

[共同研究成果]

X 線 CT 装置を用いた誘電体レンズ付きアンテナの 3D モデル化と FDTD 解析法

春日 貴志¹ 新村 奨¹ 林 優一²¹長野工業高等専門学校²奈良先端科学技術大学院大学

1. はじめに

Society5.0 時代の戦略として、自動車の自動運転化が計画されている。自動運転化のために、障害物検知用のレーダが用いられている[1][2]。障害物検知としては、77GHz のミリ波レーダが用いられているが、前方の自動車の材料評価の測定や、アンテナ周辺での電磁干渉抑制のための吸収材料評価[3～5]の測定のため、ホーンアンテナや誘電体レンズ付きアンテナが用いられている。誘電体レンズ付きホーンアンテナは、ビーム照射を絞ることができ、S/N 比を向上させることができる。しかしながら、光軸上の焦点距離に幅があるため、材料に照射する電波のスポット系や、反射の様子を可視化することが求められている。

長野高専・高速信号伝送評価センターにはフリースペース法による S パラメータの測定装置(EM ラボ FS-330)があり、電波吸収体やシールド材の S パラメータの実測を行ってきた。一般的なフリースペース法による測定では、対向させたアンテナと試料を同一線上に設置して測定する垂直入射における測定が行われる [6][7]。しかしながら、実際の使用環境下を想定した際、様々な到来方向からの電磁界分布を評価するためには斜入射による特性評価が必要である [6][8]。また、斜入射測定における測定面での照射電波のスポット径や照射角度依存性、電波の干渉の様子を明らかにすることは困難である。そのため実測に加えて電磁波を可視化することができるシミュレータによる検討も必要である。

本研究では電波吸収体評価のための電磁界シミュレータを構築し、ノイズ抑制シートの電波吸収特性を求めることを目標としている。フリースペース法で用いられる誘電体レンズ付きホーンアンテナの 3D モデルを作成し、有限差分時間領域 (Finite Difference Time Domain: FDTD) 解析に組み込む手法を提案する。誘電体レンズ付きホーンアンテナを FDTD 解析に組み込むためには、アンテナ形状や誘電体レンズの曲率を正確にモデル化する必要がある。そこで、フリースペース法の誘電体レンズ付きホーンアンテナを CT-Scan (SHIMADZU・inspeXio™ SMX™-225CT FPD HR Plus) で撮影した。CT-Scan の撮影画像であるボクセルデータをメッシュモデルに変換した後、傾きの補正やモデルの簡略化を行い、自作の変換ソフトを用いてラスターデータに変換した。また、自作の変換ソフトを用いて材料ごとに分離した。本手法を用いて電磁界表示を行い、解析手法の有用性を評価した。また、集光位置における回折パターンの比較によって CT 画像を用いた解析モデルの妥当性を考察した。

2. 誘電体レンズ付きホーンアンテナの 3D モデル化と FDTD 解析手法

図 1 に誘電体レンズ付きホーンアンテナを FDTD 解析に組み込む手法に関するフロー図を示す。CT-Scan によりホーンアンテナの断層画像を撮影する。VG Studio MAX では、この断層画像から 3 次元のボクセルデータに変換する。ボクセルデータとは、立方体のデータであり、座標値を持たないデータである。電磁界解析に組み込む場合は、多角形の頂点や稜線、面を有するポリゴンデータ (メッシュデータ) に変換する必要がある。ポリゴンデータの代表的なファイル形式は STL 形式である。

これまでの研究で、3D-CAD で作成した STL 形式を、FDTD 解析で組み込み可能なラスターデータに変換するプログラムを自作してきた。本研究では、CT-Scan で撮影されたデータに対し、この変換手法を用いて解析を行えるか検討する。

