

IEEE802.11n 無線 LAN による RSSI と 平均 throughput の関係

長谷川 公嗣^{†1} 武野 紘 和^{†1}
中津 悠斗^{†1} 大宮 学^{‡2}

最近、無線 LAN システムとして高出力かつ高速データ伝送を実現する IEEE802.11n 規格に準拠した機器が流通している。この装置をアクセスポイントとして利用することで、屋内での同一フロア部屋間あるいは複数階での大容量情報伝送が可能である。本論文では、市販の 2.4 GHz 帯無線 LAN システムを利用して、屋内伝搬特性測定を行い、受信電界強度 (RSSI) と平均スループットの関係を明らかにする。小規模および大規模オフィス環境、戸建住宅での測定と考察から、これら 2 つの特性には線形の関係があり、測定環境によらず同一の直線で近似できることを示す。このことは、市販製品が MIMO 特性を実現していないことを意味し、動作周波数が 2.4 GHz 帯であることおよび小型無線子機の構造上の制約が原因と考えられる。この場合、導出した関係式を利用することで、RSSI 値からスループット値を推定できる。RSSI はスループットに比較して測定が容易で、数値シミュレーションでの評価にも適している。そこで、FDTD 法により RSSI 分布を求め、その結果と測定結果を比較検討し、両者がよく一致することを確認した。以上のことから、数値解析で得られた RSSI 分布と実験から導出した RSSI とスループットの関係を表す近似直線を組み合わせることで、任意の場所でのスループット値を推定することができる。したがって、導出した結論はアクセスポイントの設置位置や設置台数を見積もる際の有効な設計手法となる。

Relations of RSSI and Average Throughput of IEEE802.11n Wireless LAN System

TOMOTSUGU HASEGAWA,^{†1} HIROKAZU TAKENO,^{†1}
YUTO NAKATSU^{†1} and MANABU OMIYA^{‡2}

Recently, a high-power and high-speed wireless LAN router based on IEEE802.11n standard with a data transmission rate of 300 Mbps has been developed. Using this equipment as an access point makes it possible to build easily wireless networks including a few floors in the adjacent as well as several

rooms in the same floor. This paper discusses indoor propagation characteristics of a commercial wireless LAN system operating in the 2.4 GHz band and derives the relationship between received signal strength indication (RSSI) and average throughput based on the measured and calculated indoor propagation characteristics in several radio environments. As a result, we obtain a linear relationship between them. It means that the device does not give sufficient MIMO characteristics because of the operating frequency band and the structural constraints of compact wireless handset. However the derived formula predicts values of data throughput in arbitrary places from the RSSI distributions simulated numerically. The manner combining the approximate equation with the numerical simulation is useful to design the number of access points as well as their locations required to build a wireless network.

1. はじめに

無線 LAN (Local Area Network) の規格である IEEE802.11n が 2009 年 9 月に正式に策定され¹⁾、その規格に準拠した 2.4 GHz/5 GHz 帯無線 LAN 製品が安価に入手できるようになった。IEEE802.11n の規格策定にともなって、高速かつ高出力のアクセスポイント (AP : Access Point) を利用でき、1 台の AP でオフィスビルなどの同一フロア内あるいは複数階での利用、戸建住宅全体を通信エリアとすることが現実となった^{2),3)}。

わが国においては、電波産業会 (ARIB) が電波規格を制定しており、ARIB STD-T66 が第二世代小電力データ信号システム/ワイヤレス LAN システムに関する 2.4 GHz 帯電波規格である²⁾。それによると、周波数範囲 2,400 MHz から 2,483.5 MHz、チャンネルごとの帯域幅 5 MHz、アンテナ出力電力 10 mW/MHz 以下と規定されている。IEEE802.11n では、帯域幅 40 MHz を利用して最大通信速度 300 Mbps を実現する。したがって、大容量の動画など情報伝送への適用が考えられる。ただし、屋内環境での電波伝搬においては、壁面、床、天井および什器などからのさまざまな反射波や回折波を考慮しなければならない。また、見通し外環境においては十分な通信速度を確保できるかが問題となる。このような場合、遮蔽物あるいは建物構造物などを考慮した実際の通信環境での通信速度を調査することが必要である。事前に通信環境と通信速度の関係を把握しておくことは、AP 設置台数や設

^{†1} 北海道大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information, Science and Technology, Hokkaido University

^{‡2} 北海道大学情報基盤センター

Information Initiative Center, Hokkaido University

置場所など決定のための有効な資料となりうる。このようなことから、参考文献 4), 5) においては主に同一フロア内あるいは室内見通し内における IEEE802.11b/g/a 規格に基づく無線 LAN システムの屋内伝搬特性および伝送容量に関する実験的検討結果の報告あるいは解析手法の有効性に関する報告が行われている。これらの無線 LAN 規格では受信電界強度とスループットがほぼ比例関係であることが分かっており、屋内での電界強度を実験あるいは数値計算により求めることでスループットを推定することが可能である。

一方、IEEE802.11n 規格では最新の通信方式である OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式を MIMO (Multi Input Multi Output) に拡張した MIMO-OFDM が採用され、複数のマルチパス伝送路を利用することでデータスループットの向上を図っている^{6)~8)}。さらに、高出力化が実現されたことにより、室内見通し内伝搬⁶⁾に加えて、戸建住宅全体を対象とした屋内伝搬特性の実験的検討結果が報告されている^{7),8)}。これらの報告では、高いスループットを得るために、MIMO アルゴリズムの提案、周波数 5 GHz 帯、半波長間隔に配置した 4 素子アレーアンテナを使用した 4 × 4 MIMO OFDM による大規模な測定を行っている。すなわち、実験室レベルでの研究では、可能な限り優れた特性を実現するための努力が行われている。しかし、一般ユーザが入手可能な市販の無線 LAN システムは、製造コスト、デザイン性および伝送特性のバランスに配慮した設計が行われることから、それらシステムが参考文献で報告されているような特性を有しているかどうかは明らかになっていない。さらに、実験対象は室内見通し内環境、同一フロアあるいは戸建住宅など特定の利用環境における検討にとどまっており、同一無線 LAN システムをさまざまな利用環境に適応したときの比較検討の例はない。

本論文においては、市販され一般に入手可能な IEEE802.11n 規格 2.4 GHz 帯無線 LAN システムを利用し、複数階にわたる小規模オフィス環境、大規模オフィス環境および木造 2 階建戸建住宅における伝搬特性の評価を行う。はじめに、受信電界強度 (RSSI: Received Signal Strength Indication) および平均スループットの測定を行い、RSSI とスループットの間になり立つ関係式を導出する。さらに、この関係式は利用環境によらずほぼ同一の式となり、この式を利用することで RSSI からスループットを推定することが可能であることを示す。MIMO-OFDM 方式の伝搬特性評価は複雑であることから^{9),10)}、利用環境によらず特定の式を利用して RSSI からスループットを推定できるのであれば、それは実用的な方法であるといえる。さらに、RSSI の測定はスループットの測定に対して比較的容易であることから、本手法は有効であるといえる。次に、時間領域差分 (FDTD: Finite Difference Time Domain) 法¹¹⁾に基づく電磁界シミュレーションにより RSSI 分布の評価を行い、実

