

プラズマ中の電子温度揺動計測のためのコリニア型金属レンズ付きアンテナの開発研究

竹原 啓太 (指導教員：渡邊 清政)

1. 緒言

将来の核融合炉において核融合反応を持続的に起こすためには、高温高密度プラズマを安定的に閉じ込める必要があるが、様々な不安定性の発生によりプラズマの性能が劣化することが知られている。不安定性の性質やプラズマ閉じ込めへの影響を調べるためには、プラズマ内部の電子温度分布を測定し、不安定性によるプラズマの内部構造の変化を調べる必要がある。現在、大型ヘリカル装置(LHD)では、温度分布の計測装置としてミリ波電子サイクロトロン放射(ECE)計測器が一視線ある[1]。3次元磁場配位構造を持つLHDにおいては、複数の場所で電子温度を測定したいが、計測器の設置スペースには限りがある。そこで、本研究においては光学系をコンパクトにでき、真空容器内空間を有効に利用可能なコリニア型の金属レンズアンテナの開発を、LHDの高B実験および通常磁場実験に適した周波数帯域で行った。計測装置の空間分解能を向上させるためにプラズマ測定位置における電磁波のビーム半径を既設のECE計測器よりも絞ることを設計指針として、特性試験用の金属レンズを設計・製作し、その集光特性を検証した。

2. 金属レンズの設計・製作

金属レンズとは、金属板の片側を平面、もう片側を凹面にし、格子状に貫通穴を空けた構造にすることで透過する電磁波に対する屈折率を制御したものである。図1に金属レンズの概念図と製作した例の写真を示す。

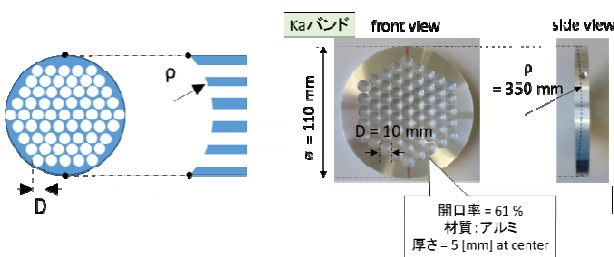


図1 金属レンズの概念図と製作した金属レンズの例
(D:貫通穴径 ρ :凹面曲率半径)

金属レンズは凹面の曲率半径 ρ と貫通穴の径 D でその特性が決まる。レンズの屈折率 n は次式のように、貫通穴の径 D と入射する電磁波の波長 λ の関数であり、焦点距離 f は屈折率 n と曲率半径 ρ の関数である[2,3]。

$$n = \left(1 - \left(\frac{\lambda}{1.706D}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$f = \frac{\rho}{(1-n)} \quad (2)$$

まず始めに、プラズマ測定位置をアンテナから2000 mmとし、その位置でのビーム半径 ω_{mes} を絞れるような焦点距離 f を持つ金属レンズの構造デザインを、ガウスビーム伝搬理論[4,5,6]を用いて設計した。ガウスビーム伝搬理論においては、電磁波がレンズを透過した後の任意の位置のビーム半径 ω_{mes} を焦点距離 f 、波長 λ 、測定位置 L の関数で表せる。図2にWバンド($\lambda = 2.5$ mm(120 GHz))における焦点距離を変えた場合の ω_{mes} の変化について示す。図よりWバンド帯において ω_{mes} の値は $f = 2000$ 前後の値で小さくなることから、レンズの焦点距離を2000 mmと設定した。

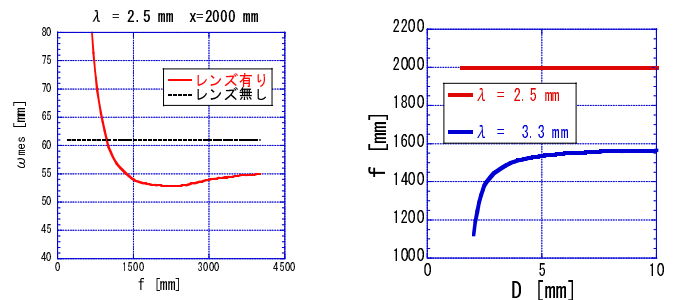


図2 Wバンド帯における(左)ビーム半径 ω_{mes} の焦点距離 f 依存性($\lambda = 2.5$ mm(120 GHz))と(右)焦点距離 f の貫通穴径 D 依存性

次に、貫通穴径 D 、曲率半径 ρ を決定する。式(1,2)より焦点距離 f および波長 λ を固定してあれば、貫通穴径 D を決定すると曲率半径 ρ は一意に定まるが、この貫通穴径 D と曲率半径 ρ の関係をを用いると焦点距離 f は波長 λ によって異なる値をもつことになる。図2(右)に、 $\lambda = 2.5$ mm, 3.3 mm(90 GHz)の f と D の関係を示す。ここで $\lambda = 2.5$ mmの時に $f = 2000$ mmとなるように D 毎に曲率半径 ρ の値を与えている。図より、Wバンドで最も波長が長い $\lambda = 3.3$ mmにおいても、 $D \geq 3$ mmの領域において焦点距離 f の差が小さく一定になっていくことがわかる。しかし、 D が波長に対して大きい場合、貫通穴に基本モードとは異なるモードが発生する可能性があるため、本設計では、Wバンドのレンズの設計値として、 $D = 2.5$ mm、 $\rho = 400$ mmと設定した。Kaバンドについても同様に設計し、 $D = 10$ mm、 $\rho = 350$ mmと設定した。Kaバンドにおいては、実験結果の比較用に曲率の異なる($\rho = 200, 500$ mm)レンズも製作した。

