

5G に対応した電波吸収材の開発

清家 翼 浦元 明 柳 大介* 西内正樹*

Development of radio wave absorbers for 5G

SEIKE Tsubasa, URAMOTO Akira, YANAGI Daisuke, and NISHIUCHI Masaki

高速かつ低遅延での移動通信が可能な 5G（第 5 世代移動通信システム）を活用したサービスが開始され、自動運転や遠隔医療などの多分野での活用が見込まれている。その中で安定的な通信環境の維持のために 5G 周波数帯域（28GHz 帯）に対応した電波吸収材の開発が望まれている。

本研究では鉄やチタン酸バリウムなどをベースとした材料をもとに、5G ミリ波帯における電磁波吸収特性を最適化する材料の厚さについて理論的かつ実験により探索した。さらに、材料の厚さ、電磁波の入射角度、環境温度の変化に対する電磁波吸収特性を明らかにした。結果、鉄をベースとする材料が 5G ミリ波帯域用の電磁波吸収材として有効であることがわかり、実環境での有用性を証明した。

キーワード：5G、電波吸収材、チタン酸バリウム、フリースペース法

はじめに

電波吸収材は、複素比透磁率の周波数分散特性を利用した VHF 及び UHF 周波数帯域のテレビゴースト対策用吸収体が広く利用されている¹⁾。近年、高速かつ低遅延での通信が可能な 5G（28GHz 帯）の利用が始まり、安定的な通信環境の維持のために 5G の周波数帯域に対応した電波吸収材の開発が望まれている。

本研究では、5G 周波数帯域に対応する鉄やチタン酸バリウムを混錬した電波吸収材を試作し、その吸収特性を評価した。吸収特性に起因する材料定数を誘電体レンズによるビーム収束型フリースペース法により測定した。得られた材料定数から、理論計算による電波吸収材の最適化を行い、安定的な吸収特性を有する電波吸収材の厚さを検討した。また、電波の入射角度及び温度変化に対する吸収特性を調査した。

実験方法

1. 電磁波吸収材料

実験に供する材料として、SIW-280（カルボニル鉄粉＋シリコーン）、BT1S（チタン酸バリウム BTE-UP（50%粒径 12.65 μ m）＋シリコーン）、BT2S（チタン酸バリウム BTE-UP2（50%粒径 2.07 μ m）＋シリコーン）を使用した。

2. 材料定数の測定

理論計算に必要な複素比誘電率、複素比透磁率の材料定数（ ϵ_r 、 μ_r ）は図 1 に示すように、誘電体レンズを用いたフリースペース法で測定を行った。本測定法は板状吸収材の材料定数値の周波数特性を測定できる手法であり、伝送・反射（S パラメータ）法の原理に基づいた測定法である。ネットワークアナライザ（VNA）から発信した電波を誘電体レンズアンテナから測定試料に対して送信を行い、試料からの反射波及び透過波をレンズアンテナで受信した後、受信波の振幅と位相量から ϵ_r 、 μ_r を求めた。本研究で対象としている 5G のミリ波帯域（28GHz）を包含する R-Band（26.5-40GHz）にて測定を行った。また、図 1 では試料に対して電波を垂直に入射する測定治具であるが、本測定では向き合う誘電体レンズの角度を変更可能な斜入射専用治具を使用して、吸収量の入射角度特性も調査した。

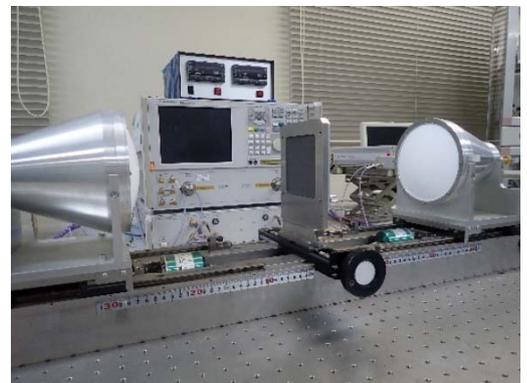


図 1 FS 法による材料定数測定法

* 株式会社タケチ

この研究は、「5G 活用イノベーション創出事業」の予算で実施した。

なお、試料についてはレンズビームスポット径を考慮して、開口部が□150mmと□100mmのサンプルホルダーに適したサイズとした。図1に示した測定系で得られた反射波及び伝送波の振幅と位相のデータ（Sパラメータ）の値から演算モデル「Nicolson-Rossモデル」を用いて材料定数を求めた。

