

正方環型 FSS を用いた周波数選択的電磁波遮へいに関する 3次元数値解析

○河野 誠太* , 工藤 孝人**

*大分大学大学院工学系研究科 工学専攻

**大分大学理工学部 創生工学科 電気電子コース

1. 研究背景

1.1 医療機関における電磁波遮へいの重要性

医療機関における電磁波環境は近年、急速に多様化・複雑化している。スマートフォンの急激な普及や無線 LAN 環境の広域化などに伴い、電磁波干渉が問題となる場合がある[1]。また、無線 LAN などの通信設備は既に病院情報システムの一部であり、可動型検査機器と無線 LAN を組み合わせたデータ伝送システムも急速に普及している。

一方、今もなお医療機器の電磁波耐性は完璧とは言い難い状況であり、医療機器と無線通信電波との電磁干渉による診療への影響を可能な限り抑制することが重要である。また、不正アクセスや情報漏えいなどの問題は今後解決すべき重要な課題である[2], [3]。よって、必要な無線通信は確保しつつ、不要な電磁波のみを遮へいする工夫が必要である。

本研究では、3次元数値解析により、帯域的な電磁波遮へい効果向上と遮へい帯域の拡大を目的とし、電磁波遮へい技術に関する研究を行っている。本稿で扱う特殊な形の金属を周期的に配列した構造は Frequency Selective Surfaces と呼ばれ、日本語では周波数選択板と訳される。この構造体を以後は FSS と呼ぶ。

1.2 FSS と選択的電磁波遮へい

上述した問題は、対象となる機器や空間全体を金属で覆えばある程度解決できるが、それでは医療機関内で必要とされる無線通信まで遮断してしまう。よって、周波数選択的な電磁波遮へいが必要であるといえる。

FSS は主にメタマテリアルの分野において、電波障害の防止や光学フィルタなどへの応用が期待されている[4]。金属部分の形や間隔の異なる周期構造を組み合わせれば、遮へい帯域の拡大や帯域の複数化も可能である。

2. 本研究の目的

本研究では、医療現場において今後更に利用度が高まると予想されるマイクロ波帯の電磁波を対象に、FSS を用いた選択的電磁波遮へい構造の開発を志向している。医療機関内の情報セキュリティ強化や電磁環境に起因する医療機器への悪影響防止など、安全・安心な医療電磁環境の構築に寄与したいと考えている。

本稿では、FSS の選択的に電磁波を遮へいできる性質に着目し、3次元数値解析により、周波数選択的な電磁波遮へいフィルタとしての効果について考察する。なお、遮へい帯域は一例として、多くの無線 LAN 規格が使用する 2.4GHz 帯とする。

本研究で用いる 3次元数値解析は時間領域差分法を利用している[5]-[8]。この解析手法は英語では Finite-Difference Time-Domain method といい、一般に FDTD 法と略される。FDTD 法は、マクスウェル方程式を時間領域において差分近似計算する方法である。FDTD 法は有限要素法と同様に基本的には閉領域の解析手法であるため、開放領域の問題を扱う場合には解析領域の外壁に反射が起こらないような仮想的な境界を設ける必要がある。本稿では Perfectly Matched Layer (PML) と呼ばれる吸収境界を用いる[9]。以後、PML と呼称する。

3. 問題設定

本研究では、正方環型 FSS 周期構造による電磁波の遮へい特性を数値的に考察する. 図 1(a) 及び(b)にそれぞれ, 解析領域の全体図及びアンテナギャップを含む x - y 断面を示す [10], [11]. 同図中の $(i_{sor}, j_{sor}, k_{sor})$ は波源 (アンテナギャップ), $(i_{max}, j_{max}, k_{max})$ は原点 O からの最遠点, j_{FSS} は基準とする正方環型 FSS のセル番号を示す. ここで, i, j, k はそれぞれ, x, y, z 方向のセル番号を表す. 観測点は対称性を考慮して 35 点配置する. また, 吸収境界として, 16 層・2 次分布の PML を用いている.

