

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 -

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^{††}

† ネットワンシステムズ株式会社 ビジネス推進本部 第 1 応用技術部 スイッチワイヤレスチーム
‡ NI ソリューション開発チーム, †† 保守運用サービス本部 サービス導入支援部 技術支援チーム

†, ‡ 〒100-7024 東京都千代田区丸の内 2-7-2 JP タワー

†† 〒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

あらまし 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(AP)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(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. 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に有用な知見となる. AP 間に見通しが無い状況において, AP 間の送受信点間距離を表現する最良のモデルを実験データから選択するには, AIC(Akaike Information Criterion, 赤池情報量基準)の利用が有用であった.

キーワード 勧告 ITU-R P.1238, 無線 LAN, 伝搬損失, アクセスポイント間伝搬路, AIC

Experimental Study to Measure a Radio Path Loss between Wireless LAN Access Point(AP)s Deployed in an Indoor Office Environment - Deriving an Empirical Formula of the Radio Path Loss between APs from Data Measured by Using Wireless LAN Access Point Cisco CAP3702I for Supplementing Recommendation ITU-R P.1238 -

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

† Switch Wireless Team, Applied Technology Engineering Department 1, Business Development Division,
NetOneSystems Co., Ltd.

‡ NI Solution Development Team, †† Service Implementation Support Department Maintenance and Operation
Service Division,

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

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

Abstract By using experimental data of received power level between wireless LAN access point(AP)s that are Cisco CAP3702I operated in an indoor office environment, we derived an empirical formula of radio path loss between APs. The empirical formula can supplement the prediction method of indoor radiowave propagation between APs in Recommendation ITU-R P.1238 that has been for between an AP and a wireless LAN terminal. The empirical formula is useful for a study of cooperation between APs and for designing a radio relay link between APs. In order to select the best statistical model that defines a radio path between APs in NLOS by the experimental data, AIC (Akaike Information Criterion) is useful for us.

Keyword Recommendation ITU-R P.1238, Wireless LAN, Radio path loss, Radio path between APs, AIC

1. はじめに

生産性の向上や事務所のスペース効率の向上等の課題を解決するために「ワークスタイルの変革」を推進する企業[1]が増加するなか、その企業内ネットワークへの無線 LAN の採用が進んでいる[2],[3]。企業における無線 LAN は、多くの従業員が無線 LAN 利用者として存在し、事務所の1つのフロアのほぼ全面を無線 LAN サービスエリアとし、また、複数の上下階フロアが同エリアとして存在する。従って、運用される無線 LAN アクセスポイント（親局、以下 AP と記載する）の数量は多くなる傾向がある。

AP の数量が多くなると運用負荷を軽減するために、多くの AP を集中的に制御運用管理する機能をもった無線 LAN コントローラが導入される[4]。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 の周波数チャネルと送信電力を自動的に制御する機能（RRM: Radio Resource Management）[5],[6]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。IEEE802.11 ワーキンググループの TGax(Task Group ax) では、無線 LAN が高密度に設置された環境での効率を改善するという新たな課題の解決にも挑戦しているが[7]、各 AP 間の連携・協調は TGax の最終形である IEEE802.11ax 規約として、将来さらに強化されてくる可能性もある。

筆者らは、企業向けの屋内事務所環境の無線 LAN 構築の実務として、無線 LAN の回線設計（1つの AP のサービスエリアの広さをどの程度にするかの判断）には、勧告 ITU-R P.1238 の屋内の電波伝搬損失距離特性の推定式[8],[9]を活用してきており、同勧告の有用性を多いに実感している[10]。ここであらためて同勧告の記述を読み込むと、それは AP と、子局である無線 LAN クライアント端末（以下 CL と記載する）間の電波伝搬状況の推定向けであると理解できる。そうすると、屋内事務所環境に設置された AP 間の電波伝搬損失距離特性の推定式はどのようになるか？ という課題を認識するに至った。

屋内事務所環境に設置された AP 間の電波伝搬損失距離特性の推定式が判明すると、それは、勧告 ITU-R P.1238 を補完することになるので、有用である。さらに、各 AP 間の連携・協調の検討に資することも可能

となり、また、無線 LAN サービスエリアの一部において AP の設置場所に AP を幹線に接続する有線 LAN ケーブルを敷設できない場合に、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も有用な知見となる。

本稿では、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 AP(シスコシステムズ社製の CAP3702I)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（CL 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する検討を述べる。

第 2 章では、実験場所の環境と実験方法について述べる。第 3 章では、実験データを使って、AP 間に見通しがある(LOS)状況における電波伝搬損失距離特性の推定式を導出し、考察する。第 4 章では、実験データを使って、AP 間に見通しがない(NLOS)状況における電波伝搬損失距離特性の推定式を導出し、考察する。

