

5G に対応した電波吸収材の開発

清家 翼 浦元 明 柳 大介*¹ 西内正樹*¹

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。そのような中、安定的な通信環境の維持のために 5G 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、鉄をベースとした材料をもとに、5G の Sub-6 帯（周波数 3.6GHz～4.9GHz）において吸収特性を有する電磁吸収材を試作し、電磁波の入射角度や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 Sub-6 帯域用の電磁波吸収材として有効であることが分かり、実環境での有用性を証明した。

キーワード：5G、電波吸収材、電波干渉、鉄系、温度特性

はじめに

電波吸収材は、ミリ波レーダーを搭載した自動車、家電やスマホ内部における電波干渉によるノイズ対策として広く利用されている。近年、高速かつ低遅延での通信が可能な 5G（Sub-6 帯）の利用が始まり、安定的な通信環境の維持のために 5G 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を混錬した電波吸収材を試作し、電波の入射角度に対する吸収特性を評価した。吸収特性は暗室内でダブルリジッドガイドホーンアンテナを用い測定評価を実施した。また、温度変化に対する吸収特性や、愛媛県産業技術研究所に整備されている 5G 基地局を用いた通信品質の改善効果を調査した。

実験方法

1. 電磁波吸収材料

実験に供する材料として、本研究で試作した、カルボニル鉄粉とシリコンを混錬した電波吸収材を使用した。

2. 斜入射特性の評価

電波吸収材の吸収特性を評価するために、図 1 に示す測定系により吸収特性を測定した。

送受信アンテナに直線偏波アンテナであるダブルリジッドガイドホーンアンテナを使用して、入射角度を 10 度～50 度まで変化させて TE 波および TM 波における吸収特性を評価した。測定周波数範囲を 3.5GHz～5.5GHz とし、電波吸収材のサイズは、アンテナの放射パターンと測定距離（1.4m）から 1000mm×1000mm とした。入射角度が広がると測定対象である電波吸収材からの反射波と送受信アンテナからの直接波とを分離する必要があり、ネットワークアナライザ（Keysight 社 E4991A）のタイムゲート機能により、測定対象からの反射波のみを選択する手法で測定した。なおタイムゲートは、1 ns に設定して測定評価を行った。

