都市部におけるマルチパス防止のための建物外装用広帯域電波吸収パネルの開発

Wide-Band Electromagnetic Wave Absorber Panel for Multipath Interference Reduction in Urban Areas

山根 俊博^{†,††}, 長田 耕治[†], 西方 敦博^{††}, 正会員 水本 哲弥^{†††}

Toshihiro Yamane^{†,††}, Koji Nagata[†], Atsuhiro Nishikata^{††} and Tetsuya Mizumoto^{†††}

Abstract A wide-band ferrite fin electromagnetic wave absorber panel for a precast curtain wall has been developed for multi-pass interference reduction in urban communication systems. The ferrite fin structure is designed to obtain a wide-band characteristic from the parameter survey of the fin structure. The characteristics are measured using mock-ups of the precast curtain wall with a time-domain method. Results indicate that the proposed absorber panel suppresses reflection < -14 dB in the frequency band 88.6 – 916.6 MHz for the incident angle of 30 degrees and 80.0 – 987.4 MHz for that of 60 degrees. The absorber panel can be applied to the TV ghost problem and other communication systems in both VHF and UHF bands.

キーワード：マルチパス，テレビゴースト障害，棧形フェライト吸収体，タイムドメイン法，電波吸収

1. ま え が き

屋外通信において、直達波と高層建物外壁からの反射波からなるマルチパスの影響による通信障害が問題となっている。例えば、アナログテレビ放送のテレビゴースト障害、デジタル通信におけるガードインターバルを超える遅延波による通信障害などである。このうちテレビゴースト障害を低減する方法としては、建物外壁に電波吸収パネルを設置することで電波の反射を抑制することが一般的に行われている。

都市部におけるアナログテレビ放送波が VHF, UHF 双方の周波数帯域を利用していることや、様々な周波数帯域のデジタル通信への対応を考慮すると、電波吸収パネルは広帯域特性を有することが求められる。しかし、現在利用されている建物外壁用電波吸収パネルは、そのほとんどが VHF または UHF どちらか一方に対する狭帯域電波吸

収体である。また、数種の外壁用広帯域電波吸収パネルも重量が非常に大きいため、建物への取り付け方法（取り付け金具の強度、数量）を検討する必要があるという問題点がある。

軽量の広帯域電波吸収体としては、グリッド形フェライト吸収体¹⁾が知られている。グリッド形フェライト吸収体は、水平、垂直両偏波に有効であり、従来電波暗室で広く利用されている。これに対してスティック状のフェライトを一定の間隔で並べた構造の棧形フェライト吸収体²⁾は、水平もしくは垂直いずれかの偏波に対して有効である。本論文では、特に都市部においては主に水平偏波を利用しているアナログテレビ放送波に対するテレビゴースト障害に主眼を置き、棧形フェライト吸収体を適用する。

これまで棧形フェライト吸収体については、反射特性についての基本的な検討がなされていた。しかし、実際に建物にこれを適用する場合、重量や耐候性、意匠性などの建築上のさまざまな制約条件の下で目標とする反射特性が得られるように、電波吸収体の設計を行う必要がある。本論文では、建物の外観を向上させるためにしばしば用いられる Pre Cast(以下、PC とする)カーテンウォールに棧形フェライト吸収体を適用した PC カーテンウォール組込み型の電波吸収パネルについて、その設計方法を検討し、さらに実験によってその妥当性を検証する。

2009 年 5 月 22 日受付, 2009 年 7 月 16 日再受付, 2009 年 9 月 1 日採録

[†] 清水建設株式会社 技術研究所

(〒135-8530 江東区越中島 3-4-17, TEL 03-3820-6864)

^{††} 東京工業大学 教育工学開発センター

(〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1, TEL 03-5734-3231)

^{†††} 東京工業大学 大学院 理工学研究科

(〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1, TEL 03-5734-2578)

[†] Institute of Technology, Shimizu Corporation

(3-4-17, Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8530, Japan)

^{††} CRADLE, Tokyo Institute of Technology

(2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan)

^{†††} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

(2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan)

図 1 電波吸収パネルの構造
Structure of electromagnetic wave absorber panel.

