有限差分時間領域法による表面電流発生装置近傍の 電磁界解析(第1報)

自動車安全部	松村	英樹	伊藤	紳一郎	長谷川	智紀
電気通信大学	岩崎	俊				

1. 緒言

近年、自動車の高性能化や高機能化のため様々な電子 装置が自動車に搭載されている。そのため、自動車の EMC 対策がますます重要となっている。自動車の EMC のうち、EMI の測定は、自動車から 3m 又は 10m 離れ た位置で行われる。この場合、大きな電波暗室が必要と なり、EMI の測定を行うコストが大きくなる。そのため、 自動車から放射される電磁波を電磁界シミュレーション により求めることができれば、コストの削減につながる。

実際の自動車を対象にした電磁界シミュレーションでは、「計算条件の複雑さ」、「自動車から放射される電磁波の発生源が複数になる」などの理由により、計算結果の 妥当性の検証が困難である。そのため、まず自動車を簡 略化した形状のものを対象に電磁界シミュレーションを 行うことにより、計算手法の有効性を検証する。自動車 から放射される電磁波の発生源の1つとして、車体の表 面に流れる表面電流¹⁾⁻⁴が考えられる。このため、以前 に、車体の表面を簡略化した表面電流発生装置を作成し、 表面電流及び近傍電磁界の測定を行った^{3).4}。

そこで、本報告では、表面電流発生装置の近傍の電磁 界シミュレーションを試み、測定結果との比較を行う。

2.計算手法

一般に、電磁界についての議論は、Maxwell 方程式に 基づいて行われる。Maxwell 方程式は、位置 r = (x, y, z)、 電界 E(r, t)、磁界 H(r, t)、誘電率 、透磁率 μ 、導電率

、時刻 t とすると下記のように示される。但し、単位はすべて SI 単位系に従うものとする。

$$\nabla \times \mathbf{H}(r,t) = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}(r,t)}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}(r,t)$$
(1)

$$\nabla \times \mathbf{E}(r,t) = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}(r,t)}{\partial t}$$
(2)

今回、電磁界シミュレーションの手法として近年注目 されている有限差分時間領域法 ⁵ (Finite Difference Time-Domain method、以下、「FDTD 法」という。) を用いた。

FDTD 法とは、Maxwell 方程式の空間および時間に対 する微分を差分に置き換えて、電界及び磁界を直接計算 する方法である。一般に Yee のアルゴリズム ⁶が用いら れる。

このアルゴリズムを用いて、Maxwell方程式を時間について差分化すると、以下の差分式が得られる。

$$\mathbf{E}^{n} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma \cdot \Delta t} \mathbf{E}^{n-1} + \frac{\Delta t}{\varepsilon + \sigma \cdot \Delta t} \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}$$
(3)

$$\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}^{n}$$
(4)

ここで、 t は時間刻みを表すものとする。また、時刻 t=n・ tにおける電界を E^n などと表すこととする。但し、 n=0, 1, 2, …とする。式(3)、(4)における電界と磁界の 時間経過の関係を図 1 に示す。図 1 のように電界と磁界 は半分の時間刻み t/2 毎に交互に計算される。

Yee のアルゴリズムでは、解析空間を微小な直方体(以下、「セル」という。)に分割し、各セルの面の中心と辺に電界と磁界を配置する。

以下、簡単のために2次元のX-Y面について、電界と 磁界の計算方法を説明する。電界の計算では、磁界を辺 上に配置し、電界を面の中心に配置する。そのため、電





図2 電界と磁界の空間配置

界と磁界は図 2 のような位置関係となり、磁界の位置は 電界の位置よりも 1/2 セルだけずれて配置される。ここ で、位置 (i, j)のセルにおける電界を $E_{(i, j)}$ などと表現 する。

