

低損失フッ素樹脂基板を用いた車載ミリ波アンテナ

Millimeter-Wave Automotive Antenna Using Low-Loss Fluororesin Substrate

三木 祐太郎*
Yutaro Miki

福永 貴徳
Takanori Fukunaga

山岸 傑
Suguru Yamagishi

桑山 一郎
Ichiro Kuwayama

完全自動運転の実現に向けて、車両や歩行者などを検知する装置として、車載ミリ波レーダの役割が今後ますます重要になる。車載ミリ波レーダでは一般的にプリント基板を用いたアンテナが採用されるが、ミリ波信号は伝送損失が大きいので、プリント基板には低損失性能が要求される。当社ではフッ素樹脂を用いた低損失プリント基板を開発しており、ミリ波伝送特性について評価を行った結果、良好な低損失性を示すことを確認した。また本基板を用いたミリ波帯アンテナの設計・試作評価の結果、既存のミリ波向けプリント基板を用いた場合と比較し、アンテナ面積を約40%小型化できることを確認した。

In order to realize autonomous driving, the millimeter-wave automotive radar will become more and more important. This radar basically uses print circuit boards (PCBs), and therefore PCBs are required to have low-loss characteristics because transmission loss is very high in the millimeter-wave. We have been developing low-loss PCBs made of fluororesin. In this study, we evaluated our fluororesin substrate and confirmed favorable transmission characteristics. Using the substrate, we also prototyped an array antenna for millimeter-wave automotive radar and successfully downsized the surface area of the antenna by approximately 40% compared to the conventional ones in the market.

キーワード：アンテナ、ミリ波レーダ、フッ素樹脂基板

1. 緒 言

近年、ミリ波ICデバイスの低価格化が進んだことを背景に、衝突防止や車間距離制御のための76GHz帯車載ミリ波レーダの普及が急速に進んでいる。現状の衝突防止や車間距離制御の目的に留まらず、今後の自動運転技術の進展に伴い、あらゆる方向の車両や歩行者の検知が必要となるため、車両1台に搭載されるミリ波レーダの数は増加する(図1)。ミリ波レーダはカメラやLiDAR^{*1}のような他のセンサ装置に比べ、悪天候や夜間等の視界が悪い状況でも対象物を検知できる特徴がある。また76GHz帯ミリ波レーダは車載に限らず、インフラ側においても車両検知用レーダとしての利用の検討が報告されており^{(1),(2)}、ミリ波レーダは車載・インフラ双方で重要な役割を担う。

当社では、ミリ波向けの低損失フッ素樹脂プリント基板材料を開発しており、本稿ではミリ波帯の伝送特性評価した結果、車載ミリ波レーダを想定したアンテナを設計し、試作評価した結果の2点について報告する。

2. ミリ波向けプリント基板材料

2-1 車載ミリ波レーダのアンテナ

レーダ装置は自らが発した電波がターゲットによって反射され、その電波を受信することによりターゲットを検知するため、電波を送受信するアンテナが必要である。車載ミリ波レーダのアンテナには、コストや設計自由度の観点から、プリント基板を用いたマイクロストリップアンテナ(Micro Strip Antenna, MSA)が採用されることが多い^{(3)~(5)}。しかしMSAを用いる場合、ミリ波帯では、送受信回路とアンテナの間を接続するマイクロストリップ線路(Micro Strip Line, MSL)等の伝送線路で発生する損失が大きく、この損失によるアンテナ利得低下がレーダの遠距離性能の劣化要因になる。レーダ検知距離の向上、つまりアンテナ利得を高めるためには、アンテナの面積を大きくすれば良いが、一方で前述したように車両へ搭載されるレーダ装置の数は今後増加するとみられており、搭載性の向上が望まれている。そのためレーダ装置の小型化が必要である。

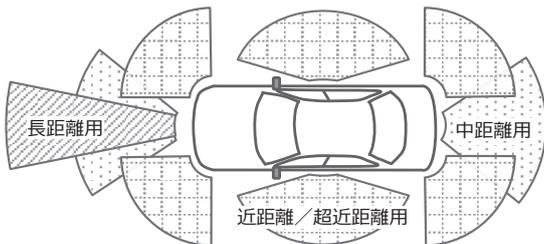


図1 ミリ波レーダ配置イメージ

レーダ装置の大きさはアンテナ面積に比例しており、アンテナ面積の小型化は装置の小型化に貢献する。低損失なプリント基板をアンテナに使用することで、高いアンテナ利得とアンテナ小型化の両立が実現できる。

