ビル屋上建造物による電磁波の回折特性の解析

Analysis of the Diffraction of Electromagnetic Fields by Buildings with Rooftop Obstacles.

正会員 岩重二郎[†], 中嶋健太^{††}, 学生会員 上田智也[†]Jiro Iwashige[†], Kenta Nakashima^{††} and Tomoya Ueda[†]

Abstract Estimation of the scattering of electromagnetic waves by buildings and other obstacles is very important for wireless communications in urban areas. In this paper, the electric fields of the waves, which are transmitted from one side of a building to travel over its rooftop to reach the other side were calculated on the basis of the GTD including slope diffraction for the cases where rooftop obstacles are and are not present. The fields as diffracted by a square obstacle and a conductive plate on a rooftop of a building are also discussed. The numerical results show that most of the diffracted waves that travel along the rooftop surface are slope-diffracted, and that installing a conductive plate of suitable height on the building's rooftop is a fairly effective way of improving the received level of electric field strength.

キーワード：都市内電波伝搬, ビル, 屋上導体板, GTD, slope 回折, 回折回数

1. ま え が き

ビルが林立する都市内では、電波はビルの壁やエッジ、その他の建造物等によって複雑に散乱され、その結果一般に通信品質は劣化する。そのため、都市内の伝搬経路を予測することは、電波資源の有効利用の観点からも大変重要となる。例えば、市街地におけるテレビや携帯電話等の電波の伝搬を考察するとき、送信アンテナからの見通し内では比較的強い電界強度が期待できるが、見通し外では電界は急激に弱まる。しかし、その伝搬経路の予測はビル等によって複雑に散乱されるために一般に容易ではない。市街地における電波伝搬経路の推定についてはこれまでに多くの報告がある^{1)~3)}。これらは、主に市街地をビルで囲まれた電波の伝搬路として解析、検討したものである。ビル屋上を超えて伝搬するものについては、Zhang が多数のビル上方の伝搬経路について考察しているが⁴⁾、1つのビルのさらにその屋上建造物まで詳しく検討した報告は筆者らの研究^{5) 6)}以外にはないようである。

本稿では、ビルの屋上を経由してその反対側に達する電波の強さについて、特にビル屋上の塔屋等の建造物による影響について考察するとともに、ビル屋上に導体板を立てることにより、ビルや屋上建造物による電磁波の減衰を抑制できることを示す。解析には GTD^{7) 8)}を用いた。GTD は本来完全導体による回折現象を解析するための手法であるが、ここでは、Burnside らが提案した heuristic な方法^{9) 10)}を用いて媒質定数を考慮し、さらにそれに Luebbers らの方法¹¹⁾を参考にして、ビル屋上の slope 回折まで含めて解析した。

図 1 ビル屋上建造物と座標系。

An obstacle on a building rooftop and its coordinate system.

ITE ROFT2001-15(Jan.2001) で発表

2001 年 9 月 12 日受付, 2002 年 3 月 4 日再受付, 2002 年 4 月 16 日採録

[†]福岡工業大学 情報工学部

(〒 811-0295 福岡市東区和白東 3-30-1, TEL 092-606-4936)

^{††}株式会社・ソフトウェア 開発部

(〒 742-0021 山口県柳井市大字柳井宇東多田野 4806-5, TEL 0820-23-0003)

[†]Fuculty of Information Engineering, Fukuoka Institute of Technology

(3-30-1, Wajirohigashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi 811-0295, Japan)

^{††}Development Division, Yanai Software, Co., Ltd.

(4806-5, Yanai, Yanai-shi, Yamaguchi 742-0021, Japan)

表 1 伝搬経路.
Propagation routes.

