無線 LAN 対応繊維強化セメント板 3 層型電波吸収体に関する検討

A STUDY ON THE THREE LAYERS TYPE EM WAVE ABSORBER BY USING FIBER REINFORCEMENT CEMENT BOARD FOR WIRELESS LAN

木村 健一*, 橋本 修**

Ken-ichi KIMURA and Osamu HASHIMOTO

Recently, wireless LAN is widely used around/inside building, and some problems have been appeared, such as multi path fading or security. Some EM-wave absorbers are proposed to solve above problems. In this situation, three layer type absorber by using common building materials is presented. In this paper, first three steps of design procedure are introduced. Secondary, the frequency of the temperature and relative humidity for the experimental room are investigated in order to estimate the condition of setting environment, and the variation of the water contents for the fiber reinforced cement boards are estimated. Lastly, comparison of measured absorption and calculated one for experimental absorber to confirm the validity of the design procedure and effectiveness of the absorber.

Keywords: EM-wave Absorber, Wireless LAN, Fiber Reinforced Cement Board, Complex permittivity, Water Content

電波吸収体, 無線 LAN, 繊維強化セメント板, 複素比誘電率, 含水率

1. はじめに

ユビキタス社会の到来が論じられる中, その情報インフラの一つとして無線 LAN が急速に普及してきている。これは, 2000 年の IEEE802.11b の規格統一による価格の低下と, その後の IEEE802.11 各タスクグループの更なる規格統一の動きに呼応した様々な製品の開発実用化に起因している。

それに伴って, 無線 LAN の使用に関しての問題点—マルチパスフェージングなどによる通信品質の劣化やセキュリティ問題など—も顕在化してきている。これに対して, 機器側の対策としては, OFDM などの新たな変調方式の採用・誤り訂正の新しいアルゴリズムの開発やアンテナなどの改善によってマルチパス環境への対応を改善したり, 802.11x などによる新規格の提案によるセキュリティ問題への対応をおこなったりしている。一方, 設置環境側の対策としては, 電波吸収体の設置によるマルチパスへの対応や電磁シールド材による漏洩電波の低減などの対策が提案・実証されている。

無線 LAN の使用周波数帯域 (2.4GHz~2.5GHz 及び 5.15GHz~5.25GHz) を含む 1GHz~10GHz の周波数に対応した電波吸収体は, 既にいくつかのものが提案されている。しかしそれらは一般の建築材料と比較して高価で, 加工性や取り扱いに問題があるなど, 実際の施工を考慮した場合には, いくつかの制約があるのが現状である。無線 LAN 用の吸収体に要求される項目^①としては, 対応周波数

帯域 (2つの無線 LAN 使用周波数帯域幅各 100MHz に斜入射も含めて対応したものであること), 対人調和性 (形状や構成要素に安全性や環境適応標準が要求させるほか, 景観やレイアウトとの調和も必要), 低コスト (無線 LAN 機器の低コスト化に対応したものであることが必要) 等が考えられる。これに対して, 既に提案されている無線 LAN 用の吸収体は, 抵抗皮膜などの導電性材料を使った $\lambda/4$ 型, 磁性材料を使った磁性材料型, 建材を主とした建材型の (混合型を含めて) 3つに大別できる。このうち建材型吸収体としては, 一般の建築材料をベースに誘電体や磁性体を混入したもの^②, 抵抗皮膜を塗布したりするもの^③などが報告されている。しかし, これらは無線 LAN 用の吸収体としての先の3つの要求項目から考えるといくつかの点で十分とはいえない状況である。

このような背景の下で, 筆者らは無線通信を快適に行うための電磁環境の構築を目指して研究開発を行ってきており, 既に一般建材を対象として, 複素比誘電率の評価手法^④や材料のばらつきの評価^⑤を行っている。そして, 建材型吸収体として一般建材のみを用いた3層型電波吸収体 (建材2層の間に空気層を挟み込むことによって周波数帯域幅を広げ, 斜入射に対しても有効なように工夫を行ったもの) を提案^⑥した。建材型吸収体は, 用いる材料が窯業系であるため, 含水率の変動や, 材料のばらつきによって, 吸収性能に大きな変動が予想される。そこで本検討では, 吸収体の設計法を説明した上で, 内装用

* ㈱フジタ技術センター 主任研究員・工博

** 青山学院大学理工学部 教授・工博

Researcher, Technology Development Division, Fujita Corporation, Dr. Eng.
Prof., Dept. of College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, Dr. Eng.

