

Effect of Spatial Expansion on Radio Wave Propagation Characteristics in Large-Scale Indoor Space

Yuto NISHITSUJI*, Shigeo GOTOH**, Hisato IWAI*, Shinsuke IBI*

(Received February 13, 2020)

A significant number of studies have been reported on the propagation characteristics in indoor environments. On the other hand, reports on the studies in larger-scale indoor environments such as large commercial facilities and gymnasiums are few. In this paper, we studied the propagation characteristics in large-scale indoor environments. We conducted experiments and ray-tracing analysis in a gymnasium. In the experiments, we utilized a drone for efficient measurement in the large space. We also carried out experiment and ray-tracing in a relatively smaller-scale room and compare the characteristics of the both environments. Based on these investigations, we clarified the effect of spatial expansion of the indoor environment on the propagation characteristics.

Key words : indoor propagation, propagation loss, large-scale indoor space, ray-tracing, measurement using drone

キーワード : 屋内伝搬, 伝搬損失, 大規模屋内空間, レイトレーシング法, ドローンによる測定

大規模屋内空間における空間規模の拡大による電波伝搬特性への影響評価

西辻 雄登, 五島 成夫, 岩井 誠人, 衣斐 信介

1. はじめに

近年, IoT(Internet of Things)の普及にともない, 屋内環境において無線通信を用いたセンサネットワークや各種機器制御の利用の増加が期待されている. それらの無線通信には, Wi-Fi や Bluetooth 等に用いられる 2.4GHz 帯やスマートメーター等に用いられる 920MHz 帯などの周波数帯が使用され, 電波干渉などの点で優位性がある 920MHz 帯の使用が増えている¹⁻⁴⁾. その一例として照明器具や空調などを制御するシステムでの利用が検討されている^{5,6)}. 照明器具や空調などは天井に固定して設置することが一般的であり, 設置後の移動が不可となる. そのため, そ

れらの無線制御システムを設計する際には信頼性のある無線回線設計が求められる. 屋内環境では送信アンテナから受信アンテナに直接到達する電波だけでなく, 壁面や什器などにより複数の反射や回折した電波も到達する. これらの電波が互いに干渉しあうことでマルチパスフェージング環境となり, 局所的に受信電力が低下する点が生じる. そのため, 屋内環境における無線回線設計では, 想定した利用環境における伝搬損失特性やフェージングの変動幅を把握し, それらを踏まえた無線回線設計を行うことが重要である.

様々な屋内環境の中で, 比較的小規模なオフィス

* 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

** Life Solutions Company, Panasonic Corporation, Kadoma, Osaka, 571-8686, Japan

などの小規模屋内空間における電波伝搬特性は多くの検討がされており、伝搬損失距離特性モデル^{7,8)}やフェージングの変動幅^{9,10)}などについて報告されている。一方、小規模屋内空間に比べて比較的規模の大きな屋内工場環境では、5Gに向けた高い周波数帯での検討¹¹⁾などはされているものの、大型商業施設や体育館などの大規模屋内空間において、無線制御に多用される特定小電力の920MHz帯に適用可能な伝搬検討の例は多くない。そこで、本稿では、920MHz帯の無線通信による照明制御を想定した大規模屋内空間における電波伝搬特性の明確化に向けて、大規模空間の一例である体育館で測定を行い、空間規模の拡大による電波伝搬特性の変化を明らかにする。体育館における実測では、ドローンを用いて効率的な測定を行った。そして、得られた伝搬特性を確認するためにレイトレーシング法¹²⁾による電波伝搬解析を行った。また、小規模屋内空間における実測及びレイトレーシングを行い、比較することで大規模屋内空間における電波伝搬特性の特徴を明確化した。

2. 屋内伝搬特性に関する従来の検討

既に述べたように、屋内環境における伝搬特性に関しては、様々な検討が行われている。ITU 勧告では無線回線設計に利用される伝搬損失距離特性モデルが提示されている⁷⁾。距離特性には伝搬損失係数(3.3節で後述)が重要となるが、このITU 勧告では900MHzのオフィス環境で伝搬損失係数が33と与えられている。また、測定データを元に電波伝搬統計モデルを算出する文献^{8,10)}では、什器などが存在するオフィスでの伝搬損失係数が27程度の値と示されている。これらの什器などが存在する環境では、受信点に到達する電波が什器などの遮蔽物により遮られて伝搬損失が大きくなり、自由空間伝搬の伝搬損失係数20より大きい値となる。一方、什器のない小規模屋内空間に類似する環境として廊下環境¹³⁾やトンネル環境¹⁴⁾があり、このような閉ざされた屋内環境では、送受信点間の直接波に反射波が加わることで伝搬損失が小さくなり、伝搬損失係数は20より小さい値となる。フェージングに関する検討では、小規模屋内空間において見通し内外に関わらず大きなフェー

