

アンテナ用高機能誘電体レンズの開発と応用

研究代表者 伊藤 桂一 秋田工業高等専門学校 教授

1 はじめに

屋外で電波センシングを行う場合、アンテナおよびセンサユニットを降雨などの使用環境下から保護するための誘電体カバーが必要となる[1]。この誘電体カバーにレンズ的な性能を組合せることにより、アンテナを保護しながら性能改善が可能な高機能な誘電体レンズの開発が本研究の目的である。アンテナに誘電体レンズを装荷するだけで所望の特性を実現できれば、アンテナまたはセンサユニットを複数の用途で使い回すことも可能となり、既存アンテナを再利用した効率の良いアンテナ開発が可能になる。

これまでの研究において導波管スロットアンテナの誘電体レンズの形状設計にトポロジー最適化を取り入れ、首尾よく設計できることを示した[2]。トポロジー最適化は従来型のパラメータ最適化と比べても形状設計の自由度が高く、アンテナの性能を最大限に引き出す高機能な誘電体レンズの開発を可能にする。提案している進化型計算手法とトポロジー最適化を組み合わせた新しい設計法が十分な設計能力を有することを明らかにするとともに、複雑な形状を設計した場合でも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[3]。

本研究ではアンテナ用誘電体レンズの開発をさらに進め、実用化に向けてアンテナの形状と用途に応じた誘電体レンズの設計と評価を行うことを目的としている。特に、コンクリートなどの構造物のクラック検知や河川の水位検知などの電波センシングへの応用において、開発した誘電体レンズを装荷することにより検出能力を改善することが当面の目標である。開発に用いた周波数帯は自動車レーダーなどのセンサ用として一般的な76GHz帯であり、波長は約4mmと極めて短いことから、高精度な測定を可能にすると同時に加工精度が要求されることが想定される。最終的にはセンサ用途に適した高感度な指向性アンテナを実現する誘電体レンズを設計し、試作まで可能なことを示し、測定による評価までを行う。

本研究では導波管スロットアレーアンテナ用の誘電体カバーとホーンアンテナ用の誘電体レンズを設計する。導波管スロットアレーアンテナはスロット数を増やすことにより容易に指向角を狭角化することができ、また、実習工場において金属加工で試作可能である。ホーンアンテナは高利得な指向性アンテナであり、標準アンテナとしても利用される。クラック検知に超指向性アンテナとして有望な導波管スロットアレーアンテナ、水位検知に高利得なホーンアンテナを用いることを想定して研究を進める。また、設計した誘電体レンズの収束性を評価するための位相分布測定、クラック検知に関する解析的な検討も行った。

2 導波管スロットアンテナ用誘電体カバーの開発

2-1 研究背景と目的

ミリ波帯導波管スロットアレーアンテナのアンテナ開口面を保護するため、従来は板状の誘電体カバーが用いられてきた[1]。誘電体カバーを装荷することにより、スロットの共振長が変化するため、一般的にはアンテナの利得は低下することが懸念される。故に、誘電体カバー装荷時にはアンテナの再設計が必要になる。本研究では収束効果による利得改善を期待して板状の誘電体カバーに小型の半球を付加した図1の誘電体カバーを提案する。従来の研究成果より、小型誘電体レンズでも延長半球型[4][5]および球型[6][7]のそれぞれについて十分な収束効果が得られることが示されている。しかし、ミリ波帯では波長が極めて短いため、導波管スロットアンテナの各スロットに小型レンズを装荷することが困難になる。本研究で提案している誘電体カバーはアンテナを保護する誘電体カバーと小型誘電体レンズを一体化した構造であり、小型レンズだけを装荷する場合に想定される固定のわずらわしさを解消する。なおかつ、本研究では与えられたスロット条件下でもアンテナの利得を改善できることを目的とする。提案している半球付き誘電カバーの各設計パラメータについてFDTD法（時間領域差分法）を用いて探索を行った。