I	S Q ₁ Q ₃ Q ₄ Q ₂ P	(G...P, S...T, G...T)
II	S Q ₁ Q ₃ Q ₄ P	(G...P, S...T, G...T)
III	S Q ₃ Q ₄ Q ₂ P	(G...P, S...T, G...T)
IV	S Q ₃ Q ₄ P	(G...P, S...T, G...T)
V	S Q ₄ Q ₂ P	(S...T)
VI	S Q ₄ P	(S...T)
VII	S Q ₂ P	(S...T)
VIII	S B Q ₃ Q ₄ Q ₂ P	(S...T)
IX	S B Q ₃ Q ₄ P	(S...T)
X	S C Q ₁ Q ₃ Q ₄ Q ₂ P	(S...T)
XI	S C Q ₁ Q ₃ Q ₄ P	(S...T)
XII	S P	(S T)

2. ビル屋上エッジによる電磁波の回折

2.1 伝搬経路

図 1 は、波源 S(送信アンテナ)からの電磁波が、ビル屋上の建造物を経由して、ビルの反対側の観測点 P(受信アンテナ)に達する様子を示している。ビル(高さ h , 幅 w) および屋上建造物(高さ h_u , 幅 w_u) は、 z 方向に無限にあるものと仮定し、それらのエッジでの回折点を $Q_i(x_i, y_i)$ ($i = 1, 3, 4, 2$) としている。また、波源 $S(x_S, y_S)$ はビルの左側にあり、観測点 $P(x_P, y_P)$ はビルの右側でビルの高さよりも低い位置にある、つまり、

$$x_S < x_1, \quad x_P > x_2, \quad y_P < y_2$$

としている。

波源、ビルおよび屋上建造物と観測点をこのように配置すると、波源 S から観測点 P へは表 1 に示すような 12 組 32 種の電波伝搬の経路が考えられる。

表中、例えば I の $S Q_1 Q_3 Q_4 Q_2 P$ は波源 S からの電磁波が 4 つのエッジ上の回折点 Q_1, Q_3, Q_4, Q_2 で 4 回回折され、観測点 P へ達することを表し、(G...P) (G は大地に対する点 S のイメージ) は図 1 に示すように、S からの波がいったん大地で反射した後 4 回回折するものを、(S...T) (T は点 P のイメージ) は 4 回回折した後大地で反射して P へ達するものを示している。さらに、VIII~XI の B と C はそれぞれ入射電磁波の $Q_1 Q_5$ 面上、 $Q_3 Q_5$ 面上での反射点を表している。

点 P で観測される全電磁界はもちろん、以上の 32 種の経路のうち点 P へ達するものの和として計算される。

2.2 Q_1, Q_3, Q_4, Q_2 での 4 回回折

(1) $S Q_1 Q_3 Q_4 Q_2 P$ (大地反射なし)

wedge 回折

前節で述べた表 1 の I の場合、つまり波源 S からの電磁波が 4 つのエッジ Q_1, Q_3, Q_4, Q_2 で wedge 回折し、観測点 P へ達する場合を考えよう。この 4 回の wedge 回折界 E_{S1342P}^{wd} は次のように表現できる¹²⁾。

$$E_{S1342P}^{wd} = E_0 \Phi_{S1342P} (\hat{r}_{S1} \times \hat{i} \times \hat{r}_{S1}) \cdot \bar{D}_{S13} \cdot \bar{D}_{134} \cdot \bar{D}_{342} \cdot \bar{D}_{42P}, \quad (1)$$

$$\Phi_{S1342P} = \Phi(r_{S1342P}) \sqrt{\frac{r_{S1342P}}{r_{S1} r_{13} r_{34} r_{42} r_{2P}}}. \quad (2)$$

ここに、 $\hat{r}_{S1}$ は S から Q_1 に向かう距離の単位ベクトル、 $\hat{i}$ は S での電流の単位ベクトル、 r_{lm} ($l, m = S, 1, 3, 4, 2, P$) は点 S, Q_l, Q_m または点 P のうちの 2 点間の距離で、

$$r_{S1342P} = r_{S1} + r_{13} + r_{34} + r_{42} + r_{2P},$$

$$\Phi(r) = \frac{e^{-jkr}}{r}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\lambda: \text{波長}) \quad (3)$$

