

# 床面材料定数の違いがサイトアッテネーションに与える影響について

自動車安全研究領域

長谷川 智紀

伊藤 紳一郎

松村 英樹

## 1. はじめに

近年、電子技術の発展にともない、自動車においても、コンピュータやセンサが多く用いられるようになってきた。特に、自動車の安全性を高めるために、自動車の状態をセンシングし、安全に停止、または安全に回避できるように車両の挙動を制御するといった手法が用いられるようになってきた。これは、コンピュータの発達、センシング技術の発展なしでは成し得ないものである。

一方、コンピュータの発達により、EMC (ElectroMagnetic Compatibility : 電磁的両立性) の問題も顕著になりつつある。EMC 問題では、電磁波を放射し、周辺の電子機器へ影響を与えるものと、周辺の電磁波の影響により誤動作を引き起こすものの2種類に分けることができる。自動車においては、前者は例えばエンジンのイグニッションや車載コンピュータのクロックなどがあげられる。また、後者は放送波や違法無線等の大電力電磁波や、微弱でも携帯電話などのように装置の近距離から放射する電磁波などがあげられる。

これらの耐性や放射量を測定・試験する場として測定サイトがある。測定サイトとしては、屋外サイト(以後オープンサイト)や電波暗室などが使われる。多くの規格では、測定結果の再現性を良くするため、これらのサイトの大地面を金属面にすることを強制または強く勧告している。

しかし、自動車における測定サイトの規定においては、床面材料は規定されておらず、オープンサイトに相関があることのみ記載されている。相関の基準となるオープンサイトの大地面材質も規定されていないため、測定サイトによって、測定結果が変わり、試験の可否に影響する可能性が大いにあり得る。

そこで、本報告では、床面材料がサイトの伝搬特性であるサイトアッテネーションに与える影響につい

て、水平偏波の場合について検討を行ったので、報告する。

## 2. サイトアッテネーション

測定サイトが EMC の測定に適しているかどうかは、測定サイトの伝搬特性を測定し、評価を行う。

測定サイトは、半無限大の広さをもつ測定サイトが理想的であるが、実際はサイトの周辺に測定に影響を与えるものが多々ある。例えば、オープンサイトであれば、樹木や支柱、金属大地面の状況等があげられる。電波暗室であれば、暗室に使われている電波吸収体の性能等がある。これらの条件により測定サイトの伝搬特性は理想とされる伝搬特性から離れていくことになる。

そこで、理想とされる測定サイトの伝搬特性と、利用する測定サイトの伝搬特性を比較し、利用する測定サイトの評価を行う必要がある。

その時用いる評価手法がサイトアッテネーションである。

サイトアッテネーションは、被試験機器の代わりに送信アンテナを配置し、伝搬特性を測定する方法で、図1に示すように、送・受信アンテナおよび送信器・測定器を配置して、規格に基づき測定を行う。その後、同軸ケーブルをアンテナからはずし、同軸ケーブル同士を直結させて(図2)、測定を行う。アンテナ接続時と、同軸ケーブル直結時の測定電圧の比のうち、EMC 測定時に受信アンテナを走査する場合は、走査した際の最大値、受信アンテナを固定して測定する場合は比そのものが、サイトアッテネーションとなる。

