

アナログ・デジタル融合制御 MIMO に適したアナログビームフォーミング給電回路の研究

研究代表者

関 智弘

日本大学 生産工学部 教授

1 まえがき

移動通信の高速化に向けた検討として MassiveMIMO 技術の適用が進められている。MassiveMIMO 技術を適用する場合、MIMO に関わるすべての処理をデジタル制御により行うとすると、莫大な重み付け演算処理が必要となる。そこで、レーダー等に用いられるマルチビーム給電回路を用い、初期重み付けを行うことにより、ある程度の無線ゾーンを形成することで、MIMO 制御を簡略化するアナログ・デジタル融合制御を用いた MIMO システムの構築が検討されている。アナログビーム成型回路にはロスレス回路が知られており、その代表例としてバトラーマトリクス給電回路が知られている。しかしながら、入出力端子が増えると構成が複雑となり実現性が困難となるという問題がある。そこで、マルチビーム給電回路を簡易に実現する構成としてレンズ給電回路の適用が考えられる。平面系で構成する場合にはロットマンレンズ給電回路を用いることが考えられるが、無線エリアを 2 次元配置で構成することを考えた場合、ルーネベルグレンズを用いた構成が適していると考えられる。なお、ルーネベルグレンズはアンテナ放射面が球体となっており、そのままビーム成型することを目的としているため、給電回路として用いることはできない。そこで、ルーネベルグレンズを用いて、ロットマンレンズ給電回路同様に入出力端子を組み合わせることによりマルチビーム給電回路を実現することを検討している [1]-[4]。なお、誘電体を用いてレンズを構成する場合、周波数が高いと誘電体損失が無視できなくなることから電気的特性を優先し、PTFE 樹脂を用いて試作・検討を行ってきた。しかしながら、PTFE 樹脂を用いた場合はコストが非常にかかることや、大型のレンズを構成することが困難などの課題がある。そこで、マイクロ波帯をベースに適用することを想定し、大型でかつ低コストで誘電体レンズを実現するため、3D プリンタを用いて構成することを検討した。なお、これまでミリ波帯基板材料で適用される PTFE 樹脂を用いた誘電体レンズを検討してきており、1 種類の誘電体材料により球体の比誘電率を変化させる手法として空気穴密度を変化させることによる実現法を検討してきた (図 1 参照)。そこで、1 種類の誘電体材料に水溶性サポート材により空気穴を構成できる機種が必要となる。

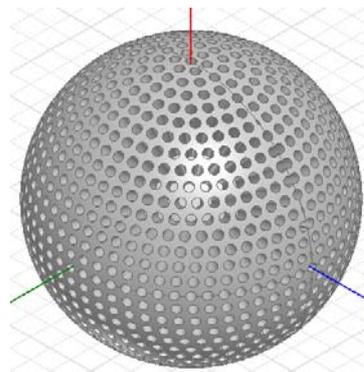


図 1 空気穴密度による誘電体レンズ構成 (100mm φ イメージ)

2 3D プリンタの選択

次に 3D プリンタ機種を選定についてであるが、どの種類の樹脂が使用可能であり、その電気的特性はどうか、また製作精度はどうかにより、適用可能な周波数特性が決まってしまう。3D プリンタで適用できる樹脂材としては、今回作成する空気穴付誘電体レンズは空気穴を多数構成する必要があり、マイクロ波帯で適用可能な電気的特性の優れた材料が使える必要がある。そこで比較的安価で高い製造精度が取れる FDM 方式の 3D プリンタを想定した場合、使用可能な代表的な材料としては ABS 樹脂 (比誘電率 2.4~3.6、誘電正接 0.007

～0.015)、Nylon12 樹脂 (比誘電率 2.1 等組成により異なる、誘電正接 0.03 等)、ポリプロピレン樹脂 (比誘電率 2.2～2.6、誘電正接 0.0005～0.0018)、ポリカーボネート樹脂 (比誘電率 3.1、誘電正接 0.010) などがある。これらのうち、高周波特性に影響する誘電正接が比較的低い材料として ABS 樹脂やポリプロピレン樹脂が適していると考えられる。また、空気穴を大量に安定して作り込むためには、水溶性サポート樹脂を同時に使用できるデュアルポートを持つ機種を選定する必要がある。また、マイクロ波帯以上の周波数帯で使用可能とするためには製作精度 100 μm 程度以上の精度を確保する必要がある。また、マイクロ波帯において無線ゾーン成型を行うためには 3dB ビーム幅として 10 度程度を実現したいと考えており、そのためには直径 20cm 程度の球体レンズを実現する必要がある。そこで、3D プリンタとしては 20cm×20cm×20cm 以上のサイズを加工できる製品でかつ、複数の樹脂を選択でき、かつ、製作精度として 50 μm 程度を実現できる機種を選定し、BRULE 製「Ultimaker3 Extended」を購入した。本機の仕様を以下に示す。

・仕様

- ・印刷方式：FDM 方式
- ・ノズル径：0.4mm
- ・最小積層ピッチ：0.02mm
- ・最大出力サイズ：215mm (幅) × 215mm (奥行き) × 300mm (高さ)
- ・使用可能素材：PLA、ABS、CPE、ナイロン、水溶性サポート樹脂

