

誘電体周期構造による帯域的電磁波遮へいに関する数値解析

○工藤 孝人, *花田 英輔

大分大学工学部 電気電子工学科

*佐賀大学大学院工学系研究科 知能情報システム学専攻

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環境は近年、急速に多様化・複雑化している。電波環境協議会が病院内での携帯電話使用に関する新指針（平成 26 年 8 月）を発表したことに伴い、携帯電話の使用を認める医療機関の増加は必至である[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。即ち、無線通信に対する医療現場の考え方は、「規制」から「両立」へシフトしている。

しかしながら、今もって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、無線傍受による医療情報漏えいを防止することも重要な課題の 1 つである[2]。

1.2 周期構造と帯域的電磁波遮へい

上述した問題は対象となる機器や空間を金属で覆えば、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、帯域的・周波数選択的な電磁波遮へいが必要となる。

誘電体のスラブ、円柱、球などを周期的に配列した構造体は一般に、フォトニック結晶構造と呼ばれる[3]。この構造体は主に光エレクトロニクス分野において、光導波・分岐回路や波長フィルタなどへの応用が期待されている[4]。構造体の大きさは数十 μm から数 mm 程度である。この構造体には電磁波が透過しない周波数帯域（フォトニック・バンドギャッ

プ）が存在し、帯域遮へいフィルタとして機能する。

フォトニック結晶構造は、そのスケールリングを変えることでマイクロ波帯の電磁波にも適用できる。構造体の大きさは数 cm から数十 cm 程度になると見込まれる。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、誘電体フォトニック結晶構造を用いた帯域的電磁波遮へい材の開発を志向している。電磁環境に起因する医療機器への悪影響防止、医療情報のセキュリティ強化、採光性や通風性の確保による患者アメニティの向上など、在宅を含む安全安心な医療電磁環境の構築が目的である。

本稿では、誘電体層状周期構造（1次元フォトニック結晶）及び誘電体円柱を用いた正方格子周期構造（2次元フォトニック結晶）に着目し、FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法[5]-[7]に基づく2次元数値解析により、電磁波の帯域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 帯及び 5GHz 帯とする。

3. 問題設定

図 1 に解析領域の設定図を示す。図中の (i_{max}, j_{max}) は原点 O からの最遠点、 (i_{sor}, j_{sor}) は波源、 (i_{obs}, j_{obs}) は周波数特性のデータを取得する際の観測点、 j_p は周期構造領域の最上部の各セル番号を示す。また、吸収境界として 8 層・2 次分

布の PML (Perfectly Matched Layer) を用いる [8].

以上の設定のもとに波源から TM 円筒波を放射し, 解析領域全体の電磁界を計算する. 周期構造を配置した場合と配置しない場合の電界振幅の比を電界透過率とする. 本稿では電界透過率 -30dB を基準に, 周期構造の遮へい性能を考察する. なお, 電界透過率 -30dB は実際の電界振幅比で約 3.16% , 電力比に換算すると 0.1% である.

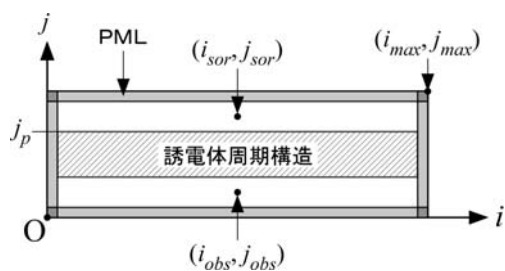


図 1 解析領域の設定

4. 数値解析結果

4.1 誘電体層状周期構造による帯域的電磁波遮へい

図 2 に誘電体層状周期構造の概略図を示す. 本稿では, 異なる誘電体層 (比誘電率が ϵ_α と ϵ_β の 2 媒質) を交互に配置する構造を考え, その周期を変えた 2 種類の構造を組み合わせる. 周期が短い方及び長い方の各層の厚さをそれぞれ, L_1 及び L_2 とする. また, 周期が短い方及び長い方の誘電体層のペア数をそれぞれ, n_{p1} 及び n_{p2} とする. なお, 本稿では $n_{p1}=n_{p2}$ の場合のみについて解析する.