ジングが生じ、場所率の50%値と1%値の伝搬損失差は15~19 dB程度であると示されている^{9,10)}。レイリーフェージング環境での伝搬損失差は18.4 dBであるため、小規模屋内空間におけるフェージングの変動幅はレイリーフェージングと同程度である。

一方、大規模屋内空間は小規模屋内空間に比べて天井や壁面などの電波の反射面との距離が大きくなり、反射波の影響が相対的に小さくなることが考えられる。その結果、壁面近傍領域を除いた空間中央付近の領域では、空間の拡大に伴って自由空間における伝搬特性に近づく傾向が予想される。本稿では、この傾向を明らかにすることを目的とし、大規模屋内空間における伝搬損失距離特性やフェージングなどの伝搬特性について分析する。

3. 測定環境と評価方法

3.1 測定環境と評価方法

実測では、照明器具や空調などの制御に使用される920MHz帯の無線モジュールを用いて伝搬損失を測定する。大規模屋内空間としてFig. 1に示す体育館($W(\text{Width}) \times D(\text{Depth}) \times H(\text{Height}) = 62.1\text{m} \times 44.8\text{m} \times 13.0\text{m}$)で測定を行った。体育館のような大規模屋内空間の実測を行うにあたり、ドローンを用いることで高所を含む広範囲の地点での効率的な測定を可能とした。ドローンには積載量の制限があるため、ボタン電池を電源とする無線モジュールを用いることで軽量化を行い、送信局とした。壁面設置の照明器具コントローラを想定して、受信点は高さ1.5mで壁面から $\lambda/4 (= 8.1\text{cm})$ の位置で固定とした。そして、送信局・受信局となる無線モジュール間の通信を行い、受信信号強度を取得して測定する。無線モジュール搭載のドローンをFig. 2に、無線モジュールの筐体に設置した状態でのアンテナ指向性(無響室における測定結果)をFig. 3に、それぞれ示す。

本稿では、受信局を固定とし、送信局となるドローンを移動させて測定を行った。そのため、送信局の位置を取得する必要がある。ドローンに搭載した送信局の位置について、従来研究のドローン実験は、屋外で行われており、GPS等の電波を用いた位置座標取得を行っている¹⁵⁻¹⁷⁾。一方、本稿ではGPSの電波が

届かない屋内環境となるため、カメラを用いた位置座標取得方法を考案した。Fig. 4 のように 2 台のカメラを用いて異なる方向からドローンを撮影する。その映像に対して、レンズの歪みを補正し、モーショントラッキングを行うことでドローンのピクセル位置を取得する。そして、2 台の各カメラのカメラ位置や視野角、ドローンのピクセル位置などの情報より、ドローンの 3 次元座標を取得した。

大規模屋内空間の測定環境を Fig. 5 に、測定諸元を Table 1 に、それぞれ示す。Fig. 5 の縦エリアは伝搬損失距離特性を求めるために測定する。A・B エリアは、壁面近傍(A)の天井付近(11~12m)、高さ中央付近(5~6m)をそれぞれ A-ceiling, A-center, 壁面遠方(B)の天井付近、高さ中央付近をそれぞれ B-ceiling, B-center と名付けた。そして、壁面及び天井との距離によるフェージングの差異を確認するために、その 4 範囲を測定する。横エリアは送受信点間距離及び壁面との距離によるフェージングの変化を明らかにするために測定する。それぞれの測定において、送信局となるドローンは測定エリア内を可能な限り空間的に均一に飛行させて測定を行った。また、比較のために、小規模屋内空間とする大学研究室(6.2m×8.6m×3.0m)における測定を行った。小規模屋内空間の測定環境を Fig. 6 に、測定諸元を Table 1 に、それぞれ示す。水平方向の移動はアクチュエータを使用し、Fig. 6 の縦ルート及び横ルート上において、送信アンテナ高 0.9m, 1.5m, 2.1m それぞれに対して 2.5cm 間隔で測定を行った。



Fig. 1. Gymnasium (large-scale indoor space).

