

研究速報

ドーム突起コンクリート壁における誘電率変化時の電磁波しゃへい・吸収特性の検討

佐藤 浩[†](正員) 高橋 応明^{††a)}(正員)

安部 實^{†††}(正員)

Consideration on Electromagnetic Waves Shelter and Absorption by Permittivity in Dome Shape Concrete Wall

Hiroshi SATO[†], Masaharu TAKAHASHI^{††a)},
and Minoru ABE^{†††}, Regular Members

[†]三菱電機(株)鎌倉製作所, 鎌倉市

Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corporation,
Kamakura-shi, 247-8520 Japan

^{††}東京農工大学 工学部 電気電子工学科, 小金井市

Faculty of Engineering, Dept. of Electric & Electronics Engineering,
Tokyo University of Agriculture & Technology,
Koganei-shi, 184-8588 Japan

^{†††}武蔵工業大学 電子通信工学科, 東京都

Department of Electronic and Communication Engineering,
Musashi Institute of Technology, Setagaya-ku, Tokyo,
158-8557 Japan

a) E-mail: masa@ieee.org

あらまし ドーム突起コンクリート壁のコンクリート含水率変化による誘電率変動に伴う電磁波のしゃへい・吸収特性について FD-TD 法で検討した結果, 2.5 GHz で損失電力変化は $-1 \sim +2\%$ であり, PHS・無線 LAN・MMAC をカバーする広帯域で反射・透過抑制効果が維持されることを確認した。

キーワード 電波吸収体, コンクリート壁, 誘電率, 無線 LAN, FD-TD 法

1. まえがき

通常のコンクリート壁(以下, 平面壁と呼ぶ)にドーム状のコンクリート突起を配列したドーム突起壁を提案・解析し, 電磁波のしゃへい・吸収効果が得られることを報告した [1]。この壁はコンクリート自体を吸収体材料として使用するため, コンクリートの含水率変化による誘電率の変動に伴い電磁波のしゃへい・吸収効果に影響を及ぼす懸念がある [2], [3]。コンクリートの誘電率変化時の電波反射・吸収特性の検討例として文献 [4], [5] があげられるが, 解析周波数が現在の主流な通信周波数より外れており, いずれも平面構造のコンクリートに対する解析である。今回, ドーム突起壁のコンクリート誘電率変化時の電波吸収特性について FD-TD 法を用いて検討を行った。その結果, ドーム突起壁は, 通常のコンクリート誘電率変化範囲内であれば, 電波吸収効果が維持されることを確認した。

2. では解析方法について, 3. は解析結果について, 4. は実験結果について, 5. でまとめを述べる。

2. 解析方法

2.1 ドーム突起壁

ドーム突起壁を図 1 に示す。周波数 2.5 GHz, 十分乾燥した状態のコンクリートを想定した比誘電率 $\epsilon_r = 6.0 - j0.2$ ($\sigma = 0.0278 \text{ S/m}$) [6] において, 建築物の仕切り壁を想定し, 厚さ $c = 20 \text{ cm}$ の平面壁に対しパラメータを最適化した突起を電波入射側のみに装荷する。突起寸法は, 高さ $h = 6.2 \text{ cm}$ ($0.52\lambda_0$) 半径 $r = 4.6 \text{ cm}$ ($0.38\lambda_0$) である [1]。波源は無線 LAN を想定し, 電界・磁界が突起配列に直交する直線偏波の平面波を壁面に垂直入射させる。解析周波数は 2.5 GHz ($\lambda_0 = 12 \text{ cm}$) を中心に $1 \sim 5.5 \text{ GHz}$ とする。

2.2 FD-TD 解析モデル [1]

FD-TD 解析モデルは壁の周期構造を用い, 電気壁, 磁気壁を挿入することで, 壁半周期分での解析を行った。解析領域の前方後方に 5 次 PML 吸収境界 [7] を用い, 無限自由空間としている。セルは $1 \times 1 \times 1 \sim 5 \text{ mm}$ の直方体セルを, 合計約 640,000 個用い, 壁を階段近似した。時間ステップは Courant の条件 [8] より 0.67 ps とした。

