河川の水位観測用高精度ミリ波センサの開発と防災への応用に関する研究

研究代表者 伊藤桂 一 秋田工業高等専門学校・電気・電子・情報系・教授

1 はじめに

防災,減災の観点から河川の水位測定に関する技術開発が喫緊の課題になっている。特にゲリラ豪雨に伴う河川流域の急激な水位の上昇の検知するためには、高精度かつ IoT 技術と親和性が高い非接触測定方法の 開発とそのネットワーク化が必要不可欠である。水位計は今でも浮きなどを使った機械式の測定方法が主流 であるが、超音波式[1]、電波式[2]、カメラ式などのように非接触測定方式も採用されている。測定精度が 波長に依存することを考えるとレーザーを用いた光学式が最も有力であるが、豪雨、降雪、霧などの気象環 境下ではレーザーが遮られるため、悪天候ではその性能を発揮することが難しい。

本研究では高精度かつ小型化が容易であることからミリ波センサの水位測定への応用に注目した。ミリ波 は雨,雪をも透過して測定できるため気象環境の変化に強く、76 GHz 帯であれば数 mm 単位での水位の測定 も可能である。しかし,水面からの微弱な電波を受信するには、ミリ波センサの根幹をなすアンテナユニッ トの高効率化,高利得化が課題となる。加えて、雨雪などからアンテナを保護するための誘電体レドームも 考慮したアンテナ設計法も必要となる。

本研究の目的は、河川の水位測定を高精度で実現できるミリ波センサユニットを開発することである。従 来の設計法ではアンテナ性能に影響を与えないように極力薄い誘電体板をレドームとしてアンテナ開口面に 設け、試行錯誤を繰り返して調整する。しかし、レドーム装荷時に利得の低下は避けられないことから、ア ンテナユニットの高効率化、高利得化は容易ではない。本研究ではアンテナの高利得化を目的に、形状最適 化の観点からアンテナおよびアンテナを保護する誘電体レドームを同時に一体設計する手法の確立を目指す。

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2種類のミリ波アンテナ用レドームを対象 として、材料の空間的分布を最適化するために正規化ガウス関数ネットワーク(NGnet)を用いたトポロジー 最適化を行った。NGnet は一般的な On/Off 法と比べて試作できる可能性が高いまとまった形状を設計できる ことが大きな特徴である。導波管スロットアレーアンテナでは誘電体レドーム(カバー)の設計を行い、3D プリンタによる試作と測定によって設計能力を評価した。ホーンアンテナでは複数の NGnet(マルチ NGnet) を用いた設計を行い、金属、誘電体、空気の複数材料の分布問題に拡張してアンテナ、誘電体レドームの一 体設計の可能性について検討した。また、ホーンアンテナの解析には Altair 社の電磁解析ソフトウェアであ る Feko を導入し、高精度に計算を行うために自動計算環境の構築について検討した。以上、3 つの研究成果 について報告する。

2 導波管スロットアレーアンテナ用誘電体カバーの設計

2-1 解析モデル

(1)FDTD 解析モデル

図 2-1 に示す 76 GHz 帯 8 スロット導波管スロットアレーアンテナに装荷する誘電体カバーを設計する。本 研究では FDTD 法(時間領域差分法)を用いて解析および設計を行う。解析モデルの諸元を表 2-1 にまとめる。 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 2.6 とし、空気の場合は 1.0 を与えた。誘電体中 の損失は過去の文献を参考にして tanδ=3×10⁻³ とした[3]。これは設計後に 3D プリンタを用いて試作する際 に使用する PLA (ポリ乳酸)を誘電体の材料として想定しているためである。

平板形状の誘電体層を装荷したときには誘電体層を考慮した設計をしないと利得が減少する可能性がある ため[4],先行研究ではスロット上に半球レンズを取り付けることを提案してきた[5]。本研究では半球より 利得が向上する新規形状を探索するため,図 2-2 に示すように半球部分に対応する誘電体の最適化領域をス ロット開口面上に設けた。その周囲にアンテナ開口部を覆うように誘電体層を設置して誘電体カバーを構成 する。最適化領域の大きさは 3.84 mm の立方体である。本研究ではセルサイズを 0.08 mm としているため, 設計領域のセル数は 48×48×48 となる。実際には一つの設計領域を最適化し,他の設計領域にコピーしてい る。





