

アンテナ用高機能誘電体レンズの開発と設計法の改善に関する研究

研究代表者 伊藤 桂一 秋田工業高等専門学校 准教授

1 はじめに

アンテナを降雨などの使用環境下から保護するために誘電体カバーがよく利用される。また、誘電体レンズをアンテナに装荷して収束性が向上するとアンテナの利得が改善することが明らかにされている。誘電体カバーにレンズ的な性能を組合せ、アンテナを保護しながら指向性特性、利得などを改善する高機能な誘電体レンズを開発することが本研究の目的である。加えて、周波数選択性や超指向性あるいは超広角性などの機能を付加して誘電体レンズを高機能化することを提案する。アンテナに誘電体レンズを装荷するだけでアンテナの性能を改善し、所望の特性を実現するアンテナシステムを開発することができれば、例えば、アンテナの主ビームの狭角化や広角化を、アンテナ自体の設計は不要で誘電体レンズを取り換えるだけで簡単に実現することが可能となる。

本研究では高機能誘電体レンズを設計するために自由度の高い形状設計を可能にするトポロジー最適化に着目した。進化型計算手法と正規化ガウス関数ネットワーク (Normalized Gaussian Network: NGnet) を組み合わせた新しいトポロジー最適化による設計法を提案、開発することを目標とする。提案手法は従来型の設計手法であるパラメータ最適化や形状最適化と異なり、構造物内部に穴が開くようなより自由度が高い設計が可能である。設計対象のモデリングには FDTD 法 (有限差分時間領域法) を用いた。

提案するトポロジー最適化手法は On/Off 法を利用する。また、最適解の探索に進化型計算手法を用いていることから多峰性を有する最適化問題に威力を発揮することが期待される。アンテナ用レンズ形状の設計では誘電体の設計領域をセル単位で on (誘電体) と off (空気) を設定し、進化型計算手法を用いて最適な組み合わせを探索する。進化型計算手法は生物の進化の過程を模した最適化手法であり、最終的に残った優れた個体を最適値とする。すなわち、提案手法は確率論的に最適解を探すため、局所界に陥ることなく、最適解を探索することができる。

また、3D プリンタの普及と進化により、誘電体レンズは多層化や複数の誘電体材料による複層化も可能になってきた。フィラメント材料の種類も多くなり、導電性材料も入手できるようになっている。レンズの設計結果を CAD データに変換さえできれば 3D プリンタによる試作は容易となっており、複雑な設計結果でも試作および測定による評価ができる環境の構築も本研究の目標である。

本研究では提案しているトポロジー最適化手法をいくつかのレンズ設計に応用することにより、提案手法の設計性能を明らかにする。そして、アンテナシステムをさらに高性能化、高機能化する誘電体レンズの開発を行う。

2 トポロジー最適化手法によるアンテナ用誘電体レンズの開発

2-1 トポロジー最適化手法の開発と確立

(1) 研究背景と目的

アンテナに誘電体レンズを装荷することにより開口面効率を高め、高効率な指向性アンテナを開発することができる。アンテナ用レンズといえば波長よりはるかに大きい場合が多く、アンテナの寸法に依存するが一般的に大型かつ重くなる。これに対してミリ波帯の普及により数 GHz 以上の高周波帯向けの小型レンズアンテナに関する研究が盛んになっている。小型レンズから放射される主ビームを収束するための研究例としては延長半球型[1][2]または球型[3][4]のレンズ形状が提案されている。誘電体レンズの形状は装荷するアンテナ寸法と使用条件に合わせて個々に設計しなければならない。故に、所望の特性が得られるように自由にレンズの形状を変えることができる設計法が必要である。アンテナにレンズを装荷するだけで所望の放射パターンを実現できれば、例えば一つのアンテナを狭いビーム幅を持つ指向性アンテナ、広角なビーム幅を持つファンビームアンテナの両方の用途で使うことも可能となる。

誘電体レンズ装荷アンテナにおいて所望の特性が得られるようにレンズ形状のトポロジー最適化による設計について研究を行った。いくつかのトポロジー最適化手法[5][6]の中で On/Off 法を採用し、FDTD セルを

基本単位としてトポロジー最適化を行った。しかし、セルごとに on と off の 2 つの状態を与えてレンズ形状を表現した場合、セルの組み合わせは膨大な数となる。結果として、最適化された形状は試作困難なチェッカーボード状になる可能性が高い。この問題を解決するために空間的にフィルタリングをかける方法がある[7]。しかし、フィルタリングの手法と性能によって設計性能が左右されるため、セルの物性値をある程度まとめて設定する新しい設計方法が必要である。

本研究では滑らかな境界を持つレンズ形状を得るために、本研究では NGnet を用いたトポロジー最適化を行った。ガウス関数を用いてある程度まとまった単位でセルの物性値を指定できるだけでなく、ガウス関数をネットワーク化することにより形状全体の表現力を維持することが可能である。NGnet をトポロジー最適化に適用した研究は電気機器の最適化に関して行われているが[8]、アンテナ用誘電体レンズに関する設計手法は開発されておらず、その設計性能も未知である。本研究では 12GHz を解析周波数に設定し、比較的小型な誘電体レンズの形状設計をすることにより NGnet を用いた設計手法の有効性を明らかにした。

