

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04383

研究課題名(和文) 高誘電率材料を用いた次世代ミリ波アンテナ用高機能薄型レンズの開発に関する研究

研究課題名(英文) Study on development of high performance thin dielectric lens for next generation millimeter wave antenna using high permittivity materials

研究代表者

伊藤 桂一 (ITO, Keiichi)

秋田工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：20290702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、高誘電率材料とトポロジー最適化を組合せ、従来のレンズアンテナと同等以上の収束性能を持つ薄型レンズアンテナの新しい設計方法を確立することである。次世代ミリ波センサ用カバーとして利用可能な薄さと高い収束効果を併せ持った誘電体レンズを開発する。薄型レンズの収束効果のメカニズムの解析および設計にはFDTD法(時間領域差分法)とトポロジー最適化を用いる。本研究では高誘電率材料の空間的な分布を高精細に設計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い、従来型のレンズの1/4程度の厚さのレンズでも収束効果が得られることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

NGnetを用いた構造設計はガウス関数を局所的に用いるため微細な形状も表現可能であり、一般的な密度法と比較しても局所解に陥ることはない。本研究成果により、NGnetを用いた設計能力の高さを示すことができただけでなく、既存の光学的なアプローチ以外でも誘電体レンズの形状設計ができることを示した。ミリ波デバイスは今後ますます高周波化が進むことが予想されるが、提案手法を応用することにより誘電体レンズのみならず誘電体線路や分岐などの微細な設計にも適用可能であり、極めて汎用性の高い設計法を提案することができた。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to establish a new design method for thin lens antennas with convergence performance superior to that of conventional lens antennas by combining high dielectric constant materials and topology optimization. We develop a dielectric lens that is both thin and highly convergent, which can be used as a cover for next-generation millimeter-wave sensors. The FDTD (Finite-Difference Time-Domain) method and topology optimization are used to analyze and design the mechanism of the convergence effect of thin lenses. In this study, topology optimization using the normalized Gaussian network (NGnet) is used to design the spatial distribution of high dielectric materials with high precision. With the proposed method, we clarified that the convergence effect can be achieved even with a lens that is about 1/4 the thickness of conventional lenses.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：トポロジー最適化 誘電体レンズ ミリ波アンテナ FDTD法

1. 研究開始当初の背景

次世代型のミリ波センサは、特にドローンに搭載するようなモバイル用途では、省スペース化や軽量化への要求がさらに高まることが想定されている。そのため、雪、雨などからアンテナを保護する誘電体カバーにも収束効果も付与することで限られたスペースを効率よく高機能化する技術が必要となる。収束効果を得るためには凸レンズ構造にすることが一般的であるが、レンズ中央部に厚みが出るため、次世代ミリ波センサとしてはもっと軽薄化することが望ましい。

5G時代の到来を見据えて、波長の短縮効果による電子機器の小型化を狙った低損失、高誘電率の基板材料の開発が盛んになっている昨今、比誘電率が10程度の高誘電率の樹脂系基板材料を用いれば波長の1/3程度の薄型ミリ波レンズを開発できるのではないかと考えるに至った。しかし、従来のレンズをただ縮小しただけのレンズ形状では高い収束効果は見込めないため、自由度の高い形状設計も同時に開発する必要がある。

従来のミリ波帯薄型レンズに関する研究では、フレネル型レンズによって収束効果が得られることが報告されている[1]。しかし、フレネル型レンズは波源からレンズまでの焦点距離が必要であるため、空間的な無駄が多くなる。省スペース化を実現でき、従来の光学的なアプローチとは異なった新規性に富む設計手法の開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高誘電率材料とトポロジー最適化を組合せ、従来のレンズアンテナと同等以上の収束性能を持つ薄型レンズアンテナの新しい設計方法を確立することである。厚みが出てかさばるといふレンズアンテナの構造上の課題を克服し、次世代ミリ波センサ用カバーとして利用可能な薄さと高い収束効果を併せ持った誘電体レンズを開発する。

