

送受信間に複数の人が存在する場合の伝搬損失特性

友永 千晴^{a)} · 横田 光広^{b)}

Propagation Properties in Case Human Bodies Exist Between Transmitter and Receiver

Chiharu TOMONAGA and Mitsuhiro YOKOTA

Abstract

In cellular mobile communications, the number of customers who use cellular phones indoors is rapidly increasing. We have so far studied the shadowing properties for one or two persons from the experimental and numerical points of view. In this report, the scattering by lossy dielectric cylinders is examined numerically. The lossy dielectric cylinder is considered as the human body and propagation loss is calculated by Method of Moments. At first, the possibility of approximation by cascade connection is investigated as a method of shortening computation time. Next, the propagation loss when people exist between the transmitter and receiver are calculated numerically. As the results, the propagation loss properties for the passerby density and distance are examined.

Keywords: Human body modeling, Propagation loss, Fixed terminal, Numerical techniques

1. まえがき

セルラー移動通信では、昨今、地下街や屋内等の閉空間での使用が急増している。屋外の伝搬損失特性に関しては多くの検討がなされ、その一部は標準化されている¹⁾。一方、地下街や屋内等の閉空間の伝搬損失特性についても数多く検討がなされている。地下街や屋内等では、その中にいる人間が送受信間の伝搬路を遮蔽するため、人間による伝搬損失の増大が重要な要素となる。文献^{2) - 5)}において、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物理モデルが提案されている。

本稿では、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、この損失誘電体円柱による電磁波散乱問題について検討する。未知電界に関する積分方程式をモーメント法により離散化し、得られた未知電界に関する行列方程式をGMRES法⁶⁾により数値的に解く。送受信間距離が長い場合、伝搬損失特性の計算時間は人体の数に応じて長くなる。そこで、まず、計算時間を短縮する方法として、カスケード接続による近似の可能性を調べる。基準領域での伝搬損失特性を用いて送受信間距離が長い場合のそれを推定する基礎検討となる。次に、複数の人体が存在する閉空間における伝搬損失特性の基礎検討として、送受信間距離が比較的短い“屋内の通路相当”の伝搬損失特性の解析を試みる。

2. 定式化

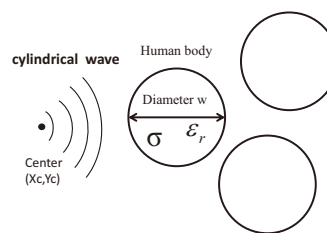


図1. 2次元損失誘電体円柱による電磁波散乱モデル

図1に示すように、人体を2次元損失誘電体円柱によりモデル化する。2次元損失誘電体円柱は、直径 w 、比誘電率 ϵ_r 、導電率 σ とする。このとき、散乱電界は以下の積分表現で与えられる^{7,8)}。

$$E_z^s(\mathbf{r}) = -j\omega\mu_0 \int_{V'} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') J_{eq}(\mathbf{r}') dV' \quad (1)$$

両辺に入射波 $E_z^i(\mathbf{r})$ を加え、具体的な等価電流密度 $J_{eq}(\mathbf{r}')$ 、2次元の場合のグリーンの関数 $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ を代入すると次式になる。

$$E_z(\mathbf{r}) = j\frac{k_0^2}{4} [\epsilon_r(n) - 1] \int_{V'} H_0^{(2)}(k_0\rho) E_z^i(\mathbf{r}') dV' + E_z^i(\mathbf{r}) \quad (2)$$

式(2)をモーメント法により離散化を行うと次の行列方程式が得られる⁸⁾。

$$\sum_{n=1}^N C_{mn} E_n = E_m^i \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

ここで、係数行列の係数は

$$C_{mn} = \delta_{mn} + j\frac{k_0^2}{4} [\epsilon_r(n) - 1] \int_{cell} H_0^{(2)}(k_0\rho) dx' dy' \quad (4)$$

