

屋内通信環境における人体の電磁波遮蔽特性の数値的検討

池上 達也¹⁾ ・ 横田 光広²⁾Numerical Examination of EM Wave Shadowing Human Bodies
in an Environment of Indoor Communication

Tatsuya IKEGAMI, Mitsuhiro YOKOTA

Abstract

The number of customers who use cellular phones indoors is rapidly increasing. In this case, mobile terminals used in a stationary condition receive a level variation different from that in a moving condition. Then, it was proposed that a physical channel model for a static terminal used in indoors. The proposed model can consider physical parameters such as moving speed in order to evaluate various situations precisely, and an experimental verification is done. The model is two dimension, and assumes that a moving person is represented as a disk with diameter of Δw and its moving person absorbs a part of the power of the paths across his width of Δw .

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 scattering by two cylinders is examined. In this case, we propose two models for the scattering by two cylinders arranged on axis. One is that two cylinders arranged on vertical axis are approximated by equivalent one cylinder. Another is that scattered field are approximated by superposition of the scattered field by each independent cylinder. Next, the scattering by several lossy dielectric cylinders which exist in random position with concrete walls is considered as the approximated modeling for real environment as an underground center.

Keywords: Human body shadowing, Fixed terminal, Indoor communication, Method of Moments

1. まえがき

近年、セルラー移動通信において、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大きく受ける。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、これまで屋内環境下で使用する無線 LAN を対象としたチャンネルモデルがある¹⁾⁻⁴⁾。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運動体である人体を考慮できる新たな伝搬モデルが提案され、実験的な検証が行われている⁵⁾。提案モデルは二次元モデルであり、人体を直径 ΔW の円盤である完全吸収体を仮定している⁶⁾⁻⁸⁾。

著者の研究室ではこれまで一人⁹⁾あるいは複数人モデルの1つとして二人¹⁰⁾の場合について、数値的に検討を行ってきた。本報告では、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、この損失誘電体による電磁波散乱問題について、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、得られた行列方程式を GMRES 法¹¹⁾により未知電界を求める。基本構成である損失誘電体円柱が2本並んで存在する場合において、円柱間の距離による比較を行う。その結果を踏まえ、指定した範囲内に複数の人体がランダム配置

で存在する場合について調べる。しかし、これらの数値計算を行う場合、計算機のメモリや計算時間が莫大になってしまふことが判っている。そこで、単円柱を用いた簡易近似の有効性についての検討を行う。最後に、より現実的なモデリングとして地下街などで壁が存在する通路において、送受信間を複数の人物が遮るときの電波減衰特性について数値的・統計的な観点から検討する。実際の環境は3次元空間であるが、基本特性を把握するため本報告では2次元空間として検討を行っている。

2. モーメント法による定式化

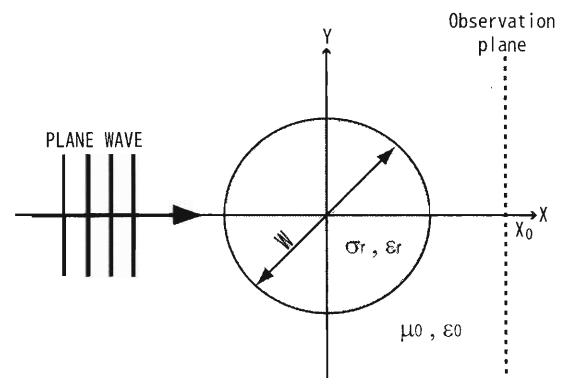


図1. 解析モデル

図1に示すように、2次元損失誘電体による電磁波散乱問題を考える。人体を比誘電率 ϵ_r 、導電率 σ の損失誘電円柱で仮定する。また、本報告では入射波 E_i の電界が軸方向に偏

1) 電気電子工学専攻大学院生

2) 電気電子工学科教授

波している E 偏波を取り扱う。このとき、散乱電界は以下の積分表現で与えられる¹²⁾。

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

ここで、等価電流 $J_{eq}(\mathbf{r})$ は

$$J_{eq}(\mathbf{r}) = j\omega\epsilon_0(\epsilon_r - 1)E_z(\mathbf{r}) \quad (2)$$

で表現される。また、 $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ は 2次元自由空間でのグリーン関数である。式(1)の両辺に入射波を加え、モーメント法により離散化を行うと次の行列式が得られる⁹⁾。