建材の一つである繊維強化セメント板⁹⁾を用いた3層型吸収体の設計・試作を行った。そして吸収体の構成材料の含水率の変動、設置環境の温湿度条件と材料の含水率変動範囲、さらにそれらを考慮した吸収体の吸収性能の評価を行った。

2. 設計

2つの材料を重ねる2層吸収体においては理論的に2つの吸収ピークができることが知られている⁹⁾ので、2層をベースに吸収ピークの周波数帯域幅を広げる工夫として層と層の間に空気層を入れた3層構造を考え、3層型電波吸収体の検討(空気層厚が0mmの場合の2層構造を含む)を行った。

2.1 基本式

この構造において、表面と層1、層1と層2、及び層2と層3との境界面の背面インピーダンスをそれぞれ $\dot{Z}_1$ 、 $\dot{Z}_2$ 、 $\dot{Z}_3$ とすると、これらは各層の特性インピーダンス、伝播定数、厚さ(それぞれ $\dot{Z}_{c1}$ 、 $\dot{Z}_{c2}$ 、 $\dot{Z}_{c3}$ 、 $\dot{\gamma}_1$ 、 $\dot{\gamma}_2$ 、 $\dot{\gamma}_3$ 、 d_1 、 d_2 、 d_3)から以下のように求められる¹⁰⁾。なお、検討している材料は誘電体なので比透磁率は1.0と考えられるため、以下の式では μ を省略してある。

$$\dot{Z}_3 = \dot{Z}_{c3} \cdot \tanh \dot{\gamma}_3 d_3 \quad (1)$$

$$\dot{Z}_2 = \dot{Z}_{c2} \cdot \frac{\dot{Z}_3 + \dot{Z}_{c2} \cdot \tanh \dot{\gamma}_2 d_2}{\dot{Z}_{c2} + \dot{Z}_3 \cdot \tanh \dot{\gamma}_2 d_2} \quad (2)$$

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_{c1} \cdot \frac{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_{c1} \cdot \tanh \dot{\gamma}_1 d_1}{\dot{Z}_{c1} + \dot{Z}_2 \cdot \tanh \dot{\gamma}_1 d_1} \quad (3)$$

ここで、自由空間の特性インピーダンスを Z_0 とすると、層 N におけるTE波とTM波の特性インピーダンス $\dot{Z}_{CN}$ と伝播定数 $\dot{\gamma}_N$ は、層 N における複素比誘電率 $\dot{\epsilon}_N$ と入射角度 θ_i 、真空での波長 λ_0 より

$$\dot{\gamma}_N = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\dot{\epsilon}_N - \sin^2 \theta_i} \quad (4)$$

$$\dot{Z}_{CN \text{ te}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\dot{\epsilon}_N - \sin^2 \theta_i}} \quad \dot{Z}_{CN \text{ tm}} = \frac{Z_0 \cdot \sqrt{\dot{\epsilon}_N - \sin^2 \theta_i}}{\dot{\epsilon}_N} \quad (5)$$

と表せる。そしてTE波とTM波の反射係数 $\dot{\Gamma}_{\text{te}}$ 、 $\dot{\Gamma}_{\text{tm}}$ は

$$\dot{\Gamma}_{\text{te}} = \frac{\dot{Z}_1 - Z_0 / \cos \theta_i}{\dot{Z}_1 + Z_0 / \cos \theta_i} \quad \dot{\Gamma}_{\text{tm}} = \frac{\dot{Z}_1 - Z_0 \cdot \cos \theta_i}{\dot{Z}_1 + Z_0 \cdot \cos \theta_i} \quad (6)$$

となる。ここで、層2は空気なのでその比誘電率は既知(1.0)で、未知数は3つの層の厚さと層1、層3の複素比誘電率の実部項、虚部項の7つ(d_1 、 d_2 、 d_3 、 ϵ'_1 、 ϵ''_1 、 ϵ'_3 、 ϵ''_3)である。このような3層型吸収体の典型的な構成を図1示す。

ここで扱うような窯業系の材料は、材料中の含水率の変化に伴って複素比誘電率が増減することが広く知られおり、室内空間で用いる場合の含水率変動内では、複素比誘電率の実部・虚部項ともその含水率と線形関係があることを過去⁹⁾に明らかにした。この関係を使って層1と層3の複素比誘電率をそれらの含水率で表すことにより、この系の未知数を5つ(d_1 、 d_2 、 d_3 、 w_{c1} 、 w_{c3})にすることが可能となる。この基本式を元に、図2に示すような3つの工程(材料選定、粗調査、詳細調査)により、実際の吸収体の設計を行う。