図 2-2 誘電体カバーの最適化領域

パラメータ	条件		
セルサイズ	0.08 mm		
FDTD 解析領域	695×274×86 cells		
吸収境界条件	PML (8 layers)		
誘電体レンズ設計領域	48×48×48 cells		
	(3.84×3.84×3.84 mm)		
レ話電索	2.6 (dielectric) / 1.0		
儿礽电平	(air)		
ガウス基底数	4×4×4=64 個		
スロット長	25 cells (2.00 mm)		
スロットオフセット	6 cells (0.48 mm)		
導波路寸法	2.54×1.27mm(WR10 規格)		
励振モード	TE ₁₀ mode		
入射波周波数	76 GHz(CW 波)		

表 2-1	鼦桁エデ	ルの諸テ
<u> </u>	四年4月11 ビーノー	/ ビ マ ノ 市住 ノ レ

(2)トポロジー最適化と設計条件

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。セル単位で On/Off 法を用いたトポロジー最適化を行うと市松模様になりやすいことが問題となる。そこで,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た。ガウス関数を基底関数としてネットワークを構成した関数近似器が NGnet である[6]。

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った。設計を簡単にするため に各ガウス基底にかかる重み係数を設計パラメータに設定し,重み係数の調整だけで誘電体カバーの設計を 行う。重み係数の最適化に進化型計算手法の一種である µGA (Micro Genetic Algorithm)を採用し,重み係 数をその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 µGA 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,1000 世代まで計算を繰り返した。µGA は個体生成,評価,交 叉処理を繰り返して多くの個体を生成するが最良値は保存される。よって,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 た。重み係数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,本研究の最適化において遺伝子のエンコーディ ング作業は不要である。

本研究では2つの目的関数を定義した。放射のメインローブ最大化を達成するために用いる目的関数 OF_{gain}と,不要放射を抑制するためにサイドローブレベル比(SLL)の最小化を達成するために用いる目的関数 OF_{SLL}である。前者だけ,または両者を最適化することをそれぞれ1目的最適化,2目的最適化と呼ぶ。目的関数 の OF_{gain}は式(2-1), OF_{SLL}は式(2-2)で与えられ,2目的最適化の目的関数 OF は式(2-3)で表される。Gain_{ref}

は誘電体カバーを装荷していない状態でのスロットアレーアンテナの利得であり, *SLL_{ref}* は一様分布のときの SLL である 13 dB を与えた。2 つの目的関数を結ぶウェイト W は 1, 5, 10 に設定した。

$$OF_{gain} = \frac{Gain}{Gain_{ref}}$$
(2-1)

$$OF_{SLL} = \begin{cases} \frac{SLL_{max} - SLL_{ref}}{SLL_{ref}}, & if SLL_{max} > SLL_{ref} \\ 0, & otherwise \end{cases}$$
(2-2)

$$OF = OF_{gain} - \# \times OF_{SLL} \rightarrow max.$$
(2-3)

式(2-1)中の Gain は FDTD 法で計算した遠方界の放射電界より算出した。また、式(2-2)中の SLLmax は放射 パターンから算出した。放射パターンは各スロットの振幅と位相からアレーファクタを用いて算出した。

2-2 設計結果

(1)最適化結果

最適化する際に式(2-3)のウェイト Wを変化させ、また、設計結果のばらつきを検証するために乱数の Seed 値を変えて計算を行った。まず、ウェイト Wを変えて最適化を行い、それぞれの誘電体カバーを装荷した時 の放射パターンを図 2-3 に示す。それぞれ、誘電体カバーなし(Without cover)、誘電体層のみ(Layer only)、 ー目的最適化 (One Object)、2目的最適化 (Two Objects)を示す。2目的最適化はウェイト Wが 1、5、10 の場合で比較している。それぞれの最適化結果において利得増加量と SLL の変化量を表 2-2 にまとめる。利 得増加量はカバー非装荷時からの増加量を表している。図 2-3 および表 2-2 より、カバー非装荷時や誘電体 層のみの場合と比較すると、最適化された誘電体カバーによって利得が大きく改善されていることがわかる。 また、1目的最適化よりも2目的最適化の利得増加量が大きくなる傾向が見られた。しかし、最適化された 形状を確認すると、スロットの上部が大きく開放されておりスロット開口面は保護されていないことが分か った。

