

2次元部屋に存在する人体モデルによる 電波伝搬損失の数値的検討

長川 裕耶^{a)}・横田 光広^{b)}

Numerical Examination on Radio Wave Propagation Loss by Human Body in Two-Dimensional Room Model

Yuya NAGAKAWA, 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. 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 attenuation when people exist between the transmitter and receiver are calculated numerically. In this thesis, 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 by using the FDTD method. The electric field distribution in indoor is examined for various kind of condition.

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

1. はじめに

我々が使用する身近な無線通信設備の一つに携帯電話がある。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は平成27年の普及率107.1%である¹⁾。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)を対象としたチャンネルモデルがある²⁾⁻⁵⁾。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⁶⁾⁻⁹⁾。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¹⁰⁾⁻¹¹⁾。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る。

本論文では、2次元屋内モデルに人体モデルとして損失誘電体円柱を設置して、送信点の位置、人体の配置位置、コンクリート壁の含水量の減少による導電率を変化させ伝搬損失特性を数値的・視覚的に検討を行う。数値計算手法として、FDTD法を用いる。

2. 部屋モデルでの数値解析

2.1 問題設定

図1に解析する基本屋内モデルを示す。屋内環境は廊下と大きさの違う二つの部屋を想定し、地面からある高さで屋内を輪切りにした面についての屋内モデルを解析する。基本屋内モデルのパラメータについては、セルサイズ 4×10^{-3} m、セル数 4850×5575 、解析領域 19.4×22.3 m、

a)電気電子工学専攻大学院生

b)電気システム工学科教授

壁の材質をコンクリートとして壁の比誘電率 $\epsilon_r = 5.0$ 、壁の導電率 $\sigma = 0.02 \text{ S/m}$ とし、壁の厚さを 0.2 m 、大きい方の部屋を $17 \times 8.5 \text{ m}$ 、小さい方の部屋を $13 \times 8.5 \text{ m}$ と設定した。入射波は円筒波を用いており、波源は赤点(975、3618)、青点(3300、4254)、緑点(1500、1404)、黄点(3950、2040)の4つの位置に配置し、周波数を 3.35 GHz に設定した。人体を設置する場合の円のパラメータは、比誘電率 $r = 50$ 、導電率 $\sigma = 0.02 \text{ S/m}$ 、円直径 $w = 0.35 \text{ m}$ に設定した。この屋内モデルを基本屋内モデルとし、壁全体の導電率を変化させた場合の屋内電波伝搬の様子についての解析を行う。また人体を配置した場合についても解析を行う。この屋内モデルを基本屋内モデルとし、壁全体の導電率を変化させた場合の屋内電波伝搬の様子についての解析を行う。また受信電力は全電界から求められ、次式で計算している。

$$20 \log_{10}|E_z| \quad (1)$$

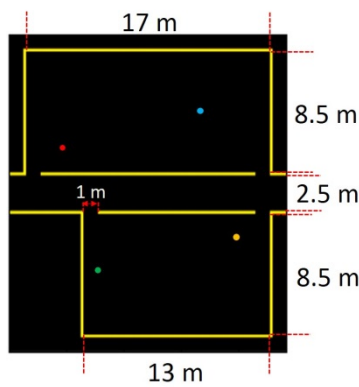


図1. 実験装置の概要

2.2 壁全体の導電率 σ を変化させた場合(人体設置なし)

図2 に壁全体の導電率 σ を $0.02 \sim 0.2$ まで 0.02 刻みで変化させた場合についての受信電力分布を示す。図3、図4 に大部屋と小部屋のそれぞれの平均受信電力のグラフを示す。図2 をみると、導電率が高くなると部屋内部の明るさは変化してないが廊下と壁の外側は暗くなっていることがわかる。また廊下では回折、反射の影響がより強く観察できる。これは壁の透過量が減少して部屋内の反射の影響が強くなったため、扉からの波源の影響だけが廊下で強く観察できたと考えられる。次に部屋の平均受信電力について図3、図4 をみると大部屋、小部屋どちらも壁の導電率が 0.06 のときに平均受信電力が最も低いことがわかる。これは導電率が 0.06 を境に壁の透過量と反射量の影響の強さが変わっているためと考えられる。導電率が低いときは壁の透過量が多いことから隣の部屋の波源の影響も受けていたが、導電率が上がるにつれて壁の反射量が多くなり廊下への透過量が減少し、部屋に設置してある波源はその部屋内に強い影響を及ぼすため、このよう