2.2 繊維強化セメント板による吸収体設計-材料選定

材料としては、含水率の変動が少ない繊維強化セメント板(スレートボードフレキシブル板⁹⁾: JIS A 5430)を選定し、複素比誘電率と含水率との実験的関係式を導出する。本検討では、市販されてい

Fig.1 Structure for the three layer type absorber

Material Selection

- Selection of building materials for layer1 and layer3 for the Three-Layers-Type EM-Absorber (3L Absorber)
 - Conduction of experimental equation of the relation between complex relative permittivity and water content for the above materials
- ⇒ Experimental equations

Course Survey

- Set target absorption performance for frequency range, oblique incident, and polarization. Typically absorption performance set 12dB for normal and 30 degree of TE and TM polarization wave.
 - Set condition of the 3L Absorber, such as thickness of each and/or total layer, range of water content.
 - Calculation absorption performance by using equation (1) to (6) and conducted experimental equations above.
- ⇒ Some combinations for thickness of each layer and

Fine Survey

- Set certain thickness of layer 1 and layer 3 among selected combinations above
 - Calculation of fine distribution of the range for water content of the each layer for corresponding thickness of layer 2, which is over the target absorption performance at 10 frequency points (0.25 GHz step for 2.4-2.5 GHz and 5.15-5.25GHz) and 13 oblique incident angels (5 degree step for 0-30 degree for TE and TM polarization wave)
- ⇒ Distribution map of water contents of 2 layers for certain combination

Final Combination of thickness and water content for each layer

Fig.2 Design flow for the absorber

る最も一般的な2つのタイプで6種類の厚さの試料(N社製3, 4, 5, 6mm厚のタイプAと8, 12mm厚のタイプB)を各10枚ずつ用意し、ダブルリッチドホーンアンテナ(EMCO3115)とネットワークアナライザー(Wiltron360B)を用いた自由空間反射損失法による反射係数の測定¹¹⁾と反復計算⁹⁾によって複素比誘電率を算出した(試料寸法: 200mm角, 測定周波数: 1~8.5GHz)。商業用材料を工場生産後、本測定用の寸法に切り出した上で上記の測定を行った。

この結果を図3に示す。2つの繊維強化セメント板の含水率-複素比誘電率曲線は、室内空間での一般的な含水率範囲である5~10%

Fig.3 Distribution of the complex permittivity of fiber reinforced cement boards for various water content

Table1 Selected range of thickness and water content for each layer over

Case	Thickness (mm)			Water Content (%)		Selected number
	d_1	d_2	d_3	wc_1	wc_3	
Case 1	3	3,4	28~32	5.0~8.9	8.0~10.0	451
	4	2,3	28~31	5.0~7.0	8.5~10.0	176
	5	2	28~30	5.0~6.1	8.6~10.0	64
	6	1,2	28,29	5.1~5.5	9.2~10.0	24
	7	1	28	5.0,5.1	9.4,9.5	3
Case 2	24~27	5,6	9	6.4~7.7	9.5~10.0	13
	20~26	5~19	10	5.6~9.6	7.8~10.0	757
	20~25	6~18	11	6.2~9.6	7.0~8.7	400
	20~24	7~16	12	7.0~9.6	6.1~7.1	122
	20~22	9~13	13	8.1~9.5	5.3~5.9	25

Table2 Selection procedure for the range of thickness and water content over 12dB in case 1

Step	Thickness (mm)			Water Content(%)		Selected number
	d_1	d_2	d_3	wc_1	wc_3	
Step 1	3	3,4	28~32	5.0~8.9	8.0~10.0	451
	4	2,3	28~31	5.0~7.0	8.5~10.0	176
	5	2	28~30	5.0~6.1	8.6~10.0	64
Step 2	3	3,4	29	5.1~8.5	9.3~10.0	156
	3	3,4	30	5~8.1	8.7~9.9	167
	4	2,3	29	5.0~6.7	9.1~10.0	97
Step 3	3	3	29	5.8~8.5	9.3~10.0	107
	3	3	30	5.3~8.1	8.7~9.8	94
	4	3	29	5.0~6.7	9.1~10.0	57

Table3 Selection procedure for the range of thickness and water content over 12dB in case 2