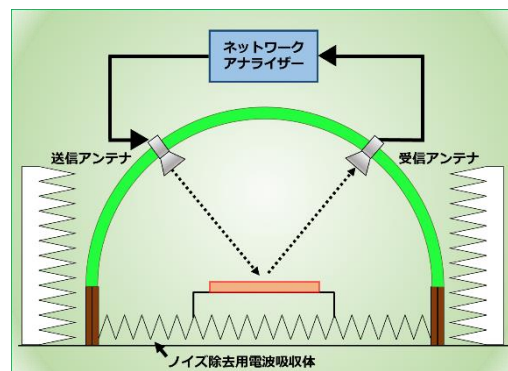


図 1 斜入射特性の評価測定図

*1 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。

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3)。

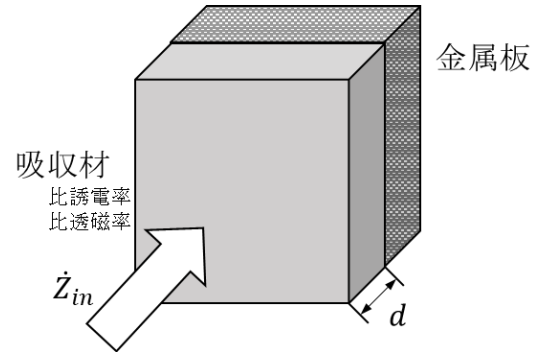


図2 電波吸収材の基本構造

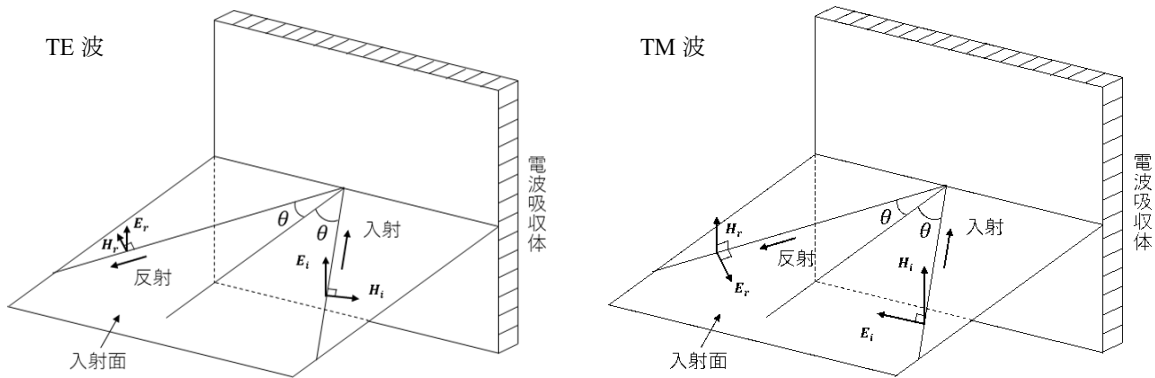


図3 入射電波の偏波の違い

<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、反射係数から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シートサンプルについて、電波の入射角度に対する吸収特性を評価した。

4. 電波吸収材の温度特性評価

電波吸収材の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5箇所貼り付けて加熱した。制御温度は常温から20、30、40、60、80℃とし、各温度での吸収特性を測定した。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。

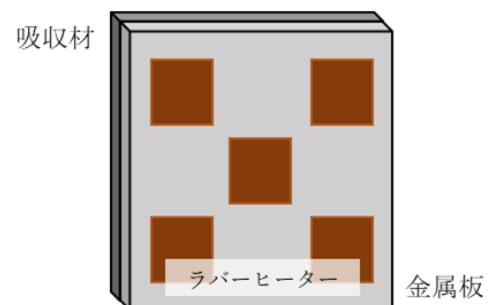


図4 温度制御装置を加えた測定

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通信品質の改善効果を検証した。図5に実環境での吸収特性評価の方法を示す。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通信品質の悪化が確認されており、その原因はマルチパスの電波干渉によるものとされている。本測定では、電波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、その通信品質を測定した。図6に通信品質の測定方法及び測定スポットを示す。Sub-6帯5G対応のUE（Foxconn社製5Gルーター）を使用して5G通信を行い、ネットワークパフォーマンスの測定するツールiPerf3で、送信したパケットが5Gのローカルネットワーク内のコアで折り返して戻ってくる際のパケットロス率を測定した。

図6の試験は、以下の手順で行った。

- ・①～④のスポットにてパケットロス率を測定した。
- ・パケットロス率が高い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。