な結果になったと考えられる。また受信電力の上がり幅の違いについては部屋の大きさが関係しており、部屋が小さいほうが反射の影響が強く、導電率の変化によつての影響を受けやすいと考えられる。

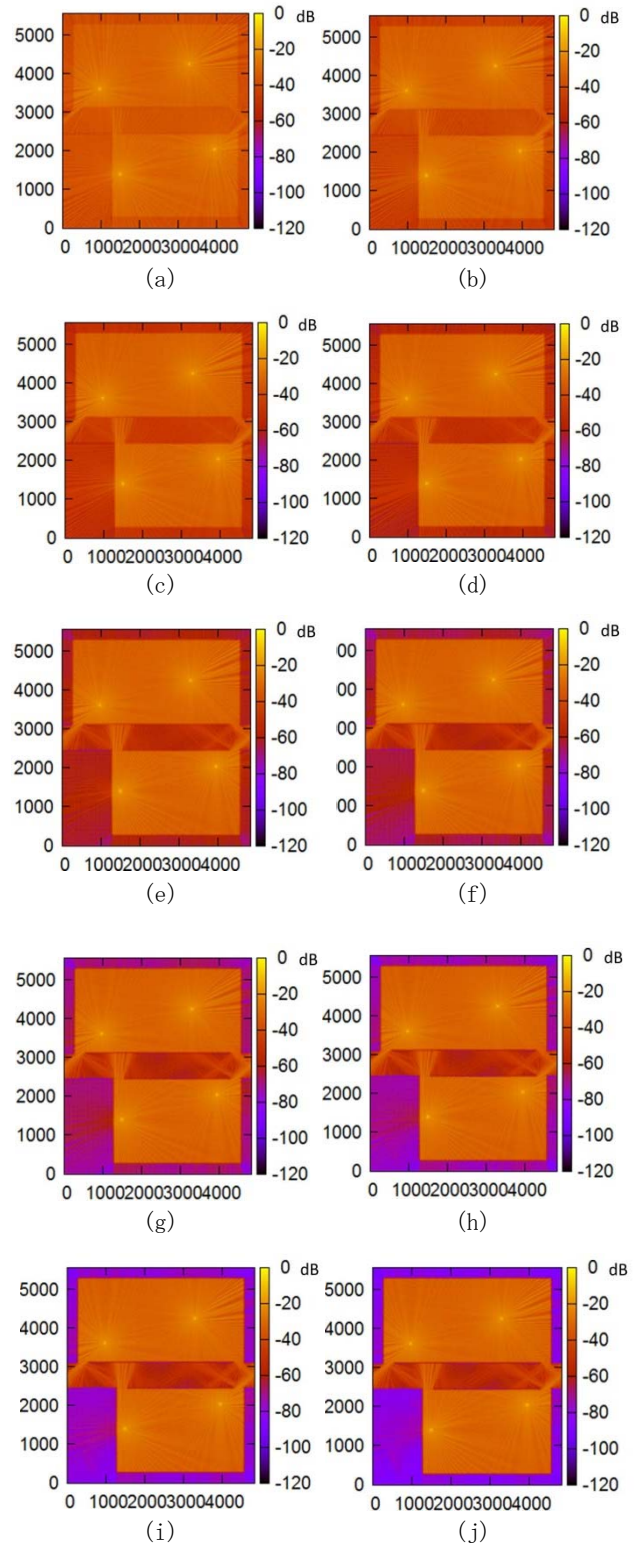


図2 受信電力分布図

表1 平均受信電力

壁の導電率 σ (s/m)	平均受信電力(大部屋)	平均受信電力(小部屋)
0.02	-31.77	-31.30
0.03	-31.86	-31.41
0.04	-31.89	-31.46
0.06	-31.90	-31.47
0.08	-31.89	-31.46
0.10	-31.87	-31.43
0.12	-31.84	-31.39
0.14	-31.81	-31.35
0.16	-31.78	-31.31
0.18	-31.73	-31.26
0.20	-31.71	-31.21

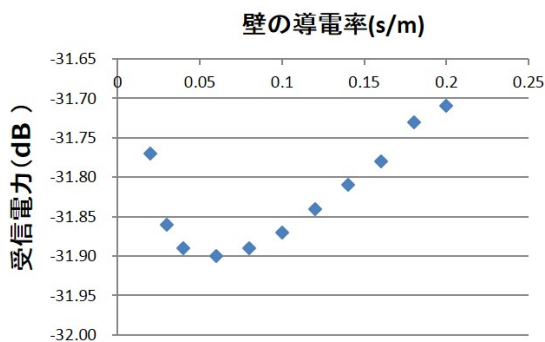


図3 平均受信電力(大部屋)

