

GHz 帯域における居住環境構成材料の材料定数

Material Constant of Building Material in GHz Frequency

○村上和也*, 岡 英夫*, 久保田賢二*, 三浦健司*, 浪崎安治**

○Kazuya Murakami*, Hideo Oka*, Kenji Kubota*, Kenji Miura*,
Yasuji Namizaki**

*岩手大学, **岩手県工業技術センター

*Iwate University, **Iwate Industrial Research Institute

キーワード： 高周波電磁特性 (high-frequency electromagnetic characteristics), 植物材料 (vegetative material), 含水率 (moisture content), 複合材料 (composite material), EMC (electromagnetic compatibility), パーティクルボード (particleboard)

連絡先： 〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学 工学部 電気電子・情報システム工学科
岡研究室 岡英夫, Tel.&Fax.: 019-621-6389, E-mail: hoka@iwate-u.ac.jp

1. 序論

電子機器のワイヤレス化によってこれまで以上に電波が飛び交う近未来居住環境¹⁾では電波環境の快適性を確保することが急務となっており、電波吸収機能を有する居住環境構成材料が期待され、その高周波における誘電特性が重要となる²⁾。岡研究グループでは、これまで磁性電波吸収木質ボードに関する研究³⁾を行い、木質ボードの磁氣的性質と共に、木材の誘電特性を明らかにしてきた⁴⁾。しかし、その他の居住環境構成材料における高周波電磁特性は十分に明らかにされていない。

本研究では、居住環境構成材料の高周波インピーダンス及び現象解明のための基礎的研究として、居住環境構成材料の中から、壁・天井・家具材等に用いられる「竹」、畳表材料である「い草」を用いた粉体型材料定数測定用ボード

(以下、ボード試料)を作製した。これらのボード試料の GHz 帯域における電磁特性、含水特性、及び曲げ強度それぞれの特性について、木粉のボード試料と比較検討し、簡単な評価を行った。

2. 試料

ボード試料作製に用いる粉体試料として、木粉(ヤチダモ、トーア木材製)、竹粉(モウソウチク「くびっ竹」、玄菱エレクトロニクス製)及びい草(熊本県八代産)を高速粉砕機(WB-1、大阪ケミカル製)で粉砕した粉体を用いた。

Fig. 1 はボード試料作製から材料定数測定までのフローチャートであり、Table 1 は各ボード試料の構成要素である。ホットプレス時に混合するバインダには、フェノール樹脂(ショウノール BRP-511、昭和高分子製)を用い、粉

Table 1 ボード試料の構成要素

Board Samples composition

Base powder	Tapped density [g/cm ³]	Base powders mass[g]	Binders mass[g]	Density of board samples[g/cm ³]
Wood powder	0.26	294.8		0.73
Bamboo powder	0.20	302.4	83.5	0.74
Igusa powder	0.33	349.3		0.91

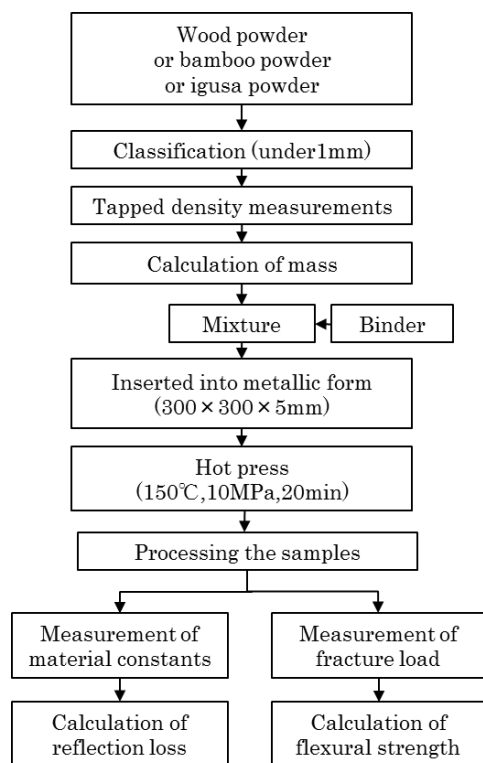


Fig. 1 ボード試料作製手順
Samples preparation procedure

体試料とバインダの体積混合率をそれぞれ 84 vol%、16 vol%一定とした。

粉体試料のタップ嵩密度はタップ法を用いて測定した。また、混合する母材の必要量は式(1)-(3)より算出した。ここで、各式中の定数は、木粉、竹粉及びい草粉が、プレス時に体積が圧縮されてそれぞれ 1/3, 1/4, 1/2.8 になることを示している。