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

ここで、

$$C_{mn} = \delta_{mn} + j \frac{k^2}{4} \left(\epsilon_r(n) - 1 - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \int_{cell} H_0^{(2)}(k\rho) dx' dy' \quad (4)$$

であり、 E_n と $\epsilon_r(n)$ は n 番目のセルにおける未知電界である。 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¹²⁾。

3. 数値計算結果

入射波は $+x$ 方向に伝搬する平面波を使い、次式で表現される。

$$E^i = E_0 \exp[-jk_0 x] \quad (5)$$

周波数 $f = 3.35[\text{Ghz}]$ (波長 $\lambda = 8.948 \times 10^{-2}[\text{m}]$)、入射波の振幅 $E_0 = 1.0[\text{V/m}]$ 、 $k_0 = 2\pi/\lambda$ とする。人体モデルである損失誘電体に関する設定は、比誘電率および導電率は $\epsilon_r = 50$ 、 $\sigma = 2[\text{S/m}]^{10)}$ 、円の直径 $W = 0.35[\text{m}]$ としている⁸⁾。各円柱のセル分割数 $N = 60 \times 60$ 、観測面は $x_0 = 1.0[\text{m}]$ の位置におき、観測面における相対受信電力 P を求める。なお、相対受信電力の式は次のようになる。

$$P = 20 \log_{10} |E_s + E_i| = 20 \log_{10} |E_z| \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

また、モーメント法で求めた $x_0 = 1.0[\text{m}]$ での散乱界が、固有関数展開法と一致していることを確認している。

図2に単円柱による数値計算結果および実験結果の相対受信電力を示している。実験結果は、標準的な成人男性の正面から入射波が伝搬した場合で、人体の直径 $W = 0.35[\text{m}]$ とした時の数値計算の結果とよく一致していることが分かる。これを踏まえ、複数人による電波遮蔽特性をモデル化する場合の基本構成である2人の場合について考える。人体が X 軸上に2本配置した場合と Y 軸上に2本配置した場合について、電磁界理論に基づく数値的な立場から散乱電磁界を検討し、その結果から、2本の損失誘電体柱による遮蔽特性を1本の場合で近似できる適用範囲を数値的に調べ、等価モデルの有効性について検討する。

