

E-Stone®による電磁波遮断特性の検証

中村 隆* 對馬 佳祐** 真鍋 大地*** 菊池 崇志*** 松田 豊稔****

Verification of the Frequency Characteristics of E-stone® on Electromagnetic Wave Propagation

Takashi NAKAMURA, Keisuke TSUSHIMA, Daichi MANABE, Takashi KIKUCHI,
Toyonori MATSUDA

Abstract

Recently, space surrounding us is fulfilled with electro-magnetic waves which are generated by highly developed electronic equipment. In some cases, undesired electro-magnetic “noise” causes malfunction of equipment or instruments. E-stone® was found to have reduction characteristics of electro-magnetic noise in Nagaoka University of Technology.

Results of experiments on E-stone® show new technologies of electro-magnetic shielding.

Keywords: E-stone®, Electro-magnetic wave, shielding, dielectric, multilayer.

1. はじめに

通信機器をはじめ、電子機器の高性能化により我々の周りは常に電磁波で満ち溢れている。このような電磁波は医療機器や計測・通信・制御機器における誤動作、緊急無線の受信障害等の原因となり、一種の環境問題になっている。

一方、長岡技術科学大学において「E-Stone®」にノイズを減少させる効果が確認されたことに注目し、長岡技術科学大学との共同研究により、砂利とシリコン被膜の積層構造による周波数選択性の原理についての研究を行っている。ここでは、これまでの経過を報告する。

2.1 E-Stone®とは

E-Stone®とは株式会社グラスノンが開発した、砂利表面にシリコン加工を施した高撥水性を持つ高電気抵抗材である。外観を Fig.1, 表面の拡大写真を Fig.2 に示す。

電力・通信・鉄道などの重要施設に E-Stone®を敷き詰める事により、保守・点検・管理作業等や異常発生時の歩幅電圧・接触電圧から作業員や周辺住民の安全を確保するために開発された。

2.2 性能

E-Stone®の抵抗率は $24[\text{k}\Omega \cdot \text{m}]$ と、通常の砂利の抵抗率 $16[\text{k}\Omega \cdot \text{m}]$ よりも優れている。また、通常の砂利は水分を含むと抵抗率が減少する傾向があるが、E-stone®はシリコン加工により高撥水性・非保水性を有

2. E-Stone®

* 釧路高専電子工学科, ** 釧路高専専攻科,

長岡技科大電気系, *熊本高専熊本キャンパス



Fig.1 E-Stone®外觀

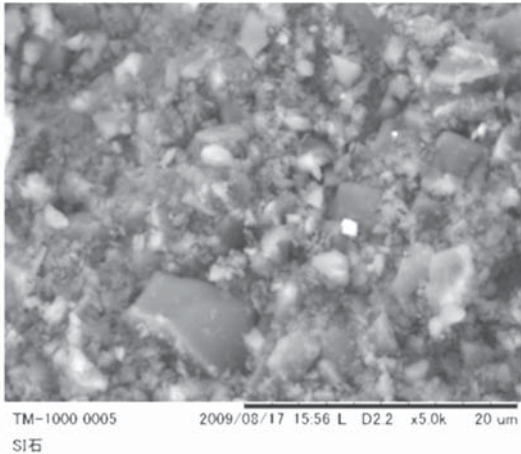


Fig.2 表面拡大図

するため、雨や雪で濡れても抵抗率の減少がなく、長期間の使用が可能である。

3. 実験的検証

E-stone®についての実験的な検証を長岡技術科学大学、釧路高専、熊本高専にて行った。以下、実験内容とその結果を列記する。

3.1 長岡技術科学大学における実験

長岡技術科学大学では、E-stone®及び加工前の砂利についてギャップ放電による電磁波発生およびループアンテナによる受信実験を行った。

Fig.3に示すように、直流電源によって6[nF]のコンデンサを約8[kV]まで充電し、2[mm]の放電ギャップに放電を起こした際に発生するノイズをループアンテナで受信し、オシロスコープで観測されたノイズ波形の計測を行った。受信において、ループアンテナを砂利に埋めたりE-stone®に埋めたりと条件を変えて行った。受信結果をフーリエ変換し、周波数スペクトルを調べたものを

