

ガラス表面上金属導線の配置による電磁波遮断

小林 豊[†] 高橋 応明^{†a)} 安部 實[†]

Electromagnetic Cut-off by Metallic Lines on the Glass

Yutaka KOBAYASHI[†], Masaharu TAKAHASHI^{†a)}, and Minoru ABE[†]

あらまし 近年、電気・電子機器の発展に伴い、これらはオフィスなどにも急速に普及してきている。それに伴い、それらの機器による電磁干渉、混信等、特に無線 LAN の使用による情報の漏えいなどが問題となっている。ガラスにおける電波吸収体は抵抗皮膜を使った検討などが行われているが、本論文では窓ガラスに金属線を配置することにより電磁波遮断をし、安価で施工のしやすい遮断材を構築することを目的とする。まず、無線 LAN の周波数 2.45 GHz のみの遮断を検討する。更に、今後の無線 LAN として MMAC (Multimedia Mobile Access Communication Systems) が考えられており、その周波数である 5.2 GHz 帯の遮断も行うように円形導線と十字導線を組み合わせることによる 2 周波遮断方法を提案する。

キーワード ガラス、電磁波遮断、FD-TD 法、金属線、無線 LAN、MMAC

1. ま え が き

近年、オフィスなどの OA 化、携帯電話の爆発的普及などによって無線通信がより身近なものになってきた。そのようななかで電気・電子機器の室内利用の増加、建物内への外部からの電波浸入などにより建物内で電磁波干渉が起こり、それがオフィスや病院などの電子・電気機器の誤動作の原因となるといわれている。また、情報通信の手段としてオフィス内における無線 LAN の利用も活発となり、その情報の漏えいに関する問題も指摘されている。それらの対策として、建物自体を電磁波シールドする方法がある。建物の電磁波シールドの対象として壁・窓・床・天井等があるが、本論文ではオフィスなどにおける重要な通信路である窓に着目した。ガラスにおける電波吸収体については、橋本らが抵抗皮膜を用いた検討 [1] を行っているが、筆者らは窓ガラスに金属線を配置することにより安価で施工のしやすい電磁波遮断材を構築することを目的とする。オフィスなどでは携帯電話及び PHS などの移動体通信機器の利用も考えられるため、対象とする無線 LAN の周波数のみを遮断するような周波

数選択性をもたせる必要がある。また窓ガラスの役割を損なわないようにデザイン、光の透過性を考慮する必要がある。

本論文では、現行の無線 LAN の周波数である 2.45 GHz、将来無線 LAN として考えられている 5.2 GHz 帯の遮断を目的とし、円形導線、十字導線等を配置したガラスの透過特性を FD-TD 法 (Finite Difference Time Domain method) [2] により解析を行い単周波遮断、2 周波遮断の効果が得られることを確認した。

2. では解析構造について、3. では単周波遮断、4. で 2 周波遮断の解析結果を示し、その有効性を実験により示した。

2. 解 析 構 造

図 1 のように x, y 方向に無限に広がるガラスに Gaussian パルスを入射させる。スペクトルの最大値から -120 dB となる周波数が 10 GHz 以上となるような Gaussian パルスを使用することにより、対象としている周波数である 10 GHz までは十分に保証される [3]。その Gaussian パルスを入射し、ガラス表面からの反射波とガラスを透過した透過波を図 2 の各点において観測し、高速フーリエ変換 (FFT) を行うことにより透過係数の周波数特性を求めた。なお、反射波の観測はガラス前面より $2\lambda_0$ (λ_0 は 2.5 GHz の自由空間波長) 透過波はガラス後面より $1.5\lambda_0$ の位置で

[†] 武蔵工業大学 電子通信工学科, 東京都

Department of Electronic and Communication Engineering,
Musashi Institute of Technology, Setagaya-ku, Tokyo,
158-8557 Japan

a) E-mail: masa@ieee.org

観測した (図 2). この値は, メッシュからの散乱が平面波として観測できる位置を検討した結果である. 遮断特性は次式により求めた. 式中の T は透過係数である.

$$\text{透過量} = 20 \log_{10} |T| \quad [\text{dB}]$$

遮断材の評価として一般的である, -20 dB を遮断の基準とした.