$$m_W = 3.0 \times V_{\text{board}} \times v_W \times d_W \quad (1)$$

$$m_B = 4.0 \times V_{\text{board}} \times v_B \times d_B \quad (2)$$

$$m_I = 2.8 \times V_{\text{board}} \times v_I \times d_I \quad (3)$$

m_W, m_B, m_I : 木粉,竹粉,い草粉の必要質量[g]

V_{board} : ボード体積[cm³]

v_W, v_B, v_I : 木粉,竹粉,い草粉の体積割合[vol%]

d_W, d_B, d_I : 木粉,竹粉,い草粉のタップ嵩密度 [g/cm³]

ホットプレスは 10 MPa、150 °C の条件下で 20 min 行った⁵⁾。その後、材料定数を測定するためのネットワークアナライザ用試料(外径 7.00-0.05 mm、内径 3.00 +0.05mm、厚さ 5.00 ±0.1 mm)と、曲げ強度試験用試料(50±5 or 90±5 mm×300 mm±10 mm×5.0±0.1 mm)を作製した。

3. 材料定数の測定

3.1 測定方法

試料は恒温恒湿槽を用いて、全乾状態(105 °Cで 48h 乾燥)及び湿度 30%, 60%, 90% (温度は 20 °C一定)と変化させた。その試料の S パラメータをネットワークアナライザ HP8720D の同軸管法⁶⁾により測定した後、HP85071B ソフトウェアの Nicolson-Ross, Weir 法⁷⁾により材料定数を算出した。測定周波数は 1-10 GHz とした。

3.2 測定結果

Fig. 2-4 に各試料の湿度 0, 30, 60, 90%での複素誘電率 ϵ_r を示す。全ての試料において、複素誘電率 ϵ_r は湿度の上昇に伴い実部 ϵ' 、虚部 ϵ'' 共に増加した。また、全乾のときは ϵ' 、 ϵ'' 共に周波数に依らずほぼ一定の値を示したが、湿度が高くなると、高周波になるにつれ ϵ' 、 ϵ'' 共に減少した。以下に、2.45 GHz における各

試料の複素誘電率について述べる。

- ① 各試料の ϵ' は、全乾状態では全試料共 ϵ' が約 2.2 であったが、湿度 90% のとき、母材が木粉及び竹粉の場合は全乾状態時に比べ約 1.3 倍に、い草粉の場合は 2.1 倍に増加した。
- ② 各試料の ϵ'' は、全乾状態では全試料共 ϵ'' が約 0.06 であったが、湿度が 90% のと

き、母材が木粉の場合は全乾状態時に比べ 5.7 倍、竹粉の場合は 6.7 倍、い草粉の場合は 20.8 倍増加した。

また、Fig. 5-7 に各試料の湿度 0, 30, 60, 90% での複素透磁率 μ_r を示す。磁性材料を混合していないため、全試料とも μ_r はほぼ $1-j0$ の値を示した。