3. 吸収特性の理論計算

本研究で評価した電波吸収材の構造は単層型電波吸収材に分類され、その基本構造は図2のとおりである。ここで電波吸収材の吸収特性を表す反射係数 \dot{S} は以下の式で求めることができる。

$$\dot{S} = \frac{(\dot{Z}_{in}-1)}{(\dot{Z}_{in}+1)} \quad (1)$$

また、図2について電磁波吸収理論²⁾により、電波が吸収材表面に対して垂直に入射し、その入射方向に反射する場合、吸収材の複素比誘電率 $\dot{\epsilon}_r$ 、複素比透磁率 $\dot{\mu}_r$ で表した特性インピーダンス \dot{Z}_{in} (Ω) は以下の式で表すことができる。

$$\dot{Z}_{in} = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_r}{\dot{\epsilon}_r}} \left(\tanh j \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r} \right) \quad (2)$$

ただし、 d : 吸収層厚 (m)、 λ_0 : 自由空間の波長 (m)

斜入射の場合、入射波の偏波によって異なる。そのため、TM波とTE波に分けて考える。

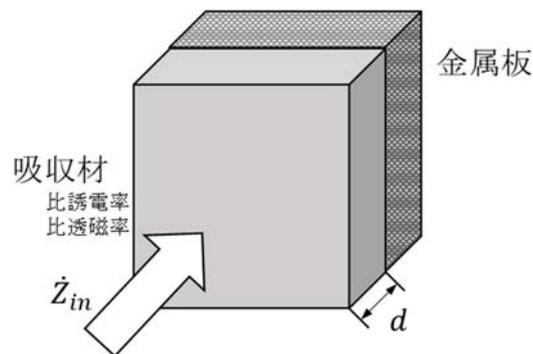


図2 電波吸収材の基本構造

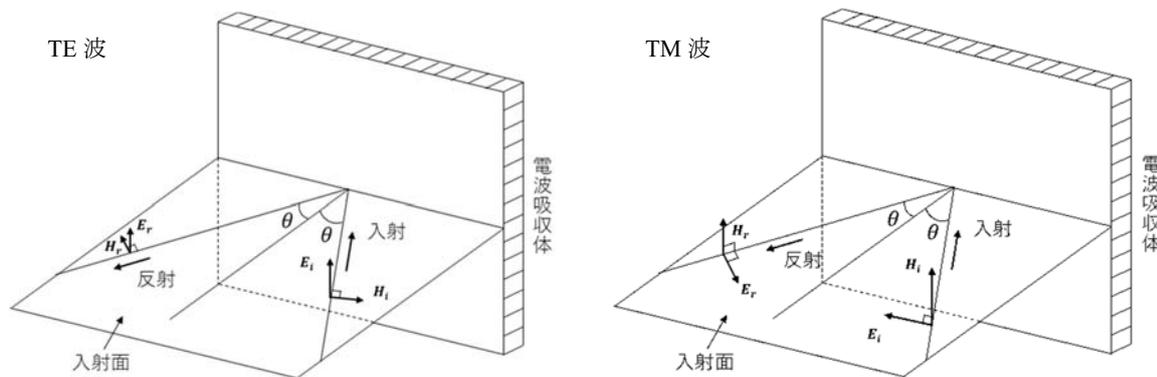


図3 入射電波の偏波の違い

<TE波>

$$\dot{S}_{TE} = \frac{(\dot{Z}_{TE}-1)/\cos\theta}{(\dot{Z}_{TE}+1)/\cos\theta} \quad (3)$$

$$\dot{Z}_{TE} = \frac{\dot{\mu}_r}{\sqrt{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r - \sin^2\theta}} \left(\tanh j \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r - \sin^2\theta} \right) \quad (4)$$

<TM波>

$$\dot{S}_{TM} = \frac{\dot{Z}_{TM}-\cos\theta}{\dot{Z}_{TM}+\cos\theta} \quad (5)$$

$$\dot{Z}_{TM} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r - \sin^2\theta}}{\dot{\epsilon}_r} \left(\tanh j \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r - \sin^2\theta} \right) \quad (6)$$

式(1)～式(6)より、サンプルの厚みを変数として吸収特性を理論的に求めることが可能となる。材料定数測定値から求めた最も吸収量に優れた厚みのシートサンプルを試作し、吸収特性の最適化を試みた。

