

[共同研究成果]

平面大地上の電磁界問題に対して有効な解析方法の開発

有馬 卓司

東京農工大学 工学部 知能情報システム工学科

車などの移動体の多くは路面や海水面上を移動している。移動体の安全運航には電波を用いたレーダが重要である。今後、自動車においては車同士が通信を行い、より高度かつ自律的に交通管制を行う事で、より効率的な移動が行えるようになる。移動体における電波利用を考える際は、大地や海面で電波が反射するためにその影響を定量的に考慮する必要がある。本報告では、電磁界シミュレーション手法の一つである FDTD 法を用いて平面大地上の電磁界問題を効率よく解析する手法について述べる。

1. 平面大地上のアンテナが作る電磁界

図1に本報告で検討する、平面大地上のモデルを示す。このように、大地上のアンテナから放射された電波は、直接届く成分と、大地に反射して届く成分の合成となる。よって、図1に示す、 E_1 と E_2 をそれぞれ求めればよい。一方、電磁界シミュレーション手法はいくつかあるが、なかでも FDTD (Finite Difference Time Domain) 法は図2左図に示すように解析したいモデルをセルと呼ばれる微小領域に分割し解析する手法である。FDTD 法においては、まず解析領域を決め、その解析領域内を各方向の長さ Δx , Δy , Δz で構成される微小立方体に分ける。そしてこのセル内に図2右図に示すように電界ベクトル、磁界ベクトルの各成分を配置する。このように FDTD 法において、各電磁界成分は同じ場所には配置されていない。そしてこれら電磁界に対してマクスウエルの方程式を差分し適用する手法である。

FDTD 法を用いて、アンテナから放射される電界 $E(r)$ を求めるには、図3に示すように仮想的な閉曲面で囲い、その閉曲面上を流れる電流に対して

$$E(r) = -j\omega\mu_0 \int_v G(r, r') J(r') dv' \quad (1)$$

の計算を行えばよい。ここで、 $G(r, r')$ はグリーン関数と呼ばれる既知の関数である。このグリーン関数は空気中は簡単に求まるが、大地などの複雑な媒質に対して有効な関数は一般化されておらず、求める必要がある。この求め方については後で述べる。一方、本報告で検討するモデルは車などを想定している。車は地面と設置しているために、車全体から放射される電波の放射界を求めるには図3に示すように、大地を横切る形で閉曲面を取る必要がある。そのため(1)式のグリーン関数は、直接波に対して有効な関数と、大地からの反射波に対して有効な関数が必要となる。

