

800MHz 帯/5GHz 帯伝搬損失比較実験と 5GHz 帯伝搬モデルの一検討

米澤 健也[†], 前山 利幸[†], 岩井 誠人[†], 原田 博司[‡]

[†] K D D I 研究所 神奈川県横須賀市光の丘 7-1

[‡] 情報通信研究機構 神奈川県横須賀市光の丘 3-4

E-mail: [†] yonezawa@kddilabs.jp

あらまし 第 4 世代移動通信システムの割当て周波数としてマイクロ波帯が有力な候補とされている。しかしながら、現在 移動通信システムの回線設計で用いられている既存の伝搬モデルの適用周波数帯は 2GHz 程度までである。本稿では 800MHz 帯と 5GHz 帯の伝搬損失特性の比較実験結果について報告し、伝搬損失の周波数特性に関して考察する。また、その結果を用いて、代表的な伝搬モデルである COST231 Walfisch-Ikegami モデルの適用周波数帯を 5GHz 帯まで拡張することを試みる。

キーワード 5GHz 帯, マクロセルシステム, 伝搬損失, 推定.

1. まえがき

屋外での高速無線インターネットの需要を受けて、4.9GHz~5.0GHz 及び 5.03~5.091GHz が無線アクセスに割り当てられた[1]。また、第 4 世代移動通信に割り当てられる周波数帯として 5GHz 帯を含むマイクロ波帯が有力な候補とされている[2]。これらの動向を受けて、筆者らは 5GHz 帯（4.9~5.0GHz）で実験局免許を取得し伝搬実験を進めてきた[3]。

現在、移動通信システムの回線設計で用いられている伝搬モデルとしては、COST231 Walfisch-Ikegami モデル[4]~[7]（以下、WI モデル）、奥村-秦式[8, 9]などがある。これらのモデルの適用周波数帯は 2GHz 以下である。一方、マイクロ波帯での実験結果を用いた既存の伝搬モデルの拡張も検討されている[10]~[12]。

本報告では、ビル屋上に基地局を設置したマクロセルシステムを想定して、見通し外となる環境において取得した 800MHz 帯と 5GHz 帯の伝搬損失特性について報告する。次に、この伝搬損失特性に関して、WI モデルの適用周波数帯の拡張を試みる。

2. 実験環境及び実験諸元

実験は福島県いわき市で行った。いわき市は平均建物高 2-3 階程度の地方の中都市である。表 1 に実験諸元を示す。本実験では、9 階建てのビル屋上にある 800MHz 帯システム基地局と同じ位置に 5GHz 帯送信機及び送信アンテナを設置した。受信アンテナは 800MHz 帯、5GHz 帯ともに測定車両の天井に取り付けられ、市街地を面的に走行しながら 800MHz 帯、5GHz 帯の受信信号強度を同時に測定した。測定車両の位置は GPS(Global Positioning System)により取得した。

表 1 実験諸元

	5 GHz 帯	800 MHz 帯
中心周波数	4950 [MHz]	845 [MHz]
送信電力	40 [dBm]	40 [dBm]
送信アンテナ	水平面内無指向性 利得 8.2 [dBi] 設置高 36 [m]	水平面内半値幅 60 [度] (3 セクタ) 利得 16 [dBi] 設置高 36 [m]
受信アンテナ	水平面内無指向性 利得 4.7 [dBi] 設置高 2.5 [m]	水平面内無指向性 利得 3.0 [dBi] 設置高 2.5 [m]

3. 実験結果

実験で取得した 800MHz 帯及び 5GHz 帯の受信信号強度を送信電力、送受信アンテナ利得、送信アンテナパターン及びケーブル損失を用いて伝搬損失に変換した。伝搬損失を 30m 区間毎に平均化し、見通し内環境における測定結果を除外した。測定結果を図 1 に示す。