としている。式 (1) の $\bar{D}_{klm}$ ($k, l, m = S, 1, 3, 4, 2, P$) は、点 Q_l におけるダイアディック回折係数で、

$$\left. \begin{aligned} \bar{D}_{klm} &= \hat{z} \hat{z} D_{klm}^{(s)} - \hat{\varphi}_{lk} \hat{\varphi}_{lm} D_{klm}^{(h)}, \\ D_{klm}^{(s/h)} &= D_{s/h}(r_{kl}, r_{lm}, \varphi_{lk}, \varphi_{lm}, n_l). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、例えば $\hat{\varphi}_{lk}$ は角度 φ_{lk} の右回りに取った単位ベクトル、 n_l は wedge Q_l の外角 $n_l \pi$ を表すパラメータである。さらに、上式の $D_{s/h}$ は soft(s) または hard(h) boundary に対するスカラー回折係数で、次式で示される¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} D_{s/h}(r', r, \varphi', \varphi, n) &= \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}} \left\{ \cot\left(\frac{\pi + \beta^-}{2n}\right) F[kLa^+(\beta^-)] \right. \\ &\quad + \cot\left(\frac{\pi - \beta^-}{2n}\right) F[kLa^-(\beta^-)] \\ &\quad + R_0^{(s/h)} \cot\left(\frac{\pi - \beta^+}{2n}\right) F[kLa^-(\beta^+)] \\ &\quad \left. + R_n^{(s/h)} \cot\left(\frac{\pi + \beta^+}{2n}\right) F[kLa^+(\beta^+)] \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{r'r}{r'+r}, \quad \beta^\mp = \varphi \mp \varphi', \\ F(x) &= 2j\sqrt{x} e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-j\tau^2} d\tau, \\ a^\pm(\beta) &= 2 \cos^2\left(\frac{2n\pi N^\pm - \beta}{2}\right), \\ N^\pm &= \left[\frac{\beta \pm \pi}{2n\pi} + \frac{1}{2}\right] \quad ([] \text{ は Gauss の記号}). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式 (5) の $R_0^{(s/h)}$ と $R_n^{(s/h)}$ は、wedge を構成する 2 平面を 0 面 ($\varphi = 0$)、 n 面 ($\varphi = n\pi$) としたとき、それぞれの面の反射係数で、それらは Fresnel の反射係数 $R^{(s/h)}$ として次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R^{(s)}(\gamma) &= \frac{\sin \gamma - \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2 \gamma}}, \\ R^{(h)}(\gamma) &= \frac{\varepsilon_c \sin \gamma - \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2 \gamma}}{\varepsilon_c \sin \gamma + \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2 \gamma}}, \\ \varepsilon_c &= \varepsilon_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0 \simeq \varepsilon_r - j60\sigma\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに、 γ は入射方向と反射面のなす角、 ε_c は複素比誘電率、 ε_r は比誘電率、 σ は導電率、 λ は使用波長である。

slope 回折

今考えている 4 回回折では、エッジ Q_3 で回折した波は引続いて Q_4 で回折する。 Q_3 での回折後の光線はビル塔屋上面に沿って進むため、いわゆる slope 回折を考慮しなければならない。式 (1) の 4 回の wedge 回折波 E_{S1342P}^{wd} に対する slope 回折波 E_{S1342P}^{sd} は次のように書くことができる¹¹⁾。

$$E_{S1342P}^{sd} = E_0 \Phi_{S1342P} (\hat{r}_{S1} \times \hat{i} \times \hat{r}_{S1}) \cdot \bar{D}_{S13} \cdot \left(\frac{j}{2kr_{34}} \frac{\partial \bar{D}_{134}}{\partial \varphi_{34}} \cdot \frac{\partial \bar{D}_{342}}{\partial \varphi_{43}} \right) \cdot \bar{D}_{42P} \quad (8)$$

