし、これによって発生した回転力が原因と考えています。

高いプラズマ温度を達成することを目指した電子サイクロトロン共鳴波加熱(ECRH)によって電子を追加加熱する実験でも興味深い結果が得られています(図4)。この例では、揺らぎの構造がECRHを用いた追加加熱により細かな構造へと変化することがわかりました。これは、追加加熱によって、それまで存在していた大きな乱流構造が細分化することで、プラズマの閉じ込めが改善しているのではないかと期待される結果となっており、プラズマの高温化への指針を立てるのに役立ちます。

このように本計測器が核融合プラズマ研究におけるメジャープレイヤーとして活躍できるよう開発を進め、詳細な物理研究の理解に貢献するよう研究しています。

(高密度プラズマ物理研究系 准教授)

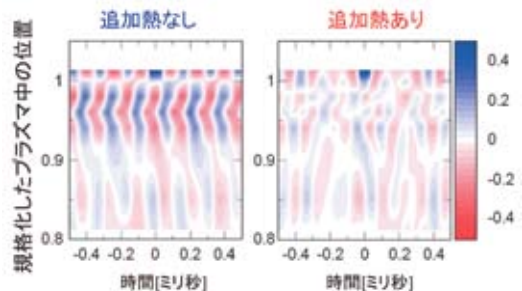


図4 追加加熱によって乱流の構造が細分化することを観測した例。揺らぎの大きさが空間でどのように分布しているかを観測し、これらの間の相関を調べることで乱流構造の変化を図示化しています。