2. 計算方法

2.1 計算モデル

本論文で検討を行う電波吸収パネルの構造を図 1 に示す。層 I～V からなるが、電波吸収体としては終端板となる金属メッシュ (層 II) の入射面側にコンクリート層 (層 III, 厚さ d_c)、棧形フェライト層 (層 IV, 厚さ d)、石層 (層 V, 厚さ d_s) を有する 3 層構造である。フェライトの磁気的特性を効果的に利用するため³⁾、棧形フェライトの棧の配列方向が入射平面波 (水平偏波) の磁界の方向と平行となる TM 入射についてのみ取り扱う。電波吸収パネルの目標性能は、建物外壁用電波吸収パネルの最も一般的な仕様である反射係数 -14 dB⁴⁾ 以下とする。

2.2 各部材の材料定数

棧形フェライト吸収体使用するフェライトの複素比透磁率 $\dot{\mu}_r (= \mu'_r - j\mu''_r)$ は式 (1) に示す周波数分散式で与えられるものと仮定する⁵⁾。

$$\dot{\mu}_r = 1 + \frac{K}{1 + j \frac{f}{f_r}} \quad (1)$$

ただし、 f [MHz] は動作周波数を示しており、 K と f_r [MHz] はその積が磁性材料としての良さをあらわす量の一つとして知られる定数である。 K と f_r [MHz] は、使用するフェライトの複素比透磁率 $\dot{\mu}_r$ の実測結果をもとに $K = 1025.9$, $f_r = 8.06$ MHz と決定した。図 2 は式 (1) から求めた $\dot{\mu}_r$ の計算値と実測値との比較を示している。実部 μ'_r 、虚部 μ''_r とともに両者はほぼ一致しており、今回使用するフェライトの複素比透磁率が式 (1) で良好に表されることが確認された。フェライトの複素比誘電率 $\dot{\epsilon}_r (= \epsilon'_r - j\epsilon''_r)$ は、実測データから周波数によらず一定値 $\epsilon_r = 12.9 - j0$ とした。

その他の層の複素比透磁率は $\dot{\mu}_r = 1.0 - j0$ とし、層 I と

図 2 フェライトの複素比透磁率 $\dot{\mu}_r$
Measured and calculated $\dot{\mu}_r$ of ferrite. In calculation $K = 1025.9$, $f_r = 8.06$ MHz are used.

層 III の複素比誘電率は文献値⁶⁾ から $\epsilon_r = 6.8 - j1.8$ 、層 V については実測結果から $\epsilon_r = 5.7 - j0.12$ とした。なお、層 IV でフェライト以外は空気であるので、 $\epsilon_r = 1.0 - j0$ とした。これらの各部材の材料定数を用いて次章以降の設計計算を行う。

2.3 一様近似解析

本論文では、伝送線路法を用いて電波吸収パネルの反射係数を計算する。その際、層 IV の棧形フェライト層は、均一な等価材料定数を持つ異方性の平板として近似する。TM 入射の反射波の計算に必要な x, z 方向の等価比誘電率 $\dot{\epsilon}_{rx}$, $\dot{\epsilon}_{rz}$ と y 方向の等価比透磁率 $\dot{\mu}_{ry}$ は、合成容量モデルと合成インダクタンスモデルを用いると以下のように表される⁷⁾⁸⁾。

$$\dot{\epsilon}_{rx} = \frac{\dot{\epsilon}_{r1}\dot{\epsilon}_{r2}}{\dot{\epsilon}_{r1}\left(1 - \frac{t}{b}\right) + \dot{\epsilon}_{r2}\frac{t}{b}} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{rz} = \dot{\epsilon}_{r1}\left(\frac{t}{b}\right) + \dot{\epsilon}_{r2}\left(1 - \frac{t}{b}\right) \quad (3)$$

$$\dot{\mu}_{ry} = \dot{\mu}_{r1}\left(\frac{t}{b}\right) + \dot{\mu}_{r2}\left(1 - \frac{t}{b}\right) \quad (4)$$

