

## 各種周波数選択シールドガラスの FDTD 法による解析

笠嶋善憲\*

## Analysis of Various 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. This time, the author analyzed characteristics of various FSSs whose antenna types are different by FDTD method. The antenna types are cross dipole, circular loop, square loop, circular patch, and square patch. As the result, the FSSs can be composed of the various types of the antennas, and the FSSs have broad-band shielding characteristics when these antenna elements are thick. This paper shows the result of analysis and characteristics of the various FSSs.

Keywords: Radio wave, Electromagnetic shielding, Shielding room, Antenna, LAN

## 1. はじめに

同じ形状・寸法の金属片が等間隔に配置された面に電波を当てるとその反射波と透過波に周波数の選択性があることが、昔からよく知られ、またその研究もなされている<sup>1)</sup>。この原理を応用して金属片を一つのアンテナと見立てて、窓ガラスに導電性インクで多数のアンテナを印刷し、特定の周波数電波のみシールドするものを周波数選択シールド (Frequency Selective Shielding、FSS と略称する。) ガラスと呼んでいる。その一部は実用化されている。この印刷されるアンテナの形状は色々考えられるが、アンテナの形状によって FSS のシールド特性にどのような影響があるのかを FDTD 法(Finite Difference Time Domain method)で解析した。アンテナの形状を十字 (線状) 型、ループ型 (波長オーダー寸法)、パッチ型の 3 つのタイプに大別、それぞれのタイプでの代表的な複数の形状アンテナの FSS の解析結果とその特徴を示す。

## 2. FSS ガラスの構造・原理

Fig.1 に、垂直な  $1/2$  波長ダイポールアンテナを  $N$  本配列した FSS を示す。この FSS に垂直偏波の平面波  $E_0$  を当てた場合、 $\#1 \sim \#n$  のダイポールアンテナには、それぞれ  $V_1 \sim V_n$  の電圧が誘起、 $\#i$  と  $\#j$  のアンテナ間の相互インピーダンスを  $Z_{ij}$  とするとき、誘起電流  $I_1 \sim I_n$  は(1)式となる。

---

\* 電気電子情報工学科

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

FSS の面が非常に広く、周り込みの電波がないと考えた場合、受信点の電界強度  $E_p$  は(2)式となる。

$$E_p = \sum_{k=1}^n E_{p,k} + E_0 e^{-j\beta z_p} \quad (2)$$

なお、 $E_{p,k}$  は #k のアンテナ電流  $I_k$  による受信点 p の電界強度、 $\beta$  は伝搬定数である。

この場合、受信点 p の FSS によるシールド効果 (Shielding Effect、SE と略称する。) は(3)式となる<sup>2)</sup>。

$$SE = 20 \cdot \log_{10} \left[ \frac{|E_p|}{E_0} \right] \quad (3)$$

Fig.2 に、FSS の SE の FDTD 法による解析結果の例を示す。Fig.1 のような 1/2 波長ダイポールアンテナでの FSS の場合、最大シールド周波数は、そのアンテナの共振周波数に近いことが分かっている。これは、N 本のアンテナに直接波が当たると、その共振周波数では最大の逆位相の電波を再放射するために、FSS の前面方向には定在波、後面では電波が消失すると説明できる。