結局、 Q_1, Q_3, Q_4, Q_2 で 4 回回折する波 E_{S1342P}^d は、slope 回折まで考慮すると、式 (1) と式 (8) の和として次のように表現される。

$$E_{S1342P}^d = E_{S1342P}^{wd} + E_{S1342P}^{sd} \\ = E_0 \Phi_{S1342P} (\hat{r}_{S1} \times \hat{i} \times \hat{r}_{S1}) \cdot \bar{D}_{S13} \cdot \bar{S}_{1342} \cdot \bar{D}_{42P} \quad (9)$$

$$\bar{S}_{1342} = \bar{D}_{134} \cdot \bar{D}_{342} + \frac{j}{2kr_{34}} \frac{\partial \bar{D}_{134}}{\partial \varphi_{34}} \cdot \frac{\partial \bar{D}_{342}}{\partial \varphi_{43}} \quad (10)$$

(2) $GQ_1Q_3Q_4Q_2P$ (大地反射後 4 回回折)

波源 S からの波が大地で 1 回反射した後に Q_1, Q_3, Q_4, Q_2 で 4 回回折され、観測点 P へ達する波 E_{G1342P}^d を考えよう。この場合は、図 1 からわかるように、式 (1)~(10) の各量を $y_S \rightarrow -y_S$ として、地面の反射係数を掛ければよい。

図 1 の点 g における反射係数は、次のようなダイアデック反射係数 $\bar{R}_{Sg1}$ の形で表現できる。

$$\bar{R}_{Sg1} = \hat{h} \hat{h} R^{(s)}(\gamma_g) + (\hat{t} \hat{t} - \hat{n} \hat{n}) R^{(h)}(\gamma_g). \quad (11)$$

上式の単位ベクトル $(\hat{n}, \hat{h}, \hat{t})$ の関係を図 2 に示す。入射波の進行方向を $\hat{r}_{Sg}$ とし、 $\hat{r}_{Sg}$ が境界面となす角を γ_g 、 $\hat{n}$ を境界面の法線ベクトル、 $\hat{h}$ を入射面 (= 反射面) への垂直ベクトル、 $\hat{t}$ を入射面内の境界面への接線ベクトルとすると、これらの間には次のような関係がある。

$$\left. \begin{aligned} \hat{h} &= \frac{\hat{r}_{Sg} \times \hat{n}}{|\hat{r}_{Sg} \times \hat{n}|}, \quad \hat{t} = \hat{n} \times \hat{h}, \\ |\hat{r}_{Sg} \times \hat{n}| &= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_g\right) = \cos \gamma_g \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

図 2 単位ベクトル $\hat{r}_{Sg}, \hat{n}, \hat{h}, \hat{t}$ と入射角 γ_g .
Unit vectors $\hat{r}_{Sg}, \hat{n}, \hat{h}, \hat{t}$ and an angle γ_g .

したがって、この場合の回折界 E_{G1342P}^d は式 (9) に式 (11) のダイアデック反射係数を掛けた形で、次のように表現できる。

$$E_{G1342P}^d = E_0 \Phi_{G1342P} (\hat{r}_{Sg} \times \hat{i} \times \hat{r}_{Sg}) \cdot \bar{R}_{Sg1} \cdot \bar{D}_{g13} \cdot \bar{S}_{1342} \cdot \bar{D}_{42P}. \quad (13)$$

(3) $SQ_1Q_3Q_4Q_2T$ (4 回回折後大地反射)

波源 S からの波が Q_1, Q_3, Q_4, Q_2 で 4 回回折した後、大地上の点 t (図 1 参照) で反射する波 E_{S1342T}^d は式 (13) と同様に考えて、次のように書ける。

$$E_{S1342T}^d = E_0 \Phi_{S1342T} (\hat{r}_{S1} \times \hat{i} \times \hat{r}_{S1}) \cdot \bar{D}_{S13} \cdot \bar{S}_{1342} \cdot \bar{D}_{42t} \cdot \bar{R}_{2tP} \quad (14)$$

