

3.35GHz 及び 4.5GHz における人体モデルの遮蔽特性に関する数値的検討

丸下 翔大¹⁾ ・ 横田 光広²⁾

Numerical Study on Radio Wave Shadowing by Human Bodies Model at 3.35GHz and 4.5GHz

Shota MARUSHITA, Mitsuhiro YOKOTA

Abstract

Currently, wireless communication is necessary in our daily lives through various products and facilities such as mobile phones, smart watches, PCs, etc. 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 channel model which can take into consideration the size of a passage and the number of passersby (passerby density) in detail is carried out. So far, the propagation loss properties for one or two persons from the experimental and numerical points of view have been studied in our laboratory. In this study, the shadowing properties are examined for the 5th Generation frequency range by using the FDTD method when people exist between the transmitter and receiver. In this memoir, the two dimensional indoor model is built and the wave propagation for the specific condition such as the position of Tx and Rx is calculated numerically. The electric field distribution in indoor is examined for various kind of condition.

Keywords: Numerical techniques, FDTD method, Propagation loss, Mobile communication terminal

1. まえがき

現在無線通信は携帯電話をはじめスマートウォッチ、PC等、様々な製品・設備を通して我々の生活に根づいている。インターネット接続デバイスは世界の人口よりも多く、日本の総務省が発表する携帯電話の年度別人口普及率の推移では、平成17年の普及率73.3%から平成27年の普及率107.1%と10年間で約30%増加している¹⁾。そのスマートフォン、タブレット等の普及により移動通信への通信量が急増しており、通信速度の上昇や電磁波の混乱を避けるために周波数の割当を行っている。現在は第4世代移動通信システムのLTEが主流であるが、今後は周波数が3.6~4.2GHz帯、4.4~4.9GHz帯、28GHz帯が割り当てられている第5世代の普及を目指し技

術開発が行われている。そのため莫大な手間と時間が掛かる実験に取って代わるシミュレーション技術が重要視されている²⁾。

20年ほど前はアンテナや基地局の設計は手計算と実験が主流であったが、現在では電磁界シミュレータは設計に必要不可欠なものとなっている。必要不可欠という意味は、シミュレータを使うことによって試作・試行回数を減らして大幅に予算・時間コストを減らせることを意味している。また、問題が生じたときに定量的な電界分布がどうなっているからそのような現象が起こるということを突き止めることができる³⁾。スマートフォン、タブレット等の場合は静止環境下や歩行程度の低速移動環境下での通信が多く、このような環境下では自ら走行する場合とは異なり、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)を対象としたチャネルモデル

¹⁾ 工学専攻大学院生

²⁾ 工学教育研究部教授

がある⁴⁾⁻⁷⁾。このモデルは特定の屋内環境下での測定結果に基づいて作成されたモデルであり、人の数や歩行速度など周囲の環境変化を与えるパラメータを直接考慮できる物理モデルではない。そこで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として人体を直接考慮できる新たな伝搬モデルが提案されている⁸⁾⁻¹¹⁾。人体を損失円柱と仮定し、人体が1人あるいは2人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¹²⁾。また送受信間に複数の人体が存在する場合の伝搬損失特性が数値解析により検討されている¹³⁾。

前述のシミュレーションには、二次元モデルが採用されている。近年、2020年に向けて使用周波数がさらに高くなる5Gを想定した帯域での検討が望まれる。これをシミュレーションすることでより低コストな検討が可能となり、実装段階へより早くシフトすることが可能になると期待できる。

電磁界解析分野で用いられている数値解析の1つにFDTD法がある。この手法は、マクスウェル方程式を直接、数値解析する手法として提案され、散乱問題や導波問題など電磁界解析の様々な分野で用いられている。マクスウェル方程式の時間空間に関する微分を差分に置き換えて差分方程式に変換し、電界と磁界を時間軸方向の交互に計算する手法である。マクスウェルの方程式をそのまま差分化するため、単純な演算操作ができ、プログラミングが非常に容易である。また、時間領域の解析手法であるため、直接時間軸での値を観測できる特徴がある¹⁴⁾。

