

石膏ボードを用いた二周波対応型無線 LAN 用 電波吸収体とその設置効果

代表研究者	渡 邊 慎 也	青山学院大学理工学部電気電子工学科助手
共同研究者	橋 本 修	青山学院大学理工学部電気電子工学科教授
共同研究者	西 方 敦 博	東京工業大学教育工学開発センター准教授

1 はじめに

無線通信技術が急速に進展した昨今では、一般家庭やオフィスのみならず、空港や地下鉄構内のホットスポット設置に至るまで、無線 LAN の利用が非常にポピュラーなものとなった。また、100Mbps 超の無線通信を実現する次世代無線規格 (IEEE 802.11n) の導入も進められ、便利で快適な無線 LAN 環境が整備されている現状にある。これに伴い、安定した無線 LAN 環境を構築するために、特に室内においては壁面に電波吸収体を設置することや [1]–[7]、電波吸収機能を付加したパーティション [8] を利用することによってマルチパス伝搬を低減させる方法がとられている。このような状況下、現在の室内環境では、無線 LAN 規格として IEEE 802.11a (5.2GHz 帯、室内での利用のみ) および IEEE 802.11b/g (2.4GHz 帯) に準拠した通信機器が主に使用されているが、同室内で両規格の通信を使用する場合には、それぞれの周波数に対してではなく二周波数に対応した電波吸収体が必要不可欠となる。

そこで本研究では、室内壁に利用され、かつ高い耐火性能を有する石膏ボードに着目し、抵抗皮膜との多層構造とした二周波対応の $\lambda/4$ 型電波吸収体を提案し、伝送線理論による設計および設計結果に基づいて製作したサンプルを用いて実験的な特性評価を行った。また、シールドルーム内に本吸収体を施工した際の検証実験も行い、通信品質の評価からその設置効果を検討した。

2 電波吸収体の設計

2-1 吸収体の構成

本研究では、電波吸収体の吸収原理として $\lambda/4$ 型電波吸収体を用いている。2 周波数に対応するため図 1 に示すような 3 層構成とし、金属板側の石膏ボード層を 1 層目 (厚み: d_1)、その前面の抵抗膜を 2 層目、電波入射側の石膏ボード層を 3 層目 (厚み: d_3) とし、検討を行った。ここで、構成材料には、スぺーサとして強度を有し広く建物に普及している石膏ボードを用い、抵抗膜としては紙に導電性塗料を塗布した導電紙を用いた [9]。なお石膏ボードは、汎用性の観点から JIS 規格の厚み (9.5, 12.5, 15, 21mm) を選択した。また、その誘電率は自由空間透過法で周波数 4~6GHz において測定された複素比誘電率 ($2.40-j0.00$) とした [10][11]。

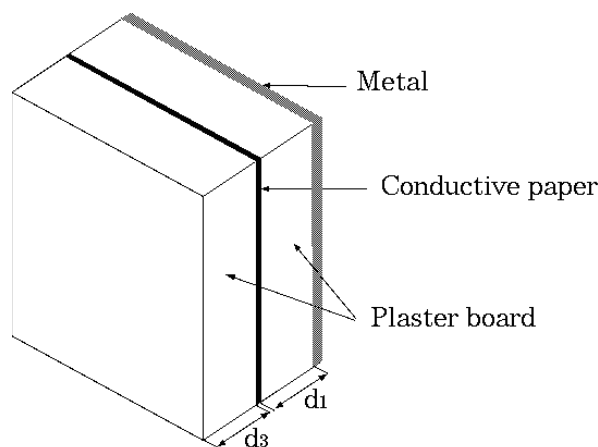


図 1. 電波吸収体の構成

2-2 設計

図1に示した電波吸収体の構成を，図2のような電氣的等価回路に置き換える．この等価回路において，伝送線理論により 1-1'端側から金属板側を見込んだ入力インピーダンス \dot{Z}_{in} を次式により計算することができる[12]．

