

# EMC測定サイトにおける地面の電気定数の決定法について

—一本のアンテナによる測定法の検討—

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ー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、車両の状態を把握、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 (Electro-Magnetic Compatibility : 電磁両立性)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、屋外サイトや電波暗室などが使われる。これらのサイトは、測定結果の再現性を良くするため、多くの規格では、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、床面材料の規定は金属とは規定されておらず、「オープンサイトに相関があること」のみの記載とされている。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。

筆者らは昨年度、シミュレーションによりサイトアッテネーションを計算し、地面の電気定数が変化した場合のサイトアッテネーションの変化について検討を行った<sup>1)</sup>が、次のステップとして、地面の電気定数を測定する。物質の電気定数を測定する方法としては、導波管等に物質を挿入し反射波・透過波を測定することにより電気定数を測定する導波管法、被測定物を平行平板に挟んだり方形共振器に被測定物を挿入し共振周波数や Q 値から電気定数を測定する共振器法、被測定物に対し電磁波を照射し被測定物がある時と無い時とでの反射波および透過波を測定することにより電気定数を測定する自由空間法などがある。(文献<sup>2)</sup> 参照)

これらの方法を地面の電気定数を測定に用いる場合、自動車が走行可能な路面の電気定数を実環境の状態を維持しつつ測定することは困難であり、地面の電気定数を測定するためには、地面の環境を維持しつつ測定する方法が必要となる。

本報告では、一本のアンテナのみを用い、地面における電磁波の反射から地面の電気定数を測定する方法について MHz オーダーにおいて検討を行ったので報告をする。

この方法を用いて測定された地面の電気定数から、EMC 試験サイトの基準となるサイトアッテネーションを求めたいと考えている。

## 2. 一本のアンテナによる電気定数の推定方法

### 2. 1. 原理

本方法は、文献<sup>3)</sup>にある3つの距離における校正用金属板を用い測定器からアンテナまでの誤差モデルを校正し、被測定物そのものの反射係数を測定する手

法を MHz オーダーに対して適用し、測定した反射係数から電気定数を推定する方法である。

詳細は次の通りである。

電気定数を推定するために必要となる被測定物の反射係数を図 1 に示す方法で測定する。図 1 の方法で得られる測定器における反射係数は被測定物の反射係数に対し、測定器からアンテナおよび被測定物直近までの部分が被測定物の反射係数に対し誤差として含まれる。そこで、この部分を図 2 に示す誤差モデルおよび式(1)に示す反射係数の測定値  $S_{11}$ 、誤差  $e_{00}, e_{11}, e_{01}, e_{10}$  および被測定物の反射係数  $\Gamma$  との関係式で仮定する。

$$S_{11}(m) = e_{00} + \frac{e_{10}e_{01}\Gamma}{1 - e_{11}\Gamma} \quad (1)$$

測定値から被測定物の反射係数を得るには、誤差項が未知な項では計算することができない。そこで、この誤差モデルに対し、文献<sup>3)</sup>にある校正方法を用いることにより、誤差項を既知の項にする。文献<sup>3)</sup>で用いている校正方法は、校正用金属板を基準位置と基準位置から  $\lambda/6$  および  $\lambda/3$  離れた位置に設置した場合の反射波を測定し、誤差モデル中の 3 つの未知誤差項を算出するという方法である。

本方法では、文献<sup>3)</sup>の校正方法を適用するにあたり、アンテナ移動間隔を  $\Delta h$  とした場合、誤差モデル式を次の通りとなる。MHz オーダーでの適用を考えているため、アンテナと校正用金属板の距離を  $\Delta h$  ずらした分を  $\exp(-j2k\Delta h)\{h_{base}/(h_{base} + \Delta h)\}$  により補正を行っている。

$$\begin{cases} S_{11}(0) = e_{00} + \frac{e_{10}e_{01}(-1)}{1 - e_{11}(-1)} \\ S_{11}(\Delta h) = e_{00} + \frac{e_{10}e_{01}(-1)\exp[-j2k\Delta h]\{h_{base}/(h_{base} + \Delta h)\}}{1 - e_{11}(-1)\exp[-j2k\Delta h]\{h_{base}/(h_{base} + \Delta h)\}} \\ S_{11}(2\Delta h) = e_{00} + \frac{e_{10}e_{01}(-1)\exp[-j2k2\Delta h]\{h_{base}/(h_{base} + 2\Delta h)\}}{1 - e_{11}(-1)\exp[-j2k2\Delta h]\{h_{base}/(h_{base} + 2\Delta h)\}} \end{cases} \quad (2)$$

