

# 家屋塀で囲まれた住宅地交差点における 720 MHz 帯 FDTD 電波伝搬特性解析

## — 2次元解析結果を用いた3次元解析結果の推定 —

青山 良輔\*, 今井 卓, 田口 健治, 柏 達也 (北見工大)

FDTD Propagation Analysis for 720 MHz Band at Intersection Surrounded by Compound Walls in Residential Area

— Estimation of Three-dimensional Propagation Characteristics from Two-dimensional Ones —

Ryosuke Aoyama\*, Suguru Imai, Kenji Taguchi, Tatsuya Kashiwa (Kitami Institute of Technology)

**Abstract** Recently, an inter-vehicle communication (IVC) system using 720 MHz band has been proposed to avoid car accidents in Japan. Many accidents occur at poor-visibility intersections surrounded by walls such as compound ones. Therefore, it is important to know radio wave propagation characteristics at those intersections to design the system. In this paper, radio wave propagation characteristics for 720 MHz band at an intersection surrounded by compound walls are analyzed by using the three-dimensional FDTD method. Specifically, we investigate qualitative impact of the ground and top of walls on propagation characteristics. Furthermore, methods for estimating three-dimensional propagation characteristics from two-dimensional ones are proposed.

キーワード：車車間通信，交差点，電波伝搬，720 MHz，FDTD 法

(Inter-vehicle communication, intersection, radio wave propagation, 720 MHz band, FDTD method)

### 1. はじめに

現代の車社会において、交差点における自動車同士の出会い頭衝突事故が後を絶たない。近年、この問題を克服するため、日本では720 MHz帯車車間通信を用いた安全運転支援システムが提案されている[1]-[8]。720 MHz帯の電波は、海外の車車間通信で利用が検討されている5.8-5.9 GHz帯と比較して回折効果が高いため、見通しの悪い交差点においてその事故防止効果が期待されている[1]-[2], [5]-[8]。更に、このシステムは自動車、二輪車及び歩行者を含めた近距離緊急衝突防止システムへと拡張される可能性がある。

車車間通信のシステム設計及びアンテナ等の開発において、交差点における電波伝搬特性及びその伝搬メカニズムを把握する事は非常に重要である。また、国内の住宅地においては家屋塀で囲まれた見通しの悪い交差点が多く存在する。これまで、我々は住宅地交差点において塀が電波伝搬特性に与える定性的な影響について明らかにするために2次元でのFDTD電波伝搬解析を行ってきた[8]。一方、定量的な交差点伝搬特性を得るためには、大地及び塀高さを考慮した3次元解析が必要となる。

近年のコンピュータの高速・大容量化に伴い、3次元交差点の電波伝搬特性を解析する事が可能となってきた。しかし、3次元解析は一般的に多くの計算機資源と計算時間を必要とする。そのため、3次元解析結果を簡便に類推する方法も必要になると考えられる。

本研究では、住宅地交差点における塀高さ及び大地を考

慮した720 MHz帯3次元FDTD電磁界解析を行い、それらが伝搬特性に与える影響を明らかにした。更に、2次元の解析結果から3次元の電波伝搬特性を得るための簡易推定方法について検討を行った。

### 2. 住宅地交差点における3次元電波伝搬特性解析

#### (2.1) 家屋塀で囲まれた住宅地交差点

図1に3次元解析のための家屋塀で囲まれた住宅地交差点を示す。ここで、道路は片道一車線を想定している。塀及び大地は軽量コンクリート及びアスファルトとし、それらの電気定数はそれぞれ $\epsilon_r = 2.0$ 、 $\sigma = 0.0278$  S/m及び $\epsilon_r = 4.9$ 、 $\sigma = 0.0761$  S/mとした[9], [10]。

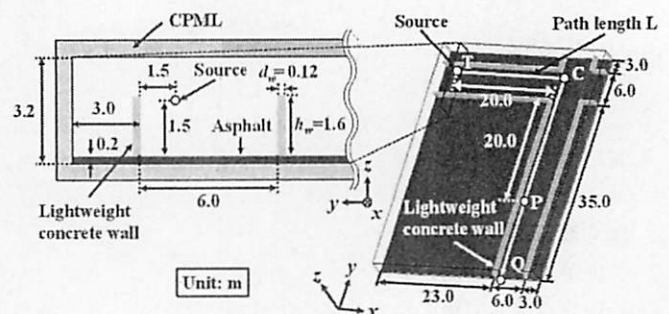


図1 家屋塀で囲まれた住宅地交差点

Fig. 1. Intersection surrounded by compound walls in a residential area.

