

## スケールモデルによる伝搬遅延のための測定器作製と測定

### Measuring Instrument Setup and Measurements for Delay Profile using Scale Model Method

船木雄、岩隈龍一郎、出口和摩、三根豊和、市坪信一

九州工業大学 大学院工学府

〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町 1-1

E-mail: funaki@pro.ecs.kyutech.ac.jp, ichitsubo@ecs.kyutech.ac.jp,

**あらまし** 移動通信の無線回線設計のために伝搬遅延特性の解明が必要である。従来からの研究手法として実環境での測定やコンピュータ上のシミュレーションがある。しかし、都市の縮小モデルであるスケールモデルによって伝搬遅延特性を再現できるなら伝搬特性を研究する有効な手段となってくる。スケールモデルの有効性を検討するために、都市環境の 1/100 縮尺のスケールモデルを作製して、そこで遅延プロファイルを測定し、実際の特性と比較した。実験した周波数は 2GHz と 10GHz（実環境で 20MHz と 100MHz に相当）である。その結果、遅延スプレッドは実環境での値に換算すると 0.1-0.2 $\mu$ s であり実環境の 1/5 程度の小さい値であった。この原因はスケールモデルではなく周波数にあると考えられ、検討結果も合わせて示す。

It is necessary to clarify the channel impulse response for the wireless link design of the mobile communication systems. In the research methods for radio propagation, the computer simulation and the measurement in a real city had been performed so far. However, if the scale model for urban area can reproduce the channel impulse response, it will be an effective method to study radio propagation. To examine the effectiveness of the scale model, the 1/100 scale model for urban area was made, and the delay profile was measured. Then, we compared the experimental results with a real characteristic. The measured frequency is 2 GHz and 10 GHz (correspond to 20MHz and 100MHz in a real environment). The measured delay spreads were 0.1-0.2  $\mu$  s when these were converted into the value in a real environment, and these were about 1/5 the value of the real environments. It is thought that this cause is not the scale model but the frequency.

**キーワード** 移動伝搬、遅延プロファイル、遅延スプレッド、スケールモデル、マクロセル

#### 1. はじめに

移動通信環境における電波伝搬特性を解明する方法には、実環境で実際に測定する実測や電磁界理論に基づく理論式または計算機シミュレーションがある。実測はありのままの伝搬特性を直接測定するので得られた特性の信頼性は高い。しかし、電波免許の取得や測定機器の準備、人的稼働の確保などで実

施するには負荷が多い。また、測定した環境での特性が表れるので統計的な特性を得るには複数地域での測定が必要になる。一方、理論式や計算機シミュレーションは実測の欠点である稼働を軽減できる利点を持つ。しかし、計算を簡易化するために最初に環境や電波特性を制限、仮定、簡易化する。これらによって生じる誤差が欠点となる。

第三の方法にスケールモデルがある。これは実環境のミニチュアを作ってその縮尺に応じた周波数で測定する方法である。実際に測定するという点からみると実測に近いが、自由に環境を作り変えて特性を調べるという点ではシミュレーションに近い方法である。これまでにスケールモデルは主に簡易な環境で用いられてきた。例えば、大型アンテナの縮尺モデルによるアンテナパターンの測定、トンネル内[1, 2] や自動車内[3]といった比較的簡易な構造内での伝搬損失の測定が行われてきた。またビルが数個といった簡易な都市環境での測定も行われている[4, 5]が、広い都市環境でスケールモデルが適用された例はほとんどない。

今回、電波伝搬特性のひとつとして伝搬遅延特性を検討した。伝搬遅延とは、基地局から送信された電波が街中の複数のビルによって反射・散乱されて多重波となり、移動局で受信され、多数の電波が時間的に遅れて受信されることである。この伝搬遅延特性は通信品質に関係するため、移動通信の無線回線設計においてはこの特性の解明は重要である。携帯電話の第2世代のような狭帯域通信では大きな伝搬遅延によって通信品質が劣化する。また、第3世代のような広帯域通信でレイク受信を行うときは、この伝搬遅延によってレイク受信利得を得ることができる。この伝搬遅延特性は従来から盛んに検討されている。しかしながら、都市の環境によって特性は異なるので、都市環境を考慮した特性の把握が必要である。