上式により、誤差項  $e_{00}, e_{11}, e_{01}, e_{10}, e_{00}, e_{11}$  の 3 つの値が既知となるので、誤差モデル式から変形した式(3)に対し被測定物の反射波の測定結果を代入することにより、被測定物における反射係数を得ることができる。

$$\Gamma = \frac{S_{11}(m) - e_{00}}{(S_{11}(m) - e_{00})e_{11} + e_{10}e_{01}} \quad (3)$$

反射係数と被測定物の電気定数の関係は、伝送線路モデルが適用できると仮定することにより次式通りになる。

$$Z_{Dielectric} \equiv \frac{1}{\sqrt{\dot{\epsilon}_r}} \eta_0 = \eta_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_r = \left( \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \equiv \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r' - j \left( \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (5)$$

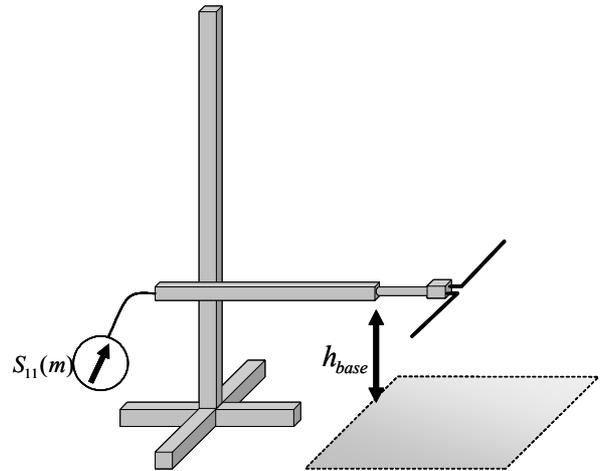


図 1 測定概念図

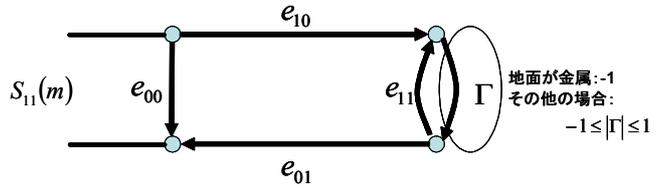


図 2 誤差モデル

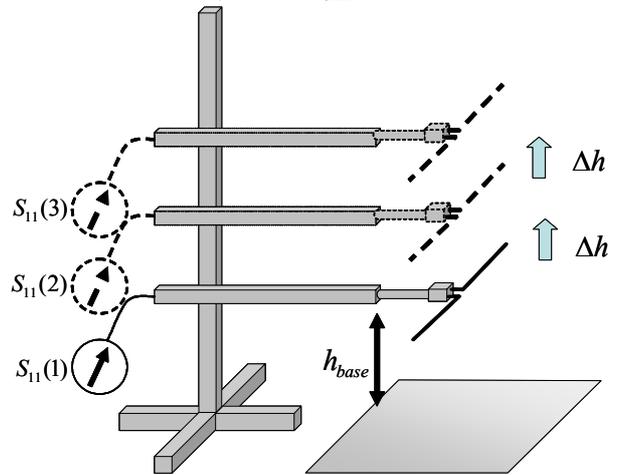


図 3 校正時の概念図

## 2. 2. 測定条件

本方法の妥当性を確認するためには、既知の電気定数の物質が必要となるが、簡単には手に入らないため、今回はシミュレーションにより測定データを作成し、本方法に適用した。

シミュレーションには FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いている AET Japan 製 MW-Studio V5 を利用した。

シミュレーションにおける条件は次の通りである。

シミュレーション時の周波数は 300MHz、 $1\lambda$  (波長) = 1m とした。

被測定物として土の地面を仮定し、文献<sup>4)</sup>にある乾燥した土の電気定数である比誘電率  $\epsilon_r=3$ 、導電率  $\sigma=1.0\times 10^{-3}[S/m]$  とした。