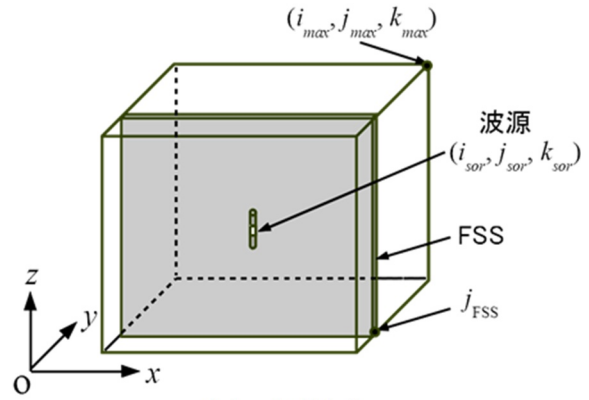
本稿で設定している入射アンテナは半波長ダイポールアンテナである. デルタギャップ給電により連続正弦波を励振させている. アンテナ長を変化させることで, 出力する電磁波の周波数を変化させ, 解析領域全体の電磁界を計算する.

電磁波の電界透過率は式 (1) を用いて計算する.

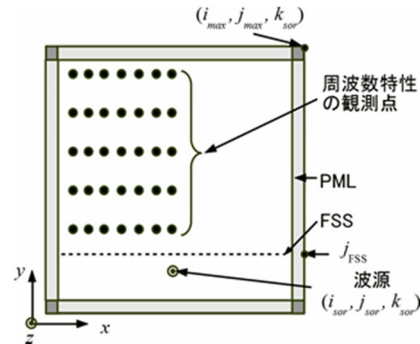
$$R_{EFC} = 20 \log_{10} \left| \frac{E_z^1}{E_z^0} \right| \quad (1)$$

ここで, E_z^1 は FSS を配置した際の電界, E_z^0 は FSS を配置していない場合の電界であり, R_{EFC} の相対的な値により電磁波遮へい効果を考察する [10], [11]. 例えば, 電界透過率 $R_{EFC} = -20\text{dB}$ は電界振幅比で約 10%, 電力比に換算すると 1% である.

図 2(a) 及び(b)にそれぞれ, 単位正方環型 FSS 及び正方環型 FSS の全体図を示す. 図 2(a) 中の p は単位正方環型 FSS の一辺の長さ, d は導体の一辺の外径, w は導体の幅, g は単位正方環型 FSS の一辺と導体の一辺の外径の差を表す. 単位正方環型 FSS の導体部は背面ガラスに貼り付けられている. 図 2(a) を同図 (b) のように配置することにより, 周期構造を構成する. 単位正方環型 FSS の導体部は導電率の高いアルミを想定して設定している. 表 1 に本研究における諸元設定を記載する.

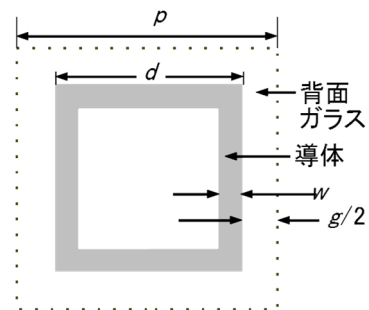


(a) 全体図

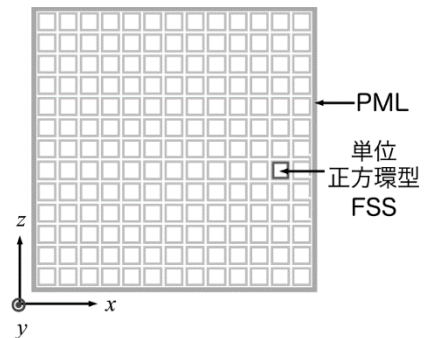


(b) アンテナギャップにおける断面

図 1 解析領域全体図 [10], [11]



(a) 単位正方環型 FSS



(b) 正方環型 FSS 全体図

図 2 FSS 構成図 [10], [11]