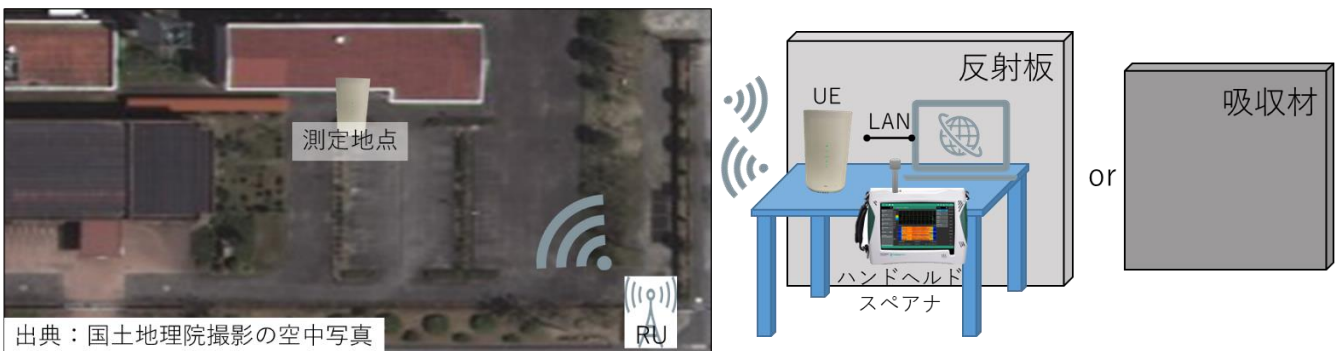


図5 実環境での吸収特性評価

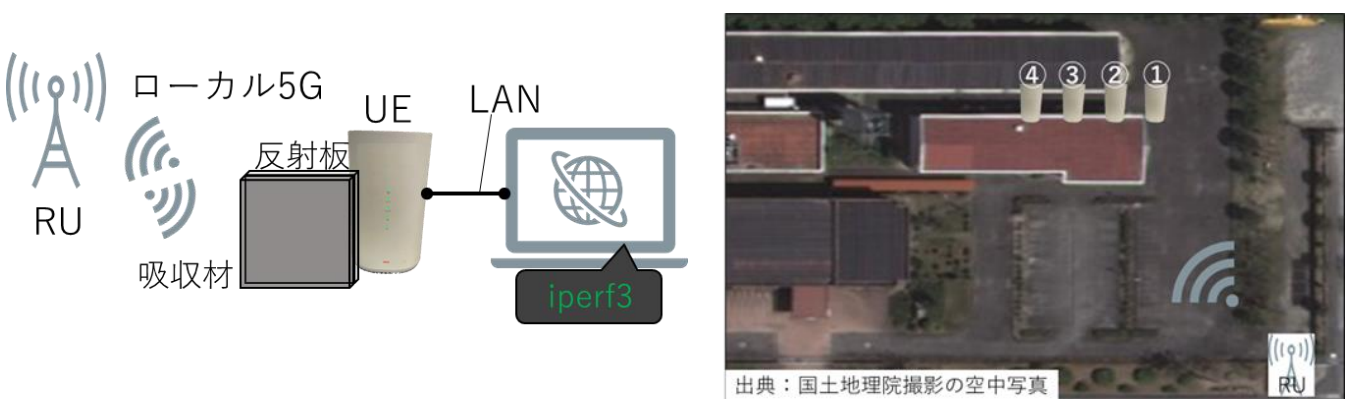


図6 通信品質の測定方法及び測定スポット

結果と考察

1. 電波の入射角度に対する吸収特性

電波吸収材の吸収特性を図1の測定系により電波暗室内で測定した。吸収特性の測定手順は、測定対象である吸収材と同じサイズの金属板をサンプル台に設置し、次に吸収材を同じ位置に設置して同様の測定を行

い、金属板と吸収材との反射波の差から吸収特性を求めた。この測定法では、測定対象である金属板と吸収材からの反射波のみを正確に測定することが重要であり、タイムゲート機能により測定対象からの反射波のみを選択し測定した。入射角度が変更しても変化しないピークが測定対象からの反射であり、送受信アンテナ間での干渉波によるピークや多重反射などの不要な反射波を除くために、今回の測定では 1 ns のゲート幅を設定し、吸収特性を評価した。