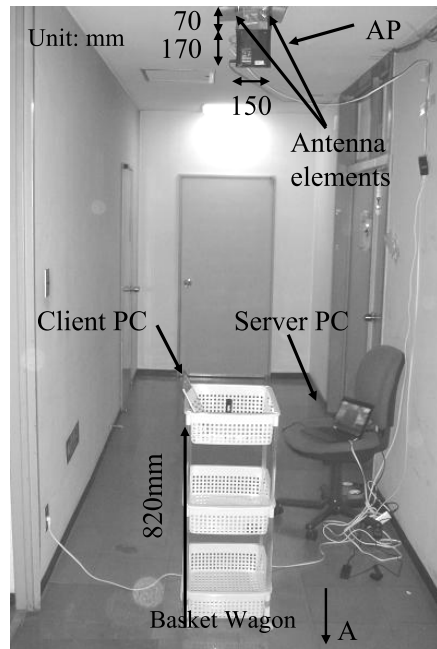
験結果と比較検討を行う。これらの比較検討から、シミュレーション結果は実験結果をよく推定し、シミュレーションで実験を置き換えることが可能であることを示す。

本論文は 4 章で構成されている。2 章において、使用する無線 LAN システムおよび特性評価のための測定方法について詳細に述べる。3 章において、複数のオフィス環境および戸建住宅環境における無線 LAN システムの伝搬特性および RSSI とスループットの関係性を測定により求め、その関係を表す近似式を導出する。導出されたこれらの近似式が、検討を行ったすべての環境に適用できることを示す。さらに、FDTD 法に基づく電磁界解析を行い、RSSI に関する数値解析結果と測定結果を比較検討することで、解析結果の有効性と実験結果の妥当性について議論する。これらの検討から、数値シミュレーションによって得られる RSSI 分布と測定で明らかにした RSSI とスループットの近似式を組み合わせることで、任意の場所におけるスループットを推定することが可能になり、無線ネットワーク設計のためのデータあるいは手法として有効であることを示す。最後に、4 章で結論を述べる。

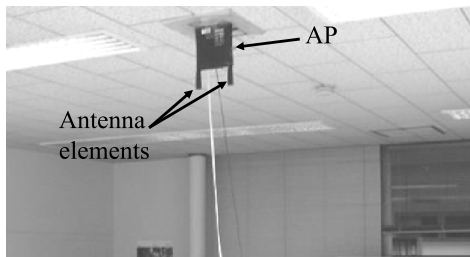
2. 無線 LAN システムと測定方法

図 1 に代表的な測定方法を示す。AP はバッファロ社製 WZR-HP-G300NH を使用する¹²⁾。この装置は 2.4 GHz 帯 IEEE802.11n 規格に準拠し、3 × 3 MIMO-OFDM 方式および 40 MHz 倍速モードで 300 Mbps の最大通信速度を達成する。また、通信環境に適応して通信速度を 300 Mbps から 6 Mbps まで自動的に変更する機能を有している。測定では、中心チャネル 7 (キャリア周波数 2,442 MHz) を設定し、チャネル 5 から 13 の間 40 MHz の帯域を使用する。AP の寸法は筐体が 170 mm × 150 mm × 20 mm で、その筐体に長さ 70 mm の外部アンテナ素子が 2 本取り付けられている。アンテナ素子はプリント基板で作成された長さ 30 mm のスリブアンテナであり、筐体内の内蔵 1 本を含めた 3 本のアンテナで同時に電波を送信する。同図 (a) および (b) に示すように、AP は屋内天井付近に設置し、つねにアンテナ素子方向が天井に対して垂直になるようにした。同図 (a) および (b) は、それぞれアンテナ素子が AP 筐体に対して上向きまたは下向きの場合であり、その固定方法を示している。

測定においては、ノート型パーソナルコンピュータ (PC) を 2 台使用した。AP に 1000Base-T で有線接続するサーバ用ノート PC は SONY 社製 VAIO VPCX11AVJ で、プロセッサは Intel Atom Z540 (1.86 GHz)、主記憶容量 2 GB、OS は Microsoft Windows XP Professional SP3 である。一方、IEEE802.11n により無線接続するクライアント用ノート PC は Panasonic 社製 Let's Note CF-T5 で、プロセッサは Intel Core Duo U2400 (1.06 GHz)、



(a)



(b)

図 1 測定装置のセットアップ。(a) AP を廊下天井に設置した場合、(b) AP を室内に設置した場合

Fig. 1 A setup of experimental equipments. AP attached under the roof in the path (a) and AP in the room (b).

主記憶容量 1.5 GB, OS は Microsoft Windows Vista Ultimate SP2 である。クライアント PC には USB2.0 インタフェースを介してバッファロ社製無線 LAN 子機 WLI-UC-G300HP を接続した。この子機は 2 本の平面型スリーブアンテナ素子で構成され、それらの素子の間隔は 16 mm, 中心周波数に対して 0.13 波長である。クライアント PC を図 1 (a) に示すキャスタ付きプラスチックワゴンに搭載し、測定者の影響が無視できる環境での測定を行った。RSSI 測定には、オープンソース WiFi ツール inSSIDer バージョン 1.2.8 を使用した。また、ネットワーク・スループット測定ソフトウェア Iperf バージョン 2.0.4 を使用し、TCP (Window Size 64 kB) で 10 秒間転送したときの平均スループットを測定した。ただし、スループットの測定は複数回行い、それらの測定結果の平均値としてスループットを求めた。ただし、測定されたスループットはほぼ同一の値であった。

3. 実験およびシミュレーション

複数階にわたる小規模オフィス環境, 大規模オフィス環境および木造 2 階建戸建住宅における伝搬特性の測定およびシミュレーションによる評価を行い, RSSI とスループットの関係性を明らかにする。

3.1 オフィス環境

図 2 に測定サイトの平面図を示す。測定場所は、北海道大学情報基盤センター北館 2 階から 4 階にわたる連続した 3 つのフロアである。各階中央にエレベータ、パイプスペースおよび基本設備がある。それらを囲むように廊下などの共用スペースがあり、さらに会議室、研究室および職員居室が周囲を囲んでいる。3 階以上の 1 フロアあたりの面積は約 675 m² である。測定では、複数階にわたるデータを取得するために廊下などの共用スペースを測定対象とした。また、近年では室内に限らず無線機能付き携帯型情報端末などの利用も可能になっており、それらを室外で利用することを想定している。