ガラスの表面に金属線を配置することによりそれぞれの相互干渉, 共振により電磁波の遮断を可能にしている. 解析モデルは x, y 方向に対して同形とし, 垂直, 水平の直交 2 偏波に対応する構造である. 一般に使用されている窓ガラスは対象としている波長に比べ十分に大きいことより, 無限周期構造の解析でおおよその特性解析が可能である. そのため, 無限周期構造を電気壁・磁気壁を用いることによって簡略化し, 吸収境界条件には Berenger の PML [4] を用いた (図 1). セルサイズはガラスの近傍で $0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm} \times 1.00 \text{ mm}$, 電界・磁界の進行方向 (z 方向) に関して不等間隔メッシュ [5] を用いて最大 5 mm とし, 合計約 $400,000$ 個のセルを用いた. そのことにより計算時間及び使用するメモリを均一メッシュと比較して, 約半分におさえる

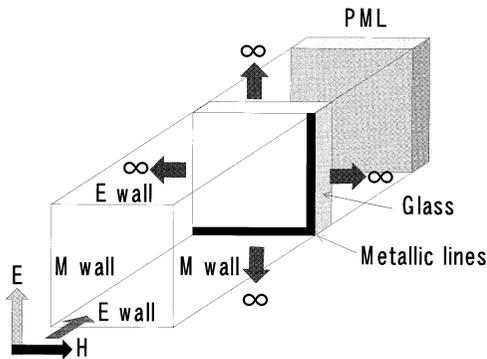


図 1 解析構造
Fig. 1 Analysis model.

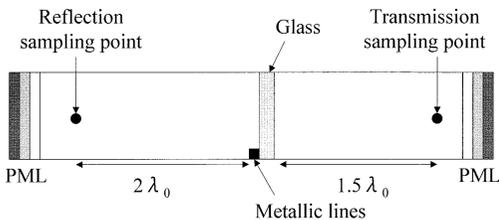


図 2 観測点
Fig. 2 Sampling point.

ことが可能となった. 円形モデルは半径に対して $40 \sim 80$ 分割の階段近似を行った. 時間ステップは Courant 基準 [6] により 0.57 ps , ガラスの比誘電率は一般の窓ガラスに使用されるソーダ石灰ガラスの値を用い $\epsilon_r = 6.4 - j0.1$ とした [7].

3. 単一周波の遮断

図 3 に示すように, 金属線を (I) メッシュ及び (II) 十字, (III) 円形状に配置したガラスの解析を行う. なお,

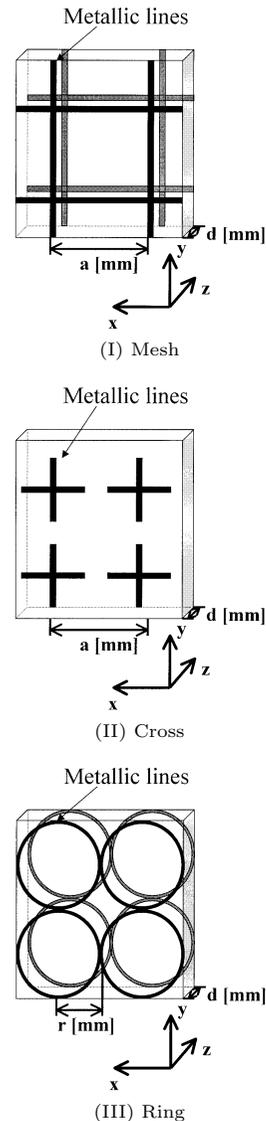


図 3 メッシュと十字, 円形導線の解析モデル
Fig. 3 Analysis model of mesh, cross and ring conductor.