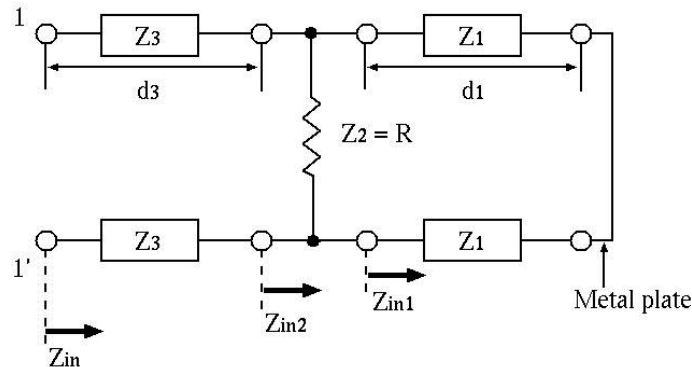


図2. 電氣的等価回路

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{in1} &= \dot{Z}_1 \tanh \dot{\gamma}_1 d_1 \\ \dot{Z}_{in2} &= \frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_{in1}}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_{in1}} \\ \dot{Z}_{in} &= \dot{Z}_3 \frac{\dot{Z}_{in2} + \dot{Z}_3 \tanh \dot{\gamma}_3 d_3}{\dot{Z}_3 + \dot{Z}_{in2} \tanh \dot{\gamma}_3 d_3} \\ \dot{\gamma}_1 &= j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r1}} \\ \dot{\gamma}_3 &= j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r3}}\end{aligned}$$

ここで， λ は波長[m]， $\dot{\epsilon}_{r1}$ ， $\dot{\gamma}_1$ は金属板から1層目の誘電率および伝搬定数， $\dot{\epsilon}_{r3}$ ， $\dot{\gamma}_3$ は3層目の誘電率および伝搬定数である．これらの式により，1-1'端から内部を見込んだ入力インピーダンス \dot{Z}_{in} および自由空間の特性インピーダンス Z_0 を用いて，吸収量を以下の式から求める．

$$S[\text{dB}] = -20 \log \left| \frac{\dot{Z}_{in} - Z_0}{\dot{Z}_{in} + Z_0} \right|$$

以上に述べた設計法から，石膏ボードと導電紙を用いて吸収体の設計を行う．なお，2.45GHz および 5.2GHz の両周波数において 10dB 以上の吸収量を目標値と定めた．また，石膏ボードの厚みは，室内壁面へ施工することを想定して，前述した JIS 規格の厚み (9.5, 12.5, 15, 21mm) の組み合わせとした．設計では，導電紙の面抵抗値を制御できる範囲を考慮して 100~500 Ω □ で変化させ，垂直入射時における最大の吸収量が得られる厚みの組み合わせについて検討した．

図3~図4に，10dB 以上の吸収量が得られる設計チャートを示す．ここで，図3は厚みを 22mm とした場合 (以後，薄型タイプと称す)，図4は 50mm とした場合 (以後，厚型タイプと称す) の結果をそれぞれ表したものである．これより，薄型タイプでは 10dB 以上，厚型タイプでは 20dB 以上の吸収量が所望の周波数において

得られることを理論的に確認した。なお、表 1 にこれらの吸収体の設計諸元をまとめておく。

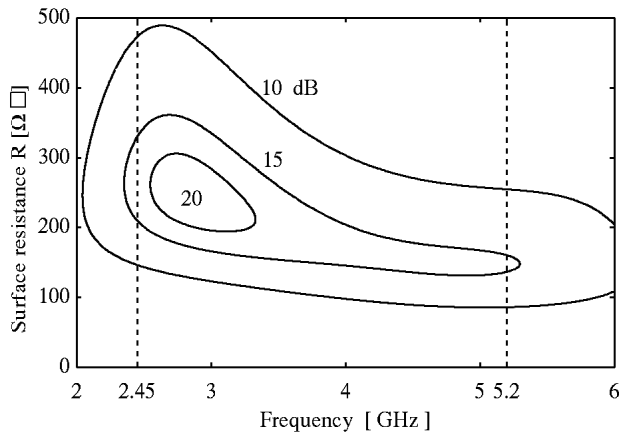


図 3. 吸収体の設計チャート (22mm 薄型タイプ)

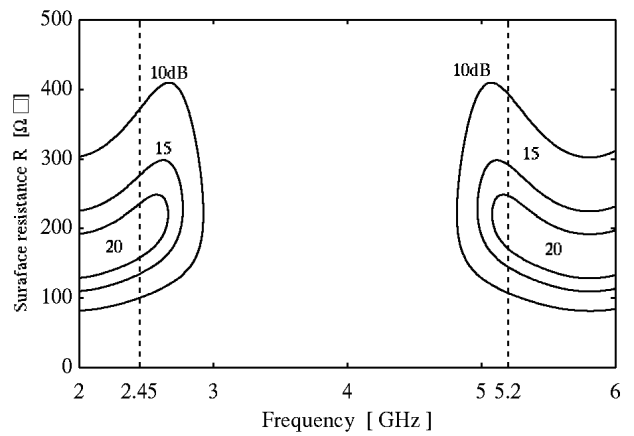


図 4. 吸収体の設計チャート (50mm 厚型タイプ)