図中の T 点は波源位置を表しており、ここに垂直偏波を有する微小ダイポールアンテナを設置した。入力には中心周波数  $f_c = 720$  MHz, 帯域半値半幅  $f_b = 150$  MHz の変調ガウシヤンパルスを用いた。また, T 点から交差点までの距離 20 m は, 40 km/h で走行する自動車の停止距離に相当する。TCQ は伝搬損失解析のための観測経路, P 点は電力遅延プロファイル解析のための観測点を表している。尚, FDTD 解析における空間離散間隔は  $\Delta = 1$  cm とした。

### (2.2) 伝搬損失解析

ここでは大地及び塀上端部が伝搬損失に与える定性的な影響を調べた。

図 2 に 720 MHz において大地及び塀上端部が伝搬損失に与える影響を示す。図中において, a) は図 1 の交差点モデル, b) は a) から大地を取り除いたモデル, c) は a) の塀高さ  $h_w$  を  $\infty$  としたモデルの解析結果である。尚, 伝搬損失は波源位置近傍の点を基準とした損失を意味し, 経路の横断方向に車幅  $w_v = 1.8$  m で平均化された値である。

図 2 に示す様に, b) の場合は大地からの反射が無くなるため, 見通し内外領域において伝搬損失が大きくなる。また, c) の場合は塀上端部からの擾乱波が無くなるため, 同様に伝搬損失が大きくなる。但し, 見通し内領域においては塀上端部が与える影響は非常に小さい。これらの結果より, 大地及び塀上端部の存在が伝搬損失に影響を与える事が示された。

### (2.3) 電力遅延プロファイル解析及び到来波推定

次に, 交差点見通し外領域における詳細な電波伝搬メカニズムを明らかにするため, 電力遅延プロファイル解析及び到来波推定を行った。尚, 到来波推定にはポインティングベクトル計算を用いた。これらの結果から, 電波の伝搬経路及びその強度を知ることが可能となる。

一例として, 図 3, 4 及び 5 に図 1 の交差点モデルにおける観測点 P の電力遅延プロファイル, 電力角度プロファイル及び遅延時間を示す。尚, 図中の受信電力値は波源近傍の点における準インパルス応答の最大値を用いて正規化されている。

これらの結果より, 電力遅延プロファイルにおいて電力が大きい最初の 2 波は波源方向から到来する波, その後の波は反対側の塀から到来する反射波に対応している事が分かる。更に, 波源方向からの到来波は大地及び塀上端部の影響により  $\theta$  方向の角度広がりを持っている事が示されている。また, 本解析パラメータにおいては, 塀上端部からの擾乱波, 塀を透過する水平方向伝搬波, 大地反射波の順に強度が大きい。尚, 見通し外領域における他の TCQ 経路上の観測点でも同様の傾向が得られる事を確認している。

### 3. 2次元解析結果を用いた3次元解析結果の推定

ここでは, 2次元解析結果から3次元解析結果を見積もるための簡易推定方法について検討を行った。具体的には, 2

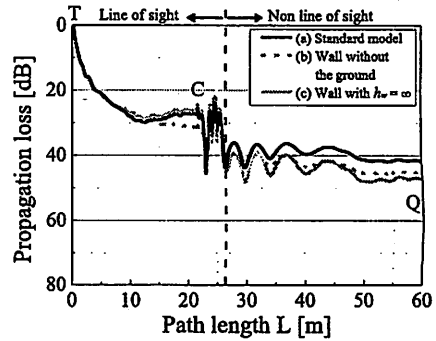


図 2 大地及び塀上端部が伝搬損失に与える影響  
Fig. 2. Effect of the ground and top of walls on propagation loss for 720MHz along TCQ path.

