

メタマテリアル周期構造の電磁波反射・透過係数制御技術を用いた無線装置ケースの透明化に関する研究

代表研究者 榎原久二男 名古屋工業大学 大学院 工学研究科 教授

1 まえがき

人工的な構造を、自然媒質に取り入れることにより、自然界ではあり得ない電気特性を有する人工媒質を、メタマテリアルと呼ぶ。メタマテリアルには、左手系伝送線路などの伝搬特性を変化させるもののほか[1], 反射係数を変化させる人工磁気導体や表面波の伝搬を抑える電磁バンドギャップ、透過特性を変化させる周波数選択板などのような2次元構造のメタサーフェスが開発されている[2], [3]。メタサーフェスのうち周波数選択板 (Frequency Selective Surface: FSS) は、図1に示すように周期構造からなり、特定の周波数の電磁波のみ透過させたり、遮断させたりできる空間フィルタの機能を実現するメタサーフェスを指す[4]。これまでに FSS のミリ波の周波数帯への適用についての研究に取り組んだところ、FSS の透過帯域において、誘電体板だけを電磁波が透過するのとは比べて、透過量が増加する性質を有することに気がついた。この特性を調査したところ、FSS により、誘電体を電磁波が透過するときに生じる反射による損失を低減できることが分かった。

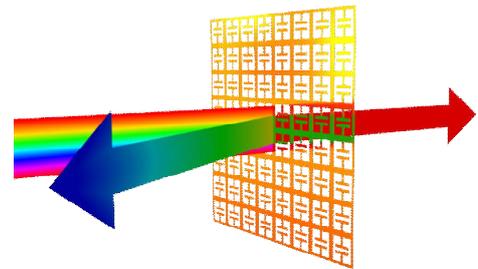


図1. 周期構造からなる周波数選択板の概念図

通信機や電波センシングなどに用いられる無線システムは、他の電波システムからの外乱や、埃や湿気などによる性能劣化を避けるため、樹脂で作られたカバー (レドーム) で覆われている。また、自動車の自動制御を実現するためのセンシング装置の1つであるミリ波レーダは、自動車のフロントグリルに搭載されていることが多いが、より搭載性の良いバンパー内や、より周辺環境への見晴らしの良いルームミラー付近への搭載も考えられており、バンパーやフロントガラスによる反射が問題になる。本研究では、無線システムのアンテナ前面に置かれた誘電体の反射損失を低減するための、FSS の設計手法を開発する。さらに、周波数選択板を誘電体に装荷したときの反射損失の低減の効果を、電磁界解析と実験により確認したので報告する。

2 周波数選択板の理論と設計

2-1 周波数選択板の構造と原理

周波数選択板 (FSS) は、特定の周波数の電磁波のみを透過させたり、遮断させたりする機能を有する空間フィルタである。共振構造を用いるために、その構造の大きさは少なくとも波長と同程度の大きさが必要である。その共振構造を1つの単位とし、波長に比べて大きい面積でその機能が必要となることが多いため、その共振構造を配列した周期構造からなる。誘電体板の片面に金属の周期構造の FSS を設置し、FSS の面の側の中空から平面波が入射する様子を図2(a)に示す。自由空間の固有インピーダンスを Z_1 とすると、誘電体内の特性インピーダンスは異なる値 Z_2 となる。FSS は金属面からなるため、電磁波が伝搬する方向と垂直な面内には電流が流れる。そのため、損失を無視したとき、FSS を等価回路で表すと、周期構造がどんな構造であっても、シャント接続のサセプタンス jB で表される。次に、周期構造の種類について示す。