4. 吸収量－温度特性

電波吸収材の吸収量－温度特性を評価するために、図1の測定法に温度制御装置を加えた測定系を図4に示す。図2における金属板の裏面に□150mm、□100mmのラバーヒーター（スリーハイ社SR100）を貼り付けて加熱し、K型熱電対（精度±1℃）で温度管理を行った。制御温度は常温から40、60、70、80℃とし、各温度での吸収特性を測定した。また、中心温度のバラつきを軽減する為に、図4のように耐熱テープを使用して重りで固定することで、ラバーヒーターと金属板裏面の密着性を向上させた。吸収材の温度は放射温度計（CUSTOM社CT2000N）で吸収材表面の中心部分を測定した。

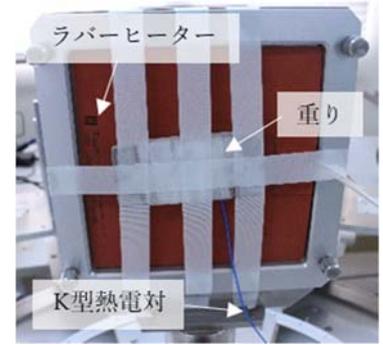


図4 吸収量－温度特性測定系

5. ローカル5Gエリアでの実環境試験

愛媛県産業技術研究所構内に設置されているローカル5G基地局を活用した実環境での吸収特性評価及び応答時間の改善効果を検証した。図5に測定スポットと測定の様子を示す。ハンドヘルドスペクトラムアナライザ（アンリツ社MS2090A）を使用し、吸収材（□800mm）の吸収量を測定した。反射板（アルミ板□1000mm）を設置した場合の測定も行い、受信電力の減衰が吸収材の効果によるものであるかを調査した。

5GではMIMOアンテナのマルチパスを有効利用できる技術によって、通信速度及び安定性の向上を実現している。しかしながら、受信環境次第では特定のスポットにおける応答時間の遅延が確認されており、その原因はマルチパスの干渉によるものとされている。本測定では干渉が生じるスポットを特定し、そのスポット付近に吸収材を設置することでマルチパスの減衰を試み、その応答時間を測定した。図6に応答時間の測定方法及び測定スポットを示す。ミリ波5G対応のUE（ASKEY社製RTL0300）を使用して5G通信を行い、Linux系のtracerouteで送信したパケットがローカル5Gネットワーク内で折り返して戻ってくるまでの応答時間を測定した。

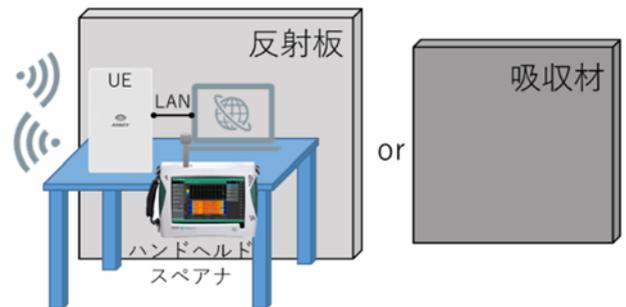


図5 実環境での吸収特性評価

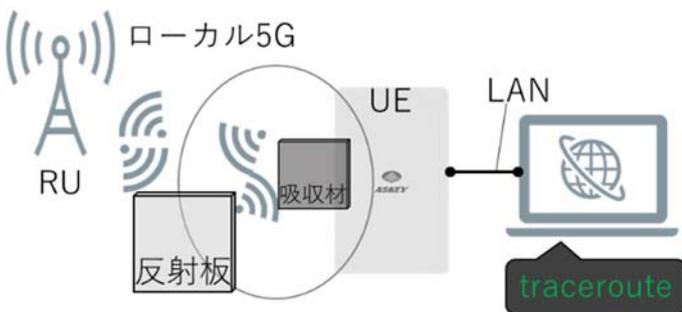


図6 通信データの応答速度に対する吸収材の有効性検証

図6の試験は、以下の手順で行った。

- ・①～④のスポットにて応答時間を測定した。
- ・応答時間が低下する特定のスポットで吸収材を設置する方向を変えながら応答時間を測定し、マルチパスの伝搬経路を調査した。