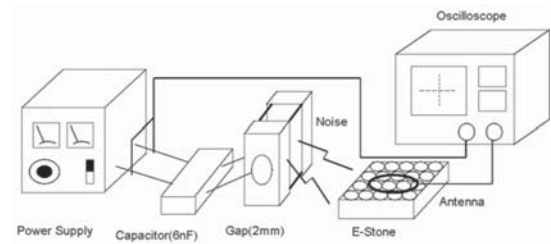


Fig.3 周波数依存性実験系

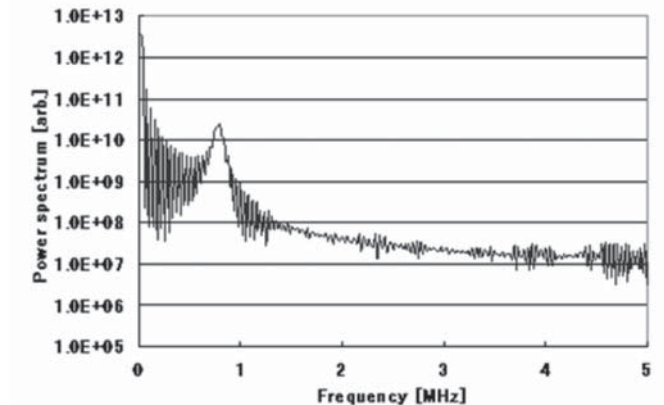


Fig.4 パワースペクトル

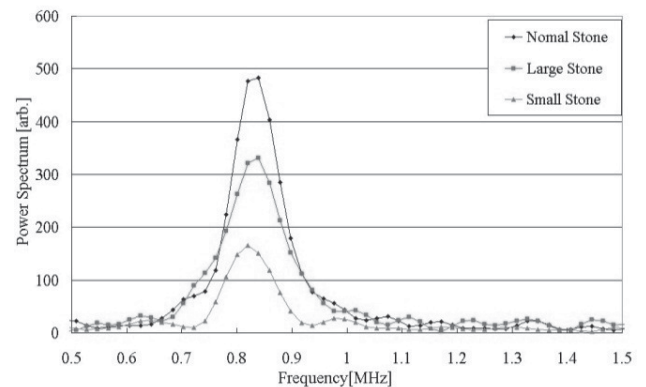


Fig.5 周波数依存性

Fig.4 および Fig.5 に示す。

また、ファンクションジェネレータから3~30[MHz]の正弦波を出力し、15[cm]間隔で平行に置かれた2本の広域帯アンテナをE-Stone®や砂利で覆い、オシロスコープで観測し、振幅比を計算した結果をFig.6に示す。

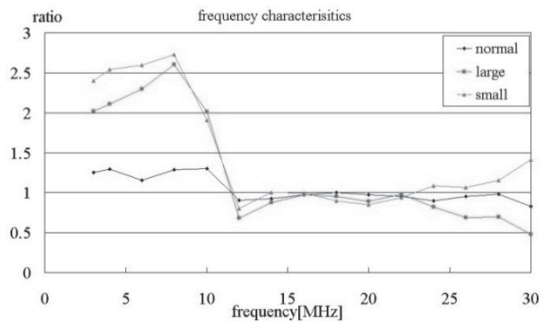


Fig.6 周波数特性

Fig.5はループアンテナの共振点付近におけるパワースペクトルを比較したもののだが、E-Stone®でループアンテナを覆った場合と砂利で覆った場合では、前者は後者に比較して約4割受信電力が減少する結果となった。砂利で覆った場合の受信電力はアンテナを空気中に置いた場合と変わらず、「石」が減少の中心ではなく、焼結シリコンオイルで石をコーティングし、さらに積層していることが電磁波の伝搬に対して何らかの影響を及ぼしていると予想される。ただし、焼結シリコンオイルの厚さ、石の直径といったサイズは測定した周波数範囲の電磁波の波長に比較して十分に小さいと仮定できるほどのサイズであるため、現象を簡単に説明することはできていない。Fig.4において、0.8[MHz]付近にパワースペクトルのピークの発生が確認できるが、これはループアンテナの共振周波数である。