3. ビーム伝搬特性試験の結果と考察

製作した金属レンズの集光特性および損失特性を評価するために、ビーム伝搬特性試験を行った。特性試験用ホーンアンテナの先端に金属レンズを配置して W バンド(90 GHz) および Ka バンド(28, 34, 40 GHz)の電磁波を放射し、受信アンテナを伝搬方向に対して垂直な方向に等速で動かして放射パワープロファイルを取得した。図 3 に実験装置の配置概念図を示す。

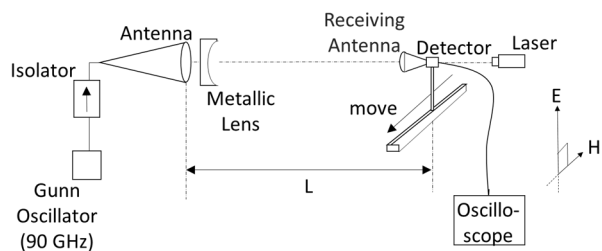


図 3 ビーム伝搬特性試験の概念図

取得した放射パワープロファイルをガウス関数でフィッティングし、電磁波のビーム半径とパワーピーク値を求めた。図 4(左)に W バンドにおけるビーム半径の距離依存特性の例(黒丸：レンズ無し 赤丸：レンズ有り)を示す。

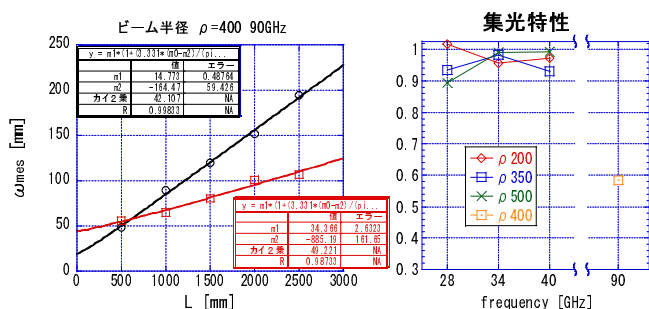


図 4 (左) W バンドにおけるビーム半径の距離依存特性。
(右) 金属レンズの集光特性

放射ビームがガウスビームであるか検証するために、ビーム半径 ω_{mes} の距離依存特性のデータにガウスビーム伝搬理論にもとづいたフィッティング処理を行った(図中の実線)。その結果、電磁波のビーム半径がガウスビーム伝搬理論が予測する関数形に従い広がっていくこと、レンズを配置することで広い範囲でビームを絞れていることを確認した。ここで、絞られたビーム半径の大きさが、図 2 の設計時の値とは異なっているのは、試験用ホーンアンテナから放射される電磁波のビーム半径が設計で用いた LHD 用のものとは異なっていたためであり、この値を補正してガウスビーム伝搬理論を適用すると、実験結果をほぼ再現できる。Ka バンドにおいても同様の解析を行い、ビーム半径とパワーピーク値の距離依存特性から、プラズマ計測位置における集光比と減衰率を評価した。図 4(右)に W バンド、Ka バンドに対する金属レン

ズの集光特性を示す。図より、W バンド、Ka バンドの双方においてレンズによりビームを絞ることができ、特に W バンドではその効果が大きいことが確認できた。また、損失特性についてもピークパワーの減衰率で評価し、Ka バンドでは最大で 1.7 dB であり、開口率から推定した損失よりも小さいことを確認した。

Ka バンドの場合、集光比の周波数依存性が小さいことから、より厳密な数値計算モデルに基づく 3 次元電磁界シミュレータ(CST MW STUDIO)による解析を行った。3 次元電磁界シミュレータでは、ガウスビーム伝搬理論で扱えないレンズの開口率や電磁波の回折などの現象を、アンテナの構造デザインを組み込むことにより取り扱うことができる。初期的な結果として、集光比の値は大きな違いはないこと、周波数依存性は少し異なっていることなどがわかった。

4. 結言

プラズマ内部の電子温度揺動分布計測用の ECE 計測装置に適用する金属レンズを Ka バンドと W バンドにおいて設計・製作し、その特性を調べた。金属レンズの設計はガウスビーム伝搬理論を用いて行った。計測位置をアンテナ先端から 2000 mm 付近と設定した場合、Ka バンドにおいては金属レンズの貫通穴径 $D = 10$ mm、曲率半径 $\rho = 350$ mm、W バンドにおいては $D = 2.5$ mm、 $\rho = 400$ mm とすることが適切であることがわかった。製作した金属レンズを用いてビーム伝搬特性試験を行った結果、Ka バンド、W バンドの双方においてレンズによりビームを絞ることができ、双方ともレンズによる損失は十分に小さいことが確認でき、金属レンズは Ka バンド、W バンドにおいてレンズとして有効に機能することが検証できた。

参考文献

- [1] H. TSUCHIYA, et al., Design and Installation of a New Electron Cyclotron Emission Diagnostic Antenna in LHD, Plasma Fusion Res, 6, 2402114(2011)
- [2] T. Uckan, Design of a Hyperbolic Microwave Metallic Lens, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-7060(1979)
- [3] 川村光男, マイクロ波基礎工学, 昭晃堂
- [4] Newport, Technical Notes ガウシアンビーム光学
- [5] 丸山修治, ガウスビームとその変換, 光学 第 13 巻第 4 号
- [6] Paul F. Goldsmith, Quasi-Optical Techniques at Millimeter and Submillimeter Wavelengths, INFRARED AND MILLIMETER WAVES, Ed, K. J. BUTTON, ACADEMIC PRESS, Vol. 6, Chap. 5

発表実績

1. 日本物理学会第 71 回年会(仙台 2016 年 3 月)
2. プラズマ・核融合学会第 33 回年会(仙台 2016 年 11-12 月)