表 1. 吸収体の設計諸元

構成	層構成		
	石膏ボードの厚み d_1 [mm]	導電紙の面抵抗値 R [$\Omega \square$]	石膏ボードの厚み d_3 [mm]
22mm 薄型タイプ	12.5	185	9.5
50mm 厚型タイプ	25.0 (12.5×2)	185	25.0 (12.5×2)

以上の設計諸元をもとに、それぞれの吸収体において周波数特性を計算した。図 5 に、その結果を示す。これより、薄型タイプでは 2.45GHz において 13.1dB、5.2GHz において 13.7dB の吸収量が得られ、また周波数帯域 2.2~6.0GHz において 10dB 以上確保できることから、広帯域な電波吸収体の実現可能性を確認した。一方で厚型タイプについては、2.45GHz において 32.7dB、5.2GHz において 23.8dB の吸収量がそれぞれ得られ、薄型タイプと比較して 2 倍程度の厚みは有するものの、2 周波数において 20dB 以上の吸収量が得られることが分かった。

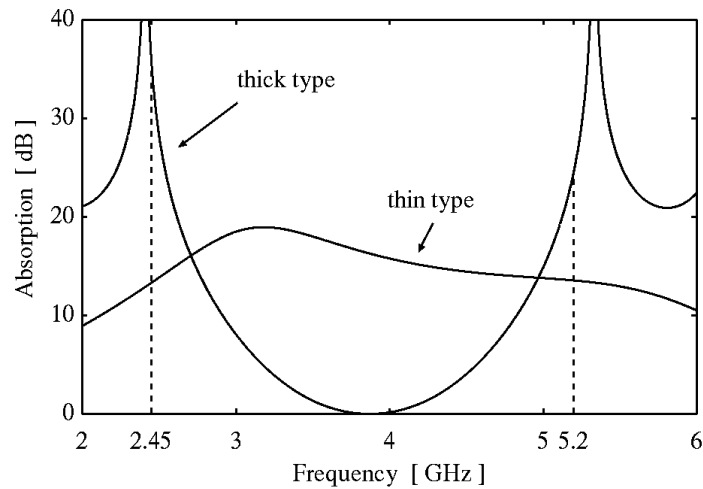


図 5. 吸収量の周波数特性の計算結果

3 吸収量の測定

3-1 測定系

以上の設計結果をもとに、実際に電波吸収体サンプルを製作し、吸収特性を実験的に検討する。測定では、図6～図7に示すように六面電波暗室内で送受信ホーンアンテナ(SCHWARZBECK BBHA 9120LF)とベクトルネットワークアナライザ(Agilent E8362B)から構成される測定系を展開し、反射電力法により実施した[12]。アンテナとサンプル支持台の距離は3.0mとし、周波数帯域は2.0～6.0GHzとした。