図 1 (a) に示すように、AP を 3 階廊下天井に設置した場合を AP1 とする。このとき、各階廊下における RSSI と平均スループットの関係を図 3 に示す。同図は、横軸が平均スループット、縦軸が RSSI である。測定は、2 階 B から H までの 7 点、3 階 A から H までの 8 点および 4 階 A から H までの 8 点の合計 23 点において行った。同図から、RSSI と平均スループットの関係は直線で近似されることが分かる。その関係式は次式で与えられる。

$$y = 1.0x - 83.9 \quad (1)$$

ただし、 y は RSSI (dBm), x は平均スループット (Mbps) である。このスループット値が 0 以上であれば通信が可能であり、式 (1) 右辺定数項は受信感度レベルを表す。測定結果

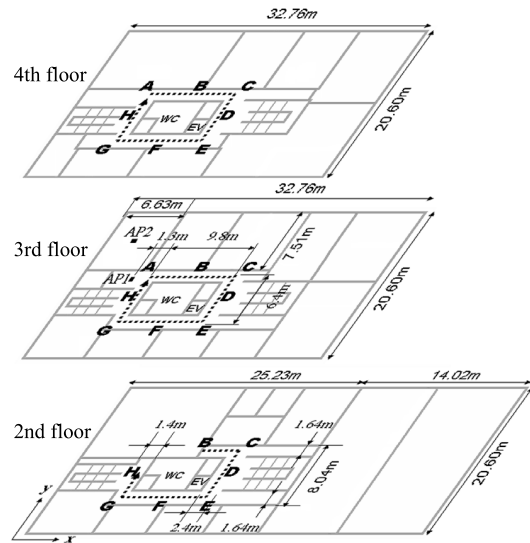


図 2 WLAN のための小規模オフィス環境
Fig. 2 A small-scale office environment for WLAN.

から得られた RSSI と平均スループットの相関係数は 0.99 であった。

MIMO-OFDM では、複数のマルチパス伝送路を利用することで、スループットは必ずしも RSSI に依存しない。しかし、得られた結果は RSSI とスループットが高い相関を有していることを示している。この原因として、下記の理由が考えられる。

- (1) 使用周波数が 2.4 GHz 帯である。
- (2) 使用周波数に対して無線機形状が小さく、アンテナ素子間隔を十分広くできない。この場合、アンテナ素子間隔は 0.13 波長である。
- (3) アンテナ素子数が 2 程度である。
- (4) 両側がコンクリート壁に囲まれた狭い空間内であることから、効果的なマルチパス伝送路が形成されない。

次に、AP を 3 階の研究室内天井に設置した場合を AP2 として測定を行った。図 4 に、RSSI と平均スループットの関係を示す。測定は、3 階 A から H までの 8 点および 4 階 A から H までの 8 点の合計 16 点において行った。同図から、AP2 においても AP1 と同様に RSSI と平均スループットの関係性を直線で近似できることが分かる。その関係式は次式で与

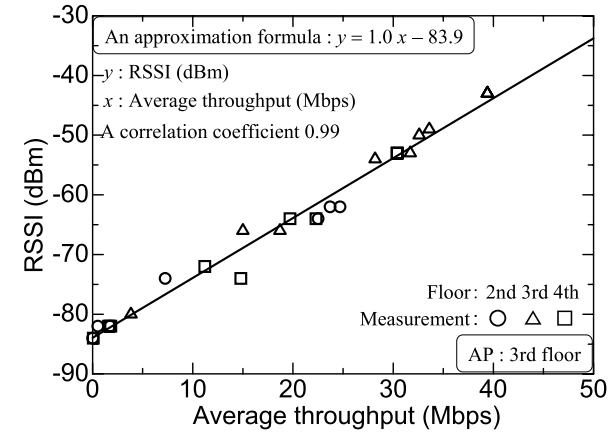


図 3 AP1 での RSSI と平均スループットの関係
Fig. 3 RSSI and average throughput for AP1.

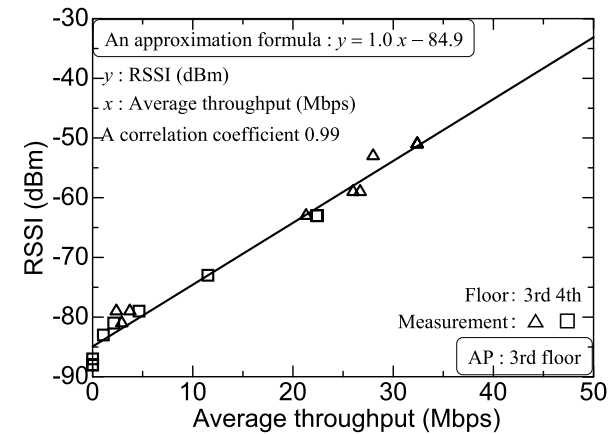


図 4 AP2 での RSSI と平均スループットの関係
Fig. 4 RSSI and average throughput for AP2.

えられる。

$$y = 1.0x - 84.9 \quad (2)$$

式 (2) は式 (1) と比較して、右辺定数項が 1 だけ異なっている。RSSI のダイナミックレ

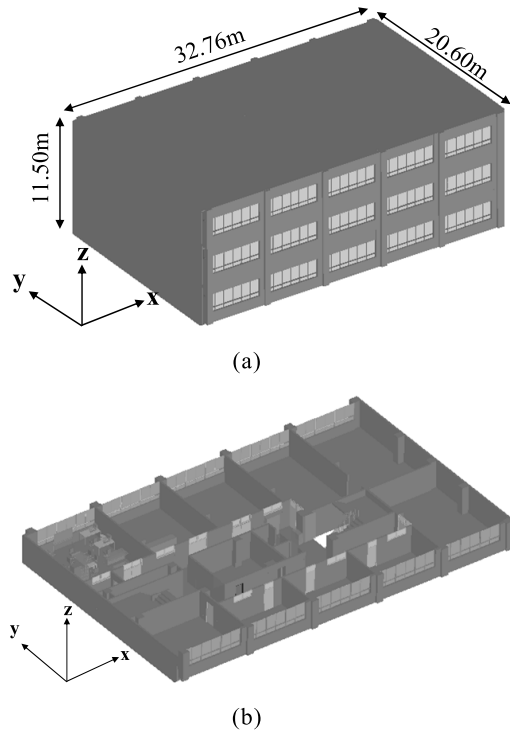


図 5 解析モデル . (a) 全体, (b) 内部

Fig.5 A numerical model. An overview (a) and an inner view in the 3rd floor (b).