薄型レンズの収束効果のメカニズムの解析および設計にはFDTD法(時間領域差分法)とトポロジー最適化を用いる。本研究では高誘電率材料の空間的な分布を高精細に設計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う。提案手法はガウス関数を局所的に用いるため微細な形状も表現可能であり、一般的な密度法と比較しても局所解に陥ることなく、汎用性の高い革新的な設計手法を提案することができる。本研究成果により、NGnetを用いた設計能力および設計の有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究ではミリ波アンテナとして高周波でも減衰が少ない導波管スロットアンテナを対象として誘電体レンズの設計を行った。導波管スロットアンテナは1スロットとし、誘電体レンズの設計領域はスロット上部に設ける。導波路はWR-10規格であり、内寸は2.54×1.27 mmである。動作周波数76 GHzにおいて解析および設計を行うこととし、FDTD法のセルサイズは波長より十分に小さい0.08 mmとした。導波管スロットアンテナのスロット長、スロットオフセットはアンテナの設計パラメータであり、オフセットは0.48 mmで固定した。

(1)FDTD解析

はじめに、導波管スロットアンテナからの放射の様子をFDTD解析により確認する。アンテナの極近傍に誘電体が配置されている状態では放射が小さくなることが予想されるため[2]、その減少の度合いと適切なスロット長を明らかにすることが解析の目的である。2つのアンテナモデルを定義し、誘電体レンズの設計パラメータの基礎的な特性を明らかにする。図1はスロットから誘電体レンズを浮かせた距離をGapと定義し、誘電体レンズの位置がスロットからの放射に与える影響を明らかにする。図1のモデルでは誘電体レンズが浮いているため、試作を考慮して周囲を誘電体で囲んだモデルが図2であり、その幅Wをパラメータとする。それぞれ、スロット長Lを変えて解析を行った。

図1のモデルにおいてGap=0 mmとして誘電体レンズがスロットに接しているときのスロット電力と比誘電率 ϵ_r の関係と、スロット電力とレンズの厚さtの関係を調べた結果を図3、図4にそれぞれ示す。スロット電力はスロットを通過する電力であり、ポインティングベクトルを用いて計算した。どちらもスロット長は1.92 mmである。図3は厚さt=1.92 mmで固定したときの結果であり、ミリ波帯では $\epsilon_r=2$ 程度の誘電体でもスロット電力が大きく減少することが分かった。また、図4は $\epsilon_r=11.3$ の高誘電率誘電体レンズを装荷時とときの結果であり、極めて薄いレンズを装荷した場合でもスロット電力は大きく下がること分かった。

次に、図1のモデルにおいてレンズの厚さをt=0.96, 1.92 mmとしてGapを変更したときのスロット長とスロット電力の関係を図5に示す。図5よりGapを大きくするとスロット電力が上昇することが分かった。図2のモデルでも同様の解析を行い、t=0.96 mm, Gap=1.2 mmの条件において誘電体の幅Wを変化させた。図6よりW=0.4 mm付近ではレンズ無装荷時と比較してス

ロット電力が約3倍になることが分かった。また図4と図6を比較してみると、最もスロット電力の値が小さくなった場合でも図4のレンズを装荷していない時のスロット電力よりも大きくなることことが分かった。