(III) において隣り合う円形導線はそれぞれ 0.5 mm の間隔をあけている．この理由については後述する．メッシュ状に導線をガラスの両面に配置したときの結果を図 4 に，十字，円形導線をガラスの片面及び両面に配置したときの解析結果をそれぞれ図 5～図 7 に示す．ガラスの片面にのみメッシュ，十字状に金属導線を配置したときの結果は両面配置のときと同様の結果が得られたので省略する．

図 4 より，メッシュ状に金属線を配置した場合にはある周波数以下の周波数を遮断し，それ以上を通すという高域フィルタの役割を果たしている．また図 5，図 6 より，十字導線，円形導線を用いることによって特定の周波数帯のみの遮断が可能となる．円形導線を用いるほうが広帯域な周波数選択性をもった遮断が確認できる．遮断周波数は円形の半径 r [mm] によって

定まり，半径を変化させることにより所望の周波数のみの遮断が可能となる（図 6）．その遮断周波数の媒質内波長 [8] と円形導線の円周の関係は約 1λ である．更に，その円形導線をガラスの両面に配置すると相互の干渉により遮断周波数帯域が図 7 のように拡大される．遮断帯域の関係を表 1 に示す．比較は同一半径である $r = 15$ mm によって行った．これより片面配置に比べて両面配置は約 2.5 倍の遮断帯域を有している．前述した円形導線どうしの間隔は，本論文の解析範囲で以下のことがわかっている．

- (1) その間隔によって遮断する周波数が変化する．
- (2) ガラスの片面にのみ配置したときにはその周波数のみの変動ですむが，両面に配置したときにはその特性すら変化する．
- (3) 導線を接続させてしまうと，メッシュ状に配置したときと同じような特性となる．

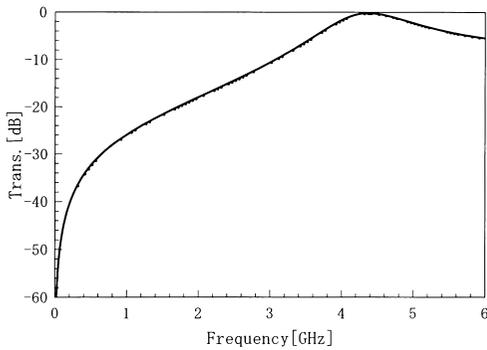


図 4 メッシュ状導線による遮断特性 ($a = 10$ mm, 片面配置)
 Fig. 4 Frequency characteristics of mesh conductors ($a = 10$ mm, the one side arrangement).

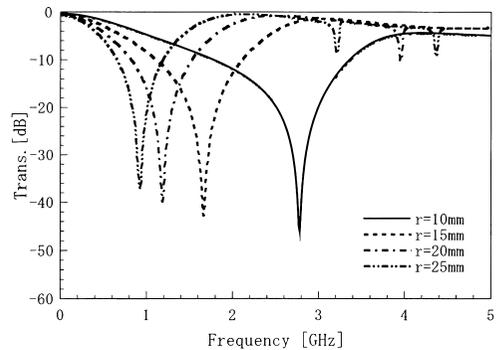


図 6 円形導線による遮断特性 (片面配置)
 Fig. 6 Frequency characteristics of ring conductors (the one side arrangement).

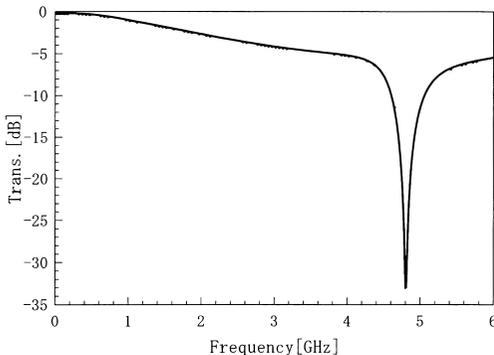


図 5 十字導線による遮断特性 ($w = 8$ mm, 片面配置)
 Fig. 5 Frequency characteristics of cross conductors ($w = 8$ mm, the one side arrangement).