2-2 伝送損失と表面粗さの関係

プリント基板は、**図2**に示すように誘電体（絶縁体）の両側に銅箔等の導体を貼り付けた構造をもつ。

プリント基板の伝送損失は、誘電体損と導体損が複合したものである（**表1**）。誘電体損は誘電体で生じる電界によって発生する損失で、比誘電率（ ϵ_r ）や誘電正接（ $\tan\delta$ ）といった誘電体がもつ材料定数に依存する⁽⁶⁾。一方、導体損は導体を流れる電流に起因して発生する損失で、導電率に依存し、周波数の平方根に比例して増大する。これに加え、表皮効果^{※2}により高周波信号は導体のごく表面に電流が集中することから、表面粗さ（導体表面の凹凸）が大きいと伝送損失が増大する。この表面粗さに起因する損失も導体損の一部とみなして考える。

表1 伝送損失の発生する要因と依存するパラメータ

	誘電体損	導体損
要因	線路体積中の電界により生じる	線路表面上に流れる電流により生じる
依存するパラメータ	誘電率（ ϵ_r ） 誘電正接（ $\tan\delta$ ）	導電率 銅箔の表面粗さ
	↓ フッ素樹脂を採用 …優れた誘電特性を持つ (低 ϵ_r 、低 $\tan\delta$)	↓ ミリ波帯での 影響が大きい

ミリ波帯のように波長が非常に短い周波数帯の場合、表皮効果の影響が非常に大きく、表面粗さの影響による損失が無視できなくなる。一般に、プリント基板では銅箔と誘電体との密着度を高めるために銅箔の接着面を粗くする処理（粗化処理）を行っているが、粗化処理は表面粗さを増大させることから、伝送損失の増加要因となる。

2-3 低損失フッ素樹脂基板

当社では現在、誘電体損の小さいフッ素樹脂を用いた低損失プリント基板を開発している。本基板の特徴は、粗化

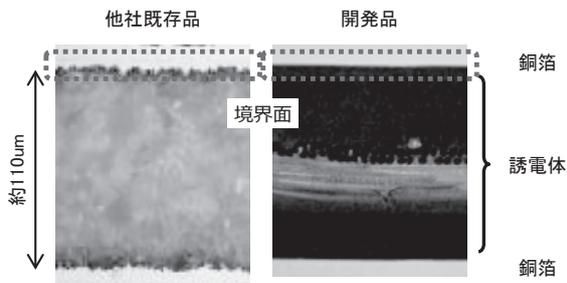


図2 プリント基板の断面写真

処理なしでの銅箔貼付けを実現したことから、表面粗さが非常に小さい点である。市場流通している既存のプリント基板は銅箔と誘電体との境界面の凹凸が数 μm あるのに対し、当社が開発中のプリント基板は凹凸が $1\mu\text{m}$ 未満となっており、良好な平滑性を示している（**図2**）。これによりミリ波帯における低損失伝送を実現し、かつ、銅箔の密着度を示すピール強度はプリント基板として要求される特性を満たしている。

3. ミリ波伝送特性の評価

開発中のフッ素樹脂基板と市販の既存品基板の伝送特性評価を行い、開発品の低損失性能の確認を行った。

3-1 特性評価用基板

本基板の伝送特性評価を行うため、MSL基板を製作し（**図3**、**表2**）、伝送特性を測定した。また、比較対象として、車載ミリ波レーダに一般的に使用されている、液晶ポリマー（Liquid Chrystal Polymer, LCP）系基板材料とフッ素樹脂系基板材料の既存品についても同様にMSL基板を製作し、測定を行った。使用した基板材料について**表3**に示す。