図 7 には各入射角度における TE 波の測定結果を、図 8 には TM 波の測定結果を示す。

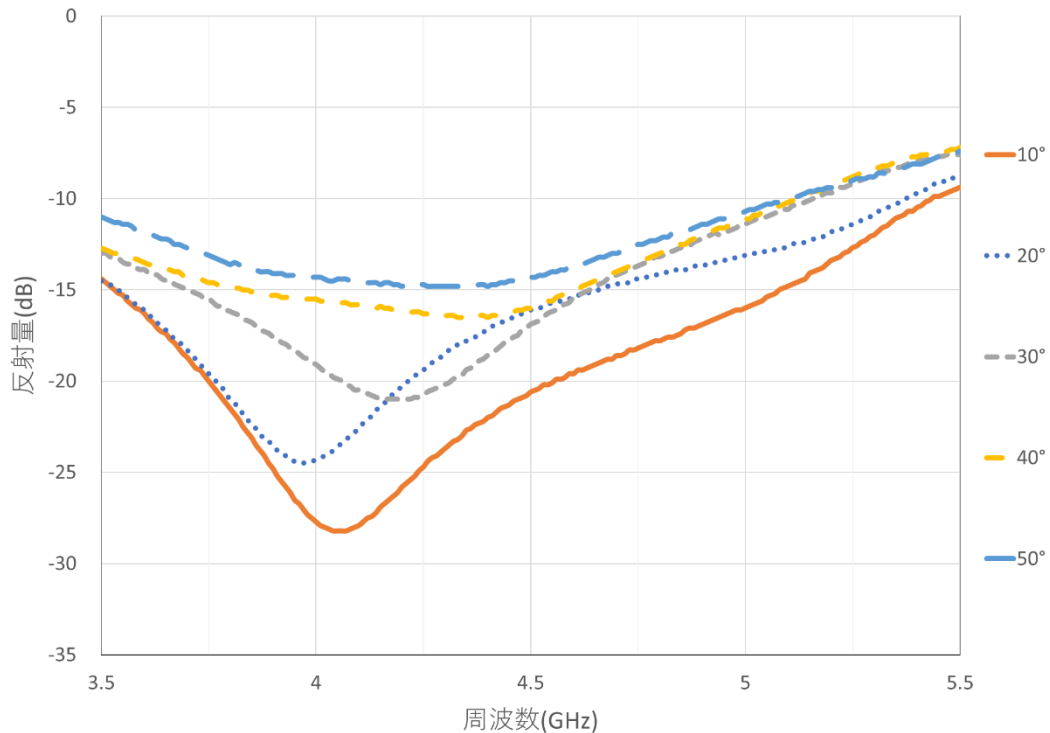


図 7 各入射角度に対する吸収特性 (TE 波)

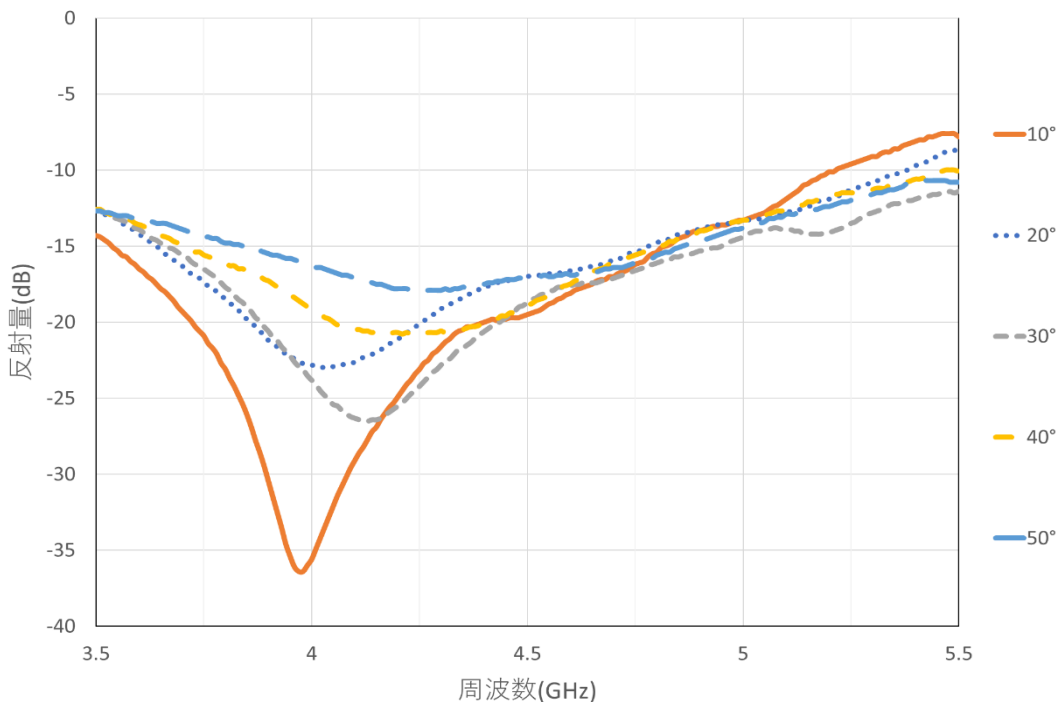


図 8 各入射角度に対する吸収特性 (TM 波)