本論文では、第5世代移動通信で用いられる周波数帯に対する2次元人体モデルにおける電波遮蔽特性をFDTD法^{14),15)}により数値的に検討している。伝搬方向が長い場合の遮蔽特性の検討において、カスケード接続の考えを導入している。通行人密度を変化させた場合の電波遮蔽について、4Gを想定した3.35GHzと5Gを想定した4.5GHzとで検討する。PML吸収境界条件を適用し、送信アンテナは円筒波を用いている。2次元人体モデルを円柱として、複数人体による伝搬損失特性の数値的検討を行う。本論文では2.0[m]×2.0[m]の基本領域内に人体4~7人をランダムに配置し、その基本領域を3つ縦続接

続し100回試行した結果の平均を求め、異なる周波数に対する比較を行う。

2. カスケード接続による近似

カスケード接続とは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を行う方法である。これにより、電波遮蔽特性を類推することの可能性の検討を行う。図1は、カスケード接続のイメージ図である。

人体を直径35[cm]の損失誘電体円柱でモデル化している。また、カスケード接続の基本領域は2×2[m]であり、本論文では3つの基本領域を縦続接続したモデルでの解析を行い、図2に示すように各基本領域を順にA,B,Cエリアとし、Aエリアの中心に送信点を置いた。なお、受信面は送信点からの距離 $x_0 = 1, 3, 5$ [m]の位置にあり、Y方向に2[m]の幅である。これはそれぞれ各エリアの右端に相当する位置である。

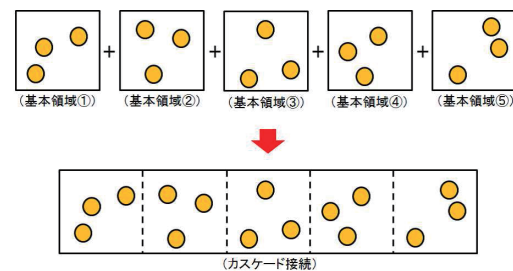


図1: カスケード接続

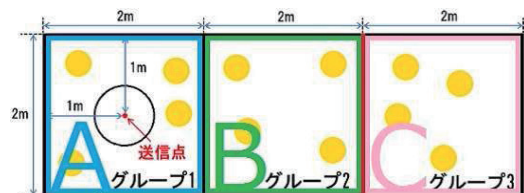


図2: エリア設定

3. 複数人をランダムに配置した場合の伝搬損失特性

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。今回入射波は、実際の環境下で使用されるものに近付けるため円筒波とし、カスケード接続の基本領域の通行人密度を $\eta = 4/4[\text{人}/\text{m}^2]$ 、 $\eta = 5/4[\text{人}/\text{m}^2]$ 、 $\eta = 6/4[\text{人}/\text{m}^2]$ 、 $\eta = 7/4[\text{人}/\text{m}^2]$ とする。また、前述のとおり円筒波の中心は前節の A エリアの中心 $(X_c, Y_c) = (1, 1)[\text{m}]$ であり、各通行人密度において周波数を 3.35 GHz、4.5 GHz の 2 つの場合について検討する。人が存在する範囲は A, B, C エリアである。今回は精度の高い結果を得られるように試行回数を増やし、100 回とした。円柱が互いに重なる場合や、入射点に重なる場合は外している。そのため、入射点を中心に半径 0.35[m] の人体侵入禁止領域を設定している。これは人体の直径と同値である。

基本領域の通行人密度を $\eta = 4/4[\text{人}/\text{m}^2]$ とした場合の 100 回 Loop 計算の中のある 1 回の人体配置の様子を例として図 3 に示す。なお、X, Y 軸の原点 0 は入射点の位置としている。

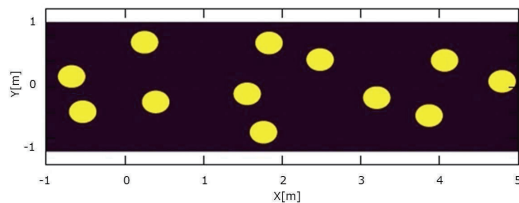
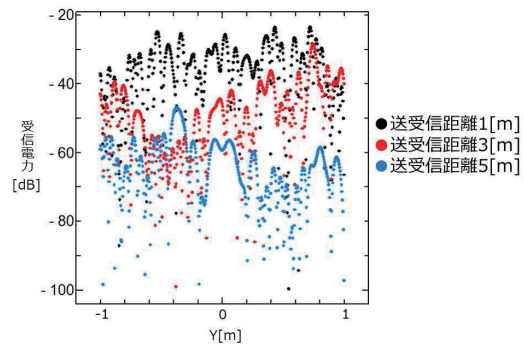