図 2 において 4 つの磁界 $H_{x(i,j-1/2)}$, $H_{x(i,j+1/2)}$, $H_{y(i-1/2,j)}$ f), $H_{y(i+1/2,j)}$ は磁界ループを形成する。また、電界 $E_{a(i,j)}$ f)は磁界ループの中心に配置しているので、 $E_{a(i,j)}$ と4つ の磁界の関係が Maxwell 方程式における電界と磁界の 関係に一致する。従って、式(3)の $\nabla \times H$ は、この磁界 ループを形成する4つの磁界から計算される。

以上の説明を 3 次元に拡張して考えると、式(3)におい て、 $\nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}$ は、時刻 $\mathbf{n} \cdot t - t^2$ におけるセルの各 辺に割り当てられた 12 の磁界から計算され、電界 \mathbf{E}^{n-1} は電界 \mathbf{E}^n と同じ位置における時刻 $\mathbf{n} \cdot t - t$ の電界で あるので、これらから時刻 $\mathbf{n} \cdot t$ における電界 \mathbf{E}^n が求 まる。また、磁界についても式(4)から同様にして求まる。 このように式(3)と(4)による計算を繰り返すことで、時間 領域における各空間での電界と磁界が求まる。

3.測定方法および計算条件

3.1 測定方法

今回、光電界センサを使用して、解析対象である表面 電流発生装置の近傍の電界を測定した。

図3に測定状況を示し、図4に表面電流発生装置の概 略図を示す。本報告においては、図4のように上部導体 の両端の傾斜している所を傾斜部分、傾斜部分に挟まれ た所を水平部分ということとした。

座標系は、図4のようにX軸、Y軸、Z軸を設定し、 下部導体面の中心を原点とした。光電界センサによる測 定は、(X=0mm, -140 Y 140mm, Z=15mm)、(X=0mm, -70 Y 70mm, Z=45mm)、(-80 X 80 mm, Y=0mm,









Z=15mm)及び(-80 X 80mm, Y=0mm, Z=45mm)の各 直線上において 10mm 間隔で行った。

表面電流発生装置の入力端には、標準信号発生器から 周波数 100MHz、電力 13dBm の電流を入力した。表面 電流発生装置の出力端には整合抵抗を接続し、インピー ダンスの整合を図った。

電界は、文献(3)と同様に、光電界センサの光出力信号 を電気信号に変換し、スペクトラムアナライザを用いて ピーク検波することにより求めた。

3.2 計算条件

図5に表面電流発生装置の解析モデルを示す。

上部導体と下部導体の寸法及び位置関係並びに座標系の設定は図4の場合と同様とした。

図5に示す上部導体と下部導体は完全導体とした。解 析モデルの上部導体の寸法は、ほぼ実際の寸法に一致さ せたが、傾斜部分については階段状に模擬したため、実 際の形状と完全には一致していない。解析空間は、

- 400mm X 500mm, - 200mm Y 200mm, 0mm Z 100mm とし、分割したセルの1つの大きさは、5mm × 5mm × 1mm の直方体とした。

また、境界条件としては、下の境界面については下部 導体の完全導体とし、その他の境界面については、電磁 波を反射させず吸収させる境界条件とした。

入力端の上部と下部の導体間に振幅 1V、周波数 100MHz の入力電圧が印加されるように条件を設定し た。また、出力端ではインピーダンスの整合が成立する ように条件を設定した。

4.計算結果及び測定結果

4.1 計算結果の可視化

今回の計算結果は、周波数 100MHz の電界の Z 方向 成分 Ezの大きさとした。図 6 に Ezの計算結果を示す。 このうち、図 6(a)は Z=15mm の平面、図 6(b)は X=0mm の平面、図 6(c)は Y=0mm の平面における計算結果であ る。

FDTD 法では、解析空間内の各セルごとに電界と磁界 の計算結果が得られる。そのため、計算結果を画像化す ることで、図6のように電界の可視化が可能である。ま た、上部導体と下部導体の間の Ez が上部導体の上方の Ezより大きいなど、電界の可視化により全体の傾向を容 易に把握することができる。