(2) NGnet を用いたトポロジー最適化の概要

本研究では設計対象のモデリングおよび解析に FDTD 法を用いたため、FDTD セルが設計領域を構成する要素の基本単位となる。まとまった一塊のセルを on と off に設定するためにガウス関数を利用し、さらにガウス関数を基底関数としてネットワークを構成したものが NGnet である。NGnet の概要は図 1 に示す通りである[9]。複数のガウス関数 $G(x)$ が x 軸上に並んでいる場合、まずは各入力 x に対して正規化ガウス関数 $b(x)$ を求める。このとき、座標ごとにガウス関数の総和をとって正規化されるため、正規化ガウス関数は[0,1]の範囲で出力される。次に各正規化ガウス関数に重み係数 w を掛け、座標ごとに総和をとる。最終的に入力 x に対して空間的に滑らかに変化する出力 $y(x)$ が得られる。

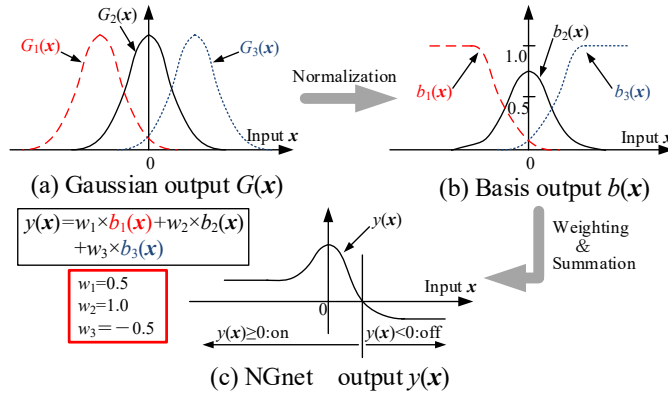


図 1 NGnet のイメージ

本研究では得られた出力 $y(x)$ を利用して、 $y(x) \geq 0$ のとき on、 $y(x) < 0$ のとき off になるように on/off を設定する。重み係数を w_i とすると、本研究で用いたガウス関数 $G_k(x)$ 、正規化ガウス関数 $b_i(x)$ 、出力 $y(x)$ は式(1)~(3)より与えられる。

$$G_k(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{D/2} |\Sigma_k|^{1/2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_k)^T \Sigma_k^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_k)\right] \quad (1)$$

$$b_i(\mathbf{x}) = \frac{G_i(\mathbf{x})}{\sum_{k=1}^N G_k(\mathbf{x})} \quad (2)$$

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N w_i b_i(\mathbf{x}) \quad (3)$$

ここで、 N はガウス関数の数、 D は入力 x の次元、 $\boldsymbol{\mu}_k$ 、 Σ_k はガウス関数 k の中心ベクトルと共分散行列である。重み係数 w_i の範囲は[-1,1]とした。

本研究では誘電体を on、空気を off に設定して誘電体レンズの形状設計を行う。NGnet を用いたトポロジ

一最適化では μ_k , \sum_k , w_i の3つが設計すべきパラメータとなるが、設計を簡単にするために重み係数 w_i だけに着目した。重み係数の最適化に進化型計算手法の一種である μ GA (Micro Genetic Algorithm) を採用し[4], 重み係数を遺伝子として扱うこととした。一般的なGAと違って個体数が少ないことが μ GA の特徴であり、本研究では個体数を5とした。目的関数 OF の評価はFDTD法による計算結果を利用し、設定した世代数まで計算を繰り返す。 μ GA は個体生成、評価、交叉処理を繰り返して進化の過程をたどるが最良値は保存される。故に、目的関数は単調に増加または減少するが、局所解に陥らないために個体が収束するとランダムに個体を生成して広域探索を行うよう設定している。重み係数 w の絶対値は計算の過程で1を超えないように世代ごとに規格化した。提案手法では重み係数をビット型遺伝子ではなく実数型遺伝子として取り扱うため、エンコーディングは不要である。

2-2 導波管スロットアンテナ用誘電体レンズのトポロジー最適化

(1) 解析条件

図2に示す導波管スロットアンテナに誘電体レンズを装荷することによりアンテナ指向性を自在に制御することを目的に3次元トポロジー最適化を行った。アンテナをレンズで保護しながら性能を改善することも期待できる。本研究では誘電体レンズを装荷したアンテナの指向性を狭角化および広角化の2つの最適化を例に提案手法の設計性能を評価した。

図2に示す1スロットの導波管スロットアンテナにおいて、スロット開口面上に誘電体レンズの設計領域を配置した。誘電体レンズの設計領域は $20 \times 20 \times 20$ mm の立方体である。本研究ではセルサイズ Δ を 0.5 mm としたため解析領域のセル数は $40 \times 40 \times 40$ となる。設計領域における比誘電率は、セルが誘電体である場合は 2.2 とし、空気の場合は 1.0 を与えた。誘電体中の損失は $\tan\delta=10^{-4}$ として極めて小さいことを想定している。励振源周波数は 12 GHz における波長は 25 mm であり、レンズの設計領域は波長よりも小さい。

