

## 平行二線線路による TV 電波吸収特性の測定方法の提案

フェライト混入モルタルの TV 電波吸収特性に関する研究

METHOD OF TV WAVE ABSORPTION MEASUREMENT  
IN FERRITE CONCRETE BY PARALLEL WIRE LINE

Study on the absorbing characteristics of VHF waves in ferrite mortar

池田 哲夫\*, 河辺 伸二\*\*, 岡島 達雄\*\*\*

Tetsuo IKEDA, Shinji KAWABE and Tatsuo OKAJIMA

In city area, electromagnetic interference caused by buildings is a very important problem. For example, a well known ghost phenomenon is caused by interaction between incident and reflected waves caused due to the presence of large and tall buildings. The characteristics of the radio waves absorption have been measured by coaxial-wave-guide unit or curtain wall specimens. But these measurements have some demerits.

In this paper, a new measurement technique by panel specimen using parallel wire line is proposed and the accuracy of the this technique is verified. An examination of return loss by the ferrite concrete panel specimen is carried out. It was shown that the measurement accuracy using parallel wire line and coaxial-wave-guide are almost equal. However, the parallel wire line technique can measure the characteristics of the radio wave absorption without being effected by the electrical environment around.

**Keywords :** Parallel Wire Line, Cement Mortar, Return Loss, Radio Wave Absorber, Ferrite  
平行二線線路, セメントモルタル, 反射減衰量, 電波吸収体, フェライト

## 1. はじめに

近年土地の有効利用による建築物の高層化が進められているが、高層建築物による電波障害、特にTV映像が二重三重に映るゴースト現象は深刻な問題となっている。そこでゴースト現象の要因である壁面での電波の反射を防止するために、従来のフェライトタイルに代わる吸収体設置方法として、コンクリートそのものを電波吸収体にする方法が考えられている。

筆者らはフェライトモルタルによる吸収特性の測定において、これまで同軸導波管を用いて反射減衰量の測定<sup>1,2,3)</sup>を行ってきた。しかし、この測定方法では①粒径の大きな材料を混入できない、②タイルなどの表面仕上げを評価できない、③鉄筋格子や溶接金網の挿入が困難である、④同軸管径により測定周波数が制限されるなどの問題があり、PCaカーテンウォールのTV電波吸収体を開発するに当たって限界がある。また、実寸大のPCaカーテンウォール供試体を用いて電波を照射し測定を行う方法もある。しかしこの測定方法は、①測定装置や供試体作製に費用がかかる、②供試体が大型で測定が不便である、③周辺電磁環境の影響を受け易く測定精度に若干の不安がある、などの問題点がある。

そこで本研究では、平行二線線路を用いたパネル供試体による測定方法を検討し、提案する。Table 1に各測定法の長所と短所を示

す。平行二線線路による測定は、供試体に直径5mmの小孔を二箇所設けるだけで、実寸大のPCaカーテンウォール供試体を用いる測定の問題点を補うことができる。

また本研究は、この新しい平行二線線路による測定の精度を検証し、測定例としてフェライトコンクリートパネル供試体による反射減衰量の測定と検討を行う。

## 2. 平行二線線路測定法基礎理論

平行二線線路の断面と、電気力線(実線)、磁力線(破線)の分布をFig.1に示す。このように電界・磁界成分は線路の垂直断面内にあるだけで、線路長さ方向には向かない性質を持つ。また、本研究で用いた平行二線線路は供試体に対して入射方向の電流が流れ、更に同じ導体に供試体からの反射の電流が流れる仕組みとなっている。つまり線路に沿い入射波と反射波の合成波である定在波が発生している。本研究では定在波の大きさを電圧として測定するため、電圧定在波と呼ぶ。

入射波と反射波が同位相となる位置では電圧の大きさ $V$ (実効値)は、 $|A| + |B|$ (入射波) +  $|B|$ (反射波)となり最大となる。逆位相となる位置では電圧の大きさは $|A| - |B|$ となり実効値は最少となる。最大と最少は $\lambda/4$ ごとに生じる。この様子をFig.2(a)に示す。