ンジが 40 dB 以上あることから、この差は実用上無視できると考える。

以上の検討から、このオフィス環境においては AP の設置場所によらず RSSI と平均スループットの関係が直線で近似可能であると結論できる。

次に、測定結果と数値解析の比較を行う。屋内電波伝搬解析では、壁面における多重反射および什器による反射や回折を考慮しなければならない。そこで、解析法として FDTD 法を適用する^{11),13)}。FDTD 法は時間領域で電磁界の変化を求める手法で、マクスウェルの微分方程式を差分法により直接解く方法であり、最近では屋内電波伝搬シミュレーションに用いられている^{5),14)}。さらに、解析アルゴリズムが並列計算処理向きであることから、これらの特徴を活かした大規模計算が行われている¹⁵⁾。しかし、空間をセルと呼ばれる微小

表 1 媒質パラメータ

Table 1 Electric constants of media.

Items	Relative permittivity	Conductivity
Free space	1	0
Metal	-	∞
Concrete	5.5	0.023
Wooden material	2.5	0.001
Window glass	5.0	0.003
Plastics material	3.2	0.008
Rubber material	2.4	0.005
Roof	1.03	0.000712

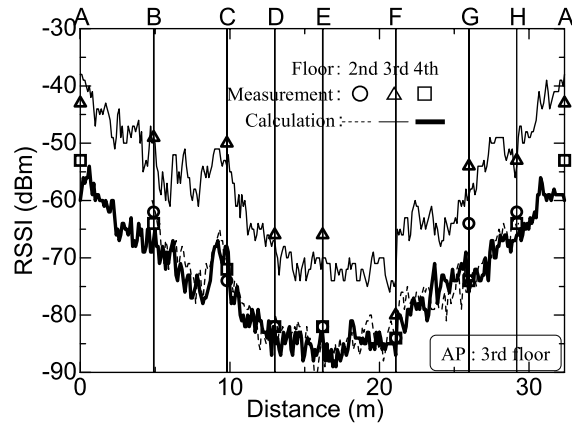
素で離散化し、時間領域において定常状態に達するまでの解析を行うことから、計算機シミュレーションには大規模主記憶容量などの計算リソースと長時間にわたる解析が必要である。このようなことから、著者らは大規模 FDTD 解析においても合理的な時間内に安定した解が得られる解析法を開発している¹⁴⁾。

図 5 (a) に数値モデルの全体を、同図 (b) に 3 階内部断面図をそれぞれ示す。測定を行った建物 2 階から 4 階までをモデル化している。その寸法は 32.76 m × 20.60 m × 11.50 m である。数値モデルの作成においては、建物現場説明書および意匠・構造図面を参照した。解析で使用するコンクリート壁、ドアおよび什器などの電気定数を表 1 に示す。これらの電気定数は、同様の解析を行っている文献を参考にして与えている。

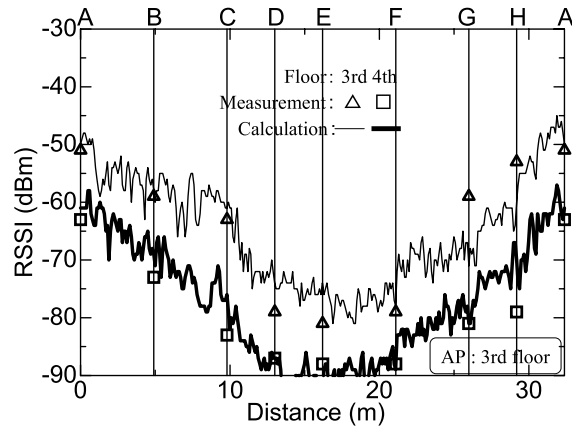
数値解析では、1 辺の長さが 10 mm の立方体セルで解析空間を離散化している。AP を導体箱とし、アンテナ素子を筐体に設置された 2 本の長さ 30 mm のモノポール素子とした。ただし、AP 内蔵アンテナは導体箱で代用している。また、7 チャンネルの搬送波周波数である 2,442 MHz でアンテナ素子を励振した。解の安定条件を考慮して、時間離散間隔を 1.73×10^{-11} sec とした。ただし、解析モデル表面からガードセル数 20 を設定し、解析空間を 10 層 (10 セル) の非分離 PML 吸収境界条件^{16),17)} で終端する。

図 6 に、RSSI の測定結果と解析結果を比較して示す。

同図から、解析により得られた RSSI 分布は実験結果をよく推定していることが分かる。その結果は、AP 設置階以外についても同様である。このことから、解析結果の有効性と測定結果の妥当性の両方を確認することができた。以上のことから、シミュレーションにより



(a)



(b)

図 6 RSSI の実験結果と解析結果の比較 . (a) AP1 , (b) AP2

Fig. 6 Comparison of calculated RSSI with measurements for the cases of AP1 (a) and AP2 (b).

RSSI 分布を求めることによって、図 3 または図 4 で得られた RSSI とスループットの関係式を利用して、任意の地点でのスループット値を予測することができる。この手法に基づいて、所望のスループットを実現する AP の設置台数や設置場所の設計が可能である。

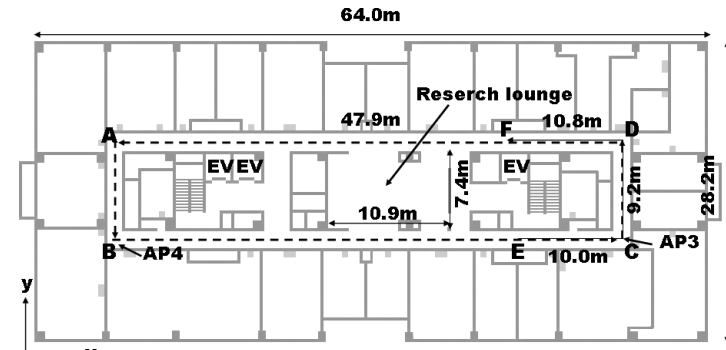


図 7 WLAN のための大規模オフィス環境 #1

Fig. 7 A large-scale office environment #1 for WLAN.

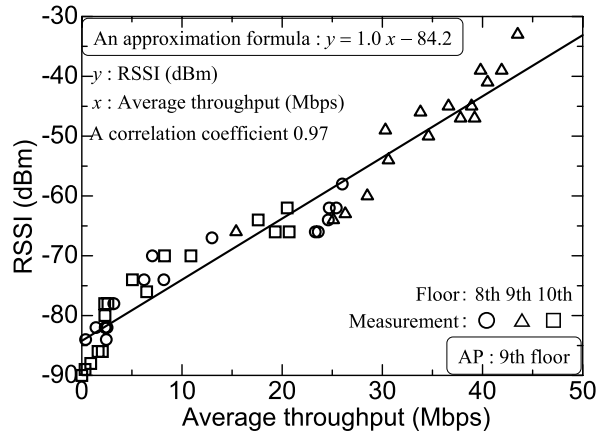
3.2 大規模オフィス環境 #1

前節において行った測定および実験を、比較的大規模なオフィス環境に適応して、同様の検討を行う。図 7 は測定サイトの平面図で、北海道大学工学部情報エレクトロニクス系棟 9 階である。フロアの中央部分がリサーチラウンジ、エレベータおよび階段などの共用スペースになっている。さらに、それらを取り囲んで会議室、研究室および居室がある。測定は、廊下などの共用スペースを利用して行った。図 7 における B および C の天井部分に AP を設置し、それぞれ AP4 および AP3 とした。測定は 1.8m の幅を有する廊下の中心とし、床面から 0.82m の高さで行った。廊下コーナを点 A, B, C, D, およびその他の点 E, F とする。AP4 については 9 階フロア A-B-C-D-A の周回コースで行う。一方、AP3 については測定区間を E-C-D-F の 30m に限定し、8 階から 10 階までの 3 フロアについて測定を行った。