## 3. シミュレーション

実験により材料定数を変化させて測定するには、膨大な時間と労力が必要となるため、コンピュータシミュレーションを実験の代わりとして用いた。

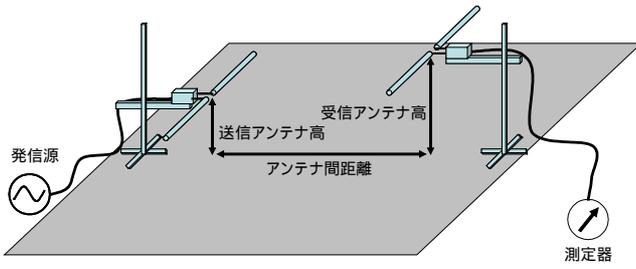


図1：サイトアッテネーション測定時の状態

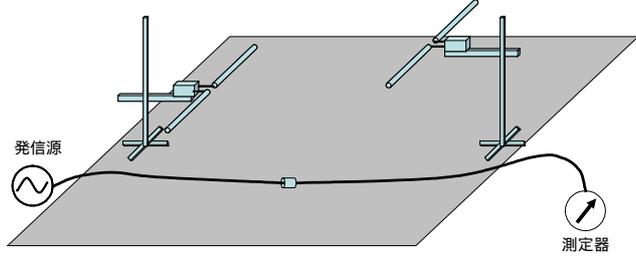


図2：直結時の状態

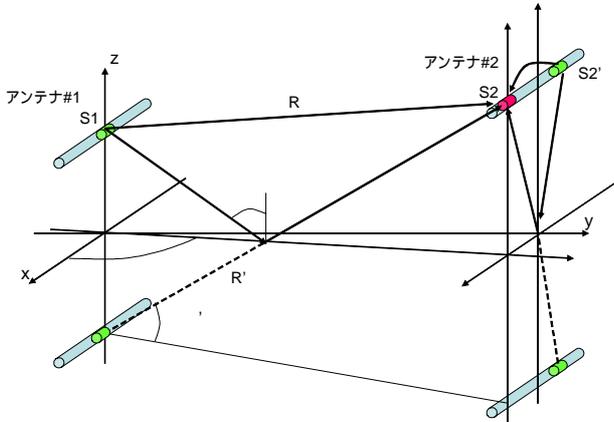


図3：シミュレーションにおけるアンテナ配置  
(水平偏波の場合)

今回用いたシミュレーションには次の式から二つのダイポールアンテナ間の伝搬特性をモーメント法を用いることにより計算する。

アンテナ#1と#2のふたつのアンテナにおける電界 $E_1$ および $E_2$ は、自身によって生じる電界 $E_{11}, E_{22}$ 、他のアンテナによって生じる電界 $E_{12}, E_{21}$ 、および、電源と負荷の状態を示す $E_a, E_b$ を用いて、式(1),(2)のように表す。そして、アンテナを微小間隔 $s_1, s_2$ に分割し、 $s_1$ から $s_2$ や $s_2$ から $s_1$ といった各微小間隔間における影響を計算し、その総和から各アンテナ間における相互結合を計算を行う方法がモーメント法である。

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_{11} + E_{12} + E_a \\
 &= \int E(s_1, s'_1) I_1(s'_1) ds'_1 + \int E(s_1, s'_2) I_2(s'_2) ds'_2 + E_a(s_1) \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 E_2 &= E_{21} + E_{22} + E_b \\
 &= \int E(s_2, s'_1) I_1(s'_1) ds'_1 + \int E(s_2, s'_2) I_2(s'_2) ds'_2 + E_b(s_2) \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、アンテナが水平偏波の場合は上式の $E(s, s')$ 項が

$$\begin{aligned}
 E(s, s') &= \\
 &= -j30k(\cos^2 \phi \sin^2 \psi' + \sin^2 \phi) \\
 &\cdot (G_o(s, s') + R_{eq} G_t(s, s'))
 \end{aligned} \tag{3}$$

となる。 $G_o$ および $G_t$ は直接波と反射波のグリーン関数で、

$$G_o = \frac{\exp(-jkR)}{R} \tag{4}$$

$$G_t = \frac{\exp(-jkR')}{R'} \tag{5}$$

である。

アンテナ間距離が近い場合、水平偏波のアンテナを用いると、各微小間隔間で、位置によっては水平偏波の反射係数のみでは実際の反射係数を表すことができず、式(6)の $R_{eq}$ を用いる必要がある。

$$R_{eq} = \frac{R_h \sin^2 \phi - R_v \cos^2 \phi \sin^2 \psi'}{\sin^2 \phi + \cos^2 \phi \sin^2 \psi'} \tag{6}$$

また、 $R_h$ および $R_v$ は、水平偏波および垂直偏波の時の反射係数で、相対屈折率 $n$ と入射角 $\theta$ からフレネルの反射係数式より、次のように表される。

$$R_v = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \tag{7}$$

$$R_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \tag{8}$$

ただし、ここでは、透磁率は1としている。また、空気対物質における相対屈折率 $n$ は、誘電率 $\epsilon$ および導電率 $\sigma$ を用いて、次の式で表すことができる。

$$n = \sqrt{\kappa - j\sigma / \omega \epsilon_0} \tag{9}$$

ただし、 $\epsilon_0$ は真空中の誘電率。 $\omega$ は角周波数を示し、周波数 $f$ に対し、 $\omega = 2\pi f$ で得られる。また、 $\kappa$ は比誘電率を示し、次のように表される。

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (10)$$

また、 $E_a, E_b$  は#1 に発信器、#2 に測定器を接続した場合、次のようになる。

$$E_a(s_1) = (V_s - Z_s I_1(0))\delta(s_1) \quad (11)$$

$$E_b(s_2) = (-Z_L I_2(0))\delta(s_2) \quad (12)$$

ただし、 $V_s$  が発信器の起電力、 $Z_s$  が発信源の内部インピーダンス、 $Z_L$  が測定器の内部インピーダンス、 $\delta$  がデルタ関数である。