ここに、 $\bar{R}_{2tP}$ はエッジ Q_2 からの波が点 t で反射し点 P へ向かうダイアデック反射係数である。

(4) $GQ_1Q_3Q_4Q_2T$ (4 回回折の前後で反射)

4 つのエッジ Q_1, Q_3, Q_4, Q_2 での 4 回回折の前後で、大地反射する波 E_{G1342T}^d は、式 (13), (14) と同様次のように表現できる。

$$E_{G1342T}^d = E_0 \Phi_{G1342T} (\hat{r}_{Sg} \times \hat{i} \times \hat{r}_{Sg}) \cdot \bar{R}_{Sg1} \cdot \bar{D}_{g13} \cdot \bar{S}_{1342} \cdot \bar{D}_{42t} \cdot \bar{R}_{2tP} \quad (15)$$

以上述べたように、表 1 の II~XI の各回折界も同様に計算できる。特に、II~IV, VIII~XI では、 Q_3 に続いて Q_4 で回折されるため、式 (8) の slope 回折を考慮しなければならない。

2.3 直接界 (SP)・反射界 (ST)

波源 S がビルの高さより充分高く、観測点 P がビルより充分離れてあるときは、 S からの波は、直接 P へ達する。直接波 E_{SP}^i は SP 間の距離を r_{SP} 、その単位ベクトルを $\hat{r}_{SP}$ とすると、次のように書ける。

$$E_{SP}^i = E_0 \Phi(r_{SP}) (\hat{r}_{SP} \times \hat{i} \times \hat{r}_{SP}) \quad (16)$$

同様に、大地上の点 t で反射する反射波 E_{ST}^r は

$$E_{ST}^r = E_0 \Phi(r_{ST}) (\hat{r}_{ST} \times \hat{i} \times \hat{r}_{ST}) \cdot \bar{R}_{StP} \quad (17)$$

となる。

2.4 全電界

全電界 E^t は表 1 の各成分の和として、形式的に次のように表現される。

$$E^t = \sum_I^{XII} (E_{SP}^i, E_{ST}^r, E^d). \quad (18)$$

3. 数 値 計 算

図 3 は、ビルをモデルとした導体壁を用い、周波数 $f=10\text{GHz}$ ($\lambda=3\text{cm}$)、水平偏波 ($\hat{i} = \hat{z}$) での数値計算結果を測定値と比較したものである。送受信アンテナとしては、ダブル・リッジガイド・ホーンアンテナを用

(a) フェンスなし

(b) フェンスあり

図3 導体壁による散乱界の理論値と測定結果との比較 (水平偏波).
($f=10\text{GHz}$, $w=10.4\text{cm}$, $x_S=-54.4\text{cm}$, $y_S=0$, $x_P=30.2\text{cm}$)
Comparison of numerical calculation and experimental results of the fields scattered by a conducting slab (horizontal polarization).

い、ネットワーク・アナライザのタイムドメイン機能により点 S, P の位置決めと周囲からの不要散乱波の除去を行った。また、導体壁はアルミ板で作成し、その幅を $w=10.4\text{cm}$ とし、長さ (図3の紙面に垂直方向) を 2m 、高さ (h) を 1m と充分長くして床からの反射は無視した。同図 (a) では波源の高さを導体壁の上面 ($y_S=0$) と一致させ、観測点 P を、 $y_P=0$ を中心に上下に変化させ、 $y_P=0$ 点での直接波の強さ $|E_{SP}^i|$ を 0dB として表示している。GTD によると、このようなモデルでは2つのエッジ Q_1, Q_2 のいわゆる遷移領域が重なるため、wedge 回折のみでは誤差を生じるのみならず、水平偏波では陰の領域 ($y_P < 0$) では界は 0 となり、 $y_P=0$ で不連続となる。しかしながら、本稿では slope 回折まで含めて計算しているため、その結果は $y_P=0$ で連続となり測定値ともよく一致していることがわかる。

