

2020年のサービス実現に向けた5G技術特集

5Gのための電波伝搬

現在ドコモでは、第5世代移動通信システム「5G」の検討を精力的に進めている。本システムでは、高周波数帯の利用を想定しているために、これら高周波数帯における伝搬特性の明確化は、5Gのための電波伝搬研究における最重要課題である。本稿では、電波伝搬の課題と検討状況について概説し、ドコモが実施したフィールド実験で得られた結果、および電波伝搬シミュレーション技術の検討結果について解説する。

先進技術研究所 5G推進室

いまい てつろう
今井 哲朗きたお こうしろう
北尾 光司郎

トラン ゴクハオ

おおまき のぶたか
大巻 信貴

1. まえがき

現在、ドコモでは、図1に示すファントムセルコンセプト*1に基づく第5世代移動通信システム「5G」の無線アクセスネットワーク*2の検討を精力的に進めている[1]。本コンセプトでは、「マクロセル*3内にさまざまな形態の小セル*4を積極的に配置するオーバレイ*5構成」が前提となり、また、より広い帯域幅を確保して超高速伝送を実現するために、高周波数帯である高SHF (Super High Frequency)*6帯 (6GHz以上) / EHF (Extremely High Fre-

quency)*7帯 (主に30~100GHz) の利用を想定している。ここで、高周波数帯におけるキャリア周波数*8を決定するためには各種伝搬特性の周波数特性の明確化が必要であり、5Gのための電波伝搬研究における最重要課題である。本稿ではまず、電波伝搬の課題と検討状況について、5G関連プロジェクトの動向とともに概説する。次に、ドコモがこれまでに実施したフィールド実験で得られた結果の一部を紹介し、続いて、将来必須となる高周波数帯における電波伝搬シミュレーション技術の検討結果について解説する。

2. 電波伝搬の課題と検討状況

2.1 5Gにおける課題

(1) 検討対象周波数帯域

5Gでは、高周波帯の利用が想定されていることから、その伝搬特性 (伝搬損失*9特性、マルチパス*10特性) を6~100GHzの範囲で明らかにする必要がある。これまで、20~30GHz帯および50~70GHz帯については、NYU (New York University) のグループや後述するMETIS (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty In-

©2016 NTT DOCOMO, INC.
本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

*1 ファントムセルコンセプト：マクロセルに小セルをオーバレイし、制御信号の通信にマクロセル基地局を、情報信号の通信に小セル基地局を利用する通信システムのコンセプト。

*2 無線アクセスネットワーク：通信ネットワークにおける、無線アクセス区間の総称。

*3 マクロセル：セルとは移動通信システムに

おいて、1つの基地局アンテナがカバーするエリアであり、マクロセルはカバーされるエリアが比較的広いセル (半径500m程度以上) のこと。

*4 小セル：カバーされるエリアが比較的狭いセル (半径500m程度以下)。マイクロセルとも呼ばれる。

formation Society)^{*11}などにより、比較的多くの検討結果が報告されている(ただし50~70GHz帯では、60GHz帯の検討がほとんどである)[2][3]。一方、10~25GHz帯および40~55GHz帯については、報告例が極めて少なく、今後の検討が必要である。

(2)影響要因

図2は高周波数帯において伝搬特

性に与える影響が大きくなると考えられる要因をまとめたものである。これらの中で、①降雨減衰と②樹木損失については、ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunications Sector) の勧告により明らかにされている[4][5]。また、③人体遮蔽については、後述するMiWEBA^{*12} (Millimeter-Wave Evolution for Backhaul and Access)

プロジェクトから、その影響を考慮したチャンネルモデル^{*13}が提案されている[6]。ただし、このモデルは、主に60GHz帯を対象としたものであり、他の周波数への適用性については今後の検討が必要である。また、④粗面散乱特性については、レイトレーシング^{*14}などの伝搬シミュレーションの観点からも、その特性の把握が重要と考える[7]。