2. 実験の内容

2.1. 実験目的

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（CL 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。図 1 に、本実験場所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、本実験場所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、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[11]。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。

2.3. 実験方法

(1) 実験システムの構成

図1に示された21個のAP(シスコシステムズ社製のCAP3702I)は、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。

RRMの動作の基本として[5]、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は、運用管理表示装置から測定できる。

(2) 測定諸元

表1に実験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

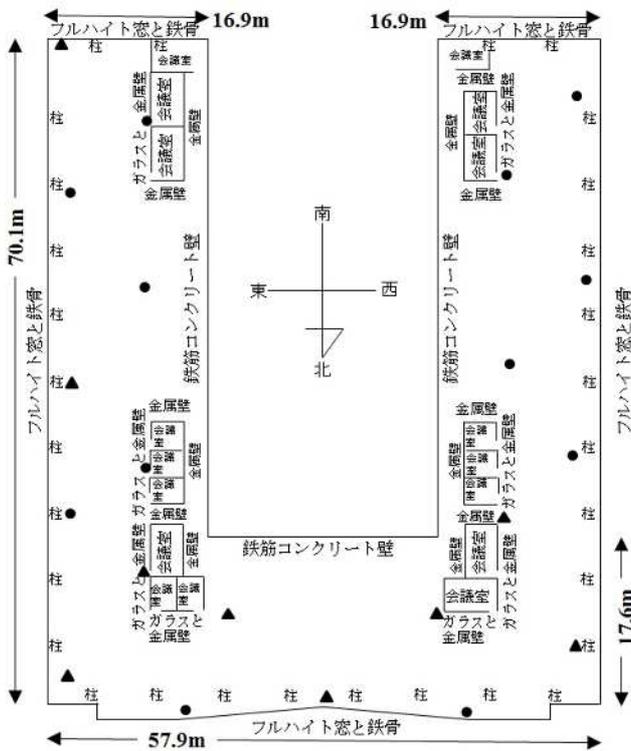


図1 実験場所の環境(フロアの平面概要図)

- : 送信用 AP
- ▲ : 送信用かつ受信電力測定用 AP

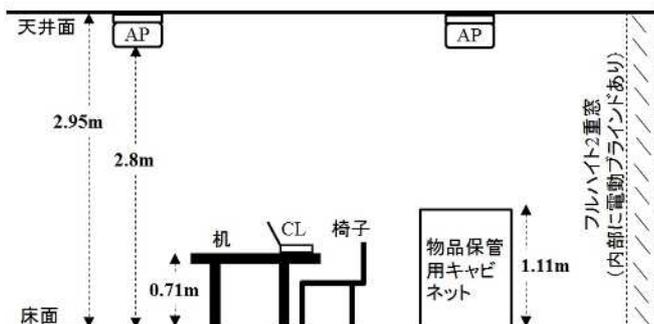


図2 実験場所の環境(フロアの立面概要図)

●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)
運用管理表示装置	Prime Infrastructure(シスコシステムズ社製、Ver.2.1.1)
●AP送信部(2.4GHz帯)	
送信電力	16dBm
アンテナ数	4
●AP受信部(2.4GHz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(2.4GHz帯)	
アンテナ利得(水平の他AP方向)	-0.2dBi
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	3波
●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

表1 実験での測定諸元

体内にアンテナを内蔵したタイプである。

本実験の視点は各 AP 間の電波伝搬状況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[12]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[13]。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 21 個の AP は、すべてネイバーメッセージの電波を送信しているが、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。東側の南北方向のエリアと東西方向のエリア間によって、及び、西側の南北方向のエリアと東西方向のエリア間によって、AP 間に見通しがない(NLOS)状況も測定している。

(4) 各 AP 間の電波伝搬による受信電力の測定手順

2.4GHz 帯と 5GHz 帯の各々において、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)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ネル番号を記録する。

(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 9 個すべての 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。

3. AP 間に見通しがある(LOS)状況における電波伝搬損失距離特性の推定式の導出

3.1. 屋内の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 における屋内の伝搬損失距離特性 $L_{total}(dB)$ の推定式[8],[9]は、本実験環境のように床・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 1) 2450MHz で、事務所環境では、 $N = 30$

(例 2) 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。

本実験において、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。

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

3.2. 実験データと測定諸元から計算した屋内の伝搬損失の距離に対する減衰係数 N と定数 C

図 3 には、2.4GHz 帯で送受信する AP 間に見通しがある(LOS)状況において測定された実験データ(データ数は 54)と測定諸元から計算した式(4)の右辺の値(伝搬損失の距離項の値)を、横軸に送受信の AP 間