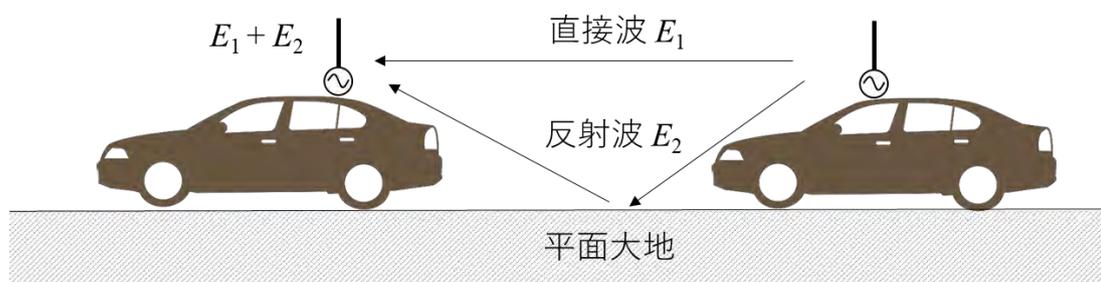


図1 平面大地上の電磁界問題の例

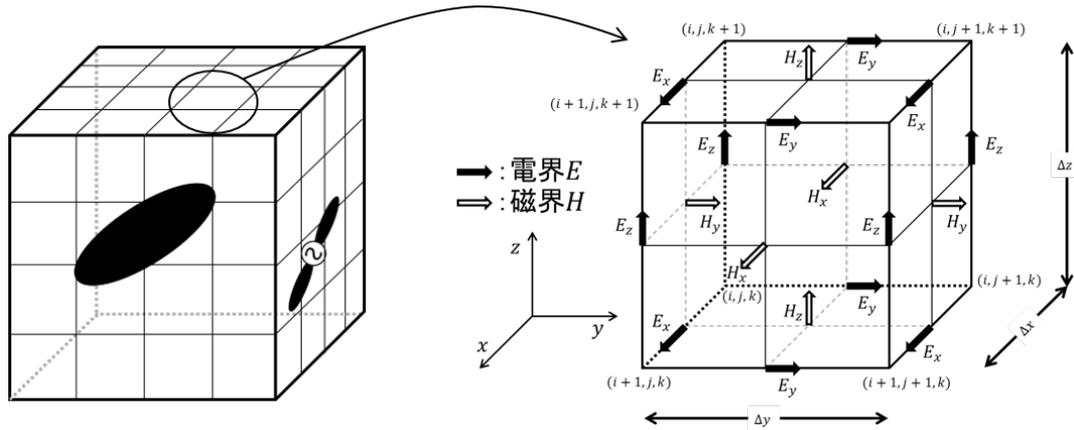


図2 FDTD法の概念

本報告に対して有効なグリーン関数と電流および電界の関係式は次式となる。

$$E^{(1)}(\mathbf{r}) = -j\omega\mu_0 \int_{S_a} \overline{\overline{G}}_{11}^{(e)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}_e^{(1)}(\mathbf{r}') dS' - \int_{S_a} \nabla \times \overline{\overline{G}}_{11}^{(m)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}_m^{(1)}(\mathbf{r}') dS' \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{J}_e 、 \mathbf{J}_m はそれぞれ電流、磁流である。

2. 平面大地上に対して有効なグリーン関数

本節では、平面大地に対して有効なグリーン関数の求め方について述べる。(2)式中のグリーン関数は

$$\overline{\overline{G}}_{11}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \overline{\overline{G}}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + \overline{\overline{G}}_s(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (3)$$

と表される。ここで $\overline{\overline{G}}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ は真空中のグリーン関数であり、 $\overline{\overline{G}}_s(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ は大地からの反射成分を表すグリーン関数である。本報告では、(2)式をさらに

$$E_1^{(1)}(\mathbf{r}) = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} [D_{0\theta}(\theta, \phi) + D_{0\phi}(\theta, \phi)] \quad (4)$$

$$E_2^{(1)}(\mathbf{r}) = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} [D_{s\theta}(\theta, \phi) + D_{s\phi}(\theta, \phi)] \quad (5)$$

とそれぞれ簡易な表現として平面大地上の電界を計算した。このように計算し最後に、これらを足し合わせるにより、平面大地上の電界を計算できる。

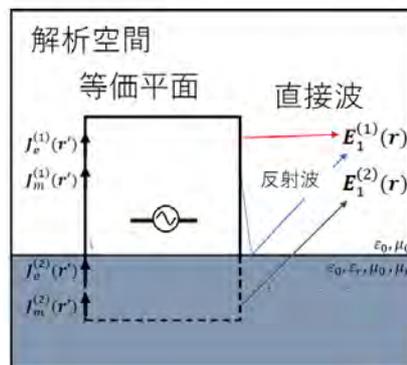


図3 平面大地上の電磁界をFDTD法で求めるための仮想閉曲面

3. 平面大地上の電磁界の計算結果

まず、提案手法の有効性を確認するために簡易なモデルで検討した。検討したモデルは図4に示すように、平面大地上に水平もしくは垂直に微小ダイポールアンテナが配置されたモデルである。これらモデルは厳密解が示されているので、精度の確認が容易に行えるためである。FDTD法のセルサイズは、3 mmとし、解析した周波数は5.8GHzである。平面大地は都市環境を考え比誘電率5.31のコンクリートでモデル化した。図4に示すようにどちらもアンテナは大地から25.8 mm上方に設置している。これは解析した周波数の半波長に当たる。

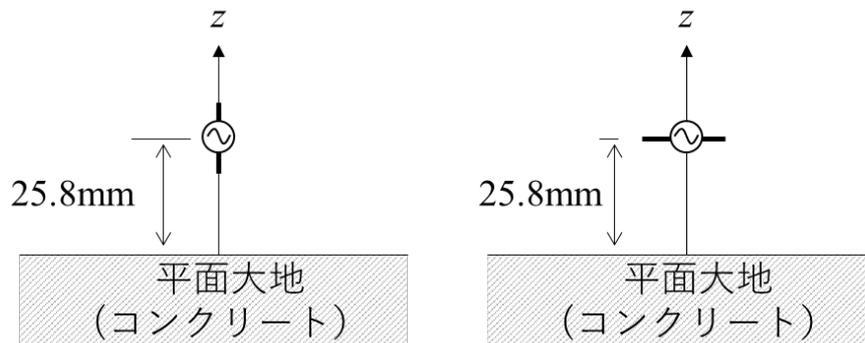


図4 平面大地上の微小ダイポールアンテナモデル (左：垂直、右：水平)