- ・ 不要なマルチパスの伝搬経路上の反射物付近に吸収材を設置し、応答時間を測定した。

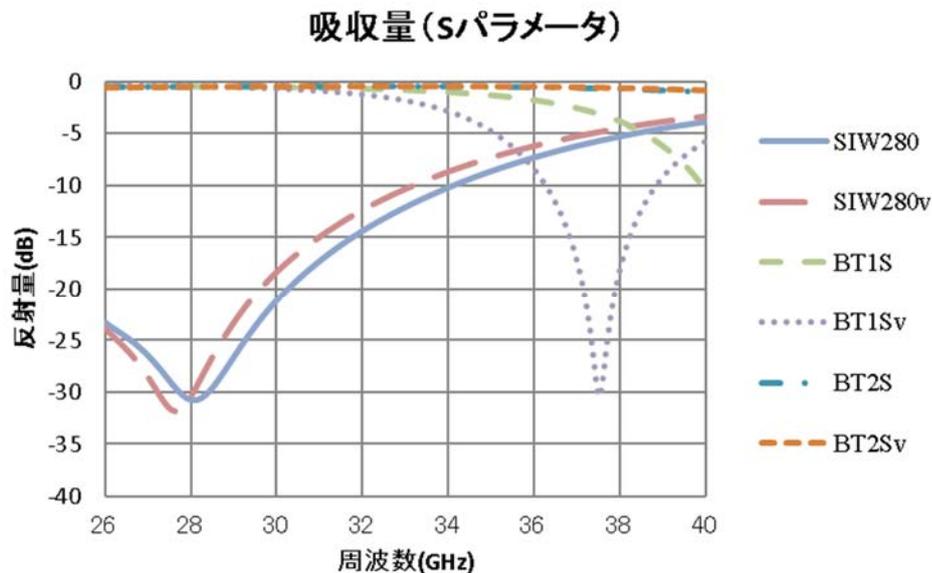
結果と考察

1. 材料定数の算出

理論計算ソフトによって厚みの最適化を図る前段階として、既製品のサンプル厚みを参考に厚さ 1.1mm の吸収材を作製し、前述のフリースペース法で各吸収材の反射係数 S パラメータ S11 を測定した。結果を表 1 及び図 7 に示す。

表 1 サンプルの厚みと吸収量 (S11)

試料名	厚み狙い(mm)	厚み実測(mm)	S11(dB) ※28GHz	混練材料
SIW-280	1.10	1.10	-30.67	鉄粉+シリコーン
			-30.43	
BT1S	1.10	1.19	-0.45	BTE-UP +シリコーン
			-0.49	
BT2S	1.10	1.14	-0.44	BT-UP2 +シリコーン
			-0.46	



※凡例の v は誘電体レンズに対してサンプル表面を垂直に維持したまま 90 度回転させた結果

図 7 吸収量のサンプル比較

図 7 の結果から各試料の複素比誘電率、複素比透磁率 (ϵ_r 、 μ_r) を算出した。ここで、 ϵ' 、 ϵ'' は複素比誘電率 ϵ_r の実数部、虚数部。
 μ' 、 μ'' は複素比透磁率 μ_r の実数部、虚数部。

表 2 28GHz における材料定数結果 SIW-280、BT1S、BT2S

試料名	材料定数			
	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
SIW-280	6.09	0.16	0.76	0.47
BT1S	19.48	5.89	1.01	-0.23
BT2S	17.04	1.01	0.98	0.00

表 1、図 7 の結果より、十分な吸収特性が確認できたサンプルは SIW-280 のみとなり、SIW-280 は他社品とほぼ同等の性能であった。また、材料定数の結果より SIW-280 と他社品の鉄粉とシリコーンの混練割合が近似している可能性が示唆された。