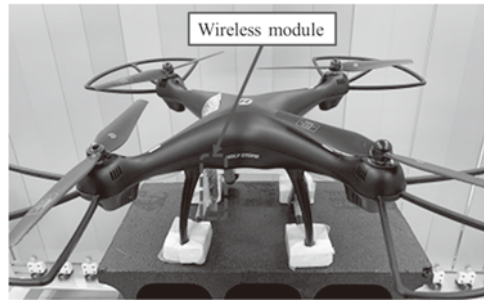


Fig. 2. Drone (transmitting station).

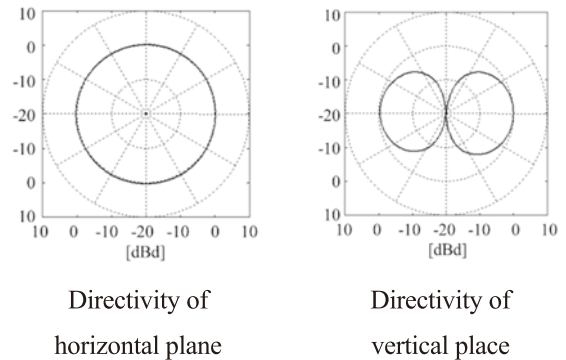


Fig. 3. Directivity of antenna mounted on a wireless module (measured value).

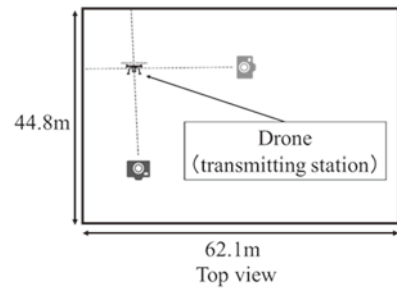


Fig. 4. Estimation method of drone position.

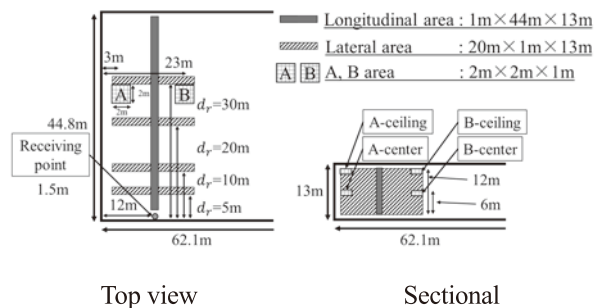


Fig. 5. Measurement areas of large-scale indoor space.

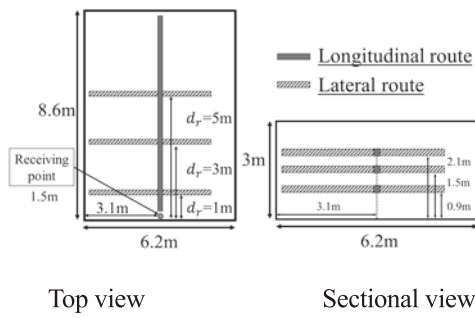


Fig. 6. Measurement areas of small-scale indoor space.

Table 1. Measurement specifications.

	Large-scale indoor space	Small-scale indoor space
Frequency	924 MHz	
Transmitting and receiving antenna	Helical antenna (Vertical polarization)	
Transmitting power	13 dBm	
Height of receiving antenna	1.5 m	
Height of transmitting antenna	0~13 m	0.9 m, 1.5 m, 2.1 m

3.2 レイトレーシングにおける解析モデル

本稿で対象とする体育館のような比較的什器が少ない環境では反射波が支配的となり、回折波の影響は小さいと考えられる。これを踏まえて本稿におけるレイトレーシング計算では、建物内部の詳細な形状や什器などを考慮せず直方体とする簡単な解析モデルとし、回折は考慮しない。計算諸元を Table 2 に示す。レイトレーシングの推定精度は最大反射回数に依存し、最大反射回数が大きいほど推定精度は高くなり、計算結果がある値に収束していく。ただし、それに比例して計算量も増大する。そこで、最大反射回数の設定は、それ以上増加させて計算した結果との RMSE(Root Mean Squared Error)が 2dB 以下となる回数とし、4 回とした。解析モデルは Fig. 5 及び 6 と同様の環境を想定し、測定内容を模擬した計算を行う。また、空間規模の変化が伝搬特性に与える影響を簡易に明らかにするため、Fig. 7 に示す仮想の解析モデルを考える。

Table 2. Calculation specifications of ray-tracing.