一般にビル屋上の周囲にはフェンス (parapet) が設けられているが、そのモデルとして、導体壁上面両端に高さ ℓ のフェンスをつけた場合について測定し数値計算結果と比較したものが図3(b)で、フェンスの先端の回折点 Q_1, Q_2 と同じ高さに波源 S を置いている。このモデル

では、両端フェンスのために slope 回折波は非常に小さくほとんどが Q_1, Q_2 での wedge 回折波と導体壁上面での反射波であるが、これも数値計算結果は測定値とよく合っている。なお、図3(a),(b)ともに2つの回折点の延長上に波源を置いているため、slope 回折まで考慮しても数値計算結果は $y_P=0$ でその勾配にわずかな不連続が認められる¹³⁾。

図4, 5は水平偏波 (Horizontal; $\hat{i} = \hat{z}$) と垂直偏波 (Vertical; $\hat{i} = \hat{y}$) について、周波数 $f=500\text{MHz}$ 、ビルの大きさは ($w=25\text{m}$, $h=30\text{m}$), $x_2=0$ とし、ビル屋上建造物 ($w_u = h_u = 5\text{m}$, $x_3 = -15\text{m}$) がある場合 (2 roofs), 屋上に何も無い場合 (1 roof), 屋上中央に導体板 ($w_u = 0$, $h_u = 10\text{m}$, $x_3 = x_4 = -12.5\text{m}$) を立てた場合 (plate) を、ビルがない大地のみの場合 (no-building) と比較している。波源 S の位置は ($x_S = -1\text{km}$, $y_S = 5\text{m}$, 60m)、受信点 P は、その高さを $y_P = 1.5\text{m}, 10\text{m}$ とし、ビル右壁面からの距離 ($0 \leq x_P \leq 500\text{m}$) に対する電界強度を $E_0 = 1$ として dB 表示したものである。ビルと屋上建造物はコンクリート ($\epsilon_r = 6.76$, $\sigma = 0.0023[\text{S/m}]$), 大地は $\epsilon_r = 15$, $\sigma = 0.005[\text{S/m}]$ とした。

図4は、携帯電話で使われるであろう観測点の高さ $y_P = 1.5\text{m}$ の場合で、同図 (a),(b) は水平偏波、(c),(d) は垂直偏波であり、また (a) と (c) は波源の高さがビルより低い $y_S = 5\text{m}$ で、(b),(d) はビルやその上の建造物や導体板より高い $y_S = 60\text{m}$ の場合のビルの反対側での電界強度の変化の様子を示している。 x_P の変化とともに電界が大きく振動しているのは、受信点付近での大地による反射の影響である。(a)では、no-building の曲線は他の3つとあまり差はなく、水平偏波で、波源・観測点ともに低い位置にあるときは、大地による反射の影響で、ビルがあるときとないときとの差は小さくて、充分遠方 ($x_P < 300\text{m}$) では導体板付きビルの方がむしろ強くなっていることがわかる。他の3つ ((b),(c),(d)) は、ビルの存在で、 20dB 程度以上の減衰がある。また、波源がビルより低い (a) と (c) を見ると、導体板がある場合 (plate) は、1 roof や 2 roofs より、 10dB 以上減衰が小さいことがわかる。これは、ある程度以上の高さの導体板では、波源からの波が、ビルエッジで複数回回折する波より、導体板で1回回折する波の方が減衰が小さくなるため、その効果は水平偏波 (a) より垂直偏波 (c) の方が大きいことがわかる。波源がビルより高い ((b),(d)) と、ビルエッジでの回折回数が少なくなるため、全体に減衰は小さい。同図 (a),(c) ではまた、1roof と 2roofs の slope 回折を考慮しない (式 (10) の第2項=0) 場合の計算結果を示しているが、slope 回折を含む結果に比べて、いずれも 20dB 以上小さくなっていて、屋上を伝わる回折波はほとんどが slope 回折によるものであることがわかる。一方、同図 (b),(d) では、波源がビルより高い位置にあるために、回折点 Q_2 または Q_4 による1回回折