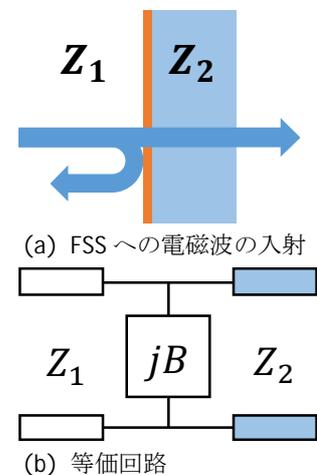
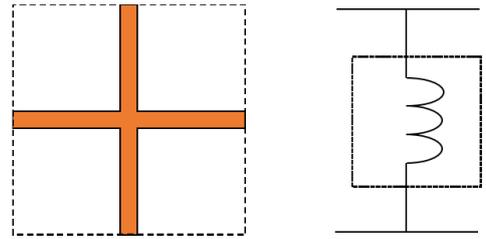


図2. FSS への電磁波の入射と等価回路

(1) グリッド型 FSS

グリッド型の FSS は、無限長のストリップ導体が垂直方向と水平方向

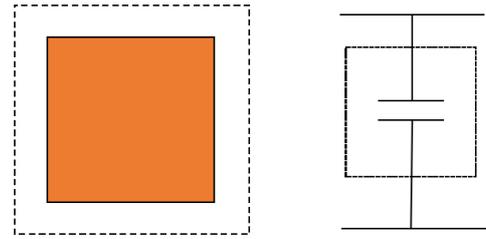
に格子状に組み合わせた形状である。1 周期分の構造とその等価回路を図 3(a)に示す。グリッドに平面波が入射すると、電界ベクトルに平行な線路には電流が流れ、インダクタンスとして働く。電界に平行な線路には、ほとんど電流が流れないため、FSS の動作には影響しない。垂直・水平の両方の偏波に対して機能するように、直交する2つのストリップ導体を用いる。周波数が低くなると短絡回路、周波数が高くなると開放回路として動作するため、グリッド型 FSS は、ハイパスフィルタとして動作する。



(a) グリッド型 FSS の周期構造と等価回路

(2) パッチ型 FSS

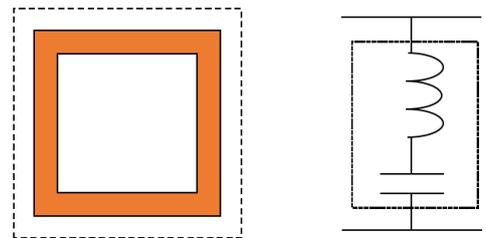
パッチ型の FSS は、正方形のパッチを周期的に配列した形状である。1 周期分の構造とその等価回路を図 3(b)に示す。平面波が入射すると、金属部はインダクタンス、パッチ間のギャップ部はキャパシタンスとして動作するが、パッチの幅が広いときにはインダクタンス成分は小さくなり、無視できる。そのため等価回路はシャント接続のキャパシタンスとなる。このとき等価回路は、周波数が低くなると開放回路となり、周波数が高くなると短絡回路となるので、パッチ型 FSS は、ローパスフィルタとして動作する。



(b) パッチ型 FSS の周期構造と等価回路

(3) ループ型 FSS

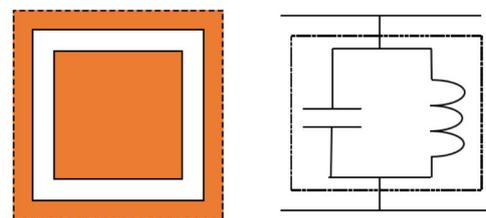
ループ型の FSS は、環状の細い金属線路を周期的に配列した構造である。1 周期分の構造とその等価回路を図 3(c)に示す。パッチ型と同様に金属部はインダクタンス、周期間のギャップ部はキャパシタンスとして動作する。パッチ型と異なり、金属部が細いため、金属部に電流が集中してインダクタンスが大きくなり、このインダクタンス成分は無視できない。金属のループの中にできるギャップもキャパシタンスとして動作するが、ギャップが大きいときには無視できるため、等価回路は、シャント接続のインダクタンスとキャパシタンスの直列回路となる。共振周波数ではインピーダンスがゼロとなり、入射した電磁波を全反射するバンドストップ特性を有する。