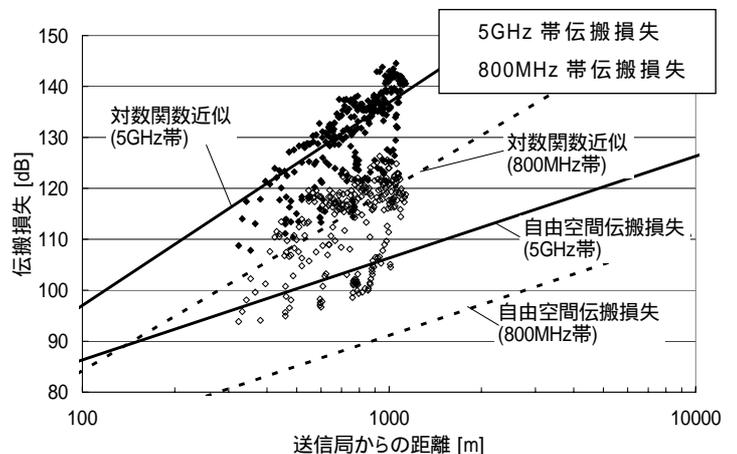


図 1 伝搬損失測定結果の距離特性(見通し外環境)

800MHz帯の伝搬定数は3.6、5GHz帯の伝搬定数は4.0であった。ここで、伝搬損失の差の距離に対する依存性はないものと想定し、伝搬損失の差の中央値を求めた。その結果、伝搬損失差の中央値は16.71 [dB]であった。この値は、自由空間伝搬損失の差15.35 [dB]とほぼ等しいと言える。

4. 既存の伝搬モデルの適用及び拡張検討

4.1. WIモデルの適用

本章では、前出の測定結果を用いて、既存の伝搬モデルの適用周波数の拡張を検討する。既存の伝搬モデルを拡張し、マイクロ波帯に適用可能な伝搬損失推定式を提案した研究として、奥村-秦式の拡張[11]、坂上式の拡張[12]などがある。これらのモデルはいずれも統計的な処理から導き出されたSight-Generalな伝搬モデルである。一方、本稿では理論的な検討から確立されたWIモデル[4]-[7]の拡張を検討する。なお、WIモデルはITU-Rでも採用されている[13]。

WIモデルにおける伝搬損失は、基地局-移動局間の自由空間伝搬損失 L_0 [dB]、基地局-移動局間の建物による回折損失 L_{rts} [dB] 及び移動局近傍の建物と移動局間の回折や反射による損失 L_{msd} [dB] の和で表される。各損失は以下の式で表される。

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (1)$$

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_m + \begin{cases} -10 + 0.354\theta & (0^\circ \leq \theta < 35^\circ) \\ 2.5 + 0.075(\theta - 35) & (35^\circ \leq \theta < 55^\circ) \\ 4.0 - 0.114(\theta - 55) & (55^\circ \leq \theta < 90^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

$$L_{msd} = 54 - 18 \log(1 + \Delta h_b) + 18 \log d - 9 \log b + \begin{cases} [-4 + 0.7(f/925 - 1)] \log f & (\text{大都市}) \\ [-4 + 1.5(f/925 - 1)] \log f & (\text{中小都市}) \end{cases} \quad (3)$$

式(1)~(3)で用いている変数の定義及び以降の伝搬損失推定に用いた値を表2に示す。WIモデルの適用周波数帯は2000MHzまでであるが、周波数を4950MHzとした場合も検討対象とする。なお、本稿では、中小都市における推定式を検討対象とする。

WIモデルにおける L_{msd} のベースとなったWalfischの提案モデル[6]では基地局-移動局間の建物を等間隔に配置された同じ高さの半無限平板 (half-screen) と仮定している。しかし、道路を挟んだ建物間の間隔と隣接した建物間の間隔は大きく異なるなど、実際の環境はモデルの仮定と異なっている。文献[7]では、平均建物間隔の抽出が困難である場合は道路幅の2倍の値を建物間隔として推奨している。しかしながら、本検

討においてその値を用いた場合、800MHz帯における推定伝搬損失と実測値の差が大きくなった。また、道路幅の2倍という値が建物間隔として妥当ではないと考えられるため、本検討では、実験エリア内の空き地面積(建物以外の面積)及び建物数から平均建物間隔を求めた。表2の適用値を用いて、WIモデルを800MHz帯及び5GHz帯に適用したときの伝搬損失推定値と実測値の距離特性(対数関数による近似)の比較を図2に示す。

表2 WIモデルのパラメタ及び適用した値

変数	定義	適用した値
b	建物間隔 [m]	6.68
w	道路幅 [m]	16.57
h_{roof}	建物高 [m]	7.18
h_b	基地局アンテナ高 [m]	36.0
h_m	移動局アンテナ高 [m]	2.50
θ	道路角 [°]	各測定点で抽出
d	基地局-移動局間距離 [km]	各測定点で抽出
f	周波数 [MHz]	845 / 4950
Δh_b	$h_b - h_{roof}$	28.82
Δh_m	$h_{roof} - h_m$	4.68