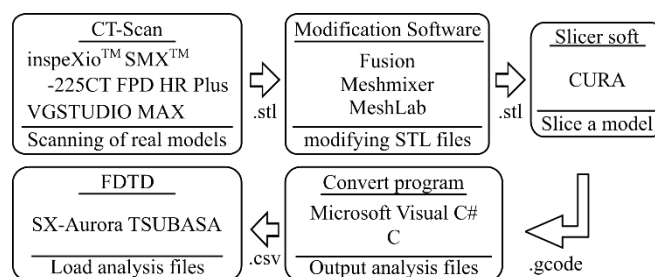


図 1 システムフロー図



図 2 フリースペース法測定装置

2.1. CT-Scan によるアンテナの撮影

図 2 に撮影対象である誘電体レンズ付きホーンアンテナを示す．本研究では，誘電体レンズ付きホーンアンテナを CT-Scan で撮影し，解析モデルを作成する．本研究で用いた CT-Scan の撮影原理を説明する．CT-Scan は X 線発生装置と X 線検出器の間に撮影対象物であるホーンアンテナを置く．X 線発生装置から照射された X 線は，撮影対象物を透過し，X 線検出パネルで受光する．この際，撮影対象物の材料密度により，X 線の透過量が変化する．例えば，空気のように密度の低いものは，X 線が透過しやすく，逆に金属は透過しにくい．この変化量はグレースケールで表され，グレースケールの濃淡により材料の判定が行われる．今回用いた CT-Scan は管電圧が 225 kV であるため，ホーンアンテナのような金属も透過することができる．レンズと金属筐体が一体化しているモデルとなるよう，輝度値を設定して出力した．

3D モデルを作成する原理について説明する．撮影対象物を 360 度回転させて撮影を行う．一定時間毎の画像を保存し，VG Studio MAX により画像を再構成することで 3D モデルを作成できる．

ホーンアンテナの撮影では，CT-Scan の管電圧を 225 kV とし，電流を変化させることで鮮明な画像が得られるようにした．誘電体レンズ付きホーンアンテナと導波管アダプタを個別に撮影した．アンテナ全体を 1 度に測定することが難しいため，高さ方向に 2 分割して撮影し，後で合成した．導波管アダプタについては拡大率を上げるため，同様に高さ方向に分割して測定した．

2.2. CT-Scan データのモデル最適化

FDTD 解析に CT 画像データをインポートするためには，FDTD 解析で構造データを読み込める直方体のラスタデータに変換する必要がある．本節では，この変換手法につなげるための前段階について詳しく検討する．

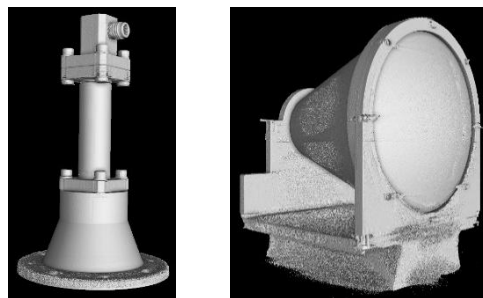
CT-Scan で撮影した断面画像は，VG Studio MAX で 3 次元データのボクセルデータとして構成される．図 3 に本研究で用いた誘電体レンズ付きホーンアンテナのボクセルデータ画像を示す．撮影したボクセルデータを CAD や有限要素法 (FEM) の電磁界解析等で利用するためには，多角形の頂点を有し，頂点同士を近似線で結んだポリゴンデータ (STL 形式) に変換して出力される．図 4 に実際に求めたポリゴンデータの例を示す．ポリゴンデータは，表裏を判別できるように法線ベクトルの情報を有する．しかしながら，データの一部にベクトルの方向が本来の向きと異なる方向に出力しているケースがある．この場合，画像を再構成する際にエラーが発生し，正しくモデル化をすることができない．このため，meshmixer を用いてデータ補正を行った．

次に、ポリゴンデータからラスタデータに変換する過程について説明する．3D プリンタで使われる CURA は、ポリゴンデータを読み込み、2次元の層データであるガーバデータを出力する．しかしながら、CT-Scan で撮影した 3D モデルは、直線や円弧は CAD で描画したモデルに比べて歪んでいる．この場合、ポリゴンデータで近似すると、頂点数が増大するためファイル容量が大きくなる．ここで、ポリゴンデータが大容量の場合には、CURA でガーバデータに変換する際に時間がかかる．実際に、ホーンアンテナのデータ量が 245 MB である．これを CURA で読み込み変換したところ、途中でエラーが発生して実行できなかった．このため、ポリゴンデータの頂点数を調整できる meshLAB を用いて、頂点数を 50,000 として、データ量を 4.75 MB に削減した．