アンテナは 300MHz の半波長ダイポールアンテナとし、全長が 0.5m、エレメント間のギャップ長が 5mm、エレメント直径が 3mm とした。偏波は水平偏波とした。

地面または校正用金属板からアンテナまでの基準アンテナ高  $h_{base}$  は  $1\lambda$  とし、 $\Delta h$  を  $\lambda/6$  とした。

測定値としてギャップ間に生じる電圧を測定し、反射係数として得たものを用いることにした。

解析空間の端面における 6 面の境界条件は PML とし、地面は PML に直結させた。

校正用金属板の大きさを変数とし、シミュレーションを行った。

図 4 にシミュレーションにおけるモデル図を示す。

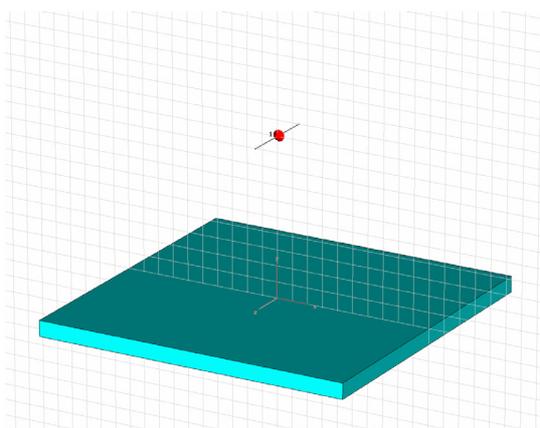


図 4 シミュレーションモデル例

## 2. 3. 結果

シミュレーション結果を用いて、本方法により得られた電気定数の結果を条件別に以下に示す。

### 2. 3. 1. 理想的な校正状態の場合

まず、理想的な状態におけるシミュレーション結果を用いて電気定数の推定を行ってみた。ここでいう理想的な状態とは、校正用金属板の大きさが無限大の場合を言う。

その結果、 $\epsilon_r$  が 3.18、 $\sigma$  が  $6.37\times 10^{-2}[S/m]$  となり、比誘電率は設定値に近い値が得られたが、導電率については一桁大きい結果となった。

### 2. 3. 2. 校正用金属板の大きさを

#### 変化させた場合

前節では校正用金属板を無限大の大きさと仮定したが、実際には無限大の大きさの金属板を用意することはできない。

前節の結果と同等の値を得るには、ひとつとして校正時の金属板の反射係数を -1 と仮定することができるかどうかに関わってくる。

金属板の反射係数は、金属板の大きさが変わると変化する。特にあまりにも小さい金属板を用いた場合、反射係数を -1 と仮定しているモデルからかけ離れるため、校正結果に誤差が生じ、その結果、電気定数の推定が不可能となる。

そこで、校正用金属板の一边の長さを変化させた場合の電気定数の推定結果の推移を見てみた。

その結果を図 5 に示す。

図 5 を見ると、比誘電率は金属板の一边の長さが  $1.4\lambda$  以下では上昇し、それ以上では周期的に変化しているように見える。一方、導電率は金属板の一边の長さが  $1.3\lambda$  付近で急激な変化が起きているが、それ以外では  $0.01[S/m]$  のオーダーとなった。

## 2. 4. 検討

理想的な校正状態における電気定数の推定結果をみると、先に述べたように比誘電率  $\epsilon_r$  は設定値と近い値を得ることができたが、導電率が一桁以上大きい値となってしまった。

この要因としては、2つが考えられる。

ひとつは  $h_{base}$  であり、もうひとつが校正モデルである。

$h_{base}$  については、今回は  $1\lambda$  とした。これは、実際に測定を行うにあたって、 $1\lambda$  程度が実用上利用しやすい高さだったためである。しかし、 $1\lambda$  では金属板および被測定物に対し、平面波として電磁波があたっ

