

研究課題：JT-60SA 用マイクロ波ドップラー反射計のビームステアリング機能付アンテナ適用に向けた研究

研究代表者：徳沢季彦（核融合科学研究所）

量研機構担当者：今澤良太

研究協力者：江尻晶（東京大学）、稲垣滋（京都大学）、出射浩（九州大学）、田中謙治（核融合科学研究所）、吉田麻衣子、大山直幸（量研機構）

研究期間：令和3年度-4年度

1. 研究目的・意義

本研究では、JT-60SA 装置プラズマの乱流輸送物理研究において、重要なパラメータとなる周辺部 SOL からコア領域にかけての乱流強度およびポロイダル速度（径電場）を計測するために、マイクロ波ドップラー反射計を適用することを目指し、その開発を行っている。ドップラー反射計による乱流計測では、プラズマに入射するマイクロ波の周波数や入射方向を制御することで、観測位置だけでなく観測する乱流波数を選択することができる。一方、真空容器内の制限された環境下でのアンテナ駆動機構の運転には、そのメンテナンス性も含め多くの検討課題がある。そこで、本研究では、駆動機構無しでマイクロ波ビームの方向を変化させる手法の内、特に、研究代表者らが開発した空間同時多点マイクロ波計測システムとの整合の良いフェーズドアレイアンテナについて調査した。

2. 研究成果

・放射角度についての検討結果

ビームステアリングに必要とする角度を、JT-60SA のシナリオ#2 (Full Ip Inductive SN 41MW)プラズマを対象として検討を行った。図 1 に 3 次元光線追跡コード TRAVIS を用いて計算した JT-60SA の P18 断面でのビーム軌道を示す。下部の 2 箇所のポートからのアクセスを検討し、それぞれの位置で水平から仰角 0~30 度を 5 度ずつ変化させた場合の軌道を描いている。マイクロ波は正常波モードで入射し、青線で示した楕円が電子プラズマ周波数に対応するカットオフ面となる。プラズマ表面斜めに入射したマイクロ波は図のように屈折の影響を受けながらカットオフ面近傍でブラッグ条件を満たす乱流成分によって後方散乱波を生じ、アンテナへと戻り受信される。上側のポートを利用した場合、図 2 のように $\rho = 0.4 \sim 1$ かつ波数 $k_{\perp} = 3 \sim 30 \text{ cm}^{-1}$ の範囲の乱流を観測できると期待できる。また仰角が 25 度以上になると、反射の影響が大きくなり後方散乱波の観測が難しくなることも予想される。したがって、0 度から 20 度程度まで放射角度を変えられれば良いという事が分かった。

・フェーズドアレイアンテナの開発

駆動機構の無いビームステアリングが可能なフェーズドアレイアンテナは真空容器内で利用することを検討する上で魅力的なコンポーネントであるが、高熱負荷環境かつ耐放射線特性を持たせる必要があることから、通信分野で用いられているような半導体素子では無く、金属だけで構成できる漏れ波アレイ (Leaked Wave Array: LWA) アンテナ構造の採用を試みた。複雑な 3 次元構造の造形を実現するため、金属粉体をレーザーで溶融する Selective Laser Melting (SLM)方式の金属 3D プリンタを用いて積層造形を行った。アルミ粉末を用いて造形した Q-band の LWA アンテナの例を図 3 に、このアンテナ

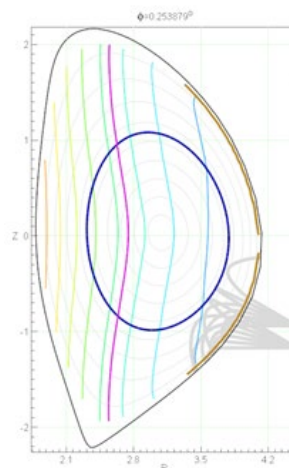


図 1：早期適用可能性のある 2 つのポートから角度を変化させてマイクロ波(70GHz)を正常波で入射した場合の光線軌道の例。青い楕円がカットオフ面を表す。

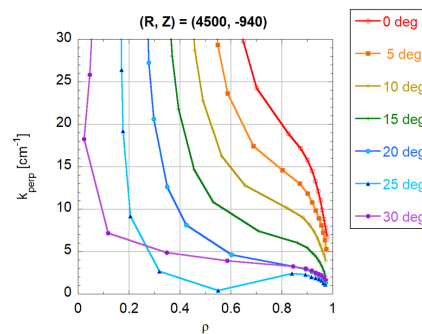


図 2：30-110GHz の波を入射した場合に観測可能な乱流波数と観測位置の関係性の例。入射角度を変化することで観測位置や波数を制御できる。

の放射特性を図4に示す。数種のアンテナの表面処理方法を試み、化学研磨処理を施した例で最も良い特性が得られた。LWA アンテナの設計予想通り、周波数を変化させることによりプラズマ実験で必要とする放射角度に十分に制御できることを確認できた。