ガーバデータを出力する際に描画する線幅を指定するが、本研究では 3 次元形状が正確に塗りつぶすことができるように、線幅を 0.03 mm とした．その後、ガーバデータからラスタデータを描画する自作ソフトにより、ラスタデータに変換した．

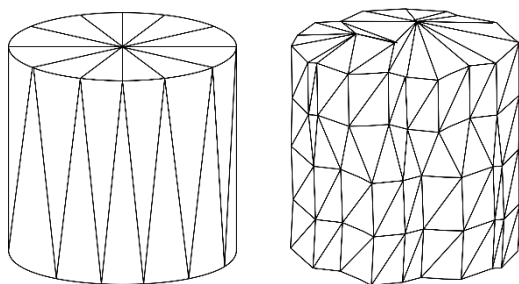
2.3. 誘電体レンズ付きホーンアンテナの材料指定

CURA から出力したラスタデータは、自由空間と金属としてデータが出力される．このため、CT-Scan で作成したモデルは誘電体レンズとホーンアンテナは分離されておらず、一つの 3D 形状になっている．このため、金属部と誘電体レンズ部ごとに材料を指定する必要がある．図 5 に作成したレンズ分離のプログラムイメージを示す．



(a) 導波管コネクタ (b) ホーンアンテナ

図 3 本研究で用いた誘電体レンズ付きホーンアンテナのボクセルデータ画像



(a) 3D-CAD から STL (b) CT-Scan から STL

図 4 各 3D モデルのポリゴンイメージ

ラスタデータのスライス画像を例に変換方法を説明する．金属と誘電体レンズが接触していない場合、画像の中央は誘電体レンズ、周辺のリングが金属である．中央を中心に上方向に走査して、金属データが連続する範囲で誘電体に書き換える．自由空間になると変更を停止する．これを、上下左右の順番に繰り返し、誘電体レンズの書き換えが完了する．誘電体レンズと金属が接触している部分のみ手作業で変換した．

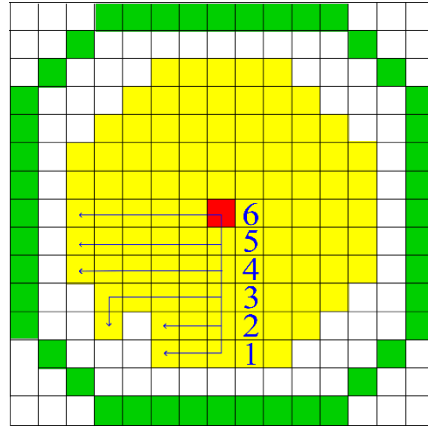


図5 レンズ変換アルゴリズムの走査イメージ

3. 数値解析

3.1. 電磁界分布

本システムで作成した誘電体レンズ付きホーンアンテナのFDTDモデルによりFDTD解析を行う。解析モデルを図6に示す。誘電体レンズの材質として、高密度ポリエチレンを想定し、比誘電率を $\epsilon_r = 2.34$ とした[9]。非球面レンズの厚さの中心点を原点とした。FDTD解析における、解析空間分解能は $\Delta = 0.5 \text{ mm}$ とした。時間ステップ Δt はCourantの安定化条件より $\Delta t = 96.23 \text{ ps}$ とし、時間ステップ数は15,000とした。信号源は導波管と同軸ケーブルの接続部に微小ダイポールとして実装し、18 GHzの正弦波を印加した。解析空間の外側には、20層の吸収境界条件(Perfect Matched Layer: PML)を設けた。SX-Auroraでの解析は大規模になるため、MPIにより高速化する。実際はMPI16で実行し、 x 方向を4分割、 y 方向と z 方向を2分割した。使用メモリは1509GB、計算時間は352秒である。計算時間はベクトル化と並列化、MPIにより短縮できた。

図7に xy 平面の電界分布を示す。信号源より印加された電界は時間変化とともにホーンアンテナ内を x 方向に伝搬し、誘電体レンズを通して集光されていることが確認できる。図8に誘電体レンズの光軸上の電界強度分布を示す。誘電体レンズの最大受信点となる集光位置 $x = x_{peak}$ における振幅値で規格化している。 $x = 169.5 \text{ mm}$ の位置で最大振幅が確認できた。これらのことからFDTD法において適切にモデルが解析できていることが確認できた。