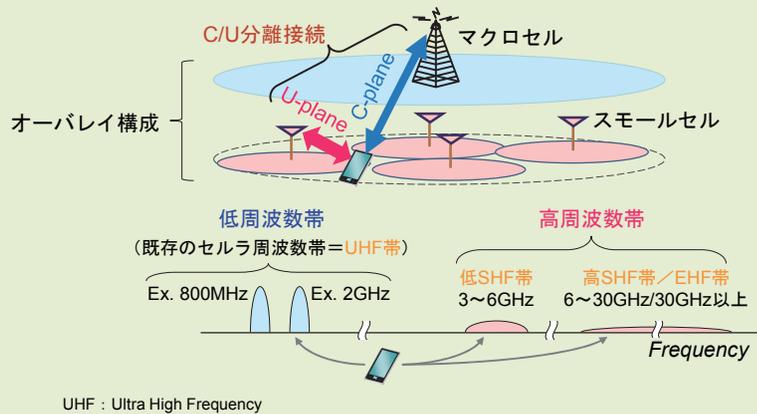


図1 ファントムセルコンセプト

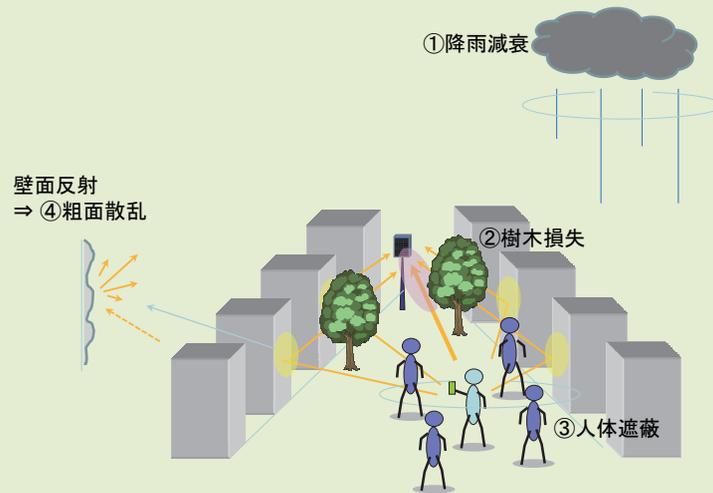


図2 高周波数帯の伝搬に影響を及ぼす要因

*5 オーバレイ：マクロセルの配下にスモールセルを配置する構成。
 *6 SHF：3~30GHzの周波数の電波。
 *7 EHF：30~300GHzの周波数の電波。ミリ波とも呼ばれる。
 *8 キャリア周波数：搬送波周波数。搬送波とは情報を伝達するために変調される電波。
 *9 伝搬損失：送信局から放射された電波の電

力が受信点に到達するまでに減衰する量。
 *10 マルチパス：送信局から受信局への電波の伝搬路(パス)が複数ある状態。
 *11 METIS：欧州の次世代無線通信システム研究プロジェクト。
 *12 MiWEBA：ミリ波技術の移動通信システムへの適用を目的とした欧州の研究プロジェクト。

*13 チャンネルモデル：無線通信システムの性能評価を行うために用いられる電波の振舞いを模擬したモデル。
 *14 レイトレーシング：電波を光とみなして追跡することにより伝搬特性をシミュレーションする方法。

2.2 5G関連プロジェクトの動向

5G関連のプロジェクトとしては、欧州における研究プロジェクトであるMETIS[2]やMiWEBA[6]が広く知られている。表1に両プロジェクトの特徴をまとめる。

(1)METIS

METISは、用途に応じて2つのチャンネルモデルを提案している。1つは、ITU-Rや3GPP (3rd Generation Partnership Project) においてシステム評価用のチャンネルモデルとして一般的に利用されてきたGSCM (Geometry-based Stochastic Channel Model) タイプのチャンネルモデルである。GSCMは実測データをベースに各パスの統計的特性を与えるモデルである。本モデルの周波数適用領域は70GHz以下とされているが、市街地マイクロセル環境においては、6GHz以下しかモデル発生用のパラメータが用意されていない。また、インドア環境においても、6GHz以下および50~70GHz帯しかパラメータは用意されておらず、5Gで想定している周波数範囲を十分カバーして

いない。もう1つのモデルは、Map-based Modelと呼ばれる、レイトレーシングを適用して伝搬特性を求めるモデルである。本モデルは100GHz以下を対象としているが、モデルの計算結果と実測データとの比較検討が少なく、推定精度の検証については今後の課題だと考える。

(2)MiWEBA

MiWEBAではQuasi-Deterministic Modelと呼ばれるモデルを提案している。本モデルは、レイトレーシングにより求められるパスと統計的に与えられるパスより構成されており、METISにおけるGSCMとMap-based Modelのハイブリッド的なモデルである。周波数帯については、主に60GHz帯を対象としているために、他の周波数帯へ適用する際は、注意が必要である。