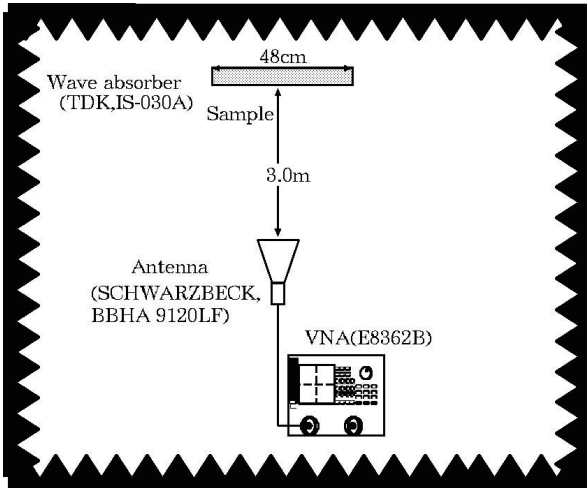


図6. 反射電力法のブロック図

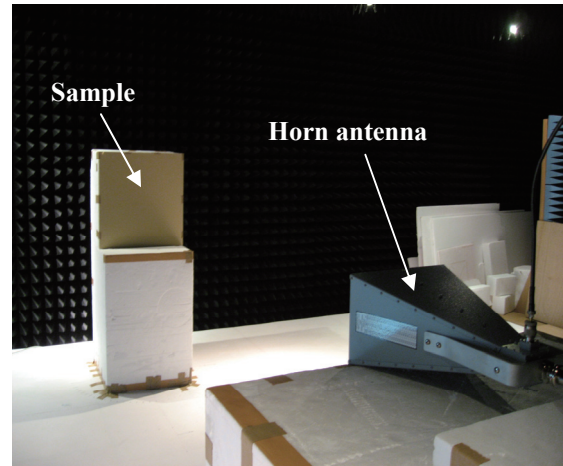


図7. 測定風景

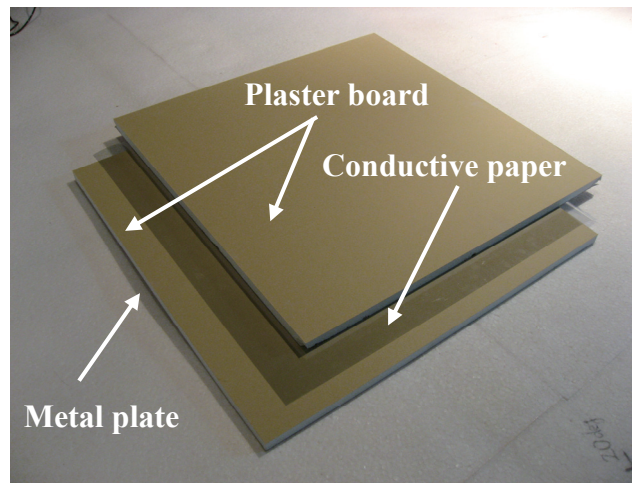


図8. 電波吸収体サンプルの概観

表2. 測定サンプルの諸元(22mm 薄型タイプ)

各諸元	層構成		
	石膏ボード(d_1)	導電紙	石膏ボード(d_3)
厚み[mm]	12.72	0.05	9.69
誘電率と面抵抗値	2.40-j0.00	188Ω□	2.40-j0.00

表3. 測定サンプルの諸元(50mm 厚型タイプ)

各諸元	層構成		
	石膏ボード(d_1)	導電紙	石膏ボード(d_3)
厚み[mm]	25.41 (12.72+12.69)	0.05	25.37 (12.70+12.67)
誘電率と面抵抗値	2.40-j0.00	188Ω□	2.40-j0.00

また、図8には吸収体サンプルの概観を示し、表2～表3にはサンプルの各諸元をまとめた。50mm厚型タイプについては、12.5mm厚の石膏ボード4枚を使用することで構成している。なお、サイズは48cm角であり、表中に示した厚みの実測値は各サンプルにおいて異なる位置計9ポイントの平均である。

3-2 周波数特性の測定結果

22mm薄型タイプおよび50mm厚型タイプの両サンプルにおける、垂直入射に対する吸収量の周波数特性測定結果を図9～図10に示す。なお、図中には理論設計値もあわせて記載した。この結果、まず22mm薄型タイプに着目すると、設計値と測定値はほぼ一致し、2.45GHzおよび5.2GHzの両周波数において15dB程度の吸収量が得られることが分かった。次に、50mm厚型タイプによる測定結果をみると、設計値と比較して吸収量のピーク値に差異が生じたものの、同等の傾向が得られることを確認した。また、所望の両周波数において18～25dB程度の吸収量が得られることを実験的に明らかとした。

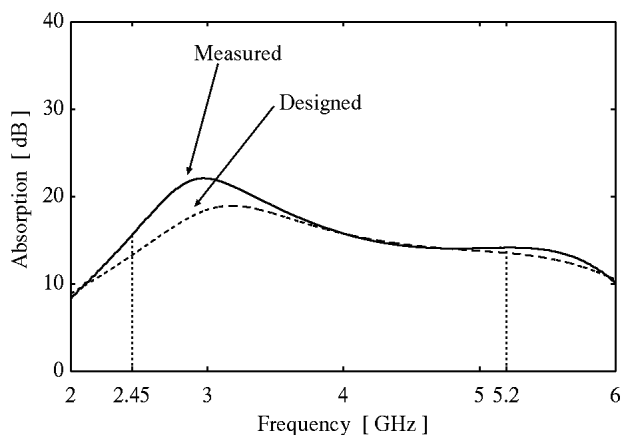


図9. 吸収体の測定結果(22mm薄型タイプ)