3.2. 集光位置における回折パターン

実装された解析モデルの検証を行うために、FDTDで算出される電界強度と理論値における電界強度の比較を行った。理論値には、円形開口に対するフラウンホーファー回折による回折パターンを表す式(1)の値を用いた[9]。

$$P(y) = \left(\frac{\pi D^2}{2} \right)^2 \left[\frac{J_1(R)}{R} \right]^2, R = \frac{\pi D y}{\lambda x_{peak}} \quad (1)$$

ここで x_{peak} はレンズ中心から最大受信点までの距離、 D は開口直径、 J_1 は第一種ベッセル関数、 λ は管内波長を用いた。図9に誘電体レンズ付きホーンアンテナの集光位置 $x = x_{peak}$ における yz 平面の電界強度 E_z を示す。

y 方向の3dB幅をビーム幅 W_y とする。それぞれFDTD解析により得られた $W_y(\text{FDTD})$ は26.5mm、式(1)により得られた $W_y(E_q, 1)$ は23.3mmであった。

FDTD解析で得られたビーム幅は理論値より3.2mm長く算出された。CT-Scanの誘電体レンズ表面において、空気と樹脂の分離がうまく行えなかったためであると考えられる。

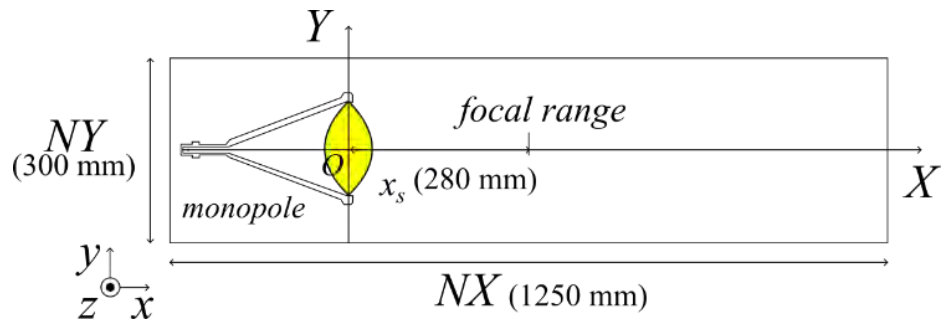


図 6 FDTD 解析範囲

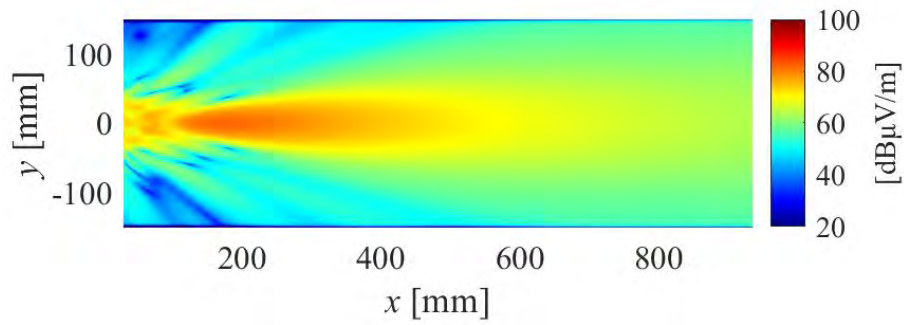
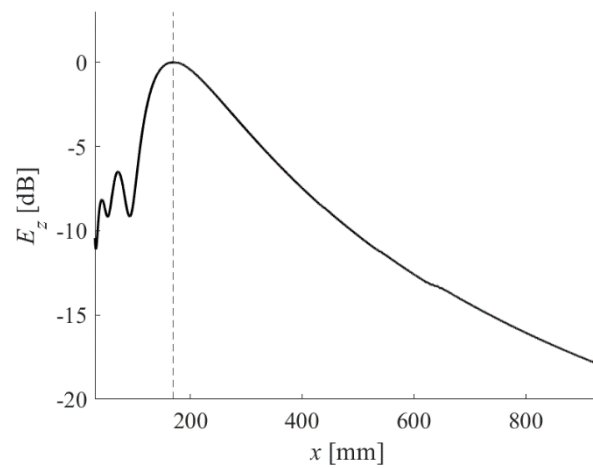
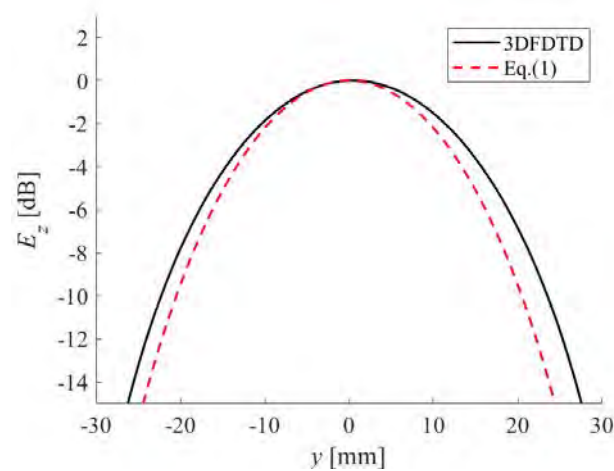
図 7 sin 波を印加した際の xy 平面の電界分布