^{a)}電気電子工学専攻大学院生

^{b)}工学教育研究部教授

であり、 E_n および $\epsilon_r(n)$ は n 番目のセルにおける未知電界と比誘電率である。 N は未知電界の総数、 ρ は m 番目のセルと積分変数までの距離、 E_m^i は (x_m, y_m) での入射電界である。モーメント法において、展開関数はパルス関数を採用し、係数 C_{mn} での積分は Richmond 近似により求めている⁸⁾。

3. 数値計算結果

本稿で行う数値計算のパラメータとして、損失誘電体円柱の比誘電率および導電率は $\epsilon_r = 50, \sigma = 2[\text{S/m}]$ としている⁹⁾。入射波は平面波 $E_z^i = E_0 \exp(-jk_0x)$ または円筒波 $E^i = -jE_0H_0^{(2)}(k|\rho - \rho_0|)/4$ を用いる。ここで、 $H_0(2)$ は 0 次第 2 種ハンケル関数である。入射波の振幅を $E_0 = 1.0[\text{V/m}]$ として、周波数 f は $3.35[\text{GHz}]$ に設定する。また、人体の直径 W は $0.35[\text{m}]$ を用いる⁵⁾。なお、本稿で用いるプログラムコードの妥当性を検証するため、厳密解として知られている固有関数展開法と一致していることを確認した。

3.1 カスケード接続による近似

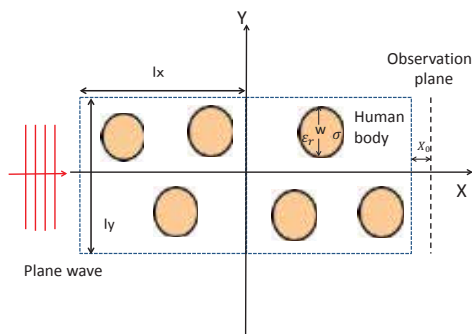
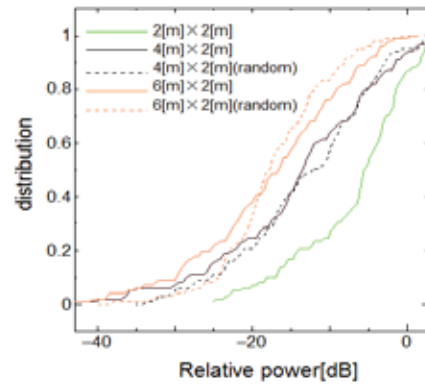


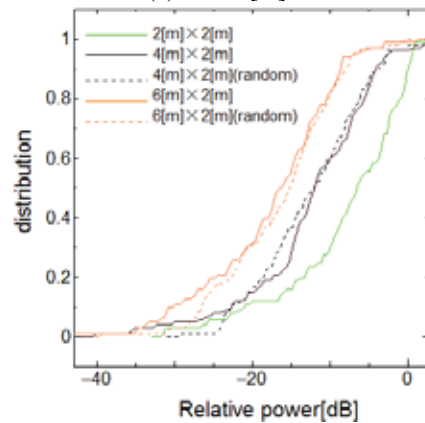
図 2. カスケード接続の解析モデル図

カスケード接続によるモデル化とは、図 2 に示すように通行人密度が同じ基本領域を縦続接続したモデル化で近似計算を行う方法である。これにより、伝搬損失を類推することの可能性の検討を行う。本節では入射波を平面波とし、通行人密度を $\eta = 3/4[\text{人}/\text{m}^2]$ とする。人がいる範囲は ly を $ly=2[\text{m}]$ と固定し伝搬距離 lx を $lx=2[\text{m}], 4[\text{m}], 6[\text{m}]$ と延ばしていく。また、人の中心位置をランダムに 100 回変化させている。