(c) ループ型 FSS の周期構造と等価回路

(4) ループスロット型 FSS

ループスロット型の FSS は、グリッド型 FSS とパッチ型 FSS を組み合わせた構造であり、ループ型 FSS の金属部と金属抜け部を反転させた構造である。1 周期分の構造とその等価回路を図 3(d)に示す。スロットによってできるギャップはキャパシタンスとして作用し、外周の金属部はインダクタンスとして作用する。中心のパッチ部分は、幅が広いために電流が分散し、インダクタンスは非常に小さい。従って等価回路は、インダクタンスとキャパシタンスの並列回路をシャント接続したものになる。共振周波数でインピーダンスが無限大となり、入射した電磁波を全透過するバンドパス特性を示す。



(d) ループスロット型の FSS の周期構造と等価回路

図 3. 様々な FSS の周期構造と等価回路

2-2 周波数選択板の解析

(1) 等価回路解析

誘電体板に FSS を装荷することで形成される積層構造は、FSS や誘電体間の境界面における反射による多重反射を制御して、所望の透過・反射特性を実現するため、FSS の最適化が難しい。そのため、本論文では等価回路を用いて所望特性を得るために必要な FSS の特性を導出し、その特性となるように FSS 単体の電磁

界解析により設計する設計法を提案する。積層構造は、FSS 面、誘電体によって構成され、異なる誘電率の領域間の境界面と、FSS で反射が発生する。FSS、誘電体の境界面、誘電体の伝送特性を示す S 行列を導出し、それらを縦続接続可能な T 行列に変換して縦続接続することで、構造全体の特性が求められる。FSS 単体の特性は等価回路によって得ることも考えられるが、等価回路を十分な精度で求めるためには、周期長が半波長以下であることや、インダクタンスとして働く線路の幅が十分に小さいことなどの制約がある。さらに積層構造の設計においては、FSS のうちのどの形状を採用するかが難しく、等価回路によってあらかじめ FSS の形状を定める設計法は適していない。本報告で提案する設計法では、FSS の透過位相のみの関数とすることで、構造全体の特性も FSS 単体の透過位相の関数で表す。その結果から、所望の特性を得るために必要な FSS 単体の特性を得ることができ、最適な FSS の基本形状を選択できる。

平面波が FSS に入射すると、金属部がインダクタンスとして作用し、金属間のギャップ部分がキャパシタンスとして作用することで、周波数依存性を有する反射・透過特性を示す。FSS が無損失導体であるとき、図 2 に示すようにシャントサセプタンス jB で表されるため、FSS の S 行列の成分は、次式で表される。

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{Z_2 - Z_1 - jB}{Z_1 + Z_2 + jB} \\ S_{12} &= \frac{2\sqrt{Z_1 Z_2}}{Z_1 + Z_2 + jB} \\ S_{21} &= \frac{2\sqrt{Z_1 Z_2}}{Z_1 + Z_2 + jB} \\ S_{22} &= \frac{Z_1 - Z_2 - jB}{Z_1 + Z_2 + jB} \end{aligned}$$

積層構造は、誘電体、FSS、誘電体の境界面によって構成されるため、S 行列を数学的に T 行列に変換し、縦続接続することで、構造全体の特性が得られる。図 4 に積層構造の等価回路を示す。空気と誘電体 1 の境界面での T 行列を T_i 、誘電体 1 中の伝送特性を T_{d1} 、誘電体 2 中の伝送特性を T_{d2} 、FSS1、FSS2 の T 行列をそれぞれ T_{FSS1} 、 T_{FSS2} とすると、構造全体の特性の T 行列 T_{total} は次式で表される。

$$T_{total} = T_i \cdot T_{d1} \cdot T_{FSS1}(\phi_{t1}) \cdot T_{d1} \cdot T_{FSS2}(\phi_{t2}) \cdot T_{d2} \cdots$$