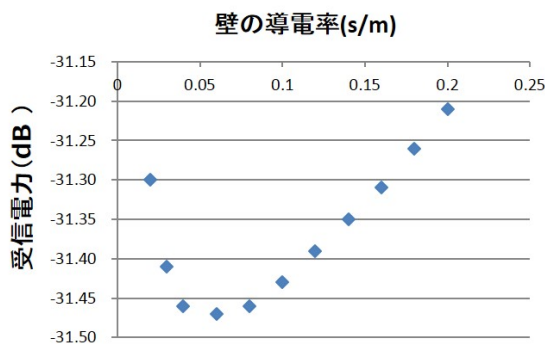


図4 平均受信電力(小部屋)

2.3 壁全体の導電率 σ を変化させた場合(人体設置あり)

解析モデルの人体の設置位置については、着席位置を想定した配置にしている。図5の(a)~(j)に壁全体の導電率 σ を0.02~0.2まで0.02刻みで変化させた場合についての受信電力分布を示す。表2と図6、図7に大部屋と小部屋のそれぞれの平均受信電力の値とそのグラフを示す。図5(a)~(j)をみると、導電率が高くなるにつれ人体を配置していないモデルと同様に、部屋内部の明るさは変化していないが、廊下と壁の外側は暗くなっている。また人体による反射、回折の影響が多くの部分で起こるため複雑な分布になっているが、波源から直接波が通る人体間では高い受信電力を観察できる。次に部屋の平均受信電力

について表2、図5、図6をみると大部屋、小部屋どちらも壁の導電率が0.06のときに平均受信電力が低いことがわかる。受信電力の上がり幅の違いについて人体配置なしのモデルと比較すると差が大きい、これは人体を設置しているため反射、回折の影響をより多く受けていることが原因と考えられる。