壁の評価方法は, 平面波入射時の壁からの反射電力, 壁を透過する透過電力, 壁内部での損失電力とする。解析値は反射電力・透過電力は dB 表示で, 損失電力は全入射電力を 1 とした正規化値で示す。

このシミュレーション系において, 平面壁に対して FDTD 法の解析結果が厳密解と一致すること, 及び解析全般において“反射電力 + 透過電力 + 損失電力 = 全入射電力”の関係があることを確認している。またドーム突起壁の実験により解析の有効性を確認し

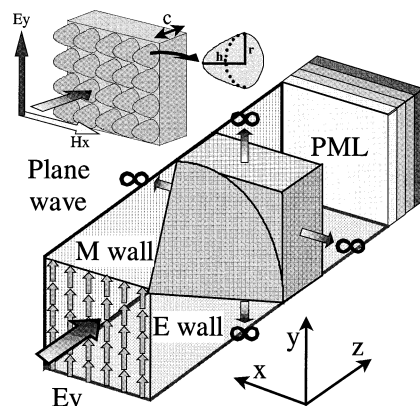


図 1 3次元 FDTD 解析モデル
Fig.1 3D FD-TD analysis model.

ている。

3. コンクリートの誘電率変化時の電波吸収特性

3.1 コンクリート含水率と誘電率

施工直後、コンクリートの含水率は最大であり、時間経過に伴い減少し、ある一定量で収束する [9]。その後も設置環境の影響により変動が起こる。含水率と誘電率の関係は、含水率の増減に伴い誘電率の実部及び虚部ともに増減する傾向がある [10], [11]。そこで、解析モデルに対し、2.5 GHz において十分乾燥したコンクリートの比誘電率 $\epsilon_r = 6.0 - j0.2$ [6] を定常状態とし、実部に 6.0~8.0、虚部に 0.2~0.8 の変化を与える。これらの値は、2.5 GHz でコンクリート含水率変

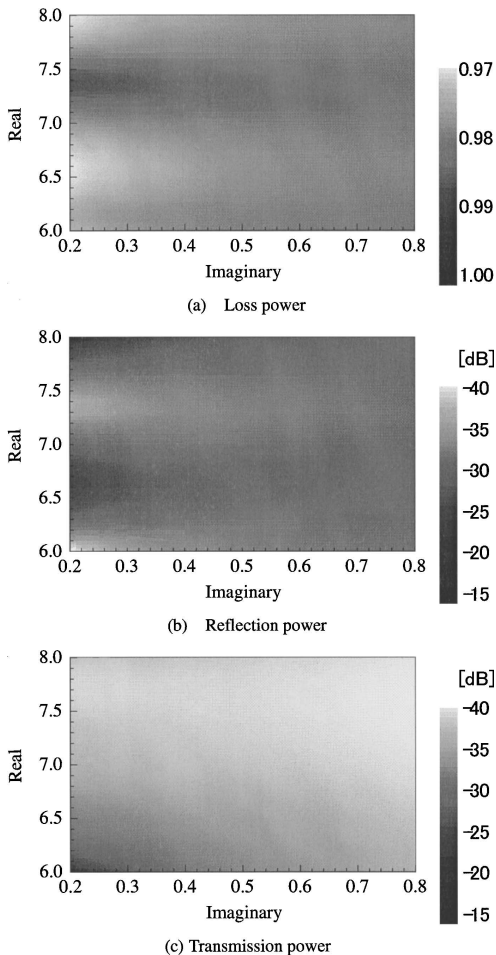


図 2 反射・透過・損失電力 (ドーム突起壁 $h = 6.2$ cm, $r = 4.6$ cm, $c = 20$ cm, 2.5 GHz)

Fig. 2 Relative power (dome shape wall $h = 6.2$ cm, $r = 4.6$ cm, $c = 20$ cm, 2.5 GHz).