本報告は都市内での伝搬遅延特性におけるスケールモデルの可能性を検討する

## 2. 伝搬遅延特性

図1に基地局に到来する多重波の様子を示す。この多重波が時間的に遅れて基地局に到来することを伝搬遅延という。伝搬遅延を表す指標に遅延プロファイルと遅延スプレッドがある。図2に到来波の受信電力とその時間的な遅れを表す遅延プロファイル  $P(t)$  を示す。到来時間を  $t$  とすれば、遅延スプレッド  $S_D$  と平均遅延  $\tau$  は、

$$S_D = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} P(t) \cdot (t - \tau)^2 dt}{\int_0^{\infty} P(t) dt}} \quad (1)$$

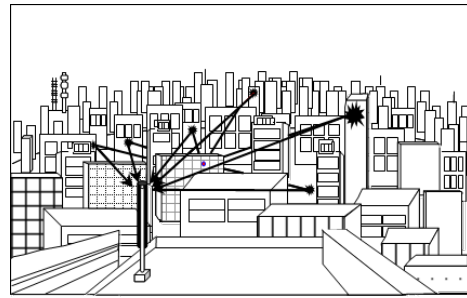


図1 多重波伝搬の様子

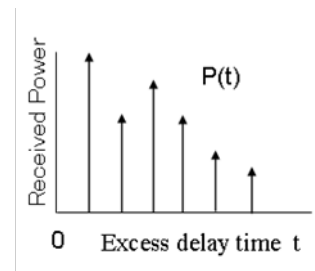


図2 遅延プロファイル

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} P(t) \cdot t dt}{\int_0^{\infty} P(t) dt} \quad (2)$$

である。都市内のマイクロセル環境（基地局高が周辺ビル高より高く、送受信間距離がおおよそ1km以内のエリア）で周波数が1GHz以上では、遅延スプレッドは1  $\mu$ s程度で、遅延プロファイルは概ね指数関数で近似できる[6]とされている。また、周波数に対する依存性はなく、3GHzと8GHz, 15GHzの周波数では遅延スプレッドや遅延プロファイルにほとんど差がないことも示されている[7]。ここでは遅延プロファイルが指数関数で、遅延スプレッドが1  $\mu$ sの場合を”都市モデル”と呼ぶ。

## 3. 測定内容

### 3.1 測定方法

伝搬遅延特性はネットワークアナライザを用いて測定した。ネットワークアナライザで送受信間の振幅と位相の周波数特性を測定して、逆フーリエ変換して時間特性である遅延プロファイルを求めた。周波数による違いをみるために、2GHz帯と10GHz帯で測定を行った。

### 3.2 測定系の作製

測定で用いたネットワークアナライザでは3GHzまでしか測定できないため、10GHzの測定のため

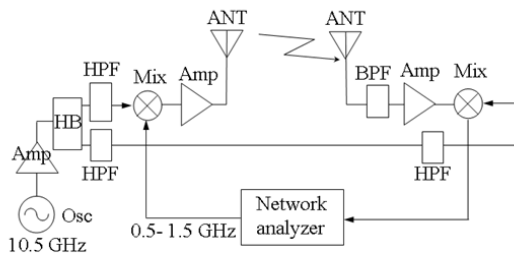


図3 10GHz 測定系概要



図4 10GHz 測定系

めにミキサを用いて変復調を行う測定系を作製した。図3に作製した測定系概要を示す。また図4に実際の10GHz測定系の写真を示す。

送信側では10.5GHzの発振周波数でスペアナ出力の0.5-1.5GHzを9-10GHzにアップコンバートして、受信側では9-10GHzの受信波を0.5-1.5GHzにダウンコンバートしてスペアナで測定した。

ミキサの周波数変換では送信側で9-10GHz、11-12GHzの二つの信号が生成されるため、受信側アンテナの直後に9-10GHzだけの受信波を取り出すBPFを設置している。BPFは5段のマイクロストリップラインにより自作した[8]。