2. 理論計算ソフトによる最適化

前述の材料定数を用い、材料の厚みを変えた場合の各試料の吸収量シミュレーションを行った。

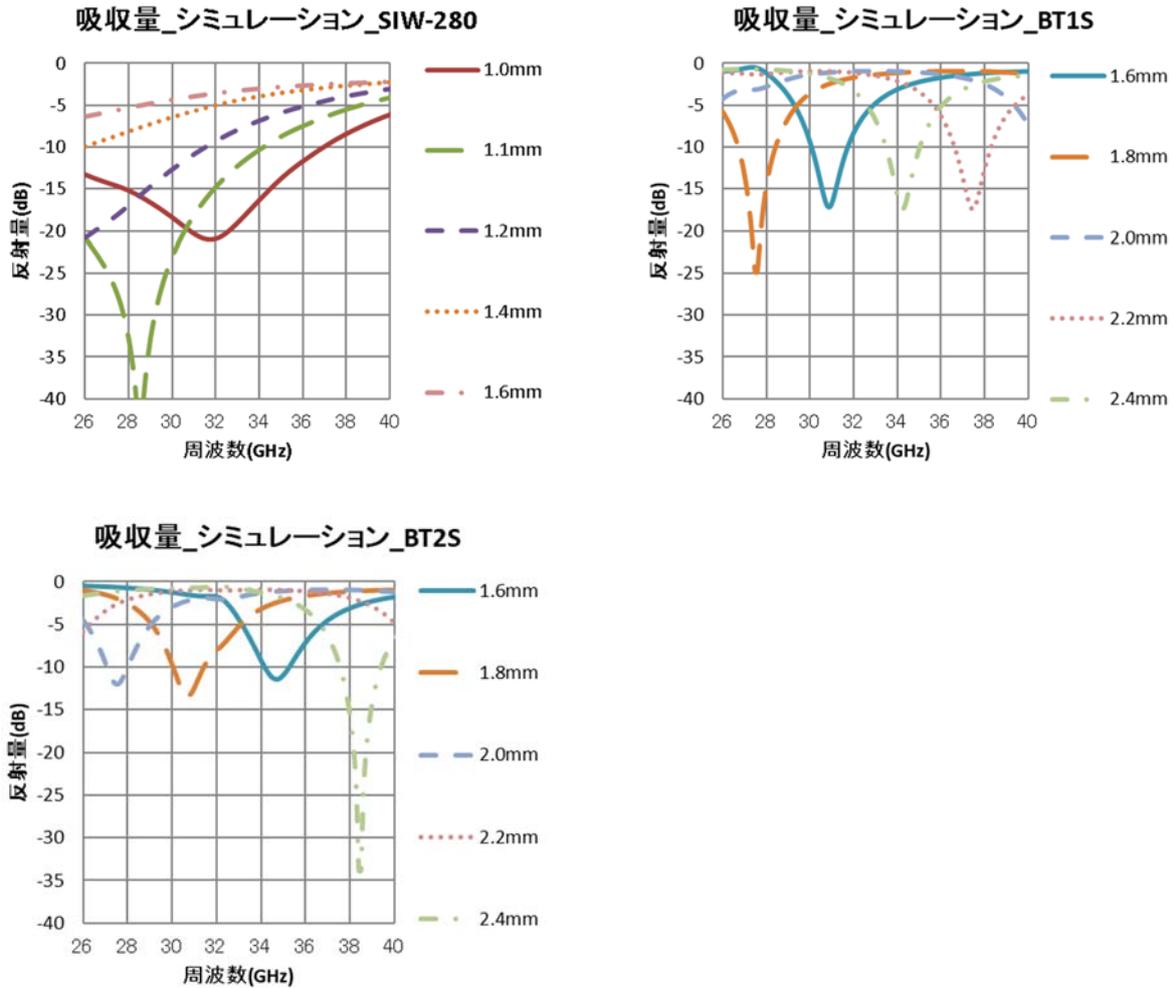


図 8 理論計算ソフトによる試料厚みと吸収量の関係

図 8 より、それぞれの試料で 28GHz を吸収ピークとするにはサンプル厚さを、SIW-280 では 1.1mm、BT1S では 1.8mm、BT2S では 2.0mm 程度にする必要があることが分かった。また、図 7 より SIW-280 では最適な厚みでの吸収量がシミュレーションと一致していることを確認した。