ここで、 ϕ_{t1} 、 ϕ_{t2} は、それぞれ FSS1、FSS2 の透過位相である。

(2) 周期構造の電磁界解析

周波数選択板は周期構造からなるため、無限周期境界条件を、1 周期の外周に適用して電磁界解析することによって、1 周期分の解析をするだけで、その構造が無限に配列している状況で生じる、隣接周期からの相互結合の影響を考慮した反射・透過特性を計算することができる。その構造を図 5 に示す。Floquet の原理による周期境界条件を適用することにより、解析領域内の構造が無限に配列しているのと同時に、その内部の電磁界も無限に配列している条件で電磁界解析することができる [5]。対向する Master/Slave 境界に位相差を与えることにより、斜め方

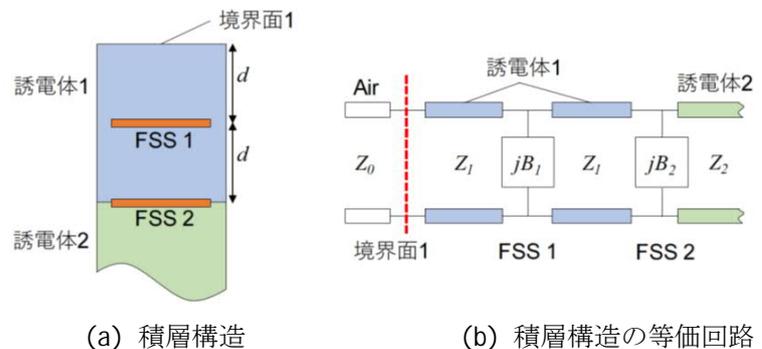


図 4. 積層構造とその等価回路

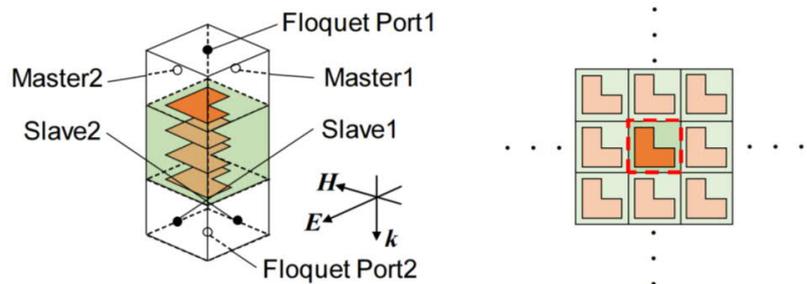


図 5. 周期構造の解析モデル

向からの入射に対しても解析することが可能である。

FSS 単体の解析構造を図 6 に示す。解析では無限周期境界を適用し、層構造中の 2 つの異なる誘電体の境界に FSS を装荷し、FSS 以外の境界面がない状態とする。透過位相を得るときには、ポートから FSS 表面までの伝搬で生じる位相変化も含んでしまうため、De-embed の機能を用いて位相参照面を補正することにより、FSS のみによって生じる位相変化だけを導出する。

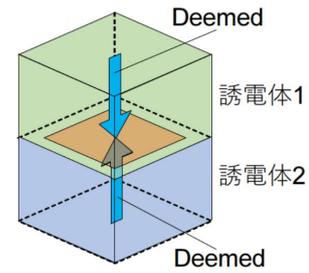


図 6. FSS 単体の解析構造

2-3 周波数選択板の設計

等価回路の行列計算と、電磁界解析を併用することで、積層構造の反射を低減し透過量が増加するための FSS の設計方法を提案する。設計フローを図 7 に示す。はじめに、各層の誘電体の厚さ、比誘電率などの層構造の条件を設定する。次に、FSS と誘電体板の特性を、それぞれ T 行列で表現し合成することで構造全体の T 行列を求める。それを S 行列に変換して構造全体の S 行列 S_{total} を求める。所望の特性を得るための FSS 単体の特性を、行列計算により求める。

次に、行列計算により求めた、所望の特性を得るための FSS 単体の特性となるように、FSS の形状と各寸法を電磁界解析により決定する。その形状によって、所望の特性が得られることが電磁界解析で確認できれば、設計は完了する。所望の特性が得られなければ、改めて、誘電体と FSS の層構造の条件に立ち返って、条件とする基本構造を考え直し、このフローを繰り返す。この手法により、計算負荷の高い電磁界解析での計算は、FSS 単体のみの最小限の構造で済むことから、物理的に構造が予測しやすいとともに、計算の負荷が小さい、簡易な設計手順で設計することができる。