Frequency	924 MHz	
Transmitting and receiving antenna	Half wave dipole antenna (Vertical polarization)	
Wall material (concrete)	Relative permittivity	6.8
	Electric conductivity	0.0023 [S/m]
Maximum number of reflections	4 times	

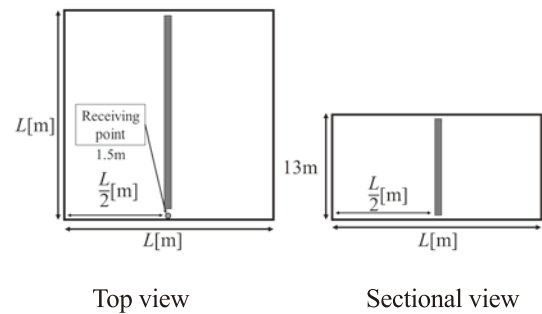


Fig. 7. Assumed analysis model.

3.3 評価方法

受信アンテナを壁から $\lambda/4$ の位置に設置するため、伝搬損失を求める際に用いる受信アンテナ利得は次式による壁面反射分を含めたパターン $D_r(\theta, \phi)$ を用いる。

$$D_r(\theta, \phi) = D_d(\theta, \phi)(1 + Re^{-ikl}) \quad (1)$$

$D_d(\theta, \phi)$ はダイポールアンテナの指向性、 R は壁面の反射係数、 k は波数である。 l は直接波と反射波の経路差であり、式(2)で示す。

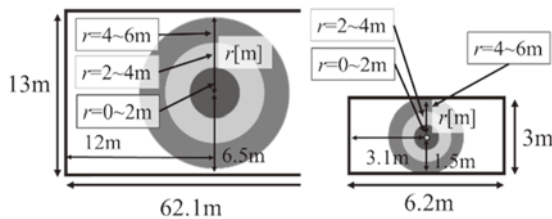
$$l = \frac{\lambda}{2} \frac{\cos \phi}{\cos(\frac{\pi}{2} - \theta)} \quad (2)$$

壁面反射を考慮したパターン $D_r(\theta, \phi)$ は、ビーム中央から離れた角度ではアンテナパターンの変化が大きく、伝搬損失の大きな誤差に繋がるため、そのような領域は伝搬損失測定には適さない。そこで、アンテナパターンの変化が小さい直接波の仰角がダイポールアンテナの半値角である $-39^\circ \sim 39^\circ$ となる測定データを評価対象とした。

4.1 節では、Fig. 5 及び 6 における縦エリア及び縦ルート上の測定において、伝搬損失距離特性評価を行う。伝搬損失距離特性は、次式の形で近似する。

$$L_p = a \log_{10}(d) + b \quad (3)$$

L_p [dB]は伝搬損失、 d [m]は送受信点間距離、 a は伝搬損失係数、 b [dB]は切片である。空間の奥行を D [m](大規模空間は 44.8m, 小規模空間は 8.6m, 仮想解析モデルは L [m])として、仮想解析モデルでは奥行(D)で正規化した正規化距離 0.05~1 を、大規模・小規模空間では正規化距離 0.1~1 を対数軸上で等間隔に 20 個に分割し、それぞれの範囲で測定データを受信電力次元の真値で平均し、その平均値の dB 値から最小二乗法により a 及び b を最適化することで伝搬損失距離特性式を求める。4.2 節では、場所率の 50%値と 1%値の伝搬損失差をフェージング変動幅と定義し⁹⁾、Fig. 5 における A, B エリアの 4 範囲において、フェージング変動幅の差異を評価する。4.3 節では、Fig. 5 及び 6 における横エリア及び横ルート上の測定において、送信エリアと壁面との距離に対するフェージングの依存性を考えるために、Fig. 8 に示すように床と天井間を 3 分割した壁面との距離が小さい領域、大きい領域、その中間の領域の 3 領域に分けてフェージング特性を明らかにする。また、少数の測定数でフェージングの変動を評価可能とするために標準偏差を評価指標とする。この標準偏差は伝搬損失の dB 値で求める。



Large-scale indoor space Small-scale indoor space
Fig. 8. Range division of lateral area and lateral route.

