

無線 LAN アクセスポイント (AP) 間, 及び AP-クライアント端末間の 電波伝搬損失を測定するための屋内構造が異なる事務所環境における 実験的検討

- 勧告 ITU-R P.1238 を補完するための CAP3702I(シスコシステムズ社製の AP)を
用いた電波伝搬損失の推定式の導出 -

松戸 孝[†] 丸田 竜一[†] 中野 清隆[†] 田中 政満[†] 大石 太郎[†]
山下 聖太郎[‡] 宇都宮 光之[‡] 力石 靖^{††}

† ネットワンシステムズ株式会社 ビジネス推進本部 応用技術部 エンタープライズ SDN チーム
‡ 市場開発本部 ソリューション・サービス企画室 第 2 チーム,
†† カスタマーサービス本部 テクニカルサポート部 第 4 チーム
†, †† 〒140-8621 東京都品川区東品川 2-2-4 天王洲ファーストタワー
‡ 〒100-7024 東京都千代田区丸の内 2-7-2 JP タワー

あらまし 屋内構造が異なる 2 つの事務所環境で日常的に運用している無線 LAN の複数のアクセスポイント (AP) で受信された受信電力データを用いて 5GHz 帯の見通しがある (LOS) 状況における電波伝搬損失を測定し, 屋内事務所環境の天井面 (無線 LAN クライアント端末 (CL) から見える面) に設置された AP 間, 及び, AP-CL 間の電波伝搬損失の推定式を, 屋内構造の違いを考慮して, 実験的に導出した. 本推定式は, 屋内における AP と CL 間の電波伝搬損失距離特性の推定式を記述した勧告 ITU-R P.1238 を補完することになり, 各 AP 間の連携・協調の検討や, 複数 AP 間の幹線を無線中継して接続する方法の回線設計, AP-CL 間の回線設計, AP における受信電力を利活用した CL 位置推定の改善検討等に有用な知見となる.

キーワード 勧告 ITU-R P.1238, 無線 LAN, 伝搬損失, 屋内構造, LOS, 5GHz 帯

Experimental Study to Measure Radio Path Loss between Wireless LAN(WLAN) Access Point(AP)s and between an AP and a WLAN Client Terminal(CL) Deployed in Indoor Offices with Different Building Structure - Deriving Empirical Formulas of the Radio Path Loss between APs and between the AP and the CL from Data Measured by Using WLAN AP Cisco CAP3702I for Supplementing Recommendation ITU-R P.1238 -

Takashi MATSUDO[†] Ryuichi MARUTA[†] Kiyotaka NAKANO[†] Masamitsu TANAKA[†]
Taro OISHI[†] Seitaro YAMASHITA[‡] Mitsuyuki UTSUNOMIYA[‡] and Yasushi CHIKARAISHI^{††}

† Enterprize SDN Team, Applied Technology Engineering, Business Development Division,
NetOneSystems Co., Ltd.

‡ Solution & Service Planning Office Market Development Division,

†† Technical Support Department Customer Service Division,

†, †† Tennoz First Tower, 2-2-4 Higashi Shinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-8621 Japan

‡ JP TOWER, 2-7-2 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-7024 Japan

Abstract By using experimental data of power level received by wireless LAN(WLAN) access point(AP)s that are Cisco CAP3702I operated in indoor offices with different building structure, we derived empirical formulas of radio path loss between APs and between an AP and a WLAN client terminal(CL) on line of sight in 5GHz band that are considering the different building structure in indoor offices. The empirical formulas can supplement the prediction method of indoor radiowave propagation Recommendation ITU-R P.1238. They are useful for a study of cooperation between APs, for designing a radio relay

link between APs, for designing a radio link between the AP and the CL and for improving on estimating the most probable location of the CL based on using power level received by WLAN APs.

Keyword Recommendation ITU-R P.1238 , Wireless LAN , Radio path loss , indoor offices, building structure , line of sight , 5GHz band

1. はじめに

本稿は、文献[1]における筆者らの検討をさらに発展させた検討結果について述べている。文献[1]における検討では、屋内事務所環境で日常的に運用している無線 LAN の複数のアクセスポイント（親局、以下 AP と記載する）間で受信された受信電力データを用いて電波伝搬損失を測定し、屋内事務所環境の天井面（子局である無線 LAN クライアント端末（以下 CL と記載する）から見える面）に設置された AP 間における電波伝搬損失距離特性の推定式を実験的に導出した。その導出した推定式は、屋内における AP と CL 間の電波伝搬損失距離特性の推定式を記述した勧告 ITU-R P.1238[2],[3]を補完することになり、各 AP 間の連携・協調の検討や、複数 AP 間の幹線を無線中継して接続する方法の回線設計に有用な知見となった。

その後、文献[1]で実験的に導出した推定式の汎用性をより高める検討のために、筆者らは、文献[1]の実験場所の環境とは屋内構造が異なる別の事務所環境においても、日常的に運用している無線 LAN システムを用いて、5GHz 帯の見通しがある(LOS)状況における電波伝搬状況を把握する実験を実施し、新たな実験データを取得した。ここに、屋内構造が異なる 2 つの事務所環境で測定された実験データ（AP で受信された受信電力データ）を解析できることになった。

本稿では、屋内構造が異なる 2 つの事務所環境で測定された 5GHz 帯の見通しがある(LOS)状況における実験データを解析することによって、屋内事務所環境の天井面（CL から見える面）に設置された AP 間、及び、AP-CL 間の電波伝搬損失の推定式を、屋内構造の違いを考慮して、実験的に導出する検討を述べる。

第 2 章では、屋内構造が異なる事務所環境における AP 間の電波伝搬損失測定の実験について述べ、その結果に基づいて屋内構造の違いを考慮した天井面（CL から見える面）に設置された AP 間の電波伝搬損失の推定式を導出し、考察する。第 3 章では、屋内構造が異なる事務所環境における AP と CL 間の電波伝搬損失測定の実験について述べ、その結果に基づいて屋内構造の違いを考慮した AP-CL 間の電波伝搬損失の推定式を導出し、考察する。

2. 実験 1：屋内構造が異なる事務所環境におけ

る AP 間の電波伝搬損失測定

2.1. 実験目的

屋内事務所環境の天井面（CL から見える面）に設置された AP 間に見通しがある(LOS)状況における 5GHz 帯の電波伝搬損失の推定式を実験的に導出する。その際に、屋内構造の違いが影響するかどうかを把握し、もしも、影響ありならば、屋内構造の違いを考慮した電波伝搬損失の推定式を実験的に導出する。

2.2. 実験場所の環境

本実験は屋内事務所環境で日常的に運用している無線 LAN の複数の AP 間で測定された 5GHz 帯の受信電力データを用いており、特別な実験環境を新たに構築はしていない。屋内構造が異なる 2 つの事務所環境は次のとおりである。

（1）事務所 1 の環境[1]

図 1 に、事務所 1 の環境をフロアの平面概要図として示す。建物中央の共用部（廊下、エレベータ等）を除いた北及び東西の 3 方向にコの字型の無柱のフロアが広がっており、そのフロア全面を無線 LAN サービスエリアとするために 21 個の AP（2.4GHz 帯と 5GHz 帯の両方の無線 LAN に対応、アンテナ内蔵タイプ）が天井面（CL から見える面）に設置されている。フロア内は、少人数用の会議室が一部に存在する他は、大半のエリアは机と椅子の座席列と物品保管用キャビネットが展開されている。

図 2 には、事務所 1 の環境をフロアの立面概要図として示す。AP は CL から見える側の天井面に設置されており、各 AP と CL 間、また、各 AP 間の見通しは、大半のエリアにおいて良好である。天井の材質は石膏ボードである。床面にはカーペットが敷かれている。屋内と屋外の境界は、床から天井まで 1 枚ガラスのフルハイト窓が 2 重になっており、かつ 2 重のフルハイト窓の中間内部に電動ブラインドが存在する。外壁側窓ガラスは銀を 2 層コーティングした高性能 Low-E ガラス（高性能遮熱断熱ガラス）とのことであるが、電波に対する周波数特性は不明である。なお、電動ブラインドは、実験中は、屋外の風景が概ね見える程度に開いていた。

（2）事務所 2 の環境

図 3 に、事務所 2 の環境をフロアの平面概要図として示す。建物の北側と南側に無柱のエリアが広がり、中央エリアは打合せコーナとなっている。そのフロア全面を無線 LAN サービスエリアとするために 9 個の AP