図3 伝送特性評価用MSL基板（当社フッ素樹脂基板）

表2 評価条件

項目	値
測定周波数範囲 [GHz]	75~85
MSL線路長 [mm]	50, 100

表3 使用した基板材料

	既存品A	既存品B	開発品
材料	LCP	フッ素樹脂	フッ素樹脂
誘電体厚さ [μm]	100	127	113
銅箔厚さ [μm] (※)	27	33	27

(※) スルーホール時の銅めっき $15\mu\text{m}$ を含む厚さ

3-2 評価結果

MSL線路長2種の実測結果から、100mmあたりの伝送損失を算出した(図4)。他に、アンテナ設計に用いる材料定数を表4にまとめる。電磁界シミュレーション時に伝送損失に表面粗さを反映する指標として実効導電率を用い、銅箔の導電率に対する係数とした。

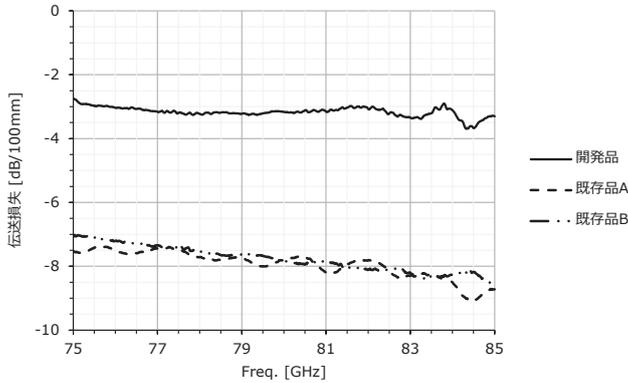


図4 評価用MSL基板の損失曲線

表4 材料定数

	既存品A	既存品B	開発品
材料	LCP	フッ素樹脂	フッ素樹脂
ϵ_r	3.04	3.20	2.20
$\tan \delta @ 10\text{GHz}$ (※)	0.002	0.001	0.0008
伝送損失 [dB/100mm] @77GHz	7.35	7.44	3.16
実効導電率 (銅比)	0.12	0.050	0.50

(※) 既存品A・Bはカタログ値、開発品は実測値

表4は76GHz帯レーダの上限周波数77GHzにおける評価結果を示すものである。既存品A・Bに対して開発品は約4dB/100mm低損失であるという結果が得られた。開発品の、銅箔の平滑性による伝送損失低減の効果を確認することができた。

4. アンテナ設計・試作評価

前章において、開発中のフッ素樹脂基板が良好な低損失性を持つことを確認したが、この低損失性がアンテナの小型化にどの程度寄与するのかを検証するため、車載ミリ波レーダ用途を想定したMSAによるアレーアンテナ^{※3}の設計を行い、電磁界シミュレーション上で特性を確認した。さらに、設計したアンテナを試作し、実機による特性評価を実施した。その際、LCP基板(第3章、既存品A基板)でも同様のアンテナ試作を行い、比較評価を実施した。

4-1 アンテナ素子単体の設計

アレーアンテナを形成するアンテナ素子単体の形式には、一般的な半波長パッチアンテナを採用した(図5)。まず、パッチアンテナ1素子を設計し、シミュレーションにより両基板での特性を比較した。必要となる材料定数は表4の値を用いた。

設計したパッチアンテナ単体(図5)のシミュレーション結果を表5に示す。比較結果では、開発品の方が1dB高いアンテナ利得を得られた。この要因としては、基板の低損失効果に加え、既存品に対して ϵ_r が低いためにアンテナ素子外形が大きくなり、ビーム幅が狭くなっていることが挙げられる。

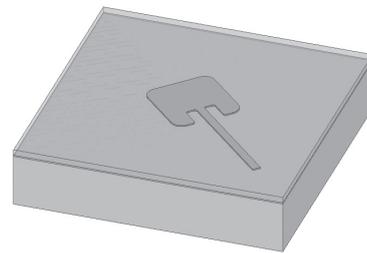


図5 パッチアンテナ単体シミュレーションモデル

表5 パッチアンテナ単体のシミュレーション結果

	既存品A	開発品
素子外形 [mm]	1.06 × 1.12	1.32 × 1.32
アンテナ利得 [dBi]	7.3	8.3
ビーム幅 [deg] (45° 偏波、水平・垂直)	3dB幅: 54 6dB幅: 106	3dB幅: 56 6dB幅: 98