ただし、 t と b はそれぞれ図 1 に示した棧形フェライトの幅と周期、 $\dot{\epsilon}_{r1}$ と $\dot{\mu}_{r1}$ はフェライト部の複素比誘電率と複素比透磁率を示している。 $\dot{\epsilon}_{r2}$ と $\dot{\mu}_{r2}$ はフェライト間空間であるため、 $\dot{\epsilon}_{r2} = \dot{\mu}_{r2} = 1.0 - j0.0$ である。また、棧形フェライト層の伝播定数 γ と特性インピーダンス Z_c は、上式の等価材料定数、真空の特性インピーダンス Z_0 と伝搬定数 k_0 を用いて以下の式で表される。

$$\gamma = k_0 \sqrt{\dot{\epsilon}_{rx}} \sqrt{\dot{\mu}_{ry} - \frac{\sin^2 \theta}{\dot{\epsilon}_{rz}}} \quad (5)$$

$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\dot{\epsilon}_{rx}}} \sqrt{\dot{\mu}_{ry} - \frac{\sin^2 \theta}{\dot{\epsilon}_{rz}}} \quad (6)$$

これらの棧形フェライト層の γ と Z_c 、その他の層の材料

図3 棧形フェライトの広帯域特性
Wide band characteristics of ferrite fin Structure. Parameters d and t/b are determined to obtain the widest frequency bands.

定数を用いて電波吸収パネルの入射面側の表面から導体板の方向を見込む入力インピーダンスを計算することによって、電波吸収パネルの反射係数を求めることができる。以降の検討では、本節で述べた計算方法を用いるものとし、棧形フェライト層の形状を決定する構造パラメータとして d と t/b を用いる。

2.4 棧形フェライトと平板フェライトの比較

図3は、入射角度 $\theta_i = 0 \text{ deg.}$ 、 $d_c = 0 \text{ mm}$ 、 $d_s = 10 \text{ mm}$ とした場合、すなわち2層形電波吸収パネルの垂直入射時の反射係数を示している。ここで棧形フェライト層(層IV)の構造パラメータを検討した結果、反射係数が -14 dB 以下となる周波数帯域が最も広帯域となる値が $d = 22 \text{ mm}$ と $t/b = 0.18$ であったため、これらの値を用いた。比較のため、層IVを平板フェライト、すなわち $t/b = 1.0$ とした場合についても示している。平板フェライトを用いた場合についても、反射係数が -14 dB 以下となる周波数帯域が最も広くなる $d = 5 \text{ mm}$ とした。棧形フェライトを用いた場合、平板フェライトと比較してフェライトの使用量が約79%と減少するにもかかわらず、反射係数が -14 dB 以下となる周波数帯域幅が平板フェライトでは 322 MHz 、棧形フェライトでは 857 MHz となり、格段の広帯域化が図れることがわかる。

3. 設計計算

3.1 2層形電波吸収パネルの設計

本節では、テレビの使用周波数帯域 ($90 \sim 770 \text{ MHz}$) において、反射係数を -14 dB 以下とするための電波吸収パネルの設計方法について述べる。ここでは、図1において $\theta_i = 0 \text{ deg.}$ 、 $d_c = 0 \text{ mm}$ とした2層形電波吸収パネルの反射特性を検討する。

(1) 石層の厚さの決定

電波吸収パネルの反射係数が -14 dB 以下となるためには、電波吸収パネルの入射面側の表面から終端板側を見込

(a) $d_s = 10 \text{ mm}$

(b) $d_s = 30 \text{ mm}$

図4 反射係数が -14 dB 以下となるための棧形フェライトの入力インピーダンス領域
Input impedance of ferrite fin layer for reflection $< -14 \text{ dB}$ in case of $f = 90 \text{ MHz}$, 430 MHz and 770 MHz .

んだ入力インピーダンスが、図4中に実線で示した円の内側の領域となる必要がある。同図の灰色の領域は、石層が存在する場合に、石層表面から見込んだ反射係数が -14 dB 以下（つまり実線の円の内部）となるための、石層裏面から終端板側を見込んだ入力インピーダンスの領域である。ただし、図4(a), (b)はそれぞれ、石層の厚さ $d_s = 10, 30 \text{ mm}$ の場合の同領域であり、 $f = 90, 430, 770 \text{ MHz}$ の3通りについて示している。周波数が高くなるに従って、また d_s が大きくなるに従って、同領域がスミスチャートの中心から左回りに変化している。

図5は、上記2層形電波吸収パネルの $d_s = 0 \text{ mm}$ とし、棧形フェライト層のみのパネルについて、 $f = 90 \sim 770 \text{ MHz}$ の範囲で変化させた場合のスミスチャート上の軌跡を示している。反射係数の実部が 1.0 以下、虚部が正の領域

図 5 1 層積形フェライト吸収体のインピーダンス特性
Input impedance of single layer panel for $f = 90 - 770$ MHz.