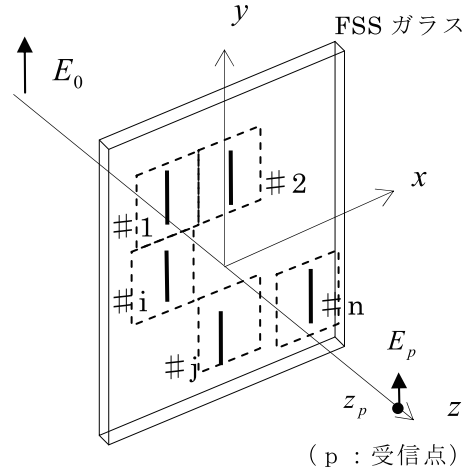


Fig.1 FSS ガラスの構造・原理

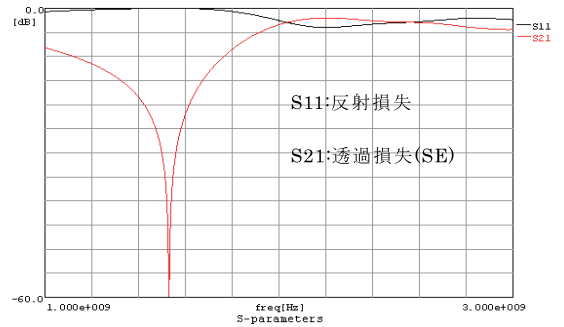


Fig.2 FSS のシールド特性の計算例

### 3. 各種アンテナ形状の FSS の解析モデルと解析構造

#### (1) 解析モデル

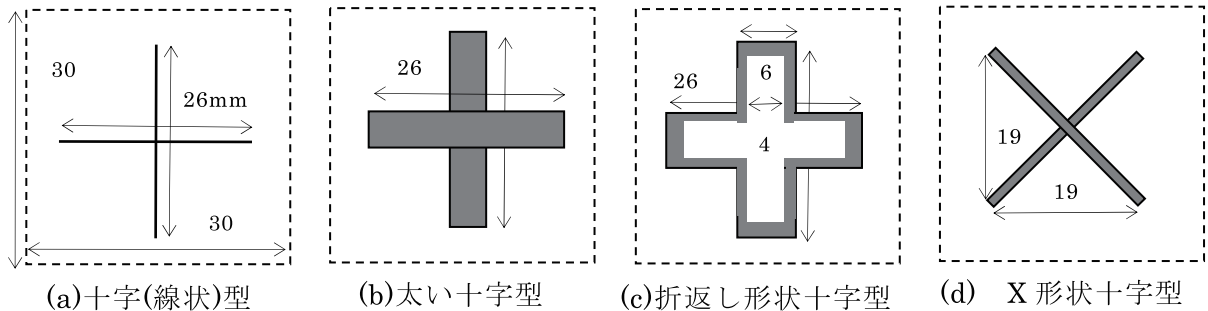


Fig.3 十字アンテナ型 FSS の種類・寸法

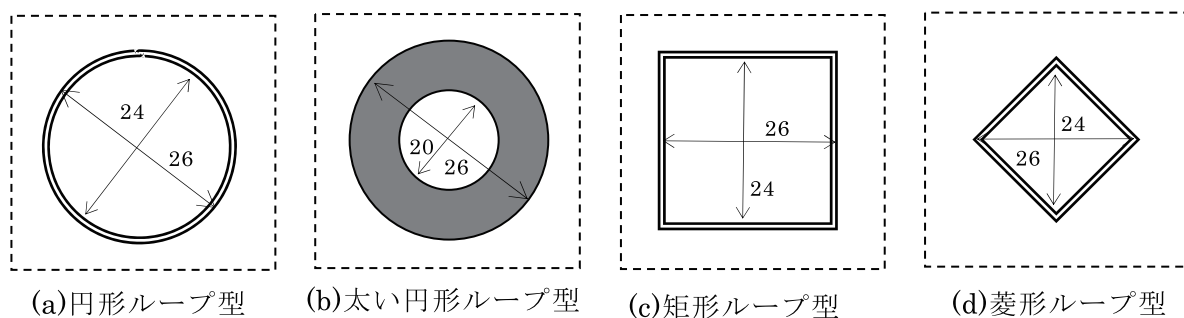


Fig.4 ループアンテナ型 FSS の種類・寸法

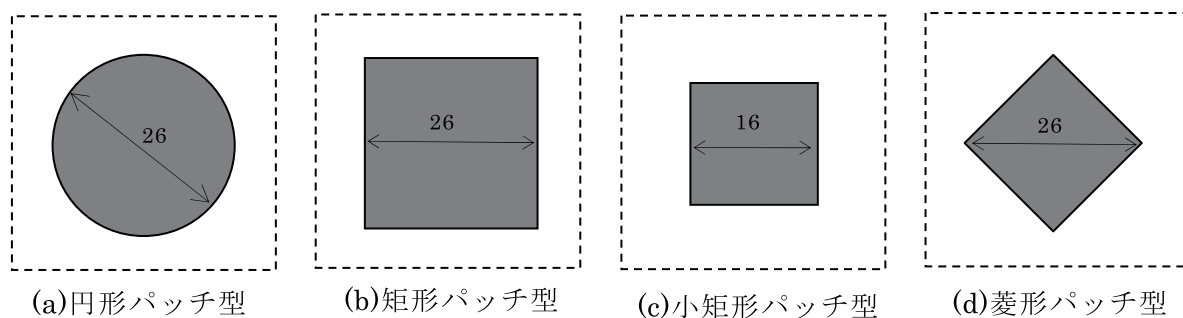


Fig.5 パッチアンテナ型 FSS の種類・寸法

Fig.3,4,5 の(a),(b),(c),(d)に、FSS のアンテナ形状をアンテナの機能形態から十字型、ループ型、パッチ型の3つに大別し、それぞれの型での複数の形状のモデルを示す。なお、FSS としてはこれらのアンテナが厚さ 10mm の板ガラス（比誘電率：7）の上に縦、横 30mm の等間隔で無限に配列されているものとする。