これらの式を用い、床面材質を様々に変更し、アンテナに流れる電流  $I$  を計算、電流  $I$  から伝搬特性を求める。

#### 4. サイトアッテネーションの計算

サイトアッテネーションの計算をするにあたって、アンテナの配置等の条件を CISPR16-1 に記載されている条件を用い、送受信アンテナ間距離 3m、送信アンテナ高 2m、受信アンテナ高の走査幅を 1~4m とした。周波数は 30~1000MHz とし、アンテナは測定で用いるアンテナに合わせ、各周波数の半波長ダイポールを用いることとした。

また、アンテナの特性を取り除いた正規化サイトアッテネーション (以後 NSA) を計算するに当たって必要とされる半波長ダイポールアンテナのアンテナ係数は、参考文献<sup>2)</sup>にあるモーメント法によるアンテナ係数の計算方法を用いて計算した

床面の材料定数としては、導電率  $\sigma$  を 0 から銅の導電率である  $5.76 \times 10^7$  [S/m]、比誘電率  $\kappa$  を 1 から 128 まで変化させて、計算を行った。

##### 4.1. シミュレーション結果の妥当性

シミュレーションの妥当性の確認のために、当研究所にある電波暗室 (床面: 大地等価床) における NSA 測定結果および、CISPR16-1AnnexG にある理論値との比較を行った。

電波暗室における測定条件として、アンテナとしてシュワルツベック製のダイポールアンテナを用い、半波長ダイポールとして利用した。また、送信アンテナは 2m の高さに配置できる発泡スチロール上に配置し、受信アンテナはアンテナ昇降機により 1~4m まで走査して測定を行った。測定器としては、アジレントテクノロジー製ベクトルネットワークアナライザ E8358A を用い、同軸ケーブル端を基準面とする

SOLT 校正を行った後の S パラメータを測定することにより、図 1, 2 の測定と同等の測定を行った。測定周波数は、30,80,100,300,500,700,1000MHz である。

シミュレーション値および理論値・測定値を図 4 に示す。

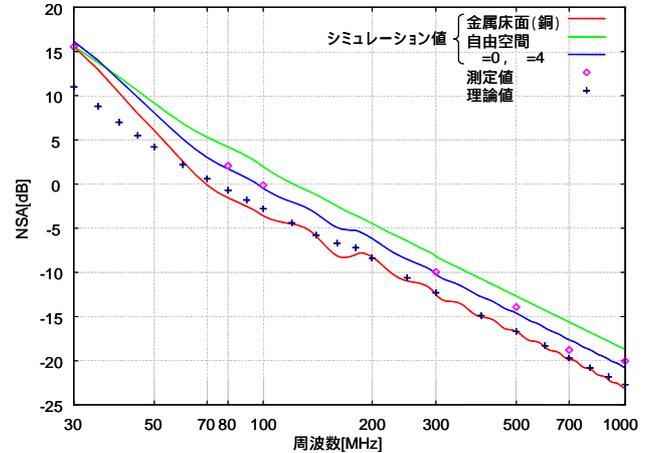


図 4 : シミュレーション結果と実験結果との比較

まず、シミュレーション結果の妥当性について検討をする。当研究所の電波暗室の床面は比誘電率 4 の床面と同等の伝搬特性が得られているという結果が以前に得られている<sup>3)</sup>。そこで、導電率 0、比誘電率 4 の計算結果 (青線) と実験結果 (菱形点) を比較すると、全測定周波数においてよい一致が得られた。

同様に、CISPR16-1Annex.G に示されてある NSA 測定の理論値 (+点) との比較を、金属床面を想定したシミュレーション結果 (赤線) を比較すると、50MHz 以上においては、良好な一致が得られているが、50MHz 以下では、差異が大きくなり、最大で 4.55dB になっている。

この差異の原因の一つとして、シミュレーションでは半波長ダイポールとしているのに対し、理論値においては共振ダイポールを用いている。そのため、アンテナ係数を差し引くときにアンテナの影響を全て差し引かれていないためと考えられる

この差異以外では、シミュレーション結果は良好であると言える。

##### 4.2 シミュレーション結果の検討

このシミュレーションを用いて、床面材料の定数を変化させた結果を図 5,6 に示す。図 5 に比誘電率を 1 とし、導電率を変化させた場合の正規化サイトアッテネーションの計算結果、図 6 に導電率を 0 とし、誘電