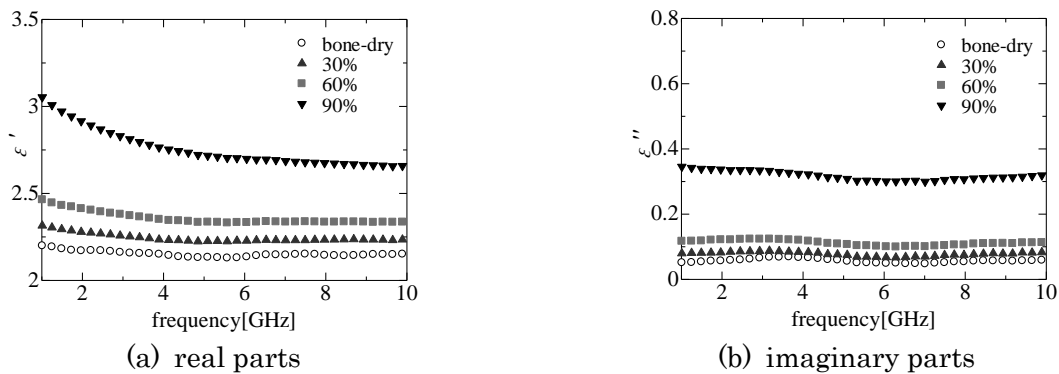


Fig. 2 木粉試料の複素誘電率

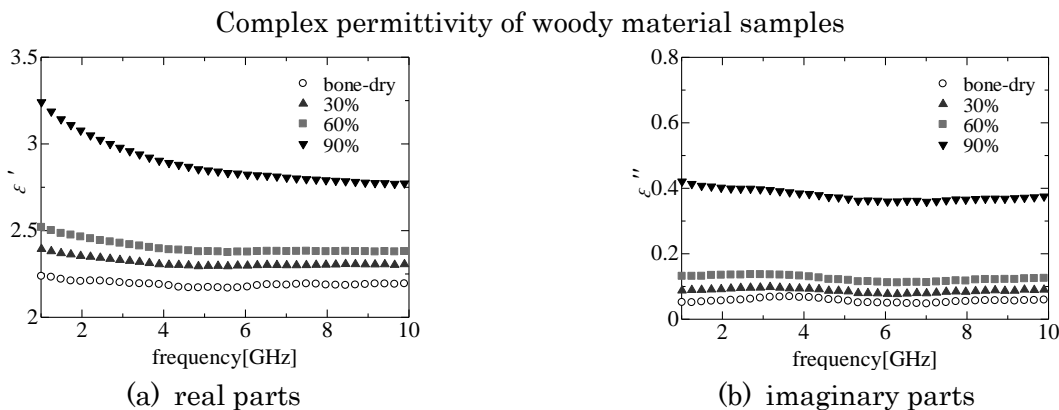


Fig. 3 竹粉試料の複素誘電率

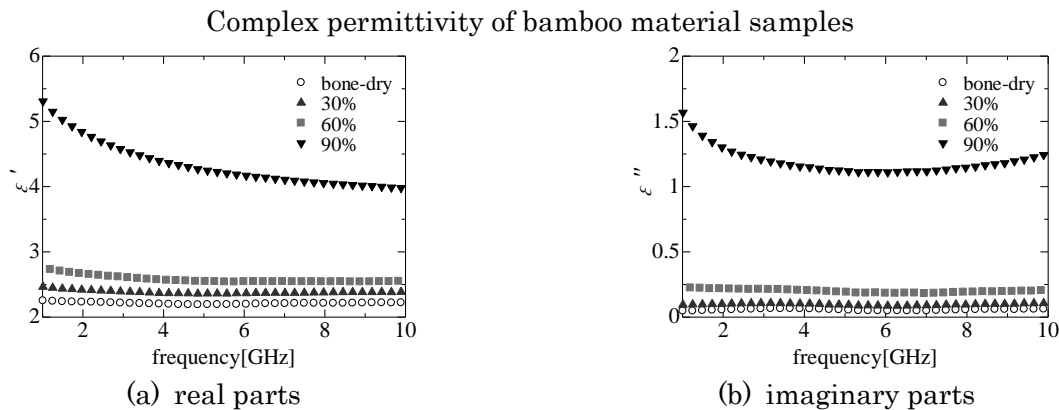


Fig. 4 い草粉試料の複素誘電率

Complex permittivity of igusa material samples

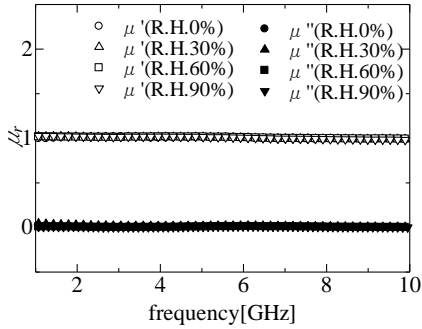


Fig. 5 木粉試料の複素透磁率

Complex permeability of woody material samples

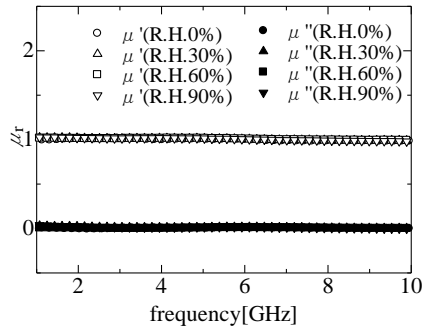


Fig. 6 竹粉試料の複素透磁率

Complex permeability of bamboo material samples

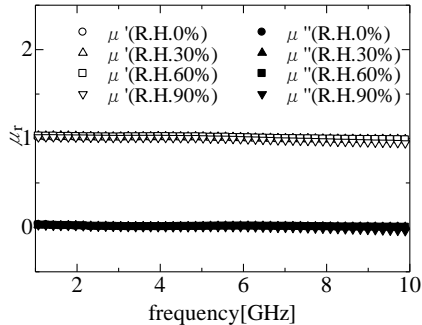


Fig. 7 い草粉試料の複素透磁率

Complex permeability of igusa material samples

4. 反射減衰量特性の算出

4.1 算出原理

ボード試料を、電波吸収ボードの母材として利用した場合の反射減衰量を算出する。ボードの裏全面に完全導体を貼りつけたとしたときの反射減衰量は以下の式(4)-(6)より算出される⁸⁾。想定するパーティクルボードの厚さ d は JIS 規格⁹⁾に準じて 9 mm とした。

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi d f}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right) [\Omega] \quad (4)$$

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (5)$$

$$RL = 20 \log|\Gamma| \text{ [dB]} \quad (6)$$

Z_{in} : 電波の入力インピーダンス [Ω]

