

広帯域周波数選択シールドガラスとその特性の FDTD 法による解析

笠嶋 善憲*

Analysis of Broad-band Frequency Selective Shielding Glass by FDTD method

Yoshinori Kasashima

A frequency Selective shielding (FSS) glass is a print of many same size antennas on a sheet of glass, and it has high shielding properties for one specific frequency. In the past, the author analyzed theoretically the characteristics of the FSS, as a large scale array antenna. The FSS has narrow-band shielding characteristics. This time, the author analyzed accurately the characteristics of a FSS glass being a print of many same size dipole antennas on a sheet of glass by FDTD method. As the result, new broad-band FSSs are designed. This paper shows compositions and characteristics of the new broad-band FSSs.

Key Words: Radio wave, Electromagnetic shielding, Shielding room, Antenna, LAN

1. まえがき

近年、無線 LAN が多く用いられているが、これには情報漏洩の問題がある。この対策として使用する部屋を電波シールドする方法があるが、その一部に使用するものとして周波数選択シールド (Frequency Selective Shielding、以下 FSS と略す。) ガラスが開発された。FSS は特定の電波周波数のみに強いシールド効果があり、他の周波数電波は透過するもので、これをシールド部屋の一部に用いると例えば無線 LAN の 2.5GHz,5GHz の電波のみのシールドルームを作ることが可能となる。しかし、提案されて久しいが、本格的な実用化には至っていない。その理由には目標のシールド周波数に一致させての設計・製作の難しさ、特性の信頼性、シールドレベルの問題などがある。従来の FSS は非常に狭帯域のシールド特性を有するものであり、したがって目標のシールド周波数に合わせて設計・製作することが非常に難しかった。

本論文では、FDTD(Finite Difference Time Domain)法¹⁾を用いて単純構造の FSS の周波数特性を計算し、その結果を詳細に分析、周波数選択シールド特性の発生メカニズムの仮説をつくり、それに基づいて広帯域 FSS のモデルを提案、その周波数特性を計算してみた。その結果、従来の FSS よりも数倍のシールド帯域幅を有する広帯域 FSS が得られた。しかし、この場合のシールドレベルは従来のものに比べて少し低下する。これらの内容を報告する。

* 電気電子情報工学科

2. FSS の概要

(1) FSS のモデル

FSS の単純なモデル例を Fig.1 に示す。(a)は板ガラス上に垂直・水平のダイポールアンテナを交差させた同寸法の十字型アンテナを多数、等間隔に配列したものである。(b)は一波長ループアンテナを同様に配列したものである。これらに平面波を当てると FSS の裏面側では FSS 上の 1 個のアンテナのほぼ共振周波数で強いシールド効果を示し、表面側では反射波が生じ、これと直接波が干渉して定在波ができる。他の周波数に対してはほとんどシールド効果、反射波も生じない。FSS は空間電波に対する帯域除去フィルターと言える。

(b)のモデルでの板ガラス厚さ(t): 10mm、その比誘電率(ϵ_r): 7、ループアンテナの半径(r): 14mm、隣接アンテナ間ギャップ(g): 5mm の FSS の周波数特性の FDTD 法による計算結果を Fig.2 に示す。S11 は反射損失、S21 は透過損失 (シールド効果) を示すが、S11 は観測点の FSS からの距離により異なるが、最大+3dB、S21 は FSS の裏面側で一様に約-60dB となっている。