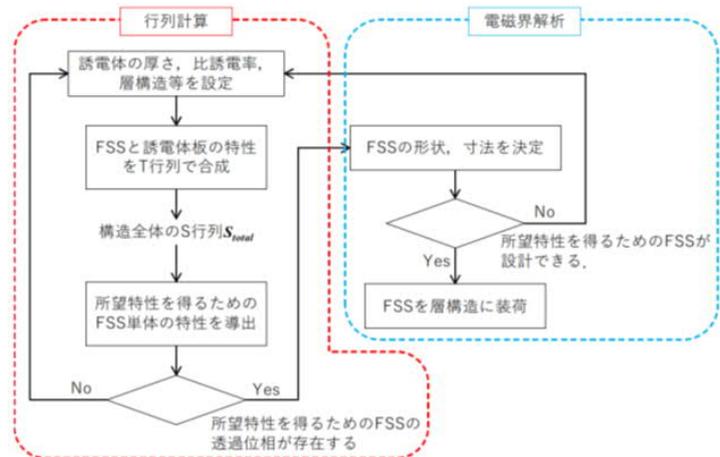


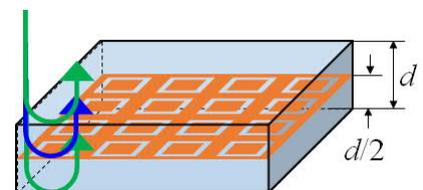
図 7. 設計方法のフローチャート

3 中央装荷周波数選択板の開発

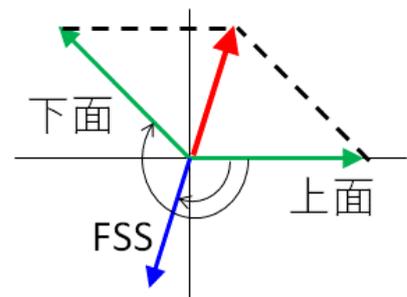
3-1 中央装荷周波数選択板の反射抑圧の原理

誘電体板の表面と垂直に、平面波が入射すると、その表裏の表面で平面波は反射する。誘電率が低い媒質から高い媒質へ入射するときの反射係数は位相が反転するが、誘電率が高い媒質から低い媒質へ平面波が入射するときの反射係数は、位相反転しない。そのため、誘電体板の厚さが、誘電体内の伝搬波長で半波長の整数倍の時に、表面の反射波と裏面の反射波の行路長差が 1 波長の整数倍となり、FSS を装荷すること無しに、反射量は低下する。ところが、誘電体板の厚さが 1/4 波長と半波長の整数倍の時には、2 つの反射は同相となり強め合う。それによって、反射量が増加してしまう。このように、波長に対する誘電体の厚さによって、反射量に変化する。このような場合でも反射量が低下するように FSS を導入する。

誘電体への FSS の設置位置には様々な選択肢がある。誘電体を作った後で FSS を形成する作りやすさを考えると、誘電体の片側または両側の表面に FSS を形成することが考えられる。当初、FSS を装