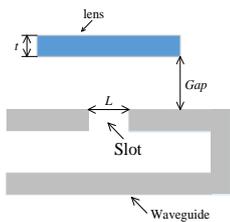


図1 アンテナモデル1

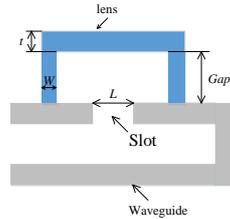


図2 アンテナモデル2

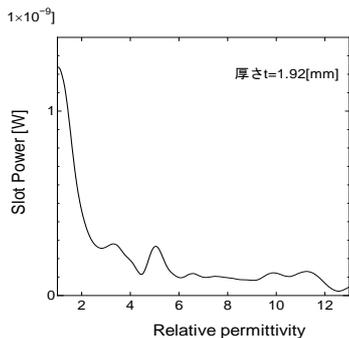


図3 スロット電力と比誘電率 ϵ_r の関係

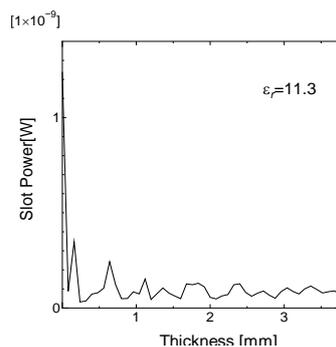
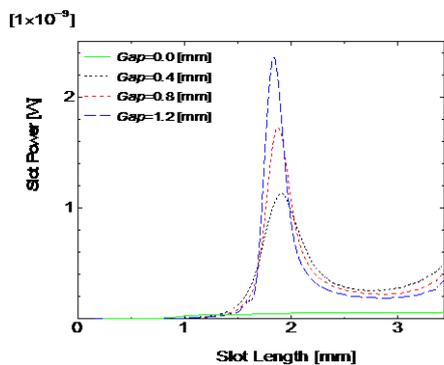
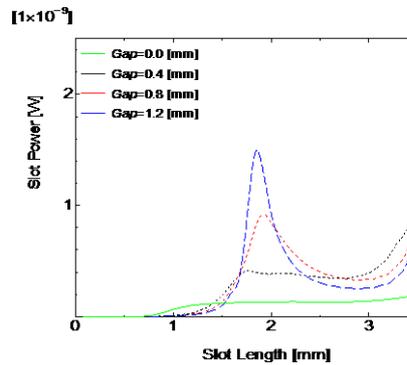


図4 スロット電力とレンズの厚さ t の関係



(a) $t=0.96\text{mm}$



(b) $t=1.92\text{mm}$

図5 スロット電力と Gap の関係

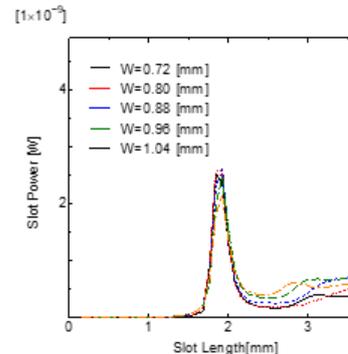
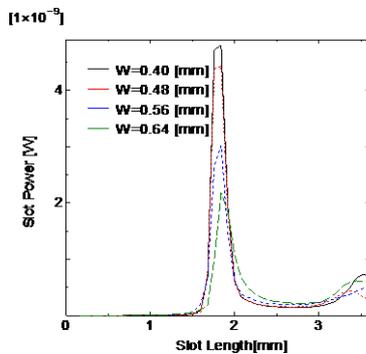
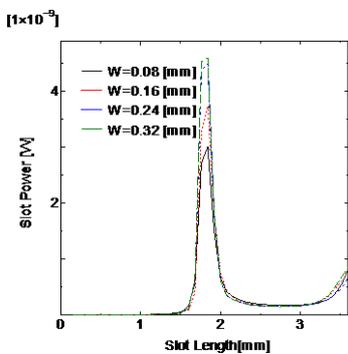


図6 スロット電力と誘電体レンズ枠の幅 W の関係

(2) トポロジー最適化

前述の解析結果より、誘電体に接した状態での設計は難しいことが分かった。そこで、本研究では設計領域が導波管スロットアンテナに接した状態（図7）と、アンテナから設計領域の間に空洞を挟んだ状態（図8）の2つのモデルについてトポロジー最適化による設計を行った。

本研究では誘電体レンズの形状設計を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により行う。トポロジー最適化はセル単位で物体の形状を対象に数理的な方法で所望の性能を最大限得ることができる形状を求める構造最適化の一手法である。On/Off法によるトポロジー最適化では市松模様となることが問題となるが、ガウス関数を用いることにより、セルを塊で扱うことが可能となる。また、ガウス基底数の調節により微細な表現も可能となる。図9はガウス基底数の配置イメージである。ガウス関数は分散を変更することにより空間の占有率を制御しやすく、平均値の変更により位置を移動させるのが容易であるためセルの制御が容易となる。本研究ではNGnetの基底関数に重み係数をかけて結合した関数近似器を用い、出力が正の空間をON（誘電体）とし、負の空間をOFF（空気）とした。基底関数の重み係数の最適化にマイクロ遺伝的アルゴリズムを（ μ GA）を導入した。