4. 測定結果

4.1 空間規模の変化に対する伝搬損失距離特性への影響評価

空間規模の変化が伝搬特性に与える影響を示す。Fig. 7 の仮想解析モデルにおいて $L=20, 60, 100$ [m]とした場合のレイトレーシング結果を Fig. 9 に示す。

同図は、伝搬損失の計算値に対する標準偏差を示している。それに加え、正規化距離 0.05 から各範囲までの計算値に対して式(3)による伝搬損失距離特性式を求め、伝搬損失係数 a と標準偏差の変化を示している。Fig. 10 は Fig. 9 と同じデータを用いているが、横軸の送受信点間距離を空間の奥行である L [m]で正規化した結果である。Fig. 9 より、空間が大きくなるにつれて標準偏差が増加するまでの距離は大きくなる。また、標準偏差が大きくなると共に伝搬損失係数 a が低下する。伝搬損失係数 a が 20 に近く標準偏差が 3dB 以下の比較的小さいフェージング変動となる。よって、送受信点間距離が小さい範囲は、送受信点間距離が大きい範囲に比べて相対的に伝搬特性が自由空間伝搬特性に近くなると考えることができる。また、そのような範囲は、空間全体の規模が大きくなるにつれて拡大する傾向があることがわかる。さらに Fig. 10 では、送受信点間距離を空間の奥行(L)で正規化した場合の伝搬損失係数 a 及び標準偏差の変化はおおよそ一致している。つまり、自由空間伝搬に近い特性となる距離は、空間規模との相対距離であると考えられる。

Fig. 5 の大規模屋内空間の縦エリアで測定された送受信点間距離に対する伝搬損失の変化を Fig. 11 に、レイトレーシング計算結果を Fig. 12 に示す。同様に、小規模屋内空間である Fig. 6 の縦ルートの測定結果を Fig. 13 に、レイトレーシング計算結果を Fig. 14 に、それぞれ示す。また、Table 3 に Fig. 11~14 の距離特性を式(3)で近似した場合の a, b の値を示す。さらに、大規模屋内空間及び小規模屋内空間における結果において、Fig. 10 と同様に伝搬損失の標準偏差を求め、送受信点間距離を各空間の奥行(D)で正規化した結果を Fig. 15 に示す。小規模屋内空間は比較的什器の少ない閉鎖的な空間であることから、伝搬損失係数 a が文献^{13,14)}のように 20 より小さな値となっている。Table 3 より、伝搬損失係数 a は、小規模屋内空間に比べて大規模屋内空間の方が 20 に近い値となるものの、大きな差は見られない。これは、Fig. 10 のように正規化距離に対する伝搬特性の変化がおおよそ一致することと整合している。Fig. 15 より、大規模屋内空間及び小規模屋内空間において、送受信点間

距離を各空間の空間規模で正規化した場合の伝搬損失係数 a 及び標準偏差の変化はおおよそ一致しており、Fig. 10 と同様の傾向が見られた。Fig. 10 はレイトレーシングの結果であり、幾何学的な考察によると正規化した結果が一致するのは自然と考えられる。一方、Fig. 15 は実際の環境でも、同様の傾向が得られることを示している。なお、Fig. 15 の正規化距離 0.2 付近で、大規模屋内空間における実測の標準偏差が大きくなっている。これは、可能な限り均一に測定を行ったが、この範囲の測定数が少なかった。そのため、十分な統計的な結果が得られなかったことが原因と推測される。

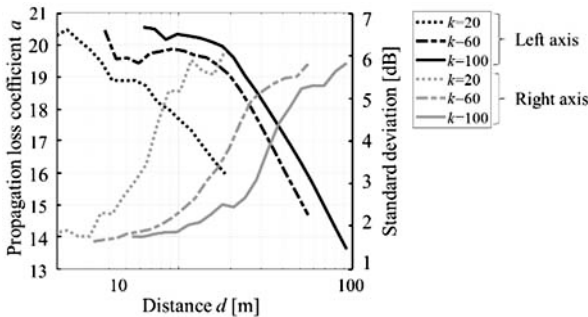


Fig. 9. Variations of propagation loss coefficient and standard deviation against distance between transmitting and receiving points.

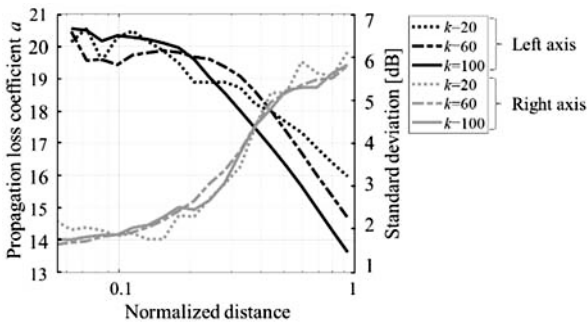


Fig. 10. Variations of propagation loss coefficient and standard deviation against normalized distance.