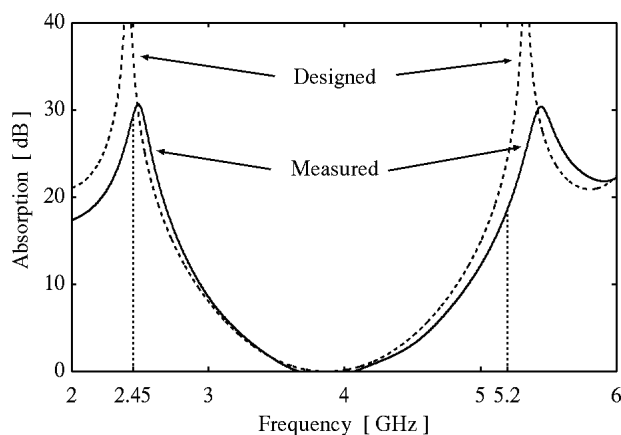


図10. 吸収体の測定結果(50mm厚型タイプ)

4 斜入射に対する検討

4-1 測定系

前節までの検討において、提案した二周波対応の電波吸収体が垂直入射に対して良好な特性が得られることを確認した。そこで次に、実際の施工時における室内での電波の反射状況を想定し、斜入射に対する検討を50mm厚型タイプを用いて行った。図11に、斜入射時における測定系を示した。垂直入射時と同様に電波暗室内で実施し、送受信ホーンアンテナそれぞれを角度ごとに移動させて吸収特性を評価した。なお、入射角度は、電波暗室内における測定限界を考慮し、5、15、30、45度と設定し、入射波はTE・TM両偏波とした。

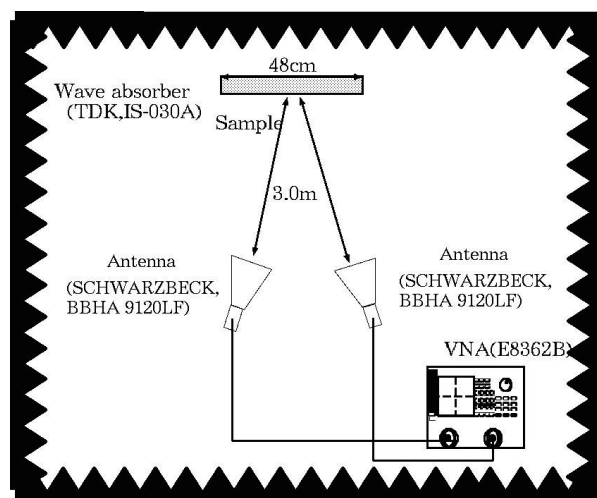


図11. 斜入射測定ブロック図

4-2 角度特性の測定結果

図 12～図 15 に、吸収量の角度特性の測定結果を示す。ここで、図 12～図 13 は周波数 2.45GHz における TE 波および TM 波の結果を、図 14～図 15 は周波数 5.2GHz における結果をそれぞれ表している。なお、図中には表 1 の諸元に基づいた伝送線理論による設計結果もあわせて記載した。この結果、まず 2.45GHz における結果に着目すると、測定値と表 1 の諸元に基づいた設計値では吸収量の傾向が異なることを確認した。そこで、使用した導電紙の抵抗値にはばらつきがあるものと想定し、この抵抗値を任意に変化させて吸収量の計算を行った結果、図中に計算値として示したように、 230Ω の場合において測定値とほぼ一致する傾向が得られた。一方、5.2GHz における測定結果(図 14～図 15)でも同様の結果が見られたため、抵抗値を変化させて検討した結果、 175Ω の場合に計算値が測定値に近づくことを確認した。このことから、使用した導電紙の面抵抗値にはばらつきが見られ、また周波数分散性を有することが分かった。

次に、両周波数における結果全体を見ると、入射角度が $0\sim 25$ 度の範囲であれば両周波数かつ TE・TM 両偏波に対して 10dB 以上の吸収量が得られることが分かり、無線 LAN 用電波吸収体としての実現性を実験的にも明らかとした。