4. 研究成果

最適化は、 E 面、 H 面のビーム幅を最小化する目的関数(OF_1)と E 面、 H 面のサイドローブを最小化する目的関数(OF_2)の2つ最小化を同時に行う2目的最適化を行った。図7の設計モデルではビーム幅は狭まるものの、設計領域周囲に誘電体が配置されるような構造になり、設計領域がアンテナに接している場合は設計困難であることを確認した。

図8のモデルにおいて、導波管スロットアンテナとレンズを密着させずにレンズの設計領域を浮かせ、空洞部分を囲む誘電体の幅 $W=0.4$ mm、アンテナと設計領域の空間Gapと設計領域の厚さ t の和を H と定義し、表1の条件下で構造設計を行った。Normal lensは3Dプリンタのフィラメント材料であるPLA（ポリ乳酸）、厚さが半分のHalf lensと1/4のQuarter lensには利昌工業株式会社の高誘電率基板を想定した。Normal lensを従来型の誘電体レンズ、Half lensとQuarter lensを薄型誘電体レンズとして定義する。

設計結果は図10となり、各誘電体レンズではビーム幅が狭くなり、収束効果が得られていることが分かる。また、サイドローブレベルも従来のレンズよりも改善された。しかし、従来型のNormal lensよりも2つの薄型レンズにおいてビーム幅が広がる傾向にあることが分かった。これはガウス基底数が少なく、表現力が不足していることが原因であると考えられる。

そこで、ガウス基底数を大幅に増やした場合の構造設計を行った。Quarterモデルにおいて、ガウス基底の総和が16（ $4 \times 4 \times 1$ ）、128（ $8 \times 8 \times 2$ ）、1024（ $16 \times 16 \times 4$ ）と変化させ、最適化後の誘電体レンズを装荷時の放射パターンを比較した。図11に示すようにガウス基底数が増えるほど利得が上昇する傾向が得られ、ガウス基底数の増加に伴い表現力が改善し、設計能力が飛躍的に向上することが分かった。ガウス基底数が16と128の時ではピーク値で約5 dBほど違うため、基底数による設計能力の違いが顕著に表れた。しかし、ガウス基底数が128と1024を比較すると、ピーク値は改善するものの飽和傾向がみられた。図12(a)~(c)はそれぞれのガウス基底数における最適化されたレンズ形状である。比較するとレンズ形状の微細さはガウス基底数に依存していることが分かる。

誘電体レンズによる収束効果についても検証した結果、本研究で設計した薄型誘電体レンズは従来のレンズと比較すると従来のレンズは厚さ3.84 mmに対して本研究の薄型誘電体レンズは厚さ2.16 mmと約60%の厚さにもかかわらず同等の収束効果を得られ、遠方界において利得を約6 dB改善する可能性があることを示した。

解析結果よりアンテナと誘電体レンズ間の距離が必要であることが分かったため、設計した誘電体レンズの厚みは波長の1/4程度まで薄くできたが、誘電体レンズ全体としては半波長程度の厚さとなった。誘電体レンズ全体でもさらなる軽薄化を実現するために、今後は薄型誘電体レンズの構造を進化させ、空間インピーダンスを考慮した傾斜材料を用いた設計および試作を行う予定である。また、ミリ波デバイスは今後ますます高周波化が進むことが想定されるため、誘電体レンズのみならず誘電体線路や分岐などの微細な設計にも本設計法を応用していく予定である。

<引用文献>

- [1] T. Nose, et al., "Basic performance of a liquid crystal millimeter wave Fresnel lens fabricated using machinable porous polymethylmethacrylate materials," *Molecular Crystals and Liquid Crystals, MCLC*, Vol.647, 1-10, 2017.
- [2] M.C. Bailey, "Design of dielectric-covered resonant slots in a rectangular waveguide," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol.AP-15, No.5, pp.594-598, 1967.