## (2) 解析構造

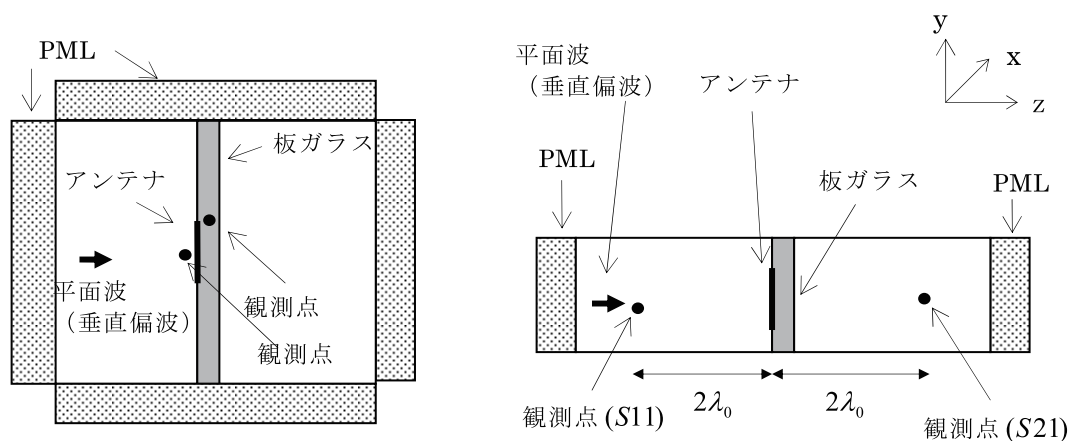


Fig.6 解析モデルと解析構造

先に、FSS の最大シールド周波数 ( $f_s$  とする) はその 1 個のアンテナの共振周波数 ( $f_r$  とする) と関係していることを示した。Fig.6(a)に、板ガラス上の 1 個のアンテナの共振特性の FDTD 法による解析構造を示す。(a)では  $45 \times 45 \times 10\text{mm}$  厚の板ガラス上、中央にアンテナ 1 個を置き、そのアンテナ中央の前方 1mm、アンテナ端の後方 1mm 位置に観測点を置く。

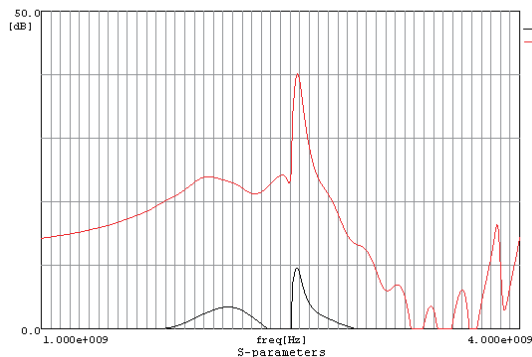
Fig.6(b)に、FSS のシールド特性の FDTD 法による解析構造を示す。(b)では縦、横、厚さ  $30 \times 30 \times 10\text{mm}$  の板ガラス中央にアンテナを置き、その前方約  $2\lambda_0$  ( $\lambda_0$  : 共振波長) 後方約  $2\lambda_0$  に観測点を置き、無限周期条件 (x,y 方向) を用いる。