(事務所 1 に設置されているのと同じ機種) が天井面 (CL から見える面) に設置されている。フロア内は、少人数用の会議室が一部に存在する他は、大半のエリアは机と椅子の座席列と物品保管用キャビネットが展開されている。

図 4 には、事務所 2 の環境をフロアの立面概要図として示す。AP は CL から見える側の天井面に設置されており、各 AP と CL 間、また、各 AP 間の見通しは、大半のエリアにおいて良好である。天井の材質は石膏ボ

ードである。床面にはカーペットが敷かれている。屋内と屋外の境界になる窓ガラスの電波に対する周波数特性は不明である。ブラインドは、実験中は、屋外の風景が概ね見える程度に開いていた。なお、図 3 に示した木製仕切り 1 (北側エリアと中央エリアの境界、及び、南側エリアと中央エリアの境界) の床面からの高さは 1.61m であるので、天井と木製仕切り 1 の間にある 0.9m の空間は見通しありの状況となっている。また、同図に示した木製仕切り 2 (東側エリアと中央エリアの境界) の床面からの高さは 1.91m であるので、天井と木製仕切り 2 の間にある 0.6m の空間は見通しありの状況となっている。

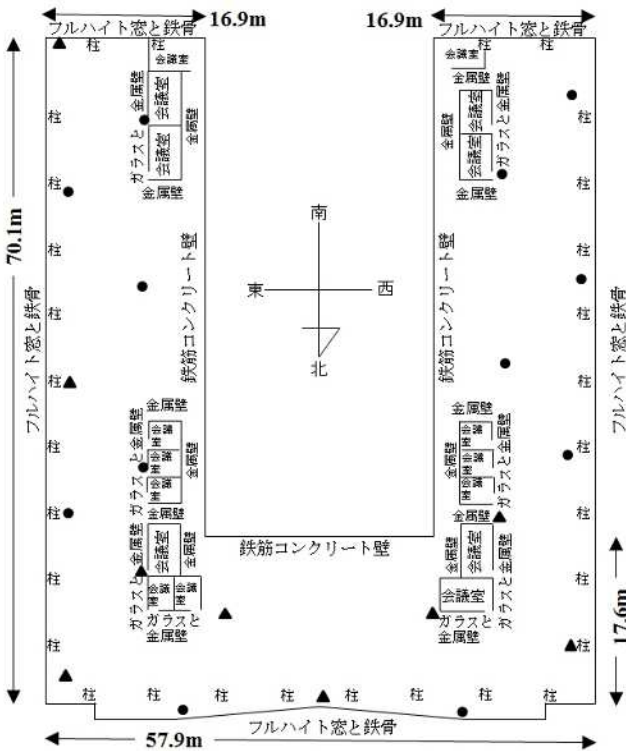


図 1 事務所 1 の実験場所の環境 (フロアの平面概要図)
 : 送信用 AP
 : 送信用かつ受信電力測定用 AP

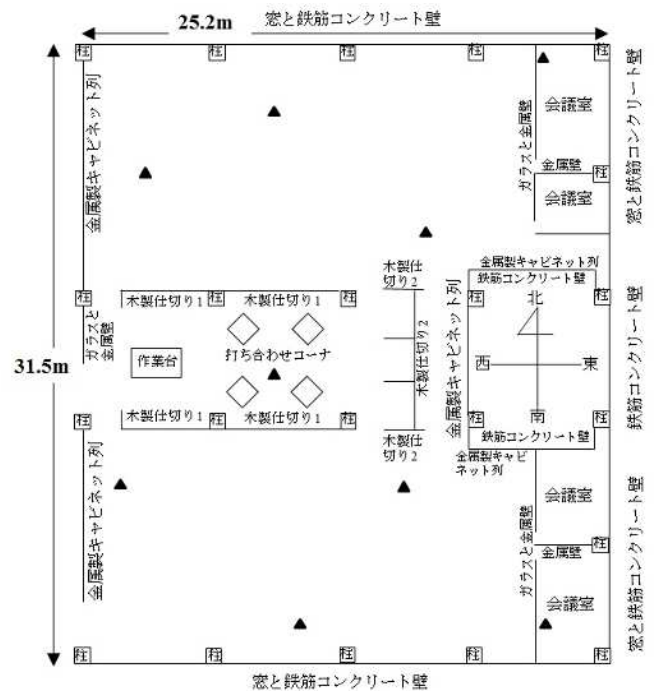


図 3 事務所 2 の実験場所の環境 (フロアの平面概要図)
 : 送信用かつ受信電力測定用 AP

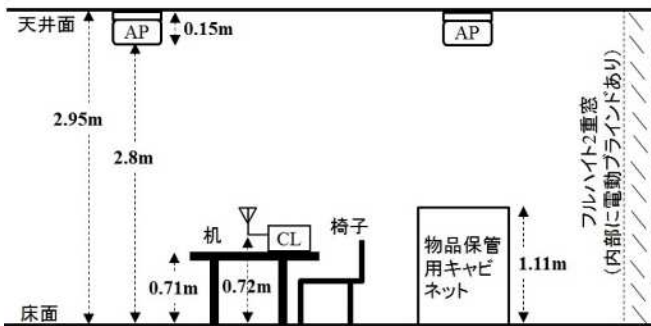


図 2 事務所 1 の実験場所の環境 (フロアの立面概要図)

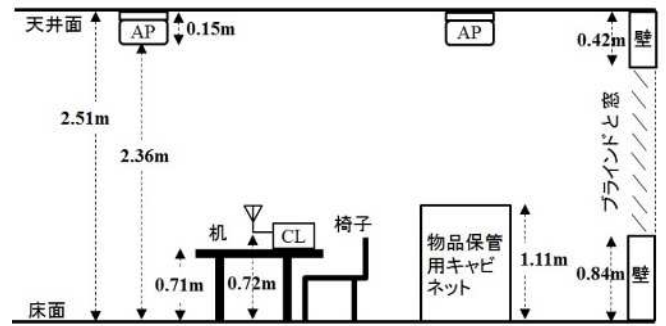


図 4 事務所 2 の実験場所の環境 (フロアの立面概要図)

2.3. 実験方法

(1) 実験システムの構成

図 1 に示された事務所 1 で運用されている 21 個の AP(シスコシステムズ社製の CAP3702I)と図 3 に示された事務所 2 で運用されている 9 個の AP(同社製の CAP3702I)は、各事務所の上下階に設置された他 AP と共に無線 LAN コントローラ(同社製の CT5508)で集中的に制御運用管理され、また RRM(Radio Resource Management)[4],[5]も動作している。さらに各種運用管理情報を把握しやすくするための運用管理表示装置(同社製の PI)も稼働している。

上述の RRM とは、無線 LAN コントローラに具備する機能である。無線 LAN コントローラでは、自ら運用する無線 LAN の複数の AP の電波と、周囲から到来する別の無線 LAN の複数の AP の電波を検知することで、極力、無線 LAN 同士の電波干渉を回避するように自ら運用する無線 LAN の各 AP の周波数チャンネルと送信電力を自動的に制御する機能(RRM)を活用する。この RRM は、現行の IEEE802.11 規約の中での各メーカーの創意工夫の成果の機能実装であるが、基本動作は、各 AP における電波系の状況を無線 LAN コントローラにて実時間で把握し、自ら運用する無線 LAN の各 AP 間をうまく連携・協調させていると理解できる。

RRM の動作の基本として[4]、各 AP は、お互いの AP 間の電波伝搬状況を 60 秒間ごとに監視している。具体的には、各 AP はその運用する周波数チャンネルにおいて、最低の伝送速度と最大の送信電力でマルチキャストアドレス(01:0B:85:00:00:00)宛てに、各 AP の情報をネイバーメッセージとして送信する。さらに、各 AP は通常データ通信に影響を与えないように配慮しながら運用可能な他の周波数チャンネルもスキャンして受信する。従って、ある AP において、他の複数の AP から送信されたネイバーメッセージの電波を受信できる電波伝搬状況では、その受信電力データを、運用管理表示装置や無線 LAN コントローラから測定できる。

(2) 測定諸元

表 1 に実験 1 での測定諸元を示す。実験で利用した AP であるシスコシステムズ社製の CAP3702I は、AP の筐体内にアンテナを内蔵したタイプである。