Step	Thickness (mm)			Water Content(%)		Selected number
	d_1	d_2	d_3	wc_1	wc_3	
Step 1	20~26	5~19	10	5.6~9.6	7.8~10.0	757
	20~25	6~18	11	6.2~9.6	7.0~8.7	400
Step 2	23	7~19	10	6.7~8.1	8.6~10.0	181
	24	6~19	10	6.2~7.7	9.3~10.0	183
	25	6~17	10	5.8~7.2	8.7~9.9	142
	23	7~16	11	6.9~8.1	9.1~10.0	123
	23	8	10	7.7~8.0	8.5~10.0	26
Step 3	23	9	10	7.6~7.8	8.9~10.0	26
	24	7	10	7.2~7.5	8.5~10.0	28
	24	8	10	7.1~7.4	8.6~10.0	27

程度では、線形関係でありその傾きは異なっていること、過去に行った結果（タイプB試料に関する実験式⁶⁾：図中の点線）とよく一致していることが分かる。

本検討では、厚さの種類が3mm~12mmと幅広く市販されているタイプAのものを吸収材料として選択した。得られた、複素比誘電率・含水率の実験式を式(7)に示す。

$$\epsilon' = 0.909 \times wc + 0.0164 \quad \epsilon'' = 0.164 \times wc - 0.293 \quad (7)$$

2.2 繊維強化セメント板による吸収体設計-粗調査及び詳細調査

式(8)で定義される吸収性能 Ste , Stm を、式(1)~(7)から得られる反射係数 Γ_{te} , Γ_{tm} から、対象周波数 1~6GHz の帯域で各層の厚さ d_1 , d_2 , d_3 と層 1 と層 3 の含水率 wc_1 , wc_3 により計算し、目標吸収性能を満足するこれらの組み合わせを調査する。

$$Ste = -20 \log_{10} |\Gamma_{te}| \quad Stm = -20 \log_{10} |\Gamma_{tm}| \quad (8)$$

目標吸収性能値は、TE・TM 偏波の斜入射 30 度及び垂直入射に対して、2 つの無線 LAN 使用周波数帯域の開始、中心、終了周波数 (2.4GHz, 2.45GHz, 2.5GHz, 5.15GHz, 5.2GHz, 5.25GHz) で 10dB 及び 12dB とした (無線 LAN 環境に対する必要吸収性能値は、一つの指標として高谷ら¹²⁾は 8dB, 守倉ら¹³⁾は CIR (希望波対干渉波電力比) として 12dB をあげている)。

計算した範囲は、建材ということ考慮に入れ、各層の厚さを 30mm 以内で 0.1mm 刻み、総厚は 45mm 以内とし、含水率は、5%~10% の範囲を 0.1% 刻みで行い、その際複素比誘電率の周波数分散は考慮せず一定値とした。

上記の計算により、目標吸収性能値を満足する各層の厚さと含水率の組み合わせが得られるが、その組み合わせは限定的である。表 1 に目標値を 12dB としたときの結果を示すが、建材層の厚さの連続性に注目すると 2 つの組み合わせ群に分けられる。ただし、表 1 に示した各変数の範囲はそのすべての領域で目標値以上であるわけではなく、その可能性のある範囲を示している (以下この範囲を許容幅と称する)。この表から 2 つの群に分けられた目標値を満たす層の厚さや含水率の範囲の分布は、層 1 と層 3 の厚さの比較により、層 1 が層 3 より薄い場合を Case1, 厚い場合を Case2 とする。

この表から、各層厚のうち許容幅が狭い層から順番に固定し、各層すべての厚さを固定した際の、目標吸収性能値を満たす層 1 と層 3 の含水率分布の広い組み合わせを考えてみる。すなわち、Case1 では、 d_1 と d_2 が d_3 よりも許容幅が狭いので、 d_1 を固定 (3mm) し、その中で目標吸収性能値を満足する組み合わせの広い d_3 を調べる。そして、さらに同様にして d_2 を固定する。このようにして、含水率分布の広い d_1 , d_2 , d_3 の組み合わせを求めることができる。表 2 にこの絞り込みの過程での各層の厚さと目標吸収性能値を満足する含水率範囲の広さ (ここでは、含水率 0.1% 刻み、厚さ 0.1mm 刻みで行った計算のうち目標値を満足する組み合わせの数：表中の Selected number) を Case1 の場合で示す。Case2 も同様にして各層の厚さを絞り込むことができ、表 3 にこの絞り込まれた層 1 と層 3 の含水率の分布範囲の広さを示す。