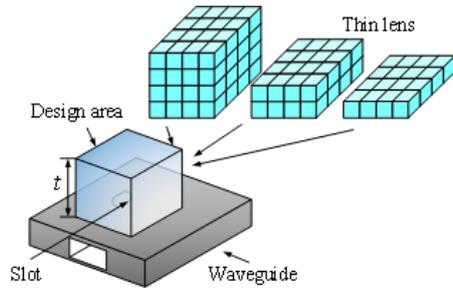


図7 設計モデル1

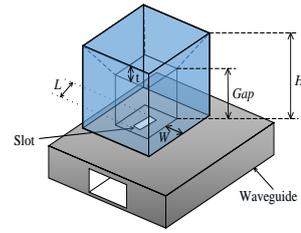
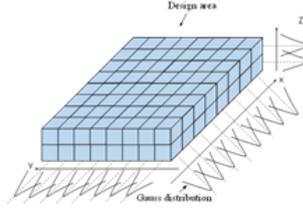
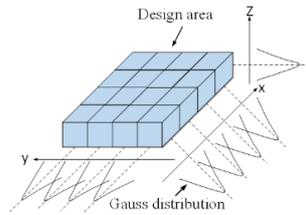


図8 設計モデル2



(a) Gauss basis = $4 \times 4 \times 1$ (b) Gauss basis = $8 \times 8 \times 2$

図9 ガウス基底数とガウス関数の関係

表1 設計領域のパラメータ

	Normal lens	Half lens	Quarter lens
t [mm]	3.84	1.92	0.96
H [mm]	5.04	3.12	2.16
ϵ_r	2.6	11.3	11.3
$\tan\delta$	0.003	0.003	0.003
Refractive index	1.5	3.4	3.4
Dielectric wavelength[mm]	2.66	0.77	0.77
Number of Gaussian Basis	64 ($4 \times 4 \times 4$)	32 ($4 \times 4 \times 2$)	16 ($4 \times 4 \times 1$)

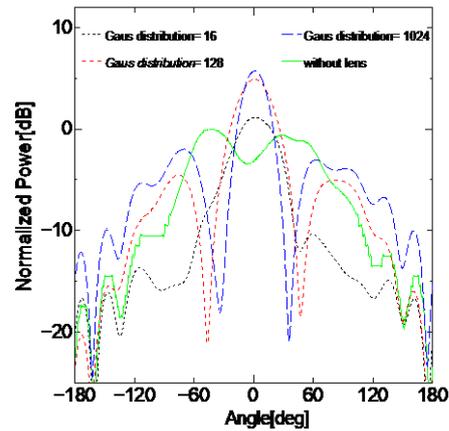
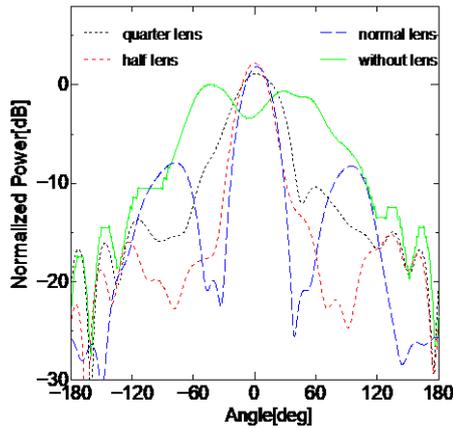
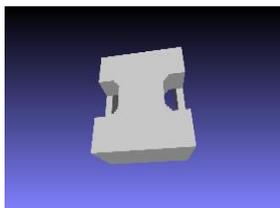


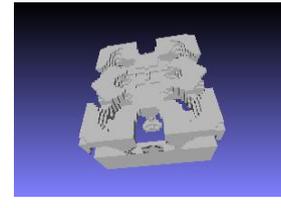
図10 レンズの厚さと放射パターンの関係 図11 ガウス基底数と放射パターンの関係