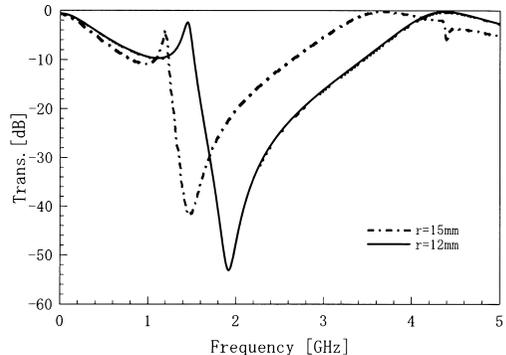


図 7 円形導線による遮断特性 (両面配置)
 Fig. 7 Frequency characteristics of ring conductors (the both side arrangement).

表 1 遮断帯域比較

Table 1 The comparison of cut-off frequency band.

	帯域幅[%]
片面配置	18.7
両面配置	49.3

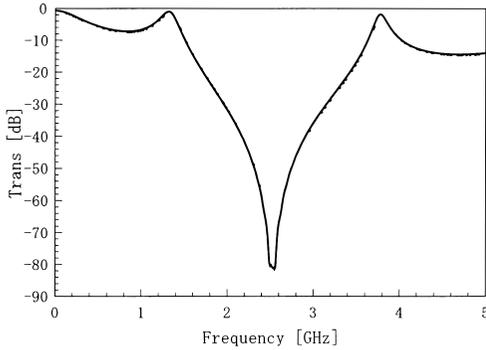


図 8 2.45 GHz の遮断
Fig. 8 Cut-off of the 2.45 GHz.

(4) 円形どうしの間隔は 0.005λ 以下とすることにより安定した特性を得ることができる。

以上より、本論文では間隔を上記の条件に順じて設定している。

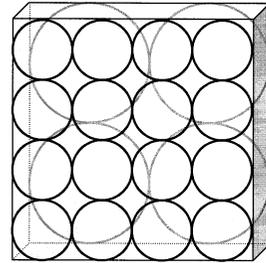
以上の結果より、厚さ 6 mm のガラスの両面に円形導線を配置して、無線 LAN の周波数である 2.45 GHz 帯の遮断条件を求めると、半径 9 mm、円形どうしの間隔 0.25 mm で図 8 の特性を得ることができる。

4. 2 周波遮断の検討

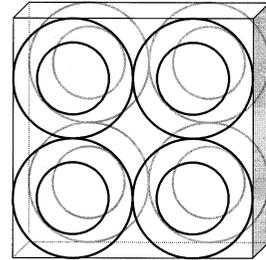
3. では、現在無線 LAN の周波数として用いられている 2.45 GHz の遮断について検討をした。今後の無線 LAN として MMAC (Multimedia Mobile Access Communication Systems)[9] の利用が予定されており、更に MMAC の周波数である 5.2 GHz 帯 (5.15 ~ 5.25 GHz) も対象にし、2 周波の遮断が可能となるモデルの検討を行う。

4.1 円形導線の組合せ

3. より、円形導線を用いることにより周波数選択性をもった遮断が実現でき、その遮断周波数は半径 r [mm] に依存することがわかった。そこで、2 周波遮断を考えた場合、まず半径の異なる円形導線の組合せが考えられる。図 9 (a) はガラスの各面に半径の異なる円形導線を配置したモデル、(b) は図 3 (III) のモデルの更に内側に円形導線を配置し、二重円としたモデル



