

Study on Simple Ray-Tracing Calculation by Selection of Dominant Propagation Paths

Kentaro YAMANE*, Hisato IWAI* and Shinsuke IBI*

(Received March 22, 2021)

The ray tracing technique is often used for analysis and estimation of propagation characteristics in various wireless systems. On the other hand, the amount of the ray tracing calculation becomes large when the target system is large-scale such as a cellular communication system. Since the large-scale environment contains many buildings, the number of the reflection surfaces and the diffraction edges in the ray tracing calculation becomes large. As the result, the number of the calculated paths in the ray tracing increases. Therefore, it is necessary to decrease the number of paths in the calculation while the estimation accuracy must be maintained. In this study, we aim to simplify the ray tracing calculation by extracting the dominant propagation paths and restricting the calculation only on the extracted paths. In the method, we firstly develop a street model simplifying the town environment and divide the whole environment into three categories based on their dominant propagation paths. Then, we carry out ray tracing calculation where only the selected paths for each region are considered. We evaluate the calculation accuracy of the simple ray tracing. From the result, we show that the simple ray tracing provides the close calculation result to those by the FDTD (Finite Difference Time Domain) electromagnetic analysis.

Key words : ray-tracing, simple calculation method, dominant propagation path, cellular communication environment

キーワード : レイトレーシング, 簡易計算法, 支配的伝搬路, セルラ通信環境

対象伝搬路の限定に基づく簡易なレイトレーシング計算に関する検討

山根 健太郎, 岩井 誠人, 衣斐 信介

1. はじめに

近年, 移動通信システムの重要性は益々高まっており, 安定かつ効率的なサービスエリア設計が重要となっている. 移動通信システムのサービスエリアの把握・設計のためには, 伝搬損失特性の把握が重要である. 伝搬損失を計算するための一般的な方法としてレイトレーシングが挙げられる¹⁾. レイトレーシングとは, 送信局から受信局に到達する全ての伝搬路を光学近似により求め, その経路の信号の総和で表される受信信号の伝搬損失を計算する方法であ

る. レイトレーシングによる伝搬損失計算は, 精度・計算量の観点から十分実用的であるため, 広く用いられている. しかし, 解析空間の反射面・回折エッジの数が多の場合等, レイトレーシングの計算量が膨大となる場合がある. そのため, レイトレーシングの高速化・簡易化は重要な技術課題である²⁾.

レイトレーシングの高速化・簡易化を目的とした検討としては様々なものがある. 例えば, 3次元レイトレーシングのトレース範囲を2次元に限定することで高速化を図る VPL (Vertical Plane Launch) 法があ

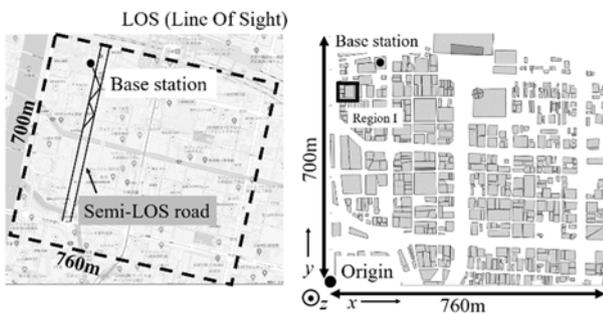
* Faculty of Science and Engineering, Department of Electronics, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6267, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: iwai@mail.doshisha.ac.jp

る^{3,4)}。また、屋内環境のイメージング法に着目した検討⁵⁾も存在する。加えて、本稿と同一の都市環境を対象とした検討もある^{6,7)}。

本稿では、計算対象の伝搬路を支配的な伝搬路に限定することにより、レイトレーシングの簡易化(以後、簡易レイトレーシングと呼ぶ)を目指す。初めに、対象の都市環境を簡易化した簡易環境モデルを作成し、そのモデルを支配的な伝搬路が異なる3つの伝搬領域に分類する。そして、分類した各領域において支配的な伝搬路のみを対象とするレイトレーシングを行う。この簡易レイトレーシングの推定精度を、FDTD (Finite Difference Time Domain: 有限差分時間領域法) による計算結果と比較することで、評価する。また、計算量の評価から、計算時間削減効果を示す。