図 6 構造パラメータによる入力インピーダンス変化
Input impedance of double layer panel for $d = 0 - 100$ mm

では周波数が高くなるに従って、スミスチャートの右上方向に軌跡が変化する傾向がある。

図 4 と図 5 を比較すると、反射係数が -14 dB 以下となる領域と積形フェライト層の入力インピーダンスの周波数の変化に対するスミスチャート上の変化の方向がほぼ垂直方向になっている。そのため広帯域な反射特性を得るためには、反射係数が -14 dB 以下となる領域の周波数による変化が小さい方が望ましい。図 4 に示したように、 d_s が薄いほど周波数の変化による同領域の変化が小さいため、 d_s は出来る限り薄くする必要がある。そこで本報告では、建築的に施工可能な最低限度の石層の厚さとして、 $d_s = 10$ mm と決定する。

(2) 積形フェライトの構造パラメータ

図 6 は、 $d_s = 10$ mm、 $f = 430$ MHz とし、 $d = 0 \sim 100$ mm の範囲で変化させた場合の積形フェライト層の入力インピーダンスのスミスチャート上の軌跡を示している。ただし t/b については、軌跡が灰色の領域を通る $0.08, 0.18, 0.85$ の 3 通りについての結果を示している。

このような積形フェライトの入力インピーダンスの軌跡が灰色の領域を通る各 t/b の値について、同領域内に入る d の範囲を求めることで、反射係数が -14 dB 以下となるための t/b と d の満たす条件を求めることができる。

図 7 は、 $90, 430, 770$ MHz の 3 周波数において反射係数が -14 dB 以下となる d と t/b の組合せの領域を示している。3 周波数の領域の共通部分が存在することがわかる。その中から d と t/b の組合せを選ぶことで、必要な周波数特性を有する電波吸収パネルを設計することができる。ここで、周波数による反射係数の変動が大きい場合は、計算を行う周波数を増加させれば良い。

図 7 反射係数が -14 dB 以下となるための構造パラメータ t/b と d の組合せの範囲
Combination of structure parameter d and t/b for Reflection < -14 dB

(3) 石層の水分の影響

建物外壁用電波吸収パネルでは、特に最外層となる石層（御影石）が雨などの影響によって吸水し、反射特性に影響を与えることが懸念される。ここでは石層の吸水状態が反射特性に与える影響を乾燥、気乾と吸水の三つの状態について検討する。

「乾燥状態 (Dry Condition)」は 105°C 、30%の恒温恒湿槽内で 24 時間乾燥させた後、「吸水状態 (Wet Condition)」は水中に 24 時間放置後の実測結果から、それぞれ、 $\epsilon_r = 5.6 - j0.06$ と $5.9 - j0.14$ とした。また「気乾状態 (Normal Condition)」については、 27°C 、50%の恒温恒湿槽内で 4 週間放置後の実測結果から、 $5.7 - j0.12$ とした。

$\theta_i = 0^\circ$, $d_c = 0$ mm, $d_s = 10$ mm とした場合について、層 V の石層の三つの吸水状態における反射係数を図 8 に示す。今回用いた最外層に御影石を用いた電波吸収パネ

図 8 石層の水分の影響

Reflectivity of double layer panel for dry, normal and wet condition of stone layer V.

図 9 入射角度の影響

Reflectivity of double layer panel for $\theta_i = 0, 30, 60$ deg.