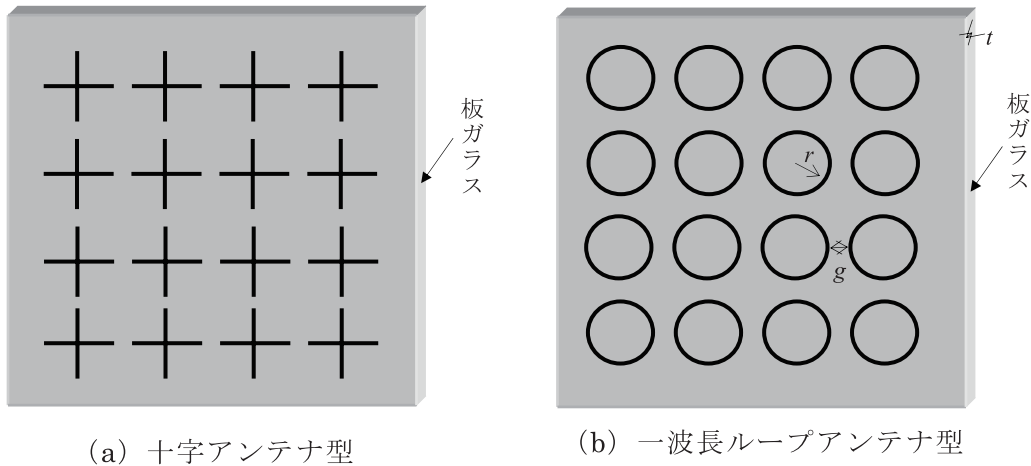


Fig.1 FSS のモデル例

(2) FSS の解析法

FSS に電波を当てるとそれに貼られている多くのアンテナが互いに影響し合っ (相互インピーダンスでの結合)、各アンテナの電流分布が決まり、それからの再放射電波と直接波の合成電界が周囲の電界強度となるので、FSS はアレーアンテナ理論で解析が可能である²⁾。しかし、この解析法はアンテナの形

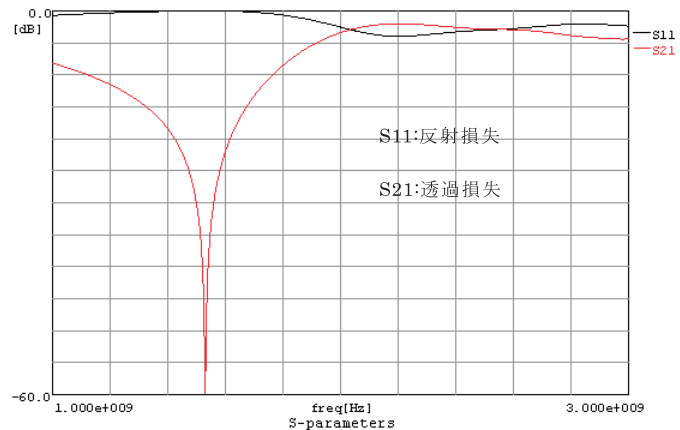


Fig.2 FSS のシールド特性の計算例

状が複雑であったり、アンテナの近くに部分的に誘電体が存在する場合には計算が極めて複雑になり適当でない。一方、FDTD法による解析の場合は、同一寸法・形状のアンテナが等間隔に配列、電波は垂直入射に制限されるが、複雑な形状アンテナ、近くに板ガラスなど部分的に誘電体が存在しても解析が可能である。

本論文では、このFDTD法を用いてFSSの各種要素をパラメータとした場合の周波数特性を計算し、一方では、同じ寸法の板ガラスに貼られたアンテナのインピーダンスを計算、それらの結果からFSSの各種要素とシールド特性の関係を明らかにし、広帯域FSSのモデルを提案、その周波数特性を計算した。

3. 解析モデル

Fig.1(a),(b)に示したFSSモデルに任意方向の偏波を当てた場合、(a)の十字アンテナ型では垂直、水平アンテナがそれぞれの電界成分を受信し、(b)の一波長ループアンテナ型では偏波方向に平行な二本のダイポールアンテナと等価に作用して電界を受信する³⁾。したがって、Fig.1(a),(b)いずれのFSSの基本動作を解明する解析モデルとしては、等間隔で配列されたダイポールアンテナのFSSのアンテナ方向偏波電波に対する特性で十分であると考えられる。

解析モデルと解析構造をFig.3に示す。解析は、無限周期条件(x,y方向)を用い(a)の解析モデルの破線で示した部分を入力データとし、計算のパラメータを板ガラスの厚さ($t\text{ mm}$)、その比誘電率($\epsilon_r = 7$)、アンテナの長さ($l\text{ mm}$)、その幅($w\text{ mm}$)、隣接アンテナ間ギャップ($g\text{ mm}$)とした。平面波としてGaussianパルス波を入力、計算、高速フーリエ変換(FFT)を行うことにより反射損失(S11)、透過損失(シールド効果、S21)の周波数特性を求めた。なお、反射波、透過波の観測点位置は、板ガラス表面より約 $2\lambda_0$ (λ_0 は 2.5 GHz の自由空間波長)とした。吸収境界条件はBerengerのPML(Perfectly Matched Layer)¹⁾を用い、セルサイズは 1 mm (x方向), 1 mm (y方向), $1\text{ mm} \sim 2.5\text{ mm}$ (z方向)の合計約270,000個とした。