### 3.3 スケールモデルの作製

図5にスケールモデルの写真を示す。縮尺が1/100の都市環境のスケールモデルを作製した。ビルの模型としてコンクリートブロック(10cm×6cm×20cm)を1000個用いた。表1にスケールモデルの都市構造を示す。都市の広さは10m×10mで、建物が占有する割合は30%、ビル高の平均は20cm、道路幅は全て25cmである。ビルの高さは均一にしないで標準偏差で8cmのばらつきを持たせた。



図5 スケールモデル

表1 スケールモデル諸元

スケール縮尺	1/100
エリア	10m×10m
スケール環境	都市環境
スケール材質	コンクリートブロック
建物占有率	30%
建物平均高	20cm
道路幅	25cm

### 3.4 シールドテントの作製

広帯域測定を行うためスケールモデルを覆うシールドテントの作製を行った。電波免許不要の環境とするには、使用周波数における漏えい電波の電界強

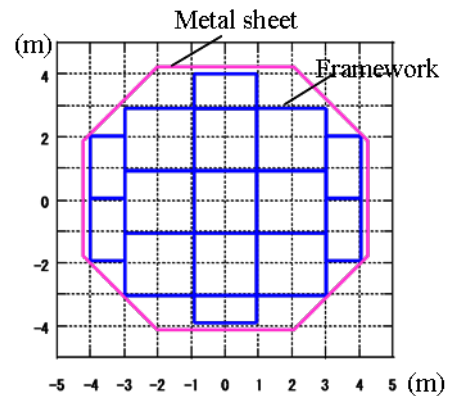


図6 シールドテント上面図

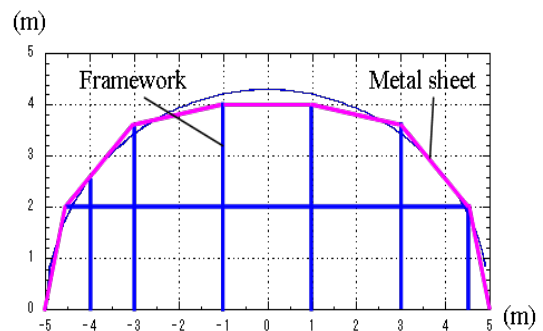


図7 シールドテント横断面図

表2 測定諸元

使用周波数	2GHz帯	10GHz帯
1/100周波数	20MHz	100MHz
周波数帯域	1GHz-2.6GHz	9GHz-10GHz
距離分解能	0.19m	0.3m
送信アンテナ	ダイポールアンテナ	ホーンアンテナ
受信アンテナ	ダイポールアンテナ	ダイポールアンテナ
送信高	50cm	50cm
受信高	5cm	1.5cm

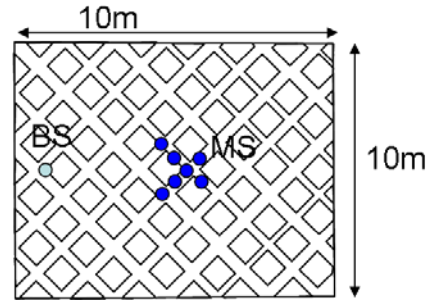


図10 スケールモデルでの測定位置

度を40dB以上減衰させなければならない。今回作製したシールドテントは、電波の反射等が起こらない木材で骨組みを作り、ブルーシートに電波を遮蔽する電磁波シールドシートを貼り合わせて骨組みの上に被せている。図6、7にシールドテントの上面図、側面図を示す。青線は骨組み、ピンク線が金属シートを表す。図8にシールドテントの骨組み、図9にシールドテントの外観を示す。作製したシールドテント内から電波を送信してシールドテントの外で受信レベルを測定しシールドテントによる電波の減衰が40dB以上あることを確認した。

