

2周波数選択シールドフィルムの理論解析

笠嶋善憲*

Theoretical Analysis of two-Frequency-selective Shielding Films

Yoshinori Kasashima

One-frequency-selective shielding film (1-FSS) is a print of many same size antennas on a sheet of film, and it has high shielding properties for one specific frequency. In the past, the author analyzed theoretically the characteristics of the 1-FSS, as a large scale antenna array. This time, the author analyzed theoretically the characteristics of two-frequency-selective shielding film (2-FSS) being a print of many two size antennas on a sheet of film, as the similar method as the past. This paper discusses the theoretical method used to analyze the 2-FSS, and shows calculated examples of the 1-FSS and the 2-FSS.

1. はじめに

近年、電波利用は高度化し非常に便利になったが、一方では電波を介した情報の漏洩が問題化されている。特に無線 LAN においては、ソフト的なセキュリティーだけでは不十分であり、重要なオフィスでは部屋を電波シールドするなどの対策を行っている。このとき従来の銅箔などで部屋の全面を覆うシールドの方法は、無線 LAN 以外の電波である放送波、携帯電話電波も遮へいされ不便で、また、部屋が完全に閉鎖された感覚を人に与え居住性にも大きな問題がある。周波数選択シールドフィルム (Frequency-Selective Shielding、以後 FSS と呼ぶ) は、薄い誘電体フィルム上に導電性塗料で特定周波数に共振するアンテナを多数印刷したもので、その周波数でのみ強いシールド特性を有し、他の周波数電波は透過、上記のような問題を生じさせないものである。この FSS に関しては、古くはモーメント法、FDTD 法などによる解析結果の論文^{(1)~(6)}があり、最近では著者の対象をアレーアンテナとして解析した論文⁽⁷⁾がある。前者はマックスウエルの方程式を直接に用いるため、いかなるアンテナの形状、配列方法の FSS でも解析が可能であるが、各アンテナを微細な区画でモデル化する必要があるため、計算できる FSS の配列アンテナの数には限界があり、FSS 全体としての特性が得にくい。一方、後者のアレーアンテナとして解析するものは、周辺の電磁界を特定形状の1つのアンテナの解析式で計算するため、特定の形状のアンテナで構成される FSS しか計算できないが、計算要素単位が1つのアンテナとなるため非常に多くのアンテナで構成される FSS が計算可能となり、FSS 全体としてのシールド特性が得られる。また、アンテナ線の太さ、アンテナ線の間隔などの計算パラメータと計算結果の物理的対応が明確であるために研究開発に非常に役立つ手法でもある。

本論文では、先の論文を補足する内容の1周波数選択シールドフィルム (1-FSS) におけるアンテナ線の太さ、アンテナ線の抵抗値、アンテナ線の間隔がシールド特性に及ぼす影響の計算例を示し、今回新たに2周波数選択シールドフィルム (2-FSS) の解析法とその計算例を示す。なお、本論文での解析では誘電体であるフィルムは非常に薄く、その影響は無視し、またアンテナ形状はダイポールアンテナとした。

* 電気電子工学科

2. 解析方法

2.1 2-FSSの解析モデル

同じ長さの水平、垂直のダイポールアンテナを十字型に組んだ、長、短2種類の十字型アンテナを多数配列した2-FSSの例をFig.1に示す。このような2-FSSに任意偏波の電波が当たると、水平、垂直アンテナがそれぞれの成分の電界に作用し、全体がアレーアンテナとして動作、シールド特性が得られる。ここでは、Fig.2のような垂直偏波のみで考え、2-FSSを2種類の長さの垂直ダイポールアンテナのみで構成されている#1、#2、・・・#nのアレーアンテナとして解析する。Fig.3に解析の概要を示す。x、y平面（FSS平面）に垂直ダイポールアンテナ#1、#2、・・・#nが配列されており、これにz軸上の負の無限遠から垂直に入ってきた平面波（垂直偏波、 E_0 ）が当たり、z軸上の正の位置Pに受信点（観測点）をもつとする。

2.2 相互インピーダンス

Fig.4に平行な#1、#2の2本のダイポールアンテナを示す。#1、#2のそれぞれの長さを $2l_1, 2l_2$ とし、それらの電流分布を次のように仮定する。