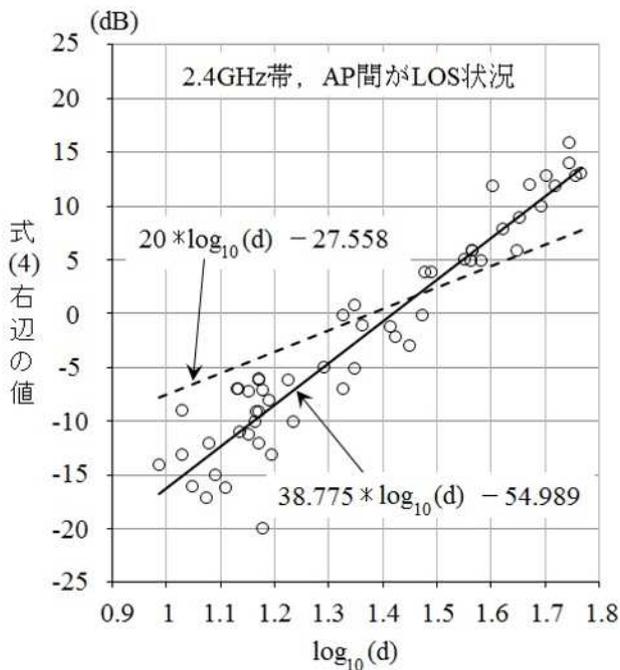


図3 伝搬損失の距離項の測定値（○印，データ数 54，式(4)右辺の値）と近似線（実線），及び，自由空間伝搬損失の距離項の値（破線）

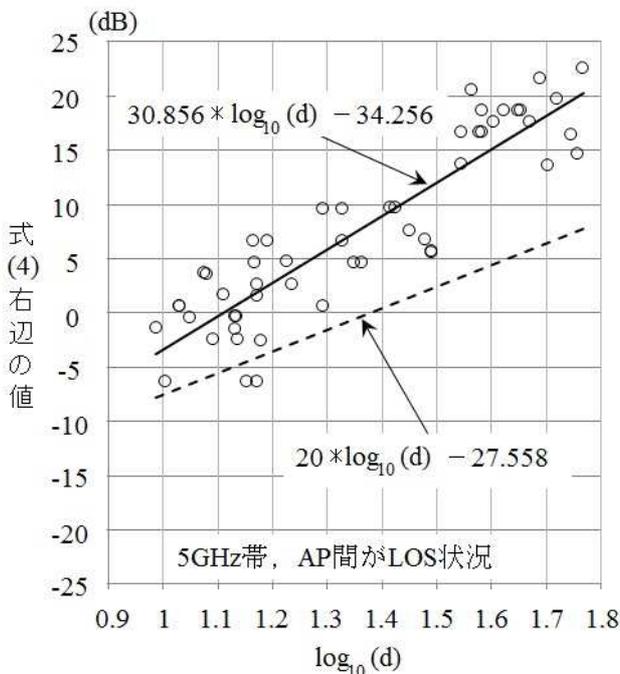


図4 伝搬損失の距離項の測定値（○印，データ数 52，式(4)右辺の値）と近似線（実線），及び，自由空間伝搬損失の距離項の値（破線）

距離 $d(m)$ を 10 を底とする対数として，印で表示した．この表示結果を一次式で近似（回帰）すると(図3の実線)， $N=38.775$ ，及び $C=-54.989$ となった．また，決定係数[14]は 0.9104 となったので，伝搬損失の距離項の値の変動の 91%は，近似（回帰）された一次式によって説明される．なお，図3の破線は，自由空間伝搬損失の距離項の値である．

図4には，5GHz帯で送受信するAP間に見通しがある（LOS）状況において測定された実験データ（データ数は 52）と測定諸元から計算した式(4)の右辺の値（伝搬損失の距離項の値）を，横軸に送受信のAP間距離 $d(m)$ を 10 を底とする対数として，印で表示した．この表示結果を一次式で近似（回帰）すると(図4の実線)， $N=30.856$ ，及び $C=-34.256$ となった．また，決定係数は 0.8108 となったので，伝搬損失の距離項の値の変動の 81%は，近似（回帰）された一次式によって説明される．なお，図4の破線は，自由空間伝搬損失の距離項の値である．

3.3. 考察

(1) 図3と4からは，近似（回帰）された一次式は，伝搬損失の距離項の値を適切に推定すると理解できる．

近似（回帰）された係数と定数の桁数を勧告 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（LOS 状況）における電波伝搬損失距離特性 $L_{total}(dB)$ の推定式（実験式）は，次のように表される．

