

フラクタル媒質における電磁波共振特性の二次元解析

園田 潤 海野 啓明

仙台電波工業高等専門学校 〒989-3128 仙台市青葉区愛子中央 4-16-1

E-mail: sonoda@cc.sendai-ct.ac.jp

Analysis of Resonance Characteristics of Electromagnetic Wave in Two-dimensional Fractal Media

Jun SONODA and Keimei KAINO

Sendai National College of Technology, Ayashi-chuo 4-16-1, Aoba-ku, Sendai 989-3128

Abstract Recently antennas and propagation of self-similar structures have been investigated. Their properties of propagation and scattering of electromagnetic waves in fractal media show various interesting properties. Propagation of electromagnetic wave in the one-dimensional pre-Cantor multilayers have been discussed by several researchers. In this paper, we will investigate wave propagation in the two-dimensional pre-Cantor multilayer using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method, and show the characteristics of transmission coefficients and the electromagnetic wave resonance in the middle point of the Cantor media.

Keywords: Fractal media, cantor set, electromagnetic wave resonance, FDTD method

1 まえがき

近年、誘電体を周期的に配列することで電磁波や光の振る舞いを制御するEBG (Electromagnetic Band Gap) やPBG (Phonic Band Gap) に関する研究が盛んに行われている。EBG やPBG はその多くが周期構造を持つが、自己相似性を持つフラクタル構造においても電磁波が特異な振る舞いをすることが知られており、新しい電磁・光デバイスへの応用が期待されている。

これまで、フラクタルの一種であるカントール構造における電磁波の反射・透過特性の一次元解析が行われている。また、文献 [1] では、Menger Sponge と呼ばれる三次元カントール構造中に電磁波が閉じ込められたという実験の報告がある。我々はこれまで一次元カントール媒質における透過・反射の解析解と数値計算との比較を行い、計算結果の妥当性を確認するとともに、一次元カントール媒質中の電磁波の共振特性を明らかにしている [2]。さらに、一次元カントール媒質を $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 薄膜で作成し、透過特性を測定した結果、計算と実験の特性は概ね一致することも明らかにしている [3]。

本研究では、実現が容易な一次元フラクタル構造による新しい電磁・光デバイスを開発することを目的に、一次元カントール構造における電磁波伝搬散乱の二次元解析を行う。本報告では、TM モード電磁波の透過および共振特性について述べる。

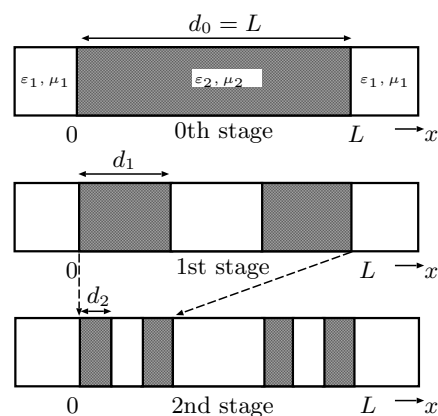


図1 一次元カントール媒質

2 一次元カントール媒質における電磁波共振特性の二次元解析

図1に示すように、カントール媒質は、長さ L で誘電率 ϵ_2 の誘電体を3分割し、中央部を異なる誘電率 ϵ_1 の誘電体で置き換えた構造である。3分割を n 回行ったものを第 n ステージと呼ぶ。第 n ステージは第 $n-1$ ステージの縮小写像である。

図1に示した一次元カントール媒質の二次元解析モデルを図2に示す。カントール媒質は長さ L で幅 W である。図2は第2ステージである。入射波は、TE ($\mathbf{E} = E_z \mathbf{k}, \mathbf{H} = H_x \mathbf{i} + H_y \mathbf{j}$) / TM ($\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j}, \mathbf{H} = H_z \mathbf{k}$) モードの平面波であり、入射角 θ_i でカントール媒質に入射する。

