

# 複数の人が存在する場合の伝搬損失特性に関する数値的検討

内布 直毅<sup>1)</sup> · 横田 光広<sup>2)</sup>

## Numerical Examination on Propagation Loss Properties in Case Human Bodies Exist

Naoki UCHINUNO, Mitsuhiro YOKOTA

### Abstract

In cellular mobile communications, the number of customers who use cellular phones indoors is rapidly increasing. Many examinations have been reported about the outdoor propagation loss characteristic, and the propagation model and the presuming method are standardized. On the other hand, although the presumed type based on an experiment has been proposed about the propagation loss characteristic, examination of the physical model which can take into consideration the size of a passage and the number of passersby (passerby density) in detail is carried out. We have so far studied the propagation loss properties for one or two persons from the experimental and numerical points of view. In this study, the shadowing attenuation when people exist between the transmitter and receiver are calculated numerically. In this paper, human body is modelled by lossy dielectric cylinder, and the propagation loss properties for the passerby density and distance between the transmitter and receiver are examined numerically. Similarly, the effect of the propagation loss properties in case human bodies exist in the backward transmitter is calculated numerically.

**Keywords:** Human body modeling, Human bodies shadowing, Fixed terminal, Numerical techniques

### 1. まえがき

近年、携帯電話などの携帯端末が普及し、セルラー移动通信において静止環境下や歩行程度の低速移動環境下での通信が急増している。このような環境下では自ら走行する場合は異なり、周囲の環境変化による伝搬変動を受ける。端末が静止し、その周辺環境が変化する場合の伝搬モデルとして、これまでの屋内環境下で使用する無線 LAN(WLAN) を対象としたチャンネルモデルがある<sup>1)-4)</sup>。屋内環境下で端末が静止している場合に周囲の環境変化を与えるパラメータ(人)を直接考慮できる新たな伝搬モデルが提案されている。提案モデルでは、運動体である人を直径の 2次元円盤(円柱)とし、端末に到来する電波を完全に遮断し、すべてを吸収する「完全吸収体モデル」を仮定している<sup>5)-8)</sup>。これを損失円柱と仮定し、人体が 1 人あるいは 2 人が存在する場合の伝搬損失を電磁界理論に基づいて数値解析を行い、実験における測定結果とよく一致することが確認されている<sup>9)</sup>。本基礎検討をさらに多くの人の数に対応できるように拡張すれば、地下街や屋内の様々な閉空間での人体による伝搬損失特性の解析に応用できる。

本論文では、簡単な人体モデルとして 2次元損失誘電体円柱を取り上げ、複数人体による伝搬損失特性を数値的に検討を行う。数値計算手法として、モーメント法及び FDTD 法を用いる。まず、送受信間に人体が存在し伝搬距離が長い場合について、カスケード接続による近似を用いて受信電力をモーメント法で計算し、通行人密度や伝搬距離に対する伝搬損失特性の検討を行う。また、送信点または受信点付近にも

人体が存在する場合について、後方から到来する電波を近似する有効性について FDTD 法で行い、通行人密度や伝搬距離に対する遮蔽減衰量について検討する。

### 2. 数値解析結果

#### 2.1 送受信間に人体が存在する場合

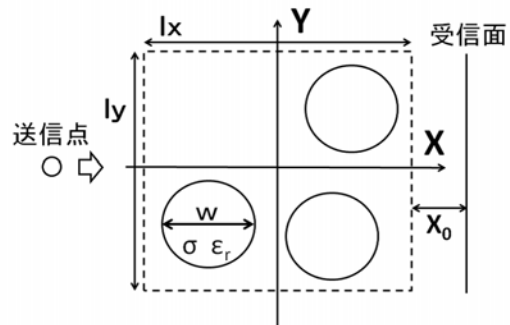


図 1:問題の座標系 1

図 1 に示すように、線波源から放射された電界が領域  $lx \times ly$  に配置された円柱に入射する場合の散乱電界を計算する。円柱中心は  $-lx/2 + w/2 < X < lx - w/2$  および  $-ly/2 + w/2 < Y < ly - w/2$  の範囲内に設置する。観測面  $X_0 = 0.1[m]$  において散乱電界を観測する。円柱の電気定数として、比誘電率および導電率を  $\epsilon_r = 50$  および  $\sigma = 2[S/m]$  とし、線波源の中心が  $(X_c, Y_c) = (-lx/2 - 0.2, 0)$ 、 $(-lx/2 - 0.2, 0.5)$ 、 $(-lx/2 - 0.2, 0.95)[m]$  の 3つの場合について検討する。また、周波数を  $f = 3.35GHz$ 、円柱直径  $w$  を  $0.35[m]$  とし、各円柱のセル分割数を  $N = 40 \times 40$  に設定している。