2.4GHz帯の場合，

$$L_{total} = 20\log_{10} f + 39\log_{10} d - 55 \quad (5)$$

5GHz帯の場合，

$$L_{total} = 20\log_{10} f + 31\log_{10} d - 34 \quad (6)$$

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

$$9.7m \leq d \leq 58.5m$$

f : 送受信周波数(MHz)

(2) 送受信点間距離に対する減衰係数は，5GHz帯の場合に比べて 2.4GHz帯の場合が大きいことが判明したが，これは 2.4GHz帯の波長（約 12cm）が 5GHz帯の波長（約 6cm）より長いので，APを天井面に設置した場合には，天井面による第1フレネルゾーンの遮

蔽の影響が 2.4GHz 帯のほうが顕著になり得るからと推測する。

(3) 本実験式である式(5)と(6)は、式(1)と比較すると、定数項の大きさの違いにより、同周波数と同距離の場合、電波伝搬損失は式(5)と(6)のほうが小さくなる傾向である。この傾向は、式(1)は概ねの LOS 状況における AP と CL 間の電波伝搬損失を表しているが、一方、式(5)と(6)は、LOS 状況が明確である AP 間の電波伝搬損失を表しているからと推測する。

(4) 5GHz 帯の場合、本実験式である式(6)と、式(1)を比較すると、送受信点間距離に対する減衰係数は、同じ 31 となった。5GHz 帯の波長(約 6cm)程度の長さになると、AP を天井面に設置した場合でも、天井面による第 1 フレネルゾーンの遮蔽の影響は小さい可能性があるかと理解した。

(5) 2.4GHz 帯の場合、図 3 に示された実験による測定データと自由空間伝搬損失の距離項の値の状況からは $\log_{10} d \approx 1.45$ 、即ち $d \approx 28m$ を境に、例えば反射波の影響が異なっている可能性もあるかもしれない。

(6) 2.3 節(2)項で述べたように、本実験で利用している AP(シスコシステムズ社製の CAP3702I)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。文献[10]における実験では、LOS 状況の同じ測定経路であっても、CL が送信する電波を AP において 1 本アンテナで受信した場合と、4 本アンテナによる最大比合成ダイバーシチで受信した場合で、送受信点間距離に対する減衰係数が異なることを、しばしば測定していた。AP 間の電波伝搬環境である本実験では、AP が 1 本アンテナで受信する機会はないので文献[10]と同様の傾向になるか否かは不明である。

4. AP 間に見通しがない(NLOS)状況における電波伝搬損失距離特性の推定式の導出

4.1. 屋内の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

AP 間に見通しがない(NLOS)状況における電波伝搬損失距離特性を検討するために、AP 間の送受信点間距離の表現を次に示す 3 つのモデルで定義し、実験データに最も適合するモデルを見極める。

(1) モデル 1

図 5 に示すように、AP 間の送受信点間距離は、AP 間を直接に結ぶ線分の長さ d_{direct} として定義する。伝搬損失の距離に対する減衰係数 N を N_1 と表記すると、

$$\text{式(4)の左辺} = N_1 \log_{10} d_{direct} + C \quad (7)$$

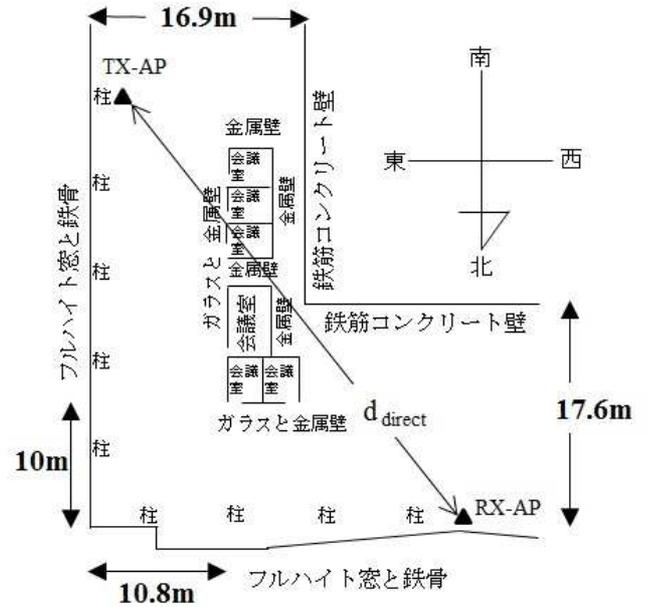


図 5 AP 間に見通しがない(NLOS)状況におけるモデル 1 の平面概要図、AP 間の送受信点間距離は AP 間を直接に結ぶ線分の長さ d_{direct} として定義する。