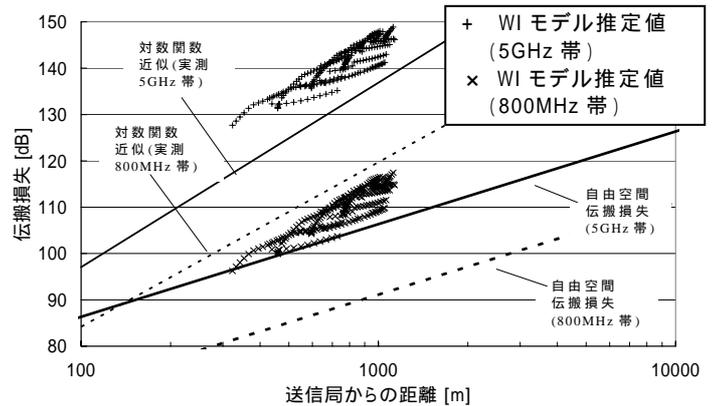


図2 WIモデルによる推定値との比較

図2において、800MHz帯に関しては、推定値が実測値よりやや小さく、5GHz帯に関しては、推定値が実測値より大きい。図3に推定誤差(“実測値” - “推定値”)の累積確率分布を示す。

推定誤差の中央値は、800MHz帯で5.5 [dB]、5GHz帯で-9.2 [dB]であった。800MHz帯の推定誤差は、伝搬モデルで仮定した市街地構造と実際の構造の差、及び、都市規模(大都市/中小都市)による差であると考えられる。

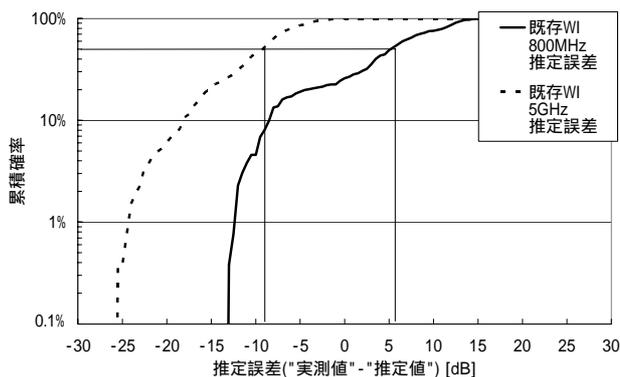


図 3 WI モデルによる推定誤差の累積確率分布

4.2. WI モデルの拡張検討

WIモデルの適用周波数帯を5GHz帯以上まで拡張することを試みる。ここで拡張方法として以下の2種類のアプローチを試みる。

- (1) 実測値ベースの拡張
- (2) WIモデルの周波数特性を基準とした拡張

4.2.1. 実測値ベースの拡張

WIモデルにおける伝搬損失推定式の周波数を含む項 L_f [dB]は以下で与えられる。

$$L_f = \underbrace{20 \log f}_{(ア)} + \underbrace{10 \log f}_{(イ)} + \underbrace{[-4 + 0.7(f/925 - 1)] \log f}_{(ウ)} \quad (4)$$

式(4)に下線で示した項(ア)は自由空間伝搬損失、項(イ)は L_{ris} においてフレネルの回折公式によって導出されている[5][14]。しかしながら、項(ウ)は Walfisch の提案モデル[6]と異なっており、COST231 において800MHz から2GHzでの実験データによる調整を行ったものと推測される。したがって、この項(ウ)に対して修正を行うことにより、WIモデルの周波数帯を拡張することを検討する。

WIモデルの適用周波数帯は800MHz~2GHzであるが、前節で示したように800MHz帯に関しても中央値で5.5 [dB]の推定誤差がある。この推定誤差は、先に述べたように実験環境に依存する誤差と考えられる。この推定誤差に周波数特性がない、すなわち、5GHz帯に適用した拡張WIモデルによる推定値の推定誤差も5.5 [dB]となることを前提として、800MHz帯、5GHz帯ともに実測値を5.5 [dB] オフセットした値により、項の修正を行う。図4に1km地点における伝搬損失を例として示し、拡張手順を以下に説明する。