\* 名古屋工業大学 教授・工博

Prof., Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

\*\* 名古屋工業大学 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

\*\*\* 名古屋工業大学長 工博

President, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

Fig.2(b)は反射波=0、つまり完全吸収の状態を示し、電圧Vはどの位置でも大きさが変わらない。

電圧定在波の電圧最大値 (Vmax) と電圧最小値 (Vmin) の比を電圧定在波比 (VSWR:Voltage Standing Wave Ratio) といい、式(1)の ρ で表す。この値が1に近いほど吸収特性が良く、1よりも大きくなるほど吸収特性は悪いことを示す。この ρ の値を用いて式(2)より反射係数を計算し、式(3)を用いて反射減衰量を算出する<sup>4)</sup>。

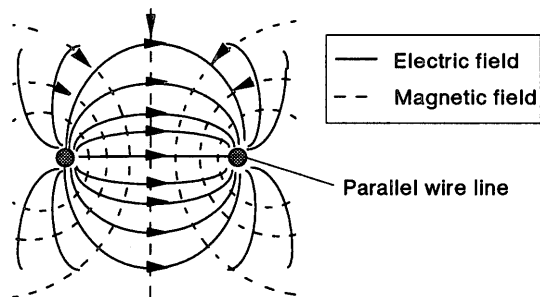


Fig.1 Distribution of electric and magnetic field

3.実験装置概要

平行二線線路による実験装置の概要をFig.3に示す。実験に用いた導線は直径5.0mmの銅線で、今回の研究の適用周波数であるTV電波の周波数帯を考慮に入れて、2線の間隔は150mmとする。供試体サイズは、線路の両側に2線の間隔と同じ距離を確保するために、500×500×50mm（以下、パネル供試体という）とし、供試体中央に銅線を通すための小孔を2箇所設ける。平行二線線路の送信側には反射板と、線路の特性インピーダンスに等しい493Ωの抵抗を設置する。これは測定時の安定性向上や、線路を整合状態にするためである。また、平衡変換器は線路上で固定とする。受信アンテナは線路上を自由に移動させることが可能で、供試体からの位置とその時の電圧実効値を測定する。供試体の裏面には反射板を設置し、供試体と密着するよう考慮する。供試体支持用台車の前面にフェライトタイルを張付け、測定精度の向上を図る。本実験は周辺環境からの電磁波の影響を比較的受けにくい性質を有しており、これらの測定は通常の鉄筋コンクリート建物内の一室を用いて行うことが可能である。

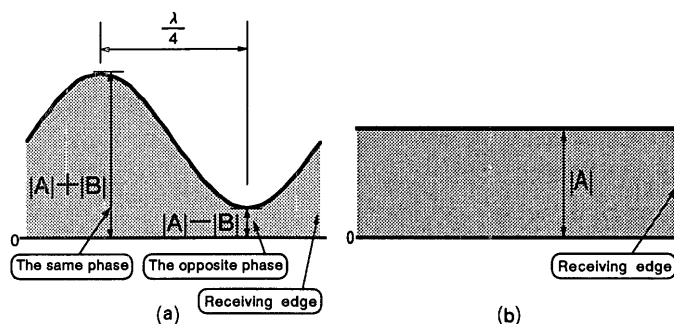


Fig.2 Distribution of Voltage Standing Wave

$$\rho = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{|A| + |B|}{|A| - |B|} = 10^{\left(\frac{V_{max} [dB] - V_{min} [dB]}{20}\right)} \dots (1)$$

$$|S| = \left| \frac{B}{A} \right| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \dots (2)$$

$$RL = -20 \log |S| \dots (3)$$

4.実験方法

4.1 供試体作製方法

本実験ではまず平行二線線路の測定精度を確認するために、同軸導波管による測定結果との比較実験を行う。比較実験にはプレーンモルタル及びMn-Zn系フェライトモルタルを、同一調合でそれぞれパネル供試体及び同軸管供試体の2種類作製する。同軸管供試体の寸法をFig.4に示す。

さらに測定精度の検証にあたり、フェライトタイルの測定も行う。フェライトタイルの寸法は100×100×6mmとし、材質はNi-Zn系を用いる。Fig.5に示す様に反射板表面に直接フェライトタイルを張付ける。この時、タイル間及びタイルと金属板との間で隙間が