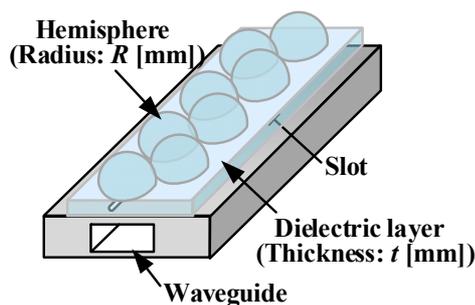


図1 半球付き誘電体カバーの形状

2-2 誘電体カバーの構造と設計結果

各スロットの位置に小型半球を設け、各スロットからの放射をレンズ的に収束させる。提案する半球付き誘電体カバーの板厚と半球の半径をパラメータとして、利得が改善する条件についてFDTD法を用いて数値解析的に検討した。FDTDセルサイズは波長よりも十分に小さい0.08 mmに設定した。最初は半球半径を固定し、板厚をパラメータとして計算を行い、最適な板厚を求めた。次に板厚を固定し、半球半径をパラメータとして検索することにより最適値の探索を試みた。探索はパラメータを変えて放射パターンを計算し、メインローブの最大値と±60deg付近に現れるグレーティングローブの最大値を求め、カバー非装荷時と比べて利得が改善するパラメータを求めた。誘電体の材料としては3Dプリンタでの試作を予定しているため、PLA(ポリ乳酸、比誘電率 $\epsilon_r=2.6$)を想定している。

解析結果より、板厚が厚くなるとグレーティングローブと考えられる不要放射が発生することが分かった。この原因は誘電カバーによってアンテナ開口面付近の波長が短縮され、グレーティングローブ発生条件であるアレー素子間距離が波長より長くなってしまいうためと考えられる。また、厚さによってメインローブの最大値は周期的に変化する傾向がみられた。スロットから放射された電波(一次放射)がカバー境界で反射してスロット側に戻り、導波管スロットアンテナ壁面で反射して再放射(二次放射)し、一次放射と同相で重なれば強め合い、逆相で重なれば打ち消しあうことが原因であると考えられる。

図2の板厚の最適値 $t=1.60\text{mm}$ において半球の半径をパラメータとして計算を行い、図3より利得が改善し、かつ、グレーティングローブが発生しない半径の最適値 $R=1.92\text{mm}$ を得ることができた。他にも候補となる優良値は得られたが、板厚が薄くなると試作が困難であり、厚すぎるとグレーティングローブが大きくなる傾向が見られたため前述の値が最良値となった。