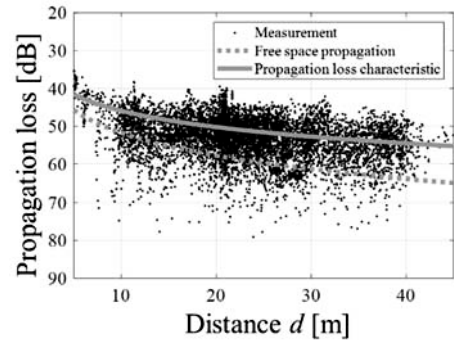


Fig. 11. Propagation loss characteristics in large-scale indoor space (measurement).

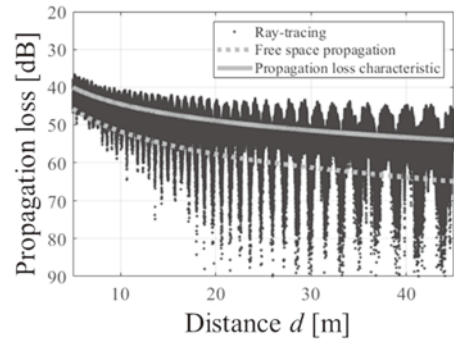


Fig. 12. Propagation loss characteristics in large-scale indoor space (ray-tracing).

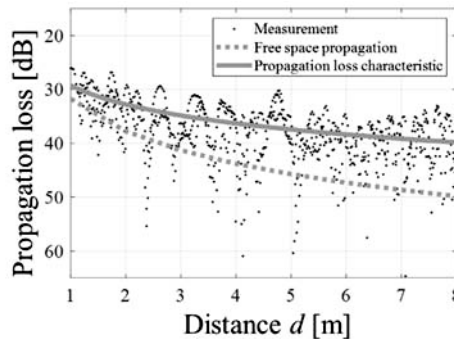


Fig. 13. Propagation loss characteristics in small-scale indoor space (measurement).

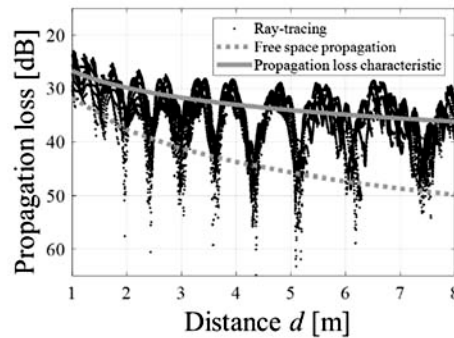


Fig. 14. Propagation loss characteristics in small-scale indoor space (ray-tracing).

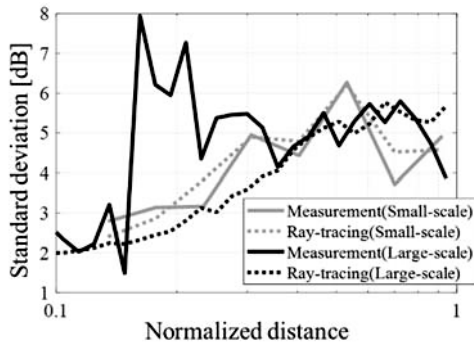


Fig. 15. Standard deviation for the normalized distance.

Table 3. Propagation loss coefficient a and intercept b .

Environment		a	b
Large-scale indoor space	Measurement	14.3	31.6
	Ray-tracing	14.7	29.8
Small-scale indoor space	Measurement	11.7	29.3
	Ray-tracing	10.6	26.7

4.2 壁面近傍・遠方におけるフェージング変動幅

大規模屋内空間における壁面近傍・遠方のフェージングの差異について示す。Fig.5 の A, B エリアの 4 範囲における実測による伝搬損失の累積分布を Fig. 16 に、レイトレーシングを Fig. 17 に、それぞれ示す。また、それぞれのフェージング変動幅を Table 4 に示す。レイトレーシングでは、Table 4 より壁面遠方(B-ceiling, B-center)のフェージング変動幅は壁面近傍(A-ceiling, A-center)に比べて小さい。その要因として壁面遠方は壁面との距離が大きく、反射波の影響が小さくなることが考えられる。そこで、レイトレーシングにおいて、各範囲での総受信電力に対する直接波電力比率を求め、Table 4 に示した。同表より壁面近傍と遠方の直接波電力比率の差は必ずしも大きくないが、フェージング変動幅の差が生じる一因であると考えられる。一方、実測では壁面近傍・遠方に関わらずフェージング変動幅が大きく、同程度となる。レイトレーシングと実測で差が生じた要因として、実測では体育館の天井形状や客席などによるレイトレーシングでは考慮されない反射波によって反射波成分が大きくなることが考えられる。その結果、壁面遠方においてもフェージング変動幅が十分に大きくなり、実測では壁面近傍・遠方に関わらず類似した結