$ly = 2[m]$  とし、 $lx$  は人口密度によって決めて領域につ

<sup>1)</sup> 電気電子工学専攻大学院生

<sup>2)</sup> 工学教育研究部教授

いて検討を行う。また、通行人密度は、単位面積当たりの人数 ( $\eta$ ) で定義され、 $\eta = 1/4$ [人/m<sup>2</sup>]、 $\eta = 1/3$ [人/m<sup>2</sup>]、 $\eta = 1/2$ [人/m<sup>2</sup>]、 $\eta = 2/3$ [人/m<sup>2</sup>]、 $\eta = 3/4$ [人/m<sup>2</sup>] の場合について検討する。なお、平均的な受信電力を評価するため、試行回数を 150 回としている。円柱をランダム配置する場合、円柱が重なる場合は外している。また、平均相対受信電力は全電界から求められる電力を同一観測点における人体がない場合の受信電力で規格化することにより定義 ( $20 \log_{10}((E^i + E_s)/E^i)$ ) する。そして、 $l_x \times l_y$  を基本領域として、カスケード接続で伝搬距離を伸ばしていく。カスケード接続とは、通行人密度が同じ基本領域を縦列接続しモデル化し近似する方法である。

上記の方法から各密度や距離での相対受信電力を求め、得られた相対受信電力から、人体が存在する領域-1[m]≤y≤1[m] で平均を取り<sup>10)</sup>、各密度、送信点の位置での送受信間距離と伝搬損失の関係性についてのグラフを図2～図4に示す。

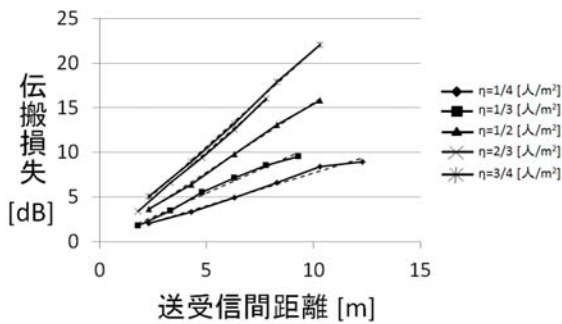


図 2:  $Y_c = 0$ [m] の場合の各通行人密度の伝搬損失

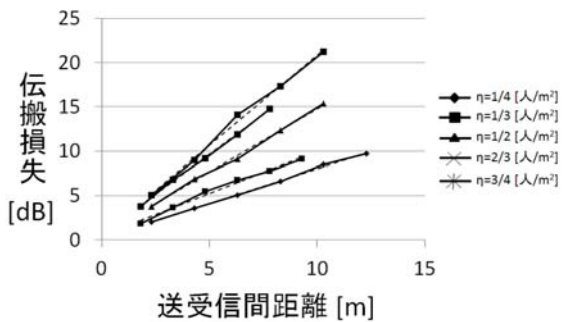


図 3:  $Y_c = 0.5$ [m] の場合の各通行人密度の伝搬損失

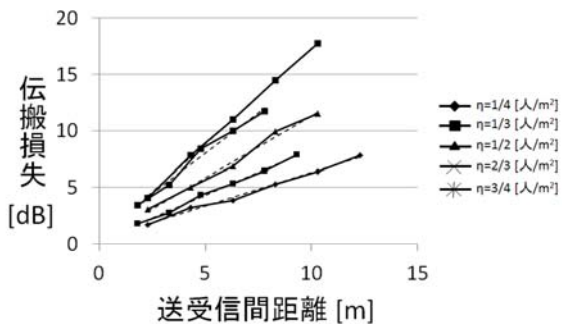


図 4:  $Y_c = 0.95$ [m] の場合の各通行人密度の伝搬損失

図 2～図 4 より、伝搬損失は、距離が長くなるにつれて増加していること、通行人密度が小さくなると、伝搬損失が小

さくなっていることも分かる<sup>10)</sup>。また、点線は、各密度で与えられた数値を最小二乗法によって近似算出されており、各グラフの点線で示しているような直線近似で与えられる。