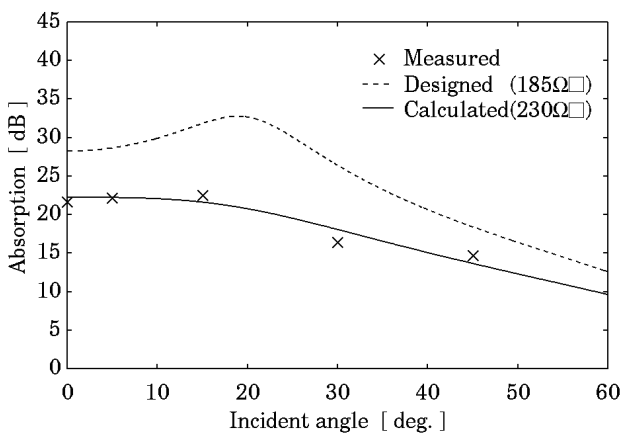


図 12. 角度特性の測定結果 (2.45GHz, TE 波)

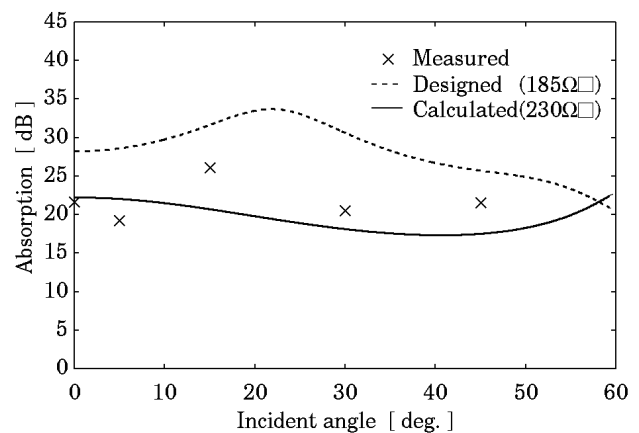


図 13. 吸収体の測定結果 (2.45GHz, TM 波)

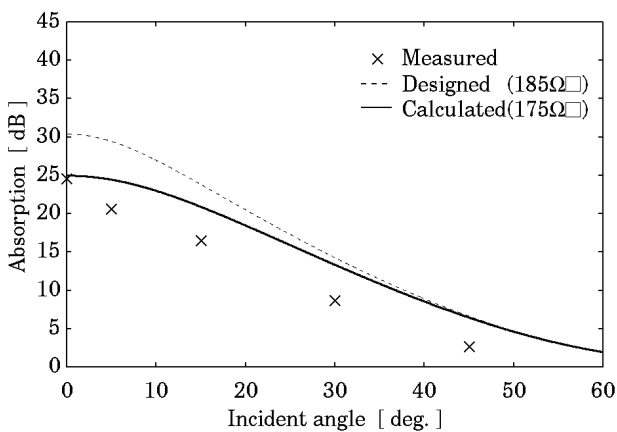


図 14. 角度特性の測定結果 (5.2GHz, TE 波)

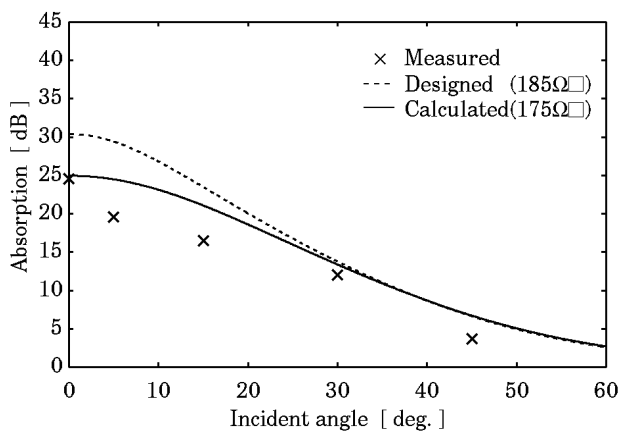


図 15. 吸収体の測定結果 (5.2GHz, TM 波)

5 設置効果の検証

次に、本電波吸収体の設置効果を検証するために、シールドルーム壁面に吸収体を設置した際の電磁界環境について検討した。具体的には、無線 LAN IP 携帯電話およびアクセスポイントをシールドルーム内に配置し、吸収体配置時および非配置時における音声品質測定を行い、パケット数により通信環境の変化を検証した。

図 16 に測定系を示す。まず SIP(Session Initiation Protocol)サーバによりそれぞれの端末に IP の割り振りを行い、無線 LAN コントローラで各端末のアクセスポイントの制御を行う。そして給電可能なスイッチングハブを介して固定電話機およびアクセスポイントに通じ、固定電話機および無線 LAN IP 携帯電話を用いた通話が可能となる。なお、本検討で用いた通信方式は IEEE802.11b(2.4~2.5GHz の 4ch)である。また、本シールドルームの大きさは縦、横それぞれ 2025mm、高さ 2400mm である。