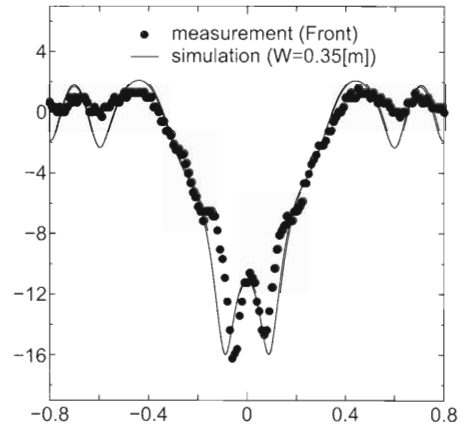


図2. 数値計算と実験結果

3.1 X 軸上に2本設置した場合

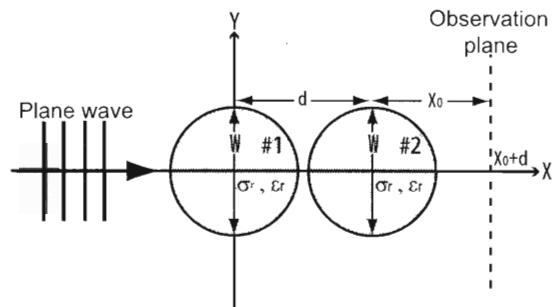


図3. X 軸上に2本設置した場合

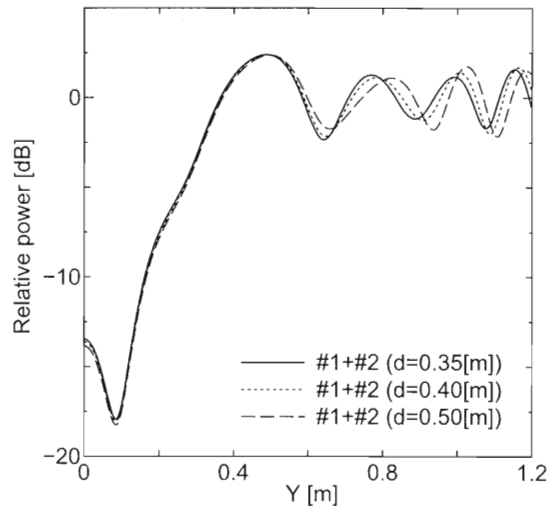


図4. 円柱間の距離による比較

X 軸上に2本配置した場合についての解析モデルを図3に示す。損失誘電体柱の中心を、原点と X 軸上の原点から $d[\text{m}]$ 離れた位置に設置する。図4に円柱間の距離を変化させた場合の観測面 $X_0 = 1.0[\text{m}]$ での相対受信電力を示す。円柱間の距離 d を離しても、相対受信電力への影響が少ない。これは、#2の円柱が#1の円柱の影となるためであり、少し大きめ

の単円柱により近似することが容易である。観測面までの距離を変えた場合も同様である。

3.2 Y 軸上に 2 本設置した場合

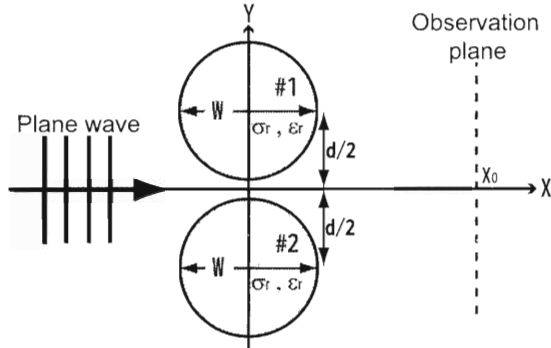


図 5. Y 軸上に 2 本設置した場合

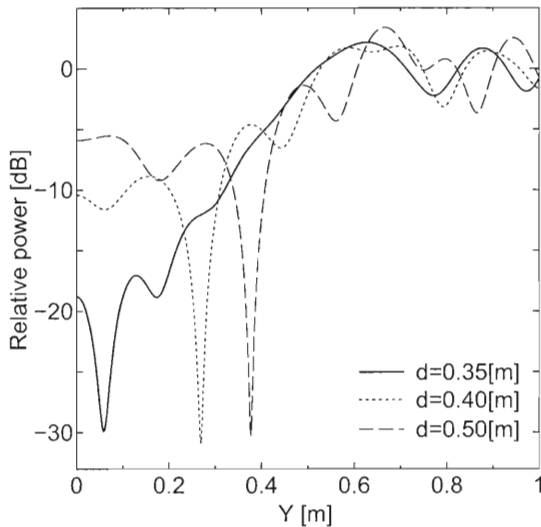


図 6. 円柱間の距離による比較

Y 軸上に 2 本設置した場合についての解析モデルを図 5 に示す。円柱間の距離 d を変化させた場合の相対受信電力は図 6 となる。 $d = 0.35[m]$ のとき 2 本の円柱が接しており、中央付近での減衰が大きいことがわかる。円柱間の距離が離れた場合、円柱間の隙間から直接伝搬してくる波があるため、中央での減衰が小さくなり、減衰のピークも中心から離れ、物体横では干涉波により波形が複雑になっていることがわかる。そこで、円柱間の距離が近い場合と離れた場合で 2 手法による近似方法を考える。比較的近い場合では、図 7 のように外接円による近似、離れた場合は式 7 のように #1 と #2 の円柱が単独存在する場合の散乱界を足し合わせる重ね合わせによる近似を用いる。

$$Ez = Ez^j + Ez_{\#1}^s + Ez_{\#2}^s \quad (7)$$

重ね合わせによる手法は、単円柱の場合を計算し、中心座標

をそれぞれ代入することで、計算回数を減らし、計算時間および使用するメモリを少なくすることが出来る。

円柱間距離 $d = 0.35[m]$ 、 $d = 0.40[m]$ 、 $d = 0.50[m]$ の場合の近似結果を図 8、図 9、図 10 に示す。円柱間距離 $d = 0.35[m]$ のとき、2 本の円柱は接しており、外接円による近似とよく一致しているが、微小な隙間ができた場合、隙間を直進する波や多重散乱の影響が大きいため、この 2 つの方法による近似は難しい。しかし、円柱間を約 1 波長以上離れた場合、重ね合わせによる近似でうまく近似することができる。今後の課題として、観測面までの距離毎に適用範囲は変化するため、各種パラメータを考慮に入れ調べる必要がある。また、X 軸方向への移動と Y 軸方向への移動が同時に起こる場合について、重ね合わせや円柱サイズによる近似を用いた簡易モデル化の有効性を調べることなどが挙げられる。