### 3.5 測定内容

図10にスケールモデルでの送信点と受信点を示す。図10のBSは送信点(基地局)、MSは受信点(移

動局)である。受信点に依存しない統計的な特性を得るために送受信間距離がほぼ同じである複数の受信点で測定した。受信点の数は2GHzで7つ、10GHzで5つである。平均した送受信間距離は2GHz測定では5.2m、10GHz測定では5.8mである。基地局高は10GHzと2GHzの測定でともに50cmとした。移動局高は10GHz測定では実環境の1.5mに相当する1.5cmとしたが、2GHz測定では移動局アンテナの長さのために5cmとした。

10GHz測定では送信アンテナに水平方向の半値角が20°のホーンアンテナを用いたが、送信アンテナを固定すると指向性のためにスケールモデル全体に電波を放射できない。そこで、図11のようにホーンアンテナをアンテナの半値角分回転して4方向測定し、その測定内容を足し合わせることで、スケールモデル全体の伝搬遅延特性を得る。このように測定した場合の等価的な半値角は、図12に示すよ



図8 シールドテント骨組み



図9 シールドテント

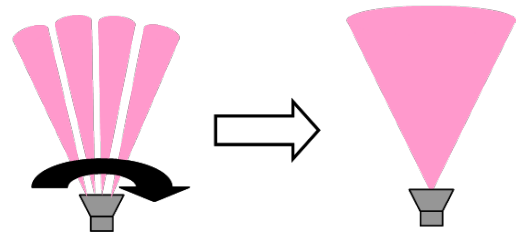


図11 10GHz 測定の工夫

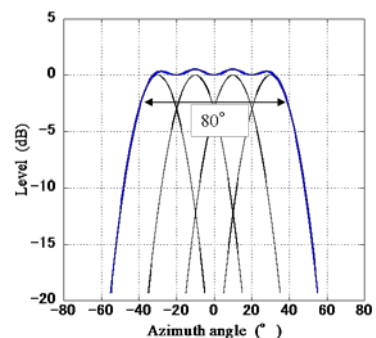


図12 アンテナの合成パターン

う  $80^\circ$  になる。

表 2 に測定諸元を示す。スケールモデルの縮尺が  $1/100$  であるため、測定周波数の 2GHz と 10GHz は実環境で 20MHz、100MHz に相当する。測定の帯域幅は測定系の違いにより 2GHz 帯で 1.6GHz、10GHz 帯で 1.0GHz である。このため、遅延時間の分解能はそれぞれ 0.625ns、1.0ns であり、距離分解能は 0.19m、0.3m である。しかし、測定結果の比較では両者の分解能の違いはあまり影響しない。サンプリングデータ数は両者とも 256 個であり、観測窓は 24m、38m である。

### 3.6 測定結果

図 13 に 2GHz 帯で測定した遅延プロファイルを示す。横軸は遅延時間の代わりに遅延時間に光速を掛けた超過伝搬路長で表している。太い線は 7 つの測定結果の平均値である。図 14 に 10GHz 帯の遅延プロファイルを示す。太い線は 5 つの測定結果の平均値である。

図 15 に測定で得た平均の 2GHz と 10GHz の遅延プロファイルを実環境に換算して示す。 $1/100$  スケールでの測定結果であるので 2GHz と 10GHz の周波数は実環境で 20MHz と 100MHz に相当する。また、超過伝搬路長は 100 倍で示される。実環境と比較するために都市モデル（遅延スプレッドが  $1\mu\text{s}$  で、指数関数の遅延プロファイル）を図中に示す。遅延距離 250m で比較すると測定された遅延プロファイルは都市モデルのそれより 20dB 以上もレベルが低くなっており伝搬遅延が小さいことが分かる。20MHz と 100MHz の遅延プロファイルのピーク値から 30dB 下がったところまでを用いて遅延スプレッドを計算すると、