2. 対象の都市環境と FDTD 計算結果

簡易レイトレーシングで評価対象とする都市環境である福岡県北九州市小倉駅周辺の地図を Fig. 1(a) に、その評価エリアの都市環境モデルを同図(b)に示す。都市環境モデルは評価エリア内の全ての建物の4隅の座標 (0.01m 単位) と建物高 (1m 単位) である建物データに基づいている⁸⁾。Fig. 1(b)に示すように、この都市環境はほぼ方格設計であり、道路の多くは図に示す x 方向または y 方向に沿っている。これを踏まえて、簡易レイトレーシングでは、全ての道路が直交している方格設計を前提とする。



(a) Map (b) Urban environment model

Fig. 1. Urban environment to be calculated.

次に、本稿では FDTD の計算結果を精度比較対象データとした。FDTD の計算条件を Table 1 に、計算

結果を Fig. 2 に示す⁹⁾。FDTD の計算セルサイズは $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 2\text{cm}$ であり、Fig. 2 は移動局アンテナの高さにおける 10m メッシュ内の建物外セルの受信電力の平均値を示している。本稿では、この 10m メッシュの FDTD データを精度比較対象とする。10m メッシュ内に建物外セルが存在しない場合には評価対象外となる。

Table 1. Parameters of FDTD calculation.

Frequency	1298MHz	
Transmitted power	39.5dBm	
Cell size	$2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 2\text{cm}$	
Coordinates of base station antenna	$(x, y, z) = (144.84\text{m}, 625.3\text{m}, 12.5\text{m})$	
Height of mobile station antenna	1.5m	
Transmitting and receiving antennas	Dipole (2dBi)	
Material constant of building (Concrete)	Relative permittivity	4.5
	Conductivity	0.008S/m
Material constant of road (Asphalt)	Relative permittivity	2.7
	Conductivity	0.01S/m

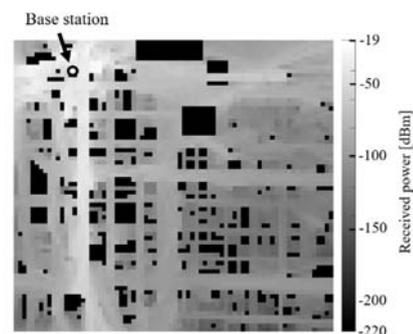


Fig. 2. Received power distribution calculated by FDTD.

3. 対象伝搬路の限定に基づいた簡易レイトレーシング

簡易レイトレーシングについて以下に示す。3.1 節においてまず簡易レイトレーシングの概要について示し、3.2 節以降でその詳細について述べる。

3.1 簡易レイトレーシングの概要

簡易レイトレーシングは、都市環境の簡易表現と支配的な伝搬波の絞り込みに基づくものである。以下にその概要を示す。また、その計算の流れを Fig. 3 に示す。

① 対象都市環境の簡易表現

1. 簡易環境モデルの構築

以後の計算の簡易化のために、Fig. 1(b)のモデルを簡易化したモデルを作成する（以後、簡易環境モデルと呼ぶ）。簡易環境モデルは 25cm メッシュの建物の存在有無情報である。

2. 伝搬領域の分類

簡易環境モデルを支配的な伝搬波の異なる複数の伝搬領域に分類する。簡易レイトレーシングでは、準見通し内伝搬領域 (Semi-LOS propagation region) (LOS: Line-of-sight : 見通し)、見通し外伝搬領域 (Non-LOS propagation region)、道路上方伝搬領域 (Region of road direction propagation) の 3 領域に分類する^{10,11)}。

3. 簡易道路マップの作成

準見通し内伝搬領域、見通し外伝搬領域では支配的な伝搬波として道路沿い伝搬波を対象とするレイトレーシングを行う。その計算を簡易に行うことを目的として、道路を簡易化した簡易道路マップを作成する。