上記以外にも、アメリカ国立標準研究所 (NIST: National Institute of Standards and Technology) の呼びかけにより結成された5G Millimeter Wave Channel Model Alliance [8] や5GPPP (The 5G Infrastructure

Public Private Partnership) におけるmmMAGIC (Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications) [9]などのプロジェクトも5G用チャンネルモデルの検討を開始している。

3. ドコモが実施した実環境における伝搬特性

ドコモがこれまでに実施したフィールド伝搬実験で得られた、市街地マイクロセル環境における伝搬損失特性と屋内におけるマルチパス特性について以下に解説する。なお、本稿では前述したチャンネルモデルに関係なく独自に計測を実施している。

3.1 伝搬損失特性

(1)測定概要

測定は東京駅周辺で実施した。写真1は測定場所であり、平均建物高と平均道路幅はそれぞれ約20mと約30mである。測定では、バケット車のバケット上に設置した基地局アンテナから受信レベル測定の容易な

表1 5G関連プロジェクト

プロジェクト	チャンネルモデルタイプ	周波数	シナリオ
METIS	GSCM	70GHz以下	市街地マイクロ、市街地マクロ、オフィス、ショッピングモール、ハイウェイ、オープン・エア・フェスティバル ^{*1} 、スタジアム
	Map-based Model	100GHz以下	市街地マイクロ、市街地マクロ、ルーラルマクロ、オフィス、ショッピングモール、ハイウェイ、オープン・エア・フェスティバル
MiWEBA	Quasi-Deterministic Model	57~66GHz	開放地、ストリート・キャニオン ^{*2} 、ホテルロビー

*1 オープン・エア・フェスティバル：野外コンサート会場などを想定したシナリオ。

*2 ストリート・キャニオン：通りの周辺が高い建物に囲まれており、基地局アンテナが周辺建物より低い位置に設置されるシナリオ。

無変調信号を送信し、測定車のループに設置した移動局アンテナで電波を受信することで、受信レベルを記録した。測定諸元を表2に示す。データ処理では、データから10m区間を1mずつ移動させた移動区間中央値を求め、それより伝搬損失を算出した。

(2)測定結果

電波伝搬損失の距離に対する変化

の特性を図3に示す[10]。ただし、これらは測定より得られた伝搬損失との二乗和誤差が最少となる距離および周波数を用いた数式の計算結果である。図より、見通し内と見通し外の両ケース共に、距離が増加するにつれて伝搬損失が増加することがわかる。また、周波数が高くなるにつれて伝搬損失が増加することがわかる。例えば、見通し内のケースに

おいて0.81GHzと37.1GHzを比較すると、伝搬損失が30dB程度増加する。また、見通し外になると、さらに伝搬損失が増加し、そのため伝搬損失補償技術は特に重要となる。