表 1 に FDTD 法に基づく数値解析における諸元設定を示す. 表中の Δu はセルサイズ, Δt はタイムステップ, f は波源周波数である.

図 3 に電界透過率の周波数特性を示す. 2 種類の周期構造を組み合わせることにより, 無線 LAN の両周波数帯近傍 (図中の網掛け部分) にバンドギャップが現れることがわかる. ただし, ペア数 $n_{p1}(=n_{p2})$ が 4 または 6 の場合は十分な遮

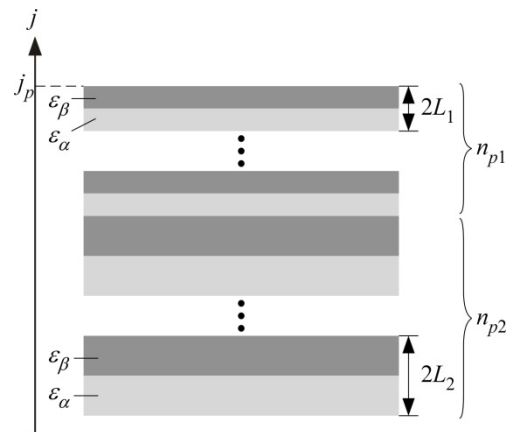


図 2 誘電体層状周期構造

表 1 諸元設定 (層状構造)

項目	仕様	項目	仕様
(i_{max}, j_{max})	(1500, 500)	ϵ_α	2.1025
(i_{sor}, j_{sor})	(750, 460)	ϵ_β	9
(i_{obs}, j_{obs})	(750, 40)	L_1	6mm
j_p	410	L_2	13.5mm
Δu	1.5mm	$n_{p1} (= n_{p2})$	4, 6, 8
Δt	3ps	f	1~6.5GHz

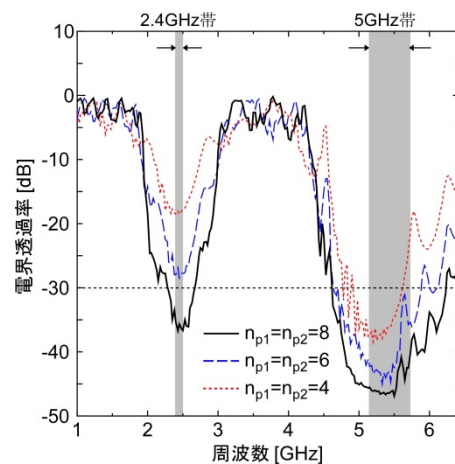
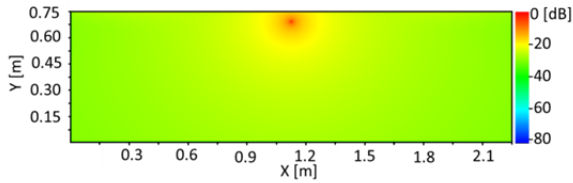


図 3 電界透過率の周波数特性 (層状構造)

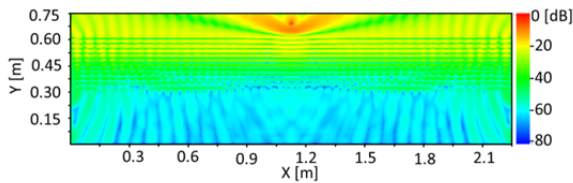
へい効果が見られず, $n_{p1}(=n_{p2}) = 8$ の場合のみ, 両周波数帯で電界透過率を -30dB 以下に抑制できている.