となる。

なお、図 5 は実験環境の北東側の AP 間に見通しがない(NLOS)状況を示しているが、図 1 によると実験環境の北西側の AP 間に見通しがない(NLOS)状況も図 5 と同様であり、式(7)が適用される。端的には本モデル 1 は、AP 間に見通しがない(NLOS)状況が、実験環境の北東側、または、北西側に 1 度だけ発生する場合である。

(2) モデル 2

図 6 に示すように、AP 間に見通しをさえぎる境界点を 1 地点定める。本実験環境では、図 6 の場合には、東側の南北方向のエリアと、東西方向のエリアが、合流する北東側の会議室の角を、境界点として定めた。

各 AP 間の送受信点間距離は、送信用 AP (TX-AP) と境界点間を結ぶ線分の長さ d_{LOS} の区間と、境界点と受信 AP (RX-AP) 間を結ぶ線分の長さ d_{NLOS} の区間の、2 つの区間で定義し、送受信点間距離に対する減衰係数も d_{LOS} の区間と、 d_{NLOS} の区間で、分離する。伝搬損失の距離に対する減衰係数 N を N_1 及び N_2 と表記すると、

$$\text{式(4)の左辺} = N_1 \log_{10} d_{LOS} + N_2 \log_{10} d_{NLOS} + C \quad (8)$$

となる。

なお、図6は実験環境の北東側のAP間に見通しが
ない(NLOS)状況を示しているが、図1によると実験環
境の北西側のAP間に見通しが
ない(NLOS)状況も図6
と同様であり、式(8)が適用される。即ち、西側の南北
方向のエリアと、東西方向のエリアが、合流する北西
側の会議室の角を、境界点として定めるので、式(8)
が適用される。本モデル2においても、AP間に見通し
がない(NLOS)状況は、実験環境の北東側、または、北
西側に1度だけ発生する場合である。

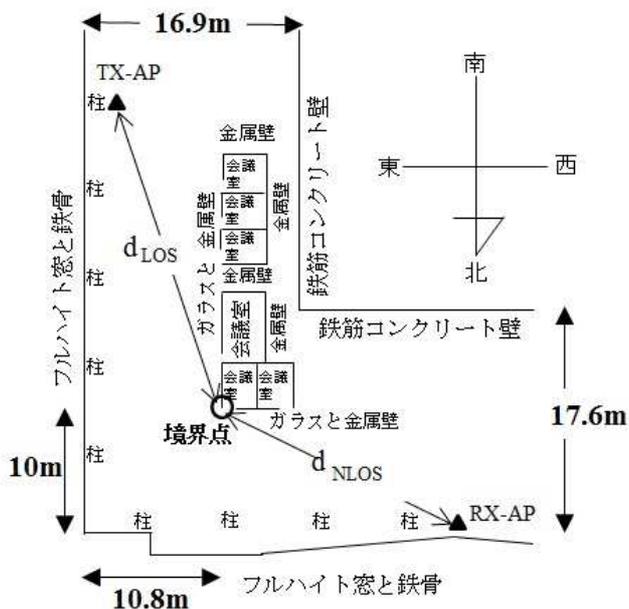


図6 AP間に見通しが
ない(NLOS)状況にお
けるモデル2と3の平
面概要図、AP間の送
受信点間距離は境界
点を挟み2つの区
間
 d_{LOS} と d_{NLOS}
で定義する。

(3) モデル3

モデル3はモデル2と同じ状況を想定するが、モデ
ル2との違いは、モデル3におけるAP間の送受信点
間距離は、送信用AP(TX-AP)と境界点間を結ぶ線分
の長さ d_{LOS} と、境界点と受信用AP(RX-AP)間を結
ぶ線分の長さ d_{NLOS} の和として定義していること
である。伝搬損失の距離に対する減衰係数NをN1と表
記すると、

$$\text{式(4)の左辺} = N1 \log_{10}(d_{LOS} + d_{NLOS}) + C \quad (9)$$

となる。

なお、本モデル3においても、AP間に見通しが
ない(NLOS)状況は、実験環境の北東側、または、北
西側に1度だけ発生する場合である。

4.2. 実験データと測定諸元から計算した屋内の伝 搬損失の距離に対する減衰係数Nと定数C

式(4)と、式(7)から(9)に2.4GHz帯と5GHz帯にお
いてAP間に見通しが
ない(NLOS)状況で測定された実
験データと測定諸元をあてはめて、モデル1から3の
伝搬損失の距離に対する減衰係数Nと定数Cの値を計
算した。モデル1とモデル3は単回帰分析(説明変数
が1つ)の計算となり、モデル2は重回帰分析(説明
変数が2つ)の計算となるので、各モデルの伝搬損失
の距離に対する減衰係数Nは、説明変数についての回
帰係数になる。