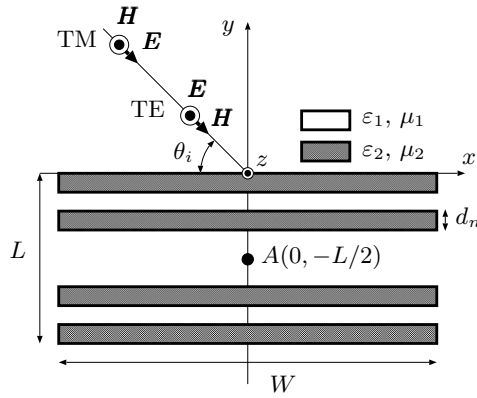


図2 一次元コントロール媒質の二次元解析モデル

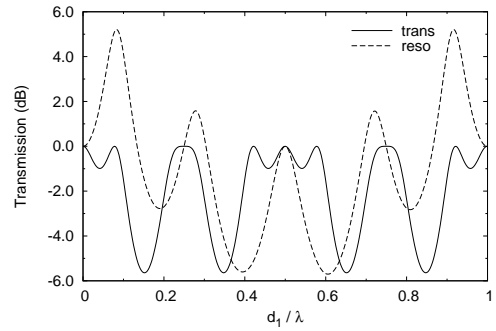
3 TMモード電磁波の透過・共振特性

図2に示した二次元解析モデルにおける電磁波の透過・共振特性をFDTD法で解析する。FDTD法はMaxwellの方程式を時間領域で計算する方法である。本報告では、TE/TMモードにおけるMaxwellの方程式をFDTD法で計算し、透過および共振の周波数特性を解析する。図2の解析モデルにおいて、媒質1, 2とも非磁性かつ無損失媒質とし、媒質1, 2の比誘電率をそれぞれ $\epsilon_{r1} = 1.0$, $\epsilon_{r2} = 4.0$ とする。

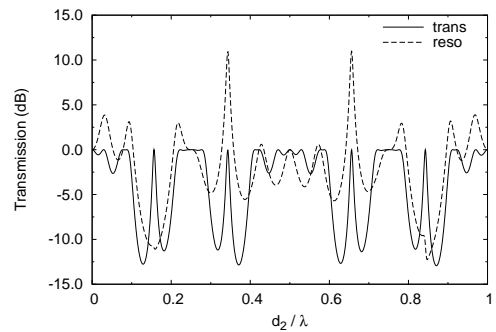
図3に図2において $\theta_i = 90^\circ$, $W = \infty$ の第1, 2ステージにおけるTMモードの透過係数と、共振特性として中央部Aにおける伝達係数を示す。透過係数は $y > -L$, 伝達係数は $y = -L/2$ の位置における磁界 H_z と入射磁界との比である。図3より、TMモード電磁波の透過は、ステージ数を高くするごとに最小透過係数は減少し、透過係数が1の伝送帯が増加することが分かる。また、共振特性は、ステージ数を高くするごとに最大振幅がおおよそ2倍になることが分かる。さらに、第1ステージと第2ステージを比較すること、第2ステージで新しく生じた伝送帯、例えば、 $d_2/\lambda = 0.35, 0.65$ では共振が、 $d_2/\lambda = 0.15, 0.85$ では反共振が生じている。これは第2ステージと第3ステージでもいえる。

4 むすび

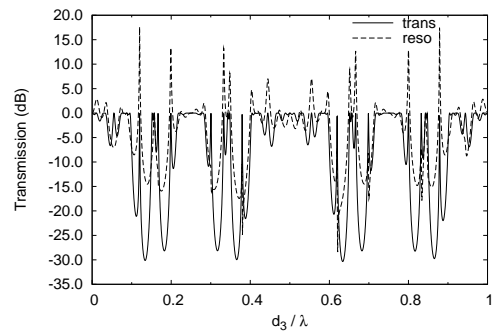
本報告では、TMモード電磁波の透過および共振特性の関係を明らかにした。TMモードにおいては、(1)ステージ数が高くなるごとに共振特性は急峻になり最大値も増加すること、(2)ステージを高くしたときに生じる新しい伝送帯で共振・反共振が生じることを示した。今後、TEモードでの解析や入射角依存性などを明らかにし、一次元コントロール構造を応用した電磁遮蔽板などへの応用を検討する。



(a) 第1ステージ



(b) 第2ステージ



(c) 第3ステージ

図3 TMモード電磁波の透過・共振特性 ($\theta_i = 90^\circ$, $W = \infty$)

謝辞

本研究は、財団法人東電記念科学技術研究所・研究助成(電気・エネルギー一般研究)の支援による。

参考文献

- [1] M. W. Takeda et.al., "Localization of Electromagnetic Waves in Three-Dimensional Fractal Cavities," Phys. Rev. Lett., vol.92, no.9, March 2004.
- [2] 園田, 海野, 佐藤, "一次元フラクタル媒質における電磁波の透過および共振特性の解析," 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J91-B, No.11, Nov. 2008 (印刷中).
- [3] 石川, 園田, 海野, 若原, "フラクタル状多層薄膜の作製と電磁波の伝搬特性," 形の科学会誌, Vol.23, No.1, pp43-44, 2008.