ガウス基底は図2に示すように設計領域中に等間隔に $4 \times 4 \times 4$ 個を配置した。最適化されたレンズ形状に对称性が得られた方が加工しやすいため、 $1/4$ の領域のみ NGnet を用いた on/off の設定を行い、残りの領域はそれをコピーすることによって設定した。また、すべてのガウス基底の分散値は $\Sigma=0.0022$ とした。

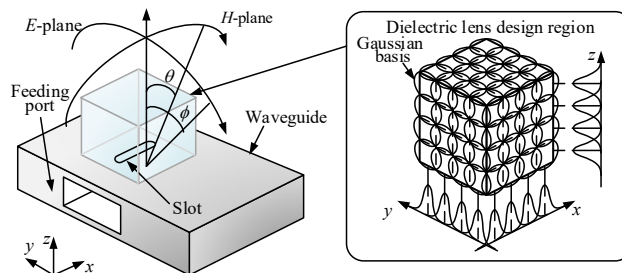


図2 導波管スロットアンテナの設計条件とガウス基底配置

(2) 最適化結果

H 面放射パターンの主ビームのビーム幅を目的関数として最適化を行った。狭角化設計ではビーム幅の最小化問題、逆に広角化設計ではビーム幅の最大化問題となる。最大化では -3 dB ビーム幅、最小化では -10 dB ビーム幅を目的関数とした。1000世代まで計算した結果、図3および図4の放射パターンおよびレンズ形状が得られた。設計領域全てが誘電体の場合の四角レンズ、誘電レンズを装荷しない場合と比較すると、それぞれ主ビームが狭角化および広角化していることが分かる。

狭角化レンズではサイドローブが大きくなる傾向が見られたため、抑制が必要であることが分かった。そこで、ビーム幅 BW の最小化とサイドローブレベル比 SLL の最大化の2つの目的関数について2目的最適化を行った。本研究では式(4)の目的関数 OF を最小化することにより最適化を行った。

$$OF = \frac{BW}{BW_0} + w \times \frac{SLL_0}{SLL} \quad (4)$$

ここで、 w は重み係数、 BW_0 , SLL_0 はビーム幅とサイドローブレベル比の基準レベルである。

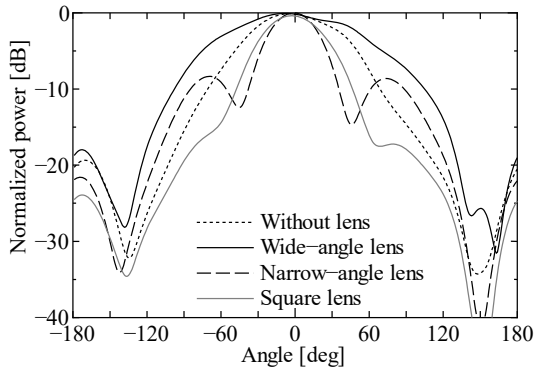
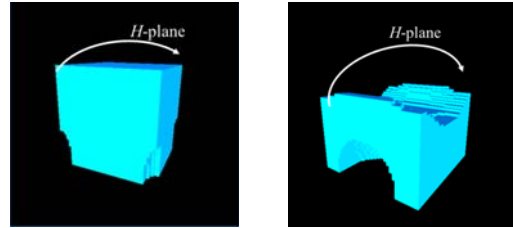


図3 各レンズ装荷時のH面放射パターン



(a)狭角化レンズ (b)広角化レンズ
図4 レンズ形状の最適化結果

図5において OF_1 は $w=0$ であり、サイドローブレベルを全く考慮しない設計をした場合である。また、 OF_2 は $w=0.1$ としてサイドローブを抑制した場合の最適化結果である。 OF_1 、 OF_2 ともにE面放射パターンはほぼ変わらないのに対し、H面放射パターンのサイドローブレベルのみ異なっていることが分かる。重み係数を適切に設定することによりサイドローブを抑制しながらビーム幅の狭角化設計が可能であることを示した。また、サイドローブレベルを考慮して設計した結果、図6に示すように中空構造となるレンズ形状が得られた。本設計手法によりトポロジカルな形状が得られることを示すとともに、本研究で定義したガウス基底の位置と数でも十分な設計能力と表現力があることを示した。

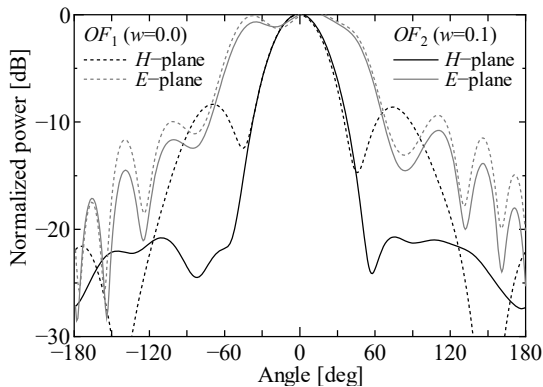
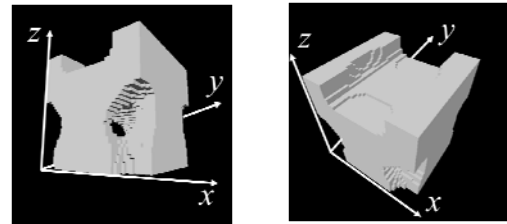