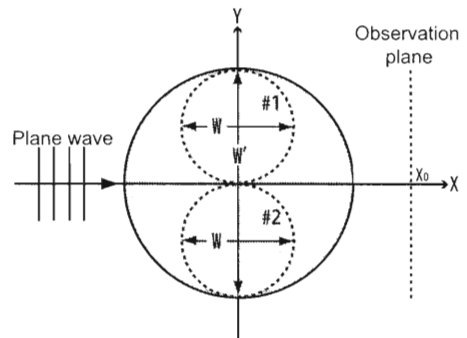


図 7. 外接円による近似のイメージ図

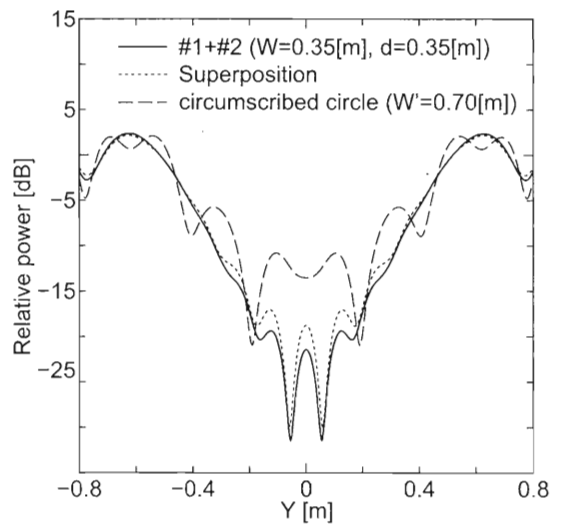


図 8. 外接円と重ね合わせによる近似 ($d = 0.35[m]$)

3.3 複数人がランダム配置する場合

次に、地下街や廊下などの閉空間の通路をモデル化し、送受信間を複数の人体が遮るような場合の電波の遮蔽特性について数値的・統計的な観点から検討する。図 11 に解析モデルを示す。観測面と人体は通路内に存在し、人が 3 人存在する場合で (中

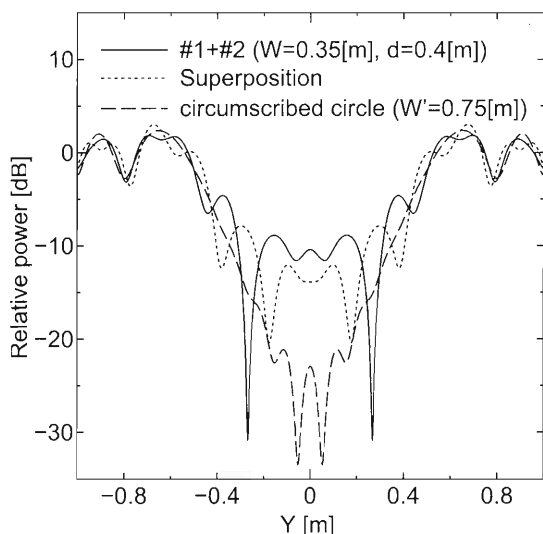


図9. 外接円と重ね合わせによる近似 ($d = 0.40[m]$)

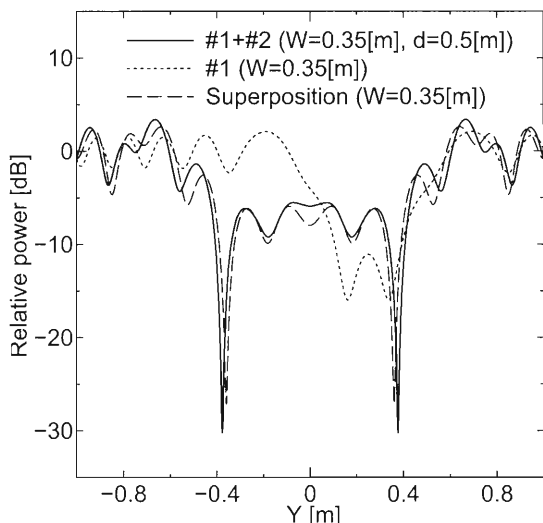


図10. 重ね合わせによる近似 ($d = 0.50[m]$)