図 4 屋上建造物付きビルを越えた点 P での受信電界 ($y_P=1.5\text{m}$).
 $(f=500\text{MHz}, h=30\text{m}, w=25\text{m}, h_u=w_u=5\text{m}, x_S=-1\text{km}, E_0=1)$
 Received fields at P diffracted by the building with the
 obstacle ($y_P=1.5\text{m}$).

図 5 屋上建造物付きビルを越えた点 P での受信電界 ($y_P=10\text{m}$).
 $(f=500\text{MHz}, h=30\text{m}, w=25\text{m}, h_u=w_u=5\text{m}, x_S=-1\text{km}, E_0=1)$
 Received fields at P diffracted by the building with the
 obstacle ($y_P=10\text{m}$).

波が主要項となり slope 回折による影響は小さい。

図5は、一般家屋屋上のテレビ受信アンテナの高さを想定した $y_P = 10\text{m}$ の場合で、同じく $0\text{m} \leq x_P \leq 500\text{m}$ での電界強度の変化の様子を示す。図4と同様に、低い波源 ($y_S = 5\text{m}$) のとき、ビル屋上に導体板を立てることにより、ビルによる減衰は抑えられ、その効果は同じく垂直偏波の方が大きいことがわかる。slope 回折の影響も、図4と同様の傾向にある。

他の周波数 (100MHz, 1.5GHz 等) でも同様の計算を行ったが、周波数を変えても図4, 5の結果と同様な傾向であることが分かった。さらに、屋上導体板を導体三角屋根⁶⁾や厚さ0のコンクリート板に置き換えて計算してみても、あまり変化はなく、導体板を設置することがビル屋上での回折回数を少なくすることに寄与していることがわかる。

以上のことから、図1のようにビルを越えて電磁波が伝搬するとき、それによる電磁波の減衰は、ビル屋上に適当な高さの導体板を立てることによってかなり抑制できることがわかった。

なお、ビルを完全導体と仮定すると、その屋上表面を伝わる回折波は水平偏波では式(10)の第1項が0となって slope 回折のみに、垂直偏波では第2項が非常に小さくなってほとんどが wedge 回折となる。

4. む す び

市街地において、基地局の見通し外で電波を利用しようとするとき、ビルの屋上を越えてくる電波を利用することが考えられる。本稿では、そのようなビルとその屋上に建造物がある場合、それらを越えて伝搬する電波の電界強度についてビル屋上での slope 回折まで含め GTD を用いて解析し、その数値計算結果について考察した。その結果、ビルや屋上建造物のエッジによる回折回数が少ないほど受信電界強度が強くなること、したがって、適当な高さの導体板をビル屋上に取り付けることによって回折回数が減り、受信電界強度はかなり改善されること、それは水平偏波より垂直偏波の方が効果が大きいこと、さらに、波源、観測点ともにビルよりも低い位置にある水平偏波では、ビルがないよりもむしろ強い電界強度が得られる場合があること等がわかった。なお、携帯電話や PHS に関しては、最近利用者の急増に伴って、そのサービスゾーンであるセルを縮小する傾向にあるが、上述の結果を逆に利用して回折回数を増やす工夫をすることによって、電磁波の遠方への伝搬を抑えることができる。

また、slope 回折に関しては、導体表面を伝わる垂直偏波の slope 回折波が非常に小さいのに対し、ビルの媒質をコンクリートと仮定したときのビルや屋上建造物の屋上表面を伝わる回折波は水平、垂直偏波ともに slope 回折波が大きく寄与していることが明らかになった。