図 4 に波源周波数が 2.45GHz のときの電界振幅分布 (空間特性) を示す. 同図 (a) は周期構造が無い場合, 同図 (b) は $n_{p1}(=n_{p2}) = 8$ の周期構造を設置した場合である. 同図 (a) に比べ, 同図 (b) には電磁波の干渉による電界振幅の変動が見えるが, 周期構造の透過側ではほぼすべて

の領域で、電界振幅の差が 30dB 以上あることが確認できる。なお、5GHz 帯においても、ほぼ同様の傾向にあることを確認している。



(a) 周期構造無し



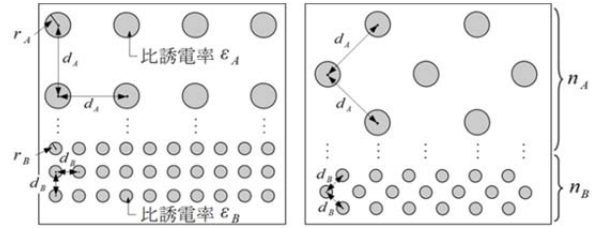
(b) 周期構造有り ($n_{p1} (=n_{p2})=8$)

図 4 電界振幅分布 (層状構造, 2.45GHz)

4.2 誘電体円柱の正方格子周期構造による帯域的電磁波遮へい

図 5 に誘電体円柱を用いた正方格子周期構造の概略図を示す。また、表 2 に FDTD 法に基づく数値解析における諸元設定を示す。本稿では、円柱の半径と中心間隔が異なる 2 種類の周期構造を組み合わせ、かつ図 5 (a), (b) に示すように、2 通りの配置について解析する。半径を r_A, r_B 、中心間隔を d_A, d_B とする。円柱の比誘電率は等しいとする ($\epsilon_A = \epsilon_B$)。また、各周期構造の層数を n_A, n_B とし、 $n_A = n_B$ の場合についてのみ、数値結果を示す。

図 6 (a) 及び同図 (b) にそれぞれ、配置 1 及び配置 2 に対する電界透過率の周波数特性を示す。この場合も無線 LAN の両周波数帯近傍にバンドギャップが現れるが、 $n_A (=n_B) = 2$ または 4 の場合は、十分な遮へい効果が見られず、 $n_A (=n_B) = 6$ の場合のみ、両周波数帯で電界透過率を -30dB 以下に抑制できている。なお、 $n_A (=n_B) = 8$ または 10 の場合、 $n_A (=n_B) = 6$ の場合と比べ、遮へい帯域はほぼ同じで、同帯域の電界透過率がさらに減少することを確認している。



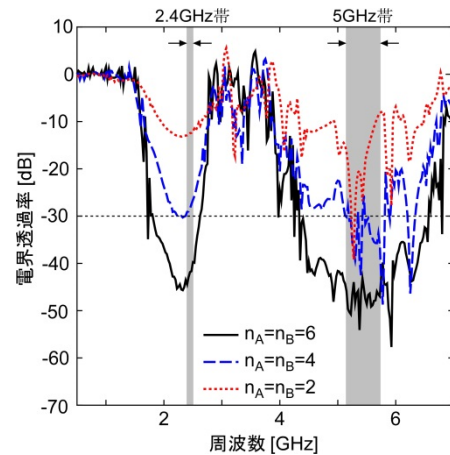
(a) 配置 1

(b) 配置 2

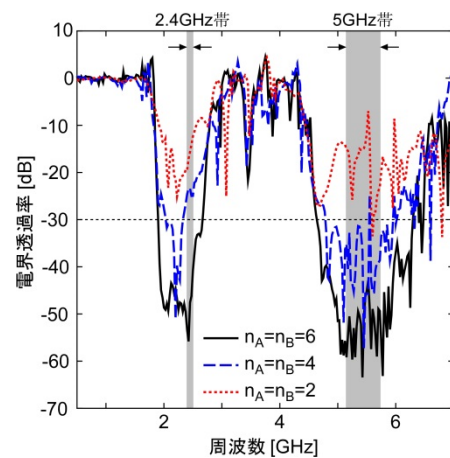
図 5 誘電体円柱の正方格子周期構造

表 2 諸元設定 (正方格子構造)