推定式の項(ウ)の修正に際し、以下の2手法を試みた。

- (1) 項(ウ)を $[a + b(f/c - 1)] \log f$ とし、係数 a 、 b 及び c を調整する。
- (2) 項(ウ)を $a \log f + b$ と置換し、係数 a とオフセット b を調整する。

手法(1)及び(2)に関し、推定誤差のRMS値(二乗平均平方根)が最小となる各変数の値を求めた。修正された項(ウ)を以下に示す。なお、手法(1)によるWIモデルの修正結果を拡張WIモデル、手法(2)による結果を拡張WIモデルとする。

$$\text{手法(1)} \quad [-4.4 - 0.27(f/1790 - 1)] \log f \quad (5)$$

$$\text{手法(2)} \quad -7.97 \log f + 11.5 \quad (6)$$

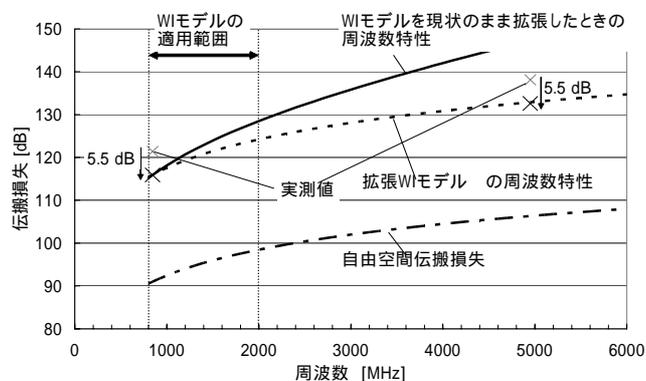


図 4 WIモデルの拡張(1km地点における推定値)

図4に破線(---)で示した曲線は、拡張WIモデルの周波数特性である。なお、拡張WIモデルの特性もほとんど差はなかった。拡張WIモデルについては、 $\log f$ の係数に含まれている周波数の影響を小さくすることにより、5GHz帯における推定値が実測値に近くなっている。拡張WIモデルに関しては、 $\log f$ の係数を調整して、実測値と同じ周波数特性を得たことと同意であるが、それにより11.5 [dB]のオフセットが生じている。

4.2.2. WIモデルの周波数特性を基準とした拡張

3章で述べたように、800MHz帯と5GHz帯の伝搬損失の差の中央値は約16.7 [dB]であり、この結果から伝搬損失は周波数の2.2乗に比例すると想定することができる。一方、WIモデルの800MHzから2GHzまでの推定損失の周波数特性は図4に示したように、2.2乗に比例する曲線の傾きより大きい。($\log f$ の係数は26~27となる。)しかしながら、既存のWIモデルが広く使われていることを考慮すれば、この特性を無視す

ることはできない。

そこで、以下の手順により、WIモデルを拡張する(図5)。なお、この手順で得た推定式を拡張WIモデルとする。

- (1) 800MHz から 2GHz までの WIモデルの周波数特性を”基準カーブ”とする。
- (2) 周波数の 2.2 乗に比例する周波数特性のカーブ “ $22\log f + offset$ ” を拡張 WIモデルの周波数特性とする。
- (3) 800MHz から 2GHz の範囲において、基準カーブと WIモデルの周波数特性カーブの RMS 値が最小となるような “offset” を求める。

この手順により、拡張WIモデルの周波数を含む項 L_f は次のように表される。

$$L_f = 22 \log f + 13.4 \quad (7)$$

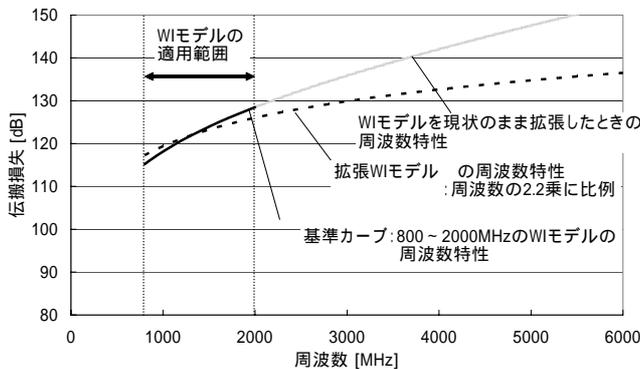


図5 拡張WIモデル

4.2.3. 推定誤差

4.2.1 節及び 4.2.2 節の結果から、拡張WIモデル ~ は WIモデルの L_{msd} を以下の式と置換することにより得られる。

拡張WIモデル

$$L_{msd} = 54 - 18 \log(1 + \Delta h_b) + 18 \log d - 9 \log b + [-4.4 - 0.27(f/1790 - 1)] \log f \quad (8)$$