3 誘電体レンズの設計

次に誘電体レンズの解析について述べる。今回試作する誘電体レンズは形状として 20cm φ を目指したが、製作時間が約 1 ヶ月と長期にわたるため、特性検証を優先し、10cm φ の球体レンズでの試作を想定した。電磁界解析手法として時間領域差分法 (FDTD 法) を用いて空気穴密度による誘電体レンズの設計を行った。用いる樹脂材により比誘電率が異なることから設計を個々に変更しなければならないが、ここでは基準となる PTFE 樹脂を用いた場合の設計を用いる (表 1 参照)。なお、この構成時の比誘電率は PTFE 樹脂を 2.1 とすると空気穴密度により 1.62 まで 5 段階の変化が生じる構成となっている。

表 1 100mm φ 球体への空気穴 (3.3mm φ) 配置及び深さ

穴深さ(mm)	42mm		33mm		25mm		17mm		8mm		
球直径=120mm ドリル直径=4mm	水平角度 ピッチ (deg)	穴数(穴)	水平角度 ピッチ (deg)	穴数(穴)	水平角度 ピッチ (deg)	穴数(穴)	水平角度 ピッチ (deg)	穴数(穴)	水平角度 ピッチ (deg)	穴数(穴)	
垂直角度 (deg)	0.000	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	0.000	1	
	5.625							60.000	6	30.000	12
	11.250						60.000	6	30.000	12	
	16.875								20.000	18	
	22.500					60.000	6	30.000	12	15.000	24
	28.125								12.000	30	
	33.750							20.571	17	10.286	35
	39.375								9.000	40	
	45.000			64.000	5	32.000	11	16.000	22	8.000	45
	50.625								7.347	49	
	56.250							13.585	26	6.792	53
	61.875								6.429	56	
	67.500					24.407	14	12.203	29	6.102	59
	73.125								5.902	61	
	78.750							11.613	31	5.806	62
84.375								5.714	63		
90.000	90.000	4	45.000	8	22.500	16	11.250	32	5.625	64	
半球穴数合計(穴)		5		14		48		175		678	
全球穴数合計(穴)		6		20		80		318		1292	
深さ毎のドリル穴数(穴)		6		14		60		238		974	
ドリル加工穴数合計(穴)										1292	
推定比誘電率		2.06		2.06		2.02		1.92		1.62	

3Dプリンタで使用する樹脂材料の電気特性は正確には公表されていないため、代表値で設定し、解析を行う。ここではナイロン樹脂を比誘電率3.1、ABS樹脂を2.8、ポリプロピレンを2.4とした。また、解析は電磁波の波源として同軸導波管変換器を用い、誘電体レンズには5mm離して配置した場合の特性を示す。また、周波数は10GHzとした。まず、同軸導波管変換器単体の3次元指向特性を図2に示す。利得は8.3dBiであった。次にナイロン樹脂時の特性を示す。なお、誘電体レンズでは比較のため、空気穴を構成した場合と空気穴なしの場合を解析した。空気穴なし時の3次元指向特性を図3(a)に、2次元の指向特性を図3(b)に示す。同図(a)から利得は18.4dBiであることがわかる。また空気穴有りの場合の3次元指向特性を図4(a)に、2次元の指向特性を図4(b)に示す。なお、利得は15.6dBiであり、設定の比誘電率が合っていないと考えられる。