3.2 熊本高等専門学校における実験

熊本高専では、Fig.7に示すようにネットワークアナライザを使用し、送受信アンテナを直線上に配置して伝送特性を測定した。受信強度の変化はE-stone®の積層部分による何らかの現象の結果と考えることができる。

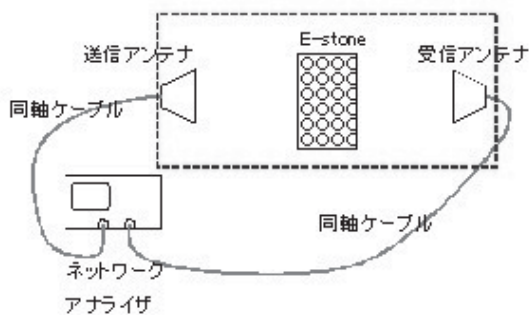


Fig.7 伝送特性測定実験概念図

Fig.8に実験結果を示す。パラメータのAirは送受信アンテナ間に何も置かない状態、BoxはE-stone®を入れるための箱を置いた状態、 $t=4$ および $t=6$ は箱の中にE-stone®を、厚さを変えて入れた状態を表す。Air曲線とBox曲線はほぼ同じであり、E-stone®を置くための箱そのものは伝搬特性に影響を与えないことがわかる。透過特性で確認されたギャップの周波数特性と位相特性を比べてみると、Air曲線は位相の乱れがないのに対し、 $t=4\text{cm}$ 曲線および $t=6\text{cm}$ 曲線ではギャップ位置で位相が乱れていることが分かる。このことから、E-Stone®の積層部を通過する電磁波はE-Stone®の積層によって位相が乱され、このずれはE-Stone®層の厚さによって変化している。

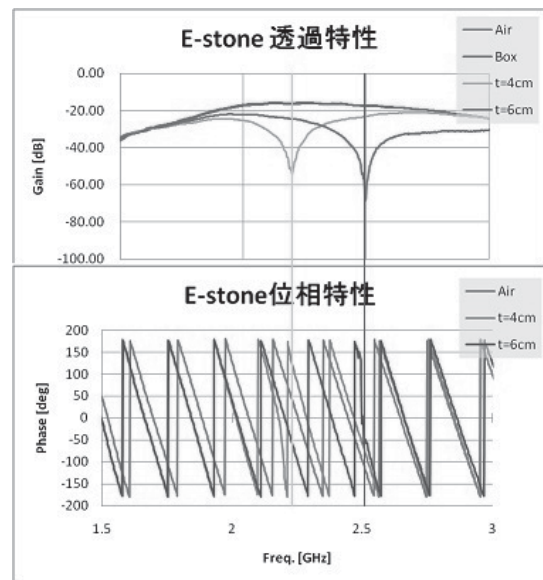


Fig.8 伝送特性

さらに、E-stone®を作る材料である砂利を厚さ3mm(試料A)、および2mmの(試料B)の薄板に加工した試料、シリコンオイルを浸透させた厚さ0.16mmの紙(試料C)、塗布前の0.165mmの紙(試料D)について複素誘電率の測定を行った。結果をFig.9に示す。石、シリコンオイルというE-stone®の素材そのものには特異な周波数特性は存在しないことがわかる。

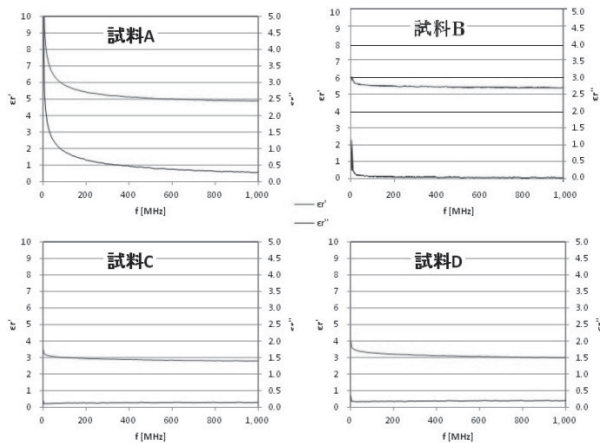


Fig.9 E-stone®素材の複素誘電率
(上が実部, 下が虚部の測定結果)