実験 1 の視点は 5GHz 帯で LOS 状況にある各 AP 間の電波伝搬状況の把握であるので水平方向の AP のアンテナ利得値を必要とする。文献[6]に記載された CAP3702I の内蔵アンテナの放射パターンによると、AP を天井面に設置した場合は、その内蔵アンテナは水平面内は概ね無指向性であり、垂直面内は主ビームが床面方向にややチルトしていることがわかる。従って、公表されているアンテナ利得に対して垂直面内の

放射パターンを考慮して、水平の他 AP 方向の AP のアンテナ利得値を算出した。

なお、CAP3702I は、4 本アンテナによる最大比合成ダイバーシチ受信が動作しているため、本実験で測定した受信電力は、4 本アンテナによる最大比合成ダイバーシチ受信による値であることは認識しておく必要がある[7]。また、シスコシステムズ社の公開資料には詳細な記述を発見できていないが、これまでの各種の知見から本実験で測定した受信電力は、20MHz 幅伝送時の平均値であると理解して実験を遂行した。

(3) 受信電力測定用の AP

図 1 に示された事務所 1 で運用されている 21 個のすべての AP は、ネイバーメッセージの電波を 5GHz 帯で送信しているが、印で示された 9 個の AP を、他 AP が送信する電波の受信電力測定用の AP に選定した。印の受信電力測定用の AP は、コの字型のエリアのうち、東側の南北方向のエリアと、東西方向のエリアに存在する。

図 3 に示された事務所 2 で運用されている印で示された 9 個のすべての AP は、ネイバーメッセージの電波を 5GHz 帯で送信するとともに、その 9 個の AP を他 AP が送信する電波の受信電力測定用の AP に選定した。

そして、今回の実験では、各 AP 間が LOS 状況にある場合についてデータ解析を実施した。

●実験システム	
無線LANアクセスポイント(AP)	CAP3702I(シスコシステムズ社製、IEEE802.11ac第1世代対応)
無線LANコントローラ	CT5508(シスコシステムズ社製、Ver.7.6.120.0(事務所1実験時)、Ver.8.2.110.0(事務所2実験時))
運用管理表示装置	Prime Infrastructure(シスコシステムズ社製、Ver.2.1.1(事務所1実験時)、Ver.3.0.3(事務所2実験時))
●AP送信部(5GHz帯)	
送信電力	16dBm
アンテナ数	4
●AP受信部(5GHz帯)	
アンテナ数	4(最大比合成ダイバーシチ受信)
●AP送受信部共通(5GHz帯)	
アンテナ利得(水平の他AP方向)	-1.5dBi
アンテナ水平面内指向性	無指向性
偏波(床面に対して)	垂直
伝送帯域幅	20MHz
実験時の周波数	6波(事務所1)、7波(事務所2)

表 1 実験 1 での測定諸元

(4) 各 AP 間の電波伝搬による受信電力の測定手順

事務所 1 と事務所 2 の各々において、5GHz 帯の電波を利用して、次の測定手順を実施した。

(Step1) 受信電力測定用の AP を 1 つ選定する。

(Step2) 事務所 1 の場合：運用管理表示装置において、選定した AP に到来している他 AP からの電波の受信電力と周波数チャンネル番号を Graphical User Interface(GUI)画面からコピーして記録する。

事務所 2 の場合：無線 LAN コントローラにおいて、選定した AP に到来している他 AP からの電波の受信電力と周波数チャンネル番号を Command Line Interface(CLI)コマンド "show ap auto-rf 802.11a 選定した AP の名称"[8]に対する応答結果の項目 Nearby APs を使って記録する。

(Step3) 別の受信電力測定用の AP を 1 つ選定する (受信電力測定用のすべての AP で測定済みであれば、測定を終了する)。

(Step4) 上記(Step2)を実施する。

なお、上記(Step2)において事務所 1 の実験時と事務所 2 の実験時で測定データの記録方法が異なるが、同じ測定結果が得られるので不都合はない。事務所 1 の実験の後に CLI コマンドを利用したほうが使い勝手が良いことを認識し、その後の事務所 2 の実験では CLI コマンドを利用した記録方法に変更した。

2.4. 屋内の電波伝搬損失の距離に対する減衰係数 N 及び定数 C を実験データと測定諸元で表す式

勧告 ITU-R P.1238 における屋内の電波伝搬損失距離特性 L_{total} (dB) の推定式[2],[3]は、本実験環境のように送受信点間を結ぶ電波伝搬路上に床・天井・壁等による完全な遮へいがない場合、式(1)で表される。

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + C \quad (1)$$

ここで、

d : 送受信点間距離(m), 但し $d > 1\text{m}$

N : 送受信点間距離に対する減衰係数

(例) 5200MHz で、事務所環境では、 $N = 31$

f : 送受信周波数(MHz)

C : 定数。 $C = -28\text{dB}$

なお、勧告 ITU-R P.1238 の記述を読み込むと、上記の N と C の値は AP と CL 間の電波伝搬状況の推定向けであると理解できる。この状況は、一般的には、屋内において、AP が天井面等の高い場所に設置され、CL は机の高さ等、人の身長以下の高さに存在する状況と理解できる。

実験 1 において、ある AP が送信する電波を別の AP で受信する場合に、その別の AP における受信電力

P_r (dBm) は、式(2) で表される。

$$P_r = P_t + G_t - L_{aa} + G_r \quad (2)$$

ここで、

P_t : ある AP の送信電力(dBm)

G_t : ある AP の送信アンテナ利得 (受信用の別の AP 方向) (dBi)

L_{aa} : ある AP と別の AP 間の伝搬損失(dB)

G_r : 別の AP の受信アンテナ利得 (送信用のある AP 方向) (dBi)

式(2)から、本実験における L_{aa} は、式(3)で表される。

$$L_{aa} = P_t + G_t + G_r - P_r \quad (3)$$

式(3)の右辺は実験での測定諸元と測定された実験データから計算可能である。ここで、式(3)=式(1)とすると、式(4)へ変形できるので、本実験環境における N と C が計算可能となる。

$$N \log_{10} d + C = P_t + G_t + G_r - P_r - 20 \log_{10} f \quad (4)$$

2.5. (実験結果 1-1) 実験データと測定諸元から計算した屋内の天井面 (CL から見える面) に設置された AP 間の電波伝搬損失の距離に対する減衰係数 N と定数 C

各 AP 間の電波伝搬によって測定された受信電力の実験データ数は、事務所 1 の環境では 52 (送受信点間距離 d の範囲は、9.7m から 58.5m) に、事務所 2 の環境では 28 (同 d の範囲は、6.7m から 26.4m) になり、合計 80 のデータ数となった。この合計 80 の実験データを式(4)の右辺に代入し、式(4)の左辺の $\log_{10} d$ についての一次式で回帰すると、 $N = 40.201$ 、及び $C = -49.805$ となった。また、決定係数[9]は 0.733 に、AIC (Akaike Information Criterion, 赤池情報量基準) [1],[10],[11],[12]は 514.48 となった。

ここで、実験データの測定値と、式(4)の左辺にこれら N と C を代入して計算した推定値との差である残差 (= 測定値 - 推定値) の実験結果を図 5 に示す。図 5 の縦軸は残差、横軸は実験データの番号である。横軸は、番号 1 から 28 までの \times 印が事務所 2 の環境における残差であり、番号 29 から 80 までの \square 印が事務所 1 の環境における残差である。合計 80 の実験データについて回帰しているため、当然に、合計 80 の実験データ数の全体としては、残差は 0dB を中心とした大小に分散していることがわかる。しかしながら、 \times 印で示した事務所 2 の環境 (実験データ数 28) における残差の平均値と、 \square 印で示した事務所 1 の環境 (実験データ数 52) における残差の平均値では、約 8dB の差があ

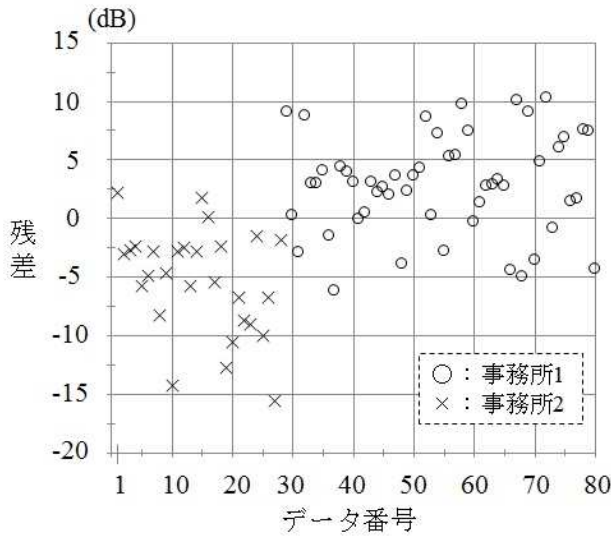


図 5 実験 1 での残差 (=測定値 - 推定値). 測定値は 5GHz 帯, AP 間が LOS 状況の場合, 推定値は式(4)の左辺の推定式から計算の場合

ることもわかる. 従って, 式(4)の左辺の推定式では, 事務所 1 と同 2 の各環境の違いを適切に表現できていないと理解できる.