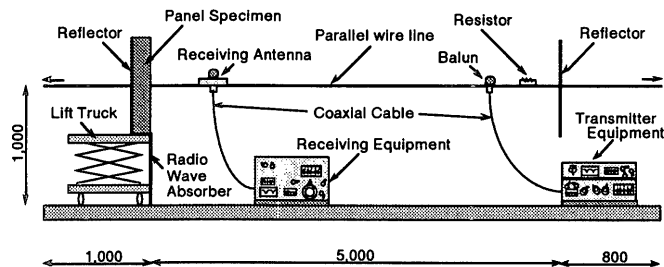


Fig.3 Plant layout drawing of parallel wire line

Table1 Efficient comparison of each measurement

	長所	短所
同軸導波管による測定	①周辺環境から影響を受けず、測定精度が高い ②供試体作製が手軽で経済的 ③供試体の取扱いが容易 ④測定が短時間かつ容易 ⑤大がかりな測定設備が不要	①供試体作製が緻密な作業を要する ②供試体作製不良による誤差が大きい ③粒径の大きな材料は混入不可能 ④タイルなどの表面仕上げや鉄筋格子の挿入が不可能 ⑤同軸管径によって測定周波数が制限される
平行二線線路を用いたパネル供試体による測定	①周辺環境からの影響が少なく、測定精度が高い ②供試体作製が比較的容易・経済的 ③供試体が比較的小型で扱い易い、室内測定が可能 ④測定が比較的容易 ⑤測定設備が小規模 ⑥粒径の大きな材料を混入可能 ⑦タイルなどの表面仕上げや鉄筋格子の挿入が可能	①破壊試験である ②測定環境は電磁的に静かな所がよい ③供試体が不均質の場合に測定しにくいことがある ④測定周波数範囲が広いときには平行線間隔を変える必要がある
実寸大PCaカーテンウォール供試体による測定	①粒径の大きな材料を混入可能 ②開口部などを含めた測定が可能 ③タイルなどの表面仕上げや鉄筋格子の挿入が可能	①周辺環境からの影響を受けやすく、測定精度に不安がある ②供試体作製が困難・不経済 ③供試体が大型で扱いづらい ④測定が困難 ⑤測定設備が大規模・高価 ⑥測定設備が屋外の場合、天候に左右される

生じないように密着させた上で、平行二線線路の測定に供する。この測定結果と同軸導波管の測定結果とを比較・検討する。

また、粒径の大きなフェライト (Ni-Zn系、Mg-Zn系) を混入したフェライトコンクリートパネル供試体を作製し、平行二線線路を用いて測定を行う。パネル供試体は、給電線を通すための2つの孔が平行を維持できるよう、特別製の鋼製型枠を使用して打設を行う。また、孔と給電線との隙間の低減等、測定精度の向上に努める。本実験ではセメントはいずれも早強ポルトランドセメントを用い、混和剤として高性能AE減水剤 (エア抜き) をセメント重量比で0.5%加える。フェライト/セメント比は3.0、水セメント比は55%とし、またプレーンモルタルについては砂/セメント比を2.0、水セメント比を50%とする。Table2からTable4に調査を、Table5からTable7にフェライトの粒度分布を示す。

4.2 測定方法

作製した供試体は、同軸管供試体については2週間水中養生の後、乾燥器にて絶乾状態まで乾燥した後に電波吸収特性試験<sup>2)</sup>を行う。パネル供試体については2週間気中養生の後一度測定を行い、乾燥器にて絶乾状態まで乾燥した後もう一度測定を行う。乾燥前のパネル供試体の含水率をTable8に示す。また、フェライトタイルは測定時に絶乾状態とする。本研究で提案する平行二線線路によるTV電波吸収特性の測定方法においては、供試体の含水状態の影響を比較的簡単に検討できる。なお、従来の測定方法である同軸導波管の測定方法は、銅管の中にコンクリート等を詰めて供試体を作るため、銅管内のコンクリートを乾燥することは比較的難しく、またコンクリートの乾燥収縮に伴い銅管とコンクリートの間に隙間を作らないための注意が必要となる。

測定はVHFのTV電波帯 (90~222MHz) を踏まえ、同軸管供試体はネットワークアナライザとSパラメータテストセットを用いて50~250MHzを5MHz間隔で、パネル供試体やフェライトタイルは平行二線線路測定装置を用いて80~230MHzを10MHz間隔で測定を行う。