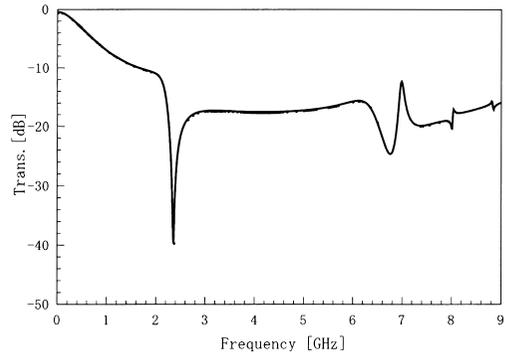
(a) Different size of ring conductors



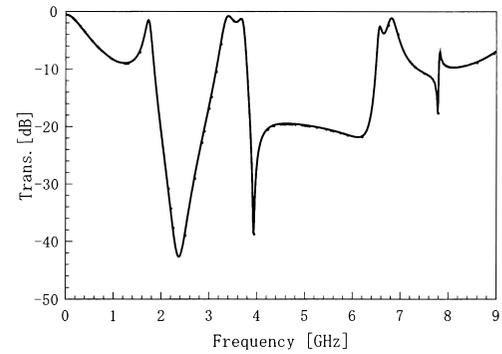
(b) Double ring

図 9 円形導線の組合せ

Fig. 9 The combination of ring conductors.



(a) Different size of ring conductors



(b) Double ring

図 10 円形導線の組合せによる遮断特性
Fig. 10 Frequency characteristics of the combination.

ルである．それぞれのモデルの解析結果を図 10 (a), (b) に示す．それぞれのパラメータはガラスの厚さを 6 mm とし, (a) では片面の円形の半径を 10 mm, 他方面を解析構造上, 半分のサイズである 5 mm, (b) では外円を 10 mm, 内円を 7 mm とした．

図 9 (a) より, 遮断特性は非常に乱れており, 2 GHz 付近で裏 ($r = 10$ mm) の円形導線によるものと思われるピークが生じているが, 2 周波遮断の特性は得られない．図 10 (b) より外円による 2.2 GHz の遮断は見られるが, 内円による高周波の遮断は非常に乱れる．これらの結果より, 円形導線の組合せによる 2 周波遮断は困難である．

4.2 円形と十字導線の組合せ

2 周波遮断モデルとして, 図 11 のようにガラスの片面に円形導線, 他の面に十字導線を配置したモデルを提案する．十字導線は 3. にて広帯域にはできなかったが, 周波数選択性を有した遮断結果が得られている．十字の交点と円の中心を合わせて配置している．これは 3. のメッシュ, 円形導線と同様に垂直 2 偏波対応となる．それぞれの形状パラメータは円形の半径を r [mm], 十字導線の長さを w [mm], ガラスの厚さを

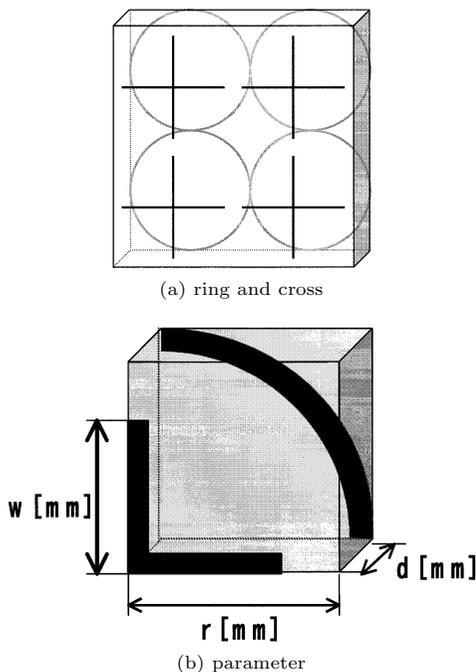


図 11 円形+十字導線の解析モデル

Fig. 11 Analysis model of ring and cross conductors.