図5 2目的最適化レンズ装荷時のH面放射パターン



(a)横から見た図 (b)上から見た図

図6 2目的最適化によるレンズ形状の最適化結果

2-3 ホーンアンテナ用誘電体レンズのトポロジー最適化

(1) 解析条件

高利得アンテナの代表格であるホーンアンテナに装着する誘電体レンズのトポロジー最適化設計を行う。ホーンアンテナにおいてもビームの指向性を自在に制御できれば、一つのアンテナで狭いビーム幅を持つ指向性アンテナや、広角なビーム幅を持つファンビームアンテナなどが実現可能となる。汎用性の高いアンテナであるため、その応用は幅広い。ホーンアンテナは立体的な構造のため、3次元では計算領域が大きくなり、本手法を適用するには計算負荷が高くなる。そこで、本研究では2次元FDTD法を用いてホーンアンテナ用レンズの設計を行った。

(2) 広角化設計

ホーンアンテナ用の広角化レンズの設計を行うために、2次元FDTD法によるモデリングを行った。励振源周波数は12GHzでセルサイズは0.5mmとし、誘電体の比誘電率は2.2とした。また、本研究では解析領域境界にPML吸収境界条件を用いた。滑らかな境界が得られるようトポロジー最適化にはNGnetを用いている。図7にレンズの設計領域とNGnetの基底配置のイメージを示す。100×200セルの解析領域内に合計8個のガウス関数を等間隔に配置した。本研究では正規化ガウス関数に掛ける重み係数を設計パラメータとし、 μGA を用いて最適化した。

放射パターンの最大値から-10dBのビーム幅を目的関数とし、最大化を行った。200世代まで計算した結果、図7のような境界が滑らかな形状のレンズを得られた。いくつか条件を変えて最適化した結果、レンズ非装荷時と比べ主ビームを広角化できる一方で利得が大きく低下することが課題となった。また、レンズ全体がアンテナから離れてしまうなどの問題点が明らかになった。

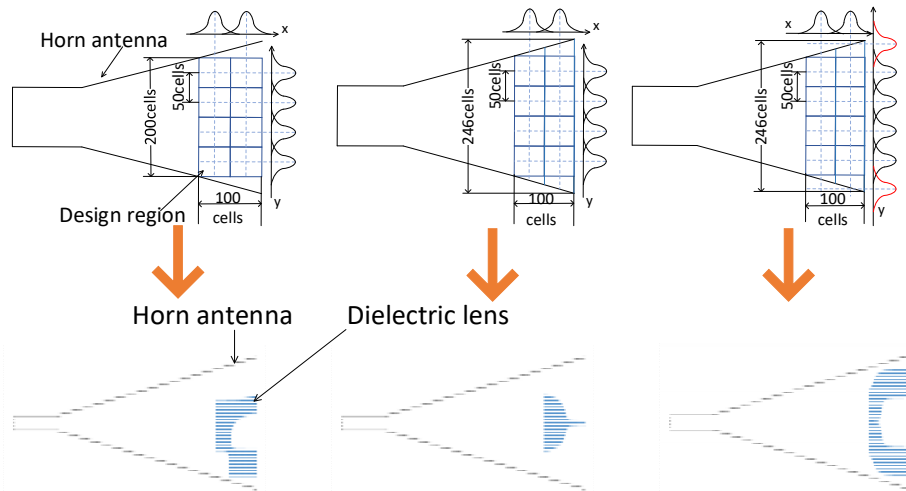


図7 ホーンアンテナ用広角化レンズの設計領域と最適化結果
(左から、基底数8個の非対称設計、基底数8個の対称設計、基底数12個の対称設計)

(3) 狭角化設計

次にトポロジー最適化による指向性の狭角化設計を行った。レンズの設計領域と基底配置を図8に示す。基底数は12個であり、両端の4個はアンテナ内のみ利用する。実際には放射パターンに対称性を持たせるため、アンテナ中心を軸とし線対称になるようコピーした。目的関数 OF は式(4)と同じであり、重み係数 w は1とした。レンズ非装荷時の値で正規化して加算することで、サイドローブを抑制し、狭角化する2目的最適化を試みた。

トポロジー最適化により設計されたレンズを装荷した場合の放射パターンとレンズ形状を図9に示す。境界が滑らかなレンズ形状が得られると共に、レンズを装荷しない場合と比較して、メインローブの狭角化が確認できた。しかし、メインローブに対するサイドローブ比が約-10dBと比較的大きいため、 OF の改良などで対応する予定である。