図 7、8 の結果より、Sub-6 帯の周波数範囲 3.6GHz~4.9GHz において、10dB(電力比 90%)以上の吸収量を確保していることを確認した。TE 波と TM 波ともに、角度が大きくなるにつれて概ね吸収量は減少する傾向にあり、TM 波は TE 波より吸収量が数 dB 程度大きいことが確認された。

2. 電波吸収材の温度特性評価

図9の結果より、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、40℃までは吸収量は減少するが15dB以上の十分な吸収量が確認できており、その後ピークは高周波へ遷移し、吸収量は回復する傾向が得られた。この結果、加熱により温度が変わる場合でも5GのSub-6帯（周波数3.6GHz～4.9GHz）において効果的なサンプルであることが確認できた。また、本測定は吸収量が多い入射角度が10°の時のTE波で実施した。

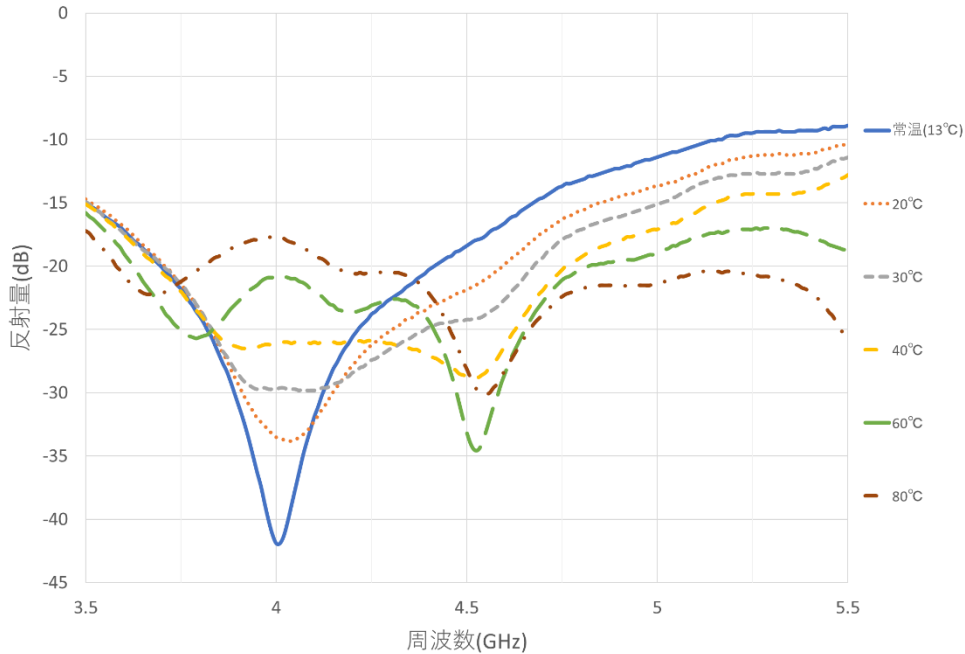


図9 温度変化に対する電波吸収特性

3. 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後方からオムニアンテナを取り付けたハンドヘルドスペクトラムアナライザで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1に示す。通常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は実環境における5G（Sub-6帯）電波を23dB程度吸収できることを確認できた。また、通常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5dB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った。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できた。

