

マルチアレイアンテナを用いたマイクロ波干渉計測の計測領域推定

九大・総理工 手島洸樹, 九大・総理工 山本直嗣, 中部大 桑原大介

Abstract

ホールスラストのプラズマ揺動計測において周波数特性のみならず波数特性を計測するには多点での計測が必要となる。そのためマイクロ波干渉計測法を用いたホールスラスト内部のプラズマ計測では、マルチアンテナシステムの構築が必要となる。スラストの周方向及び軸方向に関して3×3の計測点を有するマルチアレイアンテナの観測領域を電磁場解析により調べた。

1 導入

マイクロ波を用いた非接触計測では、送信アンテナから放射されるマイクロ波がどのような伝搬経路をたどり、受信されるかが計測される空間領域の精度を決定する。マイクロ波干渉計測では、電子密度は半径方向に伝搬する1次元波の線積分値から算出される位相差により求めることができる。しかしながら、実際には、3次元波の重ね合わせとして、マイクロ波を検出することとなるので、振幅の大きいマイクロ波が伝搬したプラズマ領域は計測値に大きく反映される一方で、振幅の小さい波は計測値に反映されにくい。

Figure1のようにアンテナをスラストのチャンネル壁内側と外側に配置することにより、チャンネル内部の電子密度を計測する。理想的にはマイクロ波が半径方向に完全に平行に伝搬し、これを満たす平面波のみ受信アンテナで検出することが望まれる。受信アンテナの視線上の領域、つまり受信アンテナの開口サイズ程度の空間分解能をもつことが理想的である。しかしながら、アノードやヨーク等による金属壁の反射や、誘電体により構成されるチャンネル壁による屈折により、送信アンテナから受信アンテナまで直進的に進行するマイクロ波以外の波も受信アンテナで検出される。すなわち計測したい空間領域外のプラズマも計測値に反映されることとなり、空間分解能を悪化させる要因となる。さらに、アンテナから放射されるマイクロ波は完全な平面波ではないため、アンテナの中心部から離れるにつれて、スラスト半径方向から外れた方向にマイクロ波が伝搬する。

アンテナの放射パターンを理解する意味は二つある。一つ目は上で述べたように、計測される空間領域が分かるということである。それにより、計測可能なプラズマ揺動の空間スケールを類推することができる点である。二つ目は、空間分解能のよいアンテナの設計や配置、そして構成を提案できることである。これにより、今まで観測が困難であった波数の大きい揺動や軸方向揺動の同定に繋がる。

2 アンテナの受信領域

受信アンテナで検出する電磁波は、無数の伝搬経路をたどった電磁波の重ね合わせで表現される。すなわち、受信

アンテナで検出する位相を含んだ複素振幅 f は以下の式のように展開できる。

$$f e^{i\omega t} = \sum_{\text{path}} f_i e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$= \left(\sum_{\text{regionD}} f_i + \sum_{\text{otherwise}} f_i \right) e^{i\omega t} \quad (2)$$

f_i は i 番目の経路をたどる電磁波の複素振幅である。また、2つ目の式は領域 D とそれ以外の領域を通過する電磁波を分離したことを表している。もし領域 D を通過する電磁波の位相が δ だけずれる場合、受信アンテナで検出される複素振幅 f' は次式で表現される。

$$f' e^{i\omega t} = \left(e^{i\delta} \sum_{\text{regionD}} f_i + \sum_{\text{otherwise}} f_i \right) e^{i\omega t} \quad (3)$$

ただし、領域 D を通過する電磁波とその他の領域を通過する電磁波の位相はほぼ同じと仮定する。

$$\arg \left(\sum_{\text{regionD}} f_i \right) \simeq \arg \left(\sum_{\text{otherwise}} f_i \right) \quad (4)$$

よって、受信アンテナが検出する電磁波 f' は式1の f に対して以下の式だけ位相がずれる。

$$\theta = \arg(e^{i\delta} \beta + 1) \quad (5)$$

β は $\sum_{\text{otherwise}} f_i$ に対する $\sum_{\text{regionD}} f_i$ の絶対値の比を表している。アンテナで受信する電磁波のうち領域 D を通過する電磁波の割合 η は

$$\eta = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\sin \theta}{\sin(\delta - \theta)} \quad (7)$$