図 9 は、BT1S、BT2S の 28GHz 帯での吸収量を最大化するための厚さの試料を作製し、試料厚みを変更した場合の吸収量を評価した。

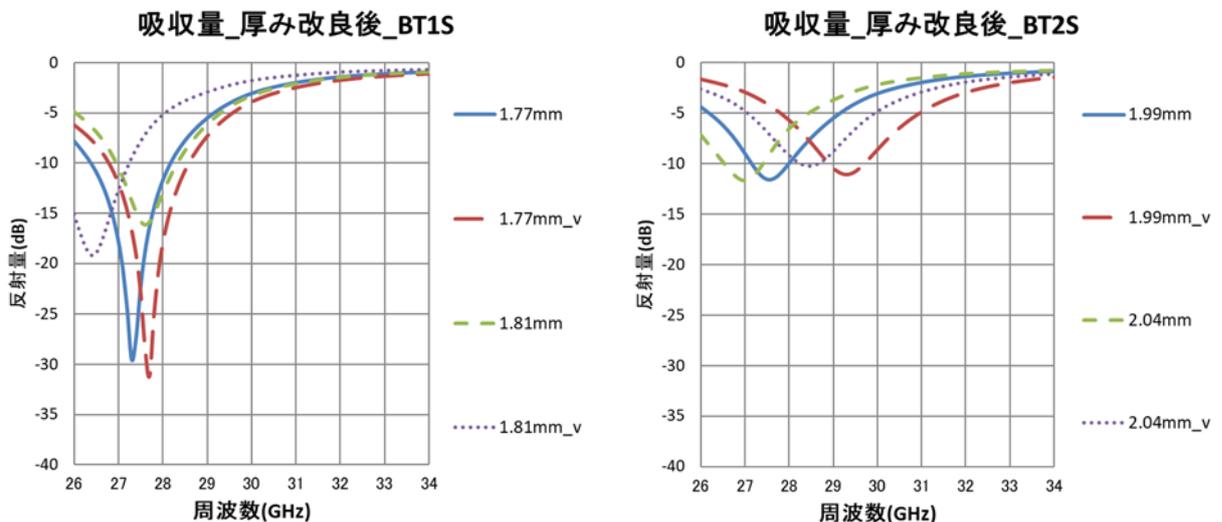


図 9 サンプル厚み改良後、吸収量測定結果

BT1S では、28GHz 帯での吸収量を最大化する厚さとして 1.77mm が得られたが、わずかの厚さの変化で特性が大きく変わることから、28GHz 帯での吸収材としては不適當であることが分かった。また、BT2S は十分な吸収量を確保することができなかつた。これにより、強誘電体材料を混練した場合、目的の周波数の吸収特性に対する厚みのバラつきによる影響が大きいため、吸収特性を合わせこむことが困難な傾向にあることが確認された。

図 10 では、優れた吸収特性が確認された SIW-280 の斜入射に対する吸収特性を評価した。斜入射の入射角度は図 3 の θ (°) を 20~70 とした。

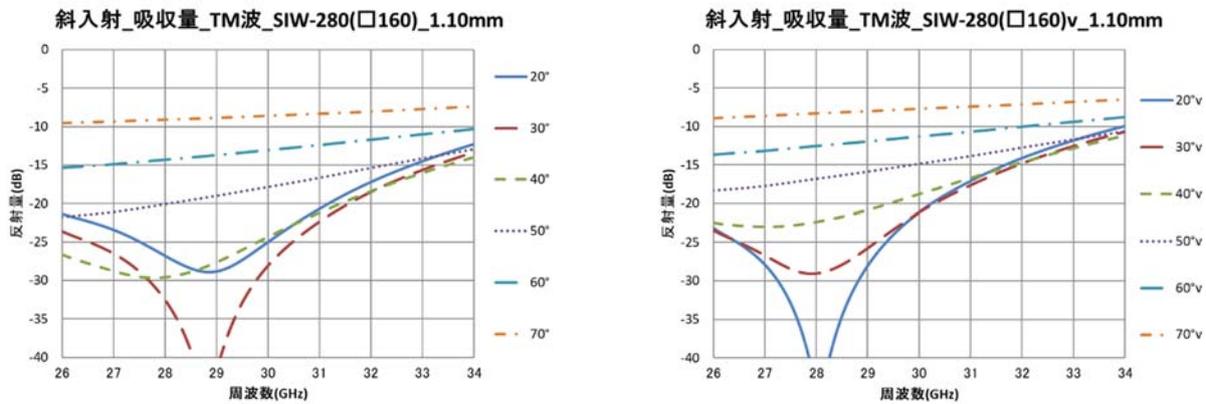


図 10 入射角度と吸収量の関係

斜入射での吸収量測定では、SIW-280 は入射角が 50~60° でも吸収材として有効であることが分かった。

3. 温度変化に対する吸収特性

温度特性については、吸収量曲線のピーク位置を追ってみると、常温から加熱した場合は、ある特定の温度までは吸収量は上がり、その後緩やかに常温時の吸収量へ戻る傾向が得られた。この結果から、加熱により温度が変わる場合でも効果的なサンプルであることが確認できた。吸収量の測定結果からサンプル BT2S では反射量が -10dB 以上となり十分な吸収特性が確認されなかつたため、斜入射及び温度特性評価では省略した。また、本測定系は試験装置の事情により値の信頼性が確保できていた斜入射 TM 波の 20° で実施した。