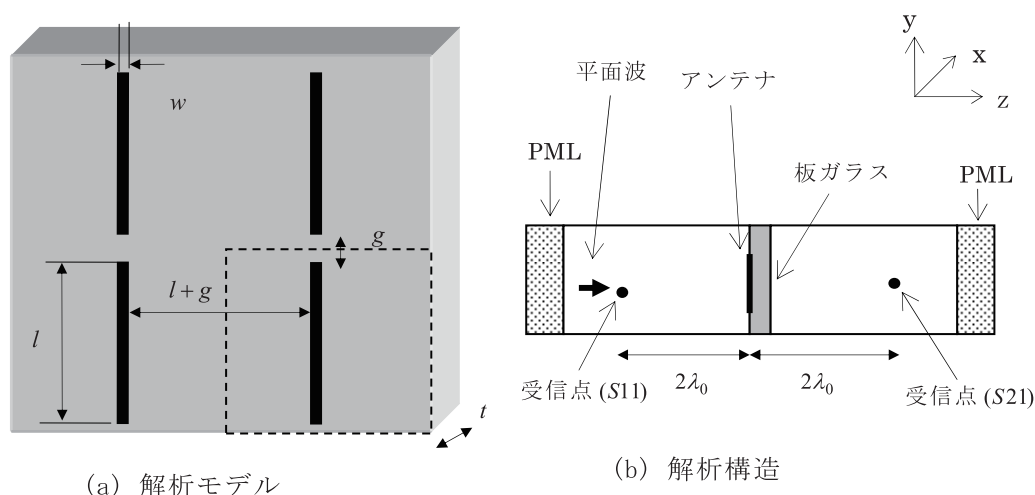


Fig. 3 解析モデルと解析構造

4. 解析結果

(1) 板ガラスの厚さの影響

自由空間に置かれたダイポールアンテナの長さ(l)と共振電波波長(λ)との関係は(1)式となる。

$$l = 0.95 \times \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

また、比誘電率 (ϵ_r) の誘電体中の同アンテナの場合は(1)式に相当するものは(2)式となる。

$$l = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \times 0.95 \times \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

FSS の場合は、誘電体である板ガラスはアンテナに部分的に接触しているだけなので、(2)式に相当するものは(3)式となると考える。

$$l = k \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \times 0.95 \times \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

すなわち、 k は誘電体 (板ガラス) の厚さによる影響度合を示す係数である。

$l = 30\text{mm}, w = 1\text{mm}, g = 5\text{mm}$: 一定とし、 $t = 5 \rightarrow 40\text{mm}$ 変化した場合の FSS の周波数特性を計算する。その結果から算出した板ガラスの厚さ(t)に対する影響係数(k)は Fig.4 となる。

(2) アンテナ間ギャップの影響

一般に受信アンテナは、一本一本が有効受信面積を有しており、FSS のアンテナ配列がそれ以上に疎になると最大シールド効果は当然悪くなる。有効受信面積が重複するような配列では、アンテナ間のギャップ(g)で相互インピーダンスが変わり、共振周波数、 Q 値も変わり、結果的に FSS のシールド特性が変化すると考えられる。

