

プラズマ計測に向けた X バンドドップラー反射計の開発

日大生産工(院) 張谷 隼斗
日大生産工 荒巻 光利

1. まえがき

核融合プラズマにおいて、プラズマの特性を正確に理解し制御することは、性能向上と安定運用に不可欠である。特に、プラズマ中の熱や粒子の輸送を支配する乱流、そして乱流を抑制する重要なメカニズムであるゾーナルフローの挙動を解明することは、核融合プラズマの閉じ込め性能を向上させる上で極めて重要となる。従来の診断手法では測定が困難であったこれらの動的な物理量を、非接触のかつ高空間・高時間分解能で計測できる先進的な診断技術が求められている。ドップラー反射計とは、プラズマに入射したマイクロ波のカットオフ現象および密度揺動による後方散乱現象を利用し、プラズマの回転速度や密度揺動を空間分解よく、測定可能な装置である。本研究では、プラズマ中の周期的構造を模擬した回転回折格子を用い、回折条件によって得られた反射波のドップラーシフトを測定することにより、ドップラー反射計から出力された信号の妥当性を評価し、性能評価を行った。本報告では、この性能評価の実験手法と得られた結果について報告する。

2. ドップラー反射計の原理

ドップラー反射計の基本的な原理の一つとして、カットオフ現象が挙げられる。外部からプラズマに向けてマイクロ波を入射させたとき、プラズマの密度により特定の周波数以下で伝播できず反射する現象である。このときの周波数はカットオフ周波数と呼ばれ、以下の式(1)で表される。

$$2\pi f_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1)$$

ここで、 e ：電子素量、 n_e ：電子密度、 ϵ_0 ：真空での誘電率、 m_e ：電子の質量である。分散関係式 $\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2$ において ω が減少し $\omega = \omega_p$ に達すると臨界密度となり、それより小さい範囲 $\omega < \omega_p$ では実数 k は満たされない。よって、

波はプラズマを伝搬することができずカットオフを引き起こす。ここで、 ω ：マイクロ波の周波数、 c ：光速、 k ：マイクロ波の波数、 ω_p^2 ：プラズマ周波数である。プラズマ中に周期的な構造があるとき、カットオフ面に対して角度 θ で入射すると、回折条件 $k_{\perp} = 2k \sin \theta$ で反射波を測定できる。ここで k_{\perp} ：周期的な構造の波数である。プラズマが速度 $v_{\perp} \approx v_E$ で回転するとき、周期構造はマイクロ波の進行方向に対し、 $v_{\perp} = v_{\perp} \sin \theta$ の速度成分を持つ。ドップラーシフトと回転速度の関係式は、以下の式(2)で表される。

$$\Delta f_D = \frac{1}{2\pi} k_{\perp} \cdot v_{\perp} \quad (2)$$

ここで、 Δf_D ：ドップラーシフト周波数、 v_{\perp} ：密度揺動の伝播速度である。本研究では、回転回折格子を用いたドップラーシフトの測定をし、関係式から導き出される揺動の情報を検証する。

3. ドップラーシフトの検出方法

ドップラー反射計の構成図をFig.1に示す。本研究では、ヘテロダイン検波方式を採用しており、これにはカットオフ周波数が関係している。本研究で想定しているプラズマの密度は $1.0 \times 10^{18} [m^{-3}]$ であり、式(1)から、カットオフ周波数は約10GHzであることが分かる。周波数をIF信号に変換することでRF周波数に比べ低周波なIF周波数での狭帯域フィルタを使

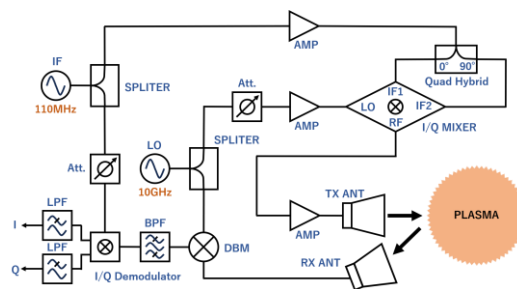


Fig.1 ドップラー反射計の構成図

Development of X-band Doppler reflectometer for plasma diagnostics

Hayato HARIGAI, Mitsutoshi ARAMAKI

用でき、かつ扱いやすい信号として取り出すことができる。ドップラー反射計内部では、IF信号とLO信号の変換が行われている。内部信号を簡易的に次のように示す。ここで、IF信号を S_{IF} 、LO信号を S_{LO} 、RF信号を S_{RF} とする。入射波の信号の場合、IF信号 $S_{IF}(t) = A\cos\omega_{IF}t$ とLO信号 $S_{LO}(t) = B\cos\omega_{LO}t$ から

$$S_{RF}(t) = AB\cos(\omega_{RF})t$$

が求まる。ここで、 $\omega_{RF} = \omega_{LO} - \omega_{IF}$ とする。反射波では、簡易的にドップラーシフトを ω_D とし、以下のように示される。

$$S_{RF}(t) = AB\cos(\omega_{RF'})t$$

ここで、 $\omega_{RF'} = \omega_{LO} - \omega_{IF} - \omega_D$ とする。この信号をDBM（ダブルバランスドミキサ）でLO信号の成分を取り除くことで、