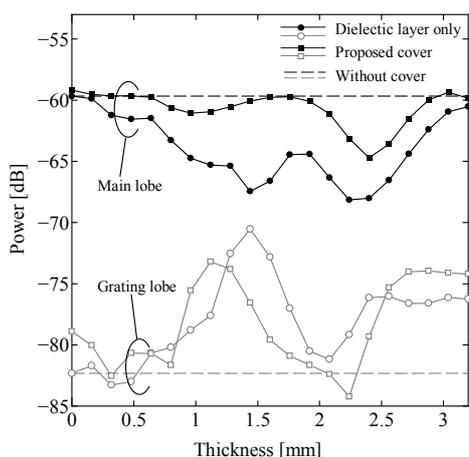


図2 厚さに対する放射パターンの変化

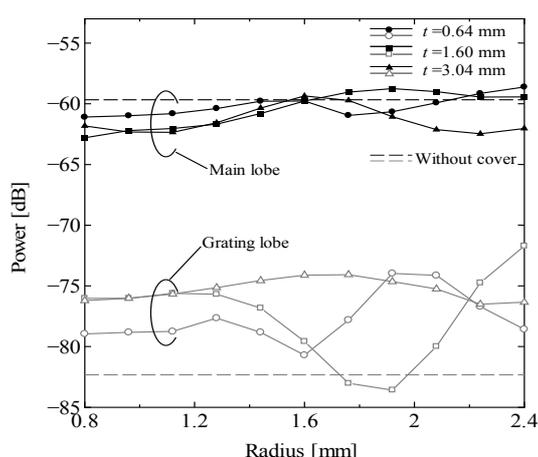


図3 半径に対する放射パターンの変化

2-3 誘電体カバーの試作と測定結果

設計形状について3Dプリンタによる試作を行った。3DプリンタはMUTOH社MF-500、フィラメントはPLAを用いた。造形物内部には空洞はないように充填率100%に設定して試作を行った。試作したカバーをアンテナに装荷し、電波暗室において放射パターンの測定を行った。回転台の制御およびスペクトラムアナライザによる測定は自動で行い、76GHz帯ミリ波の信号を中間周波数である1.4GHz付近までダウンコンバートして測定を行った。試作したアンテナを図4に、放射パターン測定結果を図5にそれぞれ示す。試作カバーを装荷することにより利得の改善を確認することができ、提案形状の有効性を確認することができた。3Dプリンタによる試作は手軽であり、大まかな形状成形にも有効である。その一方で、放射パターンにおいてサイドローブが大きく現れるなど、試作精度には課題も見られた。今後は半球の形状を最適化し、さらなる高利得化を目指す予定である。



図4 試作した誘電体カバー

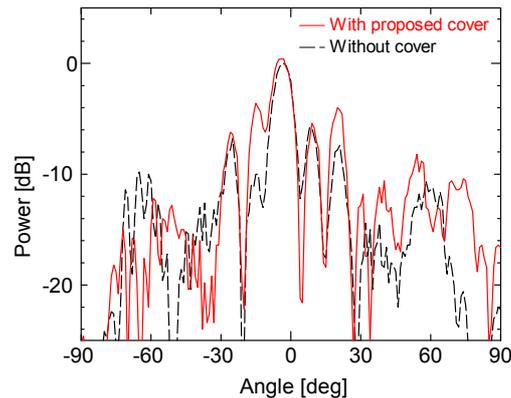


図5 放射パターンの測定結果

3 ホーンアンテナ用誘電体レンズの開発

3-1 研究背景と目的

ミリ波帯ホーンアンテナは高利得な指向性アンテナであり、河川の水位計測などの精密な距離測定に向いている。しかし、雨、雪、飛来物などからアンテナを保護するためのレドームが必要となり、レドームによって保護することにより利得の低下も避けられないことが課題となる。レドームとしてアンテナを保護する誘電体レンズをアンテナ開口面に設けることを想定し、アンテナを保護しながら利得の改善が可能なミリ波帯ホーンアンテナ用誘電体レンズの設計を行った。本設計では正規化ガウス関数ネットワーク (NGnet) を3次元に拡張してトポロジー最適化を行った。NGnetは複数のガウス関数を利用することにより滑らかな境界分布が得られるため、提案手法は他のトポロジー最適化手法と比較しても高い表現力が期待できる。ホーンアンテナ開口面近傍に設計領域を設け、ホーンアンテナ内部に入れた場合と外部に出した場合について比較をする。3Dプリンタによる試作と放射パターン測定により設計手法と設計したレンズ形状の有効性を明らかにすることが本研究の目的である。

3-2 NGnetによるトポロジー最適化の概要

本研究ではFDTD法を用いてモデリングと評価を行うため、FDTDセルが設計領域を構成する要素の基本単位となる。トポロジー最適化は自由度の高い設計が可能である一方で、市松模様のような試作困難な形状が得られる可能性が高いことが知られている。これを避けるため、セルのonとoffの状態をまとめた単位で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6に示す通りである[8]。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。

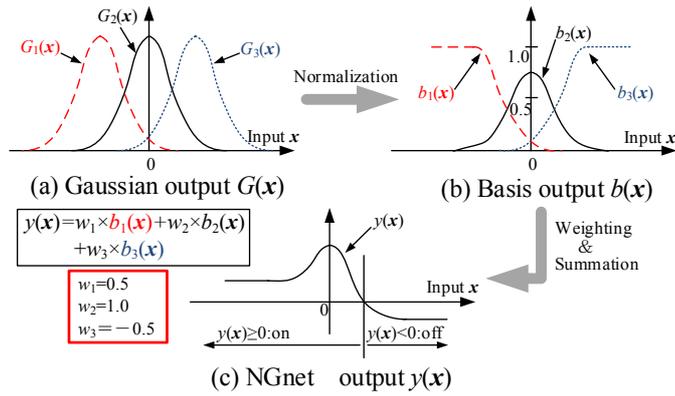


図6 NGnet のイメージ

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。

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

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

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

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い、重み係数 w_i だけに着目して最適化を試みた。重み係数の最適化には μ GA (Micro Genetic Algorithm) を採用し[9], 個体数を 5, 目的関数 OF の評価は FDTD 法による計算結果を利用した。重み係数 w_i 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。