本稿では、ビルが紙面に垂直で無限に長い2次元問題に限って解析したが、今後、ビルが有限長の場合、あるいはエッジに斜め入射するような3次元問題についても検討する予定である。

〔文 献〕

- 1) A.J.Goldsmith and L.J.Greenstein: "A Measure-ment-Based Model for Predicting Coverage Areas of Urban Microcells", IEEE J. Sel. Areas Commun., **11**, 7, pp.1013-1023 (Sept.1993).
- 2) V.Erceg, A.J.Rustako and R.S.Roman: "Diffraction Around Corners and Its Effects on the Microcell Coverage Area in Urban and Suburban Environments at 900MHz, 2GHz, and 6GHz", IEEE Trans. Vehicular Tech., **43**, 3, pp.762-766 (Aug.1994).
- 3) 今井, 藤井: "レイトレースを用いた市街地対応移動通信伝搬推定システム", 信学技報, **RCS97-37**, pp.31-38 (June 1997).
- 4) W.Zhang: "A Wide-Band Propagation Model Based on UTD for Cellular Mobile Radio Communications", IEEE Trans. Antennas & Propag., **45**, 11, pp.1669-1678 (Nov.1997).
- 5) 岩重, 中嶋, 山下: "ビル屋上に立てた導体板による電磁波の散乱", 映情技報, **ROFT2000-8**, pp.39-44 (Jan. 2000).
- 6) 中嶋, 岩重, 上田: "ビル屋上フェンスが電磁波の散乱に及ぼす影響", 映情技報, **ROFT2001-3**, pp.11-14 (Jan. 2001).
- 7) J.B.Keller: "Geometrical Theory of Diffraction", J.Opt.Soc.Am., **52**, 2, pp.116-130 (Feb.1962).
- 8) R.G.Kouyoumjian and P.H.Pathak: "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in Perfectly Conducting Surface", Proc. IEEE, **62**, 11, pp.1448-1461 (Nov.1974).
- 9) W.D.Burnside and K.W.Burgener: "High Frequency scattering by a Thin lossless dielectric slab", IEEE Trans. Antennas & Propag., **AP-31**, 1, pp.104-110 (Jan.1983).
- 10) R.J.Luebbers: "Finite Conductivity Uniform GTD versus Knife Edge Diffraction in Prediction of Propagation Path Loss", IEEE Trans. Antennas & Propag., **AP-32**, 1, pp.70-76 (Jan.1984).
- 11) R.J.Luebbers: "A Heuristic UTD Slope Diffraction Coefficient for Rough Lossy Wedges", IEEE Trans. Antennas & Propag., **37**, 2, pp.206-211 (Feb.1989).
- 12) 岩重二郎: "複数導体くさびによる電磁波の多重回折", 信学論 (B), **J70-B**, 4, pp.483-488 (Apr.1987).
- 13) P.D.Holm: "A New Heuristic UTD Diffraction Coefficient for Non-perfectly Conducting Wedges", IEEE Trans. Antennas & Propag., **48**, 8, pp.1211-1219 (Aug.2000).

いわしげ じゅういちろう
岩重 二郎 1967年、九州大学工学部通信工学科卒業、同年日本ビクター(株)入社、1968年佐賀大学理工学部助手、1985年福岡工業大学工学部通信工学科助教授、現在同情報工学部情報通信工学科教授。線状アンテナ、電磁波散乱および環境電磁工学などの教育・研究に従事。工学博士、正会員。

なかしま けんたい
中嶋 健太 2001年、福岡工業大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年、(株)ヤナイ・ソフトウェア入社。在学中、電磁波散乱に関する研究に従事。

うえだ ともやす
上田 智也 2000年、福岡工業大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程入学。現在在学中。電磁波散乱に関する研究に従事。