図 8 sin 波を印加した際の光軸上の電界強度分布

図 9 集光位置 $x = x_{peak}$ における回折パターンの比較

3.3. アンテナ対向モデルにおける FDTD 解析

フリースペース測定時を想定し，送受信アンテナ設置時の FDTD 解析を行う．解析モデルを図 10 に示す．3.1 と同様の条件で解析を行った．解析結果として，図 11 に xy 平面における電界分布を図 12 に光軸上の電界強度分布をそれぞれ示す．

図 11, 12 において，アンテナ間に $\lambda = 8.5 \text{ mm}$ 間隔の干渉縞が観測されたが，この間隔は信号周波数 18 GHz の半波長である．このノイズは受信アンテナによる多重反射であると考えられる．アンテナや試料からの反射は，通常 VNA (Vector Network Analyzer) 内に実装されている，時間領域でのゲーティング処理を行うことで除去可能となる．実測定においては，受信アンテナに最も早く到達した電波のみを使用して計測を行うため影響を及ぼさない [10][11]．

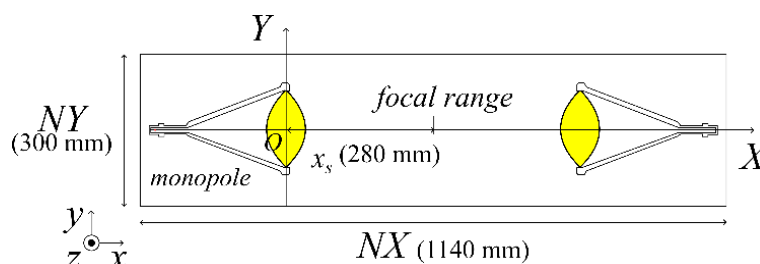


図 10 FDTD 解析範囲

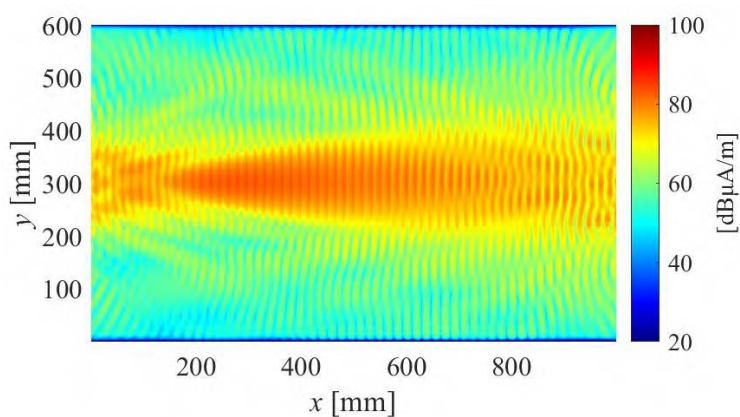


図 11 送受信アンテナ設置時の xy 平面の電界分布

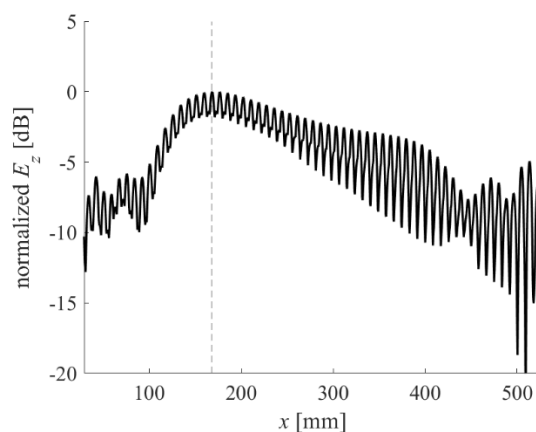


図 12 光軸上の電界分布

まとめ

本研究では、フリースペース法に用いられる誘電体レンズ付きホーンアンテナを FDTD 解析に組み込むために、CT-Scan を用いてアンテナの 3D モデルを作成し、FDTD 解析に組み込んだ。電磁界表示により適切にモデルを解析できていることが確認でき、モデル化が容易ではない湾曲形状を有したモデルの解析が行えることを示せた。また、焦点距離における電界強度を確認すると、メインローブの位置やビーム幅はほとんど一致した。

今後として、画像ノイズによる解析への影響を議論するため、解析モデルの形状比較や電界強度による比較検討を行う必要がある。

謝 辞

今回の研究では EM ラボ株式会社様よりアンテナの撮影許可をいただいた。また、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを使用して計算を行った。

文 献

- [1] 朝枝仁, 他, “Beyond 5G/6G White Paper 日本語 3.0 版”, 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT), https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaperJP_v3_0.pdf, 参照 Jun.26,2024