Z_0 : 特性インピーダンス [Ω]

d : ボードの厚さ [mm]

f : 電波の周波数 [Hz]

c : 真空の電波の速さ [m/s]

RL : 反射減衰量 [dB]

4.2 算出結果

Fig. 8-10 に各試料の反射減衰量 RL を示す。同図より、各試料の最大反射減衰量 RL_{MAX} は湿度の上昇と共に増加していき、湿度 90% において最も高い値を示した。また、湿度 90% における整合周波数は、他の湿度条件よりも低周波側にシフトした。

電波吸収ボードの母材としての特性は、他の高損失材料と複合することを考慮すると材料定数が著しく低く、周波数依存性が少ないことが望ましい。木粉及び竹粉を母材とした場合、湿度 60% までは RL は 1 dB 程度であるので、母材の反射減衰量を与える電波吸収ボードへの影響は少ないと考えられる。しかし、湿度 90% になると、双方とも電波吸収ボードへの影響を考慮する必要がある値となっている。また、い草粉に関しては湿度 60% のときの反射減衰量が 5 GHz 以上では 2 dB 以上となることから、60% 以上では影響が無視できなくなると考えられる。特に湿度 90% の場合は RL がおよそ 9 dB、つまり母材のみで電波を 80% 程度吸収する結果となっている。

5. 曲げ強度試験

本項では、建材用途として必須条件である曲げ強度の特性に関して算出・検討する。

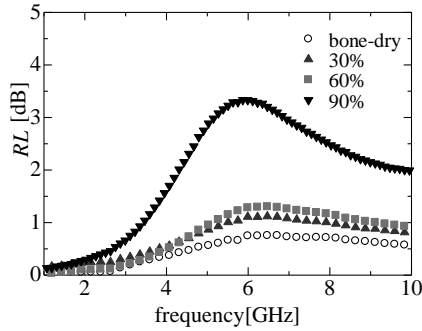


Fig. 8 木粉試料の反射減衰特性
Reflection loss of woody material samples
(thickness = 9 mm)

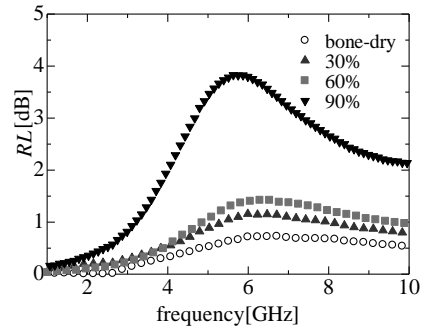


Fig. 9 竹粉試料の反射減衰特性
Reflection loss of bamboo material samples
(thickness = 9 mm)

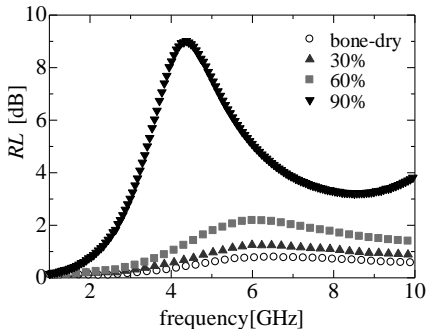


Fig. 10 い草粉の反射減衰特性
Reflection loss of igusa material samples
(thickness = 9 mm)