3-3 ホーンアンテナ用レンズのトポロジー最適化

(1) 解析条件

ミリ波帯ホーンアンテナとして WR-10 規格である Millitech 社の SGH-10 を設計対象とした。モデリングに用いた設計条件を図 7 に示す。誘電体レンズの設計領域をホーンアンテナ内部の開口面側に設け、トポロジー最適化により設計領域を誘電体と空気の 2 つの材料で表現する。本研究では誘電体材料として PLA(ポリ乳酸, 比誘電率 $\epsilon_r=2.6$) を想定している。76GHz でアンテナを励振することを想定しているため、波長は約 4mm となる。FDTD セルサイズは波長の 1/10 である 0.4mm にした。誘電体レンズの設計領域に $6 \times 4 \times 2$ 個の合計 48 個のガウス基底を配置したが、設計領域の 1/4 だけを設計し、設計形状に対称性が得られるように回転し、残りの 3/4 へコピーした。

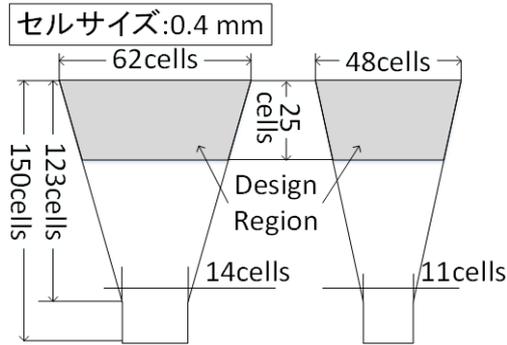


図7 ミリ波ホーンアンテナの設計条件

(2) 最適化結果と試作

遠方界におけるメインローブの最大値が最大化するよう重み係数の最適化を行った。計算にはスパコンを用い、おおよそ 400 世代で解が収束する傾向が見られた。誘電体レンズの最適化結果は FDTD セル単位でボクセルデータとして出力され、OpenGL によって可視化できる。3D プリンタで試作するために、ボクセルデータから STL 形式に変換を行い、STL 形式から 3D プリンタ用コードに変換した[3]。フィラメント材料は計算と同じ PLA を用い、充てん率 100% で試作を行った。最終的に 3D プリンタ (MUTOH MF-500) で試作した写真を図 8 に示す。アンテナ内部にレンズの設計領域を設けた場合、図 8 に示すように中空構造となる傾向が得られた。形状は複雑であるが中空構造でも 3D プリンタで試作可能であり、試作する寸法が導波管スロットアレーアンテナ用誘電体カバーの場合と比較しても立体的に大きいため、細かなバリの影響も気にならないレベルで試作可能である。また、実際のアンテナに誘電体レドームを装荷したところ、レンズの大きさが若干大きく出力されてしまうため、0.96 倍ほどの縮尺をかける必要があった。なお、今回の製作に係る時間は 13 分程度であった。

レンズ装荷時の H 面放射パターンを電波暗室内で測定し、計算結果と比較を行った。放射パターンの測定結果と計算結果を図 9 に示す。測定結果は FDTD 法による計算結果と比較してもおおむね一致しており、計算結果の妥当性は示すことができた。しかし、アンテナ内部にレンズ入れた場合、開口面を覆う誘電体レドームとしての機能を果たさないことも明らかになった。この問題を解決するために、アンテナの外部に設計領域を設けた場合についてトポロジー最適化を行った。