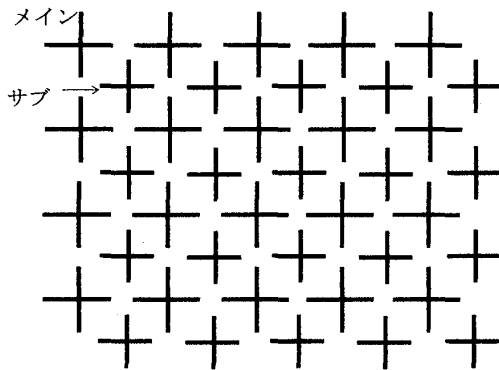


Fig.1 Example of 2-Frequency-selective Shielding Film

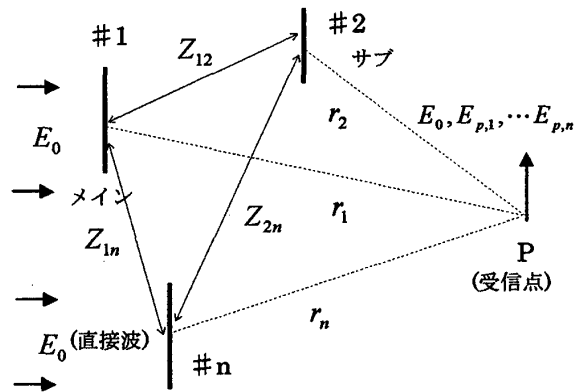


Fig.2 2-FSS as Array Antenna

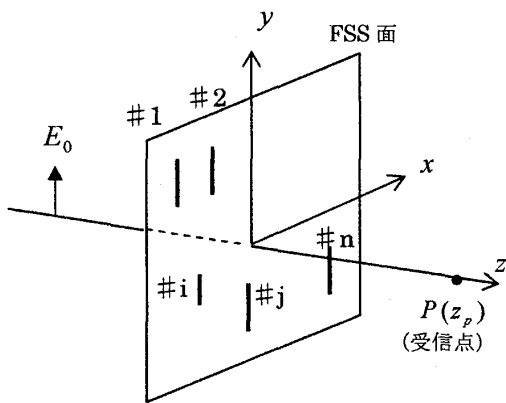


Fig.3 Outline of Theoretical Analysis

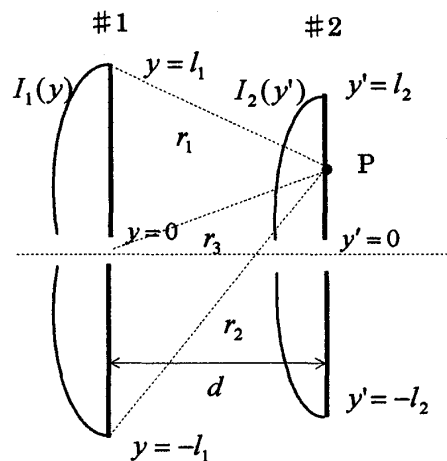


Fig.4 Mutual Impedance of #1 and #2

$$\begin{aligned} I_1(y) &= I_1 \sin \beta(l_1 - |y|), \quad |y| \leq l_1 \\ I_2(y') &= I_2 \sin \beta(l_2 - |y'|), \quad |y'| \leq l_2 \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ (λ : 波長)

#1、#2のアンテナ間の相互インピーダンス Z_{12} は次式⁽⁸⁾となる。

$$Z_{12} = j \frac{30}{\sin \beta l_1 \cdot \sin \beta l_2} \int_{-l_2}^{l_2} \left(\frac{e^{-j\beta r_1}}{r_1} + \frac{e^{-j\beta r_2}}{r_2} - 2 \cos \beta l_1 \frac{e^{-j\beta r_3}}{r_3} \right) \cdot \sin \beta(l_2 - |y'|) dy' \quad (2)$$

一般的に #i、#j のアンテナ間の相互インピーダンス Z_{ij} も同じようにして求められる。

2.3 アンテナの受信電圧

Fig.4 の #1 のアンテナに平面波 E_0 が垂直に当たる場合の実効長 $l_{eff,1}$ は次式となる。

$$l_{eff,1} = \frac{2}{I_1} \int_0^{l_1} I_1(y) \cdot dy \quad (3)$$

その結果、#1のアンテナの受信電圧 V_1 は次式となる。

$$V_1 = E_0 \cdot l_{eff,1} \quad (4)$$

一般的に #i のアンテナの実効長 $l_{eff,i}$ 、受信電圧 V_i も同じようにして求められる。

2.4 アンテナの誘起電流

#1、#2、... #n のアンテナの受信電圧を V_1, V_2, \dots, V_n 、これらアンテナ間の相互インピーダンスを Z_{ij} 、誘起電流を I_1, I_2, \dots, I_n とすれば、それらの間には次式の関係がある。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