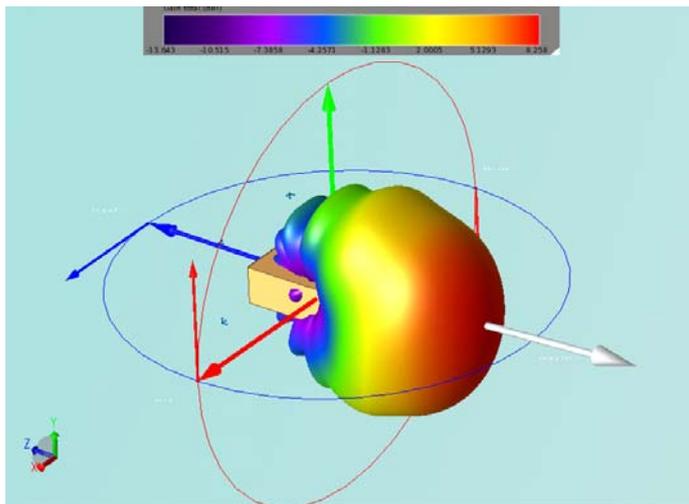


図2 同軸導波管変換器の指向特性

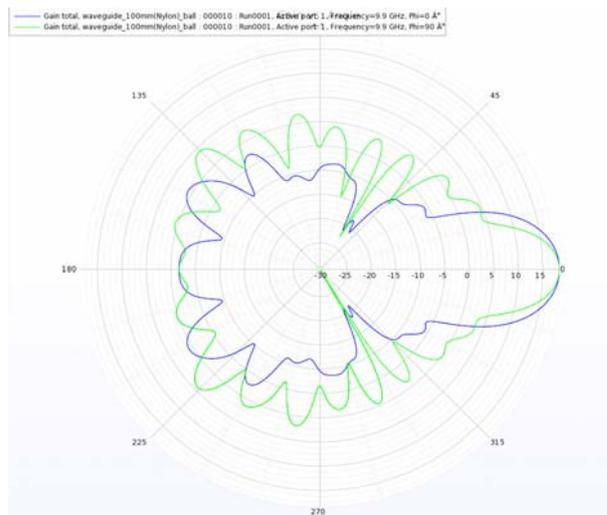
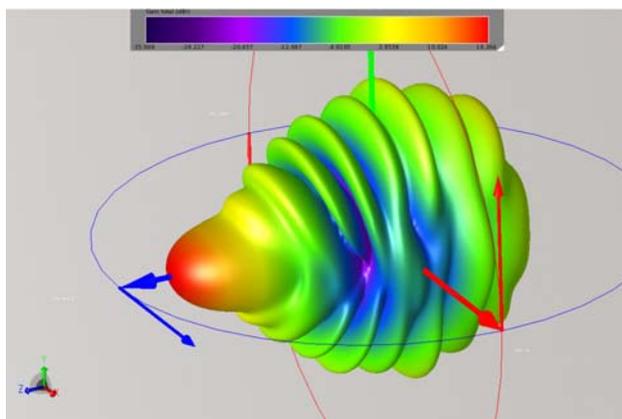


図3(a) 指向特性（ナイロン、穴なし） 図3(b) 指向特性（ナイロン、穴なし）

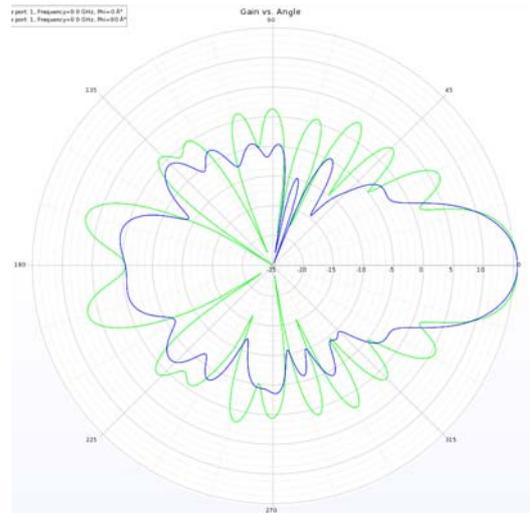
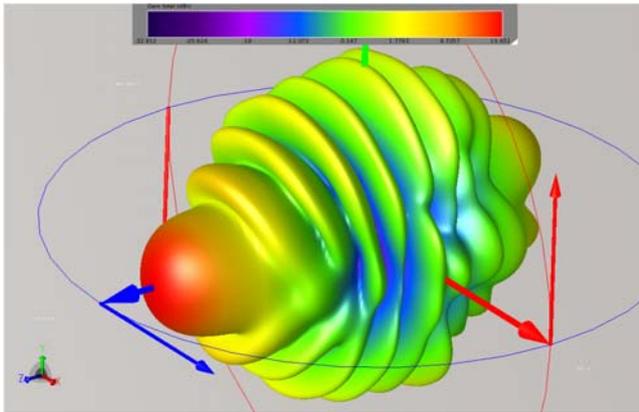


図 4(a) 指向特性 (ナイロン、穴有り) 図 4(b) 指向特性 (ナイロン、穴有り)

次に ABS 樹脂を用いた場合の解析結果を示す。空気穴なし時の 3 次元指向特性を図 5(a)に、2 次元の指向特性を図 5(b)に示す。同図(a)から利得は 18.6dBi であることがわかる。また空気穴有りの場合の 3 次元指向特性を図 6(a)に、2 次元の指向特性を図 6(b)に示す。なお、利得は 18.3dBi であり、穴有り と穴なし時の特性の差が小さく、サイドローブが抑圧されていることから空気穴による比誘電率の変化の効果が見られる。次に PP 樹脂を用いた場合の解析結果を示す。空気穴なし時の 3 次元指向特性を図 7(a)に、2 次元の指向特性を図 7(b)に示す。同図(a)から利得は 18.8dBi であることがわかる。また空気穴有りの場合の 3 次元指向特性を図 8(a)に、2 次元の指向特性を図 8(b)に示す。なお、利得は 18.9dBi であり、穴有り と穴なし時の特性の差が小さく、サイドローブが抑圧されていることがわかる。以上の解析はベースとなる PTFE 樹脂時の設計を元に行っているため、比誘電率が 2.1 に近い場合に誘電体レンズとしての特性が得られるが、これまでの検討で得られている空気穴径による遮断特性等がないことが解析で理解できる。これらの解析を元に一例として誘電体レンズを試作し、電气的特性から 3D プリントによりマイクロ波帯における誘電体レンズが製作可能かどうかについて検証を行う。