測定では、高さ 800mm の位置でシールドルーム内の壁面より L だけ離れた地点にアクセスポイントを配置し、反対の壁面より距離 d だけ離れた地点に無線 LAN IP 携帯電話を配置したものである。なお、それぞれの機器を配置した場所はシールドルームの中心線上である。そして、内部に厚み 50mm の石膏ボード型電波吸収体を 2 面配置した場合および配置していない場合に関して音声品質測定を行い、単位時間当たりのパケット数の変化を比較した。また、同時に自由空間における理想的なパケット数の測定も併せて行った。なお、今回の測定においては L=150mm、d=250, 300, 350mm と設定した。

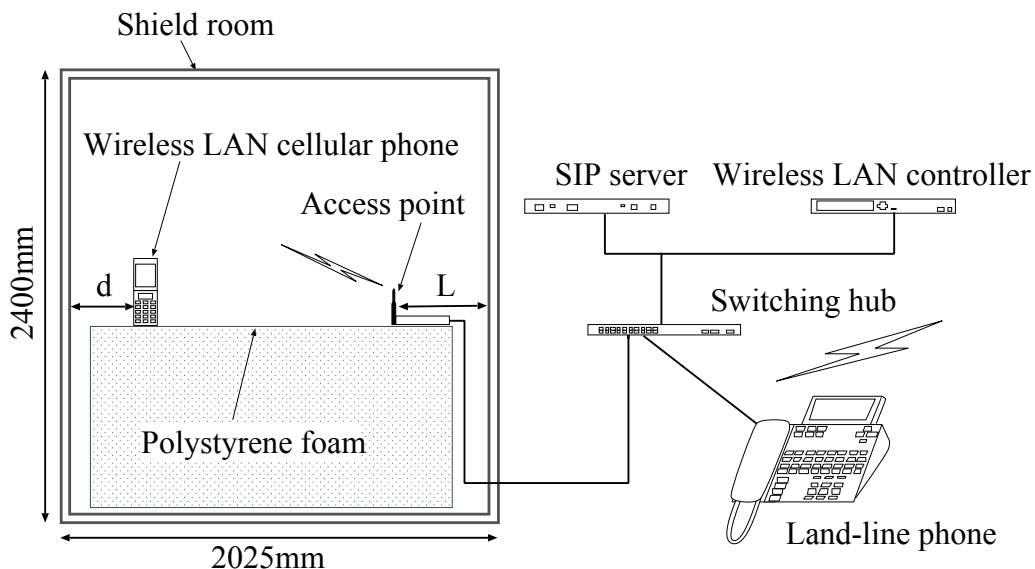


図 16. 電波吸収体の設置効果検証に関する測定系

表 4. シールドルーム内における通信品質の測定結果

-	パケット数[packets/s]			パケットロス[%]		
	d=250mm	d=300mm	d=350mm	d=250mm	d=300mm	d=350mm
自由空間時	210	210	210	0	0	0
吸収体非配置時	344	251	253	40.0	16.3	17.0
吸収体配置時	214	211	212	1.9	0.5	1.0

測定結果を表 4 に示す。上段が自由空間の場合におけるパケット数の実測値、中段が吸収体非配置時の場合、下段がシールドルーム内部 2 面に吸収体を配置した場合の結果である。これらより、吸収体非配置時の場合は内部において電波が多重反射することにより通信品質が劣化し、パケット数が増加していることがわかる。また、反射によるノイズが発生しているため、パケットロスが 16.3~40.0%と非常に多くなっている。これに対し内部に電波吸収体を配置した場合、パケット数は理想的な値である自由空間の場合に近い値をとり、パケットロスも 3%以下と非常に低く、内部の通信環境が安定していることがわかる。また、それぞれの距離 d で異なる値をとったのは、シールドルーム内部において定在波が生じている関係で、通信が難しい場所が生

じてしまったためと考えられる。以上の結果から、石膏ボード型電波吸収体をシールドルーム内に配置することで、安定した通信環境が提供可能であることが明らかになった。

6 まとめ

本研究では無線 LAN の使用環境改善を目的とし、二周波数同時対応型の電波吸収体を提案し、伝送線理論による設計からサンプル試作実験を通じて実現性を検討した。得られた結果を下記にまとめる。