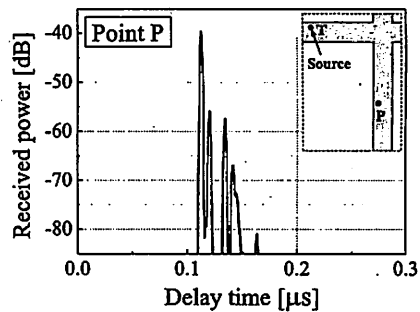


図 3 電力遅延プロファイル  
Fig. 3. Power delay profile.

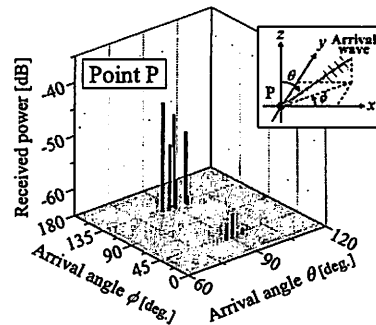


図 4 電力角度プロファイル  
Fig. 4. Power angle profile.

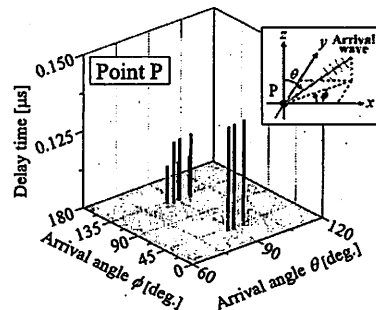


図 5 遅延時間  
Fig. 5. Delay time.

次元交差点解析の結果を用いて、図1の3次元交差点モデルにおけるTCQ経路上の伝搬損失及び観測点Pの電力遅延プロファイルを推定した。

### 〈3・1〉2次元交差点モデル

2次元解析モデルの寸法は、図1に示した住宅地交差点の観測面の高さ $z=1.5\text{m}$ における水平断面の寸法を用いた。また、媒質の電気定数は3次元モデルと同様である。尚、FDTD解析における偏波は $(E_x, H_x, H_y)$ とした。

### 〈3・2〉自由空間伝搬損失の補正

2次元と3次元では電波の伝搬広がり異なるため自由空間伝搬損失に違いがある。そのため、2次元の結果から3次元の結果を推定する際には、その違いを補正する必要がある。具体的には、以下の(1)式を用いてTCQ経路上の全観測点に対して電界値の補正を行った。

$$E_{3D'}(\mathbf{r}) \approx \frac{E_{2D}(\mathbf{r})}{\sqrt{d(\mathbf{r})}} \quad (1)$$

ここで、 $E_{2D}$ 及び $E_{3D'}$ はそれぞれ2次元の解析結果及び2次元解析結果に自由空間伝搬の補正を施した3次元電界の推定値、 $\mathbf{r}$ は2次元モデルにおける波源位置T点から観測点までの位置ベクトル、 $d$ は補正に用いる伝搬距離を表している。前節の3次元交差点解析において見通し外領域では波源方向からの到来波が支配的であることから、 $d$ は図6に示す様にT点から観測点までの直線距離を用いた。

図7に自由空間伝搬損失の違いを補正した3次元解析の推定結果を示す。ここで、 $E_{3D}$ は図1の交差点モデルの3次元解析結果を示している。

図7(a)から、2次元の解析結果に伝搬損失の補正を施す事により、伝搬損失が観測経路全体に渡って実際の3次元解析結果に近づく事が示されている。但し、見通し外領域に関してはまだ誤差が大きい。一方、図7(b)の電力遅延プロファイルにおいても時間軸全体に渡って同様の傾向が見られる。

### 〈3・3〉大地反射波の考慮

次に、前述の次元違いによる自由空間伝搬損失の補正に加えて、大地反射波の考慮を行う。ここでは、解析的に大地反射を考慮するにあたって、塀上端部の擾乱波による影響は考慮していない。

図8に、図1の交差点モデルのTP経路垂直断面における大地反射波の伝搬経路を示す。ここで、図中の $d$ は波源位置Tから観測点P点までの水平方向伝搬距離、 $d_g$ は大地反射波の伝搬距離を表している。また、 $R_g(\theta_g)$ は大地の反射係数、 $\theta$ 及び $\theta_g$ はそれぞれ波源位置Tにおける天頂から大地方向パスへの角度及び大地への波の入射角度を表している。