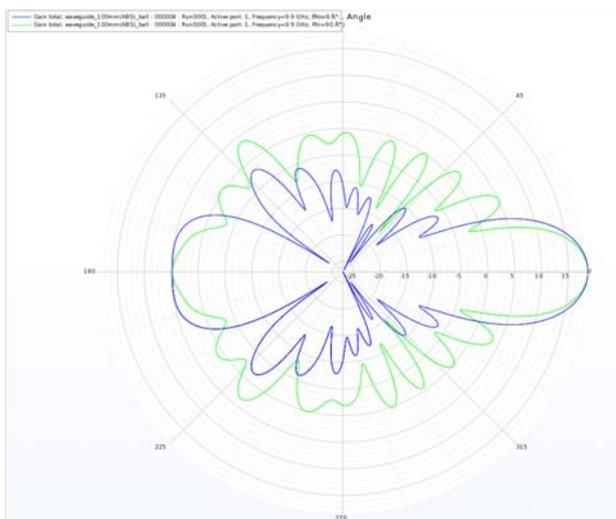
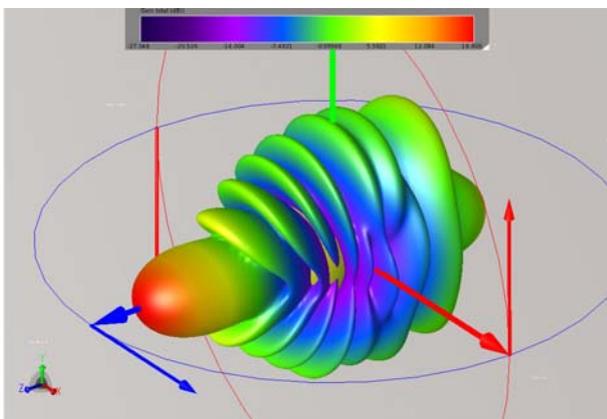


図 5(a) 指向特性 (ABS、穴なし)

図 5(b) 指向特性 (ABS、穴なし)

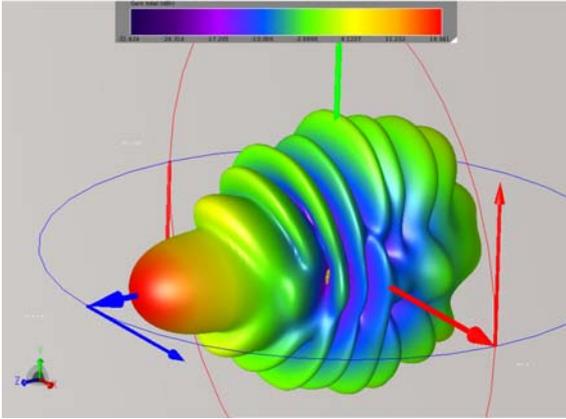


図 6(a) 指向特性 (ABS、穴有り)

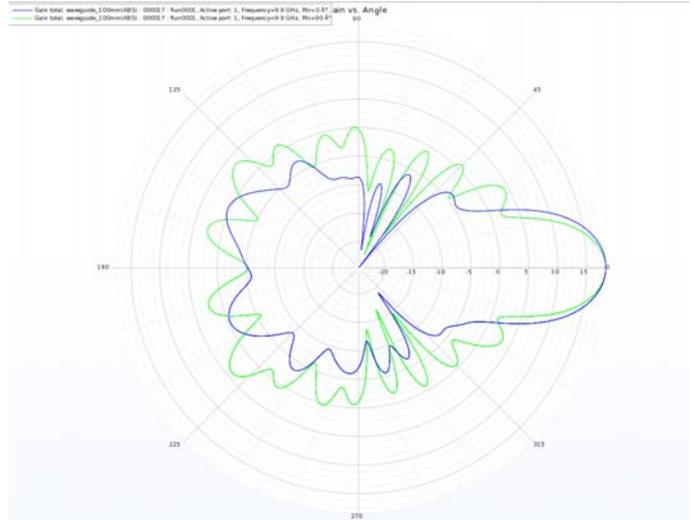


図 6(b) 指向特性 (ABS、穴有り)

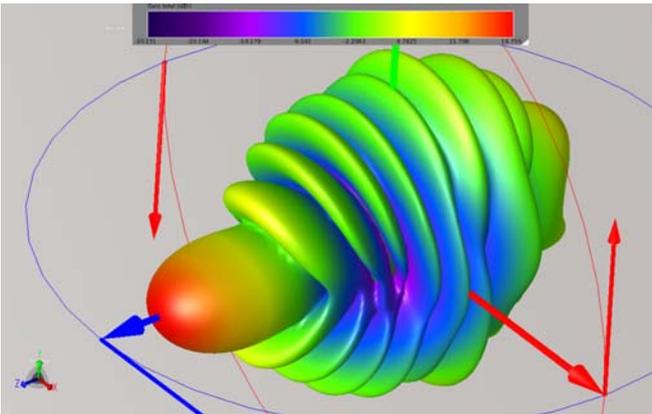


図 7(a) 指向特性 (PP、穴なし)

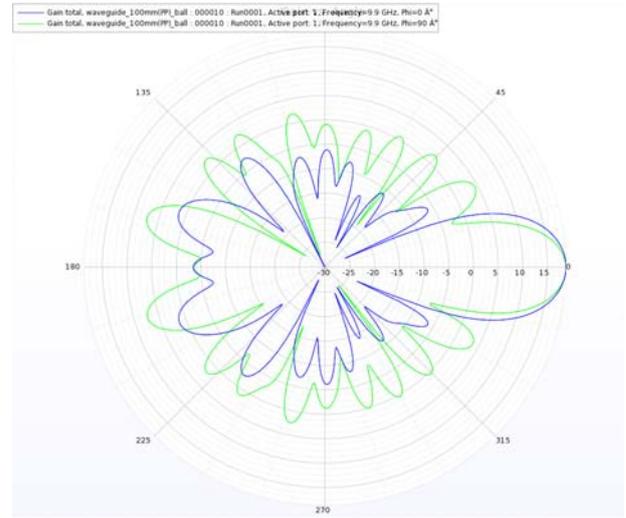


図 7(b) 指向特性 (PP、穴なし)