近似された直線から、単位伝搬距離に対する伝搬損失は送信点  $Y_c = 0$ [m] の場合、 $\eta = 1/4$ [人/m<sup>2</sup>] では約 0.73[dB]、 $\eta = 1/3$ [人/m<sup>2</sup>] では約 1.06[dB]、 $\eta = 1/2$ [人/m<sup>2</sup>] では約 1.56[dB]、 $\eta = 2/3$ [人/m<sup>2</sup>] では約 2.08[dB]、 $\eta = 3/4$ [人/m<sup>2</sup>] では約 2.15[dB] となった。 $Y_c = 0.5$ [m] の場合、 $\eta = 1/4$ [人/m<sup>2</sup>] では約 0.78[dB]、 $\eta = 1/3$ [人/m<sup>2</sup>] では約 0.95[dB]、 $\eta = 1/2$ [人/m<sup>2</sup>] では約 1.43[dB]、 $\eta = 2/3$ [人/m<sup>2</sup>] では約 1.80[dB]、 $\eta = 3/4$ [人/m<sup>2</sup>] では約 2.04[dB] となった。 $Y_c = 0.95$ [m] の場合、 $\eta = 1/4$ [人/m<sup>2</sup>] では約 0.59[dB]、 $\eta = 1/3$ [人/m<sup>2</sup>] では約 0.81[dB]、 $\eta = 1/2$ [人/m<sup>2</sup>] では約 1.09[dB]、 $\eta = 2/3$ [人/m<sup>2</sup>] では約 1.42[dB]、 $\eta = 3/4$ [人/m<sup>2</sup>] では約 1.70[dB] となった。

いずれの送信点の場合においても、送受信間距離に対する伝搬損失は、次式の形で表すことができる。

$$\text{loss}(d) = \alpha(\eta) + \beta \text{ [dB]} \quad (1)$$

ここで、 $d$  は送受信間距離を表し、今回の設定では、 $\beta \approx 0$  となる。

一般に、単位伝搬距離当たりの伝搬損失  $\alpha$  は、伝搬距離や通行人密度などと関係している。図 5 は通行人密度に対する単位伝搬距離に対する伝搬損失  $\alpha$  である。各送信点での数値を最小二乗法により算出したそれぞれの近似直線は、それぞれ点線で表しており、次式となる。

$$\alpha(\eta) = 2.62\eta + 0.203 \text{ [dB/m]} \quad \text{for } Y_c = 0 \text{ [m]} \quad (2)$$

$$\alpha(\eta) = 2.45\eta + 0.244 \text{ [dB/m]} \quad \text{for } Y_c = 0.5 \text{ [m]} \quad (3)$$

$$\alpha(\eta) = 2.24\eta + 0.054 \text{ [dB/m]} \quad \text{for } Y_c = 0.95 \text{ [m]} \quad (4)$$

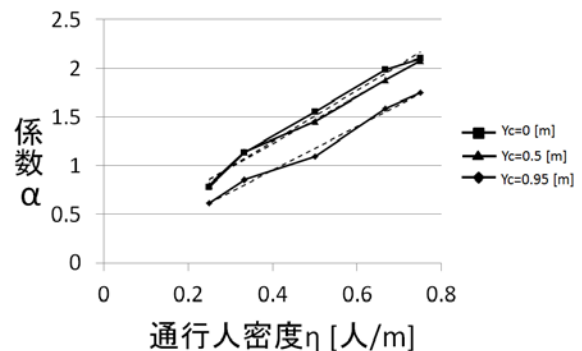


図 5: 通行人密度  $\eta$  に対する係数  $\alpha$

2.2 送信点後方の人体による影響

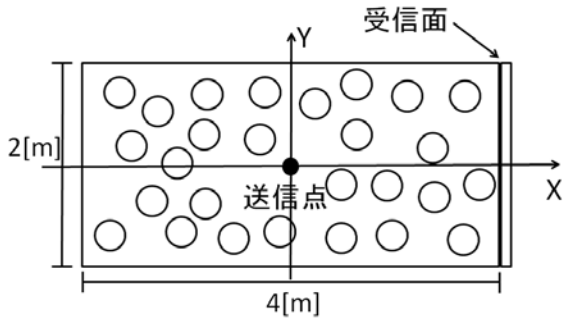


図 6:解析モデル 1

送信点付近に人体が存在することが受信点付近でどのように影響を与えるかについて検討を行う。解析モデル図 6 に示す。解析領域を 4[m]×2[m] とし、この領域内部にランダムに配置し、中心に送信点を置く。伝搬距離と損失の検討と同様に人体を 2 次元損失誘電体円柱と仮定しモデル化し、2 次元損失誘電体円柱も同じ設定で行う。入射波も同じ円筒波を使う。円柱の中心点の X が負領域にある 2 次元損失誘電体円柱を送信点の後方とみなし、送信点からの後方距離が大きい順番に 1 つずつ除いていき、初めに配置された時の受信電力との相対誤差を求め、 $x = 2[m]$  での観測点における受信電力を計算し、送信点後方の人体における伝搬損失の影響を調べる。また、解析領域 4[m]×2[m] 内に 10[人]、20[人]、30[人]、40[人] の場合について検討を行う。受信電力は、FDTD 法を用いて計算する。