2.6. (考察 1-1)屋内構造の違いを考慮した式(4)の左辺の新たな推定式

図 5 の残差の実験結果から, 式(4)の左辺の推定式では, 事務所 1 と同 2 の各環境の違いを適切に表現できていないと理解できた. 式(4)の左辺の推定式は, 電波が伝搬する送受信点間距離 d についての説明変数 $\log_{10} d$ が 1 つの単回帰モデルであり, 事務所 1 と同 2 の各環境の違いが表現されてはいない. そこで, 電波伝搬に関係するだろう事務所 1 と同 2 の各環境の違いを, 別途の説明変数として追加表現することを試み, 式(4)の左辺を説明変数を 2 つもった重回帰モデルへ変更してみる.

図 1, 2, 3, 及び 4 を見ると, 電波伝搬に関係するだろう事務所 1 と同 2 の各環境の違いは, 電波伝搬する空間の違い, つまり, 屋内構造の違いにあると考えられる. 屋内構造の違いも, いろいろなとらえ方があると考えられるが, ここでは, 極力単純であり, 汎用性がある(例えば, 新たな拠点であっても情報が入手しやすい)と考えられる天井面と床面との距離 (h_{cf} と呼称する)に着目することで, 屋内構造の違いを表現する. なお, 図 2 から事務所 1 においては $h_{cf} = 2.95\text{m}$ であり, 図 4 から事務所 2 においては $h_{cf} = 2.51\text{m}$ である. また, 事務所 1 と同 2 の h_{cf} の差 $= 0.44\text{m}$ は, 5GHz 帯の無線 LAN の波長に対して約 8 倍の長さである.

説明変数を 2 つもった重回帰モデルへ変更した式(4)の左辺を, 次のように定義する. 送受信点間距離 d に

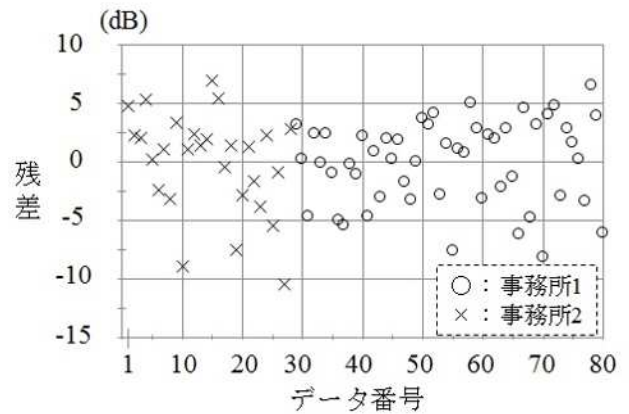


図 6 実験 1 での残差 (=測定値 - 推定値). 測定値は 5GHz 帯, AP 間が LOS 状況の場合, 推定値は式(5)の右辺の推定式から計算の場合

対する減衰係数 N を新たに $N1$ と表記し, 天井面と床面との距離 h_{cf} に対する係数を $N2$ と表記すると,

変更した式(4)の左辺

$$= N1 \log_{10} d + N2 \log_{10} h_{cf} + C \quad (5)$$

となる.

なお, h_{cf} も d と同じく単位が m の距離であるので, 式(1)にならって, h_{cf} も 10 を底とする対数の形で説明変数として表現して式(5)の重回帰モデルに採用した.

式(4)の右辺は実験での測定諸元と測定された実験データから計算可能であるので, これと式(5)に対して重回帰分析を実施することによって, 実験 1 の環境における $N1$, $N2$, 及び C が計算可能となる.

2.7. (実験結果 1-2)屋内構造の違いを考慮した実験データ(天井面 (CL から見える面) に設置された AP 間の電波伝搬データ)の解析

2.5 節のデータ解析で利用した同じ実験データ (事務所 1 と同 2 の環境で測定された合計 80 の実験データ) を式(4)の右辺に代入し, これと式(5)に対して重回帰分析を実施し, $N1 = 30.941$, $N2 = 147.168$, 及び $C = -103.514$ となった. また, 決定係数は 0.886 であり, 2.5 節で述べた式(4)の左辺で単回帰した決定係数 0.733 より大きくなった. さらに, AIC は 448.314 であり, 2.5 節で述べた式(4)の左辺で単回帰した AIC=514.48 より小さくなった. この決定係数と AIC の状況からは, 説明変数が 1 つの式(4)の左辺の単回帰モデルより, 説明変数が 2 つの式(5)の右辺の重回帰モデルのほうが実験データを適切に表現していると理解できる.

ここで, 実験データの測定値と, 式(5)の右辺にこれら $N1$, $N2$, 及び C を代入して計算した推定値との差である残差 (=測定値 - 推定値) の実験結果を図 6 に示

す。図5と同様に、図6の縦軸は残差、横軸は実験データの番号である。横軸は、番号1から28までの×印が事務所2の環境における残差であり、番号29から80までの○印が事務所1の環境における残差である。

合計80の実験データについて重回帰しているのだから、合計80の実験データ数の全体としては、残差は0dBを中心とした大小に分散していることがわかる。また、図5とは異なり、図6では、×印で示した事務所2の環境(実験データ数28)における残差の中心と、

○印で示した事務所1の環境(実験データ数52)における残差の中心では、差がないこともわかる。そして、×印のデータ番号1から28までの残差の平均値も、○印のデータ番号29から80までの残差の平均値も、各々0dBとなっていることを別途確認した。

従って、天井面と床面との距離に着目することで、屋内構造の違いを表現した式(5)の重回帰モデルは、事務所1と同2の環境で測定された天井面(CLから見える面)に設置されたAP間の電波伝搬における実験データを適切に表現できることがわかった。

2.8. (考察 1-2) 屋内構造の違いを考慮した天井面 (CL から見える面) に設置された AP 間の電波伝搬損失の推定式

(1) 2.7節の実験結果から、式(5)の重回帰モデルは、屋内構造の違いを考慮した電波伝搬損失を推定することに貢献すると理解できる。

式(5)の右辺の回帰された係数(N1とN2)、及び定数(C)の桁数を勧告ITU-R P.1238に合わせ、周波数項も考慮すると、屋内事務所環境の天井面(CLから見える面)に設置されたAP間に見通しがある(LOS)状況における5GHz帯の電波伝搬損失 L_{total} (dB)の推定式(実験式)は、次のように表される。

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + 31 \log_{10} d + 147 \log_{10} h_{cf} - 104 \quad (6)$$

ここで、

d : 送受信点間距離(m), LOS 状況,

但し、実験データの範囲から
 $6.7m \leq d \leq 58.5m$

h_{cf} : 天井面と床面との距離(m),

但し、実験データの範囲から
 $2.51m \leq h_{cf} \leq 2.95m$

f : 送受信周波数(MHz),

但し、無線LANで運用する範囲から、
 $5150MHz \leq f \leq 5725MHz$

(2) 図7には、各AP間の電波伝搬によって測定された受信電力の実験データ(データ数80)と測定諸元から計算した式(4)の右辺の値を、横軸に送受信のAP間距離を10を底とする対数として、○印と×印で表示した。○印は事務所1の環境における実験データ(データ数52)に基づき、×印は同2の環境における実験データ(データ数28)に基づいている。実線は式(5)の右辺、即ち、式(6)において右辺にある周波数項を左辺に移項して、事務所1の環境における $h_{cf} = 2.95m$ とした場合の推定値である。一点鎖線は、同様に、事務所2の環境における $h_{cf} = 2.51m$ とした場合の推定値である。なお、点線は、勧告ITU-R P.1238における屋内の電波伝搬損失距離特性の推定式(1)において右辺にある周波数項を左辺に移項した後の距離項の値(推定値)である。