3.2 屋内環境のマルチパス特性

(1)実験概要

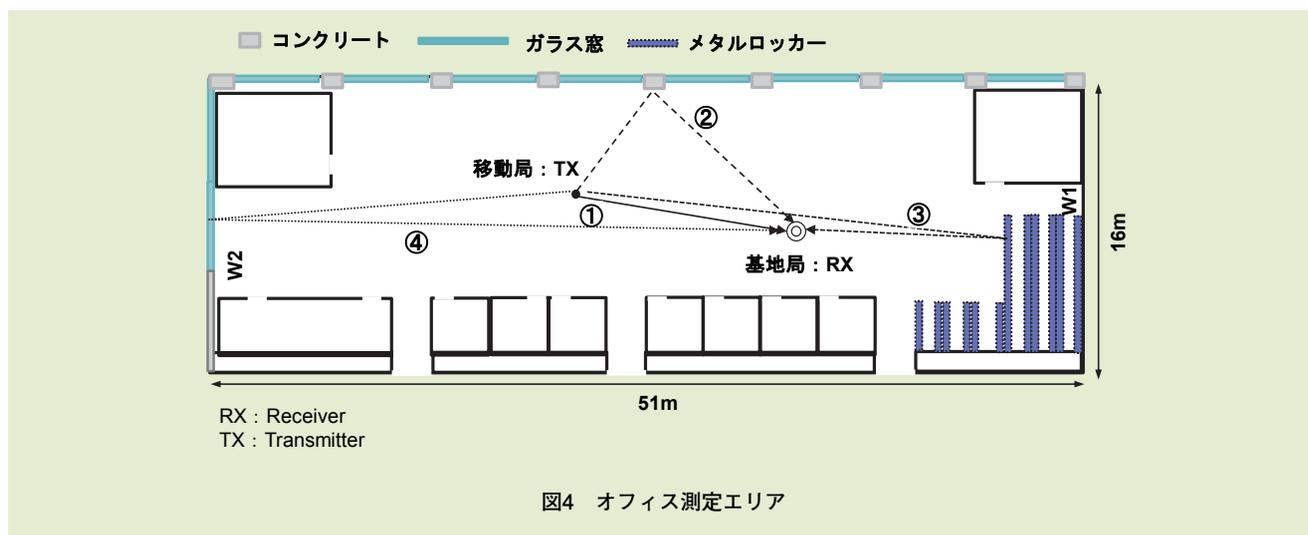
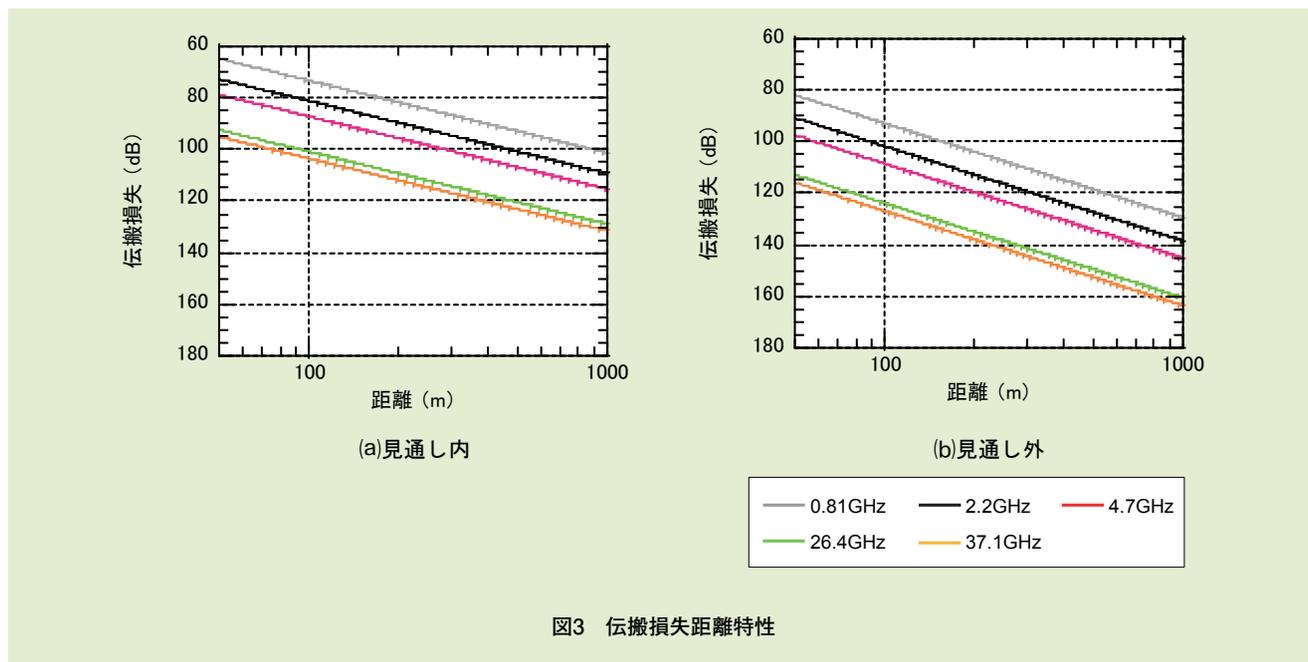
ここでは、屋内の伝搬実験より得られた“基地局への到来波の特性”について解説する。実験には、遅延時間方向においてもマルチパスを分離するために遅延時間を測定できる遅延測定器を使用した[11]。測定信号の中心周波数は19.85GHz、帯域幅は50MHzである。実験は、図4に示すオフィスで実施した。オフィスには、高さ1m程度のデスクおよび椅子、高さ2m程度のメタルロッカーなどが存在している。また、いくつかの会議室およびオフィス機器のあるブースが存在し、ガラス窓がある壁面にはコンクリート柱が存在する。また、天井高は2.7mであり天井の材質は石膏ボードである。測定では、