拡張WIモデル

$$L_{msd} = 54 - 18 \log(1 + \Delta h_b) + 18 \log d - 9 \log b - 7.97 \log f + 11.5 \quad (9)$$

拡張WIモデル

$$L_{msd} = 54 - 18 \log(1 + \Delta h_b) + 18 \log d - 9 \log b - 8 \log f + 13.4 \quad (10)$$

図6及び図7に実測値の距離特性(対数関数近似)と拡張WIモデル、との比較をそれぞれ示す。拡張WIモデルのグラフに関してはモデルとほぼ同じ特性であるため、省略する。

拡張WIモデルは800MHz帯、5GHz帯とも実測値より推定値が小さくなっている(図6)。一方、拡張WIモデルに関しては、800MHz帯、5GHz帯とも推定値の上側の包絡線と実測値の対数関数近似がほぼ一致している(図7)。

図8に拡張WIモデル及びの推定誤差の累積確率分布、表3に各モデルの推定誤差の中央値及びRMS値を示す。拡張WIモデル及びに関しては、800MHz帯におけるWIモデルの推定誤差5.5 [dB]と同程度の推定誤差を保持しながら、5GHz帯の推定誤差を800MHz帯に近づけている。一方、拡張WIモデルに関しては、800MHz帯、5GHz帯ともに推定誤差が改善されており、かつ、推定誤差の周波数による差は小さくなっている。

なお、拡張WIモデルを一般的な結論として結論付けるためには、他地域における測定及び検討が必要である。

表3 推定誤差の統計値

(中央値)

	800MHz帯	5GHz帯
WIモデル	5.24 [dB]	-9.24 [dB]
拡張WIモデル	5.86 [dB]	5.25 [dB]
拡張WIモデル	5.25 [dB]	5.18 [dB]
拡張WIモデル	3.60 [dB]	3.39 [dB]

(RMS値)

	800MHz帯	5GHz帯
WIモデル	8.35 [dB]	11.69 [dB]
拡張WIモデル	8.65 [dB]	6.75 [dB]
拡張WIモデル	8.35 [dB]	6.71 [dB]
拡張WIモデル	7.76 [dB]	5.81 [dB]

5. まとめ

本稿では、マクロセルシステムを想定した環境における800MHz帯と5GHz帯との伝搬損失特性の比較実験結果について示した。実験結果から、800MHz帯と5GHz帯との伝搬損失の差は、自由空間伝搬損失の差とほぼ等しいことが分かった。また、その結果を用いて、適用周波数範囲が2GHzまでであるWIモデルの拡張を試みた。その結果、800MHz帯における伝搬損失推定誤差と同等の推定誤差が5GHz帯においても得ることができた。

今後、他周波数における実験や他地域における実験を実施し、マイクロ波帯伝搬モデルの確立を進める予定である。

文 献

- [1] 総務省報道資料，無線インターネットの高速化に向けて - 「5GHz帯無線アクセスシステムの技術的条件」を答申 - ，2002年5月
http://www.soumu.go.jp/s-news/2002/020507_1.html
- [2] 総務省報道資料，マイクロ波帯固定通信システムの周波数割当の見直し - 「固定通信システムによるマイクロ波帯の利用に関する調査研究会」報告 - ，2001年6月
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/pressrelease/japanese/sogo_tsusin/010629_2.html
- [3] K. Yonezawa, T. Maeyama, H. Iwai, H. Harada, "Path Loss Measurement in 5 GHz Macro Cellular Systems and Consideration of Extending Existing Path Loss Prediction Methods," IEEE WCNC2004 Conference Record, 2004.
- [4] COST231 Final Report. "Digital Mobile Radio towards Future Generation Systems."
- [5] Ikegami, F., Yoshida, S., Takeuchi, T., Umehira, M., "Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, AP-32, pp. 822-829, 1984.
- [6] Walfisch, J., Bertoni, H.L. "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, AP-36, pp. 1788-1796, 1988.
- [7] K. Low, "Comparison of Urban Propagation Models with CW-measurements," IEEE VTC'92 Conference Record, pp.936, 1992.
- [8] 奥村義久，大森英二，河野十三彦，福田倚治，"陸上移動無線における伝搬特性の実験的研究"，通研実報，**16** [9]，pp. 1705-1764, 1967.
- [9] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service," IEEE Trans. Veh. Technol., VT-29, pp. 317-325, 1980.
- [10] N. Kita, S. Uwano, A. Sato, M. Umehira, "A Path Loss Model in Residential Areas Based on Measurement Studies Using a 5.2-GHz/2.2-GHz Dual Band Antennas," IEICE Trans. Commun. Vol.E84-B, No.3, 2001.
- [11] 北尾光司郎，市坪信一，"400MHz～8GHz帯のマイクロセル伝搬損失推定式"，第477回電波研連F分科会。
- [12] 太田喜元，表英毅，三上学，藤井輝也，"マイクロ波帯における伝搬損失推定式の検討"，信学技報，A/P2003-319, 2004.
- [13] ITU-R 勧告 P.1411-2, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz," 2003.
- [14] 池上著「応用電波工学」コロナ社。