$$S_{IF}(t) = AB\cos(\omega_{IF} - \omega_D)t$$

が表れる。ドップラーシフトを含んだIF信号 $S_{IF}(t)$ をI/Q復調する。I/Q復調とは、受信した高周波信号の振幅と位相の変調情報を、基本波と同相成分のI (In-phase)、基本波に対して直交した成分を持つQ (Quadrature-phase)の2つのベースバンド信号として変換する方法である。ここで、簡単な原理図をFig.2に示す。I/Q復調を行うI/Qデモジュレータの出力は、複素平面上のI/Qベクトルとして表わされる。これらの原理から、ドップラーシフトは、この複素ベクトルが一定の角速度で連続的に回転する現象として現れる。出力された信号には高調波が発生しており、必要に応じてBPFやLPFを挿入することで、目的の信号を取り出すことができる。これによって、参照信号に対して同相であるI成分では、

$$S_I(t) = AB\cos\omega_D t$$

となり、参照波に対し直交するQ成分では、

$$S_Q(t) = AB\sin\omega_D t$$

となる。これにより受信した高周波信号の振幅と位相の変調情報を、IとQの2つのベースバンド信号として変換することができる。

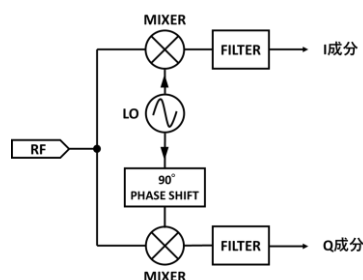


Fig.2 I/Q 復調の簡易的な原理図

IとQ成分を求めたことで位相角 ϕ を以下の式で求めることができる。

$$\phi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{Q(t)}{I(t)}\right)$$

これにより、信号の位相角の変化から符号を区別して導出することができる。磁場閉じ込めプラズマは常に微細な密度揺動を起こしているため、継続的に位相の変化が表れる。揺動が速度 v_{\perp} で回転している場合、散乱波にはドップラーシフト Δf_D が生じ、信号ベクトルは、 Δf_D に比例した角速度で回転すると考えられる。

4. 実験結果

今回行った実験は、送信アンテナを固定し受信アンテナを移動させ10GHzの位相差をオシロスコープで観測した。Fig.3に簡易的な実験の原理を示す。実験方法として、固定された送信アンテナの位置を基準位置とし、受信アンテナをずらしていくものである。この実験では、ある地点からの10GHzの位相差を確認した。実験結果をFig.4に示す。基準位置と基準位置からそれぞれ9,15,30mm離れたときの結果をFig.4に示す。Fig.4に示した各グラフの左側の波形は、LO信号（黄色）、I/Qデモジュレータからの出力されたLO信号と同相のI成分（水色）、I/Qデモジュレータからの出力されたLO信号と $\frac{\pi}{2}$ ずれた信号のQ成分（紫色）である。右図に示されている点はオシロスコープのX-Yプロットで表したリサージュ波形である。この測定方法では、リサージュで表した点が1周することで、一波長あたりの位相差を示している。10GHzのLSB (9.99GHz)を入射波としており、波長約30mmであることから一波長分の位相変化をI/Q信号で表した。また、更に距離を物理的に離れた場合、信号の減衰が見られ、I/Q信号が徐々に中心部に向かう様子を確認した。距離が離れるにつれ回転しているのが、複素ベクトル表示をした位相差である。

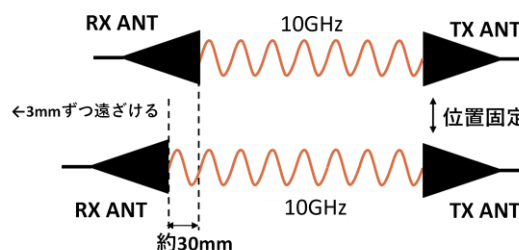


Fig.3 簡易的な原理図

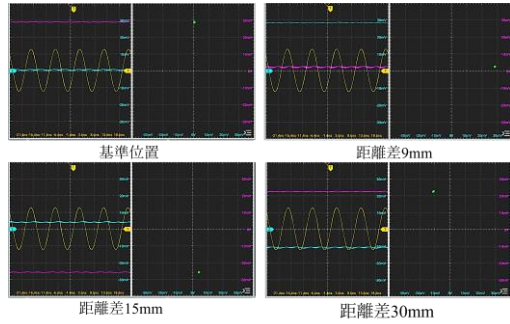


Fig.4 複素ベクトル表示の位相差

距離が離れるにつれ回転しているのが、複素ベクトル表示をした位相差である。これらを実際にプラズマに入射し、反射波の位相変化を測定することで、ある周波数に対応するカットオフが生じる密度の位置情報が得ることができる。

5. まとめ

本研究では、10GHzの位相差を、受信アンテナの位置を変化させること得られるI/Q信号の変化で観測した。

参考文献

- 1) 徳沢 季彦, 江尻 晶 3. 先進計測技術・最近の進展 3.2ドップラー反射計J. Plasma Fusion Res. Vol.87, No.6 (2011)345-349
- 2) 間瀬 淳, 川端 一男 2. 電磁波を用いたプラズマ計測の基礎J. Plasma Fusion Res. Vol.87, No.5 (2011)315-325
- 3) 江尻 晶 プラズマ計測のためのマイクロ波反射計 J. Plasma Fusion Res. Vol.79, No.8 (2003)742-749