δ 及び θ が非常に小さいとき、 $\sin \theta \simeq \theta$ 、 $\sin(\delta - \theta) \simeq \delta - \theta$ なので、 η は以下の式として表せる。

$$\eta = \frac{\theta}{\delta} \quad (8)$$

よって、位相変化量は領域 D を通過する電磁波の振幅に比例する。

3 アンテナの放射パターン

アンテナの放射パターンを把握する方法として、電磁場シミュレーションがある。これは、空間座標に依存する誘電率、伝導率等の物性パラメータを定めたうえで、電磁波がどのように、伝搬、反射、屈折を行うのかを知ることができる。

実験で行うような、ホールスラスタとアンテナや導波管の位置関係を仮想的に再現し、導波管内部にある電流源により電磁波を発生させることで、電磁波がスラスタ内部でどのように伝搬し、受信されるのかを把握することができる。

誘電体を通過する電磁波は波長が短くなるので、上に述べたような領域 D を通過する電磁波の位相差が δ だけずれるという状況は、領域 D に誘電体を挿入する状態を示している。よって調べたい領域にどれくらいの強度の電磁波が通過するかどうかは誘電体をその領域に挿入し、誘電体を挿入しない状態に対してどれくらい位相が変化するのかを調べれば良い。

Advanced Science Laboratory,inc. により開発された 3次元有限要素法解析 Amaze シリーズ「Aether」によりアンテナの放射パターンを調べた。マイクロ波は 80GHz の周波数でシミュレーションを行う。まず実際に実験で用いるスラスタとスラスタを所定の位置に配置し、メッシュを行う。メッシュのサイズは 0.3mm でこれは 80GHz のマイクロ波の波長 3.75mm のおよそ 1/10 で設定してある。その後、導波管内部にある電流源を時間変化させることで、導波管内部で電磁波を発生させる。なお、スラスタのチャンネル壁は窒化ホウ素で構成されるため、比誘電率を 4.2、それ以外のアノードやヨークを金属として物性パラメータを設定した。また、挿入するテフロンの比誘電率は 2.1 とした。誘電体中の電磁波の波長は短くなるので、チャンネル壁上ではメッシュサイズをさらに 1/4、テフロン上では 1/2 に設定している。

4 電磁場シミュレーション

2章では、アンテナで受信する電磁波のうち、ある領域を通過する電磁波がどれくらいの大きさの割合を占めているかどうかは、その領域に仮想的にテフロンを挿入して、位相変化量を求めることで導出できることを示した。アンテナで受信される電磁波のうち各領域を通過する電磁波の強度を求めることにより、アンテナの空間分解能を求めることができる。

Figure1 では、ホールスラスタと受信用マルチアレイアンテナ、送信用ホーンアンテナの位置関係を示している。本計測体系では、1つの送信アンテナから放射されるマイクロ波を 9つの受信アンテナで検出する。

受信アンテナの視線上にテフロンを配置し、どの程度の空間分解能を持つのかを調べる。

なおこの位相変化量は、受信アンテナ側にある導波路上のある 1 点の電磁場の時間変化をテフロンありの場合とテフロンなしの場合、すなわち参照波の場合においてそれぞれ記録し、その時系列データの位相差から求める。この計測点は導波路内部で生じる TE₁₀ モードのピーク上に設定している。