表1 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	-23.12	-17.96	-45.71

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iPerf3でパケットロス率を測定した結果を表2に示す。通信はUDPの複数ストリームで行い、通信速度はいずれのスポットでも約250Mbpsであった。また、調査エリアは5G電波の届き辛い場所であったため、一定のパケットロス率は許容し、各スポットで30回程度の測定を行い、その平均値を算出した。結果、局所的（□数百mm程度）な電波干渉の発生を確認し、特にスポット②ではパケットロス率が23.29%と他のスポットより15%以上のロスが確認された。また、電波干渉は複数の電波の輻輳（マルチパス）によって生じることが多く、建物や乗り物等、周囲の様々な反射物が影響することから、それらが確認されたスポットは不規則であった。

表 2 iPerf3 でのパケットロス率

		パケットロス率(平均値)
電子棟-機械化学棟	スポット①	6.75
	スポット②	23.29
	スポット③	7.6
	スポット④	7.75

スポット②の周囲でマルチパスの影響を調査した結果、図 10 に示す位置に電波吸収材を設置するとパケットロス率が低くなることが確認された。何も設置していない場合と反射板のみを設置した場合のパケットロス率と比較することで、電波吸収材の効果を確認した。その結果を表 3 に示す。

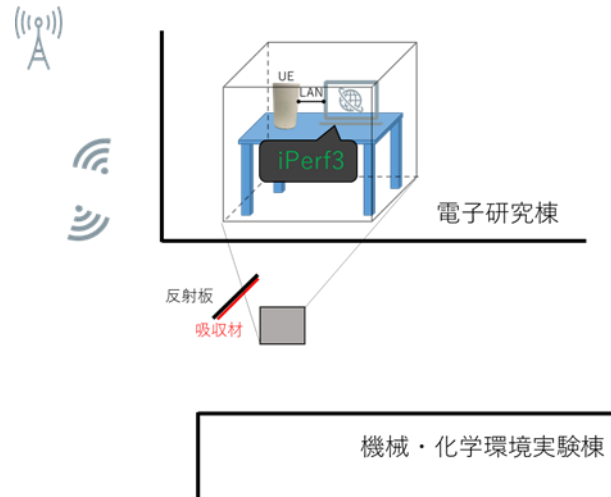


図 10 パケットロス率が低くなるスポットと電波吸収材の設置方法

表 3 吸収材を設置した際のパケットロス率

	パケットロス率(平均値)
ブランク	23.29
反射板のみ	17.71
電波吸収材	8.4

実環境にて、5G 電波に対する吸収材の性能を評価した結果、比較の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 3 より吸収材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。建物などの影響で電波干渉が生じた場合、吸収材を設置するだけで通信品質の改善が期待できることが確認された。

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実環境での有効性について検討し、以下の結果が得られた。

- 鉄系の材料を混練した吸収材は、Sub-6 帯の吸収特性に有効であることが分かった。電波の入射角度に対して、10 度～50 度のいずれの角度においても、3.6GHz～4.9GHz では 10dB(90%)以上の吸収量を確認できた。
- 温度特性評価の結果、電波吸収材は常温 (13°C) から 80°C と高温になるに従って最大吸収量は減少する傾向が確認された。これは、先行研究⁴⁾や実験時の様子から、温度の変化によって材料定数の変化やシートの厚みの変化が電波吸収量に影響していることが考えられる。一方で、Sub-6 帯の周波数帯域では殆どが 15dB(97%)以上の吸収量であり、温度変化に対する優れた吸収特性を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、電波干渉エリアにおける通信品質 (パケットロス率) の改善に有効であることが示された。

文 献

- 1) 倉橋真司,重松博之,加藤秀教,堀内健太郎,西内正樹,松永真由美 : UHF 帯 RFID 対応電波吸収材の開発 (愛媛県工業系研究報告) ,No.46 (2008) .
- 2) 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) .
- 3) 清家翼,浦元明:5G に対応した電波吸収材の開発 (愛媛県産業技術研究所研究報告) ,No.60 (2022) .
- 4) 倉橋真司,加藤秀教 : ミリ波帯域電波吸収材の性能安定化に関する研究 (第 1 報) (愛媛県工業系研究報告) ,No.45 (2007) .