表2に2.4GHz帯の回帰分析結果を、表3に5GHz
帯の回帰分析結果を示す。最適なモデルの選択につ
いては4.3節で考察する。

4.3. 考察

4.3.1. 2.4GHz帯の場合

(1) 表2の決定係数からは、モデル3が最も良いモ

モデル 番号	説明変数1	説明変数2	回帰係数N1 for説明変数1	回帰係数N2 for説明変数2	定数(dB)	決定 係数	デー タ 数	AIC
1	$\log_{10} d_{direct}$	なし	44.605	なし	-53.446	0.854	71	410.082
2	$\log_{10} d_{LOS}$	$\log_{10} d_{NLOS}$	23.117	18.757	-37.183	0.876	71	400.788
3	$\log_{10}(d_{LOS} + d_{NLOS})$	なし	45.116	なし	-57.415	0.902	71	382.104

表2 回帰分析の結果、NLOS状況における2.4GHz帯のAP間電波伝搬損失の距離項

モデル 番号	説明変数1	説明変数2	回帰係数N1 for説明変数1	回帰係数N2 for説明変数2	定数(dB)	決定 係数	デー タ 数	AIC
1	$\log_{10} d_{direct}$	なし	32.547	なし	-27.122	0.772	44	243.839
2	$\log_{10} d_{LOS}$	$\log_{10} d_{NLOS}$	17.746	16.759	-19.013	0.737	44	252.104
3	$\log_{10}(d_{LOS} + d_{NLOS})$	なし	34.752	なし	-32.205	0.795	44	239.230

表3 回帰分析の結果、NLOS状況における5GHz帯のAP間電波伝搬損失の距離項

デルであると理解できるが、モデル選択の妥当性を高めるために、AIC (Akaike Information Criterion, 赤池情報量基準) も検討してみる。AIC は、データへのモデルのあてはまりの悪さの比較のための指標であり、同一のデータについて AIC が大きいほど悪いモデルであるとされる [15]。簡単すぎることもなく複雑すぎることもない「適切な複雑さのモデル」を選ぶための合理的な手法が AIC である [16]。

回帰分析における AIC は、次のように定義される [17]。

$$AIC = n \left\{ \log_e \left(2\pi \frac{Q}{n} \right) + 1 \right\} + 2(p + 2) \quad (10)$$

ここで、

n : データ数

Q : 残差平方和

p : 説明変数の数

表 2 には本実験データによる各モデルの AIC も示したが、AIC が最も小さいモデル、即ち、最も良いモデルは、モデル 3 となった。また、2 番目に良いのはモデル 2、最も悪いのはモデル 1 と理解できる。AIC はその値そのものでなく、AIC の値の差に意味があるので [17]、表 2 から、2.4GHz 帯の場合には、モデル 3 を採用する。

AP 間に見通しが無い(NLOS)状況における電波伝搬損失距離特性には、モデル 3 が最も適しているということは、本実験環境では、東側の南北方向のエリアと東西方向のエリアは、独立した電波伝搬特性を持つのではなく、2 つのエリアは一体化した電波伝搬特性を持つとして捉えたほうが良いということを示唆する。本実験環境は、図 1 からはフロアの外側の周囲がフルハイト窓であり開放的な電波伝搬環境であることがわかり、また図 2 と 6 からは、AP 間の見通しをさえぎる境界点付近のエリアは、2.4GHz 帯の波長としては 80 波長以上の幅と、15 波長以上の高さをもった空間であることもわかる。これら本実験環境の特徴は、上記の示唆を肯定するものとなる。なお、西側の南北方向のエリアと東西方向のエリアの関係も同様と考えられる。

図 7 には、2.4GHz 帯の場合の最良のモデル 3 における AP 間の測定された実験データ(データ数は 71)と測定諸元から計算した式(4)の右辺の値(伝搬損失の距離項の値)を、横軸に送受信の AP 間距離