② 支配的な伝搬路を対象としたレイトレーシング

作成した簡易環境モデル、簡易道路マップを用いて、分類した各領域において支配的な伝搬路のみを対象とする簡易レイトレーシングを行う。

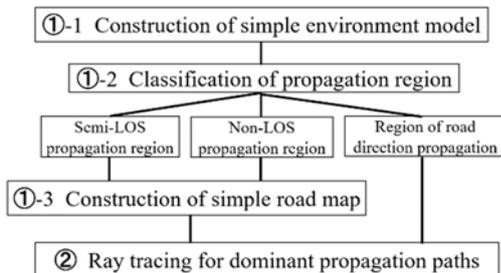


Fig. 3. Calculation flow of simple ray tracing.

3.2 対象都市環境の簡易表現と伝搬領域の分類

3.2.1 簡易環境モデルの構築

対象の都市環境モデルから 25cm のメッシュ状の簡易環境モデルを作成する。25cm 四方のセル（以後、25cm セルと呼ぶ）の 4 隅全てに建物が存在する場合、建物内セルと判定し、そうでない場合建物外セルと判定する。作成した簡易環境モデルの拡大図の一例を Fig. 4(b)に示す（拡大領域は Fig. 1(b)に示す Region I)。Fig. 4(a)にもとの都市環境モデル（0.01m 精度）の拡大図もあわせて示している。Fig. 4(b)は(a)とほぼ同じ建物形状を表しており、25cm セルの簡易環境モデルは適切に都市環境モデルを再現していることがわかる。セルサイズをより小さい値とすることで全体的な計算精度が向上すると考えられるが、メモリ量および計算量を考慮して 25cm とした。メッシュ状の簡易環境モデルとする目的は、道路幅の検出を含む以後の計算を簡易化することである。

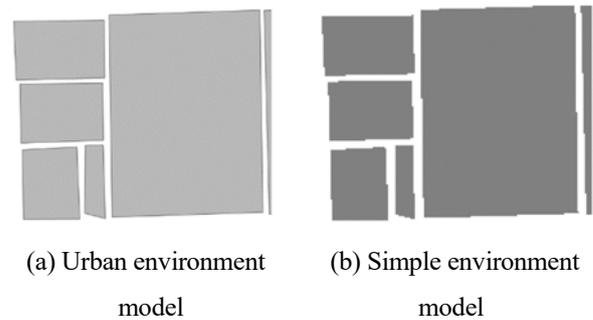


Fig. 4. Enlarged view of environment model.

3.2.2 伝搬領域の分類と簡易道路マップの作成

簡易環境モデルの受信点を、支配的な伝搬路の異なる、準見通し内伝搬領域、見通し外伝搬領域、道路上方伝搬領域の 3 領域に分類する^{10,11)}。

- 準見通し内伝搬領域：基地局が設置された建物が面する道路（以後、準見通し道路と呼ぶ (Fig. 1(a) 参照)）の領域。この道路を伝搬する道路沿い伝搬波が支配的と考える。
- 見通し外伝搬領域：準見通し道路に交差する道路の領域。準見通し道路から交差点を経て交差道路に伝搬する道路沿い伝搬波が支配的と考える。
- 道路上方伝搬領域：上記以外の領域。道路方向上方伝搬波が支配的と考える。

上記のうち、道路方向上方伝搬波について詳細を述べる。上記の通り準見通し内伝搬領域および見通し外伝搬領域では道路沿い伝搬波が支配的となる。

これら以外の領域の伝搬波としては、一般的には、建物越え伝搬波を考える場合が多い¹²⁾。しかし、対象都市環境が方格設計であること、また、一般的に道路方向は建物がなく空間的に開けていることを考慮すると、Fig. 5 に示すように、移動局が存在する道路に沿って電波が到来すると考えるのが自然である。このような伝搬波は、道路方向の比較的高い位置にある建物エッジ等の反射・回折などにより到来すると考えられる。これを踏まえて簡易レイトレーシングでは、このような伝搬波を道路方向上方伝搬波と呼び、このような領域における支配的な伝搬波と考えた。