ルでは、吸水状態による反射係数の変化は「気乾状態」を基準とすると ± 1 dB 以内となり、水分による影響はほとんど受けないことが明らかになった。

(4) 入射角度の影響

一般に、テレビゴースト対策用の外壁電波吸収パネルでは波源と建物の位置関係が決定されているため、単一の入射角度に対する広帯域化が求められる。図 9 は、入射角度 $\theta_i = 0, 30, 60$ deg. の三通りについて前節の設計手法によって設計を行った電波吸収パネルの周波数特性を示している。ただし、反射係数が -14 dB 以下となる周波数帯域が最も広くなるような d と t/b の組合せを選択している。同図から、入射角度が大きくなるに従って、広帯域な反射特性が得やすい傾向が見られる。また d と t/b の積に比例するフェライト使用量は、 $\theta_i = 0$ deg. と比較して $\theta_i = 30$ deg. では約 85%、 $\theta_i = 60$ deg. では約 52% となっており、入射角度が大きくなるに従って削減可能である。

3.2 コンクリート層の挿入による高性能化

前節で検討を行った 3 種類の入射角度では、2 層形電波吸収パネルは計算上は目標性能を満足することが明らかになった。しかし建物に実装する電波吸収パネルの設計にお

図 10 コンクリート層の厚さ d_c の影響

Reflectivity of triple layer panel for various d_c

いては、施工誤差等によって反射特性が劣化する場合を考慮して、設計仕様に対して $3 \sim 4$ dB 程度のマージンを見込んで設計を行うことが一般的である。そこで本節における計算上の目標性能としては、 -14 dB に対して -4 dB のマージンを見込んで -18 dB と設定する。

本節では、入射角度によっては 2 層形電波吸収パネルと比較して高性能化が可能となる 3 層形電波吸収パネルの検討を行う。3 層形電波吸収パネルでは、 $d_c > 0$ mm とした層構成となる。ここで d_s は前節と同様に 10 mm、入射角度 $\theta_i = 0$ deg. とする。

(1) コンクリート層の厚さ

図 10 は、 d_c を変化させた場合の電波吸収パネルの反射特性を示している。ただし、各 d_c において反射係数が -18 dB となる帯域が最も広帯域になるように d と t/b を選択している。同図においては、 $d_c = 10$ mm と 20 mm の場合に比較的広帯域な特性が得られており、最適な d_c が存在することがわかる。

図 11 は、各 d_c に対して反射係数が -18 dB 以下となる周波数帯域を計算した結果である。 $d_c = 15$ mm とした場合に、最も広帯域な反射特性が得られ、2 層形電波吸収パネル ($d_c = 0$ mm) と比較して約 36 MHz の広帯域化が可能となる。

図 12 は $d_c = 15$ mm の場合について、 d の変化に対する積形フェライト層の入力インピーダンス軌跡を示している。ここで、3.1 節と同様に $d_s = 10$ mm の石層の影響を考慮して反射係数が -18 dB となるためのスミスチャート上の周波数ごとの領域を灰色と点線で示し、石層の影響を考慮しない場合の反射係数 -18 dB の円を実線で示している。周波数が高くなるに従って、 $d = 0$ mm の入力インピーダンスが左端から右回りに変化している。これはコンクリート層によって入力インピーダンスを調整可能であることを示している。そのため、入射角度によってはコンクリート層の挿入によって高性能化が可能となる。

図 11 コンクリート層さ d_c と吸収帯域 d_c vs band width ($|R| \leq -18\text{dB}$).

図 12 3 層形電波吸収パネルの棧形フェライト層の入力インピーダンス
Input impedance of ferrite fin layer for triple layer panel for $d_c = 15\text{mm}$, $\theta_i = 0\text{deg}$.

4. 実験

前章において要求性能を満足する為の設計方法について述べたが、棧形フェライトの形状(厚さ d と幅 t)を建物ごとに変更することは、コスト面の問題で現実的ではない。棧形フェライト吸収体の二つの構造パラメータのうちの t/b については、 t が固定(本検討では既存の設備で製作可能な 8mm 固定とする)されても b によって調整可能である。しかし d については、棧形フェライトの形状を変更しなければ調整することができない。そこで本節では、既存の設備で製作可能な $d = 17\text{mm}$ の場合について検討する。波源と建物の位置関係によって決定される入射角度 θ_i については、 $\theta_i = 30\text{deg}$. または $\theta_i = 60\text{deg}$. の 2 通りを想定し、各々別々に電波吸収パネルの設計を行い、設計の入射角度 θ_i において測定を行った。

各入射角度に用いる電波吸収パネルの層構成について検討を行った結果、 $\theta_i = 30\text{deg}$. については 3 層形電波吸収

(a) $\theta_i = 30\text{deg}$., triple layer panel ($d_c = 15\text{mm}$).