$d_{LOS} + d_{NLOS} (m)$ を 10 を底とする対数として、

印で表示した。実線はモデル 3 の近似(回帰)式である

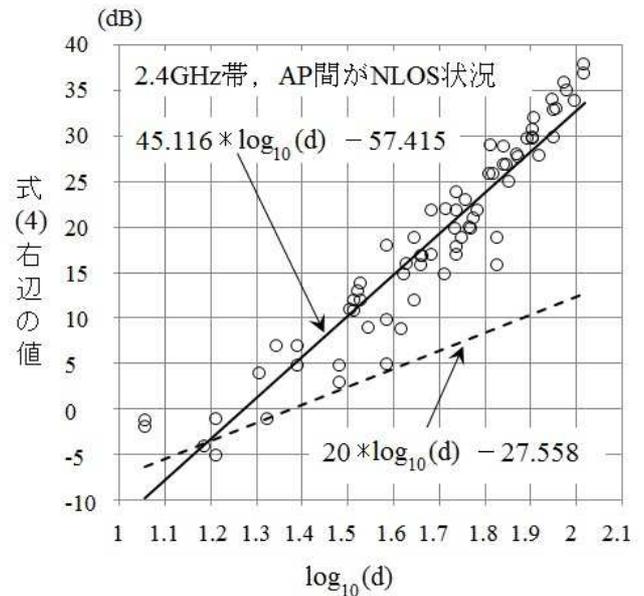


図 7 伝搬損失の距離項の測定値(○印, データ数 71, 式(4)右辺の値)と最良のモデル 3 の近似線(実線), 及び, 自由空間伝搬損失の距離項の値(破線). $d = d_{LOS} + d_{NLOS} (m)$

($N1=45.116$, 及び $C=-57.415$). なお, 図 7 の破線は, 自由空間伝搬損失の距離項の値である。

(2) 回帰された係数と定数の桁数を勧告 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 間に見通しが無い(NLOS)状況における電波伝搬損失距離特性 $L_{total} (dB)$ の推定式(実験式)は、次のように表される。

2.4GHz 帯の場合、

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + 45 \log_{10} (d_{LOS} + d_{NLOS}) - 57 \quad (11)$$

ここで、

d_{LOS} と d_{NLOS} : 図 6 に示すとおり。

但し、実験データの範囲から、

$$11.4m \leq (d_{LOS} + d_{NLOS}) \leq 104.1m$$

f : 送受信周波数(MHz)

なお、式(11)を AP 間に見通しがある(LOS)状況の式(5)と比較すると、送受信点間距離に対する減衰係数は式(11)のほうが大きい。これは、式(11)は AP 間に見通しが無い(NLOS)状況を表現しているため、妥当であると考えられる。

4.3.2. 5GHz 帯の場合

(1) 表 3 から AIC が最小はモデル 3 であるのでモデル 3 が最も良いモデルとなり、5GHz 帯の場合も、モデル 3 を採用する。なお、決定係数からもモデル 3 が最も良いモデルになると理解できる。それゆえ、2.4GHz 帯の場合と同様に、5GHz 帯の場合も、東側の南北方向のエリアと東西方向のエリアは、独立した電波伝搬特性を持つのではなく、2 つのエリアは一体化した電波伝搬特性を持つとして捉えたほうが良いということが示唆される。なお、西側の南北方向のエリアと東西方向のエリアの関係も同様と考えられる。

図 8 には、5GHz 帯の場合の最良のモデル 3 における AP 間の測定された実験データ(データ数は 44)と測定諸元から計算した式(4)の右辺の値(伝搬損失の距離項の値)を、横軸に送受信の AP 間距離

$$d_{LOS} + d_{NLOS} (m) \text{ を } 10 \text{ を底とする対数として、}$$

印で表示した。実線はモデル 3 の回帰式である (N1=34.752, 及び C=-32.205)。なお、図 8 の破線は、自由空間伝搬損失の距離項の値である。

(2) 回帰された係数と定数の桁数を勧告 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 間に見通しが無い(NLOS)状況における電波伝搬損失距離特性 $L_{total} (dB)$ の推定式(実験式)は、次のように表される。

5GHz 帯の場合、

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + 35 \log_{10} (d_{LOS} + d_{NLOS}) - 32 \quad (12)$$

ここで、

d_{LOS} と d_{NLOS} : 図 6 に示すとおり。

但し、実験データの範囲から、

$$11.4m \leq (d_{LOS} + d_{NLOS}) \leq 80.2m$$

f : 送受信周波数(MHz)

なお、式(12)を AP 間に見通しがある(LOS)状況の式(6)と比較すると、送受信点間距離に対する減衰係数は式(12)のほうが大きい。2.4GHz 帯の場合と同様に、5GHz 帯の場合も、これは、式(12)は AP 間に見通しが無い(NLOS)状況を表現しているため、妥当であると考えられる。