以上示した 3 領域へ簡易環境モデルを分類した結果を Fig. 6 に示す。なお、同図では、道路方向を示すため、道路上方伝搬領域を 2 つに分類して示している。また、計算対象外の領域も示している。準見通し道路沿いでは準見通し内伝搬領域が、その交差道路沿いでは見通し外伝搬領域が多い。それ以外の大部分の領域は道路上方伝搬領域となった。

また、準見通し道路（準見通し内伝搬領域）とその交差道路（見通し外伝搬領域）におけるレイトレーシングの簡易化を目的として簡易道路マップを作成する。作成した簡易道路マップを Fig. 7 に示す。

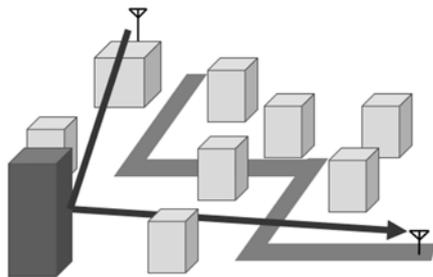


Fig. 5. Conceptual diagram of propagation path from road direction.

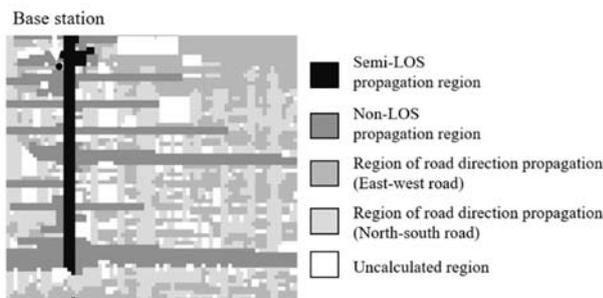


Fig. 6. Classified result of propagation region.

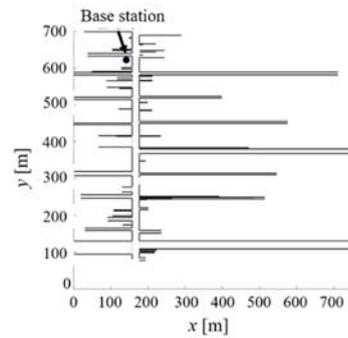


Fig. 7. Simple road map.

3.3 支配的な伝搬路を対象としたレイトレーシング

3 つの領域において、支配的な伝搬路に対して簡易レイトレーシング計算を行い受信電力を求める。本稿では、レイトレーシング計算で得られた複数レイは電力次元で合成する。

3.3.1 準見通し内伝搬領域・見通し外伝搬領域

道路沿い伝搬波を対象とする準見通し内伝搬領域、見通し外伝搬領域では、Fig. 7 の簡易道路マップを用いたレイトレーシングを行う。この場合、最大反射回数は 3 回、最大回折回数は 1 回とする。

また、Fig. 8 に示すように、一般的に交差点越え見通し外環境では、移動局が交差点近傍に存在する場合には反射のみの伝搬波が支配的となる反射波領域となり、移動局が交差点から離れるに従い、反射のみの伝搬波の強度は減少し、交差点エッジにおける回折を経て到達する伝搬波が支配的となる回折波領域となる。そこで、見通し外伝搬領域を反射波領域と回折波領域に分類する。本稿では、式(1)を用いて両領域を判別する¹³⁾。Fig. 8 に示すように、 d_1 , d_2 はそれぞれ基地局、移動局からの交差点中心までの距離、 w_1 , w_2 はそれぞれ基地局、移動局側の道路幅である。レイトレーシング計算は、反射波領域では反射のみの伝搬路に、回折波領域では回折を含む伝搬路に、それぞれ限定する。

また、本稿の評価対象環境では、基地局位置が道路上ではないことから、基地局から離れた環境では交差点周辺でも反射波領域となるとは考えにくい。これを考慮し、反射波領域が生じる基地局から交差点までの直線距離の上限を設定する。この値を変化