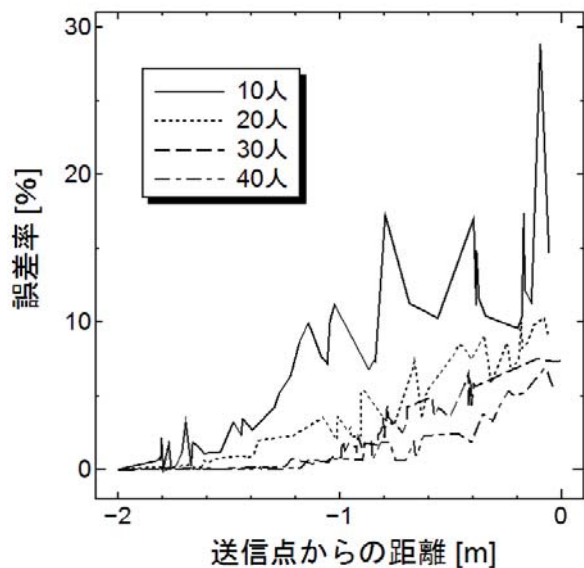


図 7:後方距離に対する誤差率

図 7 は、横軸は送信点から減らしていく人体の距離、縦軸は誤差率を表している。図 7 より、領域内に存在する人数が増加すると誤差率が減少していることが分かる。このことから、人数が増加するにあたって、後方からの影響が大きく受ける送信点からの距離が短くなっている。また、人数が 10[人]

の場合は、ほかの場合に比べて、人数が少なく人体の配置に偏りが出る場合があるため、誤差率の変動が激しくなっている。

表 1 表 1:誤差率で区別した後方距離

誤差率 [%]	送信点からの距離 [m]			
	10人	20人	30人	40人
0.1 [%] 以下	2.000	2.000	1.670~	1.387~
0.1 [%]~ 1.0 [%]	1.805~	1.415~	0.992~	0.850~
1.1 [%]~ 5.0 [%]	1.293~	0.903~	0.502~	0.276~
5.1 [%]~ 10.0 [%]	1.054~	0.191~	~0.501	~0.275
10.1 [%] 以上	~1.053	~0.190		

表 1 は、図 7 の結果を誤差率を 4 つに分け、それに対する送信点からの距離を纏めたものである。表 1 より本論文の場合、領域内に 40[人] 存在する時、受信電力の誤差 10[%] 以下を考慮できるならば、後方にいる人体を取り除いて数値解析を行えることが考えられる。同様に、ほか人数の場合でも考慮できる誤差率によって、後方に存在する人体を取り除くことができ、解析時間の削減するできる。

2.3 受信点後方の人体による影響

受信点の後方にも人体が存在する場合、後方の人体の影響についての検討を FDTD 法を用いて行う。図 8 のように送信面間に縦 2[m]、横 2[m] の基本領域として、受信面を固定したまま基本領域を 4 つカスケード接続(縦列接続)する。そして、人体が 1 のみに存在する場合、1 と 2 に人体が存在する場合、1 と 3 に存在する場合、1 と 4 に存在する場合の 4 パターンで検討を行う。人体はランダムに配置され、各基本領域には 10 人の人体が存在するように設定している。

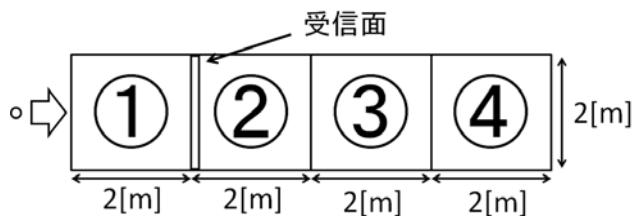


図 8:解析モデル 2

図 9 は、上記の 4 パターンの位置に人体を配置した場合の受信電力を示している。人体が存在する領域-1[m]≤y≤1[m] で平均を取る。平均受信電力はそれぞれ、1 のみの場合は-60.7[dB]、1 と 2 の場合-52.4[dB]、1 と 3 の場合-57.3[dB]、1 と 4 の場合-58.9[dB] となる。このことから、人体が 10 人の場合、受信面のすぐ後方にいる場合では、影響が大きいが分かる。また、受信面から 2[m] 以上離れた位置にいる場合、影響が小さいことが分かる。