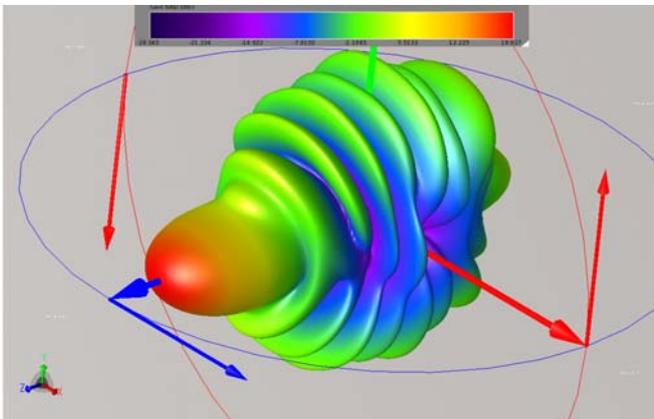


図 8(a) 指向特性 (PP、穴有り)

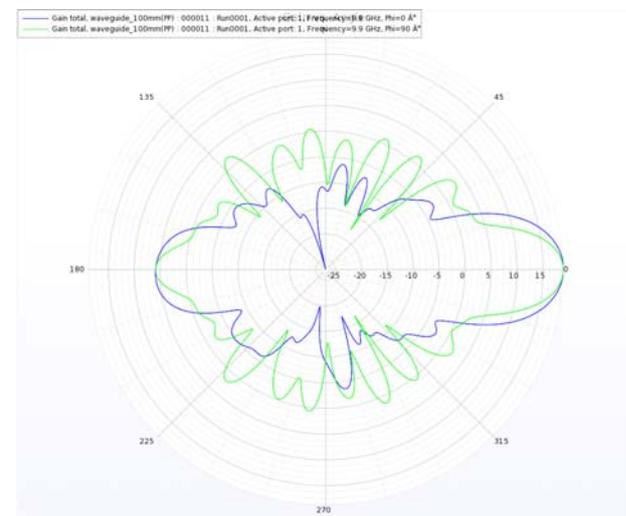


図 8(b) 指向特性 (PP、穴有り)

4 試作結果

次に 3D プリンタにより試作を行ったので報告する。比誘電率については公表されていないため、ここではマイクロ波帯で実績があるレジン（ナイロン系）樹脂で試作を行った。10cm φ の球体誘電体レンズを試作した。誘電体レンズの写真を図 9 に示す。誘電体レンズの近接させた同軸同波管変換器から放射させた場合のレンズ表面の振幅・位相分布を測定した。なお、測定は NTT 未来ねっと研究所の近傍界測定系をお借りして行った。また、周波数は同軸導波管変換器の帯域特性から 7GHz、9GHz 及び 11GHz とした。

7GHz 時の誘電体レンズがある場合の振幅・位相特性をそれぞれ図 10(a)及び図 10(b)に示す。また、誘電体レンズがない場合の振幅・位相特性を図 11(a)及び図 11(b)にそれぞれ示す。これらの図から、振幅はレンズがある場合、レンズ表面に電力が集中していることがわかる。なお、位相に関しては十分な平面波にはなっていないことがわかる。誘電体レンズとしては動作しているが、比誘電率が設計の PTFE 樹脂時とは異なることから位相が調整できていないことがわかる。これは電磁界解析時の結果からも明かである。また、周波数 9GHz の誘電体レンズ有り時の振幅・位相特性をそれぞれ図 12(a)及び図 12(b)に示す。また誘電体レンズなし時の振幅・位相特性をそれぞれ図 13(a)及び図 13(b)に示す。さらに周波数 11GHz 時の誘電体レンズ有り時の振幅・位相特性をそれぞれ図 14(a)及び図 14(b)に示す。同様に誘電体レンズなし時の振幅・位相特性を図 15(a)及び図 15(b)にそれぞれ示す。これらの図から周波数があがると若干であるが位相特性が平坦になることがわかる。振幅が集中することから、誘電体レンズとしては動作していることが明らかになった。