3.3 釧路工業高等専門学校における実験

本校における検証実験として, Fig.10 のように携帯電話と測定器をポリバケツの中で E-Stone®で埋め, 携帯電話に電話をして電力密度測定を行った。また, 比較のため E-Stone®を砂利に変えて同様に測定を行った。結果として, 測定された電力密度はE-Stone®の場合は $300 \sim 520 [\mu\text{W}/\text{m}^2]$, 砂利の場合は $2000 \sim [\mu\text{W}/\text{m}^2]$ となり, 受信電力密度が, 砂利に比べ E-stone®で 1/4 以下になることが確認できた。

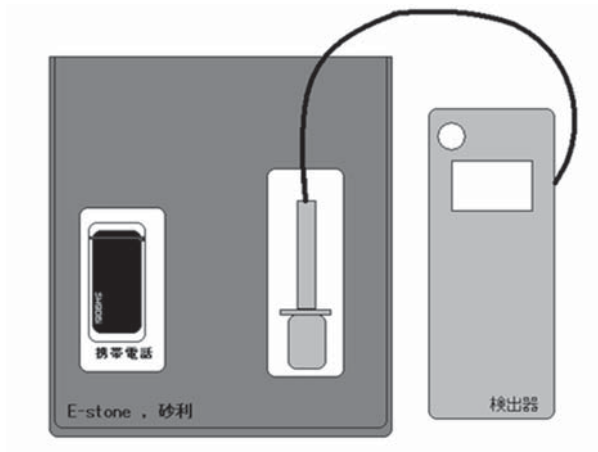


Fig.10 本校における実験概念図

さらに, $6\text{cm} \times 16\text{cm} \times 28\text{cm}$ の段ボールの中に測定器と携帯電話を入れ, シリコンオイルを浸透した紙および浸透前の紙でそれぞれ覆い, 携帯電話に電話をして RMS 値と Peak 値を測定した。携帯電話と測定器の距離により結果にばらつきが出るため, 測定器は携帯電話の上部に固定した。

Table.1 測定結果

		Normal	Phone
平常	RMS	3.2	—
	Peak	4.1~6.2	—
箱	RMS	3.1	1650
	Peak	3.8~7.0	—
箱+紙	RMS	3.5	1700
	Peak	5.2	—
箱+Si	RMS	3.2	800~1350
	Peak	4.1	1997
箱+紙+Si	RMS	3.3	1138~1769
	Peak	4.1	—

[$\mu\text{W}/\text{m}^2$]

測定結果を Table.1 に示す。箱に入れた状態と, 箱+紙に入れた状態での変化がないことから紙には反射も吸収もないと考えられる。箱+Si と箱+紙+Si では, 箱+Siの方が低い値となっている。考えられる要因として, 箱内部に到達した電磁波が内部で反射して電界強度が大きくなったことが考えられる。

シリコンオイルを浸透させた紙で箱を覆っただけでも電界強度の低下がみられることから, シリコンオイルという誘電体膜が電波伝搬に対して何らかの影響を与えていることが推測できる。

4 モデルシミュレーション

4.1 フレネル式

フレネル式はフレネルが導き出した光の反射に関する公式であり, 古い理論だが Fig.11 のように波動をイメージしやすく, 吸収がある場合にも四則演算と三角関数で比較的簡単に計算を行うことができる[2,3]。