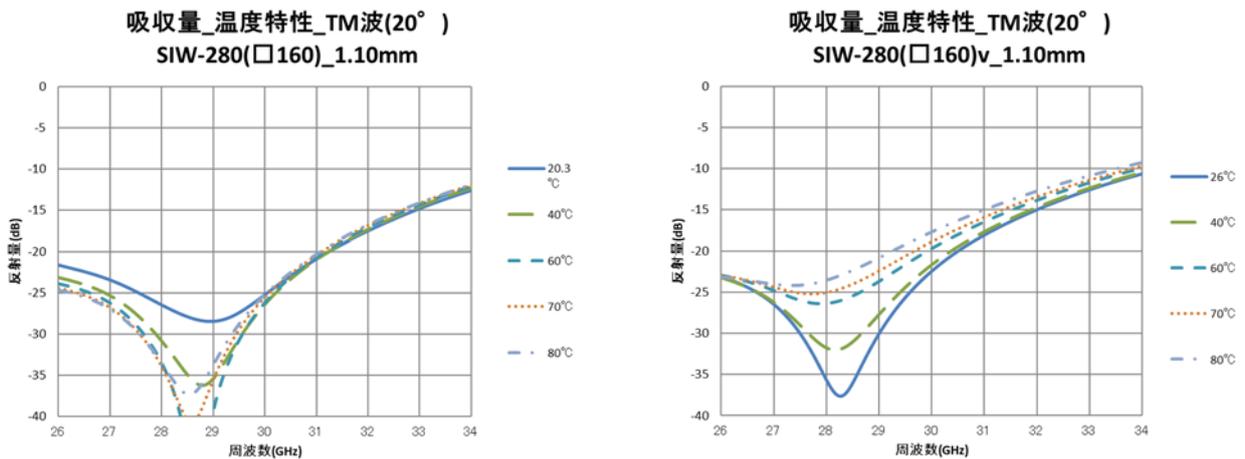


図 11 吸収量－温度特性

4. ローカル 5G エリアでの実環境試験・吸収特性

図 5 の方法で、通信中の UE の裏面付近にオムニアンテナを使用したハンドヘルドスペクトラムアナライザを設置し、電力強度を測定した。リアルタイムスペアナ (RTSA) 機能を使用し、MaxHold の値を測定した結果を表 6 に示す。通常の電力強度と吸収材を設置した際の電力強度を比較した結果、本研究で開発した電波吸収材 SIW-280 は実環境における 5G (28GHz 帯) 電波を 25dB 程度吸収できることを確認できた。また、通常の電力強度と反射板を設置した際の電力強度を比較した結果、反射板を設置した際の電力強度では 7dB 程度強くなった。5G 通信を行っていない時の電力強度を RTSA 機能で測定したところ、その電力強度はノイズフロアに埋もれる程度に微弱であり、測定値を得られなかつた。これらの結果から、本測定で得られた電

力強度は 5G 電波の電力強度であることや、電力強度の増減が電波吸収材の吸収特性や反射板によるものであることが確認することが出来た。

表 3 ハンドヘルドスペアナ測定結果

	リアルタイムスペアナMaxHold値(dBm)		
	通常	反射板	吸収材
電子棟前	-25.47	-18.54	-49.22

干渉スポットの調査のため、図 6 に示す①～④のスポットにて traceroute で測定した。各スポットで 100 回程度の測定を行い、平均の応答時間を算出した。一定の待機時間が経っても応答がない場合（通信の不安定さ）や受信強度が弱く、強制的に 4G 通信になった場合の測定値は外れ値として、その発生数を平均応答時間とともに表 4 で示す。また、パケットサイズ (Byte) を変更することで、通信量による応答時間の傾向を確認した。

表 4 traceroute での平均応答時間と外れ値の数

		平均応答時間(ms)		外れ値の数	
		28Byte	1280Byte	28Byte	1280Byte
電子棟-機械化学棟(反射板無)	スポット①	37	42	1	0
	スポット②	93	191	14	18
	スポット③	124	931	13	34
	スポット④	411	1399	18	26
電子棟-機械化学棟(反射板有)	スポット①	36	41	0	0
	スポット②	142	198	18	21
	スポット③	79	143	5	16
	スポット④	89	223	10	15