図 9 誘電体レンズ

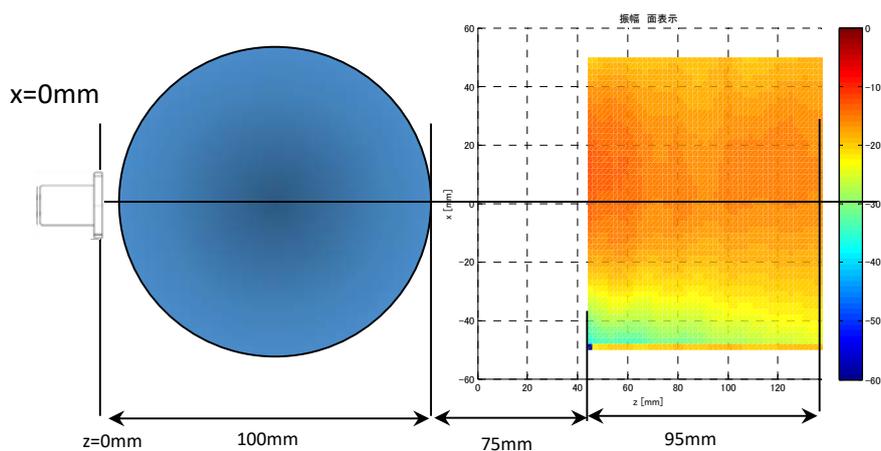


図 10(a) 振幅特性（レンズ有り、7GHz）

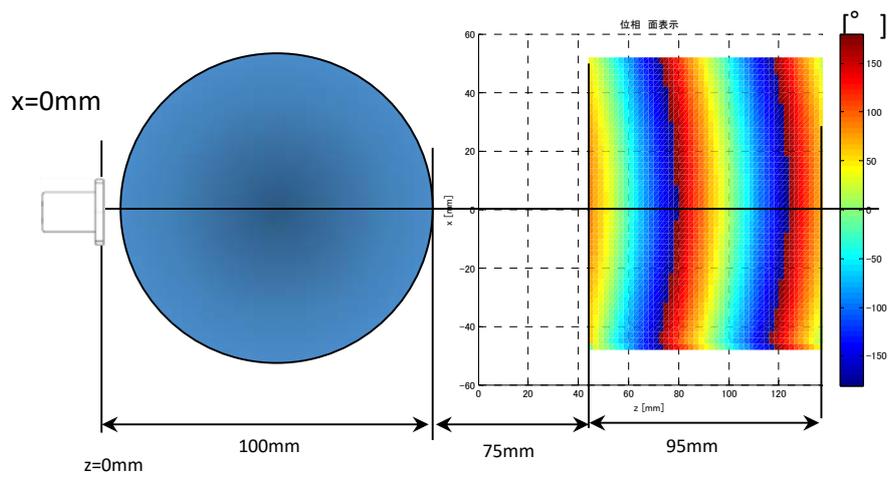


図 10(b) 位相特性 (レンズ有り、7GHz)

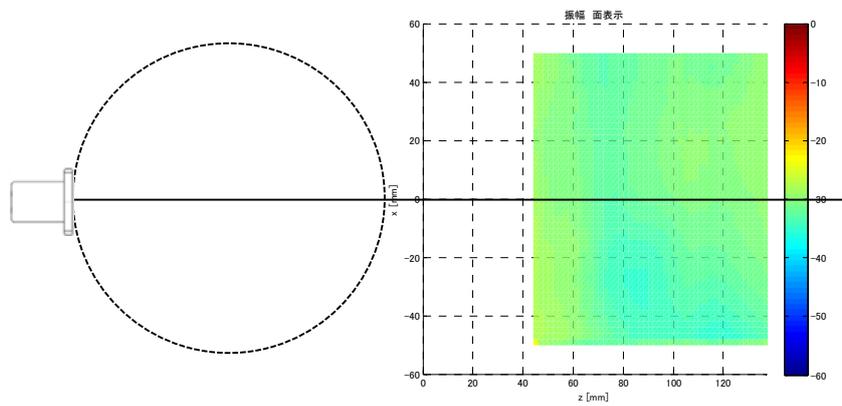


図 11(a) 振幅特性 (レンズなし、7GHz)

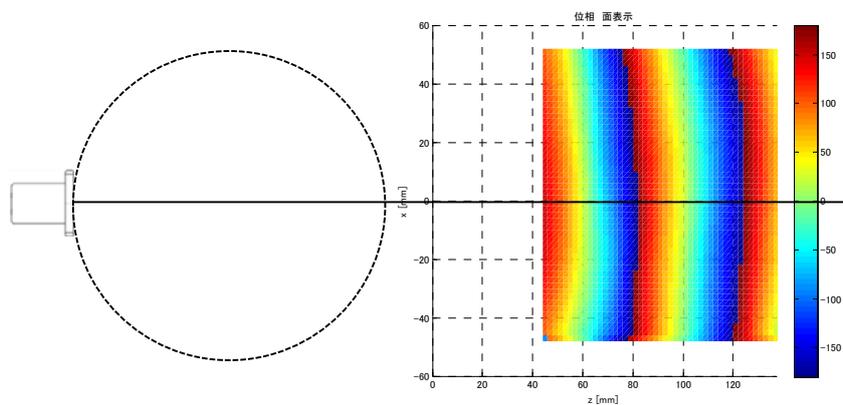


図 11(b) 位相特性 (レンズなし、7GHz)

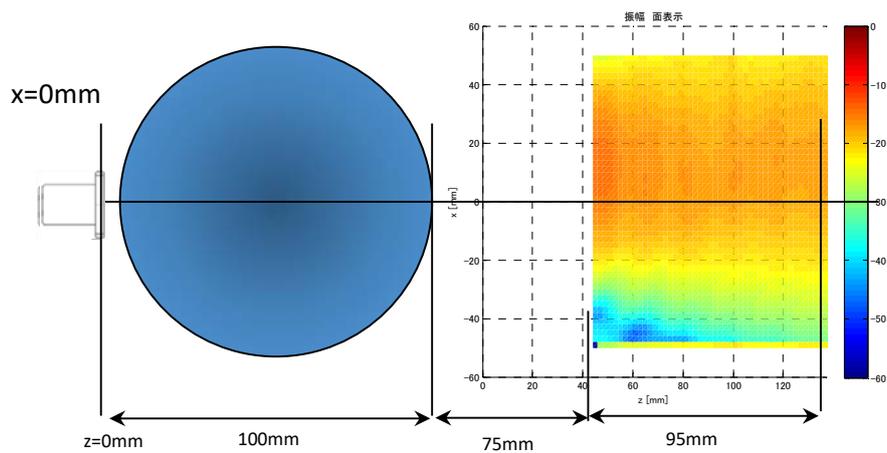


図 12(a) 振幅特性 (レンズ有り、9GHz)