5. 測定結果

5.1 平行二線線路による電圧定在波測定結果

Fig.6からFig.8に、乾燥後のプレーンモルタル及びMn-Zn系フェライトモルタルパネル供試体の電圧定在波測定結果の一部 (100,150,200MHz時) を示す。図の横軸は供試体表面から受信アンテナまでの線路上の距離を表す。Fig.2(a)にも示す様に、電圧定在波はλ/4ごとに最大値と最小値を繰り返す。100,150,200MHz時における電圧定在波はそれぞれ理論上λ/4=75,50,37.5cmとなるが、本測定でもほぼ理論値と同様の間隔を得ることができた。また、その他の周波数においても理論値通りの間隔となった。電圧定在波も滑らかなカーブを描くことができ、最大値・最小値の測定距離によるばらつきもほとんど見られなかった。これは、屋外で行われている従来のパネル供試体測定と比較して精度が向上しており、本測定方法の信頼性を表すものである。また、プレーンモルタルパネル供試体では電圧定在波比は大きく、またMn-Zn系フェライトモルタルパネル供試体では比較的小さい値となっている。これは、プレーンモルタルの吸収特性はフェライトモルタルの吸収特性より劣ることを表している。

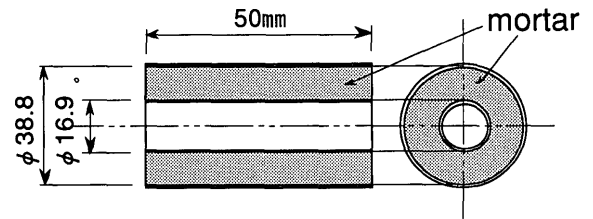


Fig.4 Coaxial-wave-guide

Table2 Mix proportion of plain mortar

S/C	Unit Volume(kg/m <sup>3</sup> )			
	Cement	Sand	Water	AE Agent
2.0	610	1221	336	C×0.5%

Table3 Mix proportion of Mn-Zn ferrite mortar

F/C	Unit Volume(kg/m <sup>3</sup> )			
	Cement	Mn-Zn	Water	AE Agent
3.0	681	2042	374	C×0.5%

Table4 Mix proportion of Mg,Ni-Zn ferrite concrete

F/C	Unit Volume(kg/m <sup>3</sup> )			
	Cement	Mg,Ni-Zn	Water	AE Agent
3.0	669	2007	368	C×0.5%

Table5 Grading of Mn-Zn ferrite

Sieve size (mm)	20.0	15.0	10.0	5.0	2.5	1.2	0.6	Under 0.3
Residual Quantity (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.10	1.89
Residual Ratio (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	5.00	94.50
Accumulated Residual Ratio (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	5.50	100.00
Pass Ratio (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	94.5	0.0

Fineness Modulus=3.000

Table6 Grading of Ni-Zn ferrite

Sieve size (mm)	20.0	15.0	10.0	5.0	2.5	1.2	0.6	Under 0.3
Residual Quantity (%)	0.00	0.00	0.09	0.09	0.34	0.54	0.42	0.52
Residual Ratio (%)	0.00	0.00	4.50	4.50	17.00	27.00	21.00	26.00
Accumulated Residual Ratio (%)	0.00	0.00	4.50	9.00	26.00	53.00	74.00	100.00
Pass Ratio (%)	100.0	100.0	95.5	91.0	74.0	47.0	26.0	0.0

Fineness Modulus=3.395

Table7 Grading of Mg-Zn ferrite

Sieve size (mm)	20.0	15.0	10.0	5.0	2.5	1.2	0.6	Under 0.3
Residual Quantity (%)	0.00	0.00	0.05	0.29	0.66	0.35	0.23	0.42
Residual Ratio (%)	0.00	0.00	2.50	14.50	33.00	17.50	11.50	21.00
Accumulated Residual Ratio (%)	0.00	0.00	2.50	17.00	50.00	67.50	79.00	100.00
Pass Ratio (%)	100.0	100.0	97.5	83.0	50.0	32.5	21.0	0.0

Fineness Modulus=3.695

Table8 Water content (Panel specimen)