化による誘電率の変化範囲である [6], [9]~[11]。

3.2 2.5 GHz における各電力の特性

2.5 GHz においてドーム突起壁の誘電率を変化させた場合の各電力を図 2 に示す。同図のデータに基づいて各電力の最大値・最小値とその比誘電率及び平均値を表 1 に示す。図 3 は平面壁 ($c = 20$ cm, 2.5 GHz) での損失電力、表 1 に対応する平面壁でのデータを表 2 に示す。表 3 は 2.5 GHz, 乾燥時の誘電率 $\epsilon_r = 6.0 - j0.2$ での損失電力 (ドーム突起壁 0.98, 平面壁 0.55) を基準として、与えた誘電率変化に対する損失電力の変動の割合を示す。平面壁は平均損失電力が低く、特性が安定しない。ドーム突起壁は誘電率の変化による各電力の最適値は存在するものの、損失電力の変動は

表 1 反射・透過・損失電力の最大値・最小値と誘電率 ($h = 6.2$ cm, $r = 4.6$ cm, $c = 20$ cm, 2.5 GHz)

Table 1 Relative power and ϵ_r ($h = 6.2$ cm, $r = 4.6$ cm, $c = 20$ cm, 2.5 GHz).

	Max	比誘電率	Min.	比誘電率	Ave.
Loss	1.00	7.4-j0.2	0.97	8.0-j0.2	0.99
Ref.	-15.4	8.0-j0.2	-40.7	6.0-j0.2	-21.4
Trans.	-17.1	6.0-j0.2	-15.4	7.6-j0.8	-29.2

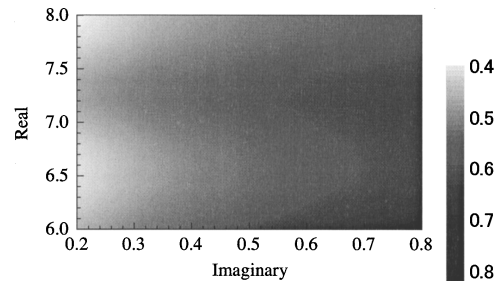


図 3 損失電力 (平面壁 $c = 20$ cm, 2.5 GHz)

Fig. 3 Loss power (plane wall $c = 20$ cm, 2.5 GHz).

表 2 反射・透過・損失電力の最大値・最小値と誘電率 (平面壁 $c = 20$ cm, 2.5 GHz)

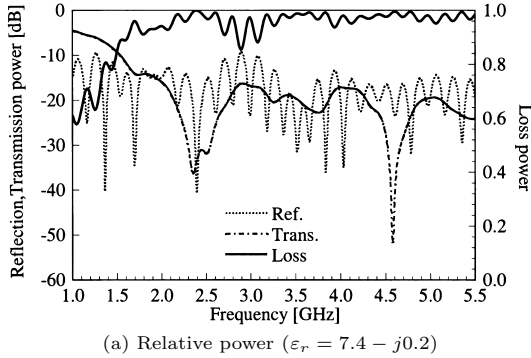
Table 2 Relative power and ϵ_r (plane wall $c = 20$ cm, 2.5 GHz).

	Max	比誘電率	Min.	比誘電率	Ave.
Loss	0.80	6.0-j0.8	0.37	8.0-j0.2	0.67
Ref.	-4.0	8.0-j0.2	-10.7	7.2-j0.2	-6.0
Trans.	-4.6	7.2-j0.2	-16.5	6.0-j0.8	-9.3