表 2 と表 3 で示した絞り込みを行った結果から、Case1 の組み合わせの方が Case2 に比べて、目標値を満足する含水率の範囲が広いこと、Case1 は層 1 の含水率の分布範囲が層 3 のものより広く、逆

Fig.4 Area of water content of each layer over 12dB absorption

Fig.5 Frequency characteristics for the absorber

Fig.6 Area of water content of each layer over 10dB absorption

に Case2 は層 3 の方が層 1 より含水率の分布範囲が広いことがわかる。これは、Case1 の組み合わせが、含水率の変動、特に表層（層 1）の変動に対応しやすいことを示している。さらにこの構成は、実際上の施工を考慮すると、部屋に面している表層が薄く、下地などの部分が厚いという点で実用的であるといえる。このことから、3 層型電波吸収体を考える場合、層 1 が層 3 より薄い Case1 の構成が適切であることが明らかになった。

次に、上記の絞り込まれた構成について、複素比誘電率の周波数分散を考慮した詳細調査を行うこととする。モルタルの複素比誘電率の周波数分散については、本計算周波数帯域 1GHz～6GHz 中では、実部項は減少、虚部項は微増するという報告¹⁰⁾がある。筆者らも含

水率の異なる試料に対しての周波数分散を検討しており、複素比誘電率の帯域中の代表値に対する 2.45GHz 帯と 5.2GHz 帯の複素比誘電率実部項の増減は、含水率によらず一定であった。そこで、この検討結果から対象とする 2 つの周波数帯域毎に補正数を算出し、含水率－複素比誘電率実験式に反映 (2.45GHz: 0.07, 5.2GHz: -0.06) させた。ただし、複素比誘電率の虚部項については、2.45GHz と 5.2GHz での変動値が極めて小さいため、この検討においては考慮せず、実部項のみ考慮した。そして、計算は斜入射に対しては、0～30 度まで 5 度刻み (TE, TM 偏波を含めて 13 回の計算) で、周波数に対しては 0.25GHz 刻み (2.45GHz 帯と 5.2GHz 帯合わせて 10 回の計算) で行った。

層 1 と層 3 の厚さの様々な組み合わせのうち、最も含水率の分布の広がったものは、層 1 が 3mm、層 3 が 29mm (以下層 1 と層 3 の組み合わせを、3-29 の様に示す) で、そのときの層 2 の厚さは 3mm 及び 4mm であった。その組み合わせを層 1 と層 3 の含水率をパラメーターにして図 4 に、そして層 2 の厚さが 3mm の場合の周波数分布を図 5 に示す。目標値を満足する含水率範囲が層 1 の含水率方向に広く分布している。この構成で、層 3 の含水率を 9.6% とした際には、層 1 の含水率は 6.6% から 7.6% と 1.1% の範囲で目標吸収性能値 12dB を満足することがわかる。図 4 には、層 3 の厚さを変化させた際の分布も合わせて示しているが、層 3 の厚さが 29mm から 31mm まで厚くなるにつれて分布の範囲は、狭くなると共に層 3 の含水率が低いほうへ移動していることがわかる。

最も含水率分布の広い組み合わせ 3-29 は、層 3 の含水率が 9%～10% と室内の材料としては高い部分に集中している。そこで、層 3 が厚くなるにつれて分布が層 3 の含水率の低い部分へ移動することから、目標吸収性能値を 10dB とした場合、層 3 の厚さを 29mm, 31mm, 33mm の場合について、目標値を満足する層 1 と層 3 の含水率の範囲を図 6 に示す。この図から、室内中に設置した際の繊維強化セメント板の中心的な含水率帯であると考えられる 7.5% 付近でも、3-33 の組み合わせを選択することによって、目標吸収量を 10dB とした場合、十分に広い含水率範囲を実現できることがわかる。例えば、層 3 の含水率を 7.3% とした場合、層 1 の含水率は 6.9～7.5% と 1.6% の幅において、目標吸収性能を満足することができる。

3. 材料の変動への対応性検討

前項の吸収体の設計において 1% 程度の含水率の変動に対応できることを明らかにした。本項では、実際の吸収体設置環境において材料の含水率がどの程度変動するのかを検討した。図 7 に無線 LAN の通信改善の検討を行うモデルルームでの 90 日間の温度と湿度の出現頻度を示す。この部屋は空調設備がないため、当事業所で一般居室でも空調を行っていない時期 (10 月 2 日から 11 月 17 日: 90 日間) での温湿度を 5 分ごとに「おんどとり RH: TR-72S」T&D 社製で測定した。測定位置は壁中央部で床からの高さ 750mm である。この図から、この期間中の測定結果は、温度については 18℃～23℃ の範囲に 97%、湿度については 50RH%～70RH% の範囲に 87% が分布しており、温湿度条件として 18℃50RH% と 23℃70RH% を想定すればよいことがわかる。