Fig. 11 に強度試験機 UTM-10T を用いた強度試験概略図を、Table 2 に作製したボード試料の曲げ強度特性を示す。曲げ強度 σ は、強度試験機によって測定された破壊荷重 P [N] を用い、式(7)によって算出した。

$$\sigma = \frac{3PL}{2bt^2} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (7)$$

b : ボード試料の幅 [mm]

t : ボード試料の厚さ [mm]

L : 支持点間のスパン [mm]

全ボード試料の曲げ強度は JIS 規格⁹⁾に定められた建材用パーティクルボードの曲げ強度の全タイプを満足しており、本研究で作製したボード試料は、建材としても十分有用であることが確認された。特に、竹粉を母材としたボード試料の曲げ強度 σ は 39.9 N/mm^2 と全ボード試料中最大となり、 σ が最も低い値を示した、い草粉を母材としたボード試料との差は 14.7 N/mm^2 であった。

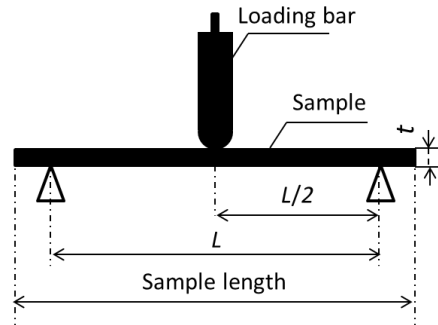


Fig.11 UTM-10T を用いた強度試験概略図
Strength test schematic using UTM-10T

6. 検討

6.1 湿度と含水率の関係

Fig. 12 に湿度 R.H. と含水率 u の関係を示す。湿度を 0%→90% まで変化させることにより含水率の最大値は木粉が 9.0%、竹粉が 9.2%、い草粉が 18.3% となった。木粉及び竹粉は同様の傾向を示し、この 2 種とい草粉を比較した際の含水率の差は湿度の上昇と共に増加していき、湿度 90% においておよそ 9% 程い草粉の方が高い値となった。これは、い草の中心部には灯心という、水分を吸収するスポンジ状の組織があるため、他の試料よりい草粉が水分をより多く吸収したものと考えられる。

なお、含水率の算出は次の式(8)により行った。

Table 2 強度試験結果
Flexural strength

Base powder	Breadth b [mm]	Thickness t [mm]	Length L [mm]	Fracture load P [N]	Flexural strength σ [N/mm ²]
Wood powder	48.7	4.97	200	119	29.7
Bamboo powder	48.4	5.08		166	39.9
Igusa powder	90.0	5.03		191	25.2

$$u = \frac{m_{R.H.} - m_{bone-dry}}{m_{bone-dry}} \times 100 [\%] \quad (8)$$

u : 含水率[%], $m_{bone-dry}$: 全乾状態の質量[g]

$m_{R.H.}$: 各湿度における質量[g]

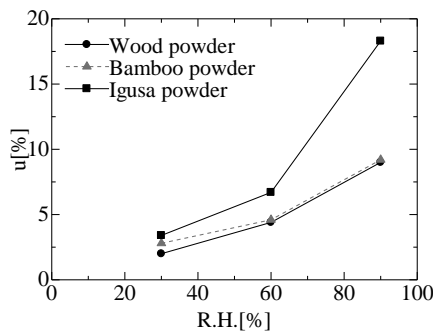


Fig. 12 湿度と試料の含水率

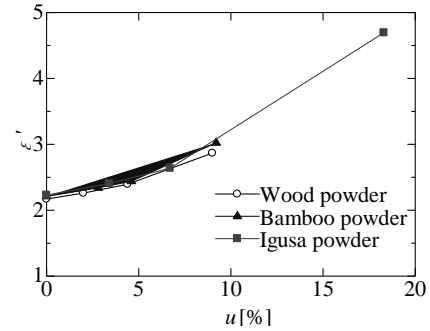
Correlation between relative humidity and moisture content of the samples (20 °C)