アンテナ利得、指向性半値角は77GHzでの値

4-2 アレーアンテナの設計

アレーアンテナの設計にあたり、既存の車載ミリ波レーダの構成から要求される性能を推定し、送信アンテナ目標仕様を設定した(表6)。この仕様に基づいて、2つの基板材料によるアレーアンテナを設計した。

表6 アレーアンテナ設計仕様

項目	性能
偏波	45° 偏波
設計帯域 [GHz]	76GHz~77GHz
利得 [dBi] (アンテナ+入力部)	20以上
ビーム幅 [deg]	水平面: 20以上 垂直面: 4以上
F/S比 [dB] ^{※4}	17以上

第3章での伝送性能評価結果及び前節のアンテナ素子単体解析結果から、各基板材料による目標性能を満たす素子構成を検討した。その結果、既存品Aを用いたアンテナは4×16素子、開発品を用いたアンテナは3×16素子となった。

アレーアンテナが形成する指向性により得られる利得（指向性利得）のシミュレーション結果と、アレーアンテナのMSL長と基板の伝送損失（表4）から求めたMSL部で発生する損失、およびアンテナ利得のシミュレーション結果の3項目を比較した（表7）。素子数が少ない開発品によるアンテナの方が指向性利得は小さいが、MSL部の損失も小さいため、全体の利得としては同等となる。

表7 アレーアンテナシミュレーション比較結果（77GHz）

	既存品A	開発品
指向性利得 [dBi]	24.4	22.8
MSL損失 [dB]	3.6	1.3
アンテナ利得 [dBi]	21.6	21.8

試作したアンテナの写真を図6に示す。今回設計したアレーアンテナは、入力部から2分配され、目標仕様に設定したサイドローブ特性を満たすように各列への電力分配が設計されている。それぞれのアンテナが占める面積を比較した結果を表8に示す。既存品Aを用いたアレーアンテナに対し開発品を用いたアレーアンテナの方が、分配部も含めた全体の面積での比較で約40%、アンテナ開口に相当する素子部の面積での比較で約30%小さい結果となった。