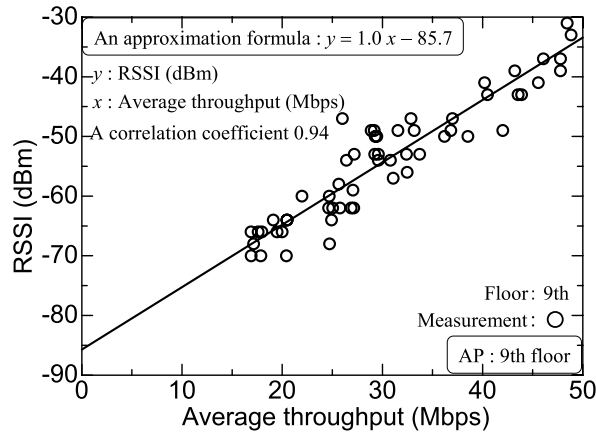
図 8 に、AP3 および AP4 の場合について RSSI と平均スループットの測定結果をそれぞれ示す。図 3 または 4 と比較して測定点のばらつきが広がり、RSSI とスループットの相関係数が 0.97 あるいは 0.94 と小さくなっていることが分かる。これは、測定サイトの規模に依存していると考えている。ただし、いずれの測定結果ともに、これまでと同様に、RSSI と平均スループットの関係を直線で近似できることが分かる。その関係式はそれぞれ次式で与えられる。

$$y = 1.0x - 84.2 \tag{3}$$

$$y = 1.0x - 85.7 \tag{4}$$



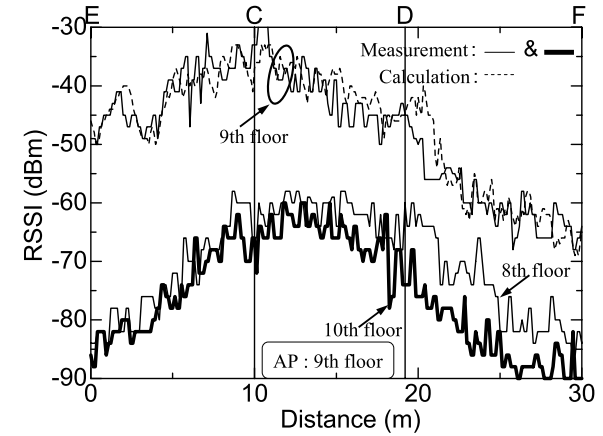
(a)



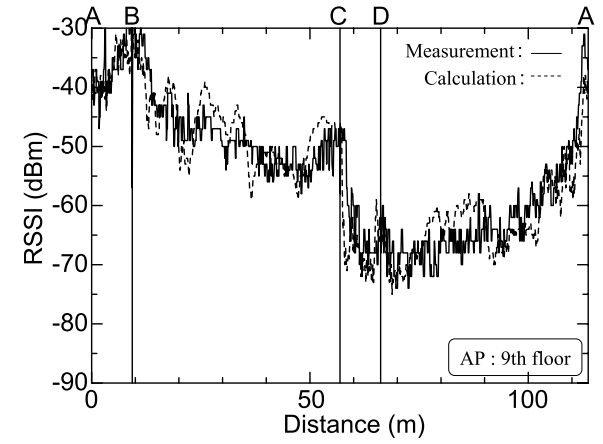
(b)

図 8 RSSI と平均スループットの関係 . (a) AP3 , (b) AP4
Fig. 8 RSSI and average throughput for AP3 (a) and AP4 (b).

ただし、式 (4) と式 (3) を比較して、右辺定数項が 1.5 dB 異なっている。これは図 8 (b) において、RSSI の測定結果が -70 dBm 以上であり、低い受信感度レベル付近の測定データがないことによる。



(a)



(b)

図 9 RSSI の実験結果と解析結果の比較 . (a) AP3 , (b) AP4
Fig. 9 Comparison of calculated RSSI with measurements for the cases of AP3 (a) and AP4 (b).

前節と同様の手順により、モデル化し計算機シミュレーションを行った。図 9 に RSSI について解析結果と測定結果を比較して示す。ただし、図中の破線は 9 階フロアのみ数値解析結果で、実線は測定結果である。同図 (a) から、9 階フロアにおける RSSI 分布について

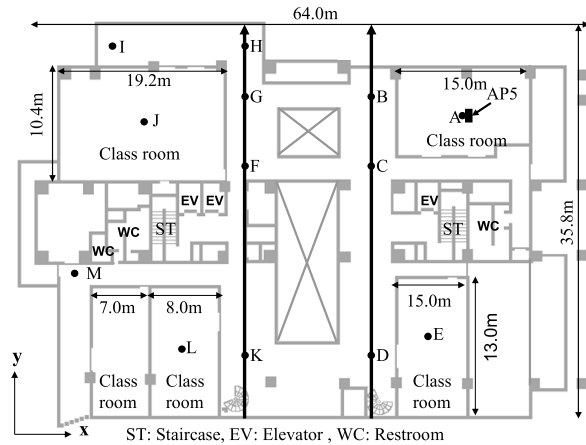


図 10 WLAN のための大規模オフィス環境#2
Fig. 10 A large-scale office environment #2 for WLAN.

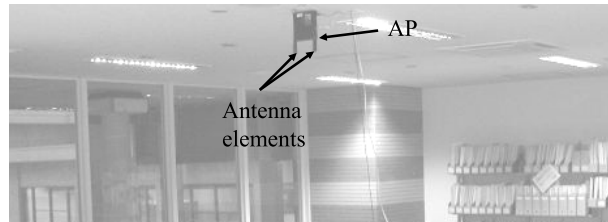


図 11 アクセスポイント AP5
Fig. 11 An access point AP5.