表 1 諸元設定

$(i_{max}, j_{max}, k_{max})$	(684, 684, 684)
$(i_{sor}, j_{sor}, k_{sor})$	(342, 42, 342)
$(i_{obs}, j_{obs}, k_{obs})$	35 点
波源周波数	1~4GHz
ステップ回数	7000 回
PML 層数	16 層
ガラスの ϵ_r	6
導体の σ	3.7×10^7 S/m
j_{FSS}	92~93
p	10mm~50mm
d	8mm~40mm
w	1mm~5mm
$g/2$	1mm~5mm
Δt	1.5ps
Δu	1.0mm
j_{FSS}	92~93

4. 数値解析結果と考察

本報告では、正方環 FSS による電磁波遮へい効果について述べる。単位正方環型 FSS の p の値を 10mm~50mm まで 10mm 間隔で変化させた場合の電磁波の遮へい効果を考察する。図 3 に p の変化に対する周波数特性を示す。また、図 4 に $p = 40$ mm であった時のアンテナギャップを含む x - y 平面とアンテナの素子を含む y - z 平面において FSS を配置した場合と配置していない場合の電界の振幅分布を示す。

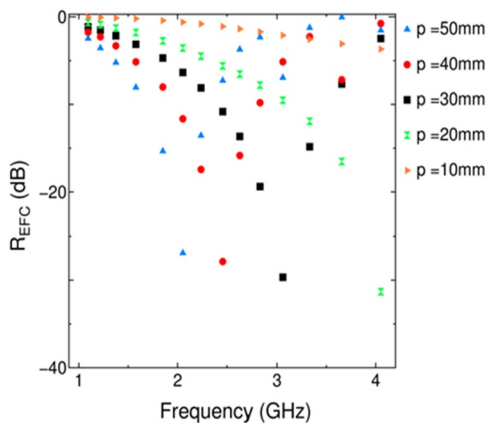
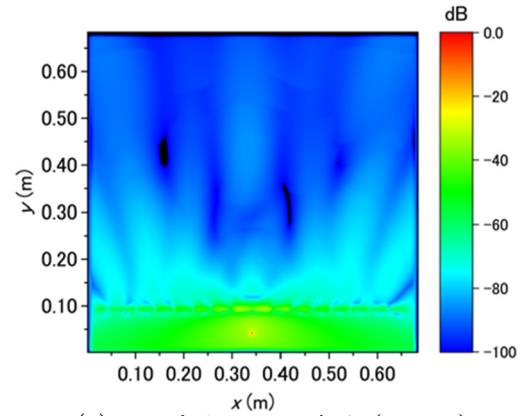
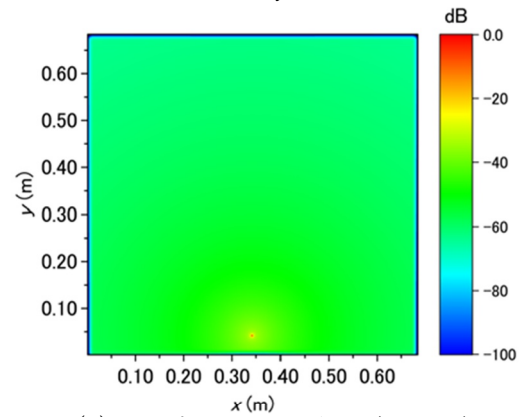


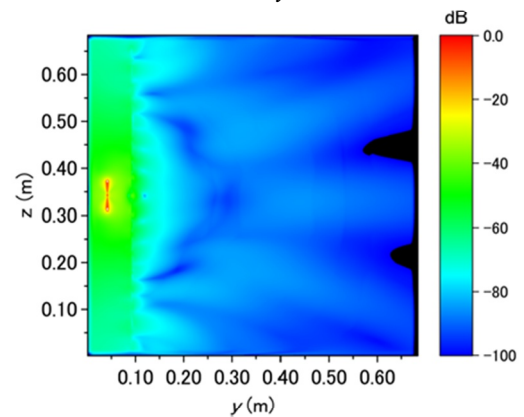
図 3 パラメータ p の変化に対する周波数特性



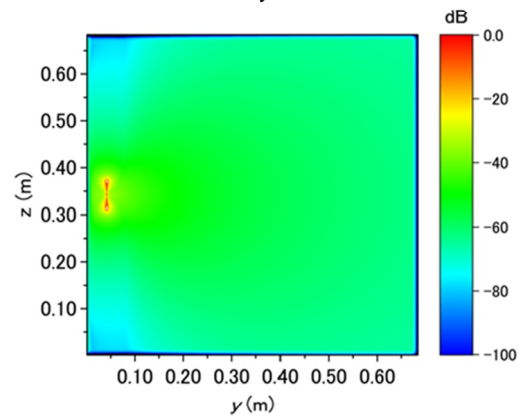
(a) FSS あり, x - y 平面 ($k = k_{sor}$)