	Ni-Zn	Mg-Zn	Mn-Zn	Plain mortar
wt%	5.2	5.1	5.6	8.3

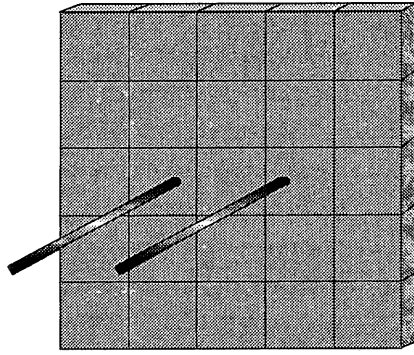


Fig.5 Specimen of Ni-Zn ferrite tile

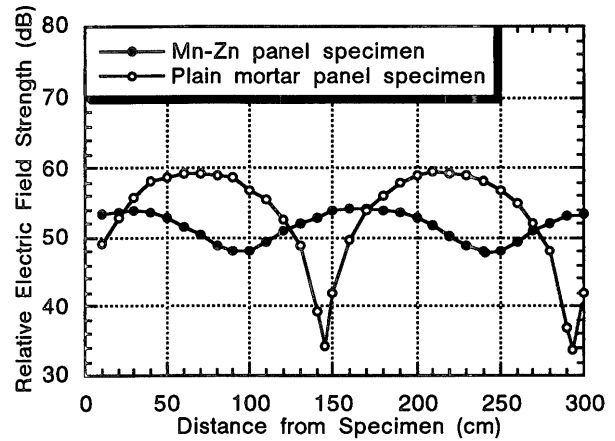


Fig.6 Voltage Standing Wave of 100MHz

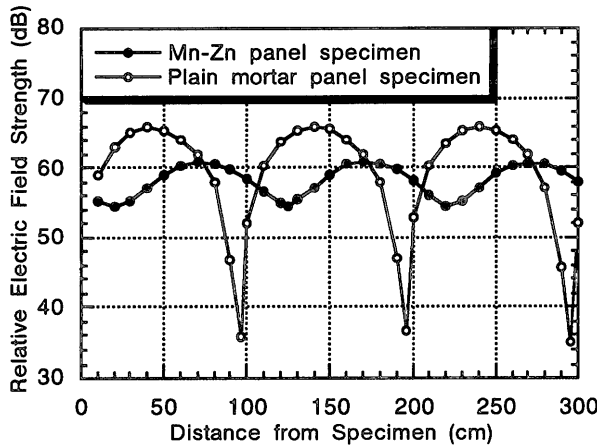


Fig.7 Voltage Standing Wave of 150MHz

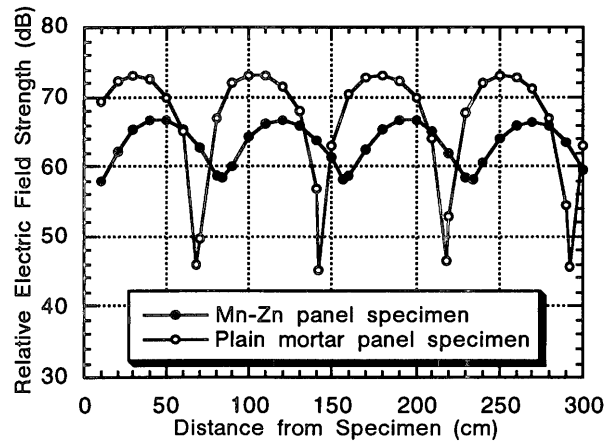


Fig.8 Voltage Standing Wave of 200MHz

5.2 同軸導波管とパネル供試体の反射減衰量の測定精度の比較

Fig.9、Fig.10、Fig.11にそれぞれプレーンモルタル、Mn-Zn系フェライトモルタル、Ni-Zn系フェライトタイルの同軸導波管及びパネル供試体の反射減衰量測定結果を示す。また、図の網掛け部分はVHFのTV電波周波数帯を表す。

(1)プレーンモルタル供試体

Fig.9に示すように、同軸導波管とパネル供試体とで、ほぼ同じ反射減衰量を得ることができた。また、パネル供試体の乾燥前の電波吸収量は乾燥後に比べて若干多い。これは供試体中の水分が誘電率を増加させ、その結果吸収特性が向上したためである。