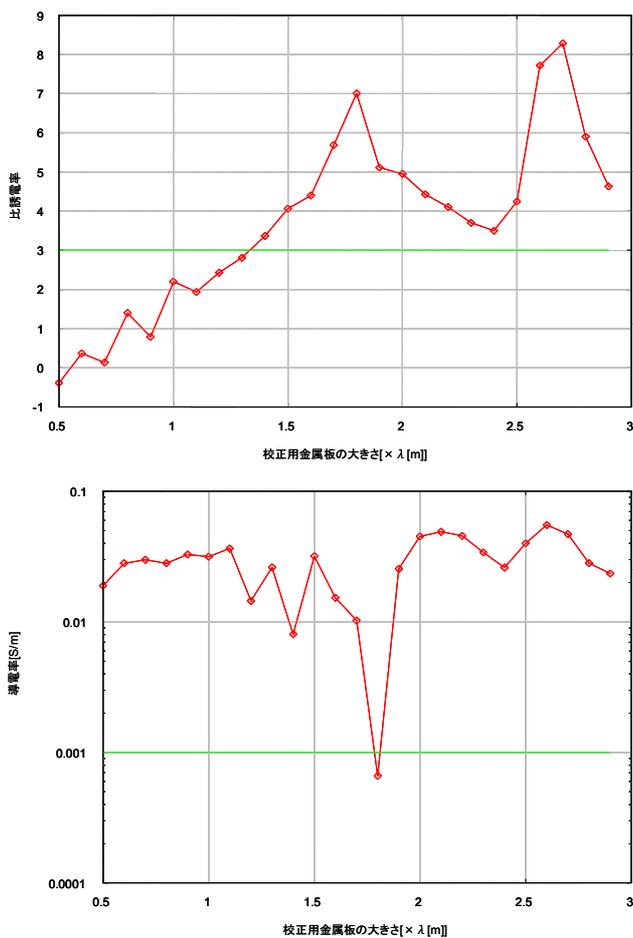


図5 校正用金属板の一辺の長さを変化させた場合の電気定数の推定結果の推移 (上：誘電率，下：導電率)

ていると見なせる部分が小さいため、電気定数を推定するにはS/Nが悪く、誤差として影響が出てきたと考えられる。

一方、校正モデルの問題としては、電波伝搬が含まれる部分の誤差項  $e_{01}$  や  $e_{10}$  を、MHz オーダーでの利用を考慮し、 $\exp(-jkr)/r$  により支配されていると考えた点と思われる。ここで、 $k$  は波数、 $r$  は伝搬距離を表す。 $\exp(-jkr)/r$  はアンテナを  $\lambda/6$  ずつずらした場合にその経路分の伝送損失と位相変化が考えられるため、補正を行うために用いた。この部分に問題があるのではと考えているが、現在のところ不明である。

次に、校正用金属板の大きさを変化させた場合における電気定数の推定結果をみると、金属板が大きくなるにつれて周期的な変動が見られた。今回用いたアンテナが半波長ダイポールアンテナであり、指向性が緩やかな特性であることから金属板の端からの放射の

影響が出ていると考えられる。この対処方法としては、指向性のあるアンテナを用い、放射する電磁波の大部分を金属板にあたるようにするか、金属板をなるべく大きくすることになると思われる。

### 3. まとめ

妨害電磁波の測定サイトにおける適切な地面の電気定数を決定するために必要がある。地面の電気定数を測定するための方法として、すでに文献<sup>3)</sup>において数十 GHz オーダーにおいて実現されている一本のアンテナを用いた測定方法を MHz オーダーに対して検討を行った。

この方法を用いることにより、地面の状態を維持しつつ電気定数を測定することができるため、自動車が走行可能である地面の電気定数を実環境の状態で測定することが可能となる。

検討の結果、現状の誤差モデルでは実際のモデルとの間に差異があること、ダイポールアンテナではアンテナに対し垂直な面内では無指向性となるため S/N の低下、校正時の金属板の端からの放射の影響などが、誤差に大きな影響を与えていると考えられる。

今後の課題としては、これらの詳細な検討を実施し問題の洗い出し、アンテナの指向性の問題としては指向性のあるアンテナ (例えば八木アンテナや誘電体レンズ等) による S/N の向上、誤差モデルの改良による電気定数の推定結果の精度向上があげられる。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、誤差モデルのアイデアを提供して頂きました東北大学の藤井助手に深謝致します。

### 参考文献

- 1)長谷川ら：“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”,平成 16 年度交通安全環境研究所研究発表会
- 2)橋本修：“高周波領域における材料定数測定法”,森北出版,2003
- 3)花澤理宏, 渡辺聡一：“自由空間法の 1 ポート校正に関する一検討”, 2004 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, P286, 2004 年 9 月
- 4) Recommendation ITU-R P.527-3: "Electrical characteristics of the surface of the earth"