(a) 厚さ中央に FSS を装荷した誘電体板



(b) 反射波の複素ベクトル

図 8. 誘電体板厚さ中央に FSS を装荷した構造と反射波の複素ベクトル

荷することにより、透過位相、反射位相を制御することができることを期待していた。ところが、位相について幅広い制御範囲を実現するためには、共振周波数付近の、特性変動の大きい特性を使わなければならなかった。そうすると周波数帯域幅が狭くなるという問題が生じた。そこで、振幅のみを制御する方法を採ることとした。FSS の反射振幅を制御する手法を活用することにより、誘電体板の厚さ中央に FSS を装荷することで、反射特性を向上させる手法を考案した。図 8(a)に、誘電体板の厚さ中央へ FSS を装荷した図を示す。FSS により生じる反射波で、誘電体表面に生じる反射波を打ち消す原理を、それらの反射波の複素ベクトルを示すことで説明する。複素ベクトルの図を図 8(b)に示す。誘電体の厚さ中央に装荷した FSS で生じる反射波の複素ベクトルは、誘電体の上面と下面で生じる反射波の位相のちょうど中間の位相を有する複素ベクトルとなることから、FSS による反射波の複素ベクトルは、誘電体の上面と下面で生じる反射波の合成ベクトルと、必ず逆相となることを突き止めた。あとは、FSS の金属パターンの抜け度合いを調整する設計をすることにより振幅量を制御することで、合成ベクトルと逆相で等振幅となり、反射量を低減することができる。

3-2 中央装荷周波数選択板の設計

誘電体板の厚さ中央の面に FSS を装荷した層構造を、2-2(1)で示した等価回路による行列解析で、反射特性を解析した。横軸に周波数、縦軸に FSS 単体の透過位相として、層構造全体の反射量の等高線図を図 9 に示す。この図は、FSS 単体の特性を図 2(b)に示すシャントサセプタンスで表したときの透過位相で表現しているの、FSS の構造の情報は必要ない。次のステップで初めて電磁界解析により、この等高線図で示す反射量が小さいエリアを、透過位相の周波数特性が通過するように構造を設計する。シャントサセプタンスの透過位相は、フォスターのリアクタンス定理[6], [7]から、原則として右下がりの特性を示すため、右下がりの曲線で、広い周波数帯域幅で反射レベルが低くなるような軌跡となるように設計する。FSS 単体の透過位相が破線の場合には狭帯域となってしまいが、実線のような軌跡を有する FSS を用いれば広帯域な特性を実現することができる。

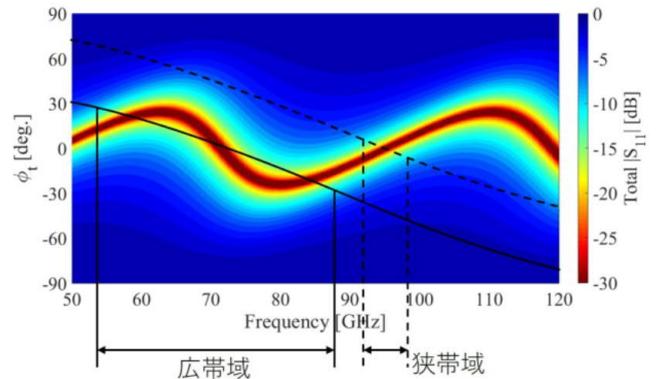


図 9. 層構造全体の反射係数の等高線図

図 10 に、円形リングスロット FSS の金属パターンを示す。2-1 では、動作原理や等価回路を説明しやすいうように、方形配列からなる正方形を基本とした金属パターンの周期構造を示したが、円形リングスロットでも、2-1(4)で説明した方形のループスロット型 FSS と、動作原理は同じである。円形の場合には、正方配列よりも三角配列の方が密に配列できるため、三角配列とした。周期 p 、スロットの中心線の円の半径 t とスロット幅 w を最適化することにより、広帯域設計した。図 11 に、FSS を誘電体板中央に装荷したときの反射特性を示す。3 重共振により広帯域な反射特性を実現している。中央の周波数では、誘電体の両面の反射が互いに打ち消されると同時に、FSS が共振するように設計している。低い側と高い側の共振周波数では、図 8(b)のように、誘電体表面の 2 つの反射と FSS の反射からなる 3 つの反射が互いに打ち消し合うことで共振している。