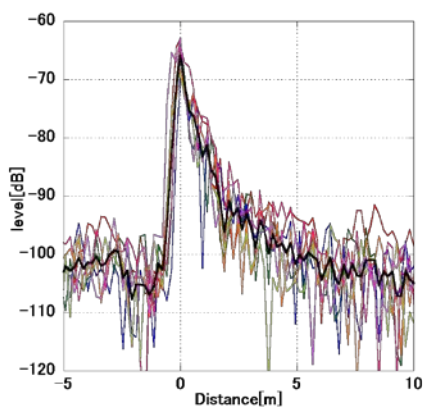


図 13 2GHz 遅延プロファイル

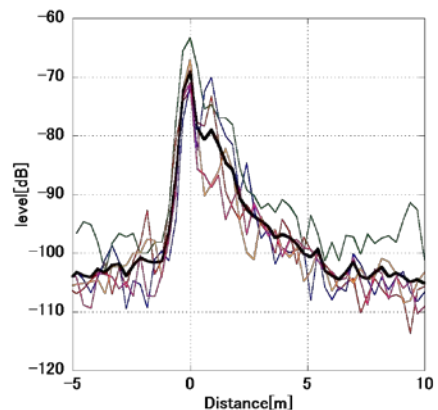


図 14 10GHz 遅延プロファイル

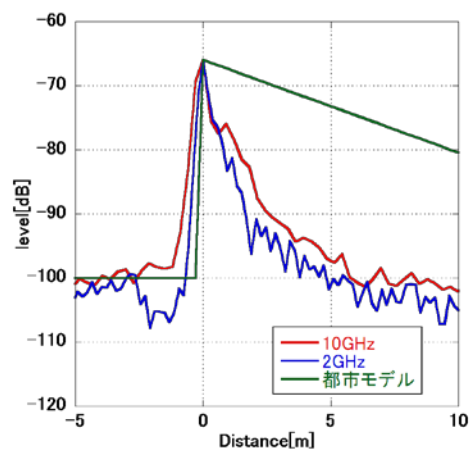


図 15 2, 10GHz 遅延プロファイル

20MHz は  $0.13\mu\text{s}$ 、100MHz は  $0.2\mu\text{s}$  である。これらは 1GHz 以上での遅延スプレッド  $1\mu\text{s}$  と比べて約  $1/5$  と小さい値である。

## 4. 検討

スケールモデルの実験で、実環境での 20MHz と 100MHz に相当する周波数では遅延スプレッドの値は小さくなった。スケールモデルによる再現性を検討するために、ビルの反射面積と周波数の影響を考える。

遅延波は伝搬路の途中でビルに反射する。反射損失は周波数によってほとんど変わらない。例えば、コンクリートの比誘電率を 5.5、導電率を  $0.023 \text{ [S/m]}$  として垂直偏波のときの反射損失はフレネルの計算式より、100MHz で 6.5dB、1GHz で 7.9dB、10GHz でも 7.9dB である。しかし、これはビルの反射面積が電波の第一フレネルゾーンより十分に大きいときである。反射面積が第一フレネルゾーンより小さく

なると反射損失が増加する。図 16 に基地局から送信された電波がビル側面に反射して移動局で受信される様子を示す。基地局からビル壁面までの距離は  $d_2$ 、ビル壁面から移動局までの距離は  $d_1$  である。ビル壁面で電波を反射する面積を  $S_B$ 、ビル壁面での第 1 フレネルゾーン的面積を  $S_1$  とする。

簡単のために、距離  $d_2$  は無限大で、反射面は  $S_B$  の面積が  $20\text{m} \times 20\text{m}$  の円で、完全導体とする。距離  $d_1$  を変数としたときの反射損失を図 17 に示す。

図 17 をみると、 $d_1=250\text{m}$  での反射損失は 100MHz は 7dB、20MHz は 20dB である。周波数が低くなると反射損失が増加することが分かる。この反射損失の増加によって 20MHz や 100MHz の遅延スプレッドは小さい値になったと考えられる。

## 5. まとめ

スケールモデルによって都市内の伝搬遅延特性が再現できるかを検証した。2GHz と 10GHz の周波数を用いて 1/100 の都市スケールモデルで遅延プロファイル測定を行い既存の伝搬遅延特性と比較検討した。

測定の準備のために、アップ/ダウンコンバータを用いた 10GHz 帯の測定系を作製し、コンクリートブロックを用いた 1/100 の都市スケールモデルを作製した。さらに、広帯域での測定が行えるように床面積が  $10\text{m} \times 10\text{m}$  で高さ 4m のシールドテントを作製した。