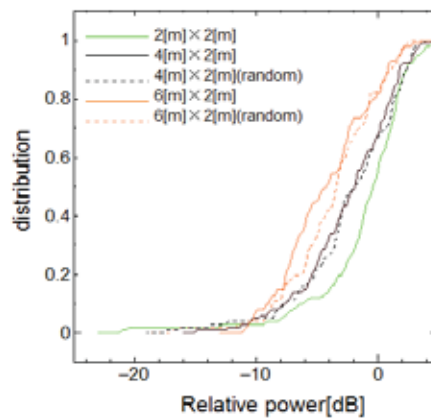
観側面の $Y=0.0[\text{m}]$ 、 $Y=0.5[\text{m}]$ 、 $Y=0.95[\text{m}]$ の点での相対受信電力に対する累積分布を図 3 に示す。伝搬距離を延ばしていくと観側面の 3 点での減衰量も増える傾向が出ている。また領域端付近では減衰が少ないが、これは人の位置がちょうど領域端に接するように設定しているため、人体の影響が少ないからだと考えられる。また、人体を指定された領域全体にランダムに配



(a) $Y = 0 [\text{m}]$



(b) $Y = 0.5 [\text{m}]$



(c) $Y = 0.95 [\text{m}]$

図 3. 相対受信電力に対する累積分布

置させた場合の平均相対受信電力と比較すると、減衰量にあまり差は見られなかった。

3.2 複数人をランダムで配置した場合の伝搬損失特性

次に、複数人をランダムで配置した場合の伝搬損失特性について検討する。図 4 に示す解析モデルにおいて入射波は円筒波とし、通行人密度を $\eta = 1/2[\text{人}/\text{m}^2]$ 、 $2/3[\text{人}/\text{m}^2]$ とする。また、円筒波の中心が $(X_c, Y_c) = (-lx/2 - 0.2, 0), (-lx/2 - 0.2, 0.5), (-lx/2 - 0.2, 0.95)[\text{m}]$ の 3 つの場合について検討する。人が存在する範囲は

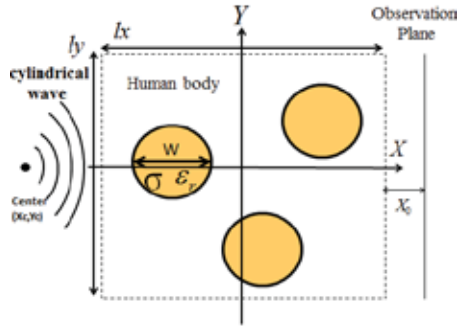


図4. 解析モデル

$l_x = 2[\text{m}], 4[\text{m}], 6[\text{m}], 8[\text{m}], 10[\text{m}]$ 、 $l_y = 2[\text{m}]$ の5つの領域である。また、本節での試行回は150回とした。

図5及び図6は、通行人密度が、それぞれ、 $\eta = 1/2[\text{人}/\text{m}^2]$ 及び $2/3[\text{人}/\text{m}^2]$ の場合の平均相対受信電力を示している。図5及び6から円柱が存在する範囲 $-1[\text{m}] \leq y \leq 1[\text{m}]$ での電界が変化し、伝搬距離が長くなり人数が増えるに従い平均相対受信電力が小さくなっていることがわかる。