この場合、P点には主に波源方向から到来する水平方向伝搬波、大地の反射波が到来すると考えられる。従って、大地反射を考慮した3次元電界値 $E_{3D_g}$ は前述の $E_{3D'}$ を用いて

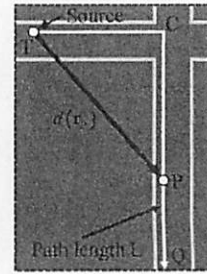
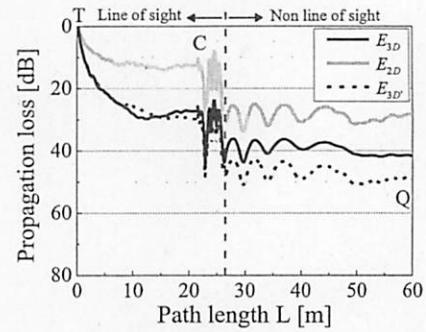
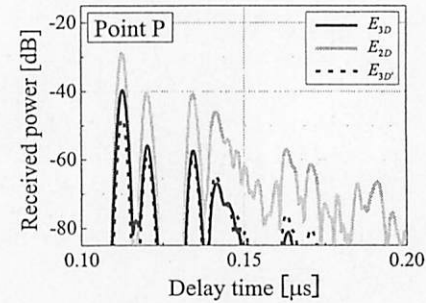


図6 波源方向から到来する波の水平面伝搬経路

Fig. 6. Propagation paths of propagation waves from the direction of a source in the horizontal plane.



(a) 伝搬損失



(b) 電力遅延プロファイル

図7 自由空間伝搬損失の違いを補正した3次元解析結果の推定

Fig. 7. Estimation of three-dimensional propagation characteristics from two-dimensional ones by considering propagation loss due to dimensional difference.

以下の様に推定する事が可能である。

$$E_{3D_g}(\mathbf{r}) \approx \left[ 1 + \frac{d(\mathbf{r})}{d_g(\mathbf{r})} \exp(-jk_0 \Delta L) R_g(\theta_g) \sin^2\{\theta(\mathbf{r})\} \right] E_{3D'}(\mathbf{r}) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta L$ は水平方向伝搬波と大地反射波の経路差、 $k_0$ は自由空間における波数を表している。

図9に大地反射波を考慮した3次元解析の推定結果を示す。図9(a)より、大地反射波を考慮することによって見通し内の伝搬損失は3次元解析結果とほぼ一致する事が分かる。一方、見通し外領域においても3次元解析結果に更に近づく

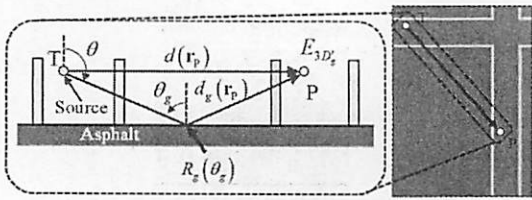
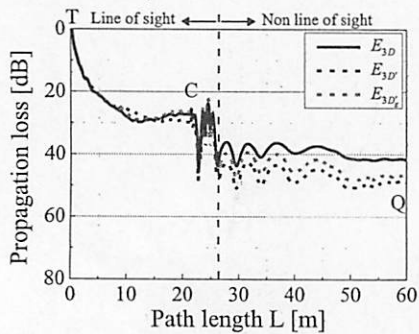
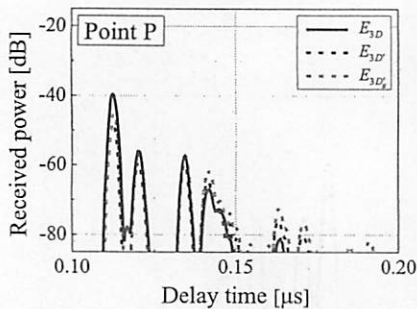


図8 TP 垂直断面における大地反射波の伝搬経路  
Fig. 8. Propagation paths of reflected waves on the ground in TP vertical section.



(a) 伝搬損失



(b) 電力遅延プロファイル

図9 大地反射波を考慮した3次元解析結果の推定  
Fig. 9. Estimation of three-dimensional propagation characteristics from two-dimensional ones by considering reflected waves on the ground.