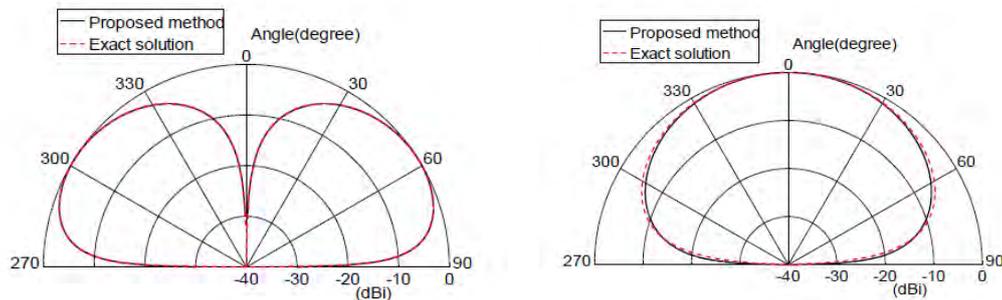


図5 平面大地上の微小ダイポールアンテナの放射電界 (左：垂直、右：水平)

解析結果を図5に示す。実線が本報告の手法、点線が報告されている厳密解を用いて解析した結果である。どちらの結果もよく一致しており、本報告の手法は精度よく解析が出来ることがわかる。

次に、実際の車が大地上におかれた際の放射電磁界をFDTD法を用いて解析した結果を示す。車は図6に示すように実車サイズとした。本報告で用いた車の大きさは、 $L_y=4.9$ m、 $L_x=1.7$ mとしている。また、FDTD法のセルサイズは、先と同じく、3 mmとし、解析した周波数は5.8GHzである。自動車自体の解析領域は $770 \times 1670 \times 770$ セルとした。FDTD法では解析対象の周りに吸収境界が必要になり、吸収境界を含む余白の領域として30セル用いているので全体の解析領域は $800 \times 1700 \times 800$ セルとしている。よって全体の解析セル数は、計約11億セルを用いている。また、FDTD法の計算タイムステップ数は5万ステップとした。そして、車のガラス部分に全長15 mmのダイポールアンテナを貼り付けている。ガラスの比誘電率は6.36とした。平面大地は先と同じく都市空間を考え、コンクリート(比誘電率5.31)としている。解析結果を図6(右)に示す。この結果は、平面大地のがあるとき(点線)と無いとき(実線)を示して、大地に近い部分で差異が見られており、大地の効果が考慮できていることが示されている。

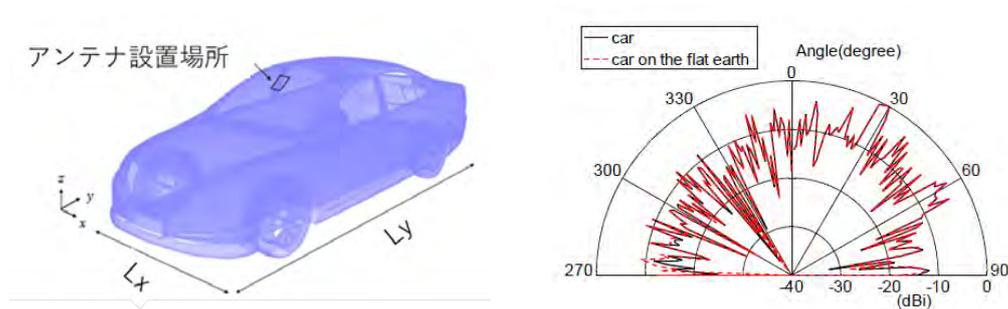


図6 平面大地上の車モデル（左）と平面大地上の放射電磁界の解析結果（右）

4. まとめ

本報告では、大地上を移動する物体の電波の放射状況を調べるために、大地や海面で電波が反射する影響を定量的に評価する手法の開発を行った。電磁界シミュレーション手法はFDTD法に対して有効な方法であった。まず、大地に対して有効なグリーン関数を導出し、実際に厳密解が与えられてる問題の解析を行い、比較する事により提案手法の有効性を確認した。さらに実際の車のモデルの解析を行い、大地の影響が考慮できていることを示した。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。

参考文献

- [1] K. Nishikawa, "Land vehicle antennas," IEICE Trans. commun., vol.E86-B, no. 3, pp. 993-1004, Mar, 2003.
- [2] T. KASHIWA, K. TAGUCHI, and S. IMAI, "Analysis of Radio Wave Propagation for Vehicular Communications in IoT Era-Towards Realization of Intersection Collision Prevention Using Inter-Vehicle Communications—," The IEICE Transactions C, vol. J99-C, no. 10, pp. 468-475, 2016.
- [3] T. Shoji, M. Muramoto, T. Hikage, and M. Omiya, "Radiation patterns of on-vehicle antenna for simplified numerical vehicle models," Proc. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Taipei, Taiwan, 2008.
- [4] O.Kagaya, K.Arai, T.Watanabe, T.Arima and T.Uno, "Generation of Surface Wave in C-band Automotive On-glass Antenna and An Easily Realizable Suppression Method for Improving Antenna Characteristics," IEICE TRANS. COMMUN., vol. E105-B, no. 1, Jan, 2022
- [5] T. Uno, Y. He, and T. Arima, FDTD Method for Computational Electromagnetics: Fundamentals and Practical Applications, Corona Publ., Tokyo 2016