次に実際の使用する材料の含水率変動を調査した。試験に用いた材料は、タイプ A の 3mm 厚 (寸法 200mm 角) を 16 枚で、20℃60%

Fig. 7 Frequency of the temperature and relative humidity

Fig.8 Weight variation for samples in various environments

の恒温恒湿室、と恒温恒湿器で 18℃50%、23℃70%、15℃20%、30℃65%の環境を作り、重量変化がなくなるまでその雰囲気中に静置した。重量変化がなくなった時点で、各試料の重さを測定し、20℃60%での重量からの変化を示したのが図 8 である。ほとんどの試料について、18℃50%環境中と 23℃70%環境中での含水率の変動は、1%以内に収まっており、16 試料の平均値は 0.89%であり、30℃65%環境中と比較しても 1.3%程度に収まっていることがわかる。

吸収体が設置される室内環境では、層 1 の試料の片面のみが室内空気に触れているうに、空調により適当な温湿度状態に保たれている場合が多いため、実際の変動はこの実験値よりは小さいことが予想される。また、層 3 は裏面が金属で裏打ちされており、その反対面は層 1 とで挟まれた空気層であるため、層 1 に比べて含水率の変動は少ないと考えられる。さらに、本実験で行った実環境と想定されるもののうち、最小温湿度環境 (18℃50%) と最大温湿度環境 (30℃65%) での含水率の差は 1.3%程度であることを考慮すると、3 層型吸収体の含水率の変動は、層 1 において 1%程度を想定すれば十分であることがわかる。

4. 3 層型吸収体の試作

前項までの検討を元に、繊維強化セメント板による 3 層型吸収体

Fig.9 Measured absorption characteristics comparing to calculated one for the absorber

を試作した。用いた繊維強化セメント板はタイプ A である。2.45GHz 帯と 5.2GHz 帯において 30 度までの TE・TM 両偏波に対して、12dB 以上の吸収量を持つ Case 1 の組み合わせは、2.4 項で示したとおり d_1 が 3mm、 d_2 が 3mm そして d_3 が 29mm の組み合わせである。しかし 29mm の板は商業用としては流通していないため、本検討では比較的手に入れやすい 8mm 厚 3 枚と 5mm 厚 1 枚の組み合わせで 29mm の厚さを実現することとした。使用した繊維強化セメント板は表面状態が極めて平坦であり過去の検討⁶⁾から表裏の差がないことがわかっているため、恒温恒湿器を使って表 2 で示した含水率範囲の中に収まるように材料中の含水率を長期間かけ各材料中の含水の分布が偏らないように調整したうえで、積層したものを 1 層として取り扱った。

材料の寸法は 200mm 角とし、空気層である層 2 の 3mm 厚は、4 角にガムテープを挟んで厚さを調整した。測定は 2.1 項と同様な測定系を用いて、1GHz～6GHz の帯域で行った。同時に各材料の厚さと含水率を実測し、式(1)～式(8)によって計算された吸収性能と合わせて、図 9 に測定の結果を示す。実測した値は、 d_1 は 3.1mm、 d_2 は 3.2mm、 d_3 は 29.3mm(8.05mm, 8.06mm, 8.06mm, 5.14mm)、 w_{c1} は 5.9%、 w_{c3} は 9.5%(9.4%, 9.5%, 9.6%, 9.6%)であった。図中の太線は測定値を細線は計算値を示している。試作した吸収体の測定値と実測した厚さと含水率によって求めた計算値とは、2.45GHz 帯、5.2GHz 帯を含む 3 つのピークを含めてよく一致していると共に、両周波数帯域すべてにわたって 15dB 以上の吸収量を示しており、本設計手法の有効性が確認できた。また、実測された厚さと含水率から TE 及び TM 偏波 30 度斜入射の周波数特性の計算を行い、斜入射 30 度に対しても 15dB 以上の吸収量を持っていることを確認した。