(b) $\theta_i = 60\text{deg}$., double layer panel ($d_c = 0\text{mm}$).

図 13 設計計算結果 ($d = 17\text{mm}$, $d_s = 10\text{mm}$)
Calculated reflectivity for various t/b when $d = 17\text{mm}$, $d_s = 10\text{mm}$

パネル ($d_c = 15\text{mm}$), $\theta_i = 60\text{deg}$. については 2 層形電波吸収パネルを採用した。ここで電波吸収パネルの目標性能は反射係数 -14dB 以下とし、設計計算時は -4dB のマージンを見込んで -18dB 以下と設定した。

4.1 t/b の決定

図 13(a), (b) はそれぞれ、入射角度 $\theta_i = 30, 60\text{deg}$. の場合の反射特性の計算結果を示している。 t/b については、前節の設計手法によって目標性能を満足する値の範囲を求め、その範囲付近で変化させている。反射係数が -18dB 以下となる周波数帯域が最も広帯域になるためには、 $\theta_i = 30\text{deg}$ については $t/b = 0.23 \sim 0.24$, $\theta_i = 60\text{deg}$ については $t/b = 0.16 \sim 0.17$ 程度とすれば良いことがわかる。そこで、本検討ではフェライトの幅 t を 8mm 、フェライトの周期 b を入射角度 $\theta_i = 30, 60\text{deg}$. についてそれぞれ、 34mm , 48mm と決定した。

図 14 実験外観

Geometry of measurement. When $\theta_i = 30, 60$ deg. , $L = 10.4$ and 31.2 m, respectively.

4.2 測定方法

図 1 に示した構造の PC カーテンウォールの実物大の試験体、すなわちモックアップを作成し、ネットワークアナライザ (Wilton 37169A) を用いてタイムドメイン法⁹⁾ による電波吸収性能評価手法に関するガイドライン¹⁰⁾ に基づいて反射係数を測定した。モックアップの大きさは、 $\theta_i = 30^\circ$, 60° で、それぞれ $3.5\text{m} \times 4.0\text{m}$, $3.5\text{m} \times 6.5\text{m}$ とした。測定は、図 14 に示すように郊外のサイトにて対数周期アンテナ (Anritsu MD635A) を用いて行った。

電波吸収パネルの反射係数 R は、以下の手順によって測定した。

- (i) 電波吸収パネルの上面を金属シートで覆い、反射波振幅を計測しリファレンス値 R_{ref} とする。
- (ii) 金属シートを取り除き、電波吸収パネルからの反射波振幅 R_{pan} を計測する。
- (iii) $R = R_{pan}/R_{ref}$ により反射係数を算出する。

4.3 測定結果

図 15 に $\theta_i = 30, 60$ deg. の場合の反射係数の測定結果を示す。 $\theta_i = 30, 60$ deg. について、それぞれ、 $88.6 \sim 916.6$ MHz, $80.0 \sim 987.4$ MHz の周波数帯域において目標性能である反射係数 -14 dB 以下となっている。両入射角度ともにテレビ放送波の使用周波数帯域である $90 \sim 770$ MHz をカバーしており、テレビゴースト対策用の電波吸収パネルとしては実用上十分な性能が得られている。

比較のため、図 15 と同様の条件における反射係数の計算結果を図 16 に示す。 θ_i が大きくなると反射係数が -14 dB 以下となる周波数帯域が広帯域となるという傾向は、計算値、測定値ともに一致している。 $\theta_i = 30, 60$ deg. とともに測定値と計算値に差異が生じているが、第一の原因は本測定系のダイナミックレンジが 20 dB 程度であるためであると考えられる。そのため、反射係数が -20 dB 程度より小さい場合は測定値の信頼性が低下する。その他の原因としては、計算において無限平面を仮定しているのに対して、実験では有限大のパネルであること、実験時のネットワークアナライザによる時間ゲート処理の演算によるもの、モッ

図 15 測定結果

Measured reflectivity for $\theta_i = 30, 60$ deg.

図 16 計算結果

Calculated reflectivity for measurement of $\theta_i = 30, 60$ deg.