させて領域全体の RMSE を評価した結果, 150m の場合に RMSE が小さくなったため, 本稿ではこの値を適用した. 見通し外伝搬領域の分類結果を Fig. 9 に示す. 基地局周辺の見通し外伝搬領域が反射波領域と分類されたことが同図よりわかる.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Region of reflected wave} \left(\sqrt{\frac{d_1 d_2}{w_1 w_2}} \leq 4.5 \right) \\ \text{Region of diffracted wave} \left(\sqrt{\frac{d_1 d_2}{w_1 w_2}} > 4.5 \right) \end{array} \right. \quad (1)$$

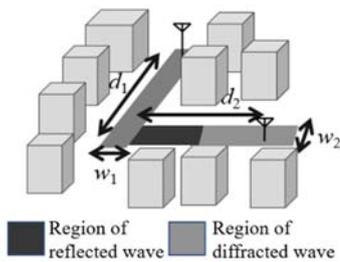


Fig. 8. Non-LOS environment across intersection.

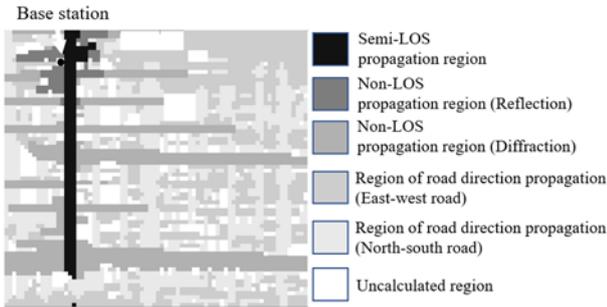


Fig. 9. Classified result of non-LOS propagation region.

3.3.2 道路上方伝搬領域

道路方向上方伝搬波を対象とする道路上方伝搬領域における簡易レイトレーシング方法を以下に示す. また, その計算の概念図を Fig. 10 に示す.

1. 移動局における道路方向を決定する.
2. 基地局から 1 で選択した道路 (その延長線を含む) に降ろした垂線の足を点 H とする.
3. 移動局・点 H 間で移動局からの建物上端部の仰角が最大の建物を選択する. なお, 移動局・点 H 間に建物が存在しない場合には, 点 H に仮想的な建物を考える. これらの位置に回折エッジを考える. より大きな回折波を発生させることを意図して, このエッジは, Fig. 10 に示す向き

の直角エッジとする. このエッジを道路方向上方エッジと呼ぶこととする.

4. 基地局・道路方向上方エッジ間における建物の上端部に回折エッジを考える (詳細は後述する).
5. 基地局から 4 の建物上端部エッジ・道路方向上方エッジにおいて回折後, 移動局に到達する伝搬波を道路方向上方伝搬波とする.

以下に 4 の建物の選択方法を示す. また, その概念図を Fig. 11 に示す.

1. 基地局・道路方向上方エッジ間において, 基地局, および, 道路方向上方エッジを經由した場合の移動局 (以後, 基地局側と移動局側とする) からの建物上端部の仰角が最大の建物を選択する¹⁰. 基地局側と移動局側で仰角が最大の建物が同一の場合 (パターン 1) はその建物, 異なる場合 (パターン 2) は, 仰角がより大きな建物を選択する.
2. 選択した建物を厚みの無い平板とみなし, これを建物上端部エッジとする.

なお, 移動局と道路方向上方エッジの距離 L [m] (Fig. 10 参照) は, 移動局・点 H 間に建物が存在しない場合には移動局・点 H 間の距離そのものとなる. しかし, 実際には道路途中の交差点等のエッジにおける回折波がより強度が大きく支配的になると考えられる. そこで, 移動局から道路方向上方エッジまでの距離 L に対して上限となる有効道路距離 L_{\max} [m] を設定する. 移動局が存在する道路の道路幅 w [m] の増加に伴って有効道路距離が増加することが自然と考えられること, および, w が小さくとも道路方向上方エッジまでは一定の距離が存在すると考えられること, から L_{\max} は式(2)に示す関数形とした. 同式の n, a, b の幾つかの値の組み合わせに対して領域全体の RMSE を評価した結果, $n=2, a=0.11, b=100$ の場合に RMSE (Root Mean Square Error) が小さくなったため, 本稿ではこれらの値を用いた.

$$L_{\max} = a(w)^n + b \quad (2)$$

以上述べた方法により, それぞれの領域についての簡易レイトレーシング計算を行うことで受信電力を求める.