解析結果は実験結果をよく推定している，すなわち，RSSI のピーク位置がよく一致していることが分かる．したがって，前節と同様の結論が導かれる．

3.3 大規模オフィス環境#2

3.2 節で検討した大規模オフィス環境とフロア面積はほぼ同じで，講義室などを含む比較的大きな単位の空間を有する大規模オフィス環境での検討を行った．図 10 に平面図を示す．測定場所は，北海道大学工学部情報エレクトロニクス系棟 2 階フロアである．このフロアは講義室および自習室で構成されていることから，講義室内および廊下などの広い範囲で測定を行う．AP を自習室内中央の天井部分に設置し，それを図 10 における AP5 とする．

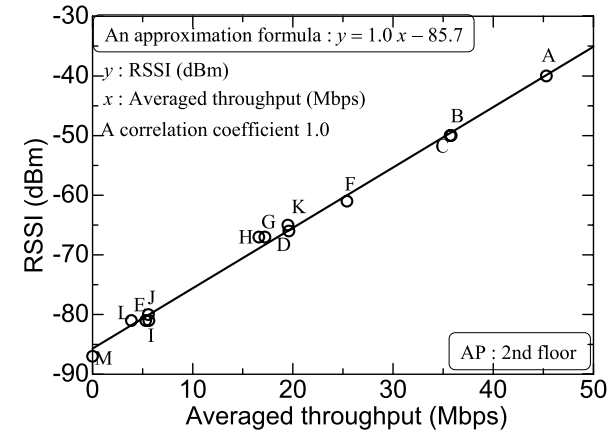


図 12 AP5 での RSSI と平均スループットの関係
Fig. 12 RSSI and average throughput for AP5.

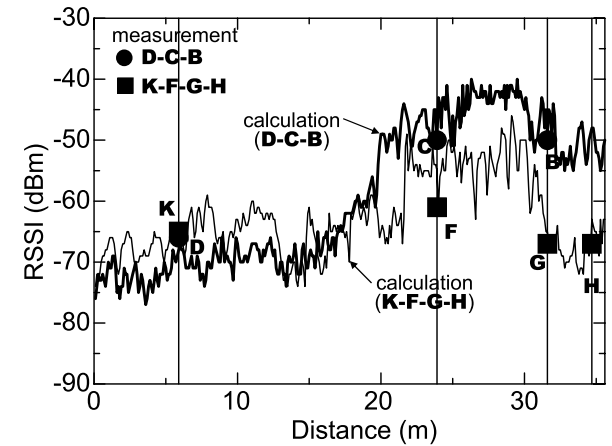


図 13 AP5 での RSSI の実験結果と解析結果の比較
Fig. 13 Comparison of calculated RSSI with measurements for AP5.

また，AP5 の設置状態を図 11 に示す．測定点を図 10 の点 A から M とした．

図 12 に，このときの RSSI と平均スループットの関係を示す．同図には，測定位置を記入している．測定結果は，これまでと同様に RSSI と平均スループットの間に関係

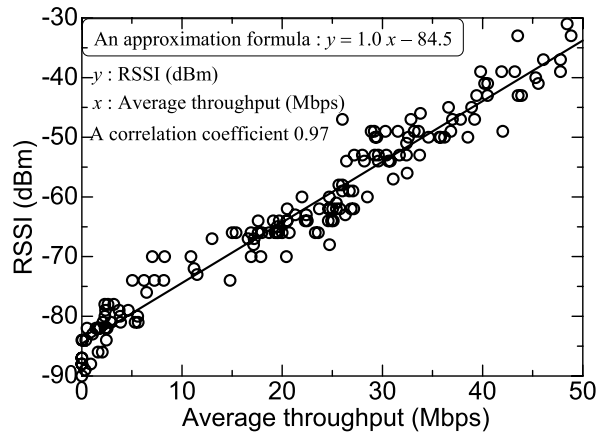


図 14 オフィス環境での RSSI と平均スループットの関係

Fig. 14 Relations of RSSI and average throughput in several office environments.

があることを示し、直線になっていることが分かる。その関係式は次式で与えられる。

$$y = 1.0x - 85.7 \quad (5)$$

このフロアは開放的な構造になっており、直接波あるいは主要な到来波の影響が支配的であるとえられる。

図 13 に、RSSI の解析結果と測定結果を比較して示す。ただし、RSSI 分布の比較を行うのは、図 10 に示す D-C-B および K-F-G-H を結ぶ 2 つの直線上である。同図において、数値解析結果を直線で、測定結果をマーカと測定点を表すアルファベットで示している。解析結果は実験結果と同様の分布をしている。さらに、測定点 D と K では、AP5 から近距離にある D に比較して測定点 K での RSSI 値が大きくなっていることも確認できる。この理由は、解析により得られた RSSI の平面分布図から、測定点 C の右下にある鉄骨により AP5 から放射された電波の反射・回折が発生し、点 D よりも点 K で RSSI 値が大きくなるように影響したことを確認している。

3.1 節から 3.3 節において、規模および構造の異なるコンクリート建造物について測定結

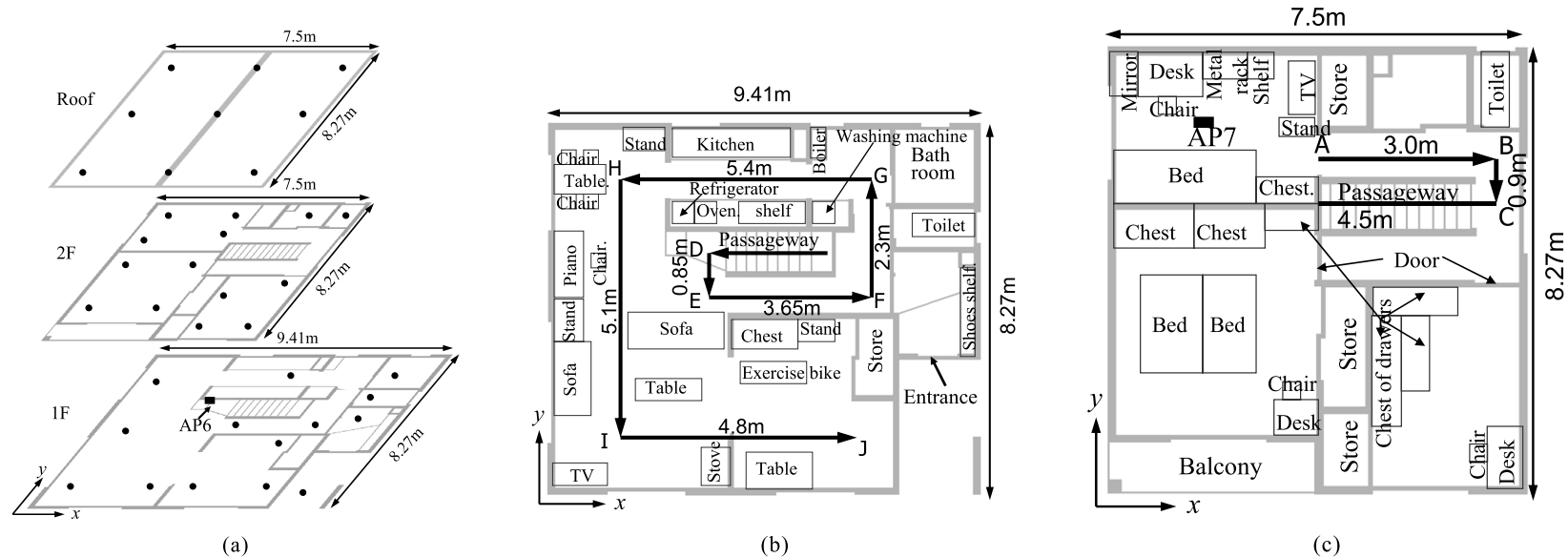


図 15 2 階建て戸建住宅。(a) 全体図、(b) 1 階、(c) 2 階

Fig. 15 Residential two-story house. An overview (a), first floor (b) and second floor (c).