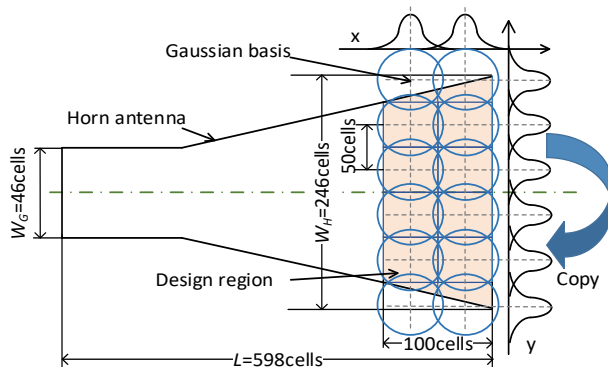


図8 ホーンアンテナ用レンズの設計領域

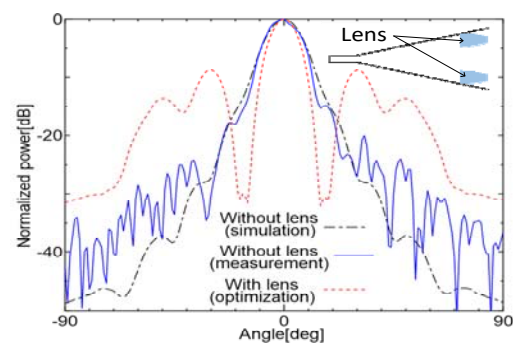


図9 H面放射パターンとレンズ形状

(4) 計算の高速化

現在、CPUの性能の大きな進歩が期待できない一方、グラフィックボードに搭載されているGPU(Graphics Processing Unit)の性能は飛躍的に向上している。GPUではスパコン並みの計算能力が期待できるため、本来の用途以外に金融、科学技術計算など多方面で利用されている。本研究ではGPGPU(General-purpose GPU)によるFDTD法および進化型計算手法の高速化を目的とする。プログラムコードをGPGPU用にチューニングし、CPUおよびスパコンによる計算との比較を行った。

GPUはCPUに比べメモリ帯域幅(バススピード)が数倍大きい,コア数が非常に多いという点で並列計算に優れている特徴を持つ。本研究ではGPUで汎用計算を行わせるために単精度浮動小数点演算が可能なグラフィックボードGTX1080TiとOpenACC対応のPGIコンパイラを用いた。ベンチマークには進化型計算手法である μ GAのプログラムを用いた。ベンチマークテストの結果,100世代までの計算にかかったGPUでの計算時間はCPU(1core),CPU(8core),スパコン(北大,32core)で計算した場合と比較して7.50%,9.23%,41.18%にそれぞれ短縮されることを確認した。

2-4 誘電体レンズの3Dプリンタによる試作

(1) ボクセルデータのSTL形式への変換

NGnetを用いた3次元トポロジー最適化手法によって試作可能な滑らかな形状の誘電体レンズを設計することができる。しかも,穴が開くようなユニークな形状が得られることも本研究で明らかにされている。内部に穴が開くような形状は従来型の機械工作による試作は難しく,一体成型は不可能であるといつてよい。これに対して3Dプリンタであれば自由度の高いトポロジー最適化結果も十分に印刷可能であり,極めて低コストで一体成型を実現することができる。本研究ではトポロジー最適化結果をCADのファイルフォーマットであるSTL形式へ変換し,3Dプリンタによる試作と評価を行った。

本研究では2-2節で述べた誘電体レンズを設計した結果を利用する。すなわち,導波管スロットアンテナ用のレンズを設計・試作するために,励振周波数12GHzにおいて,WRJ10規格の導波管に長さ12.5mmのスロットを1個空けてスロットアンテナを構成し,20×20×20mmのレンズ設計領域を開口面上に設けた。今回のトポロジー最適化では40×40×40個のセルのonとoffの配置の自動設計を行う。NGnetの基底数は4×4×4個である。設計領域内のセルが誘電体(on)であれば比誘電率を $\epsilon_r=2.6$,空気(off)であれば $\epsilon_r=1.0$ とした。誘電体は3Dプリンタのフィラメント材料であるPLA樹脂(ポリ乳酸: polylactic acid)を想定している。

最適化結果はボクセルデータとして得られるため,各セルの媒質を定義するID配列idzを用いてSTL形式への変換を行った。変換の手順を図10に示す。誘電体を表すidz=1の辺が2つ並ぶ面,または4隅が直交する面にSTL形式の構成要素である三角形を形成する。ただし,面が連続する場合は三角形を形成しない。これを繰り返すことにより,図10における灰色部,すなわち,モデル内部の三角形を除去できる。図11はトポロジー最適化結果のボクセルデータのOpenGL表示とSTL形式に変換したデータの3D表示であり,正確に変換できていることを確認した。