したがって、誘起電流は次式で求まる。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.5 再放射電波

Fig.3 での電流 I_1 の #1 の 1 本のアンテナによる受信点 P への再放射電波の電界は Fig.4 での記号を用いると次式となる。

$$E_{p,1} = -j30 \cdot I_1 \cdot \left(\frac{e^{-j\beta r_1}}{r_1} + \frac{e^{-j\beta r_2}}{r_2} - 2 \cos \beta l_1 \frac{e^{-j\beta r_3}}{r_3} \right) \quad (7)$$

一般的に #i のアンテナによる受信点 P への再放射電波の電界も同じようにして求められる。

2.6 受信点の電界強度、シールド効果

Fig.3 の受信点 P の電界強度は、直接波 E_0 と n 本のアンテナからの再放射電波のベクトル和であり次式と

なる。

$$E_{p,\Sigma} = \sum_{k=1}^n E_{p,k} + E_0 e^{-j\beta z_p} \tag{8}$$

その結果、受信点 P での 2-FSS によるシールド効果 (SE) は、2-FSS がいない場合の電界強度 (E_0) に対する 2-FSS がある場合の電界強度 ($E_{p,\Sigma}$) の比であり、次式となる。

$$SE = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{|E_{p,\Sigma}|}{E_0} \right] \tag{9}$$

3 計算例

Fig.1 に示したようにアンテナの長さの異なる 2 種類の十字型アンテナを行ごとに交互に配列した 2-FSS の特性を解析する。ここでの解析は垂直アンテナのみで行い、そのモデルを Fig.5 に示す。アンテナは長さ $2l_1$ と $2l_2$ ($l_1 \geq l_2$)、 l_1 の方をメインアンテナ、 l_2 の方をサブアンテナとする。そして、メインアンテナとメインアンテナのギャップが g となるように、その谷間にサブアンテナを入れるように配置する。

はじめに、 $l_1 = l_2$ の 1 周波数選択シールドフィルム (1-FFS) として、 $l_1 = 31.25\text{mm}$ 、 $l_2 = 31.25\text{mm}$ 、アンテナ総数 $n=253$ 、受信点座標 $z_p = 31.25\text{mm}$ でのアンテナ線の太さ (w)、アンテナ線の抵抗値 (r)、アンテナ間のギャップ (g) をパラメータにした場合の電波周波数に対するシールド特性を計算する。また、アンテナ間ギャップ (g) をパラメータにした場合の受信点 P の z 座標 (z_p) 変化に対する特性を計算する。

次に、アンテナ長さ l_1, l_2 が異なる 2 周波数選択シールドフィルム (2-FFS) として、 $l_1 = 34\text{mm}$ 、 $l_2 = 31.25\text{mm}$ アンテナ総数 $n=253$ 、受信点座標 $z_p = 31.25\text{mm}$ でのアンテナギャップ (g) をパラメータとした電波周波数に対する特性を計算する。