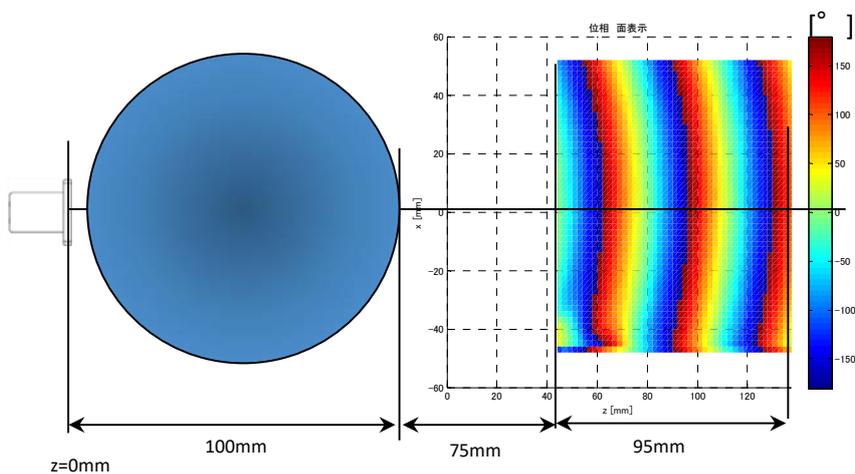


図 12(b) 位相特性 (レンズ有り、9GHz)

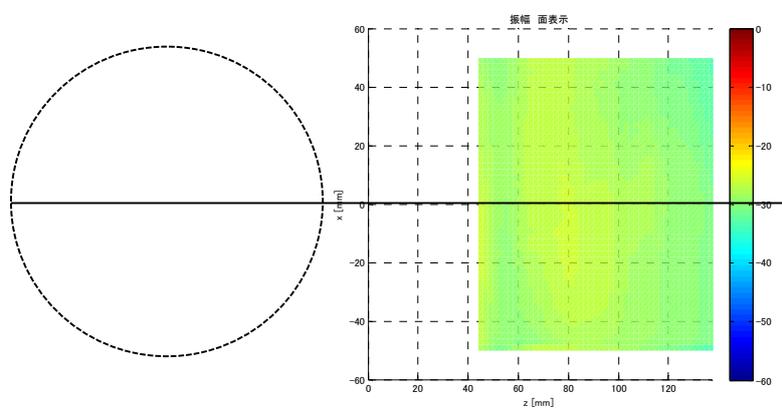


図 13(a) 振幅特性 (レンズなし、9GHz)

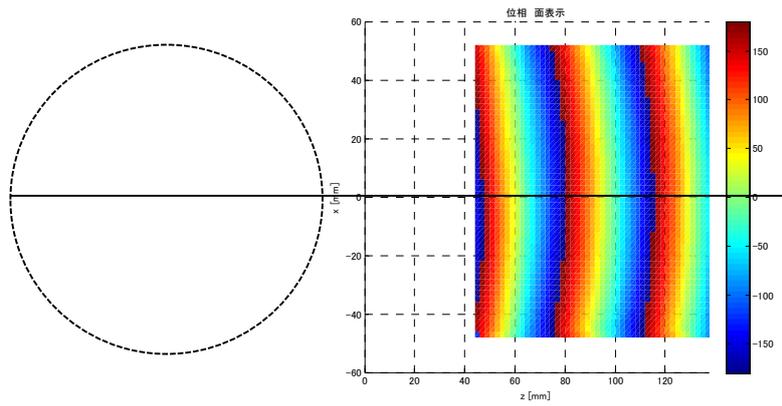


図 13(b) 位相特性 (レンズなし、9GHz)

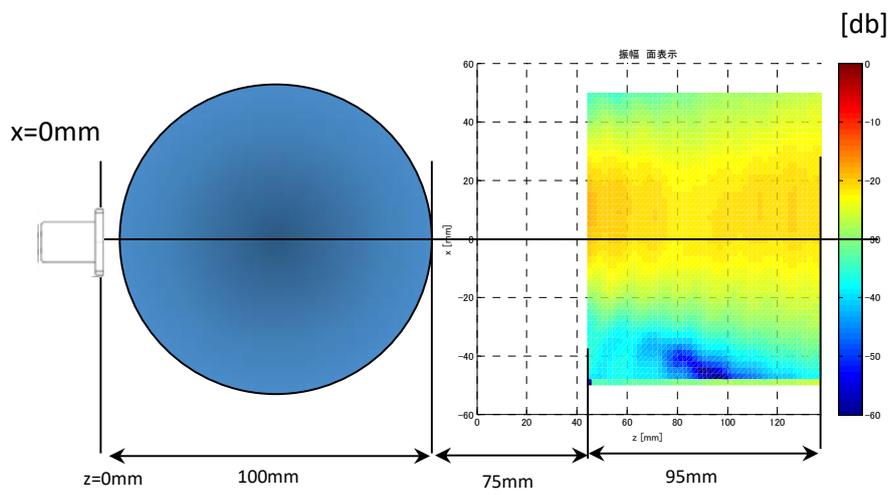


図 14(a) 振幅特性 (レンズ有り、11GHz)