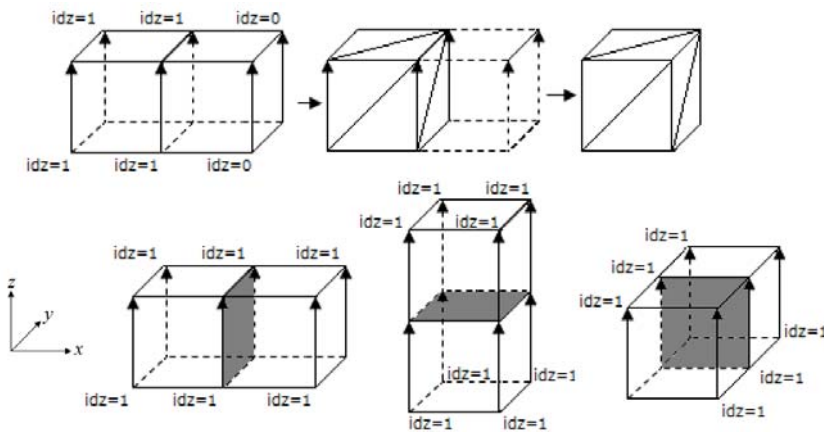


図10 STL形式への変換アルゴリズム

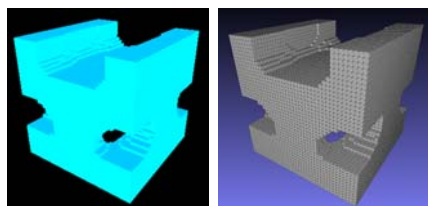


図11 OpenGL表示(左)とSTL形式表示(右)

(2) 試作結果

STL 形式に出力されたデータを 3D プリンタを用いて印刷を行った。使用した MUTOH Value 3D MagiX MF-500 は熱溶解積層方式の 3D プリンタである。熱溶解積層方式は熱に溶ける樹脂を 1 層ずつ積み上げていく方式で、熱を加えると変形しやすくなる熱可塑性樹脂を用いる。本研究では PLA 樹脂を用いた。熱溶解積層方式では、層にして積み上げていくため、中空構造となる場合、形成時にフィラメントの垂れが生じることがある。

STL 形式は 3 次元形状を表現するファイルフォーマットであり、3D プリンタで形成するためには 3D プリンタを動かすための G コードへの変換が必要であった。G コードは 3D プリンタの温度、ノズルの移動、フィラメント排出の太さ等を管理する。これはスライサーソフト Slic3r により STL 形式から変換され、ここで出力するレンズの内部形状を操作する。本研究では形状内部に不要なボイドが含まれないように充填密度 100% に設定した。また、層の高さは 0.3 mm とした。

以上の条件で 3D プリンタの制御ソフト Pronterface を用い 3D プリンタで出力を行った。図 12 は実際に出力したレンズである。このレンズの印刷時間は約 25 分であった。使用した 3D プリンタでは形状の外形を積層して、内部を充填させている。レンズには造形時のフィラメントの垂れによる凹凸が生じている。そのため、完全な設計通りの形状とは言えない。また、造形時の精度は 100% ではないため、設計値との誤差が生じる。これを踏まえて、同一のレンズを複製した。いずれもフィラメントの垂れがあり、設計値通りではない。2 つのレンズの寸法のずれは一辺 20 mm に対して 0.05 ~ 0.10 mm であった。



図 12 試作レンズ

(3) 測定結果

上述のレンズをアンテナに装荷して測定した H 面放射パターンの測定結果を図 13 に示す。横軸は角度、縦軸は利得であり、最大値で正規化している。比較のため FDTD 法による計算結果も併せて示す。図 13 より、レンズ荷前に比べて、レンズ装荷時の主ビーム幅が狭角化されていることがわかる。また、サイドローブレベルも下がっているといえる。過去の測定結果より ± 60 deg 以上測定結果は信号レベルが低下することが報告されているため[10]、図 13 の ± 60 deg 以上における計算値とのずれは無視する。 ± 60 deg 以内のメインローブおよびヌルはおおよそ設計通りの特性が得られていることが分かる。

複製したレンズからも同様な結果を得られるか比較するために、複製したレンズでも同様の測定を行った。双方のレンズともに造形時のフィラメントの垂れ等が見られるが、ほぼ一致する測定結果が得られた。多少の個体差は見られるものの、試作品のばらつきは小さいと言える。以上より、3D プリンタにより誘電体レンズの試作精度は実用上問題と言える。

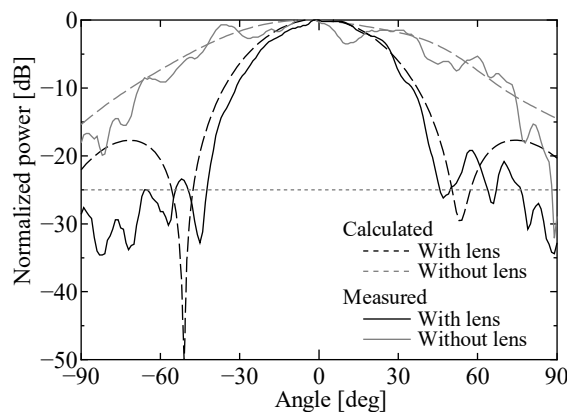


図 13 H 面放射パターンの測定結果

3 ミリ波帯測定環境の構築と測定

3-1 ミリ波位相測定環境の構築

現在、秋田高専の電波暗室では、近年需要が高まっているミリ波アンテナを測定できるようにコンパクトレンジの再構築を試みている。ミリ波アンテナの測定環境を構築する上で、ミリ波の位相分布を測定することができれば、測定環境の平面度の評価やレンズアンテナによる波面の変化も測定により明らかにすることができる。本研究ではミリ波の位相測定を行うための環境構築に関する予備的な実験と境界要素法による電磁界解析を行った。