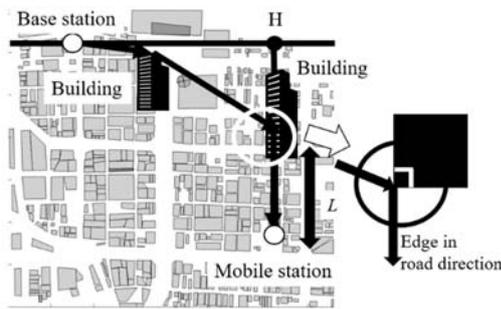


Fig. 10. Conceptual diagram of simple ray tracing in region of road direction propagation (Plan view).

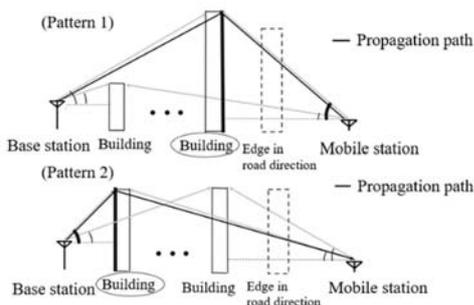


Fig. 11. Conceptual diagram of diffraction over building (Elevation).

3.3.3 建物越え伝搬波

本稿において想定する支配的な伝搬波は文献^{10,11)}の検討に基づいている。仮想都市環境を対象とする文献¹⁰⁾では、基地局から建物上部を超えて移動局へ到達する伝搬波(建物越え伝搬波)が計算対象に含まれていた。しかし、文献¹⁰⁾を本稿の対象都市環境に適応させた文献¹¹⁾では、環境および基地局アンテナ高から、その影響は小さいと考え、建物越え伝搬波は計算対象外とした。しかし検討の結果、特に基地局周辺環境では、建物越え伝搬波が無視できない環境が存在すると考えられた。そこで、建物越え伝搬波を追加する。具体的には、基地局から1回の建物越え回折で移動局に到達可能な伝搬経路が存在する場合に、建物越え伝搬波として伝搬損失計算に含める。建物越え伝搬波が計算対象となる環境を Fig. 12 に示す。

建物越え伝搬波は他の伝搬波と電力次元で合成する。つまり、他の伝搬波に加えて建物越え伝搬波が到達している状況を想定している。

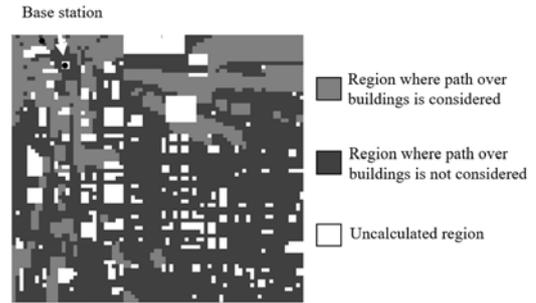


Fig. 12. Region where path over buildings is considered.

4. 推定精度の評価結果と計算量の評価

4.1 推定精度の評価結果

簡易レイトレーシングの計算結果と FDTD による計算結果の受信電力の差(以下単に受信電力差と呼ぶ)を Fig. 13 に示す。また、環境全体に対する簡易レイトレーシングと FDTD 計算の RMSE (デシベル次元で計算)を求めた結果、12.77dB であった。この誤差は、先述した本稿と同一の都市環境における、他のレイトレーシング高速化法^{6,7)}(RMSE : 11dB 程度)に近い精度であり、大規模環境を対象とした伝搬損失推定を行っていることを考慮すると、十分に小さい値であるといえる。