3.3 送受信間距離に対する伝搬損失

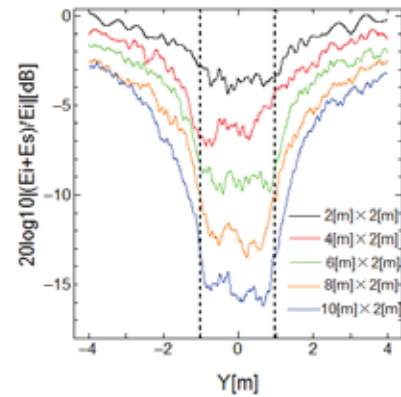
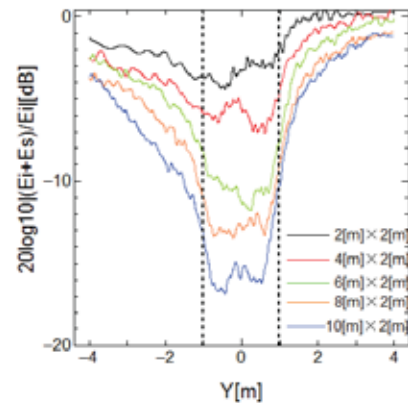
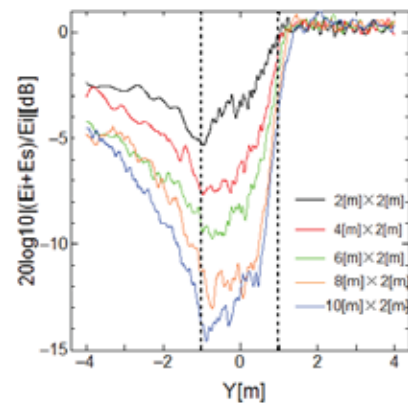
本節では、送受信間距離に対する伝搬損失について検討する。図5及び6の結果を用いて、人が存在する範囲 $-1[\text{m}] \leq y \leq 1[\text{m}]$ で送受信間距離ごとに平均をとり、送受信間距離に対する伝搬損失を算出する。送受信間距離に対する伝搬損失の結果を図7~9に示す。これらの結果から送受信間距離ごとの伝搬損失は伝搬距離を延ばしていくと増加していることが分かる。また、最小二乗法により算出した近似直線から、単位伝搬距離に対する伝搬損失は、 $Y_c = 0[\text{m}]$ では $\eta = 1/2[\text{人}/\text{m}^2]$ は約 $1.46[\text{dB}]$ 、 $\eta = 3/4[\text{人}/\text{m}^2]$ は約 $2.17[\text{dB}]$ 、 $Y_c = 0.5[\text{m}]$ では $\eta = 1/2[\text{人}/\text{m}^2]$ は約 $1.51[\text{dB}]$ 、 $\eta = 3/4[\text{人}/\text{m}^2]$ は約 $2.01[\text{dB}]$ 、 $Y_c = 0.95[\text{m}]$ では $\eta = 1/2[\text{人}/\text{m}^2]$ は約 $1.08[\text{dB}]$ 、 $\eta = 3/4[\text{人}/\text{m}^2]$ は約 $1.55[\text{dB}]$ となった。

4. まとめ

本稿では、複数の人体が存在する空間における伝搬損失特性の検討として、カスケード接続による近似の可能性や送受信間距離が比較的短い“屋内の通路相当”の伝搬損失特性の検討を行った。カスケード接続による近似の可能性については、通行人密度を $\eta = 3/4[\text{人}/\text{m}^2]$ とする基本領域を縦続接続したものと、指定された領域全体にランダムに人体を配置したモデルのそれぞれの観側面での平均相対受信電力を比較した。平均相対受信電力の結果から減衰量は僅差であり、カスケード接続による近似の有効性を示した。次に、平均相対受信電力

の人が存在する範囲で送受信間距離ごとに平均をとり、送受信間距離に対する伝搬損失を検討した。その結果、伝搬距離を延ばしていくと伝搬損失が増加し、送受信間距離 d に対するの伝搬損失は $\text{loss}(x) = \alpha d + \beta[\text{dB}]$ により近似できることを示した。

今後の課題としては、一般に単位伝搬距離当たりの伝搬損失 α は、伝搬距離や通行人密度などの関数となる。そこで、今後 η の数を増やし、伝搬損失 α と通行人密度 η の関係を明らかにすること、また、試行回数

(a) $Y_c = 0[\text{m}]$ (b) $Y_c = 0.5[\text{m}]$ (c) $Y_c = 0.95[\text{m}]$ 図5. $\eta = 1/2[\text{人}/\text{m}^2]$ の場合の平均相対受信電力