果になったと考えられる。小規模屋内空間でも同様のフェージング変動幅となると報告されており^{9,10}、屋内空間の空間規模が大きくなっても小規模屋内空間と同程度のフェージング変動幅であることを確認した。

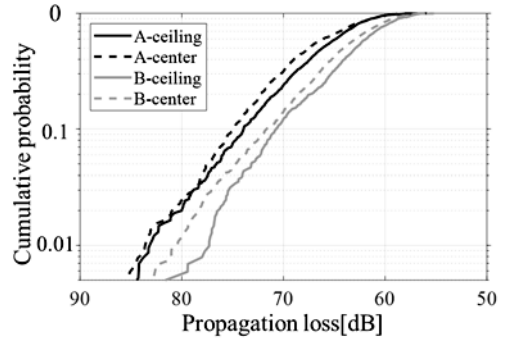


Fig. 16. CDF of propagation loss (measurement).

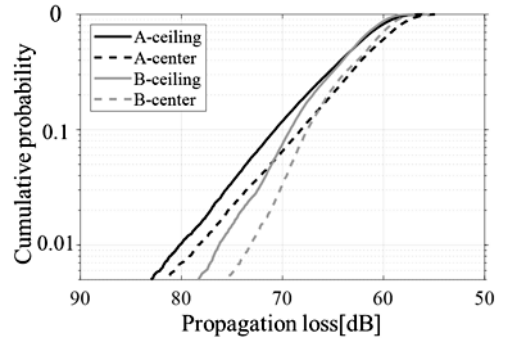


Fig. 17. CDF of propagation loss (ray-tracing).

Table 4. Fading width and direct wave power ratio.

Area	Measurement	Ray-tracing	
	Fading width [dB]	Fading width [dB]	Direct wave power ratio [%]
A-ceiling	16.9	17.1	57.0
A-center	16.1	17.2	53.2
B-ceiling	14.4	13.2	63.1
B-center	16.3	11.7	62.1

4.3 送受信点間距離及び壁面との距離によるフェージングの変化

送受信点間距離及び壁面との距離によるフェージングの変化について検討する。大規模屋内空間において、Fig.5 の横エリアにおける Fig.8 の各範囲での伝搬損失の標準偏差を Fig.18 に示し、小規模屋内空

間において、Fig. 6の横エリアにおけるFig. 8の各範囲での伝搬損失の標準偏差をFig. 19に示す。Fig. 18及び19共に r の小さい範囲が大きい範囲に比べてフェージング変動が小さくなると予想したが、実測とレイトレーシング共に明確な r に対する傾向は見られなかった。一方、前節で述べたように、実測とレイトレーシングを比較すると、実測では多くの反射波が想定されるため、レイトレーシングに比べて実測のフェージング変動は大きくなる傾向が見られ、実測の標準偏差はレイリーフェージング環境における標準偏差の約6.5dBに近い値となった。

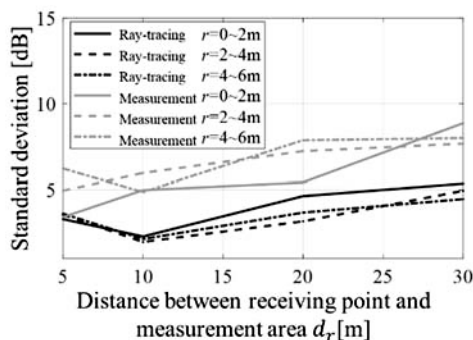


Fig. 18. Standard deviation of propagation loss in large-scale indoor space.

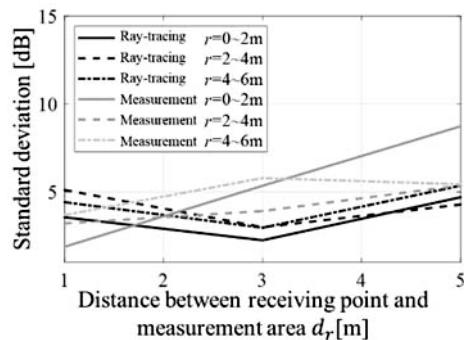


Fig. 19. Standard deviation of propagation loss in small-scale indoor space.