図7からは、屋内事務所環境の天井面(CLから見える面)に設置されたAP間に見通しがある(LOS)状況における5GHz帯の電波伝搬損失を推定する際に、天井面と床面との距離 h_{cf} は、屋内構造の違いの影響を表現することに有用であると理解できる。

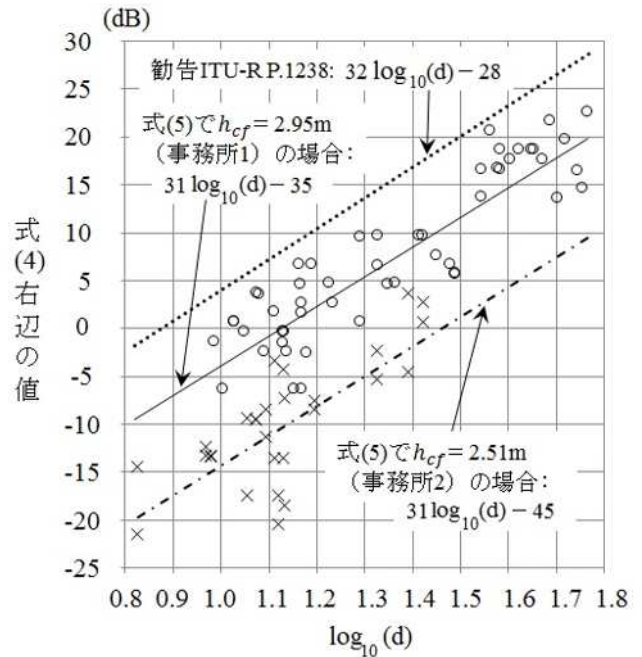


図7 AP間(5GHz帯, LOS状況)の電波伝搬損失の測定値(○印(事務所1の場合, データ数52, 式(4)右辺の値), ×印(事務所2の場合, データ数28, 式(4)右辺の値))と、式(5)右辺による推定値(実線(事務所1で $h_{cf} = 2.95m$ の場合), 一点鎖線(事務所2で $h_{cf} = 2.51m$ の場合)), 及び勧告ITU-R P.1238による推定値(点線, 推定式(1)の距離項の値)

(3)式(6)からは,天井面と床面との距離 h_{cf} が増加すると,天井面(CLから見える面)に設置されたAP間の電波伝搬損失も増加すると理解でき,そのことは図7からもわかる.その定性的な理由としては,例えば,次の解釈もできるだろう.

天井面(CLから見える面)に設置されたAP間の伝搬路は,概ね次の3つに分類できる.

伝搬路 1:AP間の直接波による伝搬路

伝搬路 2:AP間にある天井面で反射された反射波による伝搬路

伝搬路 3:AP間にある床面で反射された反射波による伝搬路

伝搬路 1と2は,天井面と床面との距離 h_{cf} の変化には依存しないと理解できるが, h_{cf} の増加は伝搬路3の長さを長くするので,伝搬路3における伝搬損失は増加すると理解できる.

それゆえ,天井面と床面との距離 h_{cf} が増加すると,伝搬路1,2,及び3の電波の合成波による受信電力 P_r は減少し,そして,式(3)からわかるように,天井面(CLから見える面)に設置されたAP間の電波伝搬損失 L_{aa} は増加すると理解できる.厳密には,伝搬路1,2,及び3の電波の位相状態によって合成波の受信電力 P_r は変動すると理解できるが,平均的には P_r は減少すると推測した.

なお,理論的には,垂直偏波の電波が床面に入射した場合には反射係数が0になる Brewstar角が存在する[13].そして,もしも入射角(床面に垂直な軸から傾斜測定した垂直面内での電波の床面への到来角度)が Brewstar角より大きい状況では,入射角が減少すると反射係数も減少して,反射波の強度は減少すると理解できる[14].実験1では,伝搬路1の長さは式(6)における送受信点間距離 d であるが,この d が一定の場合, h_{cf} が増加すると,伝搬路3ではAPから送信された垂直偏波の電波の床面への入射角は減少する.この入射角が,実験1では, Brewstar角より大きい状況であったと推測もできる.

3. 実験2: 屋内構造が異なる事務所環境におけるAPとCL間の電波伝搬損失測定

3.1. 実験目的

屋内事務所環境の天井面(CLから見える面)に設置されたAPと,机の高さ等,人の身長以下の高さに存在するCL間に見通しがある(LOS)状況における5GHz帯の電波伝搬損失の推定式を実験的に導出する.その際に,屋内構造の違いが影響するか否かを把握し,もしも,影響ありならば,屋内構造の違いを考慮した電波伝搬損失の推定式を実験的に導出する.

3.2. 実験場所の環境

2.2.節で述べた実験1を実施した同じ実験場所(事務所1と同2)で,実験2も実施した.APは屋内事務所環境の天井面(CLから見える面)に設置されているが,一方,CLは床面からの高さが0.71mの机上に存在し,CLにおける外部アンテナコネクタの中心と床面との距離は0.72mである.

3.3. 実験方法

(1) 実験システムの構成

実験2における実験システムの構成は,2.3.節(1)で述べた実験1の実験システムと同じである.そして実験2のシステムの構成では,CLが追加されている.CLは,ノートタイプ型のパソコン(PC)ではなく,シスコシステムズ社製の無線LANの自律型AP製品のAP1242AGに同社製の5GHz帯用ダイポールアンテナ製品のANT5135D-Rを取り付けた機器である.ノートタイプ型のPCの場合,内蔵する無線LAN装置の送信電力値,アンテナ利得,及びアンテナ放射パターンが不明であり,実験2の目的には不向きである.一方,AP1242AGとANT5135D-Rにおいては,送信電力値,アンテナ利得,及びアンテナ放射パターンが具体的にわかり,実験2の目的にはふさわしいのでCLとして採用した.

そして,このCLが送信する5GHz帯の電波(ピーコン波)を屋内事務所環境の天井面(CLから見える面)に設置されたAPで受信することで受信電力が測定されて,APとCL間の電波伝搬損失を把握することが可能となる.

なお,実験2におけるCLはAPとして動作しているので,そのCLの送信する電波が天井面(CLから見える面)に設置されたAPで受信された際には,無線LANコントローラは,自らのシステムで制御運用管理していない他者が運用する管理外のAP(RogueAPと呼ばれる)としてそのCLを認識する.無線LANコントローラは,自ら制御運用管理する各APで受信できたRogueAPの受信電力を測定できるので,RogueAPとして認識された実験2におけるCLの受信電力データを利用して,APとCL間の電波伝搬損失を把握できる.

(2) 測定諸元

実験2での測定諸元は,実験1での表1と同様であるが,表2には実験2で追加された,及び,変更された各測定諸元を示す.

実験2の視点は5GHz帯でLOS状況にあるAPとCL間の電波伝搬状況の把握である.APとCLの各々における床面からの高さの違い,及び,APとCL間の水平方向の距離によって,床面に対して垂直面内において,APとCL間は斜めの電波伝搬路になる.従って,斜め

●(追加)実験システムのCL (AP1242AG(シスコシステムズ社製、自律型、IEEE802.11ag対応))	
送信電力	11dBm
送信周波数	5240MHz(チャネル番号48)
アンテナ	Cisco ANT5135D-R ダイポール
運用アンテナ数	1(Primary Port-Right接続)
アンテナ利得	文献[15]の ANT5135D-R ダイポールアンテナの垂直面内放射 パターンから読み取り:実験時 のAP-CL間の斜め伝搬路で 2.6dBi 以下
アンテナ水平面内指向性	無指向性
偏波(床面に対して)	垂直
ビーコン間隔	100msec
アンテナコネクタ中心の床面から の高さ	0.72m
IOS ソフトウェア version	12.4(25d)JA2
●(変更)AP送受信部共通(5GHz帯)	
アンテナ利得	文献[6]のCAP3702Iの内蔵アンテナ の垂直面内放射パターンから 読み取り:実験時のAP-CL間の 斜め伝搬路で3.1dBi 以下