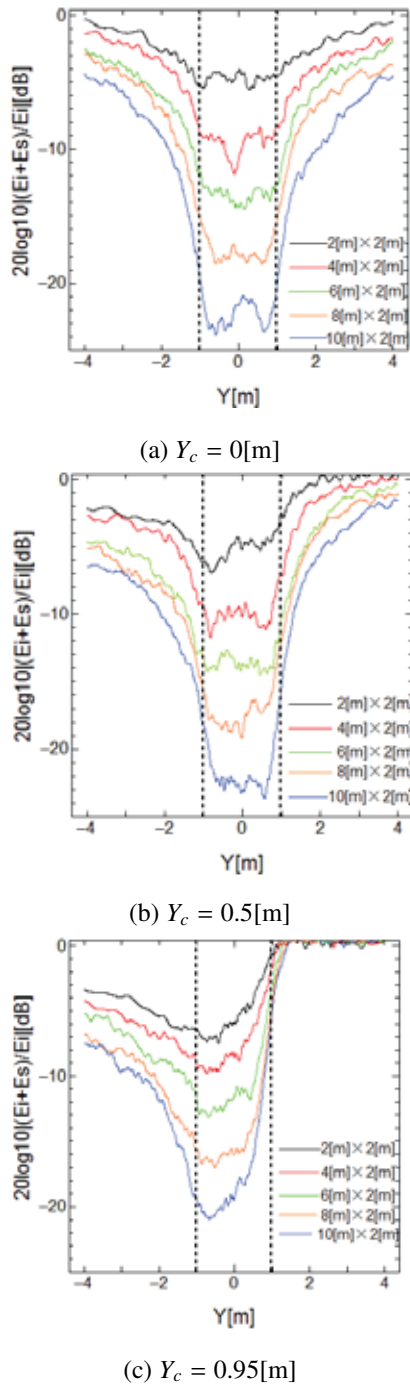


図6. $\eta = 3/4[\text{人}/\text{m}^2]$ の場合の平均相対受信電力

を増やし平均相対受信電力の精度を高くすること、より現実的なモデルである壁が存在する場合の伝搬損失について検討することなどが挙げられる。

参考文献

1) 奥村, 他: “陸上移動通信における伝搬特性の実験的研究”, 通研実報, vol. 19, no. 19, pp. 1705-1764, 1967.

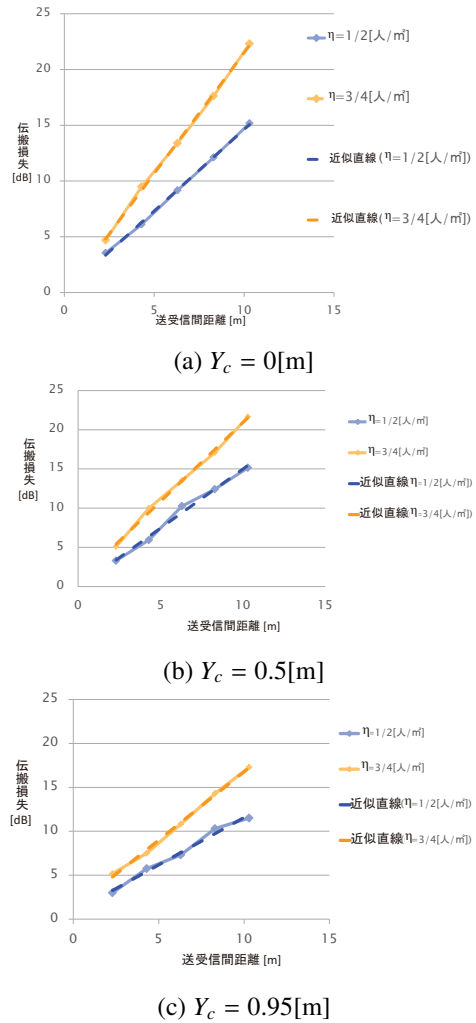


図7. 通行人密度を変化させた場合の送受信間距離に対する伝搬損失

2) 太田, 藤井: “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.

3) 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.

4) T. Fujii and Y. Ohta: “Dynamic Channel Modeling for Static Mobile Terminals in Indoor NLOS Environments”, Proc. of IEEE 2007 VTC fall, 2007.

5) 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.

6) 藤野, 張: “反復法の数理”, 朝倉書店, 1996.

7) R.F. Harrington: “Field Computation by Moment Methods”, IEEE PRESS, 1968

8) A. Ishimaru: “Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering”, Prentice Hall, 1991.

9) C. C. Johnson and A. W. Guy: “Nonionizing electromagnetic wave effects in biological materials and systems”, Proc. IEEE, vol.60, pp.692-718, 1972.