果および解析結果について議論した．その結果，いずれの場合も RSSI と平均スループットの関係は直線で近似できるとの結論を得た．さらに，それらの式は定数項が 2 dB 程度の差に収まっており，直線の傾きはすべて 1.0 である．これまでの測定により得られた合計 159 点での RSSI と平均スループットの関係を図 14 にまとめて示す．これらデータから求められた近似式は次式で与えられる．

$$y = 1.0x - 84.5 \quad (6)$$

これはいくつかのオフィス環境で測定した場合の近似式を与える．さらに，相関係数がつねに 0.94 以上になっていることから，AP の設置場所やオフィス規模によらず同一の近似式が成り立つと結果できる．また，数値計算により RSSI を推定可能であることから，これらの数値解析結果と近似式を組み合わせる方法により，任意の点におけるスループットを求めることができる．

3.4 戸建住宅

最後に，木造モルタル 2 階建て戸建住宅について，これまでと同様の検討を行う．図 15 に，実験を行った住宅の平面図を示す．これは，一般住宅として利用されている北海道地域における典型的な戸建住宅である．同図 (a) は住宅の 1 階，2 階および無落雪構造の外屋根根上面の 3 つの平面図を示している．住宅内には什器が含まれており，その配置を同図 (b) および (c) に示す．AP は，図 15 (a) の 1 階階段脇に高さ 1 m の電話台に設置した場合を AP6，2 階室内天井に設置した場合を AP7 とする．

AP6 の場合，図 15 (a) に黒点で示す 37 カ所で測定を行った．一方，AP7 の場合，同図 (b) および (c) に示す A から J まで経路に沿って測定を行った．ただし，経路の長さは 30.5 m である．

AP6 および AP7 の場合について，測定によって得られた RSSI と平均スループットの関係を図 16 にまとめて示す．ただし，マーカにより測定条件を区別している．同図から，RSSI と平均スループットの関係は直線で近似することができることが分かる．その関係式は次式で与えられる．

$$y = 1.0x - 85.8 \quad (7)$$

図 16 から，コンクリート建造物で得られた分布，たとえば図 3，図 4 および図 12 に比較して，明らかに分布が広がり，相関係数が 0.92 になっている．AP6 または AP7 のいずれの場合においても，住居内では RSSI が -70 dBm 以上，スループットが 23 Mbps と比較的高い値を実現している．これは，戸建住宅ではコンクリート建造物に比較して，電波が壁面を通過しやすい．その結果，さまざまなマルチパス伝送路が構成され，MIMO-OFDM

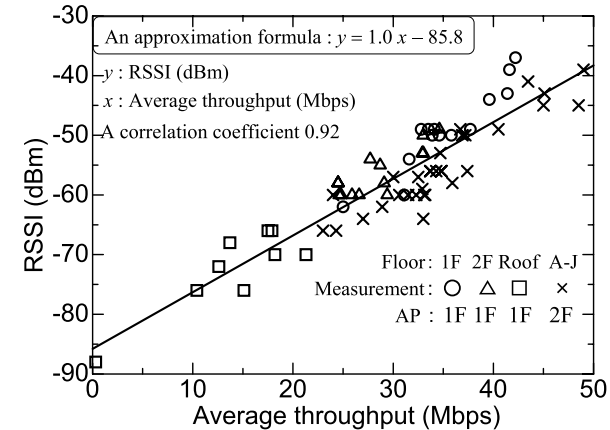


図 16 戸建住宅環境での RSSI と平均スループットの関係
Fig. 16 Relations of RSSI and average throughput in the residential home environment.

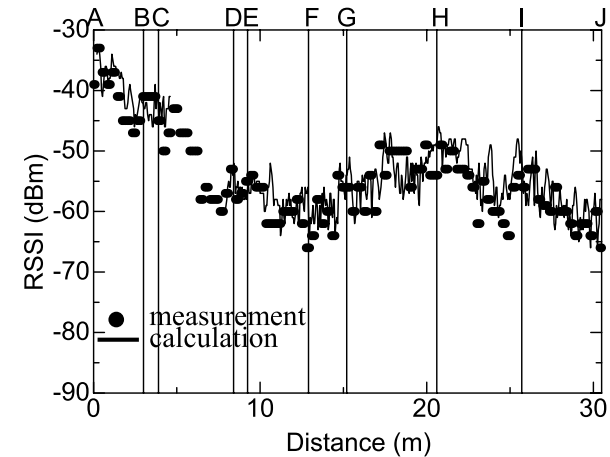


図 17 AP7 での RSSI の実験結果と解析結果の比較
Fig. 17 Comparison of calculated RSSI with measurements for AP7.

の特性が現れているのではないかと考える．ただし，式 (7) は定数項の値が異なることを除いて，式 (1) から (6) と同じである．

図 17 に，AP7 の場合について RSSI の解析結果を測定結果と比較して示す．ただし，家

具および仕器を近似するために、空間離散間隔を 5 mm としている。同図において、計算結果を実線で、測定結果を \bullet で示している。同図から、計算結果は測定結果をよく推定していることが分かる。特に、観測点 H 付近は AP7 の 1 階対応部分であり、その付近での RSSI の特徴的な分布が再現されている。以上のことから、解析結果の有効性と測定結果の妥当性を確認した。

4. む す び

IEEE802.11n 規格では広い周波数帯域を利用することで出力電力を増加させ、さらに MIMO-OFDM 方式を採用することで屋内マルチパス環境において高いスループットを実現する。しかし、市販の無線 LAN システムでは製造コストおよびデザイン性などに配慮しつつ、高い通信性能を実現することが望まれる。無線 LAN ネットワークの構築には、市販品を利用することが多く、その性能を把握することはネットワークの構築において重要である。本論文においては、市販されている IEEE802.11n 規格に準拠した 2.4 GHz 帯高速無線 LAN システムの屋内伝搬特性を明らかにすることを目的として、複数のオフィス環境ならびに戸建住宅における屋内伝搬特性について測定および数値解析による評価を行った。