(b) FSS なし, x - y 平面 ($k = k_{sor}$)



(c) FSS あり, y - z 平面 ($i = i_{sor}$)



(d) FSS なし, y - z 平面 ($i = i_{sor}$)

図 4 電界の振幅分布 ($p = 40$ mm, 2.63GHz)

図 3 から明らかなように単位正方環型 FSS の p の値を 10mm~50mm まで 10mm 間隔で大きくすると、遮へいされる電磁波の周波数帯域は低周波側にシフトするとともに遮へい効果が少し小さくなる。 $p=40\text{mm}$ の場合、目標としていた 2.4GHz 帯において遮へい効果が確認できる。

同図より FSS を配置した場合と FSS を配置していない場合を比べて電磁波が大きく遮へいされていることがわかる。これに加えて、同図中の(a), (b)のそれぞれにおいてアンテナから放射された電磁波の入射角の違いにより、電磁波の遮へい効果が多少異なることも確認できる。このことから正方環型 FSS は入射角度の影響をうけることがわかる。上述したように FSS を配置した際に電磁波が遮へいされる原因は、放射される電磁波と導体部での電磁波の反射による相加や相殺の結果、電磁波の干渉が生じるためだと考えられる。このことから、目的に応じて単位正方環型 FSS の p の値を変化させ、入射角度を調節すれば、効率よく不必要な電磁波を遮へいできるといえる。

5. まとめ

無線 LAN 電波の周波数帯を例に、正方環型 FSS 周期構造を用いた選択的電磁波遮へいについて数値的に考察した。単位正方環型 FSS の p の値を変化させることにより、電磁波を遮へいできる周波数帯を効果的にシフトできることを示した。今後は複数層の FSS を利用し、複数帯域の電磁波遮へいを図りたい。また、正方環型 FSS は入射角の影響をうけるため、様々な角度から入射する電磁波に対応させるとともに、平面波入射での解析も視野に入れて検討していきたい。

参考文献

- [1] 石田開, 新山大地, 藤原康作, 塚尾浩, 廣瀬稔, “医療機関における無線 LAN の使用状況の調査,”平成 28 年度第 2 回医療電磁環境研究会, pp. 13-14, Aug. 2016.
- [2] 電波環境協議会編, 医療機関における携帯電話等の使用に関する報告書, 2014.
- [3] E. Hanada, T. Kudou, and S. Tsumoto, “Installation of secure, always available wireless LAN systems as a component of the hospital communication infrastructure,” J. Med. Syst. vol.37, article 9939, pp.1-8, 2013.
- [4] 堀越智, 萩行正憲, 田中拓男, 高野恵介, 上田哲也, メタマテリアル-常識を超えた次世代材料-, 日刊工業新聞社, 2013.
- [5] K. S. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media,” IEEE Trans. Antennas & Propag., vol.14, no.3, pp.302-307, 1966.
- [6] 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.
- [7] 宇野亨, 何一偉, 有馬卓司, 数値電磁界解析のための FDTD 法 -基礎と実践-, pp. 1-55, コロナ社, 2016.
- [8] 新井宏之, 新アンテナ工学, 総合電子出版社, 1996.
- [9] J.-P. Berenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” J. Comp. Phys., vol.114, pp.185-200, 1994.
- [10] S. Kono and T. Kudou, “3D-FDTD analysis of electromagnetic shielding by using single square-loop frequency selective surface,” P00095, 8th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, Incheon, Korea, Aug.2019.
- [11] 河野誠太, 工藤孝人, “正方環型 FSS を用いた電磁波遮へいに関する 3次元 FDTD 解析,”電子情報通信学会九州支部学生会講演会, C-02, 2019.