項目	仕様	項目	仕様
(i_{max}, j_{max})	(3000, 1000)	r_A	8.75mm
(i_{sor}, j_{sor})	(1500, 840)	r_B	3.75mm
(i_{obs}, j_{obs})	(1500, 120)	d_A	50mm
j_p	640	d_B	17.5mm
$\epsilon_A (= \epsilon_B)$	11.56	$n_A (= n_B)$	2, 4, 6
Δu	1.25mm	f	0.5~7GHz
Δt	2.5ps		



(a) 配置 1



(b) 配置 2

図 6 電界透過率の周波数特性 (正方格子構造)

図 7 に波源周波数が 2.4GHz のときの電界振幅分布（空間特性）を示す。同図 (a) は周期構造無し，同図 (b) は配置 1，同図 (c) は配置 2 の場合である。同図 (b)，(c) についてはいずれも， $n_A(=n_B)=6$ としている。層状周期構造の場合と同様に，周期構造の透過側ではほぼすべての領域で，周期構造が無い場合に比べ，電界振幅の差が 30dB 以上あることが確認できる。なお，5GHz 帯でもほぼ同様の傾向にあることを確認している。

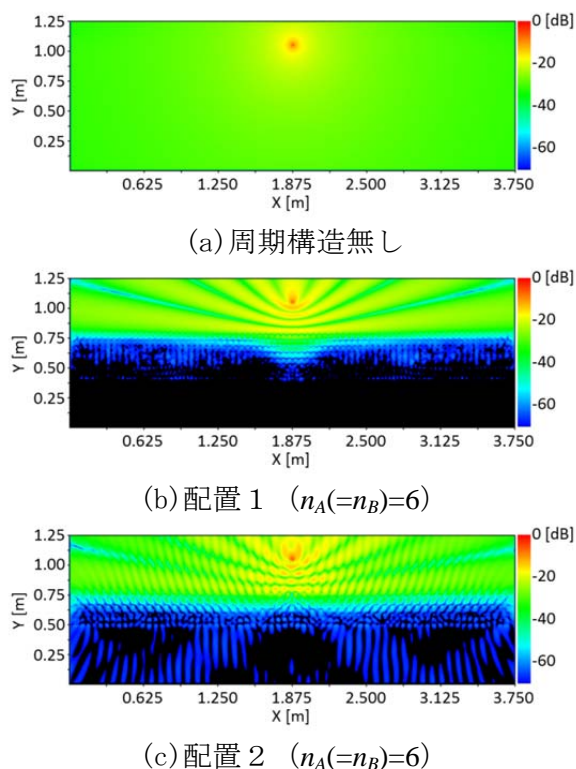


図 7 電界振幅分布（正方格子構造，2.4GHz）

5. まとめ

無線 LAN 電波の周波数帯を例に，誘電体周期構造を用いた帯域的電磁波遮へいについて数値的に考察した。誘電体層状周期構造，誘電体円柱を用いた正方格子周期構造のいずれも，2つの異なる周期構造を組み合わせることにより，2つの周波数帯を効果的に遮へいできることを示した。今後は他の周期構造も含め，周期構造のパラメータ設定について詳細に検討し，バンドギャップの狭帯域化を図

りたい。また，3次元解析や実証実験などにも取り組んでいく予定である。

謝辞

本稿の内容に関する計算プログラムの作成及び取得データの整理には，大分大学大学院工学研究科電気電子工学専攻の井上昂大君（M2）ならびに水内貴大君（M1）の協力を得た。また，本研究は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(B)：15H04794，基盤研究(C)：15K06024）の助成によることを付記し，謝意を表す。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 吉野勝美，竹田寛之，フォトニック結晶の基礎と応用，コロナ社，2001.
- [4] 横田光広，永田玲矢，"二次元共振器付きフォトニック結晶導波路における周波数分離特性に関する数値的検討，" *信学論 C*, vol. J95-C, no. 10, pp. 231-234, 2012.
- [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] 新井宏之，新アンテナ工学，総合電子出版社，1996.
- [8] J.-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Comp. Phys.*, vol.114, pp.185-200, 1994.