d [mm] とする．解析に用いるセルサイズ, ガラスの誘電率などは 2. で記述したものと同じ値を用い, 円形導線どうしの間隔は 0.5 mm とした．

図 11 のモデルで $r = 10$ mm, $w = 8$ mm として解析を行った結果を図 12 に, 比較のため円形導線 ($r = 10$ mm) のみをガラスの片面に配置したときの結果, 十字導線 ($w = 8$ mm) のみを片面に配置した結果を示した．図より, 円形導線と十字導線を用いることにより 2.55 GHz と 5.00 GHz の 2 周波遮断が実現できていることがわかる．また, 2.55 GHz の遮断は円形導線によるものであり, 5.00 GHz の遮断は 5.34 GHz から周波数が変化しているが十字導線による遮断である．

以上の結果より, 形状パラメータとして図 12 の円形の半径 r , 十字の長さ w を調整することにより, 所望の 2 周波遮断が実現できることが推測される．

半径 r を 10 mm として w を 4 mm から 8 mm まで変化させた．結果を図 13 に示す．同図により, w の変化によって遮断の低周波成分は 2.5 GHz 付近に固定し高周波部は w が大きくなるに従って低周波側に大きく移行している．これにより, 円形導線の半径 r を固定し十字導線の長さ w を変化させることにより, 遮断の高周波部のみを自由に設定できることが確認できる．このとき, 遮断周波数の媒質内波長 $[8] \lambda$ と各パラメータを比較すると, 円形導線の円周は約 1λ , 十字導線はガラスの片面にのみ単独で配置したときには長さ $2w$ は 0.5λ , 円形と同時に配置すると 0.5λ より若干短い値となっている．

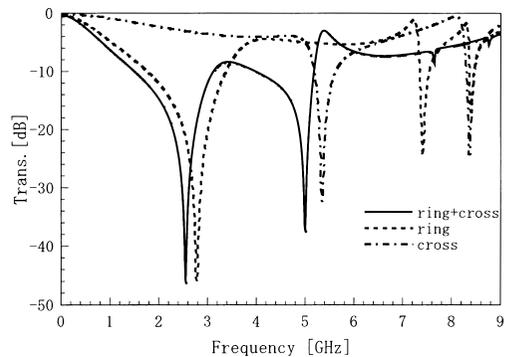


図 12 円形+十字導線の遮断特性 ($r = 10$ mm, $w = 7$ mm)

Fig. 12 Cut-off characteristics of ring and cross conductors ($r = 10$ mm, $w = 7$ mm).

2周波遮断の遮断周波数設計方法としては図14に示すように、まず円形の半径 r をパラメータとし、2周波の低周波部の周波数を設定する。次に、十字導線の長さを設定して遮断の高周波部を決定する。この手順により所望の2周波遮断の設計が可能となる。なお、このモデルでは円形導線の半径をベースに考えるため十字導線の長さ w は円の半径 r より小さい必要がある。

前述の設定方法により円形導線の半径 $r = 10\text{ mm}$ 、十字導線の長さ $w = 7\text{ mm}$ 、円形の間隔 0.5 mm 、ガラスの厚さ $d = 6\text{ mm}$ で図15に示す特性が得られ、目的の周波数 $2.45, 5.2\text{ GHz}$ 帯の遮断が実現できる。ただし、高周波部は遮断帯域が 100 MHz となっており、無線LANにて使用される帯域が 100 MHz であることから、実用化に向けてはまだ課題がある。

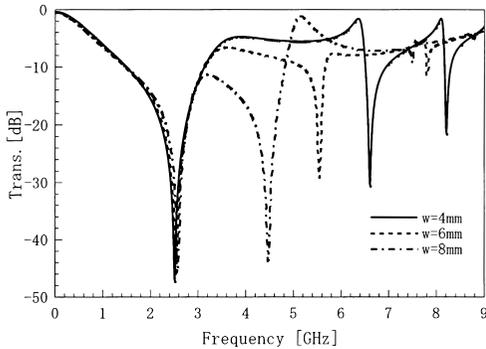


図13 w による遮断特性の変化 ($r = 10\text{ mm}$)
Fig. 13 Cut-off characteristics by size of cross conductors ($r = 10\text{ mm}$).