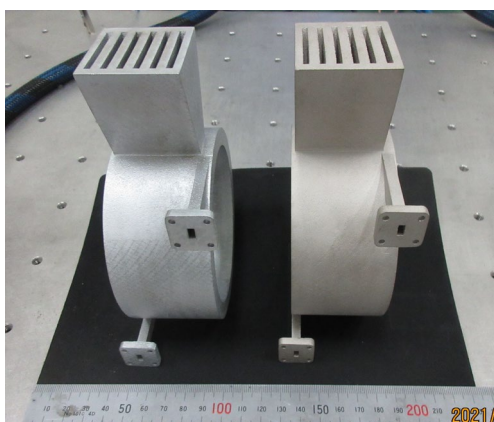


図3: 金属3Dプリンタで造形したQ-band LWA アンテナ。(左)化学研磨および(右)無電解Niメッキによる表面処理を施した。

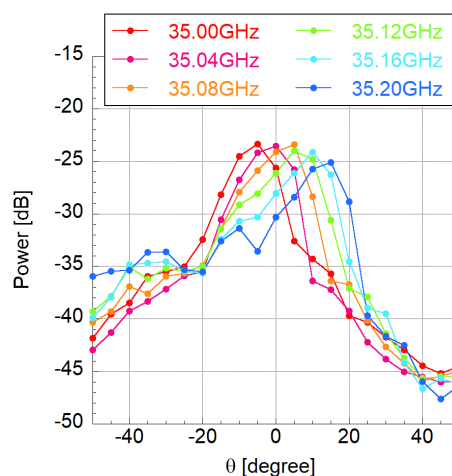


図4: LWA アンテナからの放射分布の周波数依存性。この周波数範囲では、約20度の範囲で異なる方向にマイクロ波を放射できている。

実際にこのLWA アンテナでプラズマ計測が可能であることを九州大学の直線型プラズマ実験装置PANTAを用いて確かめた。PANTAプラズマの密度に合わせたKu-bandのLWAアンテナを銅素材で造形し、図5のように設置して約50mWのマイクロ波を入射した後方散乱波のドップラーシフト周波数を観測した(図6)。発振周波数を変え、プラズマへの入射角度 α が変化することにより、観測位置におけるマイクロ波の波数 $k_{\perp} = -2 \cdot k_0 \sin(\alpha)$ が変化し、結果としてドップラーシフト周波数 $2\pi f_D = v \cdot k \approx v_{\perp} k_{\perp}$ が変化すると予想され、この傾向を明瞭に示す観測結果が得られた。またこの値は静電プローブで得られた観測結果と矛盾の無い値であった。



図5: フェーズドアレイアンテナをPANTA装置に設置

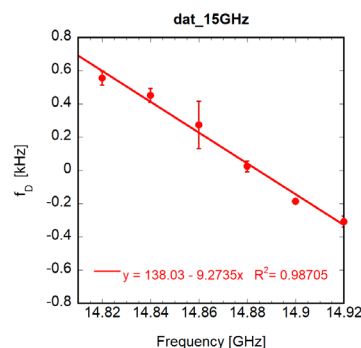


図6: 15GHz帯のドップラーシフト周波数(5mTorr実験時)

3. まとめと今後の課題・予定

マイクロ波ドップラー反射計の機能を高めるため、駆動機構を必要としないビームステアリング機能のあるアンテナの開発試験を行った。金属3Dプリンタを用いてLWAアンテナを設計製作し、周波数制御によりマイクロ波を任意の方向へ放射できることを確認した。今後、真空容器内での利用に適したステンレス素材でのアンテナ製造やさらに指向性の高い高性能のアンテナ設計なども行うことを計画している。

4. 成果リスト:

- (1). T. Tokuzawa, T. Nasu, S. Inagaki, C. Moon, T. Ido, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, M. Yoshida, N. Oyama, K. Tanaka, and K. Ida
 “3D Metal Powder Additive Manufacturing Phased Array Antenna for Multichannel Doppler Reflectometer”
 Review of Scientific Instruments, 93, 113535 (2022). <https://doi.org/10.1063/5.0101723>
- (2). 徳沢季彦, “シンポジウム「高周波技術と核融合」マイクロ波計測”, プラズマ・核融合学会 2021 年年会、S1-6 (口頭発表).

- (3). T. Tokuzawa, T. Nasu, S. Inagaki, C. Moon, T. Ido, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, M. Yoshida, K. Tanaka, and K. Ida, “3D Metal Powder Additive Manufacturing Phased Array Antenna for Multichannel Doppler Reflectometer”, High-Temperature Plasma Diagnostics 2022 @ May 15-19, 2022. hybrid format hosted by The University of Rochester, USA, PE-33
- (4). T. Tokuzawa, T. Nasu, S. Inagaki, C. Moon, T. Ido, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, M. Yoshida, N. Oyama, K. Tanaka, and K. Ida, “Characteristics of 3D metal powder additive manufacturing waveguides and antenna for microwave Doppler reflectometry and trial experiments at PANTA”, 15th International Reflectometry Workshop (IRW15) @ 7th – 10th June 2022 @ ITER Organization HQ, Route de Vinon sur Verdon, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance, France (口頭発表)