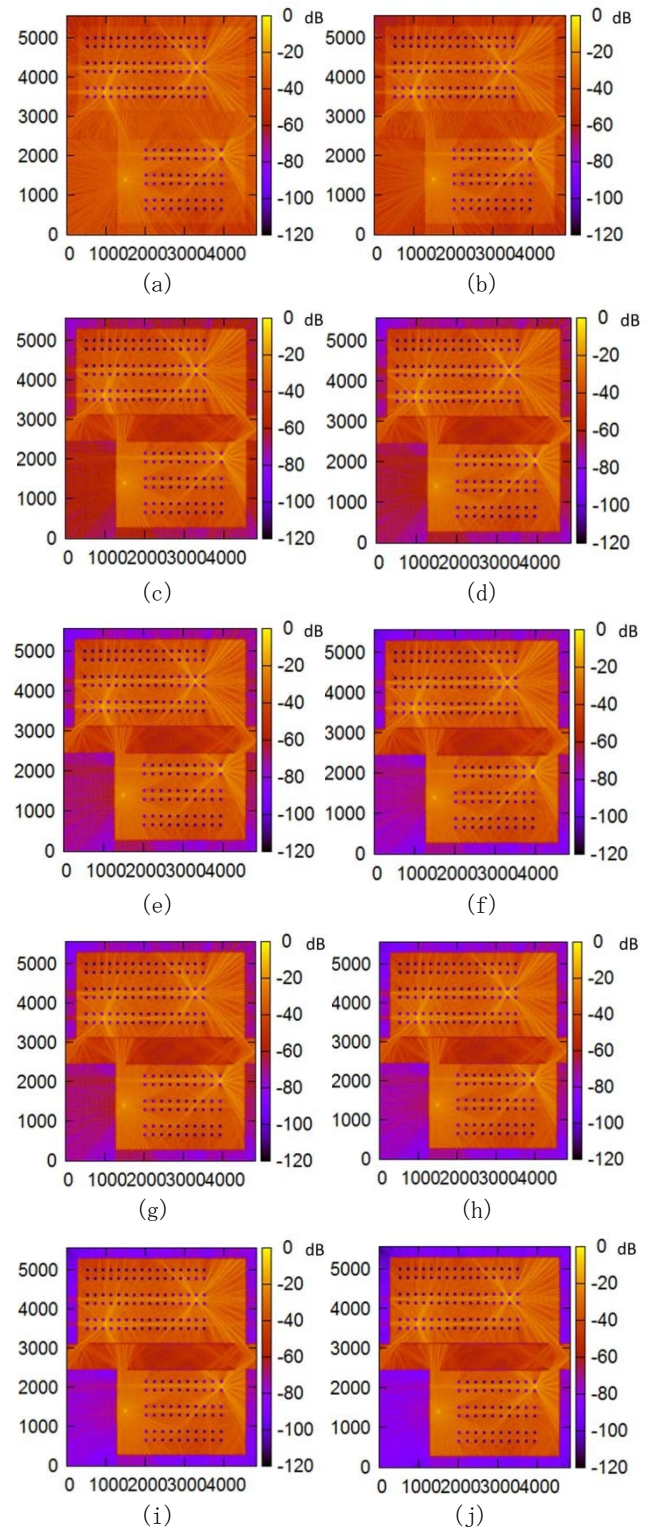


図5 受信電力分布図

表2 平均受信電力

壁の導電率 σ (s/m)	平均受信電力(大部屋)	平均受信電力(小部屋)
0.02	-37.97	-36.69
0.03	-38.11	-36.81
0.04	-38.16	-36.86
0.06	-38.18	-36.87
0.08	-38.17	-36.85
0.10	-38.15	-36.81
0.12	-38.12	-36.76
0.14	-38.08	-36.71
0.16	-38.05	-36.66
0.18	-38.01	-36.60
0.20	-37.97	-36.54

部屋ごとに受信電力を比較すると、部屋に波源が1つの場合に比べ、基本モデルのような部屋に波源が2つの場合は受信電力が大きくなっており、その差は約3 dBである。

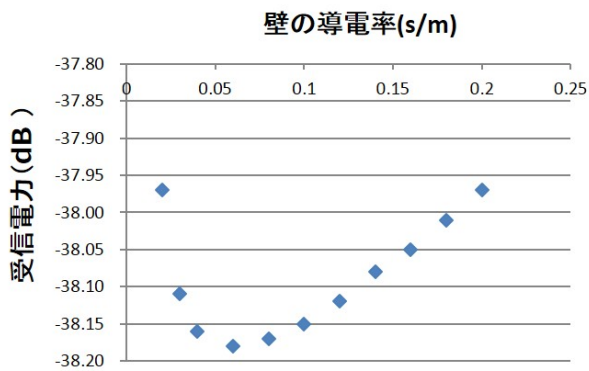


図6 平均受信電力(大部屋)

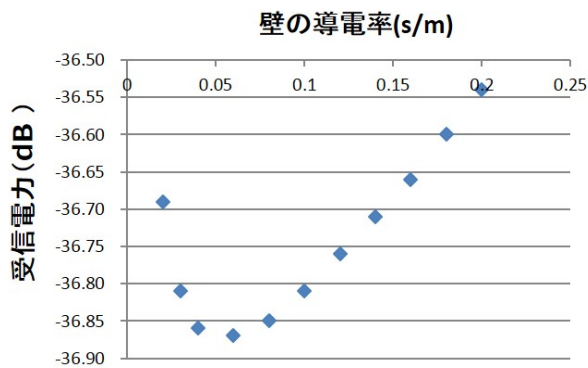
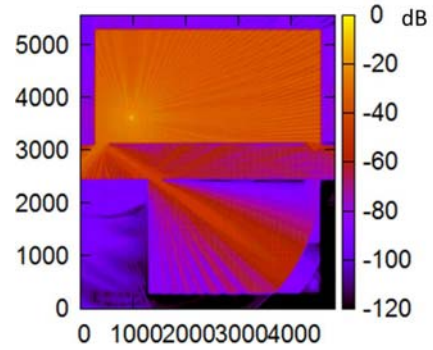


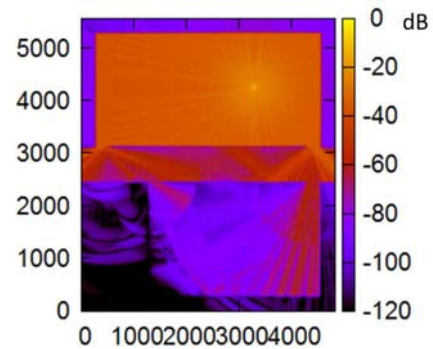
図7 平均受信電力(小部屋)