3.1 アンテナ線の太さ (w) の変化

一般に 1 本のダイポールアンテナは、アンテナ線が太くなると容量的となり、広帯域化する。アンテナ線

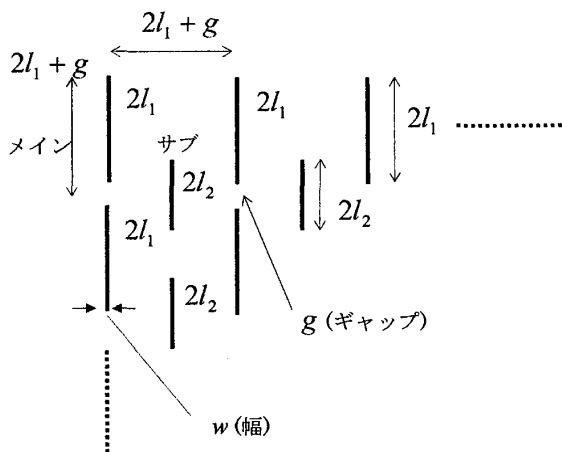


Fig.5 Model for Calculation

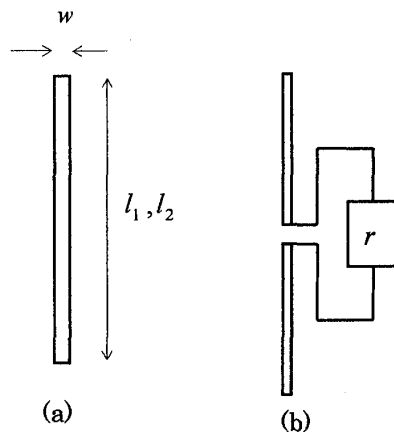


Fig.6 Self Impedance of Antenna

の太さは FSS の場合 Fig.6(a)に示すようにフィルム上に導電性塗料で印刷されるアンテナの幅 (w) に相当する。Fig.5 においてアンテナの幅 $w=0.003\lambda$ 、 0.006λ 、 0.015λ 、 0.03λ ($\lambda=125\text{mm}$) とした場合のシールド特性の計算結果を Fig.7 に示す。アンテナの幅を広くするとシールド効果は低下、広帯域化することが分る。

3.2 アンテナ線の抵抗値 (r) の変化

フィルム上に導電性塗料で印刷されたアンテナの抵抗値は、その塗料の導電率、塗り厚、アンテナの幅などに表皮効果を考慮したものとなる。この抵抗値を仮定し、その抵抗値 (r) を FSS の個々のアンテナの放射インピーダンス (半波長ダイポールアンテナの場合 73Ω) に増加分として加えたものを自己インピーダンスとして解析する。これを Fig.6(b)に示す。この増加分の抵抗値 $r=0,20,50,100\Omega$ とした場合のシールド特性の計算結果を Fig.8 に示す。抵抗値が大きくなるとシールド効果は低下するが、帯域幅には影響を与えないことが分る。

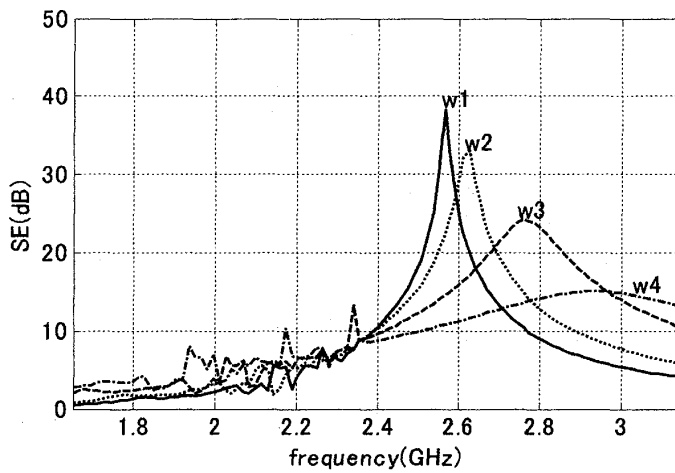


Fig.7 Changing the width of the antennas (1-FSS)

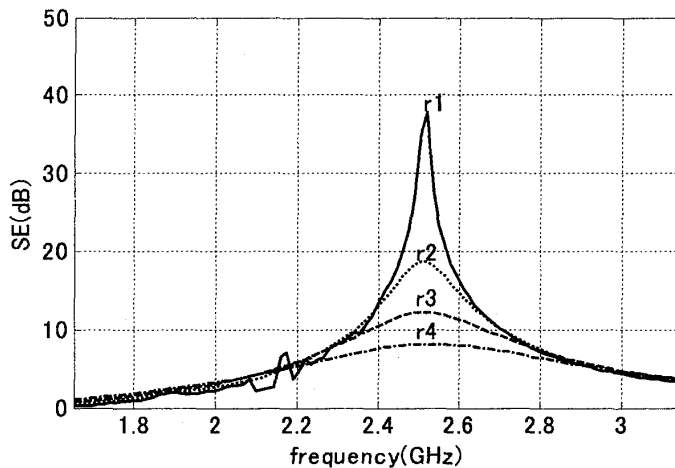


Fig.8 Changing the resistance of the antennas (1-FSS)