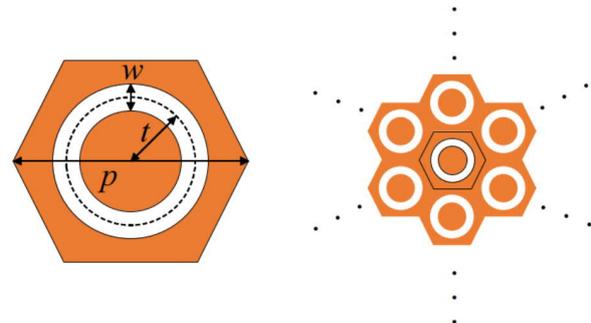


図 10. リングスロット FSS の構造

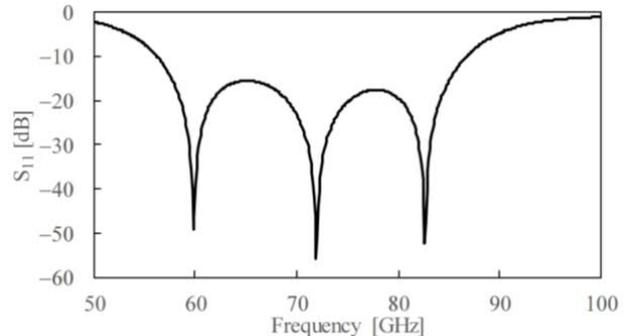


図 11. 反射特性の電磁界解析結果

3-3 中央装荷周波数選択板の特性評価

電磁界解析で求めた FSS の特性とその効果を実験的に検証するために、FSS を試作した。その写真を図 12 に示す。同じ厚さの 2 枚の誘電体板の間に写真のような円形のリングスロット FSS を装荷した。厚さ 2.032 mm (実測)、比誘電率 2.35 の 2 枚の誘電体の片方の誘電体に FSS のパターンを施し、このパターンを内側にして、2 枚の誘電体を、ボンディングシートで張り合わせている。FSS のスロット半径 $t = 0.54$ mm, スロット幅 $w = 0.17$ mm, 周期 $p = 1.80$ mm とした。

透過量と反射量を、図 13 に示すフリースペース法の測定系で測定した。ベクトルネットワークアナライザにミリ波エクステンダーモジュールを接続し、両者のミリ波ポートにホーンアンテナを接続して対向させ、その中間に、試料を立てた。透過量については、試料が無い場合との差を、反射量については、金属板を立てた場合との差を観測することで校正をとり測定した。

反射量の周波数特性を図 14(a)に、透過量の周波数特性を図 14(b)に示す。測定の結果、共振周波数がずれたが、3つの共振が発生することが分かった。これにより、誘電体だけの場合と比較して、透過量が改善することが分かった。

4 まとめ

誘電体板の反射を低減するために、メタサーフェスの一種である周波数選択板を誘電体板に装荷することを提案した。等価回路の行列解析により所望の特性を得るために周波数選択板に必要な特性を求めることができ、構造全体を電磁界解析することなく、周波数選択板単体の電磁界解析による最適化によって、設計できるという、簡易な設計法を提案した。また、誘電体板の厚さ中央に周波数選択板を装荷することにより、3重共振を実現でき、広帯域に反射を低減できることを、理論的に説明し、その効果を、電磁界解析と測定により示した。

【参考文献】

- [1] C. Caloz and T. Itoh, Electromagnetic Metamaterials, Transmission Line Theory and Microwave Applications, Wiley Interscience, 2006.
- [2] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering, The Cambridge RF and Microwave Engineering Series, Cambridge University Press, 2009.
- [3] S. W. Schneider, J. F. McCann, "Frequency Selective Surfaces," Antenna Engineering Handbook, 4th Ed., Ch. 56, 2007.
- [4] B. A. Munk, Frequency Selective Surface: Theory and Design, Wiley Interscience, 2000.
- [5] R. E. Collin, Field Theory of Guided Waves, 2nd Ed. IEEE Press, Ch. 9.