表 2 実験 2 での測定諸元, 但し, 実験 1 の測定諸元に追加と変更された項目

伝搬路の仰角に応じて AP と CL の各アンテナ利得は, 各アンテナの垂直面内放射パターンによって変化することになる。そこで, 斜め伝搬路の仰角に応じた各アンテナ利得値をメーカーから公開されている各アンテナの垂直面内放射パターンの資料[6],[15]から読み取って利用した。

なお, CL 位置が AP 設置位置の真下の場合, つまり仰角 90 度の場合, アンテナ利得が急激に低下する状況(アンテナの垂直面内放射パターンの Null の状況)になるので, 現実的に安定した状態の適切なアンテナ利得値を読み取ることが困難であった。そこで, 仰角 90 度の場合には, AP と CL 間の中間距離における第 1 フレネルゾーン半径を計算し, その第 1 フレネルゾーン半径をアンテナ位置から見込む角度におけるアンテナ利得値をアンテナの垂直面内放射パターンから読み取って利用した。

(3) 測定用電波を送信する CL と受信電力測定用の AP

事務所 1 においては, 測定用電波を送信する CL は, 図 1 の印で示された AP の真下に設置した。そして CL から送信された電波の受信電力は, 図 1 の印と印の両方の AP で測定した。

事務所 2 においては, 測定用電波を送信する CL は,

図 3 の印で示された AP の真下, 及び, AP の真下以外の机上等の複数の場所にも設置した。そして CL から送信された電波の受信電力は, 図 3 の印の AP で測定した。

今回の実験では, 各 AP-CL 間が LOS 状況にある場合についてデータ解析を実施した。

(4) 各 AP-CL 間の電波伝搬による受信電力の測定手順

事務所 1 と事務所 2 の各々において, 5GHz 帯の電波を利用して, 次の測定手順を実施した。

(Step1)測定用電波を送信する CL の位置を 1 つ選定して CL を設置し, 電波を送信する。

(Step2)無線 LAN コントローラにおいて, CL から各 AP に到来している電波の受信電力を, CLI コマンド "show rogue ap detailed 測定用電波を送信する CL の MAC アドレス"[16]に対する応答結果の項目 Reported By を使って記録する。

(Step3)測定用電波を送信する CL の別の位置を 1 つ選定して CL を設置し, 電波を送信する(測定用電波を送信する CL のすべての選定位置で測定済みであれば, 測定を終了する)。

(Step4)上記(Step2)を実施する。

3.4. (実験結果 2-1) 実験データと測定諸元から計算した屋内の AP-CL 間の電波伝搬損失の距離に対する減衰係数 N と定数 C

各 AP-CL 間の電波伝搬によって測定された受信電力の実験データ数は, 事務所 1 の環境では 45 (送受信点間距離 d の範囲は, 2.1m から 58.5m) に, 事務所 2 の環境でも 45 (同 d の範囲は, 1.6m から 22.8m) になり, 合計 90 のデータ数となった。この合計 90 の実験データを式(4)の右辺に代入し, 式(4)の左辺の $\log_{10} d$ についての一次式で回帰すると, $N = 27.148$, 及び $C = -31.672$ となった。また, 決定係数は 0.674 に, AIC は 636.9 となった。なお, 実験 2 においては AP-CL 間の電波伝搬状況になるので, 式(4)の右辺の P_t, G_t, G_r , 及び P_r は次に示す意味になる。また, 式(3)の L_{aa} は, 次に示す L_{ac} に置き換わる。

P_t : CL の送信電力 (dBm)

G_t : CL の送信アンテナ利得 (受信用の AP 方向) (dBi)

G_r : 受信用の AP の受信アンテナ利得 (送信用の CL 方向) (dBi)

P_r : CL が送信する電波を受信用の AP で受信する場合に, その受信用の AP における受信電力 (dBm)

L_{ac} : AP と CL 間の伝搬損失 (dB)

ここで, 実験データの測定値と, 式(4)の左辺にこれら N と C を代入して計算した推定値との差である残差

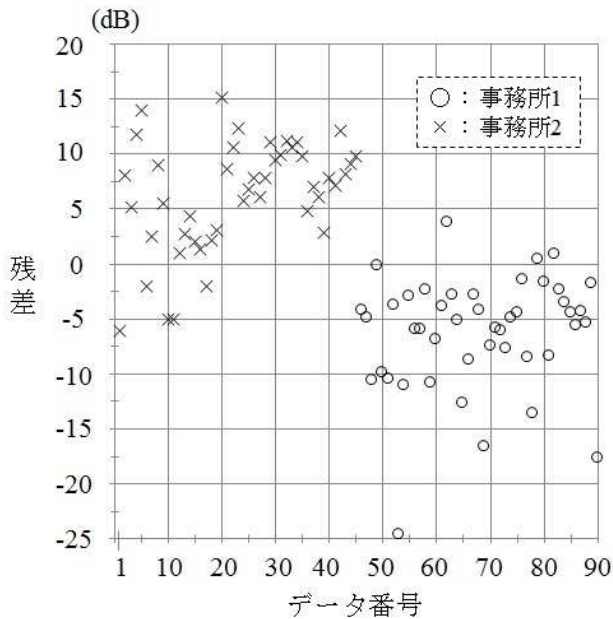


図 8 実験 2 での残差 (=測定値 - 推定値). 測定値は 5GHz 帯, AP-CL 間が LOS 状況の場合, 推定値は式(4)の左辺の推定式から計算の場合

(=測定値 - 推定値)の実験結果を図 8 に示す. 図 8 の縦軸は残差, 横軸は実験データの番号である. 横軸は, 番号 1 から 45 までの \times 印が事務所 2 の環境における残差であり, 番号 46 から 90 までの \circ 印が事務所 1 の環境における残差である. 合計 90 の実験データについて回帰しているため, 当然に, 合計 90 の実験データ数の全体としては, 残差は 0dB を中心とした大小に分散していることがわかる. しかしながら, \times 印で示した事務所 2 の環境(実験データ数 45)における残差の平均値と, \circ 印で示した事務所 1 の環境(実験データ数 45)における残差の平均値では, 約 13dB の差があることもわかる. 従って, 式(4)の左辺の推定式では, 事務所 1 と同 2 の各環境の違いを適切に表現できていないと理解できる. これは 2.5 節で述べた実験 1 の結果と同じ状況である.

そこで, 2.6 節で考察して実験 1 のデータ解析で新たに採用した式(5)の重回帰モデルを, 実験 2 のデータ解析でも採用し, その結果を次の 3.5 節で示した. なお, 電波伝搬に関するだろう事務所 1 と同 2 の各環境の違いは, 屋内構造の違いにあると考えて, 天井面と床面との距離 h_{cf} を新たな説明変数として採用したのが, 式(5)の重回帰モデルである.

3.5. (実験結果 2-2) 屋内構造の違いを考慮した実験データ(AP-CL 間の電波伝搬データ)の解析

3.4 節のデータ解析で利用した同じ実験データ(事務所 1 と同 2 の環境で測定された合計 90 の実験データ)を式(4)の右辺に代入し, これと式(5)に対して重回

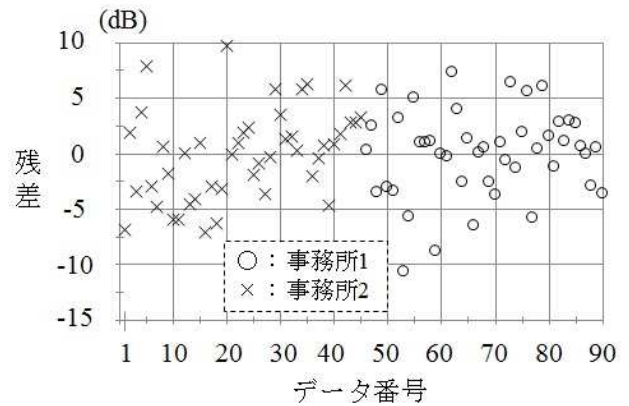


図 9 実験 2 での残差 (=測定値 - 推定値). 測定値は 5GHz 帯, AP-CL 間が LOS 状況の場合, 推定値は式(5)の右辺の推定式から計算の場合

帰分析を実施し, $N1 = 35.503$, $N2 = -224.333$, 及び $C = 57.052$ となった. また, 決定係数は 0.921 であり, 3.4 節で述べた式(4)の左辺で単回帰した決定係数 0.674 より大きくなった. さらに, AIC は 510.937 であり, 3.4 節で述べた式(4)の左辺で単回帰した AIC=636.9 より小さくなった. この決定係数と AIC の状況からは, 説明変数が 1 つの式(4)の左辺の単回帰モデルより, 説明変数が 2 つの式(5)の右辺の重回帰モデルのほうが実験データを適切に表現していると理解できる.