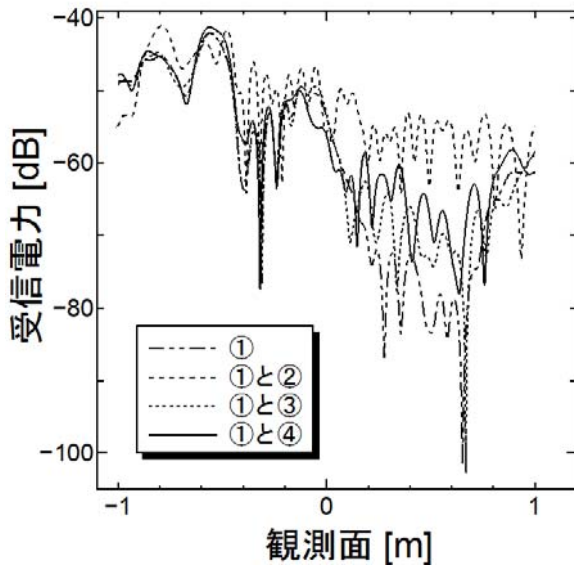


図 9:受信面後方に人体が存在する場合の受信電力

### 3. まとめ

本論文では、複数人体による伝搬損失特性及び送信点後方または受信点後方にも人体が存在する場合の伝搬特性について、数値的に検討を行った。カスケード接続における伝搬損失特性については、5つの通行人密度で検討を行い、送受信点距離ごとの伝搬損失を直線近似できることを示し、単位伝搬距離の伝搬損失が通行人密度の1次関数により近似できることを示した。また、送信点の後方に人体が存在する場合の検討については、4つのパターンで検討を行い、送信点から離れている人体から順番に減らしていくことで、距離と誤差の関係性について、表に示した。受信点の後方にも人体が存在する場合は、受信点と後方の人体の距離を伸ばしていくことで、受信点後方の人体の影響力を示し、後方から到来する電波の近似の有効性を示した。

今後の課題として、伝搬損失特性については、様々な環境に対応できるように通行人密度のデータ数の増加や、地下街などの周りに壁が存在する場合の伝搬損失特性の検討が挙げられる。また、送信点や受信点の後方にも人体が存在する場合は、送信点と受信点の両方に人体が存在する場合の検討をする予定である。

### 参考文献

- 1) R. J. C. Bultitude, "Measurement, characterization and modeling of indoor 800/900 MHz radio channels for digital communications", IEEE Communications Magazine, Vol.25, No.6, 1987.
- 2) H. Hashemi and M. McGuire and T. Vlasschaert and D. Tholl, "Measurement and modeling of temporal variations of the indoor radio propagation channel", Trans. Veh. Technol. Vol.43, No.3, pp.733-737, 1994.

- 3) V. Erceg and L. Schumacher and P. Kyritsi and A. Molisch and D. S. Baum., "TGn Channel Models", Doc. IEEE 802.11-03/904r4, May 2004.
- 4) 水谷, 阪口, 高田, 荒木, "時変動屋内 MIMO 伝送路のドップラスベクトル解析", 信学総大, B-1-14, 2006.
- 5) 藤井, 太田, "屋内・周辺環境下における伝搬変動モデルの提案(その1)", 信学技法, AP2006-55, 2006.
- 6) 太田, 藤井, "屋内・周辺環境下における受信レベル変動特性", 信学技法, AP2006-54, 2006.
- 7) T. Fujii and Y. Ohta, "Dynamic Channel Modeling for Static Mobile Terminals in Indoor NLOS Environments", Proc. of IEEE 2007VTC fall, 2007.
- 8) 太田, 藤井, "人体による電波の遮蔽特性に関する実験的検討", 信学技法, AP2008-159, 2009.
- 9) Y. Sakoda, M. Yokota, Y. Ohta, T. Fujii, "Numerical Analysis of Radio Wave Shadowing by Human Body", IEICE Tech. Report, AP2008-222, 2009.
- 10) 友永千晴, "送受信間に複数の人が存在する場合の伝搬損失特性に関する研究", 平成 24 年度宮崎大学大学院工学研究科修士論文, 2013.