率を変化させた場合の正規化サイトアッテネーションの計算結果である。

#### 4.2.1 導電率を変化させた場合

図5を見ると、導電率を変化させると、設定した比誘電率が1であるため、導電率が0に近いと自由空間のNSAに、導電率が大きくなるにつれて金属床面におけるNSAに近づくことがわかる。全ての導電率によるNSAは、自由空間のNSAと金属床面のNSAの間に入っていることがわかる。

#### 4.2.2 比誘電率を変化させた場合

図6を見ると、比誘電率を変化させると、比誘電率が高いほど、床面における反射が大きくなるため、金属床面におけるNSAに近づくことがわかる。比誘電率を変化させた場合も、導電率を変化させた場合と同様に、全ての比誘電率におけるNSAは、自由空間のNSAと金属床面のNSAの間に入っていることがわかる。

### 5. おわりに

今回、モーメント法を用い、床面材質を変化させて、サイトアッテネーションへの影響について検討を行った。

その結果、CISPR16-1にあるアンテナ間距離3m、送信アンテナ高2m、受信アンテナ高走査幅1~4mの配置においては、床面材質を導電率・比誘電率の両者を変数として変化させたところ、正規化サイトアッテネーションとしては、全ての材質において、自由空間中のNSA（正規化サイトアッテネーション）と金属床面におけるNSAの間に入り、両者の差異は最大で5.7dB、平均で4.1dBとなった。

今後の課題として、今回は、水平偏波のみの比較であるため垂直偏波についての検討、また、ECE R10の測定のような受信アンテナを固定して測定を行う場合のNSAにおける床面材質の影響についての比較検討があげられる。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、貴重な御意見を頂きました東北大学通信研究所藤井勝巳助手に深謝致します。

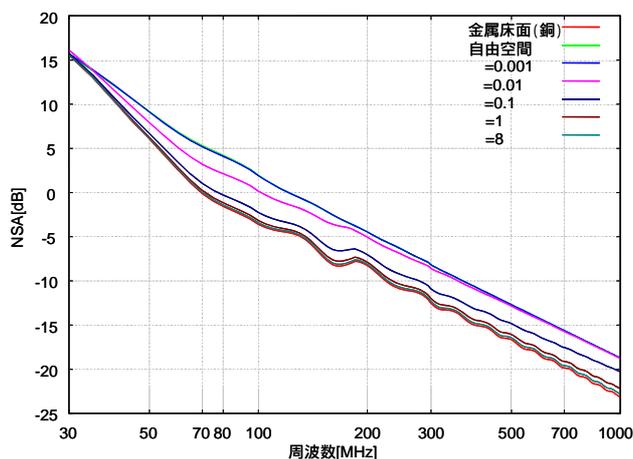


図5：導電率を変化させた場合の正規化サイトアッテネーションの変化（比誘電率：1）

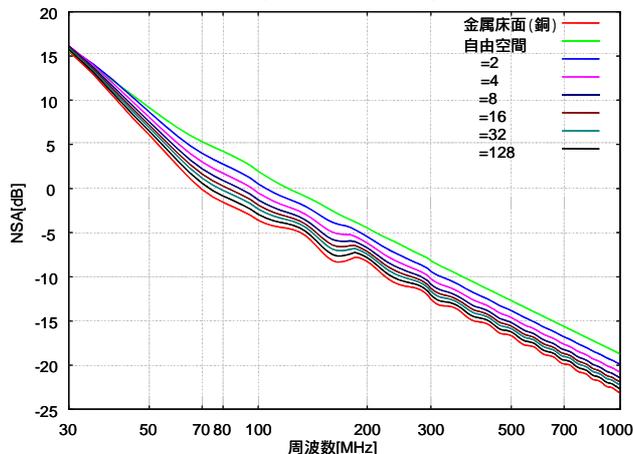


図6：比誘電率を変化させた場合の正規化サイトアッテネーションの変化（導電率：0）

### 参考文献

- 1) Akira SUGIURA, et., "Site Attenuation for Various Ground Conditions", Trans. IEICE, Vol.E73, No.9, pp.1517-1524(1990)
- 2) 藤井勝巳, 「EMI 測定用アンテナ解析へのモーメント法の適用」, 電子情報通信学会 2004 年総合大会
- 3) 伊藤紳一郎, 「電波暗室における特性の測定例について」, 自動車技術会 1998 年春季大会