ここで, 実験データの測定値と, 式(5)の右辺にこれら $N1$, $N2$, 及び C を代入して計算した推定値との差である残差 (=測定値 - 推定値) の実験結果を図 9 に示す. 図 8 と同様に, 図 9 の縦軸は残差, 横軸は実験データの番号である. 横軸は, 番号 1 から 45 までの \times 印が事務所 2 の環境における残差であり, 番号 46 から 90 までの \circ 印が事務所 1 の環境における残差である.

合計 90 の実験データについて重回帰しているため, 当然に, 合計 90 の実験データ数の全体としては, 残差は 0dB を中心とした大小に分散していることがわかる. また, 図 8 とは異なり, 図 9 では, \times 印で示した事務所 2 の環境(実験データ数 45)における残差の中心と, \circ 印で示した事務所 1 の環境(実験データ数 45)における残差の中心では, 差がないこともわかる. そして, \times 印のデータ番号 1 から 45 までの残差の平均値も, \circ 印のデータ番号 46 から 90 までの残差の平均値も, 各々 0dB となっていることを別途確認した.

従って, 天井面と床面との距離に着目することで, 屋内構造の違いを表現した式(5)の重回帰モデルは, 事務所 1 と同 2 の環境で測定された AP-CL 間の電波伝搬における実験データを適切に表現できることがわかった.

3.6. (考察) 屋内構造の違いを考慮した AP-CL 間

における電波伝搬損失の推定式

(1) 3.5 節の実験結果から、式(5)の重回帰モデルは、屋内構造の違いを考慮した AP-CL 間における電波伝搬損失を推定することに貢献すると理解できる。

式(5)の右辺の回帰された係数 ($N1$ と $N2$)、及び定数 (C) の桁数を勧告 ITU-R P.1238 に合わせ、周波数項も考慮すると、屋内事務所環境の AP-CL 間に見通しがある (LOS) 状況における 5GHz 帯の電波伝搬損失 L_{total} (dB) の推定式 (実験式) は、次のように表される。

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + 36 \log_{10} d - 224 \log_{10} h_{cf} + 57 \quad (7)$$

ここで、

d : 送受信点間距離(m), LOS 状況,

但し、実験データの範囲から

$$1.6\text{m} \leq d \leq 58.5\text{m}$$

h_{cf} : 天井面と床面の間の距離(m),

但し、実験データの範囲から

$$2.51\text{m} \leq h_{cf} \leq 2.95\text{m}$$

f : 送受信周波数(MHz),

但し、無線 LAN で運用する範囲から、

$$5150\text{MHz} \leq f \leq 5725\text{MHz}$$

(2) 図 10 には、各 AP-CL 間の電波伝搬によって測定された受信電力の実験データ (データ数 90) と測定諸元から計算した式(4)の右辺の値を、横軸に送受信の AP-CL 間距離を 10 を底とする対数として、印と×印で表示した。印は事務所 1 の環境における実験データ (データ数 45) に基づき、×印は同 2 の環境における実験データ (データ数 45) に基づいている。実線は式(5)の右辺、即ち、式(7)において右辺にある周波数項を左辺に移項して、事務所 1 の環境における $h_{cf} = 2.95\text{m}$ とした場合の推定値である。一点鎖線は、同様に、事務所 2 の環境における $h_{cf} = 2.51\text{m}$ とした場合の推定値である。なお、点線は、勧告 ITU-R P.1238 における屋内の電波伝搬損失距離特性の推定式(1)において右辺にある周波数項を左辺に移項した後の距離項の値 (推定値) である。

図 10 からは、屋内事務所環境の AP-CL 間に見通しがある (LOS) 状況における 5GHz 帯の電波伝搬損失を推定する際に、天井面と床面の間の距離 h_{cf} は屋内構造の違いの影響を表現することに有用であると理解できる。

さらに図 10 からは、事務所 2 の環境では、AP-CL 間に見通しがある (LOS) 状況における 5GHz 帯の電波伝搬損失は、勧告 ITU-R P.1238 によって推定された電波伝搬損失に近い傾向があることもわかり興味深い。

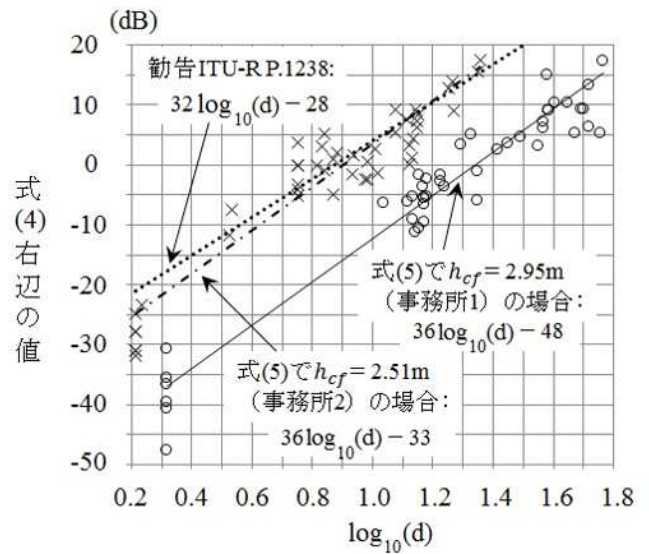


図 10 AP-CL 間 (5GHz 帯, LOS 状況) の電波伝搬損失の測定値 (○印 (事務所 1 の場合, データ数 45, 式(4)右辺の値), ×印 (事務所 2 の場合, データ数 45, 式(4)右辺の値)) と、式(5)右辺による推定値 (実線 (事務所 1 で $h_{cf} = 2.95\text{m}$ の場合), 一点鎖線 (事務所 2 で $h_{cf} = 2.51\text{m}$ の場合)), 及び勧告 ITU-R P.1238 による推定値 (点線, 推定式(1)の距離項の値)

(3) 式(7)からは、天井面と床面の間の距離 h_{cf} が増加すると、AP-CL 間の電波伝搬損失が減少すると理解でき、そのことは図 10 からわかる。この特徴は、実験 1 の 2.8 節で考察した天井面 (CL から見える面) に設置された AP 間の電波伝搬損失の場合と、逆の特徴である (実験 1 の結果では、 h_{cf} が増加すると、AP 間の電波伝搬損失も増加していた)。実験 2 の結果に見られる特徴、つまり、 h_{cf} が増加すると AP-CL 間の電波伝搬損失が減少する理由は、定性的には、次の解釈もできるだろう。

AP-CL 間の伝搬路は、概ね次の 3 つに分類できる。
 伝搬路 1: AP-CL 間の直接波による伝搬路
 伝搬路 2: AP-CL 間にある天井面で反射された反射波による伝搬路
 伝搬路 3: AP-CL 間にある床面で反射された反射波による伝搬路

例えば、伝搬路 1 の長さは、式(7)における送受信点間距離 d であるが、天井面と床面の間の距離 h_{cf} が増加すると、同じ d になるためには、CL から見た天井面に設置された AP の仰角が大きくなる。実験 2 では、AP-CL 間は LOS 状況を前提としているが、CL から見た天井面に設置された AP の仰角が大きくなれば、さらに良い LOS 状況となる。

それゆえ、天井面と床面の間の距離 h_{cf} が増加すると、伝搬路 1,2,及び 3 の電波の合成波による受信電力 P_r は増加し、そして、式(3)からわかるように、AP-CL 間の電波伝搬損失 L_{ac} (3.4 節で述べたように L_{aa} を L_{ac} に置き換え)は減少すると理解できる。厳密には、伝搬路 1,2,及び 3 の電波の位相状態によって合成波の受信電力 P_r は変動すると理解できるが、平均的には P_r は増加すると推測した。