さらに、この試料を使って含水率変動した際の吸収量の変化を確認するために、層 1 に用いた 3mm 厚の試料を 30℃65%雰囲気中に数時間設置し、含水量を 1%程度増加させた状態での測定を行った。その結果を図 9 に太点線で合わせて示す。その際、層 3 の試料の重量も合わせて測定し、層 1 の含水率は 6.9%、層 3 の含水率は 9.4%であった (先に試作した吸収体の含水率とは層 1 で +1%、層 3 で -0.1%の増減)。この図から 5.2GHz 帯超のピークでの吸収量は低下

しているが、含水率が1%程度変動しても2.45GHz帯、5.2GHz帯にわたって15dB以上の吸収性能を維持していることがわかる。

ここで用いた吸収体の層1は3mm程度の厚さであるが、材料自体で所望の曲げ強度や耐衝撃性は保持⁹⁾しており、さらに空気層の3mmを確保するためのスペーサーや層3(29mm)と複合することによって衝撃や曲げ荷重或いは材料自体のそりなどに対しても十分対応可能な構成となっている。

5. おわりに

一般建材としてよく使用されている繊維強化セメント板を使って、2つの周波数帯域の無線LANに対応した3層型電波吸収体の検討を行った。まず、3層型電波吸収体の基本的な設計手法を説明した上で、3つの段階からなる設計手法を明らかにした。そして本設計手法による3層型電波吸収体に関して行った検討により明らかになったことは、以下のとおりである。

1. 3層構造のうち、層1が層3より薄いCaseが、層1の含水率変動に広く対応でき、施工を考慮しても、適切な構成であること。
2. 得られた構成は、層3の含水率を適切に設定した場合には、1.1%の変動内で2つの無線LAN周波数帯域で30度までのTE・TM斜入射において、所定の目標吸収性能値である12dBを満足すること。
3. 本検討で用いた繊維強化セメント板を30℃65%環境や18℃50%環境などでの含水率の変動を定量的に調査した結果、その含水率の変動は1.3%程度であり、このことから本吸収体が設置される場所を想定した場合に、考慮すべき層1の含水率変動は1%程度であること。
4. 3層型吸収体を試作しその吸収量を測定した結果、実測した厚さや含水率から求めた計算値とよい一致をし、2つの周波数帯域にわたって15dBを超える吸収性能を確認した。さらに、層1の含水率を1%程度変化させても上記の吸収性能を満足することから、本吸収体が含水率の変動にも対応できることを実証した。

今後は、繊維強化セメント板を用いた3層型電波吸収体の施工を行い、部屋レベルでの吸収体の設置効果を確認する予定である。

参考文献

- 1) 守倉正博, 松江英明, : IEEE802.11 準拠無線LANの動向, 信学論(B) vol.J84-B, no.11, pp.1918-1927, 2001.11
- 2) 木村健一: 無線LAN用電波吸収体, 月刊OHM, no.5, 2004.5
- 3) 河辺伸二, 池田哲夫, 若田佳希, 小西正夫: 準マイクロ波帯用電波吸収リサイクルボードの開発, 日本建築学会構造系論文集, No.579, pp.1-5, 2004.5
- 4) 遠藤哲夫, 花沢理宏, 橋本修, : $\lambda/4$ 型電波吸収石膏ボードに関する基礎検討, 日本建築学会環境系論文集, 第568, pp.127-132, 2003.6
- 5) Kimura, K. and Hashimoto, O.: An Experimental Study on the Calculation of the Complex Permittivity for Building Materials from the Reflection Loss by Free Space Measurement, 電学論C, vol.124, No.2, pp.381-387, 2004.2
- 6) 木村健一, 新納敏文, 橋本修: 内装用建材の複素比誘電率とその変動に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, No.590, pp.57-63, 2005.4
- 7) 木村健一, 新納敏文, 橋本修, : 一般建材を使った3層型電波吸収体の開発に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-1, 2004.8
- 8) せんい強化セメント板協会: 技術資料スレート, 2004
- 9) 橋本修: 電波吸収体のはなし, 日刊工業新聞社, 東京, 2001.6
- 10) 清水康敬他, : 電磁波の吸収と遮蔽, 日経技術図書, 東京, 1999.9
- 11) 木村健一, 久保知也, 白水廣一, 橋本修: 自由空間法による複素誘電率測定における試料寸法に関する実験的検討, 信学論(B), Vol. J85-B, No.11, pp.1964-1967, 2002.11
- 12) 前田祐二, 高谷和宏, : 電波吸収パーティションを用いた2.4GHz帯無線LAN伝播特性改善効果の解析, 1999 信学ソ大(通信) B-4-39, 1999.9
- 13) Rhim, H. C., and Büyüköztürk, O. : Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range, ACI Material Journal, Vol.95, pp.262-271, 1998

Summary

Recently, wireless LAN is widely used around/inside building, and some problems have been appeared, such as multi-path fading or security. Some wave absorbers are proposed to solve these problems as a one of the counter plan. In this situation, we presented the three layers type absorber by only common building materials (the Absorber) to propose the better wireless communication environment, while other absorber is expensive and difficult for handling, comparing common building materials. The target of the absorption is 12dB for two major wireless LAN frequency ranges up to 30 degree of TE and TM polarization wave including normal incident.