領域別の RMSE を Table 2 に示す。Table 2 において、[All], [A]~[C]はそれぞれ以下を表す。

[All] : 対象環境全体

[A] : 準見通し内伝搬領域

[B] : 見通し外伝搬領域

[C] : 道路上方伝搬領域

同表に示すように、最も小さい領域ではあるが、特に準見通し内伝搬領域の誤差が小さいことがわかる。しかし、Fig. 13 では、依然として大きな誤差が存在する環境もみられる。特に多くの細い路地状の道路では、簡易レイトレーシングにより求めた受信電力が大きい。このような環境における簡易レイトレーシングの伝搬波は道路方向上方伝搬波であるが、これが実際の伝搬波とは異なることが原因と考えられる。したがって、このような環境における受信電力差を減少させるためには、道路方向上方伝搬波とは異なる伝搬メカニズムを考える必要があると考えられる。

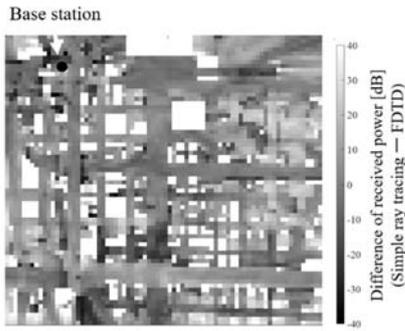


Fig. 13. Distribution of difference of received power between simple ray tracing and FDTD calculation.

Table 2. RMSE between simple ray tracing and FDTD calculation [dB].

[All]	[A]	[B]	[C]
12.77	6.16	11.46	13.50

4.2 計算量の評価結果

次に簡易レイトレーシングの計算量を評価する。通常のレイトレーシング (簡易化非適用のレイトレーシング) と簡易レイトレーシングの計算時間の比較により計算量を評価する。しかし、本稿の対象環境において通常のレイトレーシングを行うと非現実的な時間が必要となる。そこで、Fig. 14 に示すような計算量評価用の簡易環境モデルを作成した。同図のモデルは、本稿で分類する 3 領域の割合が Fig. 6 に近づくよう作成した。通常のレイトレーシングでは最大反射回数 3 回、最大回折回数 2 回で、道路沿い伝搬波のみを計算対象とした。Fig. 14 において、送受信アンテナ高は 1.5m、道路幅は全て 10m とし、受信電力の計算は、各道路中央の位置に対して、10m 毎に行う。また、計算に使用した PC の諸元を Table 3 に示す。なお、Fig. 14 に各建物に示す数字は建物の高さであり、多くの環境において、建物越え伝搬波の影響が小さいと考えられる高さとした。通常のレイトレーシングと簡易レイトレーシングはともに MATLAB によりコーディングした。

計算時間を計測した結果を Table 4 に示す。簡易レイトレーシングの計算時間は通常のレイトレーシングに比べて 1/5 程度である。特に大きな計算時間差となったのは道路上方伝搬領域であり、簡易レイ

トレーシングの計算時間は通常のレイトレーシングに比べて、1/8 程度である。簡易レイトレーシングの道路方向上方伝搬波の計算に対して、通常のレイトレーシングの道路沿い伝搬波のトレース時間が大きかったためと考えられる。

しかし、今回の評価環境は簡易であるため、簡易レイトレーシングの計算時間に 3.2 節の処理が含まれていないこと、通常のレイトレーシングにおいて最大回折回数 2 回では計算が不可能となるような受信地点がないこと、全ての道路を直交としていること等、複数の課題がある。よって、計算量の分析については、より詳細な評価方法の検討が必要である。

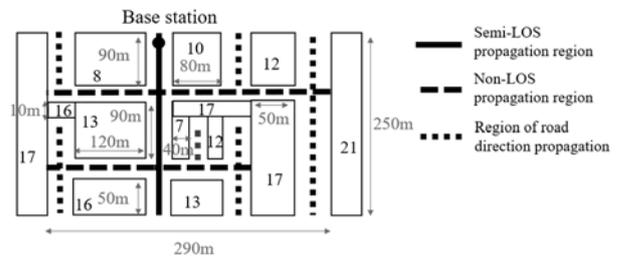


Fig. 14. Simple environmental model for evaluation of amount of calculation.