図 3: ランダム 12 人のモデル

3.1 使用周波数 3.35GHz の場合

使用周波数 3.35GHz の場合の人体と仮定した誘電体円柱の比誘電率および導電率はそれぞれ $\epsilon_r = 50$ 、 $\sigma = 2[\text{S}/\text{m}]$ とする。通行人密度 η が $4/4[\text{人}/\text{m}^2]$ のときの受信面における相対受信電力を図 4 に示す。この図は、人体配置を 100 回行い、それぞれ 1 回ごとに受信電力を解析したものを 100 回分平均化したものである。さらに図 4 を受信面で平均化し、各送受信間距離における平均値とした。これを伝搬距離と通行人密度を変化させた場合の各観測点における



$\eta=4/4 [\text{人}/\text{m}^2]$ の場合

図 4: 送受信距離の違いによる受信電力分布

平均相対受信電力を図 5 に示す。通行人密度 η は $4/4[\text{人}/\text{m}^2]$ 、 $5/4[\text{人}/\text{m}^2]$ 、 $6/4[\text{人}/\text{m}^2]$ 、 $7/4[\text{人}/\text{m}^2]$ の 4 つのパターンのそれぞれの場合について入射点から 1[m]、3[m]、5[m] に位置で Y 方向に 2[m] の受信面を設定し、伝搬距離と通行人密度の変化による伝搬損失特性を検討した。

送受信間距離が延びるにつれて伝搬損失が増加していくことが確認できる。また、図 5 より最小二乗法により算出した単位伝搬距離に対する伝搬損失は $\eta=4/4[\text{人}/\text{m}^2]$ では約 7.01[dB]、 $\eta=5/4[\text{人}/\text{m}^2]$ では約 8.68[dB]、 $\eta=6/4[\text{人}/\text{m}^2]$ では約 6.92[dB]、 $\eta=7/4[\text{人}/\text{m}^2]$ では約 9.42[dB] となった。

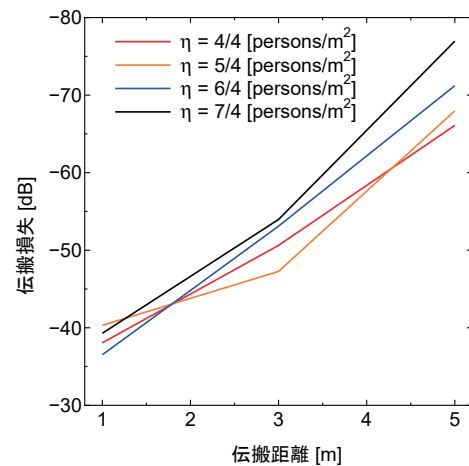


図 5: 3.35GHz での伝搬距離に対する伝搬損失

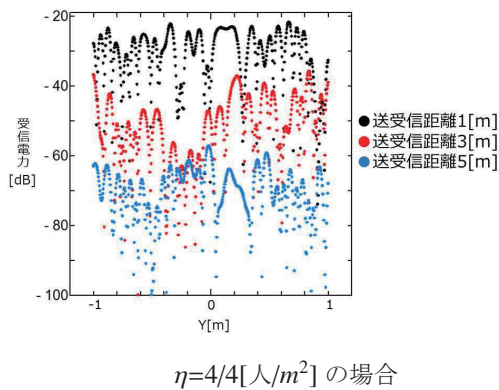


図 6: 送受信距離の違いによる受信電力分布

3.2 使用周波数 4.5GHz の場合

使用周波数 4.5GHz の場合の人体の比誘電率と導電率はそれぞれ $\epsilon_r = 40.228$ 、 $\sigma = 3.1246[S/m]$ とする。通行人密度 η が $4/4[人/m^2]$ のときの受信面における相対受信電力を図 6 に示す。この図は、人体配置を 100 回行い、それぞれ 1 回ごとに受信電力を解析したものを 100 回分平均化したものである。さらに図 6 を受信面で平均化し、各送受信間距離における平均値とした。これを伝搬距離と通行人密度を変化させた場合の各観測点における平均相対受信電力の様子とし、図 7 に示す。通行人密度 η は $4/4[人/m^2]$ 、 $5/4[人/m^2]$ 、 $6/4[人/m^2]$ 、 $7/4[人/m^2]$ の 4 つのパターンのそれぞれの場合について入射点から 1[m]、3[m]、5[m] に位置で Y 方向に 2[m] の受信面を設定し、伝搬距離と通行人密度の変化による伝搬損失特性を検討した。