ここで、シールド特性の Q 値を(4)式に定義する。

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \quad (4)$$

ただし、 f_r : 最大シールド周波数(Hz)、 Δf : 最大シールド周波数を中心に 3dB シールド効果低下帯域幅(Hz)である。

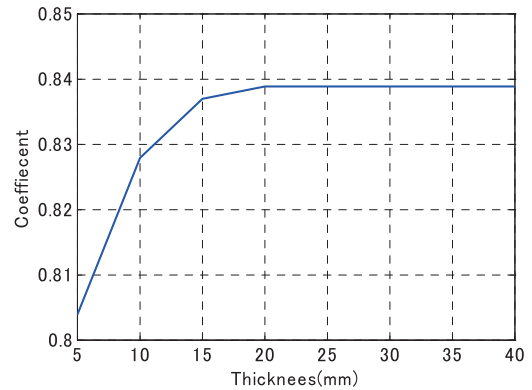


Fig. 4 板ガラス厚とシールド周波数の影響係数

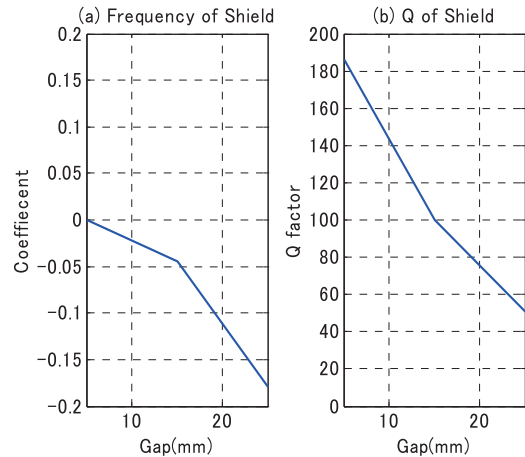


Fig. 5 ギャップとシールド周波数の変動率・ Q

$t=10\text{mm}, l=30\text{mm}$: 一定とし、 $g=5 \rightarrow 25\text{mm}$ 変化した場合の FSS の周波数特性を計算する。その結果から算出したアンテナ間ギャップ(g)の変化に対する最大シールド周波数の変動率 ($g=5\text{mm}$ での最大シールド周波数に対する比率)、シールドの Q 値を Fig.5 に示す。ギャップ(g)の増加とともに最大シールド周波数は低い方に、またシールド特性の Q 値は小さい方向に変化する。

(3) アンテナの幅の影響

一般に線状アンテナは、線径が大きくなると広帯域になる。FSS でのアンテナは薄い金属箔を板ガラス(誘電体)上に貼り付けるか、導電性インクで印刷することになるので、このアンテナの太さは、幅に置き換えられる。アンテナが広帯域特性になるのは周波数の変化に対してアンテナインピーダンスのリアクタンス分(虚数部、 X)の変化 (dX/df) が緩やかになるためである。

FSS のアンテナインピーダンスのリアクタンス分の変化が周波数の変化に対して緩やかになれば、FSS のシールド効果も周波数に対して緩やかに変化、すなわち広帯域化が期待できる。

$t=10\text{mm}, l=30\text{mm}, g=5\text{mm}$: 一定とし、 $w=1 \rightarrow 10\text{mm}$ 変化した場合の FSS の周波数特性を計算する。その結果から算出したアンテナの幅(w)に対する最大シールド周波数の変動率 ($w=1\text{mm}$ の FSS の最大シールド周波数を基準とした比率)、シールドの Q 値を Fig.6 に示す。

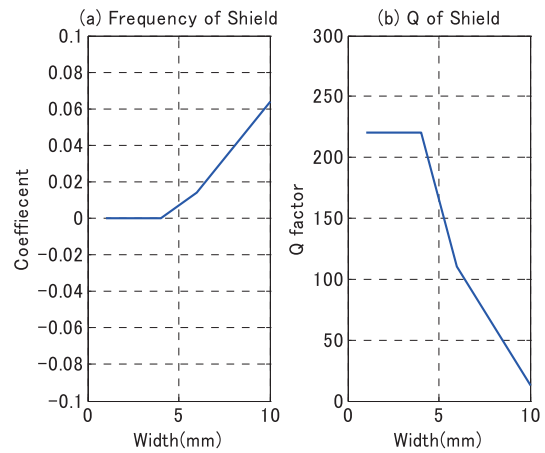


Fig. 6 アンテナ幅とシールド周波数の変動率・Q

(4) アンテナ幅とアンテナインピーダンス

FSS 上のアンテナのインピーダンス、すなわち板ガラス上の一本のアンテナのインピーダンスの周波数特性をその幅が狭い、広い場合について FDTD 法により計算する。

$t=10\text{mm}, l=30\text{mm}, g=5\text{mm}$: 一定とし、 $w=1\text{mm}$ と 10mm の2つの場合のアンテナインピーダンス(R, X)の計算結果を Fig.7、Fig.8 に示す。これらのリアクタンス分(X)が零の近傍での周波数の変化に対するリアクタンスの変化 (dX/df) は約 $14 \times 10^{-8}, 5 \times 10^{-8} \Omega/\text{Hz}$ となり、アンテ