くが、交差点から離れた地点ではまだ誤差が大きい。これは、現段階では塀上端部の影響を考慮出来ていないためであると考えられる。また、図9(b)の電力遅延プロファイルにおいては、波源方向から到来する波は3次元解析結果に近づくが、その他の反射波に対しては誤差が大きくなる。

#### 4. まとめ

本研究では、家屋塀で囲まれた住宅地交差点における720 MHzの3次元電磁界解析を行った。その結果、大地及び家屋塀の上端部が伝搬損失特性に影響を与えることが明らかになった。また、見通し外領域では波源方向からの到来波が支配的であり、それらの波は大地及び塀上端部の影響により垂直方向の角度広がりを持つ事が示された。また、2次

元の解析結果から3次元伝搬特性を簡便に推定する方法についての検討も行った。その結果、2次元の解析結果に対して自由空間伝搬損失の補正及び大地反射波の考慮を行うことにより、およそ3次元伝搬特性を推定可能である事がされた。現在、更に塀上端部の影響を解析的に考慮する方法について検討を行っている。

今後は自動車及びアンテナを考慮した解析、塀で囲まれた特性の比較を行う予定である。

#### 謝 辞

本研究の一部は独立行政法人日本学術振興会の科学研究費(23560433 及び 22760260)の助成を得たものである。ここに謝意を表する。

#### 文 献

- (1) Ministry of Internal Affairs and Communications Website:  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000025421.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000025421.pdf)
- (2) “700MHz 帯を用いた運転支援通信システムの実験用ガイドライン ITS FORUM RC-006 1.0 版”. ITS Info-communications Forum of Japan (2009-2)  
“Experimental guideline for vehicle communications system using 700MHz band ITS Forum RC-006 Version 1.0,” ITS Info-communications Forum of Japan (2009-2)
- (3) RITA Website:  
<http://www.its.dot.gov/cicas/>
- (4) ETSI Website:  
<http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/IntelligentTransportSystems.aspx>
- (5) S. Sai, E. Niwa, K. Mase, M. Nishibori, J. Inoue, M. Obuchi, T. Harada, M. Sawada, H. Ito, K. Mizutani, and M. Kizu, “UHF band propagation loss characteristics for roadside-to-vehicle and vehicle-to-vehicle communications in urban area,” IEICE Technical Report, AP2009-111, pp. 49-54 (2009-10)  
蔡晟尉, 丹羽栄二, 間瀬公太, 西堀満洋, 井上順治, 小淵真巳, 原田知育, 澤田学, 伊藤治美, 水谷寛正, 木津雅文, “市街地環境におけるUHF帯路車・車車間通信伝搬損失特性,” 信学技報, AP2009-111, pp. 49-54 (2009-10)
- (6) K. Ieda, Y. Murakami, H. Unada, S. Fujimoto, and T. Oshida, “A study on UHF band propagation loss characteristics for inter-vehicle communication at road faces variation,” IEICE Technical Report, AP2010-7, pp. 31-34, (2010-4)  
家田清一, 村上裕一, 井奈波恒, 藤本真吾, “車車間通信におけるUHF帯伝搬損失特性の道路路面違い検討,” 信学技報, AP2010-7, pp. 31-34, (2010-4)
- (7) H. Iwai and I. Sugae, “Path loss and delay profile models for its in 700 MHz band,” IEICE Technical Report, AP2010-8, pp. 35-40, April 2010.  
岩井誠人, 菅江一平, “700MHz帯におけるITS用伝搬損失距離特性モデルおよび遅延プロファイルモデル,” 信学技報, AP2010-8, pp. 35-40, (2010-4)
- (8) K. Taguchi, S. Imai, T. Kashiwa, K. Ohshima, T. Kawamura, “FDTD Analysis of Radio Wave Propagation at Intersection Surrounded by Concrete Block Walls in Residential Area for Inter-Vehicle Communications Using 720 MHz Band,” IEICE Trans. Electron., vol. E95-C, no. 1, pp. 79-85 (2012-1)
- (9) Rec. ITU-R P. 1238-5 : “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz”, ITU-R Recommendations (2007-2)
- (10) E. J. Jaselskis, Jonas. Grigas, and Algirdas. Brillingas : “Dielectric properties of asphalt pavement”, J. Mater. Civ. Eng., Vol.15, pp.427-434 (2003-10)