図 7 より、最小二乗法により算出した単位伝搬距離に対する伝搬損失は $\eta=4/4[人/m^2]$ では約 9.87[dB]、 $\eta=5/4[人/m^2]$ では約 5.12[dB]、 $\eta=6/4[人/m^2]$ では約 5.68[dB]、 $\eta=7/4[人/m^2]$ では約 10.15[dB] となった。

4. まとめ

本論文では、3.35GHz と 4.5GHz の 2 種類の周波数に対する 2 次元人体モデルに対する遮蔽特性を数値的に検討した。また、伝搬方向に長い場合を検討する際に有効となるカスケード接続を用いて、伝搬

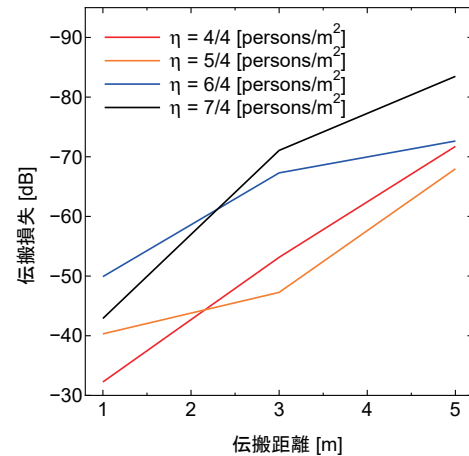


図 7: 4.5GHz での伝搬距離に対する伝搬損失

距離に対する損失特性を計算した。3.35GHz は第 4 世代移動通信を、4.5GHz は第 5 世代移動通信を想定している。本論文での 4 つの通行人密度での平均受信電力を比較すると、2 つの周波数に対して伝搬距離が延びるにつれ一様に減衰するが、3.35GHz での平均受信電力が 4.5GHz に比べて 15.36[dB] ほど高い結果となった。

伝搬距離に対する伝搬損失特性では、どちらの周波数の場合も伝搬距離が延びるにつれ一様に減衰した。この検討は近似直線により求めたものである。全体的な受信電力としては使用周波数 3.35GHz の方が高い結果であるにも関わらず、周波数 4.5GHz の場合は人体が多いほど単位伝搬距離に対する伝搬損失が少ない結果となった。高周波になるにつれ試行回数や基本領域の数を増やした場合での検討が必要不可欠である。

今後の課題としては、静止環境下での遮蔽の人体の方向への依存や、地下街モデルに壁などを設置しより実環境に近いづけた場合の検討、距離を延ばすことでの通行人密度と伝搬距離による減衰や、地下街での実験によるシミュレーション値との比較検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 総務省: “新世代モバイルシステムの技術的条件について”, 情報通信審議会, 資料番号 1-1, Oct.

- 2016.
- 2) 安達 三郎: “電波伝送工学”, コロナ社, 1981.
 - 3) 平野 拓一: “電磁界シミュレータ利用の勘所”, 電子情報通信学会誌, vol.100, no.5, 2017.
 - 4) 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, pp.5–12, 1987.
 - 5) H. Hashemi, M. McGuire, T. Vlasschaert, and D. Tholl: “Measurement and modeling of temporal variations of the indoor radio propagation channel”, Trans. Veh. vol.43, no.3, pp.733–737, 1994.
 - 6) V. Erceg, L. Schumacher, P. Kyritsi, A. Molisch, and D.S. Baum: “TGn Channel Models”, Doc. IEEE 802.11-03/904r4, May, 2004.
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) T. Fujii and Y. Ohta: “Dynamic Channel Modeling for Static Mobile Terminals in Indoor NLOS Environments”, Proc. of IEEE 2007VTC fall, 2007.
 - 11) 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.
 - 12) M. Yokota, Y. Ohta, and T. Fujii: “Radio Eave Shadowing by Two-Dimensional Human Body Model”, IEICE Trans. Commun., vol. E101-B, no. 1, pp.195–202, 2018.
 - 13) 内布 直毅: “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 26 年度宮崎大学工学研究科修士論文, 2014.
 - 14) 宇野 亨: “FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析”, コロナ社, 1998.
 - 15) A. Taflov: “Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method”, Norwood, MA, Artech House 1995.