(a),(b)両解析では、周辺吸収境界条件を Berenger の PML<sup>3)</sup>、セルメッシュサイズを 1mm(x 方向)  $\times$  1mm(y 方向)  $\times$  1mm(z 方向)、垂直偏波の平面波を Gaussian パルスとして入力、計算、高速フーリエ変換により、(a)では電界強度 ( $\cong$  透過特性 ( $S_{21}$ )) から共振周波数特性、共振周波数での電圧分布、また、(b)では反射特性 ( $S_{11}$ )、透過特性 ( $S_{21}$ ) を求めた。この  $S_{21}$  を SE とした。

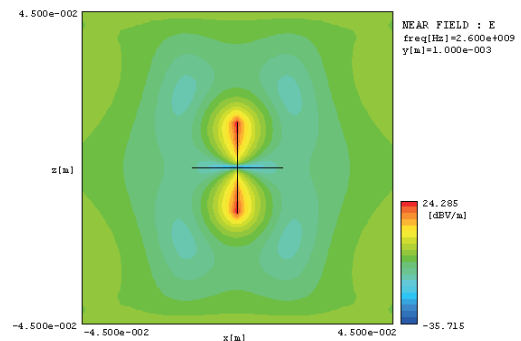
#### 4. 解析結果

##### (1) 1 個のアンテナの共振特性

Fig.3(a)の十字型、Fig.4(a)の円形ループ型、Fig.5(a),(b)の円形パッチ型、矩形パッチ型の板ガラス上の 1 個のアンテナの共振特性、共振周波数での電圧分布 (赤：電圧高い、青：電圧低い) を Fig.7,8,9,10 に示す。Fig.7 から十字型アンテナの場合は、共振周波数が  $f_r = 2.61\text{GHz}$  で、電圧分布が垂直方向のダイポールアンテナに正弦波状であることが分かる。Fig.8 から円形ループ型アンテナは、一波長ループアンテナと同じ電圧分布で共振周波数  $f_r = 1.84\text{GHz}$  であることが分かる。Fig.9 から円形パッチ型アンテナは、同じ外周長の一波長ループアンテナとほぼ同じ周波数での最低共振周波数となり、また Fig.9,10 から円形、矩形パッチ型アンテナの電圧分布は偏波方向にほぼ正弦波状なることがわかる。しかし、これらのアンテナはループ型アンテナと比べて共振帯域幅がずっと高周波のほうにも広がっていることも分かる。