5. まとめ

屋内事務所環境で日常的に運用している無線 LAN

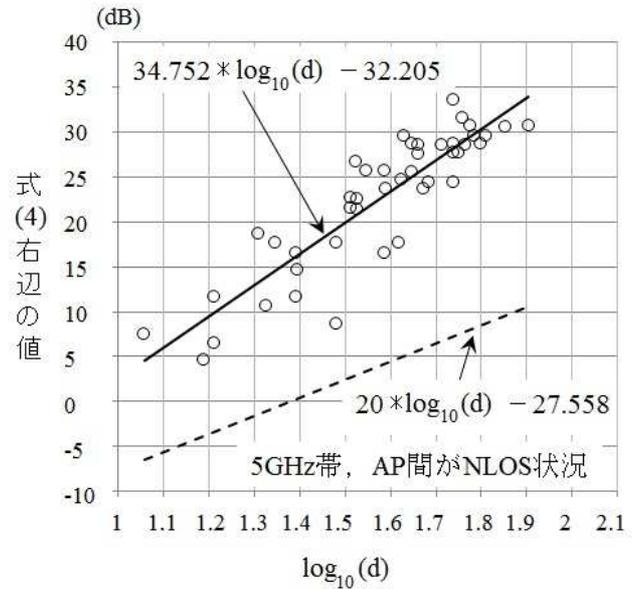


図 8 伝搬損失の距離項の測定値(○印, データ数 44, 式(4)右辺の値)と最良のモデル 3 の近似線(実線), 及び, 自由空間伝搬損失の距離項の値(破線). $d = d_{LOS} + d_{NLOS} (m)$

の複数の AP 間で受信された受信電力データ(4 本アンテナによる最大比合成ダイバーシチで受信)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 (CL 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。

(1) 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 間における電波伝搬損失距離特性の推定式は、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。

(2) 従って、本実験により導出された推定式は、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る。

(3) AP 間に見通しが無い(NLOS)状況において、AP 間の送受信点間距離を 3 つのモデルで表現したが、実験データから最良のモデルを選択するには、AIC (Akaike Information Criterion, 赤池情報量基準) の利用が有用であった。

(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である。

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プラットフォーム部プラットフォームチーム(当時)の大井社員, 永谷エキスパート, 古森エキスパート, 谷口リーダーに感謝する。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の篠浦執行役員, 飯田第 1 応用技術部長, 大高スイッチワイヤレスチームマネージャーに感謝する。

文 献

- [1] 谷口勇, "「経営課題を解決する働き方革命」～失敗談から成功談まですべて語ります!", ワークスタイル変革シンポジウム 2014 in 大阪, 日経情報ストラテジー, <http://ac.nikkeibp.co.jp/nis/wso2014/>, http://special.nikkeibp.co.jp/as/201407/ws2014_netone/#ttl1, 日経 BP 社, 2014 年 11 月 20 日.
- [2] 玄忠雄, "特集 "節約" 上手で勝つ先行企業のコツ [通信機器]投資増の無線 LAN とルーター、価格など訴求で新勢力が台頭", 日経コミュニケーション 2014 年 10 月号, pp.29-30, 日経 BP 社, 2014 年 10 月 1 日.
- [3] 丸田竜一, "第 1 回 無線 LAN を介して VDI を利用するとき意識する特徴と課題", ネットワークシステムズ, http://www.netone.co.jp/report/column/20150521_3.html, 2015 年 5 月 21 日.
- [4] 田中政満, "特集 1 機器の役割がわかるネットワーク図鑑 アクセスポイント & コントローラー", 日経ネットワーク 2015 年 3 月号, pp.28-29, 日経 BP 社, 2015 年 2 月 28 日.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 井上保彦, "高密度環境での無線 LAN の性能改善めざし本格的な規格化に踏み出した 802.11ax", 第 41 回ワイヤレス技術セミナー IEEE802 ワイヤレス標準化最新動向, リックテレコム, 2014 年 10 月 23 日.
- [8] Rec. ITU-R P.1238-7: "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz", ITU-R Recommendations P Series, <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-7-201202-I/en>, 2012.
- [9] 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.
- [10] 松戸孝, 宇都宮光之, 田中政満, 中野清隆, 力石靖, 山下聖太郎, 丸田竜一, "屋内電波伝搬推定法に最大比合成 (MRC) ダイバーシチ受信の効果を検討するための実験的検討 ~ 勧告 ITU-R P.1238 と無線 LAN アクセスポイント CAP3602E (シスコシステムズ社製) の MRC ダイバーシチ受信の接点を探る ~", <http://ursi-f.nict.go.jp/annai575.html>, 第 575 回 URSI-F 会合, 2013 年 6 月 27 日.
- [11] 櫻井句子, "建築画報モノグラフ JP タワー", 建築画報, 第 49 巻, 2 号, 通号 354 号, 建築画報社, 2013 年 4 月 18 日.
- [12] 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_370cc0AP.html#4877.
- [13] 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) ダイバーシ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, ネットワークシステムズ, <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>.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.