- [2] マイナビ出版編集部, 徹底カラー図解 新世代の自動車のしくみ, 2022.
- [3] 山口正洋, “高速スイッチングインバータ機器による不要電波の広帯域化に対応したノイズ抑制材料実装技術と受信性能評価技術”, 2019 信学ソ大, no. BI-4-4, Sept.2019.
- [4] S. Ajia, H. Asa, S. Mitsuharu, M. Matsuura, N. Tezuka, and S. Sugimoto, “Enhancement of microwave absorption properties using spinodally decomposed Fe–Cr–Co flakes,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol.564, Dec.2022.
- [5] S. Muroga, S. Kumagai, T. Arakawa, M. Tanaka, S. Yodokawa, S. Yoshida, and Y. Endo, “Transmission Attenuation of Noise Suppression Sheet Composed of Carbonized Rice Husk,” 2024 APEMC Okinawa, no.WedAM2A.2, p.288, Okinawa, Japan, May. 2024.
- [6] KEYSIGHT, “誘電体測定の基礎,” KEYSIGHT, <https://www.keysight.com/jp/ja/assets/7018-01284/application-notes/5989-2589.pdf>, 参照 Jun.26,2024.
- [7] 中村浩人, 橋本修, “多層カーボンナノチューブ含有抵抗シートを用いた電波吸収体に関する研究,” 信学論 (C), vol.J93-C, no.10, pp.371-373, Oct.2010.
- [8] 伊藤盛通, 山本真一郎, 畠山賢一, “人工磁性体における斜入射時の反射係数測定,” 信学技報, Vol.119, No.20, pp.13-18, May.2019.
- [9] 滝本未来, 中田淳, 佐藤弘康, 澤谷邦男, “77GHz 帯ミリ波パッシブイメージング用フレネルレンズの設計,” 信学論 (B), vol.J94-B, no.9, pp.1153-1161, Sept.2011.
- [10] 坪井瑞輝, “フリースペース法測定における VNA の校正とタイムドメインゲート処理の検討,” 京都府中小企業技術センター技報, no.50, pp.28-32, 2022.
- [11] 中嶋宏昌, 野口直也, 阿戸弘人, 瀧川道生, 米田尚史, “周波数選択板の測定手法に関する一検討,” 2018 信学ソ大, no.B-1-51, p.51, Aug.2018.