心座標 $-0.825[m] \leq Y \leq 0.825[m]$ 、 $-0.825[m] \leq X \leq 0.825[m]$ の範囲に) 乱数によりランダム配置し、観測面は $X_0 = 1.1[m]$ に位置する。単位面積当たりの人数 $N_{person} = 3/4[人/m^2]$ とな

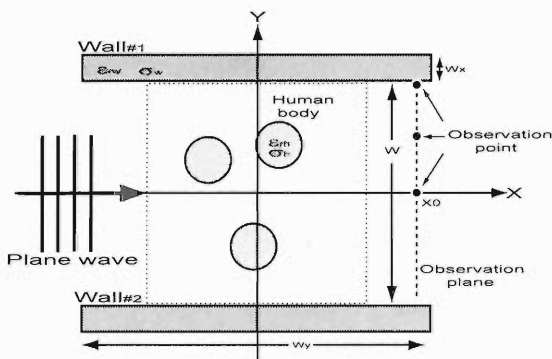


図11. 複数人がランダム配置する場合

る。通路の壁は、コンクリート壁と仮定し、その比誘電率と導電率は、コンクリートの湿潤状態の違いや周波数によっても変化するが、今回は $\epsilon_r = 5.0$ 、 $\sigma = 0.1[S/m]$ で設定している。壁の厚さが約 0.5 波長の場合で、伝搬する波をほぼ遮蔽することを確認している。人体の中心位置を 100 回変化させ、その平均相対受信電力を求める。

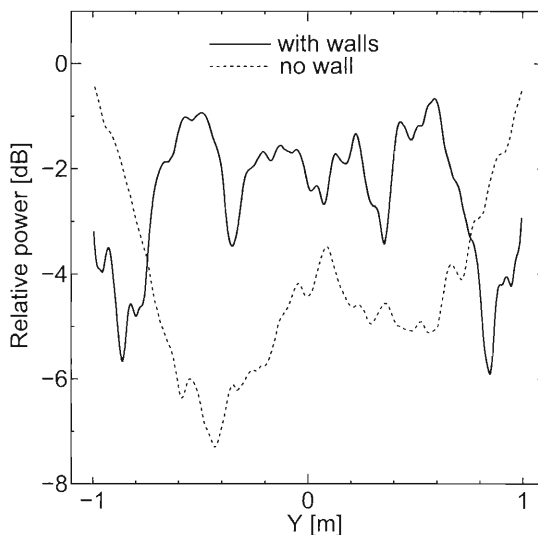


図12. 壁の有無による平均相対受信電力の比較

図12に壁が存在する場合と壁が存在しない場合の平均相対受信電力を示している。壁が存在する場合では、観測面の端 ($Y = \pm 1.0[m]$) 付近の減衰が中央付近よりも小さくなる傾向が出ている。また、壁の有無に係らず、観測面での相対受信電力は $0[dB]$ より減衰する結果となった。

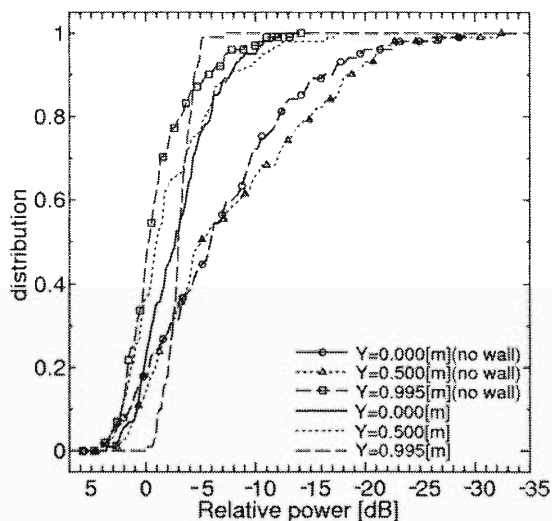


図13. 各観測点の累積分布

次に、観測面の $Y = 0.0[m]$ 、 $Y = 0.5[m]$ 、 $Y = 0.995[m]$ の位置に観測点を置き、各観測点での電波の減衰量の分布を統計的に調べた。図13の横軸は相対受信電力の減衰量、縦軸は減衰量に対する累積分布を示している。平均相対受信と累積分