図 14 に本研究で用いたミリ波位相測定システムの概要を示す。送信アンテナから照射された電波を基準アンテナと受信アンテナの 2 つで受信し、両者を混合した合成波の振幅スペクトルを観測する。合成波の振幅は 2 つの信号が同相のとき大きくなり、逆相のとき小さくなるため、振幅より両者の位相差を推測することができる。なお、今回用いた発振周波数 76GHz では直接測定は困難であるので、Harmonic mixer (HM)を用いて 1.4 GHz にダウンコンバートして測定系を構成した。

図 14 の測定系において、基準アンテナを動かして振幅の変化を測定した。図 15 に示すように合成波のヌル点が波長と等しい約 4 mm 間隔で現れたため、HM でダウンコンバートされていても、アンテナ間の位相変化を検出できることを明らかにした。基準アンテナの後ろにある Phase Shifter (PS)を用いた定量的な位相変化の観測方法について現在検討中である。

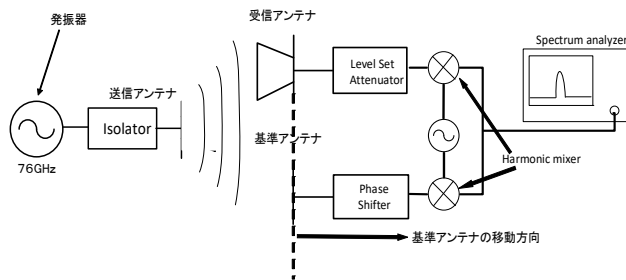


図 14 位相測定システムの概要

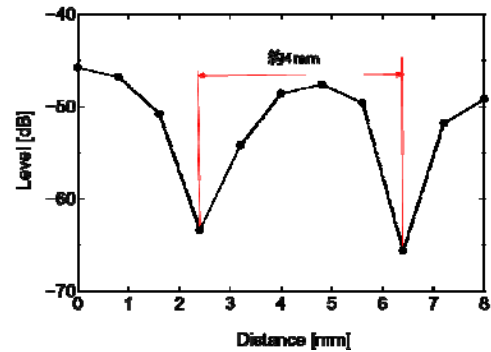


図 15 移動距離と合成波振幅の関係

3-2 クラック検知に関する予備実験

ミリ波は空間分解能が高く、直進性も高いため距離センサや障害物センサとして用いられている。また、高い透過性も有しており、壁紙などで隠れたコンクリートクラックの検知への応用も報告されている。クラック検知を高精度で行うためには、高い空間分解能を有する指向性アンテナが必要となる。本研究では指向性アンテナをクラック検知へ応用し、その能力を明らかにすることが目的であり、測定系の構築と予備的な実験を行った。

クラック検知能力を調べるための予備的な実験を行った。図 16 に示す測定システムを構築し、送信アンテナとして導波管スロットアンテナ(ビーム幅 7deg)またはホーンアンテナ(ビーム幅 20deg)から照射された電波を測定物に当て、その反射波の大きさを測定した。測定物は 2 個用意し、両者を離すことでクラックに見立てたスリットを設けた。今回は照射する角度は 45°となるようにアンテナを取り付け、アンテナ間距離 D とスリットの位置 L を変えて測定を行った。

スリットを移動させて受信電圧の測定を行った結果を図 17 に示す。測定物は金属でスリット間隔は 1, 3, 5 mm の 3 通りに設定した。図 17 は導波管スロットアンテナの測定結果であり、スリットがない場合を基準にして電圧比として表している。どちらのアンテナの場合もスリットがあると測定値が変化したが、スリットの幅が広がるほど変化が大きくなり、検出しやすくなる。また、導波管スロットアンテナではスリット幅 5mm において電圧の変化が大きくなる一方で、ビーム幅の広いホーンアンテナではスリット幅 3mm から電圧の変化が大きくなった。どちらのアンテナでもスリットの検出は可能であるものの、測定環境からの反射などの外乱の影響を抑えることが今後の課題となる。