写真1 測定エリア

表2 測定諸元

項目	諸元
中心周波数	0.81GHz, 2.2GHz, 4.7GHz, 26.4GHz, 37.1GHz
送信電力	43dBm (0.81GHz, 2.2GHz), 40dBm (4.7GHz, 26.4GHz), 37dBm (37.1GHz)
送信信号	無変調信号
基地局アンテナ高	1.5m, 6m, 10m
基地局アンテナ	スリープアンテナ
移動局アンテナ高	2.7m
移動局アンテナ	スリープアンテナ
基地局—移動局間距離	56~959m



送信局を移動局と想定し、高さ1.5mのスリープアンテナ*15で全方面へ電波を放射した。また、受信局を屋内基地局と想定し、高さ2.3mの基地局アンテナを設置した。基地局アンテナにはホーンアンテナ*16を使用して、仰角と方位角を変えながら遅延プロファイル*17の取得を行い、

電波の到来方向を測定した。アンテナ間の状況は見通し内であった。

(2)測定結果

図5と図6に測定で得られた結果を示す。ただし、図5は“仰角および方位角に対する受信電力”の特性であり、図6は“方位角および遅延時間に対する受信電力”の特性である。

また、各図中の“○”は測定結果を解析して得られた電波の伝搬路(パス)である。仰角は、ホーンアンテナが水平の場合を0°とし、ホーンアンテナが水平より上を向く場合を正とした。方位角は、ホーンアンテナの方向が壁W2の法線方向と一致する場合を0°とし、法線方向の右

*15 スリープアンテナ：水平面内においてほぼ同じ強度の電波を放射するアンテナ。

*16 ホーンアンテナ：角錐・円錐の形状を持ち、特定の方向へ強い電波を放射するアンテナ。

*17 遅延プロファイル：受信局に到達した直接波および散乱波の伝搬遅延時間と受信電力の関係を示す波形。

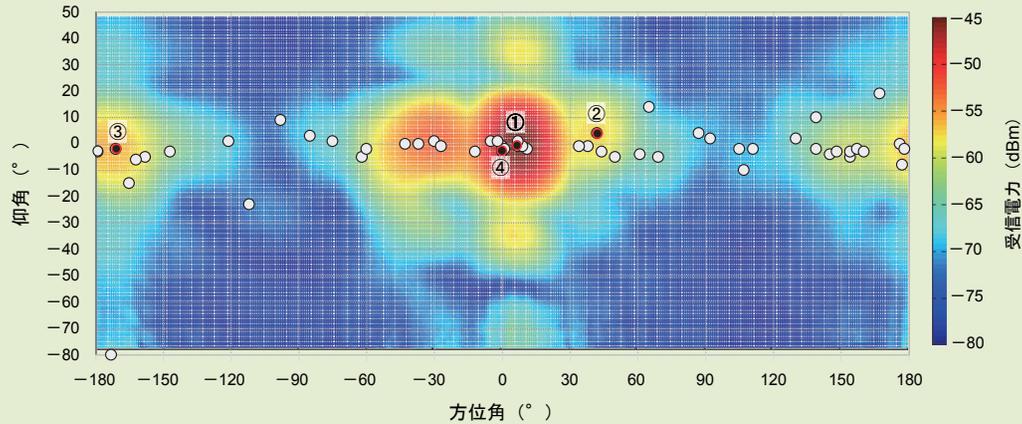


図5 到来方向と受信電力の関係

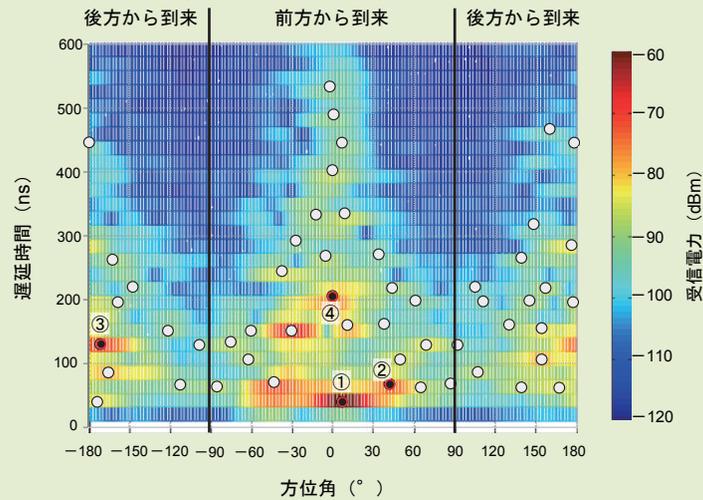


図6 到来方向、遅延時間および受信電力の関係

側を正とした。図5および図6より、比較的多くのパスが存在することがわかる。これらのパスは、方位角方向では、ほぼ一様に存在しており、仰角方向については、 0° 付近に集中していることがわかる。また、図5および図6には、直接波と主な壁面などからの反射波（正規反射を仮定）のパス（図4①～④）を併せて