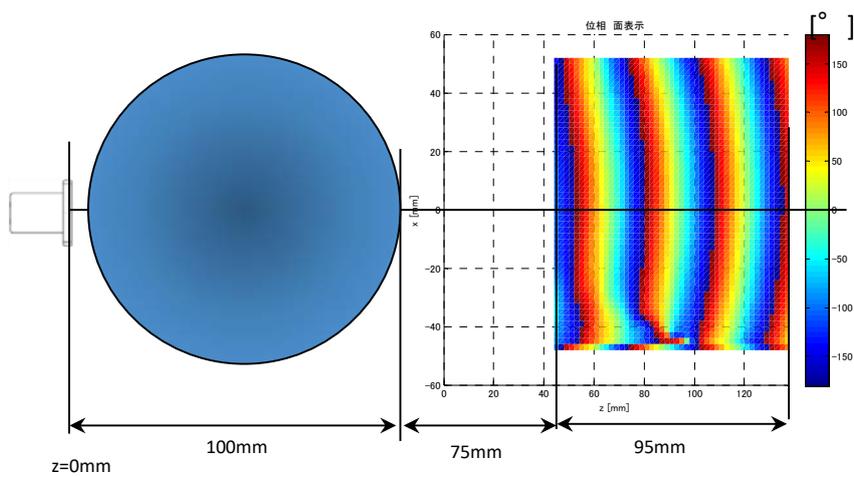


図 14(b) 位相特性 (レンズ有り、11GHz)

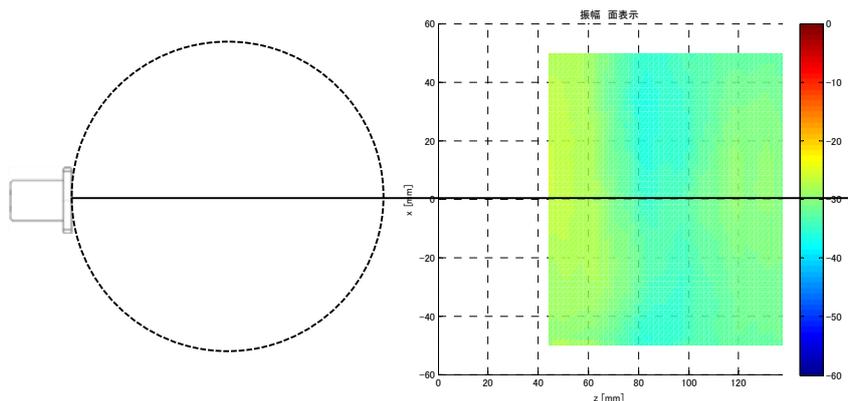


図 15(a) 振幅特性 (レンズなし、11GHz)

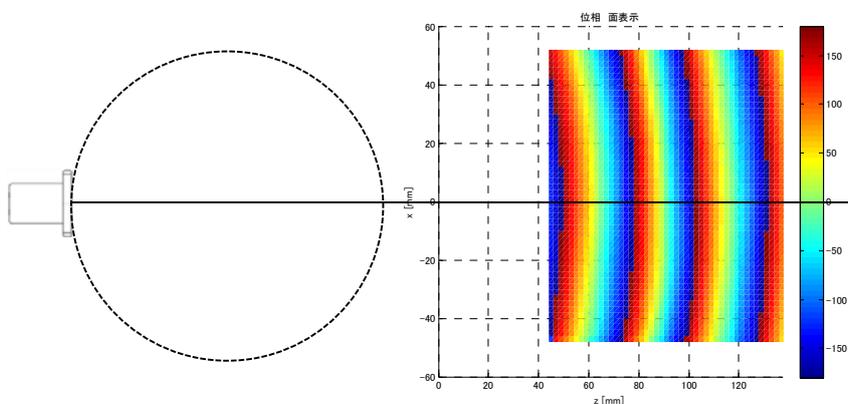


図 15(b) 位相特性 (レンズなし、11GHz)

5 まとめ

アナログ・デジタル融合 MIMO 用マルチビーム給電回路として誘電体レンズによる実現を想定し、簡易に製作できる 3D プリンタを用いた設計及び試作を行い、誘電体レンズとして適用可能であることを示した。今後、各樹脂の比誘電率を計測し、それぞれの樹脂に適した比誘電率変化を空気穴により実現する必要がある。また、入出力端子として平面アンテナアレーを配置した検討を行う予定である。

【参考文献】

- [1]新井 麻希, 山口 陽, 関 智弘, "ミリ波帯マルチビームを用いたスポットセル形成技術に関する一検討", 2016 電子情報通信学会総合大会, B-1-172, 3月 2016 年.
- [2]関 智弘, 新井麻希, 宮武 遼, 山口 陽, "誘電体レンズを用いたマルチビーム給電回路の基礎検討," 2016 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-122, 9月 2016 年.
- [3]新井麻希, 宮武 遼, 山口 陽, 関 智弘, "超高速スポットセル形成のためのマトリクス給電回路に関する一検討," 2016 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-121, 9月 2016 年.
- [4]関 智弘, 鹿志村亮介, 坂口浩一, 西森健太郎, "誘電体レンズに適した比誘電率制御法に関する検討", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-19-1, 9月 2017 年.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
3Dプリンタを用いた空気穴密度制御誘電体レンズの検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	2018年9月