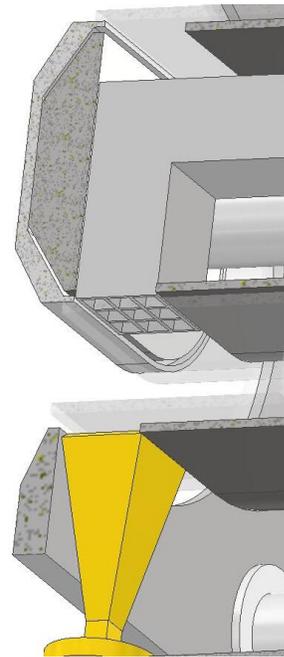


Figure 1: 受信用マルチアレイアンテナと送信用ホーンアンテナの位置関係。便宜上、内側のチャンネル壁は透明としている。

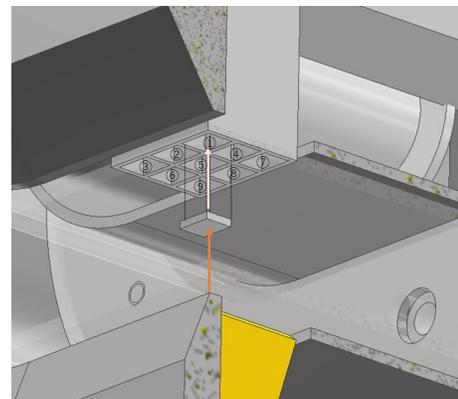


Figure 2: 各受信アンテナ上の数字は CH 番号を示している。この図では、CH1 の受信アンテナ視線上においてテフロンを挿入していることを表している。

5 各計測点における位相変化割合

図2のように受信アンテナの視線上にテフロンを配置する。テフロンは受信アンテナの開口径法5mm×4mmと同じ幅を持ち、厚みは1mmである。図2の例では、CH1の受信アンテナの視線上でかつスラストのチャンネルの半径方向真ん中にテフロンを配置してある。他の受信アンテナの視線上に関して同様の操作を行い、計9つの領域それぞれにおいてテフロンを挿入する。各受信アンテナで受信される電磁波において、9つの領域を通過した電磁波がそれぞれどの程度含まれるかどうかを式(8)のように、絶対位相変化割合 η で評価する。Figure 3は、

これを示している。Table1は、各受信アンテナの中心座標位置(軸方向位置,周方向位置)[mm]を示す。例えばFigure 3(a)すなわちCH1で受信される電磁波においてCH1の視線上(-2 mm, 5.75 mm)の領域を伝搬する電磁波が最も大きい。CH1に隣接するCH2の視線上(-2 mm, 0 mm),CH4の視線上(-6.75mm,5.75mm),CH5の視線上(-6.75mm,0mm)の領域を通過する電磁波もある程度検出する。このように、CH1で検出される電磁波のうち、大部分はCH1の受信アンテナの視線上を通過する一方で、他の受信アンテナの視線上、すなわち目的とする観測領域外を通過する電磁波も混在することとなる。