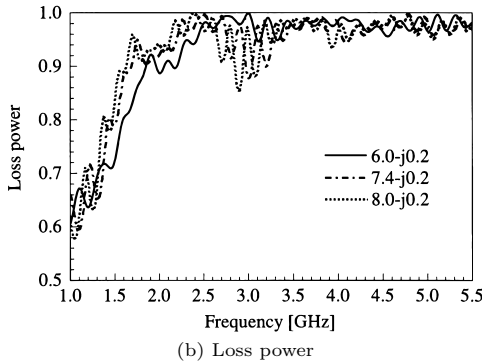
表 3 平面壁・ドーム突起壁での損失電力の変化率 ($c = 20$ cm, 2.5 GHz)

Table 3 Rate of loss power for plane wall and dome shape wall ($c = 20$ cm, 2.5 GHz)

	Plane wall	Dome wall
Rate [%]	-32.21 ~ +46.79	-1.02 ~ +1.86



(a) Relative power ($\epsilon_r = 7.4 - j0.2$)



(b) Loss power

図4 反射・透過・損失電力の周波数特性 ($h = 6.2$ cm, $r = 4.6$ cm, $c = 20$ cm)
 Fig. 4 Frequency characteristics ($h = 6.2$ cm, $r = 4.6$ cm, $c = 20$ cm).

-1.02 ~ +1.86% 以内であり、損失電力が高いだけではなく、コンクリートの誘電率変動に対し電波しゃへい・吸収特性が維持される結果となった。

3.3 各電力の周波数特性

図4はドーム突起壁で、表1より、(a)は最大損失電力が得られた比誘電率 $7.4 - j0.2$ での各電力を、(b)は誘電率 $6.0 - j0.2$, $7.4 - j0.2$, $8.0 - j0.2$ に対する損失電力の周波数特性を示す。誘電率変化に伴い、特性が周波数軸方向で移動していることが確認できる。 λ_d : 媒質内波長, ϵ'_r : 複素比誘電率の実部, λ_0 : 自由空間波長とするとき次式の関係がある。

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon'_r}} \quad (1)$$

式(1)より誘電率増加で壁内の媒質内波長が短縮するため ϵ'_r が増すと図4(b)の周波数特性が低周波側にシフトしていることがわかる。また図5は、平面壁について表2で最小損失電力(0.37)が得られた $\epsilon_r = 8.0 - j0.2$ での各電力の周波数特性を示す。表3

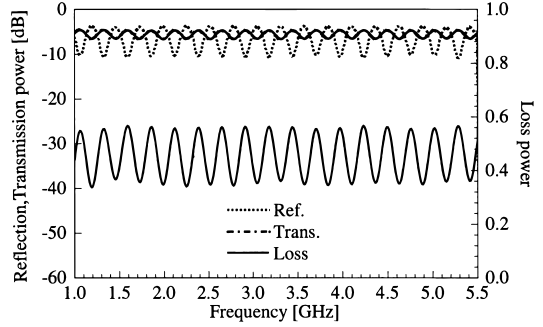


図5 反射・透過・損失電力の周波数特性(平面壁 $c = 20$ cm, $\epsilon_r = 8.0 - j0.2$)
 Fig. 5 Frequency characteristics (plane wall $c = 20$ cm, $\epsilon_r = 8.0 - j0.2$).