6.2 複素誘電率と含水率の関係

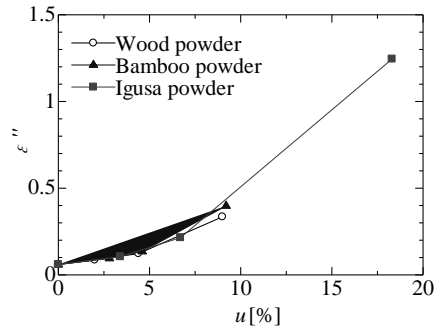
Fig. 13 は周波数 2.45 GHz における含水率と複素誘電率の関係である。木材の含水率と複素誘電率の関係については、則元らが周波数 9.4 GHz で実験した結果、含水率 5%を境に誘電率の挙動が変化すると報告している¹⁰⁾。これは、木材の場合、含水率約 5%までの範囲では木材中の水分は結合水となり、ほとんど分極を生じないが、含水率 5%以上では木材と水の結合している力が弱くなり自由水に準ずる分極を生じるためと説明している。

同図より、全ての試料において湿度を 60% から 90%に変化させたとき、すなわち含水率が 5~8%付近で誘電率の上昇が顕著であり、則元らの報告結果とおおよそ傾向が一致した。

含水することによる複素誘電率の増加具合を検討する。Table 3-5 は 2.45 GHz における、



(a) real parts



(b) imaginary parts

Fig.13 試料の複素誘電率

Complex permittivity of Samples (2.45GHz)

全乾状態での複素誘電率を基準としたときの、各試料の湿度を 30, 60, 90%と変化させたときの複素誘電率の変化割合である。変化割合は以下の式(9)より求めた。

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{R.H.}}{\varepsilon_{bone-dry}} \quad (9)$$

$\varepsilon_{R.H.}$: 各湿度における複素誘電率

$\varepsilon_{bone-dry}$: 全乾状態の複素誘電率

同表より、複素誘電率は実部、虚部共に湿度を 60%から 90%へと変化させたときに大きな変化が起こり、最も増加割合が大きくなった。また、複素誘電率実部よりも虚部の増加割合のほうが大きいことがわかる。これは含水するこ

Table 3 木粉試料の含水率に対する全乾状態を基準とした複素誘電率の変化割合
Ratios of the complex permittivity in moist condition to one in bone-dry
for various moisture contents in the case of wood powder samples.

R.H.[%]	u [%]	ϵ_f'	ϵ_f''
0	0	1	1
30	2.0	1.04	1.43
60	4.4	1.10	2.05
90	9.0	1.32	5.58

Table 4 竹粉試料の含水率に対する全乾状態を基準とした複素誘電率の変化割合
Ratios of the complex permittivity in moist condition to one in bone-dry
for various moisture contents in the case of bamboo powder samples.

R.H.[%]	u [%]	ϵ_f'	ϵ_f''
0	0	1	1
30	2.8	1.06	1.58
60	4.8	1.10	2.25
90	9.2	1.37	6.63

Table 5 い草粉試料の含水率に対する全乾状態を基準とした複素誘電率の変化割合
Ratios of the complex permittivity in moist condition to one in bone-dry
for various moisture contents in the case of igusa powder samples.

R.H.[%]	u [%]	ϵ_f'	ϵ_f''
0	0	1	1
30	3.4	1.08	1.75
60	6.7	1.18	3.58
90	18.3	2.10	20.8

とにより抵抗率が減少し、それに伴い導電率が増加するために虚部の値が高くなったものと考えられる。

6.3 曲げ強度と体積収縮率の関係

最後に、母材によって曲げ強度に差異が生じた原因について検討する。Table 6 に各粉体試料の体積補正係数と、10 MPa で熱圧縮した際の体積収縮率を示す。体積補正係数とは、ボード試料を作製するためにホットプレスで熱圧縮した場合の、粉体母材によって異なる体積収縮率を補正するための値である。

同表より、体積収縮率は高い順に竹粉、木粉、い草粉となっている。柳館によると、ボード試料を構成する粉体の粒子が小さいほど曲げ強度は大きくなる¹¹⁾。このために、今回も体積

収縮率が最も高い、つまり他に比べて小さい粒径の粒子が最も多かった竹粉の曲げ強度が最も大きい値を示し、その他の試料もそれに準ずる結果を示したのと考えられる。

Table 6 試料の体積補正係数と体積収縮率
Samples volume revision and contraction
percentage at 10 MPa