4.2 計算結果と測定結果の比較

図 7 に X=0mm, Z=15mm の直線上の Ezの計算結果 及び測定結果を示す。Ez の値については X=0mm, Y=0mm, Z=15mm の Ezの値を基準として正規化を行 った。

図 7 において、計算結果は、Y= - 140mm から Y= - 70mm 付近まで急激に増加し、Y= - 60mm から Y=



(a) Z=15mm の平面



(b) X=0mm の平面





+60mm で一定となり、Y=+70mm 付近から急激に減 少した。また、測定結果も同様の傾向を示した。

図 8 に X=0mm, Z=45mmの直線上の Ezの計算結果 及び測定結果を示す。Ezの値については X=0mm, Y=0mm, Z=45mmの Ezの値を基準として正規化を行 った。

図 8 において、Y= ± 70mm 付近での計算結果が Y=0mm 付近に比べて 3dB ~ 4dB 程度大きくなった。ま た、測定結果も同様の傾向を示した

図9にY=0mm, Z=15mmの直線上のEzの計算結果 及び測定結果を示す。Ezの値についてはX=0mm, Y=0mm, Z=15mmのEzの値を基準として正規化を行 った。

図 9 において、 X が - 80mm から + 80mmまで変化 するに伴い計算結果は単調に減少するが、測定結果はほ ぼ一定であった。計算結果は測定結果に対して、X= - 80mm で約 0.5dB 大きく、X= + 80mm で約 0.9dB 小 さくなった。

図 10 に Y=0mm, Z=45mm の直線上の Ezの計算結

果及び測定結果を示す。Ez の値については X=0mm, Y=0mm, Z=45mmの Ezの値を基準として正規化を行った。

図 10 において、 計算結果は、X= - 80mm から X= +80mm の範囲において、下に凸型の単調に変化する曲 線となる。また、測定結果についても同様の傾向を示し たが、X=0mm から X= +80mm の間で計算結果と測定 結果に差があり、X= +80mmの位置において計算結果は 測定結果より約 0.7dB 小さくなった。

5. 結言

今回、表面電流発生装置近傍の電磁界について、FDTD 法による電磁界解析を試みた。また、光電界センサを用 いた電界の測定も同時に行い、計算結果と測定結果との 比較を行った。

FDTD 法による計算では、電界の可視化が可能であり、 全体の傾向を容易に把握することができた。

電界の Z 方向成分について、計算結果と測定結果を比 較したところ、X=0mm, Z=15mm 及び X=0mm, Z=45mmの直線上では、計算結果と測定結果がほぼ一致 した。Y=0mm, Z=15mm 及び Y=0mm, Z=45mmの 直線上では、計算結果と測定結果との間に 1dB 程度の差 異が見られた。

今後、計算結果と測定結果について定量的な検討を行うとともに解析モデルについて検討を行う予定である。

参考文献

- 長沢他:「自動車から発生する高周波電磁雑音と車体を流れる高周波雑音電流」,信学論 B,Vol.J-71-B,No1,pp59-65,1988
- (2) 天野他:「導体表面に発生する電磁界測定法に関する研究(第 1報)」,平成10年度交通安全公害研究所研発表会 講演概要
- (3) 伊藤他:「導体表面に発生する電磁界測定法に関する研究(第2報)」,平成13年度交通安全環境研究所研発表会講演概要
- (4) 松村他:「導体表面に発生する電磁界測定法に関する研究(第 3報)」,平成13年度交通安全環境研究所研発表会 講演概要
- (5) 宇野:「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」,コロナ 社,1998
- (6) K.S.Yee : "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media", IEEE Tran.A.P, Vol.14, No4, pp302-307, 1966



図7 電界のZ方向成分(X=0mm, Z=15mm)











図10 電界のZ方向成分(Y=0mm, Z=45mm)