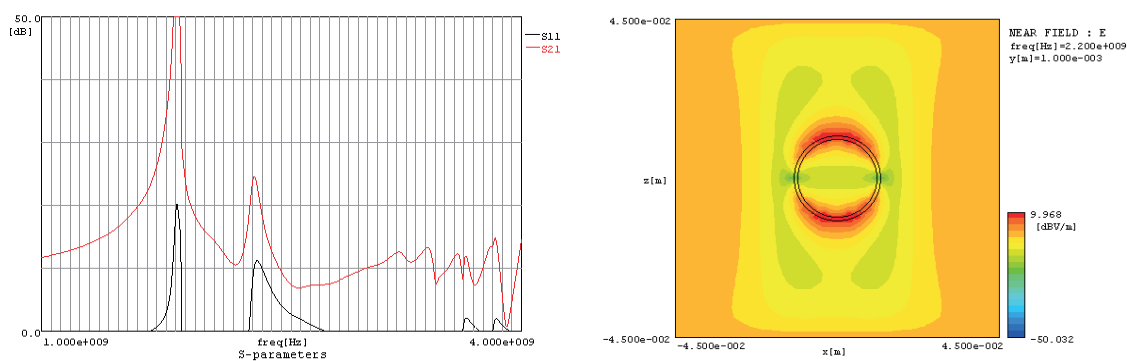


(a) 周波数特性



(b) 電圧分布

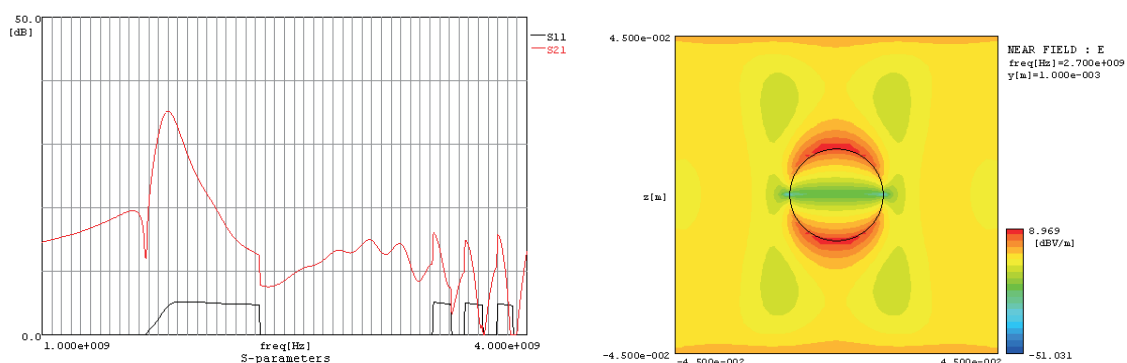
Fig.7 1 個の十字型アンテナの共振特性 ( $f_r=2.61\text{GHz}$ )



(a) 周波数特性

(b) 電圧分布

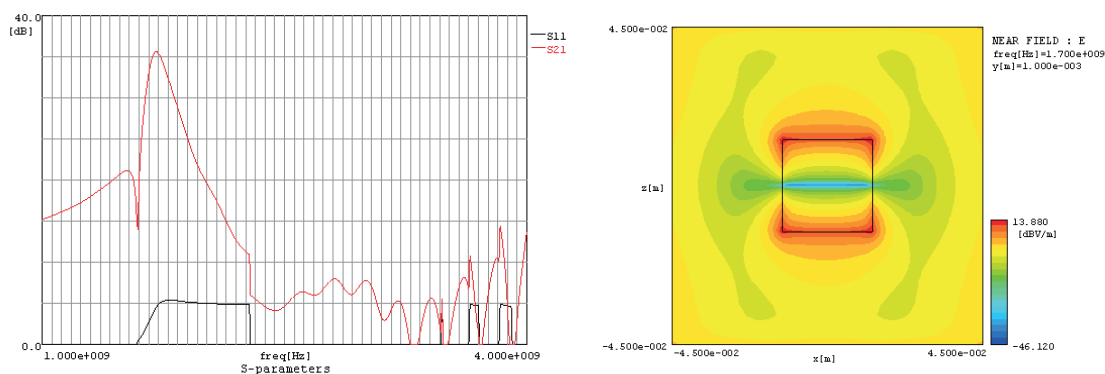
Fig.8 1個の円形ループ型アンテナの共振特性 ( $f_r=1.84\text{GHz}$ )



(a) 周波数特性

(b) 電圧分布

Fig.9 1個の円形パッチ型アンテナの共振特性 ( $f_r=1.79\text{GHz}$ )



(a) 周波数特性

(b) 電圧分布

Fig.10 1個の矩形パッチ型アンテナの共振特性 ( $f_r=1.70\text{GHz}$ )

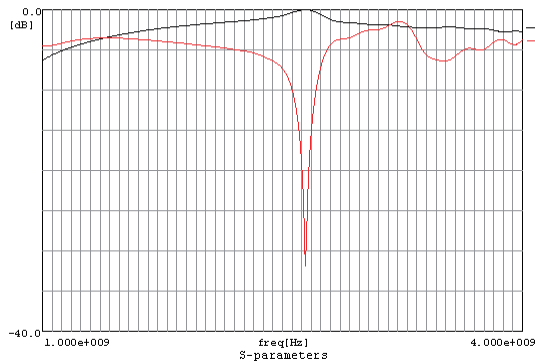
## (2) FSS の SE

Fig.3,4,5(a),(b),(c),(d)の各種 FSS のシールド周波数特性を Fig.11,12,13 の(a),(b),(c),(d)に示す。Fig.7(a)の十字型アンテナの共振周波数は  $f_r = 2.61\text{GHz}$ 、Fig.11(a)の FSS としてのシールド周波数は  $f_s = 2.63\text{GHz}$  で両者はほぼ一致していることが分かる。Fig.11(b),(c)からは十字型アンテナを太