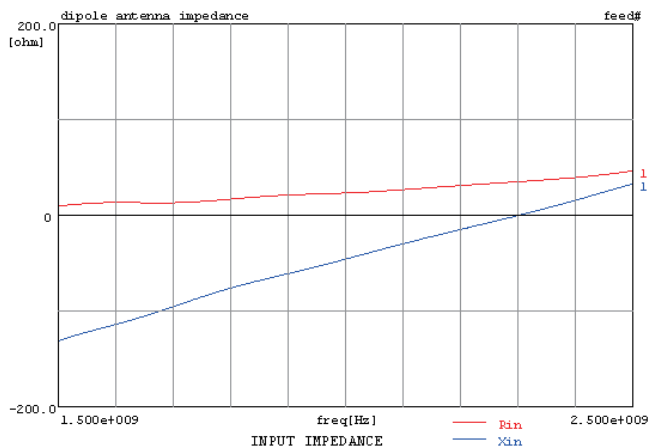


Fig. 7 幅の狭いアンテナのインピーダンス

ナの幅が広くなると約 1/3 程度に小さくなっていることが確認できる。

前項 (3) の結果と合わせて考えると FSS に平面波を当て、その周波数が FSS 上のアンテナの共振周波数近傍になると、アンテナのリアクタンス分が零となり、当たった電波と完全に逆位相の再放射波が生じ、その結果、FSS の裏面側では直接波と再放射波が相殺され強いシールド効果、表面側では反射波による定在波が生じると説明ができる。

(5) 広帯域 FSS モデルの特性

前項 (3)、(4) の結論として、広帯域 FSS は、幅の広いアンテナの十字型、一波長ループアンテナ型で製作すれば良いと考えられる。同じような広帯域 FSS の 1 個のアンテナとして Fig.9 のようなモデルも考えられる。(a) は長さが僅かに異なった複数本のダイポールアンテナを狭い間隔で並べたもの、(b) は半径が僅かに異なったループアンテナを同心円状に置いたものである。これらの導体本数をパラメータとした FSS の周波数特性を計算する。

(広帯域直線アンテナ型 FSS)

Fig.9(a)において $t = 10\text{mm}$, $g = 5\text{mm}$: 一定とし、 $l = 30, 29, 28, 27, 26\text{mm}$ の全部で 5 本、1 本の場合 $l = 30\text{mm}$ のみ、2 本の場合 $l = 30, 29\text{mm}$ 、・・・のようにした FSS の周波数特性を計算する。そのうちの 1 本 ($n = 1$) と 5 本 ($n = 5$) の場合の FSS の周波数特性を Fig.10、

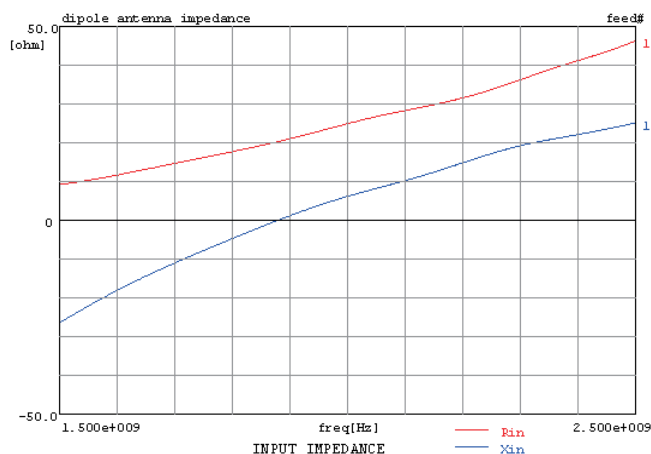
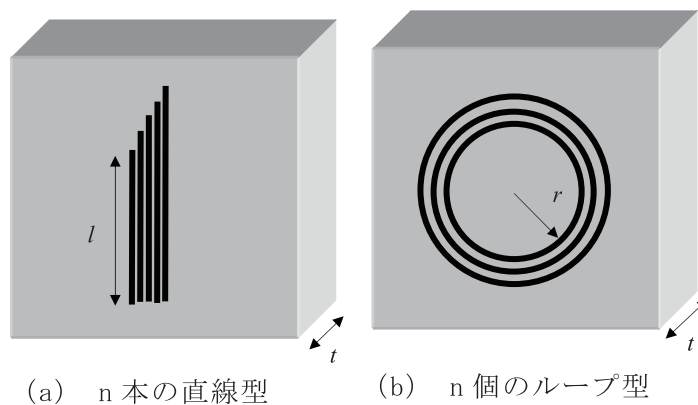