そこで、ウェイト Wを変化させるだけではなく、乱数の Seed 値も変えて最適化を行った。このときの利得 増加量と SLL の変化量を表 2-3 にまとめる。SLL は主にスロットオフセットに依存するため、この 2 目的最 適化が、必ずしも効果的に効いていないことが分かる。今回の計算結果で最も利得改善されたウェイト W=10, Seed 値 3 において、スロット上部をカバーが覆っており、アンテナ開口面の保護も可能な形状を得られた。 このときの放射パターンを図 2-4 に示す。誘電体カバー非装荷の場合、平板状の誘電体層のみ装荷した場 合、トポロジーの設計領域の代わりに半球状の突起物を誘電体層に追加した場合と比較した。図 2-4 の放射 パターンに示すように誘電体層で覆っただけではメインローブ最大値は大幅に低下する。これに対して、半 球またはトポロジー設計領域を設けた場合は最大値の改善が見られ、トポロジー最適化を用いた場合の利得 増加量は 4.4 dB となった。この時の設計結果を図 2-5 に示す。利得増加の理由について誘電体設計領域に 3 次元的な自由度を持たせたことによるレンズ効果とスロットアンテナーカバー間のインピーダンスマッチン グの改善が考えられる。前者については E 面においてメインビームのビーム幅が狭くなり、収束性があるこ とを計算により確認した。

3



図 2-3 最適化後の放射パターンの比較

	利得増加量[dB]	SLL[dB]
1目的最適化	1.69605	12.20000
2目的最適化(Weight=1)	4.05718	12.77759
2目的最適化(Weight=5)	2.58984	12.06202
2目的最適化(Weight=10)	3.51456	11.97081

表 2-2 利得増加量と SLL 変化量の比較

表 2-3	Seed 値によ	る利得増加量と	SLL 変化量の比較
-------	----------	---------	------------

	Seed値	利得増加量 [dB]	SLL[dB]
2目的最適化(Weight=1)	1	4.05718	13.64396
	2	2.83476	11.43848
	3	3.21244	11.53489
2目的最適化(Weight=5)	1	2.58984	12.17662
	2	3.81290	12.41662
	3	4.13090	12.45335
2目的最適化(Weight=10)	1	3.51456	11.97081
	2	1.54732	12.20507
	3	4.43224	12.72234



図 2-4 H面放射パターン



図 2-5 誘電体カバー設計結果(左:上面,右:背面)

(2) 最適化結果の試作と測定

図 2-5 で示した誘電体カバーを 3D プリンタ (MUTOH MF-500) で試作した。図 2-6 に PLA フィラメントを用い て試作した誘電体カバーを示す。製作方式は熱溶解積層法 (FDM) で,積層ピッチは 0.2mm に設定した。製作時 間は 30 分ほどであった。試作した誘電体カバーを装荷して放射パターンを測定した結果を図 2-7 に示す。カ バー非装荷時に比べて,最適化された誘電体カバー装荷時にはメインローブの最大値の増加を確認すること ができた。その利得増加量は 4.6 dB であり,計算結果とほぼ一致する傾向が得られた。

本研究の成果により、導波管スロットアレーアンテナに装荷するだけで利得を改善することができる誘電 体カバーを開発することができた。また,提案手法の設計能力および設計結果の有効性を示すことができた。



図 2-6 試作した誘電体カバー(左:上面,右:背面)



図 2-7 H面放射パターンの測定結果

3 ホーンアンテナ用誘電体レドームの設計

3-1 マルチ NGnet によるトポロジー最適化

(1)マルチ NGnet の概要

先行研究では 76 GHz 帯ミリ波センサ (ホーンアンテナ) に装着するだけで高利得化を実現する誘電体レド ームの形状最適化を行った[7]。NGnet を用いたトポロジー最適化を行うことにより首尾よく設計できること が分かったが、一方で、アンテナも同時に設計できればさらに高性能なセンサが開発できるのではないかと 考えるに至った。アンテナの金属領域、レドームの誘電体領域、空気領域の3つの材料の空間分布を最適化 するために複数の NGnet (マルチ NGnet)を用いたトポロジー最適化によるアンテナ・レドームの一体設計を 行った。複数材料のトポロジー最適化に関して、マルチフェーズフィールド法を用いた J. Lee らや S. Lim らの研究成果が報告されている[8][9]。どちらもレベルセット法を用いたトポロジー最適化であるために、 感度解析ができない最適化問題には適用できない。これに対して本研究で提案している NGnet を利用した手 法は解析対象を選ばず、その適用される分野は広いことが利点となる。