2.4 波源による影響

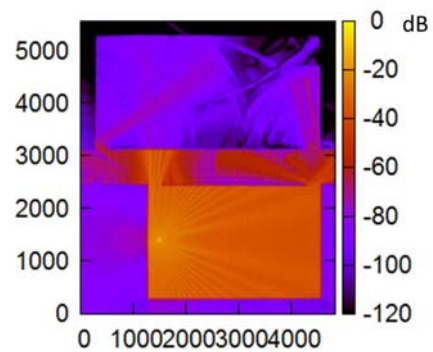
本節では屋内モデルに設置された4つの波源のそれぞれの影響について考察する。図8の(a)~(d)にそれぞれの波源による受信電力分布を示す。また波源の影響を観察しやすいように壁の導電率は0.2に設定した。表3、表4には波源を設置している部屋の平均受信電力を示す。図より波源を1つ設置した場合に見える回折、反射の影響は、4つ設置した分布にも観察することができる。また廊下や隣の部屋にも影響していることがわかる。表3、表4より、



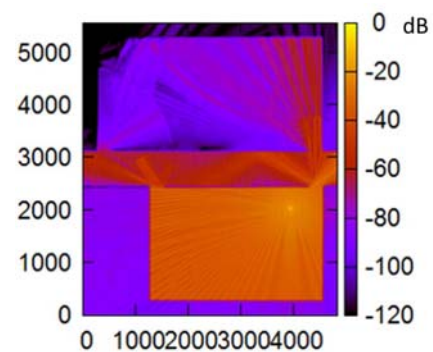
(a)



(b)



(c)



(d)

図8 受信電力分布図

表3 平均受信電力

	基本モデル	波源(975, 3618)	波源(3300, 4254)
平均受信電力(大部屋)	-31.71	-34.73	-33.90

表4 平均受信電力

	基本モデル	波源(1500, 1404)	波源(3950, 2040)
平均受信電力(小部屋)	-31.21	-34.38	-33.92

3. まとめ

本研究では、屋内環境変化における電波伝搬について FDTD 法を用いて 2 つのモデルの解析を行った。

簡易な屋内モデルでは、波源位置、人体の配置、壁の導電率を変更した際の影響を確認した。波源位置を変更した場合については、部屋内部に侵入する直接波の量が部屋の平均受信電力に影響していることがわかり、幾何光学的観点からの説明が可能であった。人体の配置を変化させた場合では、人体による透過、反射の影響を確認することができ、受信電力損失は大きくなることがわかった。壁の導電率を変化させた場合では、壁の透過、反射の影響も変化と平均受信電力の変化を確認することができた。

実際のフロアを想定した屋内モデルでは、人体を設置していない場合と設置した場合について、壁の導電率を変化させた影響と波源の影響を確認した。人体設置あるなしに関わらず壁の導電率が 0.06 の場合が最も部屋の平均受信電力が低いことがわかり、その値を境に壁の透過量と反射量の影響の強さが変化していることがわかった。導電率の変化による平均受信電力の影響は、大部屋より小部屋の方が大きいことがわかった。また人体を設置すると部屋内部の受信電力分布は複雑になり、回折や反射が多様に起こっている影響を確認することができた。波源による影響では、部屋に波源を 2 つ設置することによって、1 つ設置した場合に比べ、平均受信電力が約 3 dB 大きくなった。

今後の課題については、送信アンテナの周波数変化、実モデルに近づけるために家具や窓の設置、2 つ以上の波源による影響の検討等が挙げられる。

参考文献

- 1) http://www.soumu.go.jp/soutsu/tokai/tool/tokeisiryo/idoutai_nenbetu.html
- 2) 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.
- 3) H.Hashemi, et al., "Measurement and modeling of

temporal variations of the indoor radiopropagation channel", Trans. Veh. Vol.43, No.3, Aug. 1994

4) V.Erceg, et al., "TGn Channel Models", Doc. IEEE 802.11-03/904r4, May 2004.

5) 水谷, 阪口, 高田, 荒木, "時変動屋内 MIMO 伝送路のドップラスペクトル解析", 信学総大, B-1-14, 2006.

6) 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.

7) 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.

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

9) 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.

10) Y. Sakoda et al., "Numerical Analysis of RadioWave Shadowing by Human Body", IEICE Tech. Report, AP2008-222, 2009.

11) T.Ikegami et al., "Numerical Analysis of Equivalent Model for Radio Wave Shadowing by Two Lossy DielectricCylinders", IECE Tech. Report, AP2009-163, 2010