Fig. 8 幅の広いアンテナのインピーダンス



(a) n本の直線型 (b) n個のループ型

Fig. 9 広帯域 FSS の計算モデル (1 個のアンテナ分)

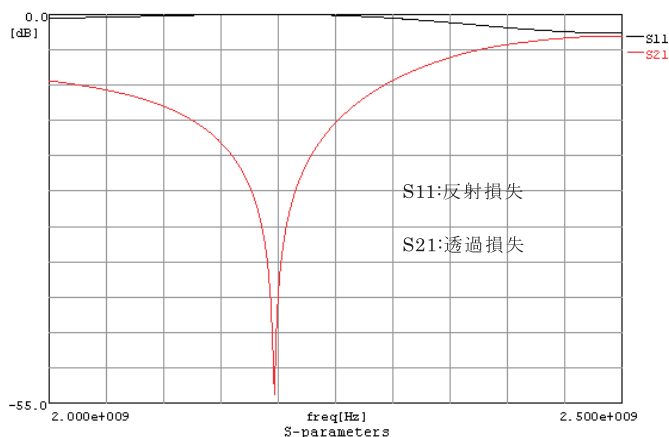


Fig. 10 $n = 1$ の場合の FSS のシールド特性

Fig.11 に示す。また、これらの計算結果から算出したアンテナ本数(n)と最大シールド周波数の変動率 (1本($n=1$)の場合の最大シールド周波数を基準とした比率)、シールドの Q 値を Fig.12 に示す。

(広帯域ループアンテナ型 FSS)

Fig.9(b) において $t=10mm, g=5mm$: 一定とし、 $r=14,13,12mm$ の全部で 3 個、1 個の場合 $r=14mm$ のみ、2 個の場合 $r=14,13mm \dots$ のようにした FSS の周波数特性を計算する。そのうちの 1 個($n=1$)と 3 個($n=3$)の場合の FSS の周波数特性を Fig.13、Fig.14