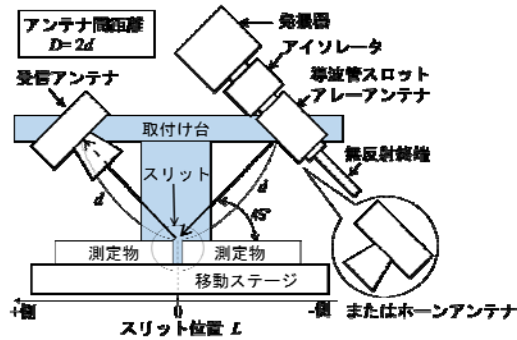


図 16 測定システムの概要

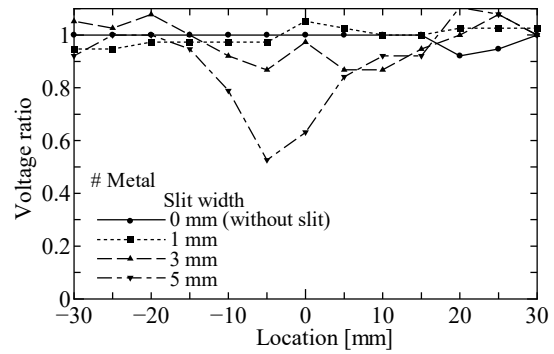


図 17 スリット位置と受信電圧の関係

4 まとめ

本研究は装荷される誘電体レンズの形状を最適化設計し、レンズアンテナの特性を改善して所望の性能を達成することを目標としている。極めて自由度の高い設計方法であるトポロジー最適化をレンズ設計に導入し、試作と測定による評価まで含めたトポロジー最適化によるレンズ開発環境の構築を行った。本研究では正規化ガウス関数ネットワークを導入することにより高い設計性能を持つトポロジー最適化手法を提案した。導波管スロットアンテナおよびホーンアンテナを対象としていくつかの設計事例を示し、設計法の有効性を明らかにした。本提案手法は On/Off 法と NGnet の組み合わせによるトポロジー最適化であり、2次元だけでなく3次元への拡張も容易であるだけでなく、多峰性を持つような最適化問題に対しても局所解に陥ることなく高い設計性能を示した。今後、提案手法は幅広い分野で応用可能な有効性の高い設計ツールになると考えている。

また、提案手法によって得られた最適化形状は 3D プリンタを用いることにより試作可能であることを示した。本手法では中空構造のようなトポロジー最適化ならではのユニークな性能と形状を有する誘電体レンズが設計可能である。従来の加工方法では試作が困難な形状でも、3D プリンタでは実用上問題のない精度で試作が可能であり、測定結果よりレンズとして問題なく機能することも明らかにした。

最後に、試作アンテナの性能を評価するために必要となるミリ波帯における測定環境の構築を行い、ミリ波帯位相測定では 76 GHz 帯における位相測定の可能性を示した。また、同じ 76 GHz 帯を用いた簡易クラック検知システムの構築を行った。将来的にはドローンなどの無人飛行機に搭載可能な小型軽量かつ耐環境性に優れた誘電体レンズ一体型アンテナを開発することを考えている。

【参考文献】

- [1]G. Godi, R. Sauleau and D. Thouroude, "Performance of reduced size substrate lens antennas for millimeter-wave communications", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol.53, No.4, pp.1278–1286, 2005.
- [2]T. Shimizu and T. Yoneyama, "A NRD fed dielectric lens antenna with high gain and low sidelobe characteristics", IEICE Trans. Electron, Vol.E88-C, No.7, pp.1385-1386, 2005.
- [3]B. Schoenlinner, X. Wu, J. P. Ebling, G. V. Eleftheriades and G. M. Rebeiz, "Wide-scan spherical-lens antennas for automotive radars", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.50, No.9, pp.2166-2175, 2002.
- [4]K. Itoh, K. Miyata and H. Igarashi, "Evolutional design of waveguide slot antenna with dielectric lenses", IEEE Trans. Magn, Vol.48, No.2, pp.779-782, 2012.
- [5]K. Watanabe, F. Campelo and H. Igarashi, "Topology optimization based on immune algorithm and multigrid methods", IEEE Trans. Magn., Vol.43, No.4, pp.1637–1640, 2007.
- [6]T. Nomura, K. Sato, K. Taguchi, T. Kashiwa and S. Nishiwaki, "Structural topology optimization for the design of broadband dielectric resonator antennas using the finite difference time domain technique", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.71, No.11, pp.1261-1296, 2007.
- [7]日高勇気, 五十嵐一, "動的フィルタリングを用いた電磁機器のトポロジー最適化", 第 22 回 MAGDA コンファレンス in 宮崎, OS4- 2, pp.95-100, 2013.

- [8]T. Sato, K. Watanabe and H. Igarashi, “Multimaterial topology optimization of electric machines based on normalized Gaussian network”, IEEE Trans. Magn., vol.51, no.5, Article #: 7202604, 2015.
- [9]J. Moody and C. J. Darken, “Fast learning in networks of locally-tuned processing units”, Neural Computation, Vol.1, No.2, pp.281-294, 1989.
- [10]伊藤桂一, 宮田克正, 五十嵐一, “球形誘電体レンズ装荷による導波管スロットアンテナの放射特性改善”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J92-B, No.7, pp.1185-1192, 2009.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
トポロジー最適化によるアンテナ指向性の狭角化および広角化	平成 29 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2D02	2017 年 8 月
正規化ガウス関数ネットワークを用いた誘電体レンズアンテナのトポロジー最適化	電子情報通信学会技術研究報告, Vol.117, No.245, EST2017-63 , pp.123-127	2017 年 10 月
スロットアンテナ用誘電体レンズのトポロジー最適設計と試作	平成 30 年電気学会全国大会, 3-009	2018 年 3 月
トポロジー最適化を用いたホーンアンテナ用誘電体レンズの設計	平成 30 年電気学会全国大会, 3-011	2018 年 3 月