5. まとめ

大規模屋内空間における電波伝搬特性の明確化に向けて、空間規模の拡大による伝搬損失距離特性の変化と壁面との距離や送受信アンテナ間距離によるフェージングの変化について実測とレイトレーシングにより評価した。その結果、フェージング変動幅は、壁面近傍・遠方に関わらず、レイリーフェージング環境に近い値であり、小規模屋内空間と同程度で

あることを示した。そして、送受信点間距離が小さい範囲では自由空間伝搬に近い特性が見られ、そのような範囲は空間規模との相対距離であることを示した。このような傾向はレイトレーシングで予想されるが、実測においても同様の傾向が得られることを明らかにした。

参考文献

- 1) 浮田陽介, 藤原ゆうき, 村上隆史, 林野裕司, 吉川嘉茂, 多鹿陽介, “ホームエネルギーマネジメントシステムにおける無線応用”, *Panasonic Technical Journal*, **57**[1], 48-53 (2011).
- 2) 松井進, “IoT システムの技術動向と実用化に向けた取り組み”, *信学論(C)*, **J100-C**[4], 151-158 (2017).
- 3) 藤崎邑史, 野林大起, 塚本和也, 池永全志, “920MHz帯を利用する異種無線通信規格間の干渉の影響調査—Wi-SUNとLoRaWAN間の相互干渉の影響調査—”, *信学技報*, **117**[459], 345-350 (2018).
- 4) 山下育男, 浅野愛治, 墨忠彦, “920MHz帯および2.4GHz帯の屋外無線環境の簡易実測評価”, *信学技報*, **119**[106], 7-10 (2019).
- 5) 山本尚武, 小林弘晃, 小向康文, 小幡将之, 泉貴志, 前山利幸, “屋内IoT機器向け指向性偏波及び空間ダイバーシティを有した920MHz帯アンテナ設計と実験的評価”, *信学技報*, **119**[168], 91-96 (2019).
- 6) 渡邊敏康, “IoTのアーキテクチャ、プラットフォームに関する考察”, *情報通信審議会 情報通信技術分科会 技術戦略委員会 先端技術WG資料 WG3-6*, https://www.soumu.go.jp/main_content/000403586.pdf (2016).
- 7) ITU-R Rec. P.1238-10, “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz”, (2019).
- 8) 橋本貴博, 西岡泰弘, 稲沢良夫, 宮下裕章, “幾何光学的な空間分類を用いた屋内電波伝搬損失の統計モデル”, *信学論(B)*, **J99-B**[9], 684-692 (2016).
- 9) 小泉弥栄喜, 岩井誠人, 笹岡秀一, “屋内通信環境における送受信アンテナの偏波に対するフェージング変動幅の評価”, *電気関係学会関西連合大会*, G7-19 (2017).
- 10) 中西孝行, 橋本貴博, 清水健矢, 瀧川道生, 米田尚史, “屋内環境における電波伝搬統計モデルと回線設計マージンに関する検討”, *信学技報*, **117**[490], 39-43

(2018).

- 11) 北尾光司郎, 今井哲朗, 猪又稔, 浅井孝浩, “屋内工場環境における伝搬特性の基礎検討”, 信学技報, **118**[390], 69-73 (2019).
- 12) 今井哲朗, 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), pp. 42-72.
- 13) 細矢良雄 (監修), 電波伝搬ハンドブック, (リアライズ社, 東京, 1999), pp. 363-365.
- 14) 今井哲朗, “レイトレース法を用いたトンネル内伝搬特性の推定”, 信学論(B), **J85-B**[2], 216-226 (2002).
- 15) 斎藤健太郎, ハンキイ, キラティウオラナンノッボン, 高田潤一, “Unmanned Aerial Vehicle を用いた 4.9GHz 帯屋外-屋内電波伝搬損失測定”, 信学技報, **117**[178], 25-30 (2017).
- 16) 鈴木利則, 松野宏己, 吉岡達哉, 鈴木信雄, “上空エリアの電波強度推定を目指した基本検討”, 信学技報, **117**[446], 81-86 (2018).
- 17) 山田渉, 久野伸晃, 中村光貴, 佐々木元晴, 西森健太郎, “都市内低空環境の伝搬モデル化に向けた基礎検討”, 信学技報, **119**[379], 93-98 (2020).