Table 3. PC specifications.

CPU	Intel Core i5-7400	
	Clock frequency	3GHz
	Number of cores	4
Memory	8GB	

Table 4. Calculation time of full ray tracing and simple ray tracing [sec].

	[A] + [B]	[C]	[All]
Full ray tracing	3.01	1.92	4.93
Simple ray tracing	0.73	0.23	0.96

5. まとめ

本稿では、計算対象の伝搬路を支配的な伝搬路に限定することにより、レイトレーシングの簡易化を図った。FDTD による計算結果と比較した結果、多くの領域で簡易レイトレーシングと FDTD 計算の受信

電力差は小さかった。また、環境全体に対する簡易レイトレーシングと FDTD 計算の RMSE を求めた結果 12.77dB となった。さらに計算量を評価した結果、簡易レイトレーシングの計算時間は通常のレイトレーシングの 1/5 程度であった。

本稿において利用した建物データは電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会伝搬データベースに登録されたものである。伝搬データの構築・公開に尽力されている関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) 今井哲郎, 電波伝搬解析のためのレイトレーシング法, (コロナ社, 東京, 2016).
- 2) T. Imai, “A Survey of Efficient Ray-Tracing Techniques for Mobile Radio Propagation Analysis”, *IEICE Trans. Commun.*, E100-B, 666-679 (2017).
- 3) G. Liang, H. L. Bertoni, “A New Approach to 3-D Ray Tracing for Propagation Prediction in Cities”, *IEEE Trans. Ant. & Propag.*, **46**, 853-863 (1998).
- 4) T. Hashimoto, T. Nakanishi, Y. Inasawa, H. Miyashita, “Calculation Accuracy and Time of Outdoor Propagation Estimation Using Vertical Plane Launch”, *2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics*, 115-116 (2017).
- 5) 日下美穂, 塩田茂雄, “屋内電波伝搬特性解析におけるレイトレーシング法の高速化”, *信学論 B*, J98-B, 654-663 (2015).
- 6) 橋本貴博, 瀧川道生, “非一様な光線発射分布を用いたレイトレーシングの高速化”, *信学技報*, AP2020-15, 33-38 (2020).
- 7) 堀端研志, 長谷川嶺, 守内祐三, 佐藤浩, 小柳芳雄, 市川泰史, “凸包検出及び複数の簡易パス探索結果を活用したレイトレーシング高速化手法の一検討”, *信学技報*, AP2020-11, 9-14 (2020).
- 8) 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究専門委員会, “第 2 回電波伝搬モデリングコンペティション”, アンテナ・伝播研究専門委員会, https://www.ieice.org/cs/ap/event/compe/compe_prop2/#denpancompe_gaiyo (2020).
- 9) 日景隆, 吉江明花, 大宮学, “大規模 FDTD 解析を用いた都市環境モデルの 3 次元伝搬特性推定”, *信学技報*, AP2020-9, 1-4 (2020).
- 10) 杉本智哉, 川崎翔平, 岩井誠人, 笹岡秀一, “支配的な伝搬経路の物理的検討に基づく仮想的都市環境レイトレーシングデータの伝搬損失推定式”, *信学論 B*, J102-B, 498-507 (2019).
- 11) 川崎翔平, 岩井誠人, 笹岡秀一, “実環境を対象とした支配的な伝搬波の物理的検討に基づく伝搬損失推定式”, 2019 信学総大, BS-1-7 (2019).
- 12) 北直樹, 佐々木元晴, 猪又稔, 山田渉, “支配的な到来波に着目した伝搬損失特性モデリング-伝搬損失特性の変化をシームレスに推定する方法-”, *信学論 B*, J100-B, 723-737 (2017).
- 13) 小澤和生, 岩井誠人, 笹岡秀一, “車車間通信環境における道路幅方向送受信位置変化の伝搬損失特性への影響”, *信学技報*, AP2015-18, 89-94 (2015).