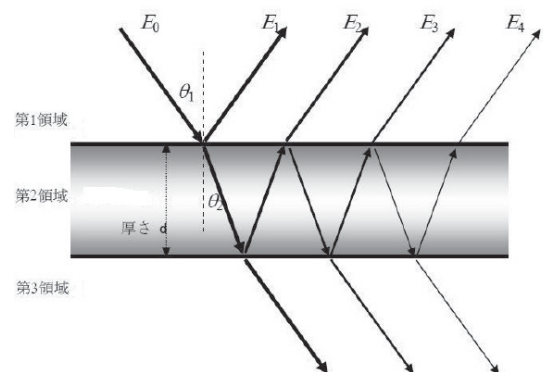


Fig.11 フレネル式のイメージ

4.2 E-Stone の簡易モデル化

フレネル式を用いて解析を行うにあたり、Fig.12 のような簡易モデルを考えた。E-Stone®は砂利の表面にシリコンオイルを焼結していることから、1つのE-Stone®がSi-SiO₂-Siという構成からなるものとし、E-Stone®間には薄い真空を挟むこととした。屈折率はSiを4.2、SiO₂を1.45、真空を1.0とした[4]。なお、今回は垂直入射で、E-Stoneモデル、砂利モデルに吸収がないものとし、解析を行った。

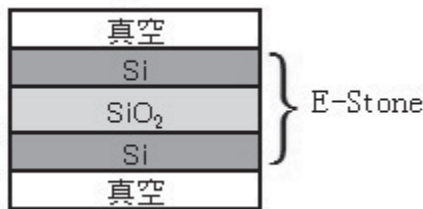


Fig.12 1層簡易モデル

4.3 解析

Siの厚さを1[mm]、SiO₂の厚さを10[mm]、真空の厚さを1[mm]とし、3層・11層・23層と層数を変えて解析した結果をFig.13に示す。

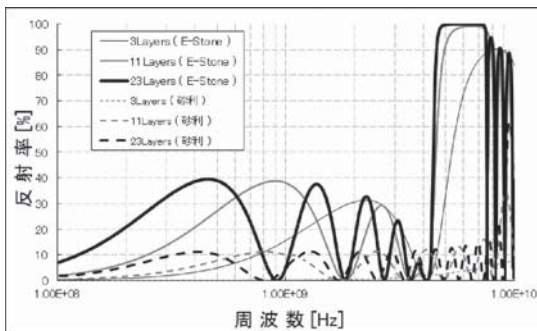


Fig.13 解析結果

E-Stoneモデルでは、携帯電話に使用される0.8～2[GHz]付近での最大反射率が約40%、砂利モデルでは約10%と約4倍も違いがあることがわかった。この結果より、E-Stone®は携帯電話で使用している0.8～2[GHz]の電磁波を反射する可能性があり、前述の検証実験結果との整合が期待できる。実際のE-stone®の積層はランダムな積層であり、その解析は複雑なものとなるため、今後の課題である。

5. 考察

以上から、E-Stone®あるいはその積層構造は電磁波に対し何らかの振る舞いをすることがわかった。研究は定性的な確認実験から定量的な原理追求に移行する途中にある。従来、電磁波を遮断するためには、電磁シールドとして導体で囲い込むことが行われてきた。しかし、近年、フォトニック結晶の電磁波領域への応用として、周期構造体による周波数選択性の研究が行われている。このことから、E-stone®の積層は、ランダム性を含む3次元周期構造によって電磁波帯域において周波数選択性を持つと予想できる。

今後の課題として、E-stone®の素材の複素誘電率の測定を行った結果を踏まえて、フレネルの式によるモデル計算、さらに不規則モデルによるシミュレーションを行うこと、E-stone®積層構造における電磁波の周波数選択性が反射、屈折、吸収のいずれによるものかの実験的検証を続けること、の2点がある。

E-stone®あるいはシリコンオイルそのものによる周波数選択性が原理的に検証され、工業生産が可能になれば、特定の電磁波を必要とする、あるいは嫌う場所における使用には無限の可能性はある。

謝辞

本研究は、長岡技術科学大学による「平成21年度高専との共同研究の推進」、「平成22年度高専—長岡技科大連携教育研究経費」の援助を得て実施している。

参考文献

- [1] (株)グラスノン, “高電気抵抗材 E-Stone+に関する公開特許公報”, 日本国特許庁, 2007.
- [2] 小檜山光信, “光学薄膜の基礎理論”, オプトロニクス社, 東京, 2003.
- [3] 薄膜干渉を繰り返し用いて多層膜反射スペクトルを計算する方法.
<http://mph.fbs.osaka-u.ac.jp/~ssc/excelde/principle.pdf>
- [4] 屈折率一覧表.
<http://www.betterseishin.co.jp/download/pdf/kussetu.pdf>