測定結果から、RSSI と平均スループットの関係性を直線で近似可能であることを明らかにし、その近似式を導出した。ここで、本論文で示したオフィス環境および戸建住宅に関するすべての測定結果から求められる RSSI と平均スループットの関係性を表す近似式を求めると、次式になる。

$$y = 1.0x - 84.5$$

ただし、相関係数は 0.96 である。直線の傾きはつねに 1.0 であり、右辺定数項が環境によって異なっている。ただし、RSSI のダイナミックレンジが 40 dB 以上であることを考慮するならば、その差は実用的な観点から無視できるものと考えられる。

さらに、測定結果の妥当性を確認するため、FDTD 法に基づく電磁界解析を行い、数値解析結果は測定結果をよく推定していることを示した。その結果、RSSI を測定あるいは数値解析で求めることによって、それら RSSI 値を導出した近似直線の式に代入することでスループットを算出することが可能であることを示した。このことから、数値シミュレーションで得た RSSI 分布から、任意の場所でのスループット値を推定することができ、アクセスポイントの設置位置や設置台数を見積もる際の有効な設計手法となる。

スループット値を RSSI から推定可能であることは、十分な MIMO 特性が実現されていないためであるといえる。その理由は、送受信機の主要なアンテナ素子数が 2 であること、

使用周波数が 2.4 GHz 帯であり、無線子機寸法が波長に比較して小さく、アンテナ素子間隔が十分確保されていないことが原因として考えられる。一方、高出力電力により、広いカバーレージと良好なスループットを実現することが可能である。以上のことを考慮して、今後は市販の IEEE802.11n 規格 5 GHz 帯無線 LAN システムを利用した同様な検討を今後行う予定である。

謝辞 本論文で示した数値解析には、全国共同利用北海道大学情報基盤センター大型計算機システムのスーパーコンピュータ HITACHI SR11000 モデル K1 を利用した。本研究は科学研究費補助金（基盤研究（C）21500065）の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 社団法人電波産業会：第二世代小電力データ通信システム/ワイヤレス LAN システム標準規格 ARIB STD-T66 3.5 版 (2010).
- 2) 守倉正博, 久保田周治：802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレスネットビジネスカンパニー, 東京 (2004).
- 3) Nee, R.V., Jones, V.K., Awater, G., Zelst, A.V., Gardner, J. and Steele, G.: The 802.11n MIMO-OFDM Standard for Wireless LAN and Beyond, *Wireless Personal Communications*, Vol.37, pp.445–453 (2006).
- 4) Kim, N.: IEEE802.11 MAC Performance with Variable Transmission rates, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E88-B, No.9, pp.3524–3531 (2005).
- 5) Harris, L.R., Hikage, T. and Nojima, T.: Using Large-Scale FDTD Method to Obtain Precise Numerical Estimation of Indoor Wireless Local Area Network Office Environment, *IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol.E92-A, No.9, pp.2177–2183 (2009).
- 6) Sakaguchi, K., Chua, H.-Y.-E. and Araki, K.: MIMO Channel capacity in an Indoor Line-of-Sight (LOS) Environment, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E88-B, No.7, pp.3010–3019 (2005).
- 7) Iwai, H., Sakata, T., Yamamoto, A. and Sakaguchi, K.: 3-D Angular Spectrum Measurements at 5 GHz in a Residential Two-Story House, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E90-B, No.9, pp.2344–2351 (2007).
- 8) Tran, G.K., Dao, N.D., Sakaguchi, K., Araki, K., Iwai, H., Sakata, T. and Ogawa, K.: Performance Analysis of MIMO Schemes in Residential Home Environment via Wideband MIMO Propagation Measurement, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E93-A, No.4, pp.814–829 (2010).
- 9) 坂口 啓, 高田潤一：MIMO 伝搬特性の測定装置・測定方法・解析方法・モデル化, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J88-B, No.9, pp.1624–1640 (2005).
- 10) Zvanovec, S., Pechac, P. and Klepal, M.: *Wireless LAN Networks Design: Site Sur-*

- vey or Propagation Modeling?, *Radioengineering*, Vol.12, No.4, pp.42–49 (2003).
- 11) Taflov, A. and Hagness, S.C.: *Computational Electrodynamics, the Finite-Difference Time-Domain Method, Third Edition*, Chapter 5, Incident wave source conditions, pp.169–228, Artech House, Boston (2005).
 - 12) 株式会社バッファロ : エアステーション WZR-HP-G300NH 製品仕様 (オンライン), 入手先(<http://buffalo.jp/download/manual/html/air1200/>) (参照 2009-12-20).
 - 13) Yee, K.S.: Numerical Solution of Initial Boundary Value of Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol.14, No.5, pp.302–307 (1966).
 - 14) Hasegawa, T., Shoji, T., Omiya, M. and Hikage, T.: A Numerical Analysis of Cumulative Probability of Incident Wave Indoor Propagation, *2008 International Symposium of Antennas and Propagation (ISAP 2008)*, TP-A03, 1644976, pp.746–749 (2008).
 - 15) Taguchi, K., Uchiya, M., Kashiwa, T., Hirayama, K., Kuribayashi, H. and Komatsu, S.: FDTD Large-Scale Parallel Supercomputing and Its Application to the Analysis of Radiation Characteristics of an Antenna Mounted on a Vehicle, *Int. J. RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol.14, No.3, pp.253–261 (2004).
 - 16) Sullivan, D.M.: *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*, IEEE Press, New York (2000).
 - 17) Sullivan, D.M.: An Unsplit Step 3-D PML for Use with FDTD Method, *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol.7, No.7, pp.184–186 (1997).

(平成 22 年 11 月 14 日受付)

(平成 23 年 6 月 3 日採録)



長谷川公嗣 (学生会員)

2011 年現在, 北海道大学大学院博士後期課程在学中. 電磁界システム Jet FDTD の開発, CAD 連携解析システムの開発, 画像処理, ソフトウェア開発, 路線バス内の携帯電話使用による電磁界分布推定, 建物侵入波の人体を含む高速無線 LAN の屋内伝搬特性に関する研究に従事. 電子情報通信学会, 日本シミュレーション学会, IEEE 各会員.



武野 紘和

2010 年北海道大学工学部卒業. 現在, 同大学大学院修士課程在学中. 電磁界解析のための大規模・高速計算機手法に関する研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE 各会員.



中津 悠斗

2010 年北海道大学工学部卒業. 現在, 同大学大学院修士課程在学中. 大規模計算機システムを利用した解析手法および屋内伝搬に関する研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE 各会員.



大宮 学

1981 年北海道大学工学部卒業. 1983 年同大学大学院修士課程修了. 同年北海道大学工学部電子工学科助手. 1995 年同大学助教授. 2000 年同大学大型計算機センター教授, 2003 年同大学情報基盤センター教授, 現在に至る. この間, アダプティブアレーアンテナ, アンテナ自動設計 CAD システムの開発, 太陽発電衛星送電システムの開発および大規模並列電磁界解析システム Jet FDTD および電波伝搬の研究に従事. 工学博士. 映像情報メディア学会, 日本計算工学会, IEEE 各会員.