なお、理論的には、垂直偏波の電波が床面に入射した場合に、もしも入射角が Brewstar 角より小さい状況では、入射角が減少すると反射係数は増加して、反射波の強度は増加すると理解できる[14]。実験 2 では、天井面と床面の間の距離 h_{cf} の増加に伴い、CL から見た天井面に設置された AP の仰角が大きくなると、伝搬路 2 と 3 では、CL から送信された垂直偏波の電波の天井面への入射角と同床面への入射角は減少する。この入射角が、実験 2 では、Brewstar 角より小さい状況であったと推測もできる。

4. まとめ

日常的に運用している無線 LAN システムを用いて、5GHz 帯の見通しがある(LOS)状況における電波伝搬状況を把握する実験を、屋内構造が異なる 2 つの事務所環境において実施した。複数の AP 間で受信された受信電力データ、及び、CL を RogueAP として認識して複数の AP で受信された受信電力データから、AP 間、及び、AP-CL 間の電波伝搬損失を測定した。そして、屋内事務所環境の天井面(CL から見える面)に設置された AP 間、及び、AP-CL 間の電波伝搬損失の推定式を、屋内構造の違いを考慮して、実験的に導出した。

(1) 実験的に導出した電波伝搬損失の推定式において、屋内構造の違いを表現するために、極力単純であり、汎用性がある(例えば、新たな拠点であっても情報が入手しやすい)と考えられる天井面と床面の間の距離を採用した。天井面と床面の間の距離は、推定式において、屋内構造の違いを適切に表現できることを確認できた。

(2) 本実験により導出された屋内事務所環境の天井面(CL から見える面)に設置された AP 間、及び、AP-CL 間における屋内構造の違いを考慮した電波伝搬損失の推定式は、屋内における AP と CL 間の電波伝搬損失距離特性の推定式を記述した勧告 ITU-R P.1238 を補完する役割を果たせる。

(3) 従って、本実験により導出された屋内構造の違いを考慮した電波伝搬損失の推定式は、各 AP 間の連携・協調の検討(例えば IEEE802.11 ワーキンググループの Task Group ax での検討[17])、複数 AP 間の幹線を無線中継して接続する方法の回線設計、AP-CL 間の回

線設計、AP における受信電力を利活用した CL 位置推定[18]の改善検討等に有用な知見となる。

(4) 今後の課題

本実験環境とは異なる屋内構造をもったエリアにおいて、本実験で導出した推定式の有効性を検証評価すること。

2.4GHz 帯における場合の実験的検討。

見通しが無い(NLOS)状況における場合の実験的検討。

謝 辞

社内無線 LAN 環境を利活用する機会を与えていただいたネットワークシステムズ株式会社 経営企画本部 情報システム部 インフラ基盤チームの大井社員、谷口マネージャー、及び、同部 共通系システムチームの古森エキスパート、角田社員に感謝する。無線 LAN 製品の様々なことで日頃よりお世話になっているシスコシステムズ合同会社の 大野奈津子様、清水智生様、竹林百合香様に感謝する。本実験実施の機会を与えていただいたネットワークシステムズ株式会社 ビジネス推進本部の篠浦本部長、同本部応用技術部の井上部長、村元副部長、及び、同部エンタープライズ SDN チームの大高マネージャーに感謝する。

文 献

- [1] 松戸孝, 山下聖太郎, 丸田竜一, 田中政満, 中野清隆, 宇都宮光之, 力石靖, "屋内事務所環境に設置された無線 LAN アクセスポイント(AP)間における電波伝搬損失測定の実験的検討 勧告 ITU-R P.1238 を補完するための CAP3702I(シスコシステムズ社製の AP)を用いた AP 間の電波伝搬損失距離特性の推定式の導出", <http://ursi-f.nict.go.jp/annai595.html>, 第 595 回 URSI-F 会合, 2015 年 6 月 24 日。
- [2] Rec. ITU-R P.1238-8: "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz", ITU-R Recommendations P Series, <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-8-201507-I/en>, 2015。
- [3] 守倉正博, 久保田周治, "改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書 第 11 章高速無線 LAN 環境における電波伝搬", インプレス R&D, 2008 年 4 月 11 日。
- [4] Cisco systems, "Radio Resource Management under Unified Wireless Networks", Cisco systems, http://www.cisco.com/en/US/tech/tk722/tk809/technologies_tech_note09186a008072c759.shtml, May 17, 2010。
- [5] 中野清隆, "第 1 回 見えた! 無線 LAN の電波!! ~電波の可視化の重要性~", ネットワークシステムズ, <http://www.netone.co.jp/report/column/20150525.html>, 2015 年 5 月 25 日。
- [6] Cisco systems, "Cisco Aironet Series 1700/2700/3700 Access Points Deployment Guide",

- http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/technology/apdeploy/8-0/Cisco_Aironet_3700AP.html#pgfId-98129 .
- [7] 松戸孝, 宇都宮光之, 田中政満, 中野清隆, 丸田竜一, 力石靖, 山下聖太郎, "シスコシステムズ社製無線 LAN アクセスポイント CAP3602E の最大比合成 (Maximal Ratio Combining:MRC) ダイバースチ受信性能の実験的検討 - より信頼性の向上した無線 LAN の実現を目指して", 第 1 回 シスコテクノロジー論文コンテスト最優秀賞受賞論文, 社員執筆記事, ネットワンシステムズ, <http://www.netone.co.jp/report/press.html>, http://www.netone.co.jp/wp-content/uploads/2012/04/matsudo_et_all.pdf, 2013 年 7 月 12 日 .
受賞論文紹介, Cisco systems, <http://www.cisco.com/web/JP/partners/ronbun/1st/index.html#2> .
- [8] Cisco systems, "Cisco Wireless LAN Controller Command Reference, Release 8.0", Cisco systems, http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/8-0/command-reference/b_cr80/b_cr80_chapter_0111.html#wp5309843700, Sep 07, 2016 .
- [9] 美添泰人, "現代統計学 基礎講座 第 2 回 データ分析の基礎:多変量", 数学セミナー 2015 年 5 月号, 通巻 643 号, pp.67-73, 日本評論社, 2015 年 4 月 11 日 .
- [10] 林知己夫, 鈴木達三, 赤池弘次, "統計学特論", 放送大学教育振興会, 1987 年 3 月 20 日 .
- [11] 赤池弘次, 甘利俊一, 北川源四郎, 樺島祥介, 下平英寿, "赤池情報量基準 AIC - モデリング・予測・知識発見", 共立出版, 2007 年 9 月 15 日 .
- [12] 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎, "情報量統計学", 共立出版, 2008 年 9 月 25 日 .
- [13] 進士昌明, "無線通信の電波伝搬 第 2 章伝搬の法則", 電子情報通信学会, 1993 年 6 月 1 日 .
- [14] 下条則之, 唐沢好男, "屋内電波吸収壁によるマルチパス抑圧効果とデジタル伝送特性改善に関する等価伝送路モデルによる解析," 信学論(B), vol.J86-B, no.12, pp.2522-2532, 2003 年 12 月 .
- [15] Cisco systems, "Cisco Aironet 3.5-dBi Articulated Dipole Antenna (AIR-ANT5135D-R)", Cisco systems, <http://www.cisco.com/en/US/docs/wireless/antenna/installation/guide/ant5135d.html> .
- [16] Cisco systems, "Cisco Wireless LAN Controller Command Reference, Release 8.0", Cisco systems, http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/8-0/command-reference/b_cr80/b_cr80_chapter_0101.html#wp3228845100, Sep 07, 2016 .
- [17] 足立朋子, "802.11ax 最新ドラフト案の概要とコア技術", 第 53 回ワイヤレス技術セミナー IEEE802 無線 LAN 標準化最新動向, リックテレコム, 2016 年 10 月 7 日 .
- [18] 松戸孝, 宇都宮光之, "Cisco 無線 LAN アクセスポイントにおける受信電力を利活用した事務所環境での端末位置推定の実験的検討 - 推定位置の誤差の把握とフリーアドレスで利便さ痛感の「空席エリア推定アプリケーション」の開発 -", 第 3 回 シスコ論文コンテスト特別功労賞受賞論文, 社員執筆記事, ネットワンシステムズ, <http://www.netone.co.jp/report/press.html>, http://www.netone.co.jp/wp-content/uploads/2012/04/cisco_ronbun3_Takashi_Matsudo.pdf, 2015 年 12 月 11 日 .
受賞論文紹介, Cisco systems, <http://www.cisco.com/web/JP/partners/ronbun/3rd/index.html#~2> .