本研究ではマルチ NGnet の設計方法を確立することを目標に、複数材料のトポロジー最適化を行う。その 設計能力を評価するために最適化結果とホーンアンテナとの比較を行った。

(2)設計結果

図 3-1 に設計モデルを示す。76 GHz 帯における波長(約4 mm)に対してセルサイズを 1/10 程度の 0.4 mm に設定し、FDTD 法でモデリングを行った。(a)のホーンアンテナの開口面の寸法を基準として、(b)のように 立方体状のトポロジー最適化を行う設計領域を設ける。アンテナへの給電部はホーンアンテナと同じ構造で あり、波源として TE₁₀モードの正弦波(周波数は 76 GHz)を与えた。本研究におけるマルチ NGnet は NGnet を 2 つ用意し、空間分布の近似関数を出力する。2 つの NGnet (NGnet1, NGnet2)の出力をそれぞれ出力 1、 出力 2 としたとき、

(a) 出力1≧0, 出力2≧0のとき金属

- (b) 出力 1<0, 出力 2<0 のとき空気
- (c) 上記以外は誘電体

のように3つの材料分布を与えることができる。遠方界における正面方向の電界値が最大となるよう設計領 域の材料分布の最適化を行った。

給電部のみ、ホーンアンテナ、マルチ NGnet による最適化結果の3つの状態について遠方界における電界 値をまとめた結果を表3-1に示す。最適化結果より、一体設計することによりホーンアンテナ単体よりも高 性能なアンテナが得られる可能性が示唆された。この時の形状を図3-2に示す。導波管の広管壁中央で切っ た時の断面であり、灰色が金属、水色が誘電体、白色が空気の各領域を示している。全体的に飛び地が多い 構造となり、試作を考慮すると設計条件を追加するなどして改善する必要があることが分かった。



(a)ホーンアンテナモデル

(b)設計モデル

図 3-1 設計モデルの概要

ŧ	0 1	具 ``油/\// 田	
衣	3-1	取週11. 樎木	

計算モデル	遠方界における電界値[V/m]
給電部のみ	$5.936 imes 10^{-4}$
ホーンアンテナ	1.426×10^{-3}
最適化結果(マルチ NGnet)	3.975×10^{-3}



図 3-2 最適化形状

3-2 Feko による電磁界解析

(1)アンテナモデル

Altair 社の電磁界解析ソフトウェアである Feko を用いてホーンアンテナの解析を行った。これまで FDTD 法による解析および FDTD モデルを用いた最適化を行ったきたが、Feko は多数のソルバが用意されており、 FDTD 法との比較検討も可能である。これまでの FDTD 法による計算結果の妥当性を確認するとともに、自動 計算による計算の高精度化について検討した。

始めに解析に用いたアンテナモデルの概要を図 3-3 に示す。ホーンアンテナは Millitech 社製ホーンアン テナの寸法を参考にしてモデリングを行った。導波管は WR-10 規格であり,(a)は誘電体レンズがある場合, (b)は誘電体レンズがない場合である。誘電体レンズがない場合をレンズの厚さが 0mm であると扱っている。 誘電体の材料定数は PLA を想定して与え,ミリ波水位測定に用いたられる 76 GHz 帯において計算を行った。





(2)計算環境構築

通常, Feko では次のような手順で解析を行う。

(a) Cad Feko でモデルを設計する。

(b) Run Feko でモデルを解析する。

(c)Post Feko で解析結果を表示する。

本研究では、大量のモデルの解析を行うため一連の作業を自動化した。開発した手法では次のようにして 解析を行う。

(a) Lua スクリプトで Cad Feko を自動操作し、モデルを作成する。

(b)計算管理プログラムを用いて複数の RunFeko を自動操作し、モデルを解析する。

(c)計算結果表示プログラムで RunFeko の出力をパースして、目的の解析結果を表示する。

Cad Feko は Lua スクリプトを用いて自動操作をすることができる。Lua とは、スクリプト言語である。Cad Feko 上から Script Editor を起動し、Lua 記述領域にプログラムを書く。マクロ記録機能があり、Cad Feko の Lua スクリプト API を参照せずとも、容易に動作を実現するためのコードを生成できる。