図8 ミリ波レンズの試作結果

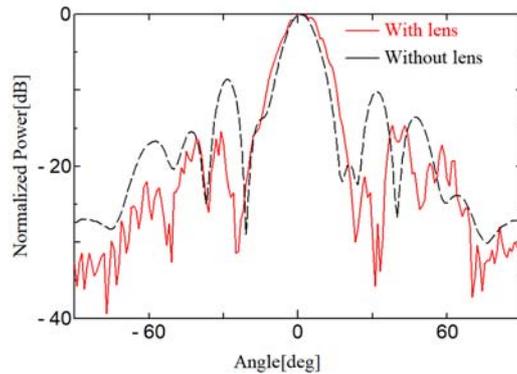


図9 H 面放射パターンの比較

3-4 ホーンアンテナ用誘電体レンズの再設計

アンテナ内部に設計領域を設けると高確率で中空構造になることが分かった。そこで、設計領域をアンテナ開口面外部に設け、再度トポロジー最適化による設計を行った。設計結果を 3D プリンタで試作した結果を図 10、レンズを装荷して非装荷時と放射パターンを比較した結果を図 11 に示す。これらの結果より、設計領域をアンテナ外部に設けた場合、アンテナを保護しながら利得改善が可能であることが分かった。今後はレンズの設計領域を微調整して最適な位置を探し、設計領域の位置とレンズ形状と利得の関係について明らかにする予定である。また、水位検知に実際に応用し、測定距離の改善が可能か検証する予定である。

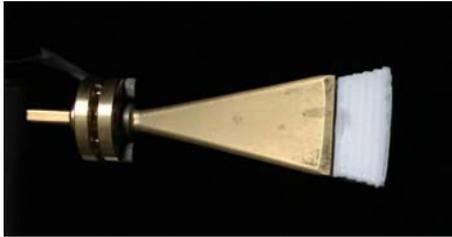


図 10 ミリ波レンズの試作結果

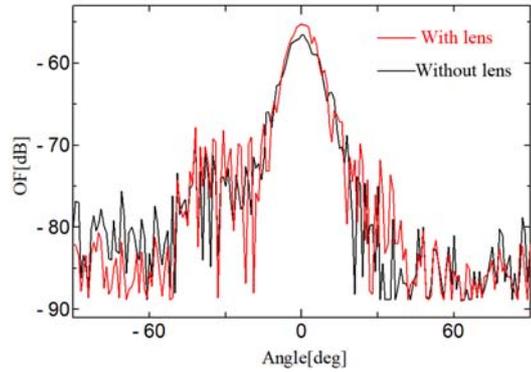


図 11 H面放射パターンの比較

4 ミリ波帯測定環境の構築と位相分布測定

4-1 研究背景と目的

ミリ波アンテナ用レンズの試作と評価を行う上で、ミリ波の位相分布を測定することができれば、レンズの収束性を定量的に評価することが可能である。また、コンパクトレンジ測定環境における波源の平面度の評価も可能となる。ミリ波帯における位相測定はネットワークアナライザなどの測定機材を用いた場合、コスト面で実現が難しくなってしまう。そこで、本研究では参照アンテナを用意し、試験アンテナとの合成出力をスペクトラムアナライザで測定することにより安価なミリ波位相測定システムを構築する。すなわち、合成出力が最大の時は2つアンテナからの出力は同相、逆に最小の時は逆相であることから、スペアナの振幅によって位相差を推定できると考えている。実際には試験アンテナの移動量を波長で規格化することにより位相量を割り出して位相測定を行う。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。

4-2 ミリ波位相分布の測定

図 12 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。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。測定の手順としては、まずは基準アンテナを図 12 の x 方向に動かして移動量に対する振幅の変化を測定する。次に、得られた振幅のヌル点から別のヌル点までの変化を波長で正規化することにより位相量に変換し、移動量と位相量の変化の関係を求める。

図 13 に測定結果より求めた測定位置と位相の関係を示す。比較のために示した境界要素法による位相分布と測定結果はおおむね一致しており、提案手法によって位相分布を定量的に評価できることが分かった。最初に基準となる振幅を合わせるための補正が必要であるため測定の自動化は困難であったが、今後は推定された位相分布よりレンズ装荷による位相面の変化を評価する予定である。