測定の結果、実環境に換算して表現すると、遅延スプレッドは 20MHz で  $0.13\mu\text{s}$ 、100MHz は  $0.2\mu\text{s}$  となった。これらは実環境の都市モデルである遅延スプレッド  $1\mu\text{s}$  と比べて約 1/5 と小さい値であった。この原因は、測定周波数のフレネルゾーンとビル壁面の大きさによって生じる反射損失と考えられる。

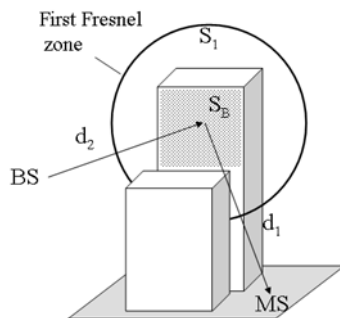


図 16 フレネルゾーンに対する反射面積

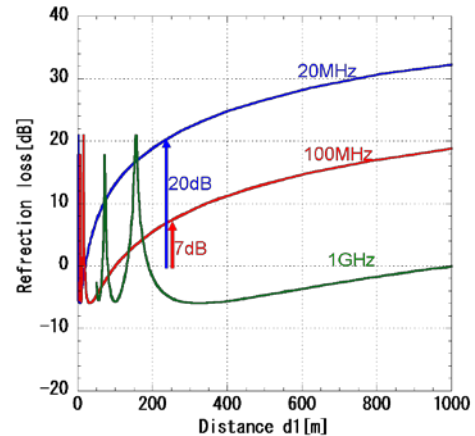


図 17 周波数ごとの反射損失

実環境の 1GHz に相当する周波数での測定が行えなかったので本研究の目的であるスケールモデルの再現性は確認できなかった。しかしながら、低い周波数では遅延スプレッドが小さくなる可能性があることがわかった。

今後の課題として、実環境の 1GHz の伝搬遅延特性と比較するのであれば 1/100 のスケールモデルでは 100GHz で実験を行う必要がある。しかし、100GHz の測定系を作製することは困難であるため都市の縮尺を小さくするなどの工夫を今後行う必要がある。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金( 基盤研究(C) 21560403) の助成を受けたものである。

## <参考文献>

- [1] Y. Yamaguchi, T. Abe, and T. Sekiguchi, "Radio wave propagation loss in the VHF to microwave region due to vehicles in tunnels", IEEE Trans. EMC-31, no. 1, pp. 87-91, 1989.
- [2] K. Uchida, T. Matsunaga, and T. Noda, "Electromagnetic wave excitation in a two-dimensional impedance tunnel with a T-junction," IEICE Trans., vol. J68-B, no.12, pp.1459-1466, Dec. 1985.
- [3] 堀内学、山田邦彦、田中信吾、山田吉英、道下尚文、戸羽辰夫、“スケールモデルを用いた自動車内電界分布の評価”、信学技報 AP2006-42, pp. 19-24, 2006 年 7 月。
- [4] F. Aryanfar and K. Sarabandi, "Validation of wireless channel models using a scaled mm-wave measurement

system," IEEE Antennas Propagat. Magazine, vol.49, no.4, pp.124-134, Aug. 2007.

[5] D. Erricolo, G. D'Elia, and P. L.E. Uslenghi, "Measurements on scaled models of urban environments and comparisons with ray-tracing propagation simulation," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.50, no.5, pp.727-735, May 2002.

[6] COST 207, "Digital land mobile radio communications," Final report of the COST-Project 207, Commission of the European Communities, Brussels, 1998.

[7] Y. Oda, R. Tsuchihashi, K. Tsunekawa, and M. Hata, "Measured path loss and multipath propagation characteristics in UHF and microwave frequency bands for urban mobile communications," Proc. IEEE VTC2001 Spring, vol.1, pp.337-341, Rhodes, May 2001.

[8] 上野伴希、"試作で学ぶ高周波フィルタの設計法"、pp. 111~133, 総合電子出版、2002.