示しているが、これらのパスは受信電力が大きくなることがわかる。なお、パス④は実際にはガラスの鉄製窓枠からの反射だと考えられる。

4. 伝搬シミュレーション技術

4.1 レイトレーシング法

市街地伝搬特性を推定する技術と

して代表的なものにレイトレーシング法がある。ここで、市街地ストリート環境では道路沿いに高いビルが存在するケースが多いため、レイトレーシングにおいては「道路沿いがすべて壁面で覆われている伝搬路のモデル」を仮定する場合が多い。このモデルにおいて、送信点から射出されて受信点に到達するレイは、

道路両脇のビルの間を複数回反射しながら受信点に到達するレイ（図7中の青線）、交差点の建物端部を經由して受信点に至るレイ（図7中の赤線）、大地面で反射するレイなどから構成され、精度の高い結果を得るためには多重反射を含めた多数のレイを考慮する必要がある。

4.2 交差点建物モデル

交差点にレイトレーシング法を適用する際に、従来モデルでは交差点のビル端部を直角と仮定していた。

図8に従来モデルの計算結果と実測値の比較を示す。従来モデルを用いると、周波数が比較的低い(a)の800MHzの場合

高周波数である(b)の37GHzにおいては、交差点から遠い場所で推定精度が著しく劣化することがわかる。

5Gシステムでは高周波数帯（6～100GHz）の利用を想定していることから、この誤差を低減する必要がある。

ところで、実際の建物の端部形状

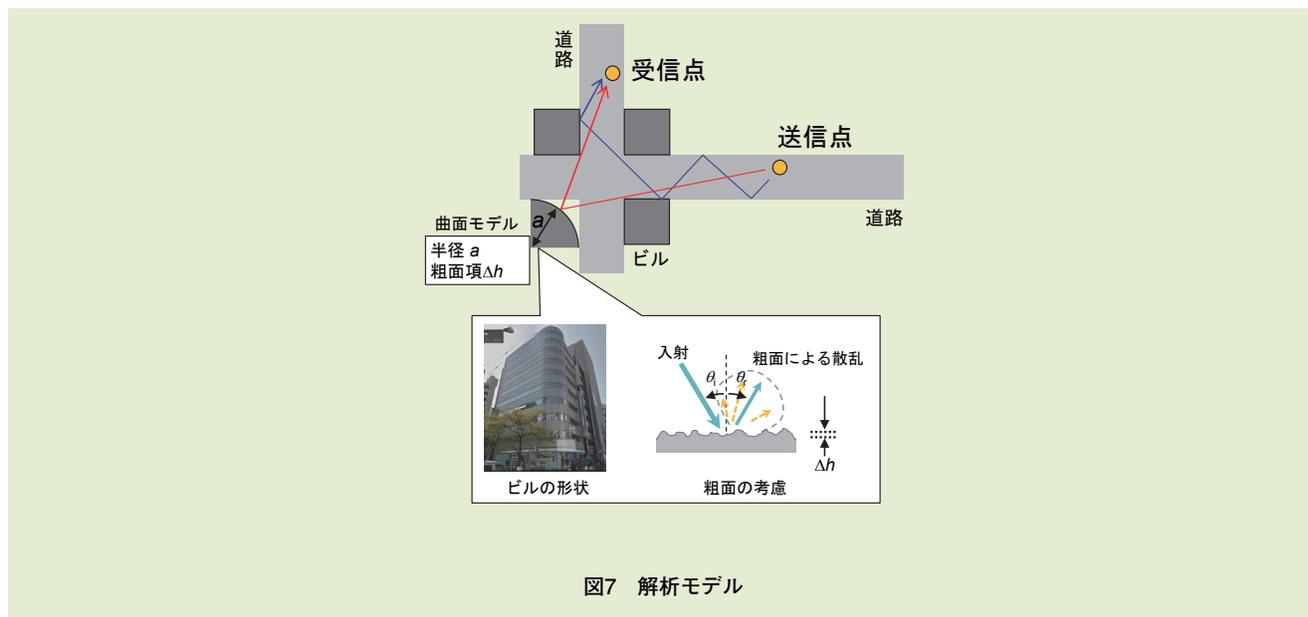


図7 解析モデル

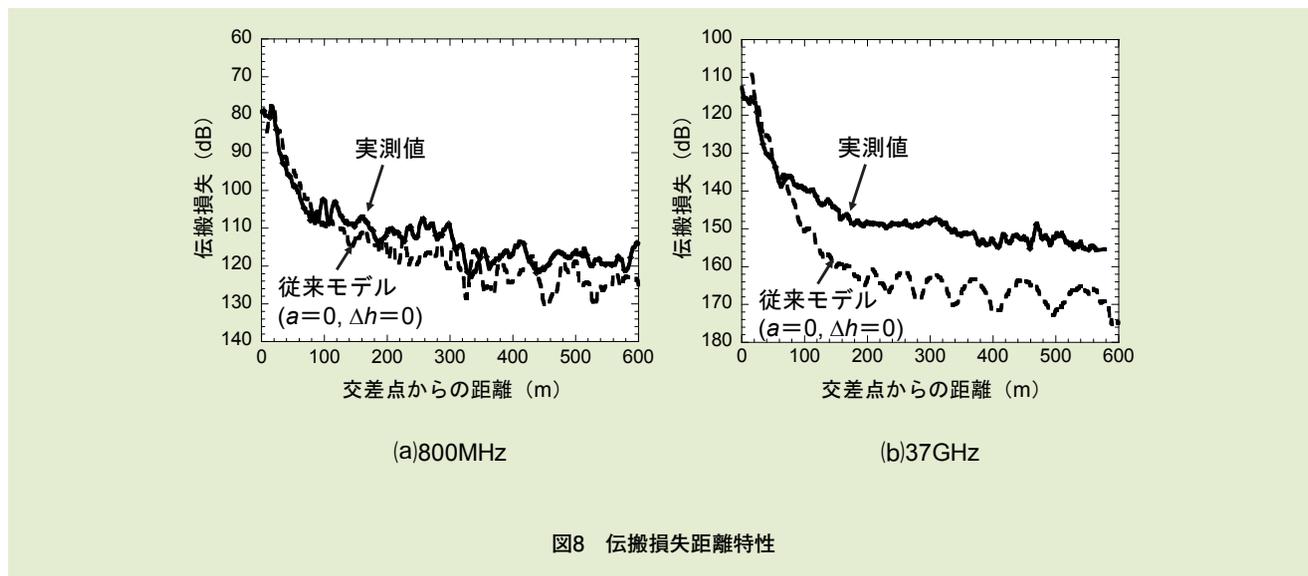


図8 伝搬損失距離特性