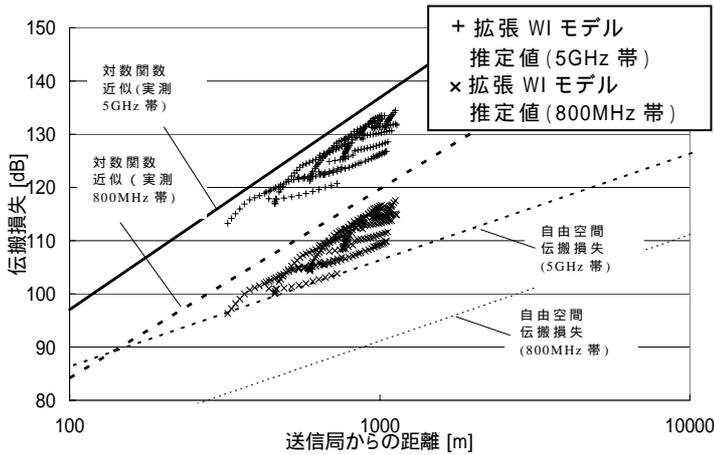


図 6 実測値と拡張 WI モデル の比較

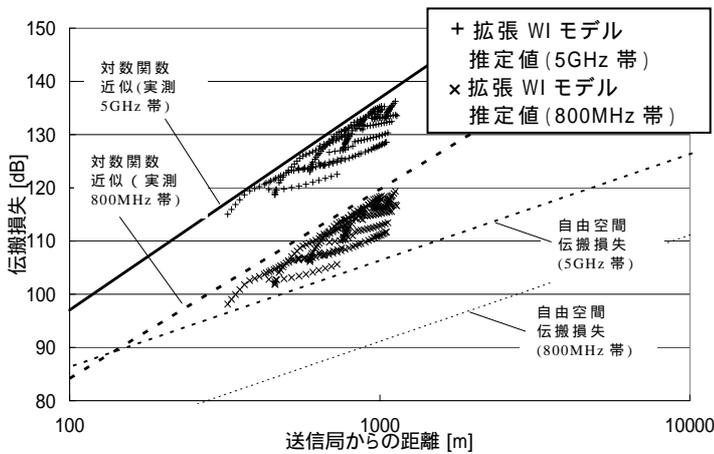


図 7 実測値と拡張 WI モデル の比較

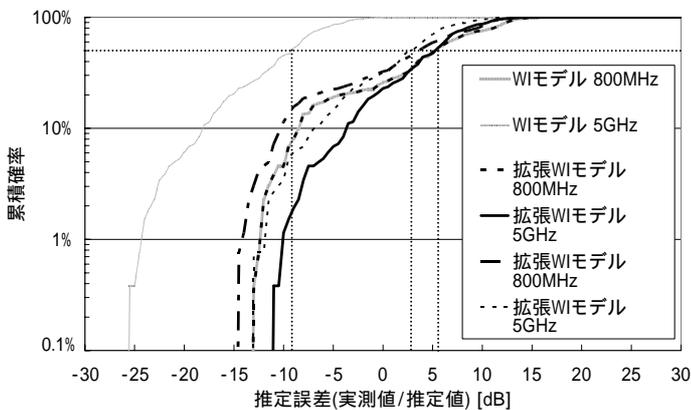


図 8 拡張 WI モデル の推定誤差の累積確率