(2)Mn-Zn系フェライトモルタル供試体

Fig.10に示すように、同軸導波管とパネル供試体とで、ほぼ同じ反射減衰量を得ることができた。また、乾燥前は乾燥後と比較してピーク値が低周波数側に移行する傾向がある。これは誘電率の上昇がピーク値を低周波数側に移行・増加させる性質によると考えられる。

(3)Ni-Zn系フェライトタイル

Fig.11に示すように、Ni-Zn系フェライトタイルにおいても同軸導波管の測定結果と平行二線線路による測定結果は、ほぼ同じ反射減衰量を得ることができた。

以上より、同軸導波管による材料単体の物性から得られる電波吸収特性と同程度の精度で、骨材などの大きな混和材料や鉄筋挿入の影響を検討できるパネル供試体による物性が、平行二線線路を用い

ても得られる。

これらの結果から、平行二線線路測定装置によるパネル供試体の測定精度の信頼性が検証されたと考えられる。

5.3 フェライトコンクリートパネル供試体の測定

(1)Ni-Zn系及びMg-Zn系フェライトコンクリートパネル供試体

平行二線線路を用いて、粒径の大きなフェライトを混入した、フェライトコンクリートパネル供試体のTV電波吸収特性を測定した。Fig.12にNi-Zn系フェライトコンクリートパネル供試体の電波吸収特性を、Fig.13にMg-Zn系フェライトコンクリートパネル供試体の電波吸収特性を示す。Ni-Zn系とMg-Zn系は、ほぼ同じような吸収特性となった。周波数が大きくなるに従い吸収特性が伸び、ピークは230MHz以降の高周波数領域に存在するものと思われる。Mn-Zn系が比較的的低周波数領域でピークをとっていたことと対照的である。また乾燥前は乾燥後に比べてNi-Zn系もMg-Zn系も吸収特性が優れており、Mn-Zn系の時と同様の傾向が見られた。

(2)パネル供試体の二層化による測定

前述のパネル供試体はそれぞれ単独（一層）で測定を行ってきたが、ここではNi-Zn系とMn-Zn系パネルを用いて二層化させ、測定を行った。その結果をFig.14に示す。一層目にNi-Zn系パネルを用いた場合吸収特性が飛躍的に伸びた。これはMn-Zn系がNi-Zn系に比べて誘電率・透磁率とも大きく、よってこのMn-Zn系パネルを二層目に設置することによって吸収特性の広帯域化につながったものと思われ