Base powder	Volume revision	Contraction percentage[%]
Wood powder	3.0	66.7
Bamboo powder	4.0	75.0
Igusa powder	2.8	64.3

7. 結論

竹粉及びい草粉それぞれを母材とする粉

Table 7 各ボード試料の誘電・ボード性能

Dielectric and material characteristics of board samples

		Wood powder	Bamboo powder	Igusa powder
Dielectric characteristics	ε' (2.45 GHz, R.H.0%)	2.17	2.21	2.23
	ε'' (2.45 GHz, R.H.0%)	0.06	0.06	0.06
	ε' (2.45 GHz, R.H.90%)	2.87	3.02	4.70
	ε'' (2.45 GHz, R.H.90%)	0.34	0.40	1.25
	RL_{MAX} [dB] (R.H.0%)	0.77	0.74	0.80
	RL_{MAX} [dB] (R.H.90%)	3.33	3.84	9.01
Material characteristics	σ [N/mm ²]	29.7	39.9	25.2
	u [%] (R.H.90%)	9.0	9.2	18.3
	Boards density [g/cm ³]	0.73	0.74	0.91

体型材料定数測定用ボード試料を作製し、GHz帯域における電磁特性、含水特性及び曲げ強度特性について木粉を母材とするボード試料との比較・検討を行った。Table 7に、各試料の特性の比較一覧を示す。本研究で得られた結果を要約すると、以下ようになる。

① 複素誘電率と含水率について

竹粉及びい草粉を母材とするボード試料の複素誘電率は、全乾状態においては木粉と同様の傾向を示し、含水率が上昇するにつれ複素誘電率も上昇した。次項で述べる通り、い草粉の含水率が他の試料より高いことにより、誘電特性も他の試料に比べ高い値を示した。

② 湿度と含水率について

竹粉を母材とするボード試料の含水率は、木粉を母材とした場合とほぼ同様な値を示したが、い草粉に関しては湿度90%において、他の試料より2.3倍ほど高い値を示した。

③ 曲げ強度特性について

全ボード試料の曲げ強度特性において、JIS規格⁹⁾に定められた建材用パーティクルボードの曲げ強度の全タイプを満足し、本研究で作製したボード試料は建材としても有用であることが確認された。全ボード試料中最も良好な値を示したのは、竹粉

を母材としたボード試料の39.9 N/mm²であった。

④ 電波吸収ボードの母材について

竹粉を母材としたボード試料は、木粉を母材とした場合と同様の誘電特性を示し、且つ全ボード試料中最も良好な曲げ強度特性を示した。これらの結果より、岡研究グループが提案している磁性電波吸収木質ボードと同様に、竹粉を用いた磁性電波吸収ボードの作製が期待できる。

参考文献

- 1) 足立 克己, 他: ワイヤレスによるユビキタスネットワーク社会の実現, 東芝レビュー, 58-4, 1/6 (2003)
- 2) 電気学会マグネティック技術委員会: 近未来居住環境における磁気応用調和技術調査専門委員会設置趣意書 (2008)
- 3) H. Oka, K. Narita: Experiment results on indoor electromagnetic wave absorber using magnetic wood, Journal of Applied Physics, 91-10, 7008/7010 (2002)
- 4) 斉藤 涼, 他: 木質系材料の高周波電磁特性に関する研究(2), 電気学会マグネティック研究会資料, MAG-09-4, 15/18 (2009)
- 5) 田鎖 亮, 他: 粉体型磁性木質材の作製法と

- その磁気特性(2), 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-98-119, 7/12 (1998)
- 6) 仁田 周一, 他 (編): 環境電磁ノイズハンドブック, 152/153, 朝倉書店 (1999)
- 7) 日本ヒューレット・パッカー(株): HP85071B 材料測定ソフトウェア, TECHNICAL DATA Mar. (1993)
- 8) 橋本 修 (編): 電波吸収体のはなし, 43, 日刊工業新聞社 (2001)
- 9) 日本工業規格: パーティクルボード, JIS-A-5908 (2003)
- 10) 則元 京, 他: 木材の剛性率および誘電特性におよぼす含水率の影響, 京都大学木材研究報告, 41, 43 (1967)
- 11) 柳館 勇也: 含水率を考慮した磁性粉混合による粉体型磁性木材の電波吸収特性調整法に関する研究, 岩手大学大学院修士論文 (2008)