(a) Gaussian basis=16



(b) Gaussian basis=128



(c) Gaussian basis=1024

図12 最適化後の誘電体レンズの形状

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 戸賀瀬駿, Hanna SALMINEN, 田中将樹, 伊藤桂一
2. 発表標題 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GAを用いた形状設計
3. 学会等名 令和2年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 船木誠哉, 新井場貴寛, 田中将樹, 伊藤桂一
2. 発表標題 FSSを組み合わせた周波数選択性スロットアンテナの開発
3. 学会等名 令和2年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸賀瀬駿, 伊藤桂一, 田中将樹, 五十嵐一
2. 発表標題 ミリ波導波管スロットアンテナ用薄型誘電体カバーの設計
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス in 大津
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 船木誠哉, 佐藤裕汰, 田中将樹, 伊藤桂一
2. 発表標題 FSSを組み合わせた周波数選択性スロットアンテナの設計
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸賀瀬駿, 田中将樹, 伊藤桂一
2. 発表標題 ミリ波導波管スロットアンテナ用薄型誘電体レンズの設計
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keiichi Itoh, Kazuma Takita, Masaya Kumata, Hideaki Matsuda, Masaki Tanaka, Hajime Igarashi
2. 発表標題 Development of Novel Dielectric Cover for Millimeter-wave Band Waveguide Slot Array Antenna
3. 学会等名 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤裕汰, 田中将樹, 伊藤桂一
2. 発表標題 周波数選択性を有するスロットアンテナの開発に関する解析的検討
3. 学会等名 令和元年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滝田和真, 田中将樹, 伊藤桂一
2. 発表標題 ミリ波導波管スロットアレーアンテナに装荷する半球付き誘電体カバーの形状設計と試作
3. 学会等名 令和元年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichi Itoh, Kohei Shida, Hajime Igarashi
2. 発表標題 Study on performance improvement of waveguide power divider using evolutionary method
3. 学会等名 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahide Omori, Keiichi Itoh
2. 発表標題 Fundamental study on development novel design method combining topology optimization and machine learning for dielectric lens antenna
3. 学会等名 4th International Conference of "Science of Technology Innovation" 2019 (STI-Gigaku2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke MIURA, Tsukasa SUSUGA, Masaki TANAKA, Keiichi ITOH
2. 発表標題 Development of millimeter wave water level detector using horn antenna with topology optimized radome
3. 学会等名 4th International Conference of "Science of Technology Innovation" 2019 (STI-Gigaku2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta SATO, Masaki TANAKA, Keiichi ITOH
2. 発表標題 Analytical study on development of slot antenna with frequency selectivity
3. 学会等名 4th International Conference of "Science of Technology Innovation" 2019 (STI-Gigaku2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森宇栄, 伊藤桂一
2. 発表標題 機械学習を援用したアンテナ用誘電体レンズの形状設計に関する研究
3. 学会等名 第25回高専シンポジウム in Kurume
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤海斗, 伊藤桂一
2. 発表標題 ミリ波を用いたマルチコプター搭載クラック検知システムの解析的検討
3. 学会等名 第25回高専シンポジウム in Kurume
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦悠介, 煤賀司, 田中将樹, 伊藤桂一
2. 発表標題 ミリ波ホーンアンテナ用誘電体レドームのトポロジー最適化による形状設計
3. 学会等名 第25回高専シンポジウム in Kurume
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤裕汰, 田中将樹, 伊藤桂一, 佐々木友之
2. 発表標題 THz液晶デバイスのトポロジー最適化に関する基礎的検討
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 滝田和真, 田中将樹, 伊藤桂一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐々木 友之 (SASAKI Tomoyuki) (90553090)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	松田 英昭 (MATSUDA Hideaki)		
研究協力者	佐藤 裕汰 (SATO Yuta)		
研究協力者	滝田 和真 (TAKITA Kazuma)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	鈴木 裕野 (SUZUKI Yuya)		
研究協力者	戸賀瀬 駿 (TOGASE Shun)		
研究協力者	船木 誠哉 (FUNAKI Seiya)		
研究協力者	佐藤 海斗 (SATO Kaito)		
研究協力者	大森 宇栄 (OMORI Takahide)		
研究協力者	三浦 悠介 (MIURA Yusuke)		
研究協力者	新井場 貴寛 (NIIBA Takahiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------