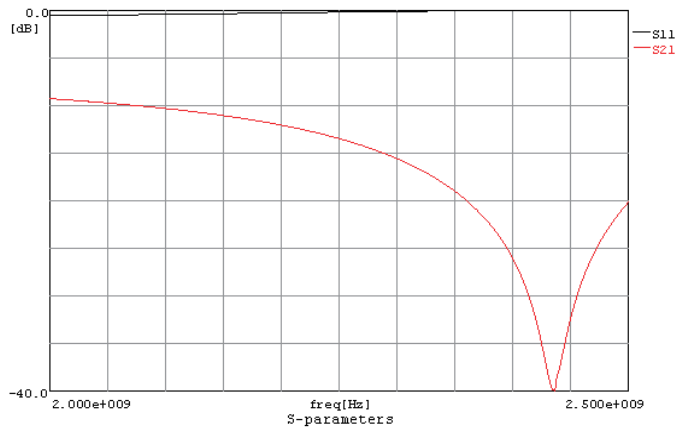


Fig. 11 $n=5$ の場合の FSS のシールド特性

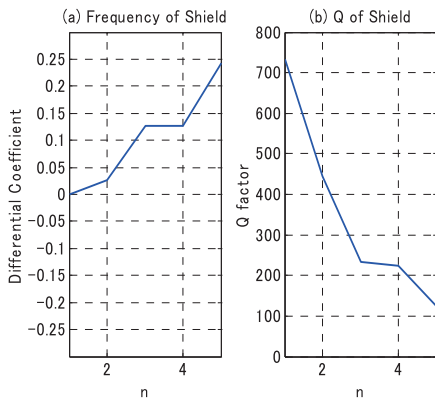


Fig. 12 直線導体の本数(n)とシールド周波数の変動率・Q

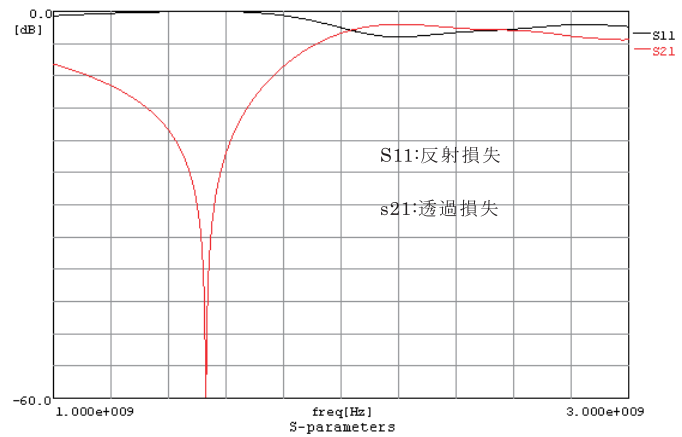


Fig. 13 $n=1$ の場合の FSS のシールド特性

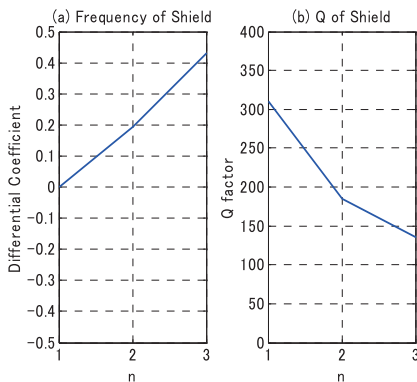


Fig. 15 リング個数(n)とシールド周波数の変動率・Q

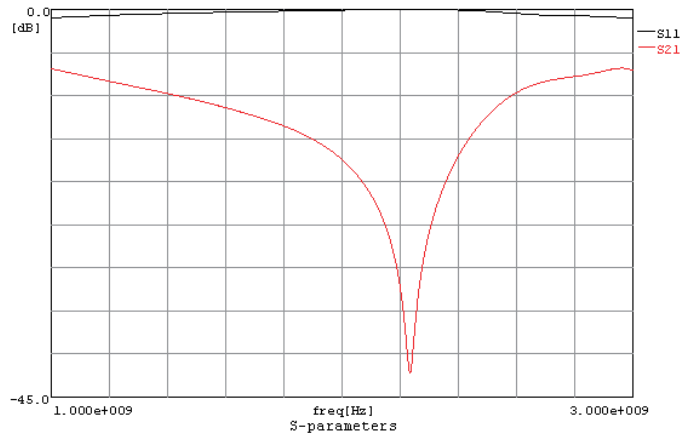


Fig. 14 $n=3$ の場合の FSS のシールド特性

に示す。これらの計算結果から算出したアンテナ個数(n)と最大シールド周波数の変動率($n=1$ の場合の最大シールド周波数を基準とした比率)、シールドの Q 値を Fig.15 に示す。

5. まとめ

複数のパラメータを変化した場合の FSS のシールド周波数特性を FDTD 法で計算し、その解析結果から FSS のシールドのメカニズムの仮説をたて、広帯域 FSS のモデルを提案、その周波数特性を計算した。

解析の結果、FSS の強いシールド効果は、FSS 上のアンテナが共振周波数近傍でインピーダンスのリアクタンス分が零となり、当たった電波（直接波）の再放射波は完全な逆位相となり、FSS の裏面側では直接波と再放射波が相殺されるためと説明できると考えられる。そのことから、シールド特性を広帯域にするには FSS 上のアンテナのインピーダンスを広帯域化、すなわち単純な場合は個々のアンテナを太くすればよいことが明らかになった。今後、このことは実験で検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 宇野 亨；FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析、コロナ社、1998.
- 2) Yoshinori Kasashima; Theoretical Analysis of Frequency Selective Shielding Films, The 14 International Zurich Symposium and Exhibition on Compatibility, pp5-10, (February 2001)
- 3) 三輪 進、加来信之；アンテナおよび電波伝播、pp54-55、東京電機大学出版局、1999.

(平成 22 年 3 月 31 日受理)