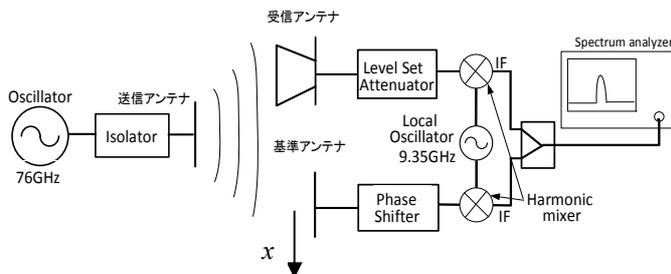


図 12 位相測定システムの概要

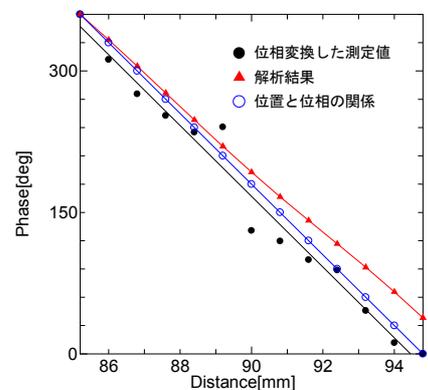


図 13 移動距離と合成波振幅の関係

5 クラック検知に関する解析的検討

5-1 研究背景と目的

ミリ波は空間分解能が高く、高い透過性も有しているため、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可能である。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。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を目的に測定系の構築と予備的な実験を行い、送信アンテナとして導波管スロットアレーアンテナ(ビーム幅 7deg)とホーンアンテナ(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。構築した測定システムの概要を図 14 に示す。使用周波数は 76GHz の正弦波であり、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。

これまでの研究では、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、スリットを移動させて受信電圧の測定を行った。スリットがない場合を基準にして電圧比を求めたところ、スリット間隔 1mm では検出が不可能であったが、両アンテナとも波長より広い 5mm 以上のスリット間隔を検出することができた。しかし、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り、検出できた一方で、ホーンアンテナより指向角の狭いはずの導波管スロットアレーアンテナでは検出できなかった。以上の結果より、両アンテナともにスリットの検出は可能であるものの、指向角と検出感度に相関関係は見られなかった。この原因として測定環境からの反射などの外乱の影響があると考え、本研究では境界要素法によって指向角と検出感度の関係について理論的に明らかにすることを目的とする。

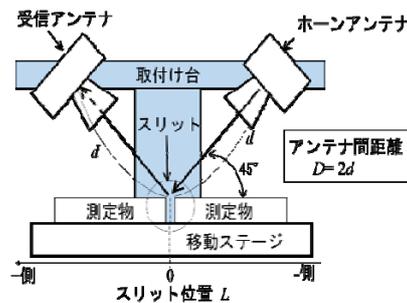


図 14 測定システムの概要

5-2 境界要素法による解析的検討

境界要素法とは解析対象の境界を要素といわれる直線の集まりで近似してモデリングし、各要素の交点を求める計算方法である。今回は図 14 に示す実験環境を再現するため、図 15 に示すように送信アンテナとクラックを想定した測定物についてモデリングを行った。境界要素法は解析対象の境界のみモデリングするため、解析空間全体をメッシュしてモデリングする FDTD 法と比べると、大規模空間になるほど計算負荷の点では有利になる。本研究では 0.14mm 間隔で接点を設置し、要素数、節点数ともに 1200~1600 のモデルとなった。波源の周波数 76 GHz とし、Windows10、CPU が CORE-i7 の計算環境において、計算時間は 15 秒ほどであった。

スリット幅ごとに測定物を移動させて電界強度の解析を行い、送信アンテナに導波管スロットアレーアンテナを用いた場合の解析結果を図 16 に示す。測定結果では観測できなかったスリット幅 3mm の場合でも、解析結果では検出しており、測定では外乱などの影響によって測定できなかったことが示唆された。今後は測定環境の再構築を行い、測定のための治具などによる反射の影響の軽減に努めることと、測定距離と検出能力の関係を解析により明らかにする予定である。