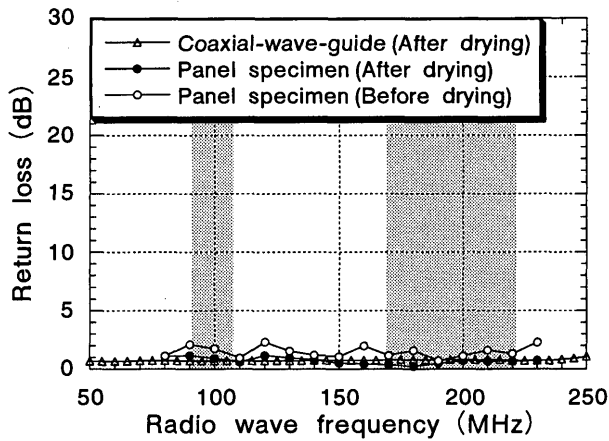


Fig.9 Radio wave absorber of plain mortar

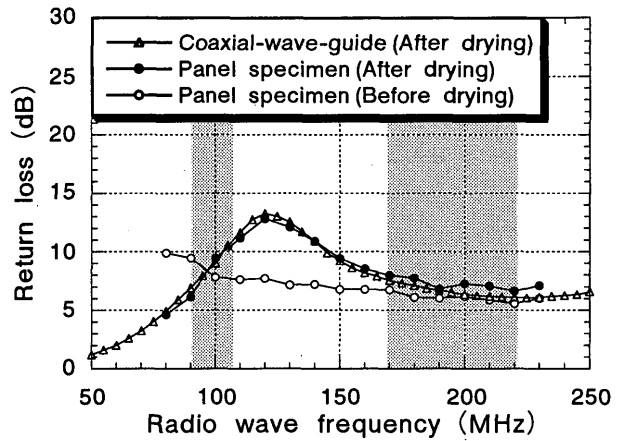


Fig.10 Radio wave absorber of Mn-Zn ferrite mortar

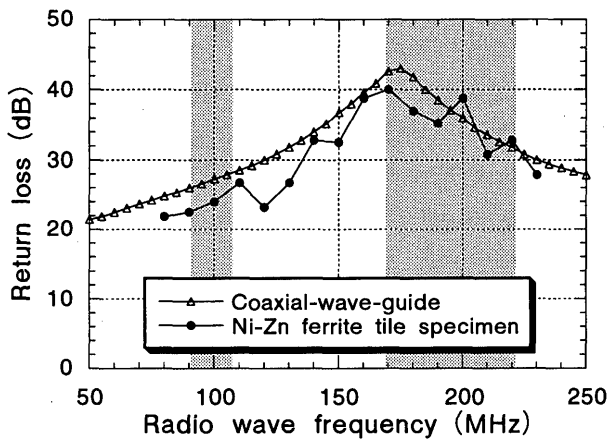


Fig.11 Radio wave absorber of Ni-Zn ferrite tile

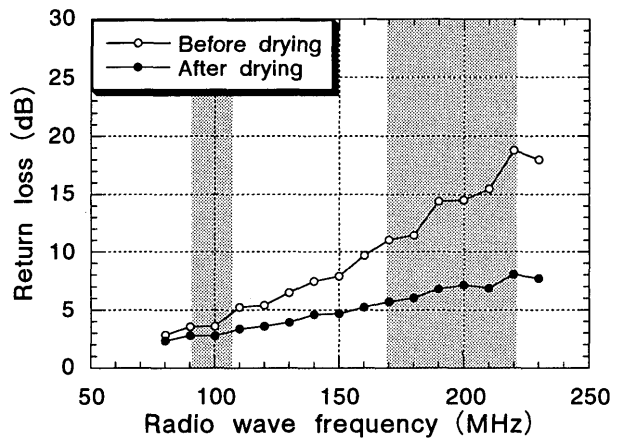


Fig.12 Radio wave absorber of Ni-Zn ferrite concrete

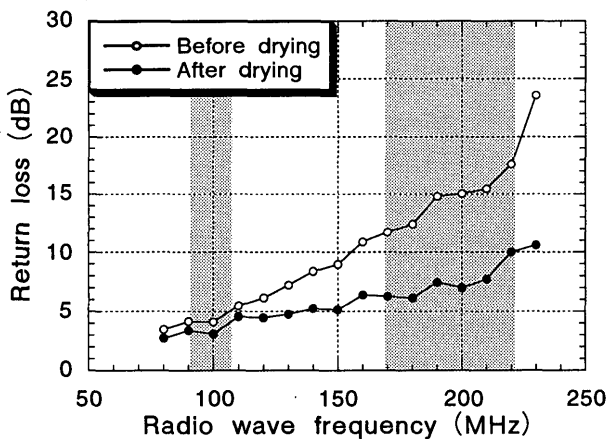


Fig.13 Radio wave absorber of Mg-Zn ferrite concrete

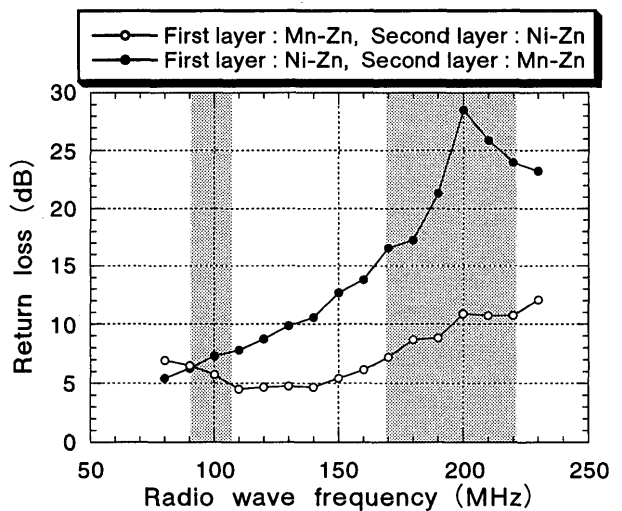


Fig.14 Radio wave absorber of double layers

る。逆に一層目にMn-Zn系パネルを設置した場合は供試体表面での反射が大きいため、Ni-Zn系パネルとの二層化によるメリットは小さくなった。

## 6. 結論

平行二線線路を用いたパネル供試体によるTV電波吸収特性の測定方法を提案し検討した結果、以下のことが明らかになった。

平行二線線路によるパネル供試体の測定結果と、同軸導波管の測

定結果はほぼ等しい。本研究で提案された平行二線線路によるTV電波吸収特性の測定方法の信頼性が検証された。経済的・効率的に、かつ周辺電磁環境の影響をほとんど受けずに測定を行うことが可能となった。

今後はこの測定方法を用いて、さらに粒径の大きなフェライトや鉄筋格子挿入等の影響の検討を行いたい。また現行の寸大PCaカーテンウォール供試体測定値との比較・検討を行っていきたい。最終的には平行二線線路を用いた測定方法の標準化を目標とする。

## 謝 辞

本研究は、文部省科学研究費（試験B(2)07555469）、セメント協会研究奨励金、豊田理化学研究所研究助成により行われたものである。

フェライトをご提供頂きました住友特殊金属(株)、日立金属(株)に感謝いたします。

研究にご協力頂きました当時の修論生川本喜也氏、小椋功氏（現清水建設(株)）、当時の卒論生桑原浩通氏（現清水建設(株)）、下釜一男氏（現修論生）に厚く謝意を表します。

## 注

注1) 電波吸収特性試験の際に用いた、反射減衰量算出のための基本的な計算式を以下に示す。<sup>5,6,7)</sup>