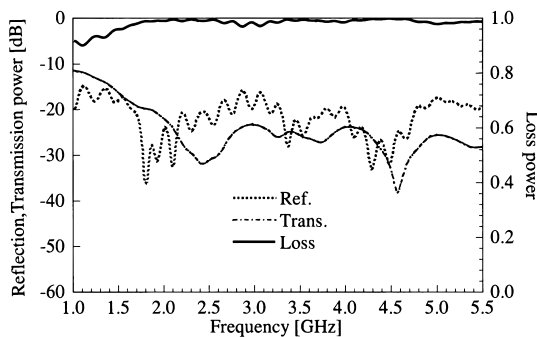
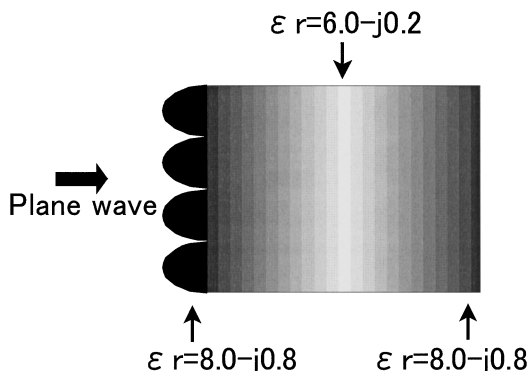
の平面壁で誘電率変化に対し、損失電力変動が激しく、安定性が得られない理由は、平面壁の特性として周波数に対する各電力の変動が激しく[1]、その各電力が周波数軸方向にシフトするためである。図5示す平面壁の場合、約300MHz周期で損失電力が0.3~0.6で変動しており、高い損失電力が得られる場合でも非常に狭帯域である。ドーム突起壁は図4(a)に示すように、広帯域で0.9以上の高い損失電力が得られており、誘電率変化に伴う低周波数側への損失電力特性のシフトがあっても高い損失電力が維持されており、MMACで用いられる5.2GHz付近の高周波帯域での損失電力の落込みも認められない。

図6(a)は雨などの気象条件により、壁内部で比誘電率が低く($\epsilon_r = 6.0 - j0.2$)、外側に行くに従い高く($\epsilon_r = 8.0 - j0.8$)なる場合を想定した、(b)に示す比誘電率分布での各電力の周波数特性である。損失電力は2.5GHzで0.99、また2.5GHz以下の低周波帯域での損失電力の改善が確認され、特に透過電力は比誘電率 $\epsilon_r = 6.0 - j0.2$ 一様分布に対して、抑圧量は-30dB程度に減少するものの、2.5GHzを中心とする所望周波数から外れることはない。

以上より、ドーム突起壁の設計には、コンクリート壁として十分乾燥した通常使用時の誘電率を対象に、使用中心周波数でパラメータを最適化しておけばよいことがわかる。これにより、コンクリートの含水率変化による誘電率変化にも十分対応して高い電磁波吸収特性を維持する壁が実現できる。

4. 実験結果[1]

FD-TD法による計算結果の有効性を確認するために、実際に縮小モデルを製作し、反射電力、透過電力

(a) Relative power ($\epsilon_r = 6.0 - j0.2 \sim 8.0 - j0.8$)

(b) Permittivity distribution on dome shape wall

図6 反射・透過・損失電力の周波数特性 ($h = 6.2$ cm, $r = 4.6$ cm, $c = 20$ cm, $\epsilon_r = 6.0 - j0.2 \sim 8.0 - j0.8$)

Fig. 6 Frequency characteristics ($h = 6.2$ cm, $r = 4.6$ cm, $c = 20$ cm, $\epsilon_r = 6.0 - j0.2 \sim 8.0 - j0.8$).

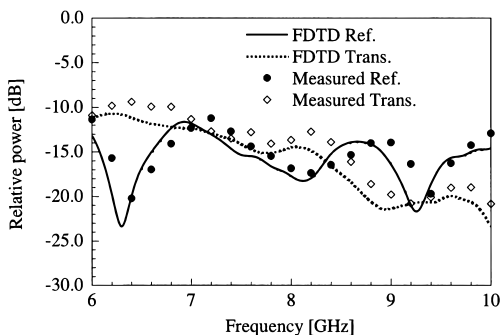


図7 反射・透過電力の測定結果 ($W60$ cm \times $H30$ cm \times $D2.5$ cm, $h = r = 1.5$ cm)

Fig. 7 Measured reflection and transmission power ($W60$ cm \times $H30$ cm \times $D2.5$ cm, $h = r = 1.5$ cm).