※反射板を置くことで応答時間が短縮された測定値と反射板を置くことで応答時間が延長された測定値

スポット②の周囲でマルチパスの影響を調査した。図 12 に測定イメージ、表 5 を示す。これにより、不要なマルチパスが生じている方向を特定した。

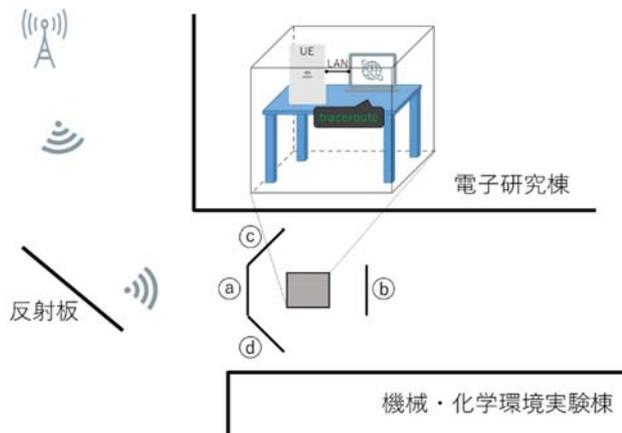


図 12 不要なマルチパスの調査

表 5 吸収材を設置した際の応答時間

	平均応答時間(ms)	外れ値の数
吸収材①	207	19
吸収材②	183	18
吸収材③	44	1
吸収材④	151	19

表 5 の結果から、図 12 における③の方向から不要なマルチパスを受信している可能性を確認した。このマルチパスは、電子研究棟の角に施設されている金属プレート及び配管が一因と考えられる。図 13 のように、金属物による不要な反射を遮る位置に吸収材を設置して、パケットサイズを 28Byte で応答時間を測定した。その結果を表 6 に示す。

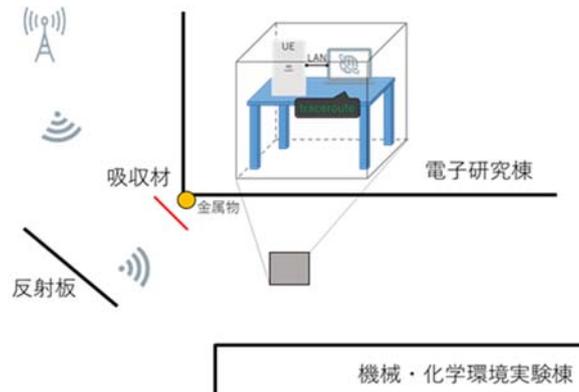


図 13 不要なマルチパスを遮蔽した時の応答時間測定

表 6 吸収材を金属物前に設置した際の応答時間

	平均応答時間(ms)	外れ値の数
電子棟-機械化学棟 (反射板有)スポット②	142	18
平均応答時間 2/3 短縮 外れ値の数 94%削減		
	平均応答時間(ms)	外れ値の数
電子棟-機械化学棟 (吸収材有)図15参照	44	1

実環境における 5G 電波に対する吸収材の性能を評価した結果、比較的見通しの良い環境で測定した RSRP 減衰量（吸収量）は 25dB となった。また、応答時間の遅延が見られる環境に対して吸収材を使用した結果、表 6 より SIW-280 の吸収量は応答時間改善に効果的であることが示された。RU 側に制約があり、建物などの影響で干渉スポットが生じた場合、UE 側付近でユーザーが簡単に対策を施すことができる製品として有効であることが分かった。

ま と め

本研究では 5G に対応した電波吸収材の開発とその特性評価及び吸収材の有効性について検討し、以下の結果が得られた。

- 鉄・チタン酸バリウム系の材料を混錬した吸収材は、28GHz 帯の吸収特性に有効であることが分かった。特にサンプル SIW-280 は周波数に対する吸収量の波形が緩やかであり、目的の周波数の吸収特性に対する厚みのバラつきによる影響が小さいため、吸収特性を合わせこみやすい材料であることを確認できた。
- 新材料でのサンプル評価を効率的に行うために理論計算による厚みの最適化を行った結果、SIW-280 では 1.1mm の厚みが最適であることが分かった。
- 温度特性評価の結果、SIW-280 では常温（20℃）から 60℃と高温になるに従って吸収量が増加することが確認され、温度変化に対する優れた吸収特性が有することが分かった。
- 実環境測定によって、吸収特性は 5G 電波にも同様の特性を得られることや、干渉スポットにおける応答時間の改善に有効であることが示された。

文 献

- 倉橋真司,加藤秀教,堀内健太郎,西内正樹,末永慎一,窪田賢：76GHz 帯で吸収特性を有するフェライト系電波吸収体の開発,愛媛県工業系研究報告,No.45 (2007)。
- 清水康敬,杉浦行,石野健：最新電磁波の吸収と遮蔽,第 2 版,(日経技術図書),128-130 (1999)。