電波吸収体の後方に金属板がある場合の、表面から内側を見込む入力インピーダンス  $Z_{in}$  は式(4)で表される。一方、空気の界インピーダンス  $\eta_0$  は真空の誘電率  $\epsilon_0$  と透磁率  $\mu_0$  で式(5)によって表される。周波数  $f$  MHzの電磁波がすべて吸収されるための条件は、吸収体の厚さ  $d$ 、誘電率  $\epsilon$ 、透磁率  $\mu$  の組合せによりこれらの両式が等しくなることである。

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh(j 2 \pi f \sqrt{\epsilon \mu} d) \quad \dots (4)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \quad \dots (5)$$

厚さ  $d$  m について材料の周波数  $f$  MHzの電磁波に対する誘電率、透磁率は測定から得られる特性インピーダンス  $Z$ 、伝搬係数  $\gamma$  でそれぞれ式(6)、式(7)で表される。電波の入射波に対する反射波の比を表す反射係数  $\Gamma$  と、反射係数の二乗のdB値である反射減衰量  $RL$  はこれらの材料定数を用いて式(8)、式(9)により導くことができる。

$$\epsilon' - \epsilon'' = -j 2.39 \times 10^3 \gamma \frac{1}{Zf} \quad \dots (6)$$

$$\mu' - \mu'' = -j 0.955 Z \gamma \frac{1}{f} \quad \dots (7)$$

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_{in} - \eta_0}{Z_{in} + \eta_0} \right| \quad \dots (8)$$

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad \dots (9)$$

## 参考文献

- 1) 岡島達雄他；モルタルのVHF波吸収特性に与える各種混合材料の影響，セメント・コンクリート論文集No.48, pp.328~333, 1994.12
- 2) 池田哲夫他；フェライト混入モルタルのTV電波吸収特性に関する研究，セメント・コンクリート論文集No.49, pp.1074~1079, 1995.12
- 3) 岡島達雄他；フェライト混入率や電波吸収体設置方法による吸収効果、フェライト混入モルタルのTV電波吸収特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集No.482, pp.1~8, 1996.4
- 4) 雨宮好文；現代電磁波工学，（株）オーム社，1985.1
- 5) 内藤喜之；電波吸収体，オーム社，1987.4
- 6) 倉田豊；電磁波の吸収と遮蔽，日経技術図書（株），1989.1
- 7) 稲垣直樹；電磁波工学，丸善（株），1980.9

(1996年9月9日原稿受理，1997年1月30日採用決定)