布の結果からわかるように、壁が存在する場合の減衰が小さくなっているが、これは壁で反射した波の影響が原因として考えられる。累積分布の結果より、観測面の端 $Y = 0.995[m]$ では傾きが大きくなっており、減衰量の最大値と最小値の差が少ない傾向が出るのが分かった。今回、ランダムに変化させる回数を 100 回としたが、壁のない場合で円柱本数を増やした場合、観測面の 3 点での減衰量も増える傾向が出ており、おおよそ妥当な結果が得られていると言える。

4. まとめ

本報告では、屋内通信環境において、複数人による電波遮蔽特性について、最も簡単なモデルである 2 人が並んで存在する場合と、人数を 3 人以上で指定された範囲内にランダムに存在する場合の散乱問題について検討を行った。基本となる 2 人の場合では、観測面での相対受信電力から、2 本の円柱を 1 本の円柱の遮蔽特性で近似できる適用範囲を数値的に示した。X 軸上に 2 本設置した場合、円柱間の距離に係わらず #1 の円柱のみを設置した場合とよく一致していた。Y 軸上に 2 本設置した場合、X 軸上に 2 本配置した場合よりも円柱間の距離による影響が大きい。そのため、円柱間の距離が比較的近い場合 (0.5 波長程度) とそれ以上の場合で、外接円による近似と重ね合わせによる近似の 2 種類の方法を用いた。これらの近似方法は適用できる範囲が観測面ごとにあり、波長などを考慮に入れて検討する必要がある。また、X 軸方向への移動と Y 軸方向への移動が同時に起こる場合について、今回の結果を踏まえ数値計算結果から検討を行い、ランダムに配置する場合への応用の可能性を調べる必要がある。

複数の人体がランダムに存在する場合では、数値的・統計的な観点から検討を行い、壁の影響を確認した。今後、通路幅 W や通路の長さ W_x を長く設定し、人数も増やし計算する予定である。しかし、そうした場合には壁と人体の分割数を多くとるの必要があり、メモリおよび計算時間が莫大になってしまう。このような莫大な計算するのではなく、別の簡易 (近似) 計算方法を考えることが課題となる。その可能性の一つとしてカスケード接続がある。

が $2 \times 4[m^2]$ の範囲内でランダムに存在する場合の計算を、3 人が $2 \times 2[m^2]$ の範囲でランダムに存在する場合を掛け合わせたもので近似する方法である。

本研究では、計算時間の都合上、それを検討することが出来なかったが、今後、カスケード接続による近似の有効性を調べ、有効である場合には 10 人以上存在する場合や、通路の長さを長くした場合を計算し、単位面積当たりの人数 N_{person} などによる減衰量の変化など調査していく方針である。

参考文献

- 1) R. J. C. Bultitude: IEEE Communications Magazine, Vol.25, No.6, 1987.
- 2) H. Hashemi, *et al.*: Trans. Veh. Vol.43, No.3, Aug.1994.
- 3) V. Erceg, *et al.*: Doc. IEEE 802.11-03/904r4, May 2004.
- 4) 水谷, 阪口, 高田, 荒木: 信学総大, B-1-14, 2006.
- 5) 太田, 藤井: 電子情報通信学会技術報告書, AP2008-159, 2009.
- 6) 藤井, 太田: 電子情報通信学会技術報告書, AP2006-55, 2006.
- 7) 太田, 藤井: 電子情報通信学会技術報告書, AP2006-54, 2006.
- 8) T. Fujii and Y. Ohta: Proc. of IEEE 2007VTC fall, 2007.
- 9) R.F.Harrington: Field Computation by Moment Methods, IEEE PRESS, 1968.
- 10) C. C. Johnson and A. W. Guy : Proc. IEEE, vol.60, 692-718, 1972.
- 11) 藤野 清次, 張 紹良: 反復法の数理, 朝倉書店, 1996.
- 12) A. Ishimaru : Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering, Prentice Hall, 1991.

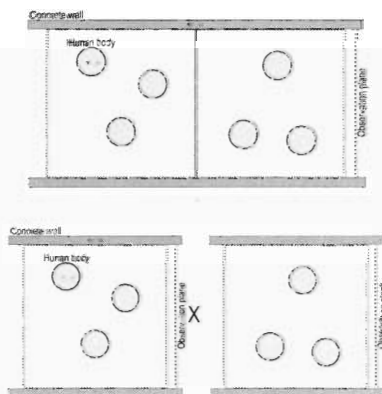


図 14. カスケード接続のイメージ図

図 14 はカスケード接続のイメージ図である。例えば、6 人