は直角ではなく、図7のように丸みを帯びた形状を有している場合が多い。そこで、ドコモでは交差点の建物の端部形状を半径 a の曲面形状としてモデル化することを提案している[12]。なお、従来モデルは半径をゼロ ($a=0$) としたモデルと言える。以下、曲面形状を用いたモデルを提案モデルと呼ぶ。

また、従来モデルでは建物の表面を滑らかな面として扱っているが、波長がミリオーダーとなるEHF帯の電波にとっては建物表面の粗さが無視できなくなる。図9に表面の粗さに h (図7参照) に対する誤差特性を示す。ただし、レイトレーシング計算には曲面形状を考慮した提案モデル ($a=7\text{m}$: 実際の建物サイズに相当する値) を用い、また誤差は、平均的な誤差を得るために計算値と実測値のRMS (Root Mean Square) 誤差^{*18}としている。4.7GHz以下の周波数では表面の粗さに対してほとんど変化しないが、26GHz以上の周波数になると粗さの影響が顕著になることがわかる。今回の結果では、1.5mm程度の粗さを考慮することで、26GHz以上の誤差でも低減可能になることがわかる。

4.3 精度検証

図10に従来モデルおよび提案モデルにおける実測値とのRMS誤差の周波数特性を示す。ただし、提案モデルでは前述の結果を参照して $a=7\text{m}$ 、 $\Delta h=1.5\text{mm}$ としている。図より、従来モデルでは周波数が高くな

るにつれて誤差が大きくなるのに対して、提案モデルでは、全周波数において10dB以下に低減できることがわかる。すなわち、レイトレーシングにおいて提案モデルは高周波数帯の電波伝搬シミュレーションに適していると言える。