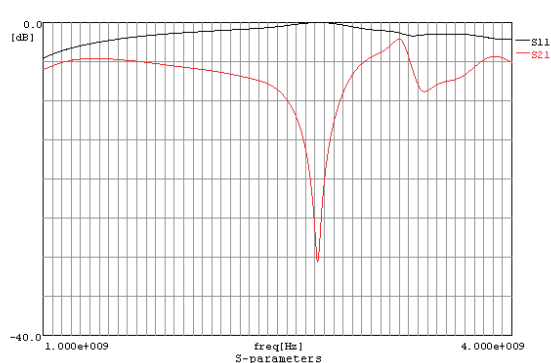
く、または折返し状にするとシールド帯域幅が広くなること、また Fig.11(d)からはアンテナ方向と偏波方向が一致していなくても同じ特性が得られることが分かる。

Fig.8 (a)の円形ループ型アンテナの共振周波数は  $f_r = 1.84\text{GHz}$ 、Fig.12 (a)の FSS としてのシールド周波数は  $f_s = 1.99\text{GHz}$  で両者はほぼ一致していることが分かる。Fig.12(b)からは円形ループ型アンテナを太くすると広帯域になることが分かる。Fig.12(c)からはループが矩形になっても円形と同じようにループの全長でシールド周波数が決まること、また Fig.12(d)からはループの1辺のアンテナ方向と偏波方向が一致しなくても同じ特性が得られることが分かる。

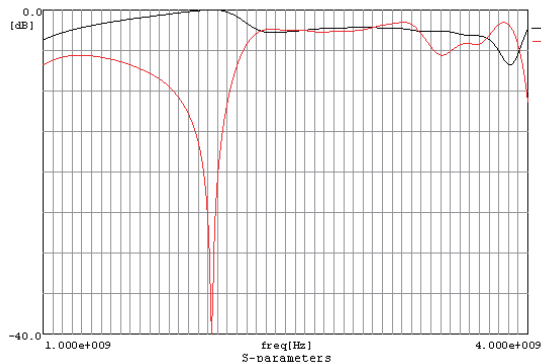
Fig.9(a)の円形パッチ型アンテナの共振周波数は  $f_r = 1.79\text{GHz}$ 、Fig.13-1(a)の FSS としてのシールド周波数は  $f_s = 4.16\text{GHz}$  で両者はまったく異なっていることが分かる。 $f_r, f_s$  ともに極めて広帯域になる特徴があることも分かる。このことは、Fig.13-1(b), Fig.13-2(c),(d)でも同じである。推論すると、1個のパッチ型アンテナはその形状から広帯域の共振特性を有し、またパッチ型アンテナの FSS では、FSS の面のほとんどがパッチ型アンテナ面で占められ、アンテナ間の相互インピーダ



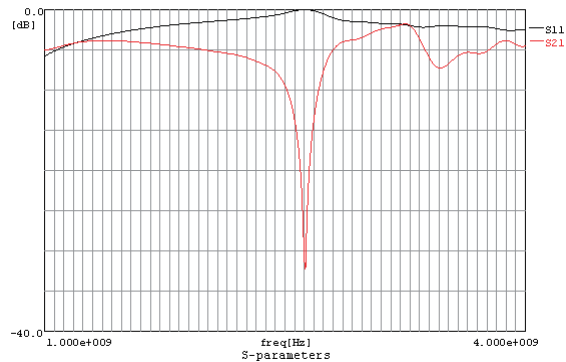
(a) 十字(線状)型 ( $f_s = 2.63\text{GHz}$ )



(b) 太い十字型 ( $f_s = 2.75\text{GHz}$ )