3.3 ギャップの大きさ (g) の変化

一般のアンテナの場合、実効面積に等しい電波電力を受信可能である。したがって、FSS の場合のアンテナの配列密度は、少なくとも実効面積当たり 1 本以上のアンテナが必要なことが分かる。アンテナギャップ $g=0.01\lambda$ 、 0.05λ 、 0.1λ 、 0.2λ ($\lambda=125\text{mm}$) とした場合のシールド特性の計算結果を Fig.9 に示す。アンテナの密度が一定以上になると、ギャップの大きさでのシールド効果の変化は少なく、また、シールド周波数はギャップにより多少変化することも分かる。

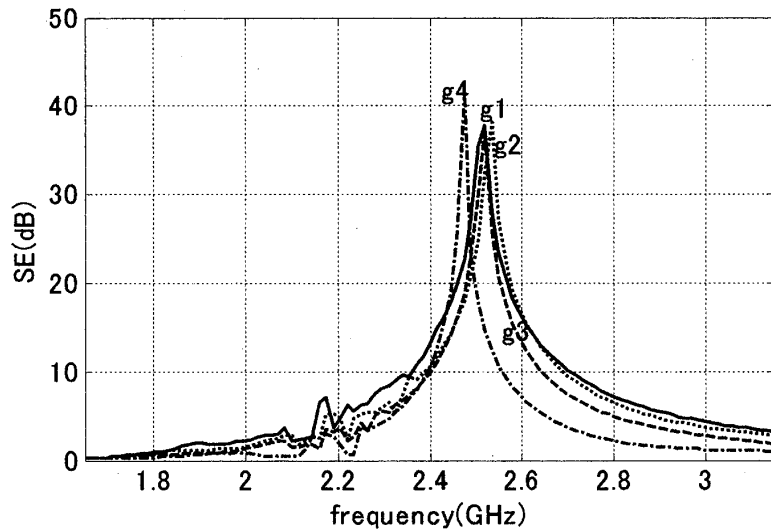


Fig.9 Changing the gap between the antennas (1-FSS)

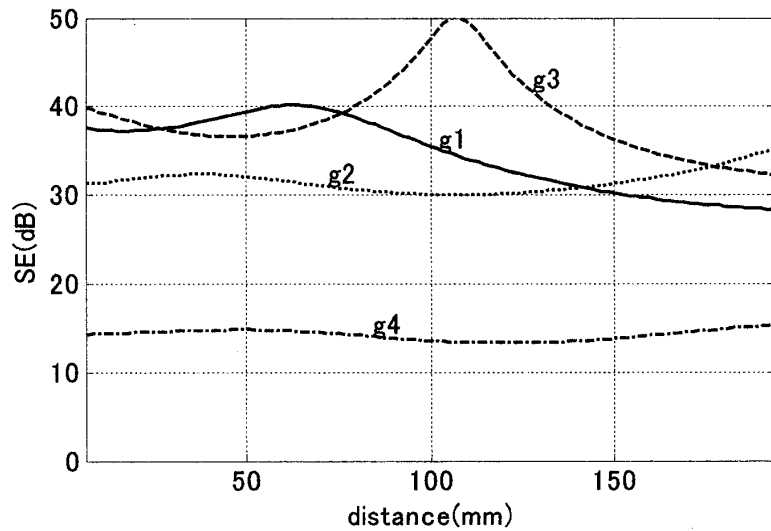


Fig.10 Changing the observation point on the z-axis (1-FSS)

3.4 受信点 (z_p) の z 軸上での変化

実際に使用される FSS では、アンテナ数は非常に多く無限に近いものである。しかし、計算では直接波と有限個の個々のアンテナからの距離による位相変化も含めた再放射電波のベクトル和としてその特性を得ているため、FSS から受信点までの距離が特性に影響する。先の Fig.9 のアンテナギャップをパラメータとした計算で、その電波周波数 (2.52GHz) を固定し、その受信点座標 $z_p=6.25\sim 194\text{mm}$ と変化した場合のシールド特性の計算結果を Fig.10 に示す。アンテナ総数 $n (=253)$ が大きいと、シールド特性は受信点の FSS からの位置にほとんど影響を受けないことが分かる。