- (1) JIS 規格に基づいた石膏ボードの厚みを数種類想定し、制御できる抵抗値の厚みを考慮して所望の周波数帯において 10dB 以上の吸収量が得られる構成を理論的に設計した。その結果、22mm 薄型タイプおよび 50mm 厚型タイプの構成とすることで、両周波数において 10dB 以上の吸収量が得られることを理論的に確認した。
- (2) 設計結果に基づいて電波吸収体サンプルを製作し、実験的に特性評価を行った結果、設計値と測定値はほぼ一致し、また 50mm 厚型サンプルに着目すると、斜入射に対する吸収量についても入射角度が 0~25 度の範囲であれば両周波数かつ TE・TM 両偏波に対して 10dB 以上の吸収量が得られることを確認した。
- (3) 本吸収体をシールドルームの壁面に配置し、通信品質の評価から設置効果を実験的に検討した結果、電波吸収体を配置した場合、パケット数は理想的な値である自由空間の場合に近い値をとり、パケットロスも 3%以下と非常に低く、安定した通信環境が構築できることを確認した。

以上の結果より、二周波数同時対応型電波吸収体の実現性および設置効果を理論的かつ実験的に明らかにすることができた。

【参考文献】

- [1] 遠藤哲夫, 花澤理宏, 橋本 修:
"印刷シートを用いた $\lambda/4$ 型電波吸収石膏ボードに関する基礎検討"
電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J86-B, No.7, pp.1249-1250 (2003-7).
- [2] K. Kimura and O. Hashimoto:
"An Experimental Study on the Calculation of the Complex Permittivity for Building Materials from the Reflection Loss by Free Space Measurement"
電気学会論文誌(C), Vol.124, No.2, pp.381-387 (2004-2).
- [3] K. Kimura and O. Hashimoto:
"Three-Layer Wave Absorber Using Common Building Material for Wireless LAN"
Electronics Letters, Vol.40, No.21, pp.1323-1324 (2004-10).
- [4] K. Kimura and O. Hashimoto:
"A Fundamental Study on the Improvement of Indoor Propagation for Wireless LAN Communication by an EM Wave Absorber"
Microwave and Optics Technology Letter, Vol.43, No.3, pp.226-228 (2004-11).
- [5] 木村健一, 橋本 修:
"無線 LAN 通信環境における建材型電波吸収体の設置効果に関する実験的検討"
電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J88-B, No.1, pp.310-318 (2005-1).
- [6] 木村健一, 久保知也, 橋本 修:
"内装用一般建材を用いた三層型電波吸収体の基礎的検討"
電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J88-B, No.6, pp.1130-1138 (2005-6).
- [7] K. Otsuka, H. Suzuki, K. Tani, and O. Hashimoto:
"An Experimental Study on Improving of the Wireless LAN Communication Environment Using a Plaster Board-type Wave Absorber"
Microwave and Optical Technology Letters, Vol.48, No.1, pp.107-108 (2006-1).
- [8] 近藤明日香, 松本好太, 橋本 修, 中里寿考:
"無線 LAN に対応したパーティションタイプ電波吸収体に関する基礎的検討"
電子情報通信学会論文誌(C), Vol.J88-C, No.12, pp.1121-1129 (2005-12).

[9]大塚健二郎, 橋本 修, 織田 満, 守田幸信:

"マイクロ波帯における導電紙を用いた $\lambda/4$ 型電波吸収体に関する基礎的検討"
電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J83-B, No.7, pp.1043-1049 (2000-7).

[10]橋本 修, 佐藤篤樹, 花澤理宏, 谷 健祐, 遠藤哲夫:

"C 帯における自由空間透過法による複素比誘電率測定に関する研究"
電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J86-B, No.7, pp.1089-1095 (2003-7).

[11]橋本 修: "高周波領域における材料定数測定法" 森北出版 (2003).

[12]橋本 修: "電波吸収体のはなし" 日刊工業新聞社 (2001).

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
石膏ボード型電波吸収体を用いた室内電波環境改善に関する検討	電子情報通信学会論文誌(C)	2007年12月
石膏ボードと導電紙を用いた無線 LAN 用電波吸収体の吸収特性	電気学会計測研究会	2008年3月
石膏ボードを用いた二周波対応型無線 LAN 用電波吸収体と設置効果に関する検討	エレクトロニクス実装学会誌	投稿中
石膏ボードと導電紙を用いた無線 LAN 用電波吸収体の設置効果に関する検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	2008年9月発表予定