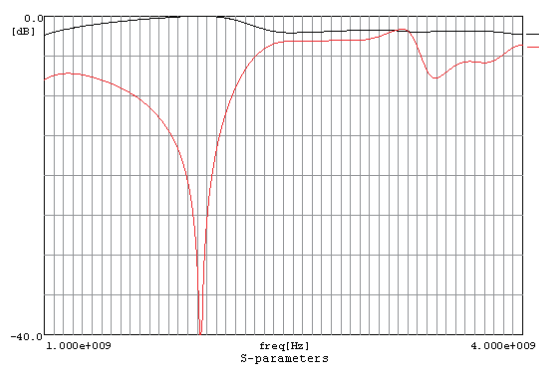
(c) 折返し形状十字型 ( $f_s = 2.05\text{GHz}$ )



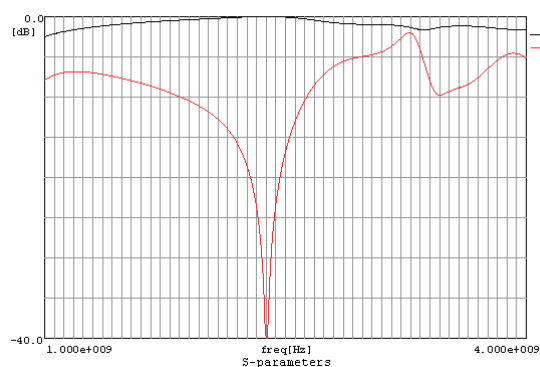
(d) X形状十字型 ( $f_s = 2.62\text{GHz}$ )

Fig.11 十字アンテナ型 FSS のシールド特性

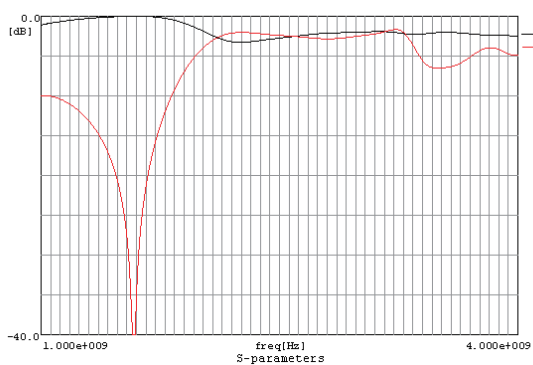
ンスが非常に大きくなるため、FSS のシールド周波数は全てのアンテナの影響を非常に大きく受ける。その結果、FSS のアンテナ配列の方向と当てる電波の偏波方向の角度によってもシールド周波数・帯域幅が変化することになり、FSS としては設計しにくいものになると考えられる。ただ、非常に広帯域の特徴があることは何かに利用可能かも知れない。



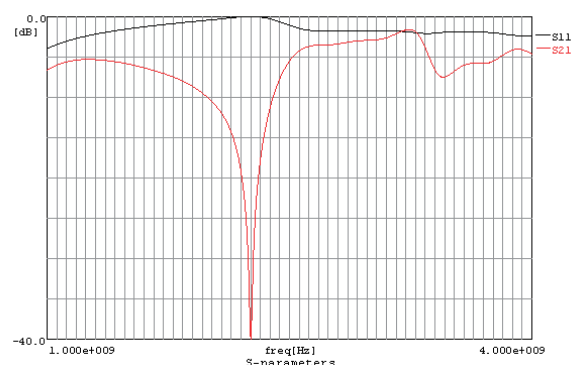
(a) 円形ループ型 ( $f_s=1.99\text{GHz}$ )



(b) 太い円形ループ型 ( $f_s=2.37\text{GHz}$ )

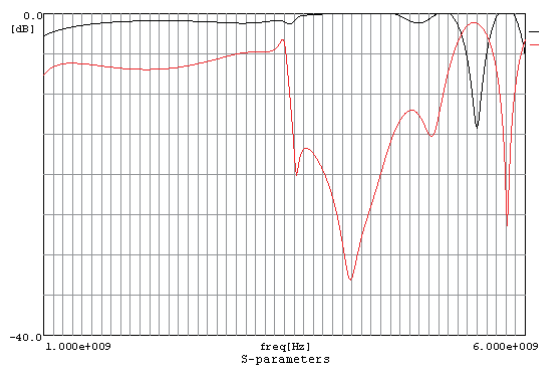


(c) 矩形ループ型 ( $f_s=1.57\text{GHz}$ )