Lua による自働化では Cad Feko のすべての機能を自動で操作することができるため、Cad Feko で製作可能 なモデルは Lua でも作成できる。このため、本研究で作成したプログラムでは、レンズの厚さや給電部のピ ンなどを変数としてそれを変更する構成とした。基礎となるモデルを人間がモデリングし、Lua スクリプト で変数として保存されているパラメータを変更することでモデルを出力することができる。

計算管理用プログラムの全体像を図 3-4 に示す。計算管理用プログラムは Python3 で記述され,管理用コ ンピュータから計算用コンピュータを操作するプログラムである。計算管理プログラムは,ディレクトリ構 造にある複数のモデルを読み込み,それらを計算用コンピュータに対して割り振るものである。その際に, 単純にモデルを割り振るのではなく,計算が最も高速に行えるようにマッチングプログラムが調整する。



図 3-4 計算管理用プログラムの全体像

(3)計算結果

本研究では、大量のパラメータを変更したときの特性の変化を調べるため、計算環境の自働化を行った。 自働化によって大量のモデルを解析することが可能になり、計算のコンピュータ間の分担による最適化によ って短時間でモデルを解析することが可能となった。また、Fekoの解析手順を自動化することで、大量のモ デルを解析することが可能となった。これにより、連続計算が可能となり、ヒューマンエラーによるミスを 減らすことができた。

計算環境を構築するにあたって,計算管理プログラムを作成した。計算管理プログラムでは,解くべき複数のモデルを単調に順番に解くだけではなく,複数台のコンピュータの性能や計算中のモデルなどを考慮して,計算時間が最短となるようにモデル計算の割り当てを行う。本項では,その最適化による効果がどの程度あったのかを実際に調べ,それを考察する。

まず、テストのためのモデルとして、表 3-2のパラメータを変更した合計8つのモデルを生成した。

私 8 2 前昇 C 及父 じにパリア		
項目	値	
解析手法	MLFMM/FDTD	
メッシュサイズ	Standard/Corse	
レンズ厚さ	0. 0mm/3. 6mm	

表 3-2 計算で変更したパラメータ

解析側は、並列化の有無、最適化の有無を変更して計算した。並列化の有無とは、計算用コンピュータが itok13(図3-4参照)のみの時の場合、計算用コンピュータが itok5, itok6, itok13, itok20, itok22 のう ちマッチングプログラムが最適と判断する2台を用いて計算する場合の2つである。また、最適化の有無は、 主にコンピュータの搭載パーツに焦点を当て、CPU ソルバのみの場合、GPU ソルバのみの場合、マッチングプ ログラムが CPU と GPU で最適な計算方法を選ぶ場合の3つである。計算が完了するまでの計算時間の比較を 図 3-5 に示す。





計算機が1台の場合と計算機が2台の場合では、明らかに計算時間が短くなっていることが分かる。単純 に時間が半分とならないのは、計算機が1台の場合に使用したコンピュータのitok13は、この実験で使った すべての計算用コンピュータの中で最速であるためである。

また、MLFMM (Multilevel fast multipole method) は CPU で計算すると計算時間が短く、FDTD は GPU で 計算すると計算時間が短くなることが分かっている。本プログラムではこの点に注目し、計算を行うモデル が FDTD なのか MLFMM なのかを判断して、MLFMM は優先的に CPU で解き、FDTD は優先的に GPU で解くことを行 う。図 3-5 を見ると、最適化を有効にすると、切り替えなしに CPU のみや GPU のみで計算した場合に比べ計 算時間を確実に抑えることができているといえる。以上の結果より、並列化と最適化を実現した本プログラ ムでは、当初使用していた計算機1台の CPU で計算していた場合に比べ、計算時間を 1/7 に短縮できた。