ックアップの製作精度等が考えられるが、詳細については今後の検討課題である。

5. む す び

椋形フェライト吸収体を用いた PC カーテンウォール組込み型電波吸収パネルについて、テレビ放送波の周波数帯域 $90 \sim 770$ MHz において目標性能である反射係数を -14 dB 以下とするための椋構造の設計手法について述べた。

本手法によって設計した電波吸収パネルについて、タイムドメイン法によって、反射係数を波源と建物の位置関係によって決定される入射角度の一例として $\theta_i = 30, 60$ deg. にて測定したところ、反射係数が -14 dB 以下となる周波数帯域は、入射角度 $\theta_i = 30$ deg. の場合は $88.6 \sim 916.6$ MHz, $\theta_i = 60$ deg. の場合は $80.0 \sim 987.4$ MHz という結果が得られた。

本研究で開発した電波吸収パネルは、テレビ放送波の全周波数帯域において目標性能を満足することが明らかになった。これにより、本設計手法が広帯域電波吸収パネルの設計に有効であることが確認された。開発した電波吸収パネルは、入射角が大きい場合に広帯域性能が特に優れており、入射角度 $\theta_i = 0$ deg. で従来の平板フェライトと比較して

約 79%と使用するフェライト量も少ないため、軽量化の面でも有利である。

【文 献】

- 1) Yoshiyuki Naito, Hiroki Anzai and Tetsuya Mizumoto, "FER-RITE GRID ELECTROMAGNETIC WAVE ABSORBERS," IEEE EMC Symp.(1993)
- 2) 内藤喜之, 高橋道晴, 水本哲弥, 野瀬浩之, "棧形フェライト電波吸収体の広帯域特性," 信学論, **J76-B-II**, 7, pp.641-646(1993)
- 3) 橋本修ほか, "新電波吸収体の最新技術と応用," シーエムシー (1999)
- 4) 清水康敬ほか, "テレビ受信障害対策用電波吸収壁の性能評価に関する調査研究会報告書 [II], " NHK, p39, pp68-75(1999)
- 5) 内藤喜之, "スピネル形フェライトの透磁率の周波数分散について," 信学論, **56-C**, 2, pp.113-120(1973)
- 6) 秋田慶一, "コンクリートの電気定数とテレビ電波反射特性," 信学技報, **EMCJ78-38**, pp.47-53(1978)
- 7) 安斎弘樹, 才川亮, 水本哲弥, 内藤喜之, "ピラミッド形電波吸収体の特性解析," 信学論, **J78-B-II**, 3, pp.191-199(1995)
- 8) 安斎弘樹, 内藤喜之, 水本哲弥, 高橋道晴, "フェライト系電波吸収体に対する隙間の影響," 信学論, **J81-B-II**, 6, pp.616-623(1998)
- 9) 橋本修, "電波吸収体入門," 森北出版 (1997)
- 10) 清水康敬ほか, "テレビ受信障害対策用電波吸収壁の性能評価に関する調査研究会報告書 [I], " NHK(1999)

やまね としひろ
山根 俊博 1997 年, 東京工業大学大学院理工学研究科電気・電子工学専攻修士課程修了。同年, 清水建設(株)入社, 技術研究所所属, 副主任研究員。2009 年, 東京工業大学大学院電気電子工学専攻博士課程(社会人大学院プログラム)入学。主として環境電磁工学, 分散型電源制御技術の研究・開発に従事。

ながた こうじ
長田 耕治 1977 年, 同志社大学工学部電子工学科卒業。同年, 清水建設(株)入社, 技術研究所所属, 主任研究員。主として環境電磁工学, 画像処理の研究・開発に従事。

にしかた あつひろ
西方 敦博 1984 年, 東京工業大学・理学部・物理学科卒業。1986 年, 同大学大学院電気電子工学専攻修士課程修了。1989 年, 同博士課程修了。同年郵政省通信総合研究所入所。1993 年東工大助手。1995 同大教育工学開発センター助教授。現在, 同准教授。工博。

みずもと てつや
水本 哲弥 1979 年, 東京工業大学・工学部・電気電子工学科卒業。1984 年, 同大学大学院博士課程電気・電子工学専攻修了。同年同大学助手, 1987 年, 同大助教授, 2004 年, 同大学大学院理工学研究科教授, 現在に至る。アイソレータ, フィルタなどの導波路形光学素子, 非線形光学素子, 電磁波回路の研究に従事。工学博士。正会員。