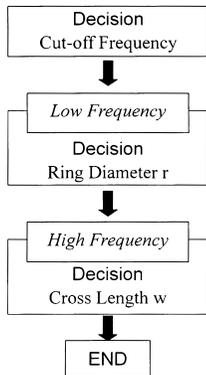


図14 2.45, 5 GHz 帯の遮断
Fig. 14 Cut-off of the 2.45 GHz and 5 GHz.

4.3 実験

FD-TD法の解析による結果の有効性を示すために、実験による評価を行う。円形状の真鍮をガラス表面に配置したモデルの遮断を測定した。実験に使用した増幅器の周波数範囲と手作業での作成上の都合により、円形導線の半径は 6.5 mm 、太さ 1.0 mm 、として観測周波数は $2\sim 6\text{ GHz}$ とした。円形どうしの間隔は 3 。で記述した条件のとおり 0.5 mm とするべきところであるが、実際の作業の困難さから 1.0 mm とし、間隔により特性のあまり変化しないガラスの片面のみの配置とした。用いたガラスの厚さは 3.0 mm 、比誘電率は自由空間法 [10] により 6 GHz で測定を行い $\epsilon_r = 7.14 - j0.38$ とした。測定系を図16に示す。空間定在波法 [10] を用いホーンアンテナよりガラスに電磁波を照射し、反射・透過を微小ダイポールアンテナにより測定する。ホーンアンテナからガラスまでの距離を 2.5 m とし、測定の精度を高めるため送信・受信には増幅器を用いている。ガラス前面で観測した定在波、ガラス後面の透過波より反射係数・透過係数を求める。ガラスは $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ で測定を行い同サイズ

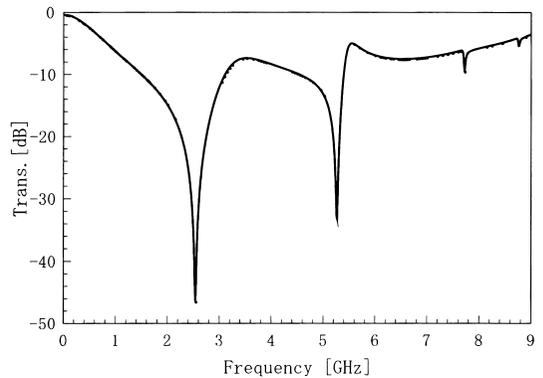


図15 遮断周波数の設定方法
Fig. 15 Setting of cut-off frequency.

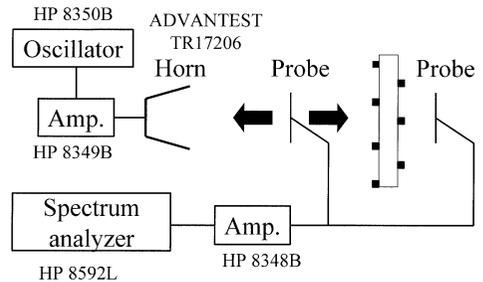


図16 測定系
Fig. 16 Measurement system.

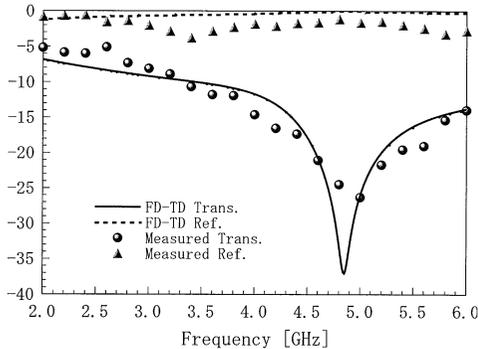


図 17 実験結果
Fig. 17 Experimental result.