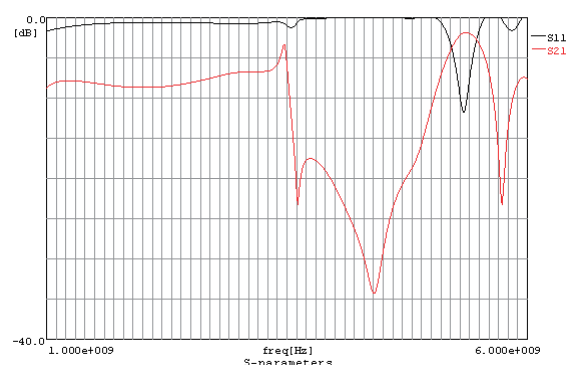


(d) 菱形ループ型 ( $f_s=2.26\text{GHz}$ )

Fig.12 ループアンテナ型 FSS のシールド特性

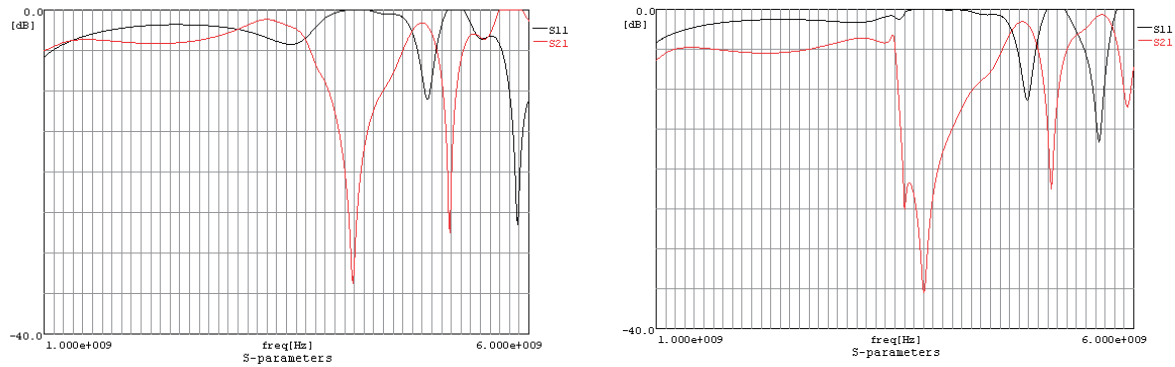


(a) 円形パッチ型 ( $f_s=4.16\text{GHz}$ )



(b) 矩形パッチ型 ( $f_s=4.39\text{GHz}$ )

Fig.13-1 パッチアンテナ型 FSS のシールド特性



(c) 小矩形パッチ型 ( $f_s=4.22\text{GHz}$ )

(d) 菱形パッチ型 ( $f_s=3.74\text{GHz}$ )

Fig.13-2 パッチアンテナ型 FSS のシールド特性

## 5. まとめ

本論文では、全部の解析データは示さなかったが、文章ではその内容を含めて述べている。今回の結論は次の2点となる。

- ① 十字（線状）型、ループ型アンテナの FSS は、それらのアンテナ全長でほぼ最大シールド周波数、その太さでシールド帯域幅が決まり、アンテナ線方向と偏波方向に関係なく良好なシールド効果が期待でき、設計し易い。
- ② パッチ型アンテナの FSS は、シールド帯域幅が極めて広帯域になるが、アンテナ形状・アンテナ配列方向と当てる電波の偏波方向により、そのシールド周波数・帯域幅が変化するため、FSS としては利用しにくく、また設計もしにくい。

今回の解析結果の一部は、実験でも確認されている。

以上

## 参考文献

- (1) 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)
- (2) Yoshinori Kasashima; Theoretical Analysis of Frequency Selective Shielding Films, The 14 International Zurich Symposium and Exhibition on Compatibility, pp5-10, (February 2001)
- (3) 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

(平成 24 年 3 月 31 日受理)