3.5 2 周波数選択シールド特性

アンテナの長さの異なる ($l_1=34\text{mm}$, $l_2=31.25\text{mm}$) の 2 周波数選択シールドフィルムとして、そのギャップ $g=0.01\lambda$, 0.05λ , 0.1λ , 0.2λ ($\lambda=125\text{mm}$) をパラメータにした場合の特性の計算結果を Fig.11 に示す。計算結果では、高い周波数 (l_2 に対応) でのシールド特性が良く、低い周波数 (l_1 に対応) での特性が悪くなっている。これは 2 種類の長さのアンテナの実効長は、共に低い周波数よりも高い周波数電波に対して大きい値を持つためと考えられる。したがって、2-FSS においては、 l_2 のアンテナ数を l_1 のアンテナ数よりも多くするなどアンテナの配置方法に工夫が必要であることが分かる。

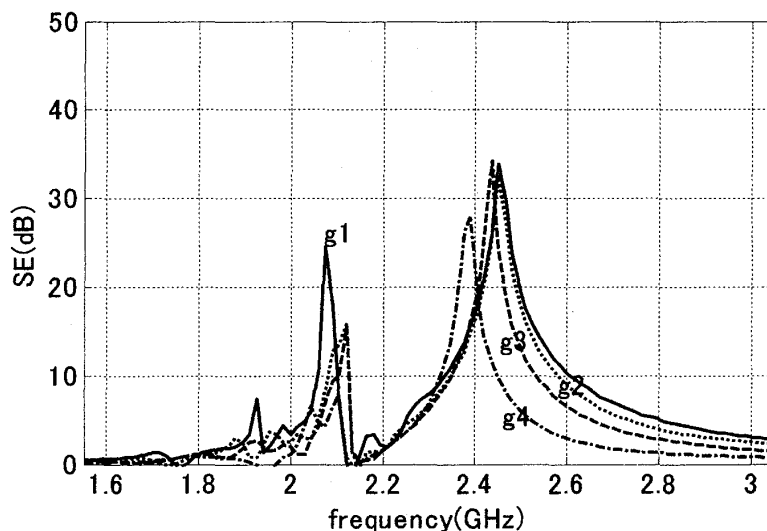


Fig.11 Changing the gap between the antennas (2-FSS)

4 まとめ

本解析法は、1-FSS、2-FSS の実用化研究におけるアンテナの配置密度、導電性塗料によるアンテナの幅、抵抗値などを具体的に検討する有効な手段であることを示した。実際の FSS では比較的誘電率の大きい、ある厚さのある誘電体 (ガラス) 上にアンテナを配置することが多いが、この場合のシールド周波数は、誘電体の誘電率による波長短縮率を考慮に入れたアンテナ長で決まる。しかし、誘電体の厚さと波長短縮率の関係は複雑であるため、アンテナ長は実験的に求めたほうが良いと考えられる。また、この解析法では理論的に斜入

射電波に対してもシールド特性が得られること証明できているが、ここでは説明を省いた。

参考文献

- (1) C.H.Tsao and R.Mitra : Spectral-domain analysis of frequency selective surfaces comprised of periodic arrays of cross dipoles and Jerusalem crosses, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-32, no.5, pp478-486 (May 1984)
- (2) Raj Mittra, Chi H . Chan and Tom Cwik; Techniques for Analyzing Frequency Selective Surfaces A Review, Proceeding of the IEEE, vol.76, no.12 (December 1988)
- (3) E.A Parker and S.M.A Hamdy; Rings as Elements for Frequency Selective Surfaces, Electronics Letters, vol.17, no.17 (August 20, 1981)
- (4) James P. Montgomery; Scattering by an Infinite building Periodic Array of Thin Conductors on a Dielectric Sheet, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-23, no.1, (January.1975)
- (5) G.H. Schennum; Frequency-Selective Surfaces for Multiple-Frequency Antennas, Technical Note The Microwave Journal, (May 1973)
- (6) Raj Mittra, Richard C. Hall and Chich-Hsing Tsao; Spectral-Domain Analysis of Circular Patch Frequency Selective Surfaces , IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. Ap-32, no.5, (May 1984)
- (7) Yoshinori Kasashima; Theoretical Analysis of Frequency Selective Shielding Films, The 14 International Zurich Symposium and Exhibition on Compatibility, pp5-10, (February 2001)
- (8) 内田、虫明 ; 超短波空中線、コロナ社 (昭和 45 年)

(平成19年 3 月24日受理)