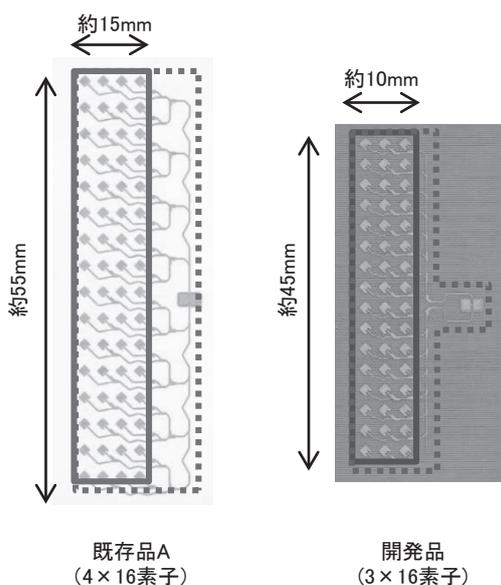


図6 アレーアンテナ試作基板写真

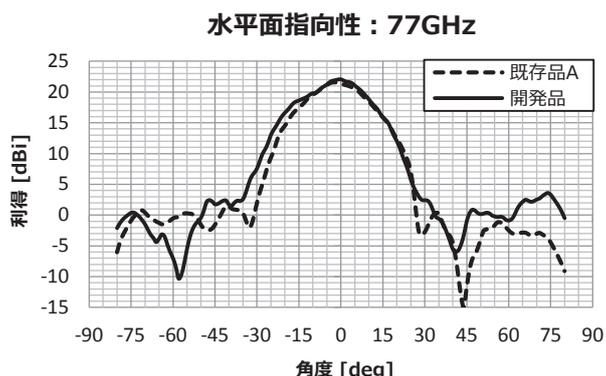
表8 アンテナ占有面積の比較

	既存品A	開発品	面積比
アレー全体（破線）	約865mm ²	約485mm ²	△44%
素子部（実線）	約500mm ²	約340mm ²	△32%

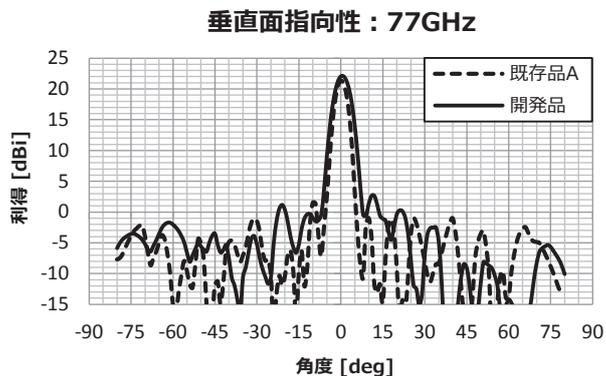
両アンテナの試作評価結果として、利得とビーム幅、F/S比について表9、指向性を図7に示す。アンテナ面積は開発品の方が大幅に小さいにもかかわらず、基板の低損失性能によりアンテナ利得やビーム幅は両者で同等の結果が得られたことを確認した。

表9 アレーアンテナ試作評価結果

	目標値	既存品A	開発品
利得 [dBi]	20以上	22.0	22.3
ビーム幅 [deg]	水平：20以上 垂直：4以上	21.8 4.0	22.3 5.5
F/S比 [dB]	17dB以上	20	17.5



(a) アレーアンテナ試作評価結果（水平面指向性）



(b) アレーアンテナ試作評価結果（垂直面指向性）

図7 アレーアンテナ試作評価結果（指向性図）

5. 結 言

現在開発しているミリ波向け低損失フッ素樹脂基板の伝送特性を評価し、既存品との比較では77GHzにおいて約4dB/100mm損失が低減されており、当社基板の特徴である銅箔の平滑性により、低損失化を実現したことを確認した。

また、車載ミリ波レーダでの使用を想定したアレーアンテナの設計の一例を示した。既存品と当社開発品の各基板を用いたアレーアンテナの試作評価を実施した結果、既存品の基板と同等の性能を持ちながら、基板の低損失効果によってアンテナ面積換算で約40%の小型化が可能であることを確認した。

本基板の実用化に向けた今後の課題として、基板の温度特性の評価、及び線膨張係数の評価が必要となっており、引き続き開発を進める。

用語集

※1 LiDAR

Light Detection and Rangingの略。赤外線レーザを用いて対象物の測距を行う装置。

※2 表皮効果

高周波信号が導体を伝送する際、導体表面付近に電流密度が集中する現象。

※3 アレーアンテナ

電波放射特性の制御や、アンテナ利得を高めるために、複数のアンテナ素子を組み合わせたアンテナ。

※4 F/S比

アンテナの指向性において、メインローブ（主放射方向）とサイドローブ（副放射方向）のレベル比。レーダアンテナでは、F/S比が高いほど誤検知を小さくできる。

参 考 文 献

- (1) 神保郁充、稲葉敬之、小河昇平、「2周波ICW方式レーダの安全運転支援システムへの適用検討」、2013 信学総大、B-2-23 (Mar. 2013)
- (2) 福永貴徳、高野豊久、山岸傑、「車両検知レーダを想定した76GHz帯パッチアンテナに関する一検討」、2017 信学総大、B-1-110 (Mar. 2017)
- (3) 上里良英、吉竹弘晃、生野雅義、藤本正彦、山脇俊樹、「小型・高性能なミリ波帯アンテナ」、富士通テック報 Vol.28 No.2, pp.19-25 (Dec. 2010)
- (4) 榎野祐一、宇野博之、佐藤潤二、「ミリ波帯高利得ループアレーアンテナの開発」、信学技報、AP2014-199 (Feb. 2015)
- (5) 神原久二男、中澤大輝、菊間信良、「ミリ波マイクロストリップコムラインアンテナの給電線路垂直面ビームチルト設計によるマルチビーム切替え電子走査アンテナ」、信学技報、AP2015-30 (May 2015)
- (6) H. Shimizu, "Electrical Property Evaluation Technology and Latest Low Transmission Loss Materials for High Speed Application," 第19回プリント配線板EXPO, PWB-5, pp.77-103, 東京 (Jan. 2018)

執 筆 者

三木 祐太郎* : 自動車新領域研究開発センター



福永 貴徳 : 自動車新領域研究開発センター



山岸 傑 : 自動車新領域研究開発センター
グループ長



桑山 一郎 : 自動車新領域研究開発センター
部長



*主執筆者