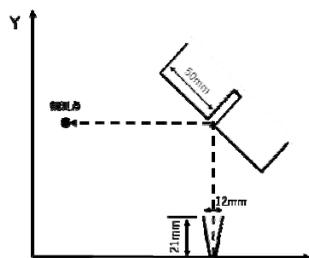


図 15 スリット位置と受信電圧の関係

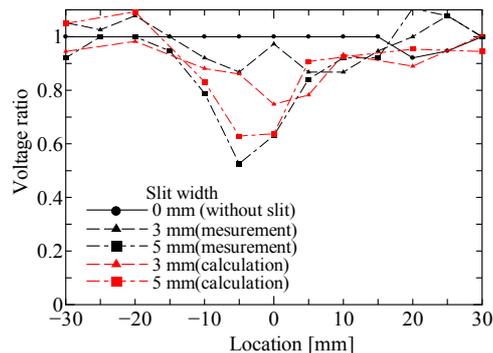


図 16 スリット位置と受信電圧の関係

6 まとめ

本研究では導波管スロットアレーアンテナとホーンアンテナの形状も用途も異なる2つのアンテナについて誘電体カバーを設計し、誘電体カバーを装荷することによりアンテナを保護しながら利得を改善できることを示した。アレーアンテナには放射素子ごとに小型半球のレンズ形状を用いる方法が有効であり、ホーンアンテナのように開口面が大きいアンテナにはトポロジー最適化を用いた設計が有効であると考えている。どちらもカバーも誘電体境界面において反射やそれに伴う出力の低下が考えられるが、それらを補って利得を改善することができることを示した。3Dプリンタを用いることを前提に設計したが、3Dプリンタのフィラメントは損失が大きいため、加工方法とそれに伴う材料の選定を適切に行うことによってさらなる利得の改善は可能になる。

また、試作レンズによる位相分布の変化の測定や電波センシングへの実際の応用については今後も継続して取り組んでいく予定である。境界要素法による解析は解析空間を広く取り、伝搬経路が長い場合でも比較的容易に計算が可能である。クラックとの距離が離れた場合のクラック検知、または、水位検知において解析的な検討に基づき、検出能力の改善や測定距離の改善が可能か検証する予定である。

【参考文献】

- [1]M. Bailey, "Design of dielectric-covered resonant slots in a rectangular waveguide", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol.15, No.5, pp.594-598, 1967
- [2]K. Itoh, H. Nakajima, H. Matsuda, M. Tanaka, H. Igarashi, "Development of Small Dielectric Lens for Slot Antenna Using Topology Optimization with Normalized Gaussian Network", IEICE Transactions on Electronics, Vol.E101-C, No.10, pp.784-790, 2018.
- [3]伊藤桂一, 中嶋悠華, 松田英昭, "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.
- [4]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.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]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.
- [8]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.
- [9]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.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
ミリ波位相測定環境の構築に関する基礎的検討	平成 30 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2C06	2018 年 9 月
ミリ波帯ホーンアンテナ用誘電体レンズの 3 次元トポロジー最適化	平成 30 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2C07	2018 年 9 月
Development of dielectric cover with hemisphere for millimeter-wave waveguide slot antenna	37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2018), pp.43-45	2018 年 9 月
Development of Small Dielectric Lens for Slot Antenna Using Topology Optimization with Normalized Gaussian Network	IEICE Transactions on Electronics, Vol.E101-C, No.10, pp.784-790	2018 年 10 月
ミリ波導波管スロットアンテナ用誘電体カバーの設計	第 27 回 MAGDA コンファレンス inKatsushika, OS4-6, pp.92-93	2018 年 10 月
境界要素法を用いたミリ波クラック検知システムの解析的検討	平成 31 年電気学会全国大会, 3-002	2019 年 3 月
ミリ波ホーンアンテナ用誘電体レンズの試作と評価	平成 31 年電気学会全国大会, 3-003	2019 年 3 月