を空間定在波法 [12] で測定した。モデルは 30 cm (縦) \times 60 cm (横) \times 2 cm (厚さ), 突起部分高さ $h =$ 半径 $r = 1.5$ cm である。コンクリートの比誘電率は含水率は、導波管法 [13] での測定より $\epsilon_r = 7.2 - j0.78$: 6 GHz, $\epsilon_r = 7.2 - j0.82$: 10 GHz を得、比誘電率は壁内で一定とし計算を行った。測定結果と計算値との比較を図 7 に示す。誘電率測定に用いた小形試料と測定用壁の誘電率誤差、壁表面・内部での誘電率差により、計算値と測定値は多少のずれが見られるが、全体的によく一致しており、FD-TD 法による解析の有効性が確認された。

5. むすび

本論文では、ドーム突起壁について、その材料であるコンクリートの含水率変化による誘電率変化時の反射・透過・損失電力の変動を FD-TD 法を用いて解析した。ドーム突起壁は、壁内で高い損失電力が得られ、結果として反射・透過を抑圧することが可能であり、1 ~ 5.5 GHz 帯域では、その損失電力の特性はコンクリートの通常使用時の誘電率変化に対して、電力で $-1 \sim +2\%$ 、周波数特性に対しても、PHS の 1.9 GHz、無線 LAN の 2.5 GHz、MMAC の 5.2 GHz をカバーする広帯域で電磁波の反射・透過抑圧効果が安定して実現できることを解析で確認した。

今後の課題として、誘電率変化、鉄線挿入を考慮に入れたうえでの、斜入射時の特性検討、レイトレース法などを用いて実際に部屋などに施工した場合での解析など、更に施工が容易で実用性に優れた構造の検討等、より現実に近づけての解析を行う必要がある。

文 献

- [1] 佐藤 浩, 高橋 広明, 安部 實, “ドーム突起コンクリート壁を用いた電磁波のしゃへい・吸収,” 信学論 (B), vol. J84-B, no. 4, pp. 767-776, April 2001.
- [2] 宗 哲, 橋本 修, “炭素粒子混入エポキシ変成ウレタンゴムを用いたミリ波電波吸収体の耐候性に関する検討,” 信学論 (B), vol. J83-B, no. 1, pp. 138-140, Jan. 2000.
- [3] 本州四国連絡橋公団 (財) 海洋架橋調査会, 橋梁構造によるレーダ電波障害軽減策の検討 報告書 (総合まとめ), July 1989.
- [4] 秋田慶一, “コンクリートの電気定数とテレビ電波反射特性,” 信学技報, EMCJ78-38, 1978.
- [5] 清水康敬, “X バンドにおけるコンクリートの誘電率と電波吸収特性,” 信学技報, EMCJ82-71, 1982.
- [6] 千葉 元, 宮崎保光, “モバイル通信における建材による電波反射・透過特性,” 信学技報, EMT-95-96, pp. 57-66, 1995.
- [7] J.P. Berenger, “A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves,” J. Comput. Phys., 114, pp. 185-200, Jan. 1994.

- [8] K.S. Kunz and R.J. Luebbers, The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, CRC Press, Boca Raton, FL, 1993.
- [9] 國分 誠, 長田耕治, “骨材種類の違う誘電吸収型コンクリート電波吸収体の誘電率に対する含水率の影響,” 建築学電磁環境研資, EME96-001, Feb. 28 1997.
- [10] 宮崎弘志, “PC 板の電波吸収効果について,” 建築学電磁環境研資, EME96-002, Feb. 28 1997.
- [11] 千葉 元, 宮崎保光, “RC スラブによる電波反射・透過の入射角度及び周波数依存性,” 信学論 (B), vol.J82-B, no.3, pp.484-496, March 1999.
- [12] 小野光弘, “斜入射空間定在波直接測定法,” 信学技報, EMCJ77-17, pp.35-42, July 1977.
- [13] 小口文一, 太田正光, マイクロ波・ミリ波測定, pp.300-305, コロナ社, 1970.
(平成 13 年 7 月 24 日受付, 11 月 12 日再受付)
-