5. あとがき

5Gでは高周波帯の利用が想定されていることから、システムを検討するためには電波伝搬特性の明確化が必須である。本稿では、電波伝搬における課題と、これまで得られて

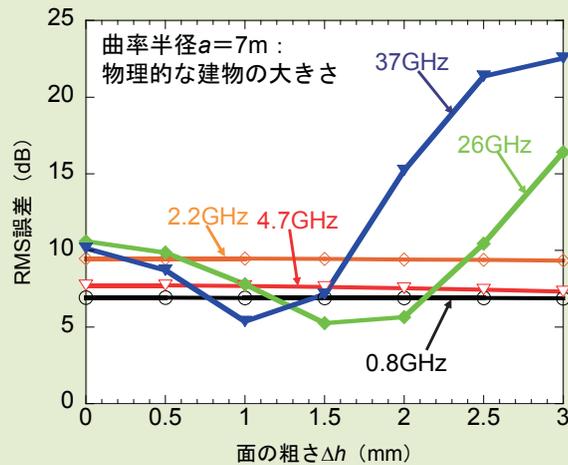


図9 粗面の影響

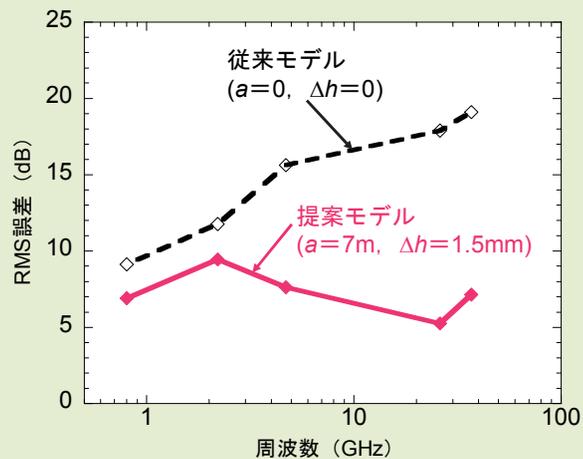


図10 従来モデルおよび提案モデルのRMS誤差周波数特性

*18 RMS誤差：誤差の二乗平均平方根をとった値。

いる検討結果について解説した。なお、ここで紹介した結果はドコモが得た結果の一部であり、実測結果の詳細については文献[10] [11]を、伝搬シミュレーション技術の詳細については文献[11]などを参照されたい。今後は、より多様な環境で測定を行うとともに、報告例の少ない周波数帯において測定を行う予定である。

文 献

- [1] NTTドコモ：“DOCOMO 5G White Paper, 5G Radio Access: Requirements, Concept and Technologies,” Jul. 2014.
- [2] METIS Deliverable D1.4: “METIS Channel Models,” Feb. 2015.
- [3] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi and F. Gutierrez: “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!,” *IEEE Access Journal*, pp.335-349, May 2013.
- [4] ITU-R Rec. ITU-R P.833-4: “Attenuation in vegetation,” 2003.
- [5] ITU-R Rec. ITU-R P.838: “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” 1998.
- [6] MiWEBA D5.1: “Channel Modeling and Characterization,” Jun. 2014.
- [7] L. Minghini, R. D’Errico, V. D. Esposti and E. M. Vitucci: “Electromagnetic simulation and measurement of diffuse scattering from building walls,” *EuCAP2014*, Apr. 2014.
- [8] NIST: “5G Millimeter Wave Channel Model Alliance.” <http://www.nist.gov/ctl/wireless-networks/5gmillimeterwavechannelmodel.cfm>
- [9] 5GPPP: “mmMAGIC.” <https://5g-ppp.eu/mmmagic/>
- [10] K. Kitao, T. Imai, N. Tran, N. Omaki, Y. Okumura, M. Inomata, M. Sasaki and W. Yamada: “Path loss prediction model for 800 MHz to 37 GHz in NLOS microcell environment,” *PIMRC2015*, Sep. 2015.
- [11] トラン ゴクハオ, 今井 哲朗, 奥村 幸彦: “20GHz帯における屋内環境のチャネル特性の検討,” 信学ソサイエティ大会, BS-1-15, Sep. 2015.
- [12] 大巻 信貴, 北尾 光司郎, 今井 哲朗, 奥村 幸彦: “見通し外ストリートセル環境におけるRounded-Shape (RS) モデルを用いたレイトレーシング法の精度改善-交差点付近の建物形状と面の粗さの考慮-, ” 信学会技術報告, AP2015-54, pp.83-88, Jul. 2015.