The Absorber has advantage of cost and handling, and absorber with two layers is widely known to have two absorption peaks. Most of building materials, however, have very low absorption, especially for oblique incident, even with two layers structure. So, we try to insert air layer into two building materials to increase the performance. Fig.1 shows the basic structure of the Absorber.

Fig.2 shows the design procedure of the Absorber. The absorption of the Absorber could be calculated by gradually electric circuit equivalent equations with 9 unknown factors (3 thicknesses, 3 real parts and 3 imaginary parts for complex permittivities). By linear relationship between complex permittivity (real and imaginary) and water content in certain range (typically 5-10 %) shown in Fig.3, 9 factors can be reduced to 5 unknown factors (3 thicknesses and 2 water contents).

Table 1 shows the combination ranges for each layer and water content for type A, which can be over 12dB absorption, as results of the calculation for the Absorber by fiber reinforced cement board. As the first step, the course calculations are conducted in the range of 0 to 30mm, 0.1mm step for each layer and 5% to 10%, 0.1% step for water content. Selected number in the table means the number of combinations of three thicknesses and two water contents satisfied the target absorption (12dB for up to 30 degree TE and TM oblique incident). The results of course survey indicated only two combination ranges for type A could be over the 12dB among wide survey ranges for two types of fiber reinforced cement board, and case 1 have narrow ranges for d_1 and d_2 , comparing that for d_3 , and also have narrow ranges for w_{c1} comparing that for w_{c2} .

Next, fine calculations are conducted to fix the thickness of each layer for the design of the Absorber. Table 2 and Table 3 show the fixing procedure for the thickness of the layer in the order of narrow range. The results of the fine calculation indicate fixed combination for case 1 has wide range for w_{c1} comparing that for case 2. This property is suitable for the Absorber, because layer 1 is more affected to the variation of temperature and humidity in the setting environment than layer 3. Fig. 4 and Fig.6 show the area of water content of each layer over 12dB and 10dB, respectively, and Fig.5 shows frequency characteristics of the Absorber.

The frequency of the temperature and relative humidity for the experimental room are also investigated in order to estimate the condition of setting environment at Fig.7, and the variation of the water contents for fiber reinforced cement board are estimated in Fig.8.

Based on the above investigation, 3mm thick fiber reinforced cement board and three 8mm thick fiber reinforced cement boards + 5mm thick fiber reinforced board are selected for layer 1 (3mm) and layer 3 (29mm). These boards set in humidifier to control the water content to fit one in the Table 1 (5.8% to 8.5% for layer 1 and 9.3% to 10% for layer 3). Fig.9 shows the comparison of measured absorption to calculation, which is conducted by measured thicknesses and water contents by each layer for normal incident. Calculated characteristics have very good agreement of the measurement for all frequency range and are confirmed over the target absorption including for oblique incident. Dot line shows another absorption characteristic in changed w_{c1} by humidifier, to confirm the Absorber is capable to keep the certain absorption for varying water content in the range of 1 %. The dot line ($w_{c1}=6.9\%$ and $w_{c3}=9.4\%$) is close to the bold line ($w_{c1}=5.9\%$ and $w_{c3}=9.5\%$). The absorptions of these two lines are confirmed above 15 dB in 2 wireless LAN frequency ranges (2.4GHz – 2.5GHz and 5.15GHz – 5.25GHz).

The calculation of the absorber with the experimental equation of water content and complex permittivity is conducted few combinations (layers and water content) satisfying the target absorption 12dB by wide range of survey. The absorption for the selected combination is confirmed over the 15dB, and the comparison of the measurement of experimented three layers type absorber and calculation with measured thickness and water content is conducted the validity of the design procedure presented this Letter, and effectiveness of the absorber even water content movement.

(2005年 5月10日原稿受理, 2005年 9月27日採用決定)