の金属板による測定結果により補正を行った。ガラス表面付近では散乱を起こすため表面から $1\lambda_0$ 離れた位置から測定を行う。回り込みを防ぐためにガラスの周りには電波吸収体を配置した。実験結果を図 17 に示す。同図より、解析結果と実験結果はよく一致しており、解析結果の有効性が示された。

5. む す び

無線 LAN による情報の漏えい防止として、その周波数である 2.45, 5 GHz 帯の遮断を目的に、ガラス表面に金属導線を配置することによる電磁波遮断について検討を行った。得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 円形導線をガラスの表面に配置することにより周波数選択性が実現できる。その遮断周波数は円形の半径 r に依存し、ガラスの厚さにはほとんど影響を受けない。またその円形導線を両面に配置することにより、片面配置に比較して遮断帯域は約 2.5 倍となる。

(2) 円形と十字導線を組み合わせることにより 2 周波遮断特性が実現できる。遮断周波数は円形の半径 r 、十字導線の長さ w に依存する。遮断周波数は円形の半径を定め、その後に十字導線の長さを定めることにより容易に設定することが可能である。

今後の課題としては、2 周波遮断における高周波部の帯域幅の拡大、またより現実に近づけた斜め入射における検討などを行う必要がある。

文 献

- [1] 橋本 修, 花澤理宏, “1 GHz 帯における広帯域透明電波吸収帯の研究,” 信学技報, EMCJ98-14, pp.29-34, 1998.
- [2] K.S. Yee, “Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems involving Maxwell’s Equations in Isotropic Media,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-14, pp.302-307, April 1966.
- [3] 宇野 亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析,

pp.46-52, コロナ社, 1998.

- [4] J.P. Berenger, “A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves,” J. Computat. Phys., vol.114, pp.185-200, Jan. 1994.
- [5] 橋本 修, 阿部 琢美, FDTD 時間差分領域法入門, pp.31-32, 森北出版, 1996.
- [6] K.S. Kunz and R.J. Luebbers, The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, Boca Raton, FL, CRC Press, 1993.
- [7] 平松徹也, 原田 悟, 清水 孝, “複層電磁遮蔽ガラスの遮蔽特性,” 旭硝子研報, vol.43, no.2, pp.89-105, 1993.
- [8] 小西良弘, マイクロ波回路の基礎とその応用, pp.54-57, 総合電子出版社, 1990.
- [9] <http://www.arib.or.jp/mmac/index.htm>
- [10] 橋本 修, 電波吸収体入門, pp.86-89, 94-95, 森北出版, 1997.
- [11] 小林 豊, 高橋 応明, 安部 實, “ガラス表面上円形導体による電磁波遮断,” 1999 信学総大, B-4-3, March 1999.
- [12] 小林 豊, 高橋 応明, 安部 實, “ガラス表面上導線配置による二週波遮断,” 1999 信学ソ大, B-4-10, Sept. 1999.
- [13] 清水康敬, 杉浦 行, 電磁波妨害波の基本と対策, pp.207-265, 電子情報通信学会, 1995.
- [14] 小林 豊, 高橋 応明, 安部 實, “ガラス表面上金属線の配置による電磁波遮断,” 信学技報, EMCJ99-83, pp.41-47, Oct. 1999.

(平成 12 年 1 月 11 日受付, 5 月 16 日再受付)



小林 豊 (学生員)

平 10 武蔵工大・工・電子通信卒。現在、同大学院電気工学専攻修士課程在学中。環境電磁工学の研究に従事。



高橋 応明 (正員)

平 1 東北大・工・電気卒。平 6 東工大大学院博士課程了。同年武蔵工大助手、現在、同講師。導波管アンテナ、平面アンテナ、小型アンテナ、環境電磁工学等の研究に従事。工博。IEEE 会員。



安部 實 (正員)

昭 40 武蔵工大・工・電子通信卒。同年同大助手。昭 43 電通大大学院修士課程卒。昭 44 武蔵工大講師、助教教授を経て、現在、同教授。回折電磁界の解析、磁流アンテナの研究に従事。工博。IEEE 会員。