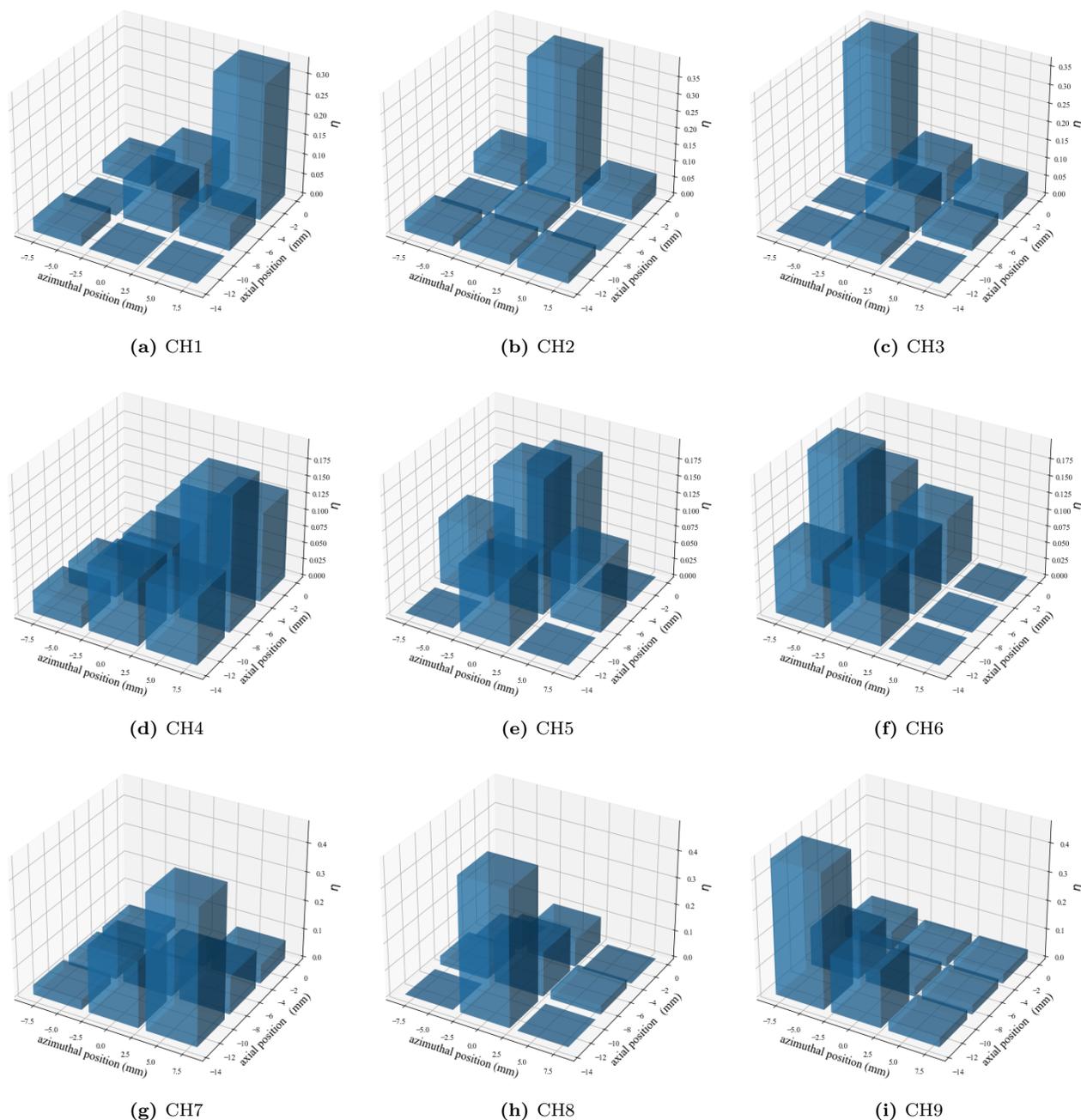


Figure 3: 各計測 CH が検出する電磁場領域のプロット

| CH1 | CH2 | CH3 | CH4 | CH5 | CH6 | CH7 | CH8 | CH9 |
|------------|---------|-------------|---------------|------------|----------------|---------------|------------|----------------|
| (-2, 5.75) | (-2, 0) | (-2, -5.75) | (-6.75, 5.75) | (-6.75, 0) | (-6.75, -5.75) | (-11.5, 5.75) | (-11.5, 0) | (-11.5, -5.75) |

Table 1: 各計測 CH の中心座標位置 (軸方向位置, 周方向位置)[mm]

特に、軸方向真ん中の受信アンテナでその傾向は強まる。(d),(e),(f)では、受信される電磁波のうち、それぞれの受信アンテナの視線上の電磁波と隣接する受信アンテナの視線上を通過する電磁波の振幅にはあまり差がないことが分かる。すなわち、軸方向真ん中に位置する受信アンテナは観測領域が広い。一方チャンネル上流と下流に位置する受信アンテナでは、観測領域の大部分が受信アンテナの視線上に位置している。

これは、軸方向の揺動計測は周方向の揺動計測よりも困難であることを示している。周方向に隣接する受信アンテナの観測領域の重なりは少ない。そのため周方向に隣接する2つの受信アンテナで計測される電子密度揺動の位相差から周方向揺動の波数同定が可能となるので、高波数の揺動も検出することができる。一方で、チャンネル中流とチャンネル上流もしくはチャンネル下流において観測領域に重なりがあるため、軸方向に隣接する2つの受

信アンテナで計測される電子密度揺動の位相差は明確に求められない可能性がある。その場合、チャンネル上流とチャンネル下流に位置する受信アンテナから計測される電子密度揺動から位相差を求めることとなり、周方向で計測できるほどの高波数の揺動は同定できない。

6 結論

ホールスラストチャンネル内部において、マイクロ波を用いた非接触計測の空間分解能についての議論を行った。電磁場解析を用いて、マルチアレイアンテナの観測領域を調べた。各受信アンテナの視線上にテフロンを挿入し、位相変化量をもとめた。これにより受信する電磁波のうち各領域を通過する電磁波がどの程度占めているのかを示した。これにより、本計測方法による周方向および軸方向に伝搬する揺動の検出可能性を示した。