最後に大量のモデルを計算可能になったため,誘電体レンズの厚さを変化させたときの利得変化も高精細 に計算できるようになった。計算結果を図 3-6 に示す。



図 3-6 計算間隔の違いによる利得の比較

図 3-6(a)は 0.01mm 間隔で 3000 モデルを計算,(b)は 1mm 間隔で 30 モデルを計算している。1mm 間隔で計算したときにはレンズの厚さによる利得変化の周期は約 5mm であると判断できてしまう。これに対して,0.01mm 間隔で計算を行うことにより周期は約 1.27mm であることを明らかにした。

4 おわりに

本研究では2種類のミリ波アンテナについて、NGnetを用いたトポロジー最適化による誘電体レドームの 設計を行った。ミリ波導波管スロットアレーアンテナでは3Dプリンタによる誘電体カバーの試作と放射パタ ーンの測定を行い,設計の妥当性と有効性を確認した。ミリ波ホーンアンテナではマルチNGnetを用いた複 数材料の最適設計によりホーンアンテナを超える利得が得られる可能性を示した。本研究では提案手法の有 用性を示すことができただけでなく、アンテナ、誘電体レドームの一体設計が可能であることを示した。ア ンテナとレドームを同時に形状最適化することにより、ミリ波センサの性能を最大限引き出すことができる 新しい設計法を開発することができた。

今後の課題としてはセンサのネットワーク化,測定データ解析に機械学習の導入,水位と流速の同時測定 が挙げられる。また,リアルタイムセンシングのための実用化の検証を行う予定である。

【参考文献】

- [1] 佐藤慶太,二瓶泰雄,木水啓,飯田裕介,"洪水流観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の 適用~江戸川を例 にして~",水工学論文集,第48巻,pp.763-768 (2004)
- [2] 山口高志,新里邦生,"電波流速計による洪水流量観測",土木学会論文集,No.497/II-28, pp.41-50 (1994)
- [3] 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)
- [4] M. Bailey, "Design of dielectric-covered resonant slots in a rectangular waveguide", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol.15, No.5, pp.594–598 (1967)
- [5] K. Itoh, K. Takita, M. Kumata, H. Matsuda, M. Tanaka, H. Igarashi, "Development of Novel Dielectric Cover for Millimeter-wave Band Waveguide Slot Array Antenna", 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag2019), Paris, PD-M4-13(2019)
- [6] J. Moody, C. J. Darken, "Fast learning in networks of locally-tuned processing units," Neural Computation, vol.1, no.2, pp.281-294 (1989)
- [7] Y. Miura, T. Susuga, M. Tanaka, K. Itoh, "Development of millimeter wave water level detector using horn antenna with topology optimized radome", 4th International Conference of "Science of Technology Innovation" 2019 (STI-Gigaku2019), STI-6-3, p.54 (2019)
- [8] J. Lee, S. Wang, "Topological shape optimization of permanent magnet in voice coil motor using level set method", IEEE Trans. Magnetics, Vol.48, pp.931-934 (2012)
- [9] S. Lim, S. Min, "Design optimization of permanent magnet actuator using multi-phase level-set model", IEEE Trans. Magnetics, Vol.48, pp.1641-1644 (2012)

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
トポロジー最適化を用いたミリ波アンテナ 用誘電体カバーの形状設計	令和 2 年度電気関係学会東北支部連 合大会	2020年8月
Shape Design of Novel Dielectric Cover for Millimeter-Wave Antenna Using Topology Optimization	5th International Conference on "Science of Technology Innovation" 2020 (STI-Gigaku2020)	2020年10月
ミリ波導波管スロットアレーアンテナ用誘 電体カバーのトポロジー最適化を用いた形 状設計	電子情報通信学会技術研究報告	2021年1月
ミリ波ホーンアンテナ用誘電体レンズの設 計と放射特性の改善	第 26 回高専シンポジウムオンライン	2021年1月
ミリ波導波管スロットアレーアンテナ用誘 電体カバーの形状設計法に関する研究	令和 3 年東北地区若手研究者研究発 表会	2021年3月
NGnetを用いたトポロジー最適化によるミ リ波導波管スロットアレーアンテナの誘電 体カバー設計	電子情報通信学会論文誌	2022年1月
自動計算環境の構築と Feko への適用	令和 4 年度電気関係学会東北支部連 合大会	2022年8月

〈発表資料〉