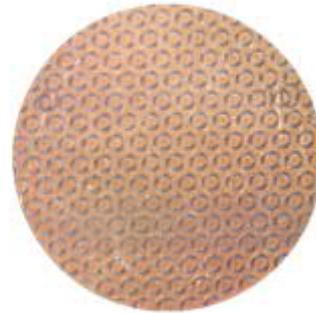


図 12. 試作した FSS

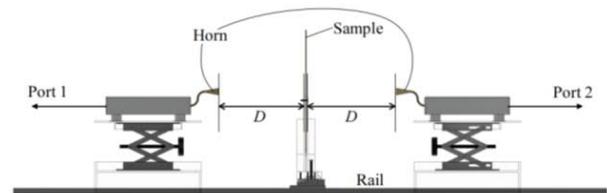
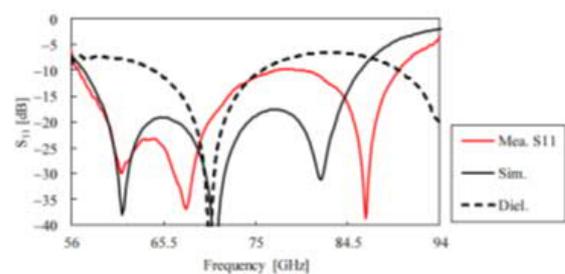
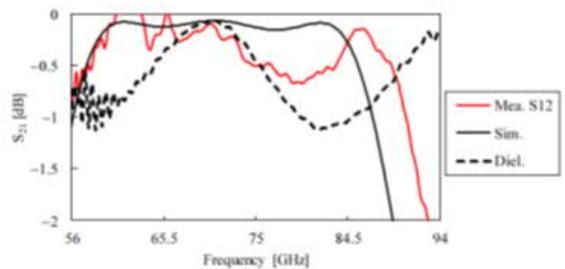


図 13. フリースペース法による測定系



(a) 反射係数



(b) 透過係数

図 14. 測定結果

- [6] S. R. Best, "The Foster reactance theorem and quality factor for antennas," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 3, 2004, pp. 306-309.
- [7] J. A. Andersen and S. Berntsen, "Comments on 'the Foster reactance theorem for antennas and radiation Q,'" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-55, March 2007, pp. 1013-1014.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
二層誘電体中央に金属パターンを構成した広帯域周波数選択板の試作評価	革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA)	2019年10月
Design of Metasurface Loaded in Multilayer Dielectric Plate to Reduce Reflection over Wide Incident Angle	IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition 2019 (iWEM 2019)	2019年9月
多層構造誘電体板における広い入射角での反射損失を低減するメタサーフェスの設計	電子情報通信学会 ソサイエティ大会	2019年9月
Measured Performance of Broadband Frequency Selective Surface to Reduce Return Loss of Dielectric Plate Designed by Matrix Analysis of Equivalent Circuit	Proceedings of 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2018)	2018年11月
Design of Frequency Selective Surface Loaded to Multilayer Dielectric Plate for Loss Reduction over Wide Incident Angle	2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2018)	2018年10月
等価回路の行列解析によって反射損失を低減するように設計された広帯域周波数選択板の測定	電子情報通信学会 ソサイエティ大会	2018年9月
メタサーフェスによる透過係数制御による誘電体板反射低減設計	電子情報通信学会 ソサイエティ大会	2018年9月
Measured Performance of Broadband Frequency Selective Surface to Reduce Return Loss	2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition	2018年8月
Design of Frequency Selective Surface Loaded to Multilayer Dielectric Plate for Loss Reduction over Wide Incident Angle	2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition	2018年8月
Return Loss Reduction of Dielectric Plate Using Frequency Selective Surface in Millimeter-wave Band	2018 Thailand-Japan Microwave (TJMW2018)	2018年6月
Design of frequency selective surface by matrix transformation of layer structure to reduce return loss of thick dielectric plate	2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (学生論文賞受賞)	2017年12月
Broadband design using matrix analysis of frequency selective surface inserted at the center of dielectric plate in millimeter-wave band	2017 International Symposium on Antennas and Propagation	2017年11月
樹脂板の厚さ中央に装荷されたミリ波広帯域周波数選択板の行列計算による設計	電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会	2017年7月
Reflection-loss reduction of dielectric plate by reflection-phase control of Frequency Selective Surface	2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition	2017年5月