

IEEE 802.11n 無線 LAN の電波伝搬特性とスループットの比較

陳 春 祥・佐々木 宣 介

Propagation characteristics and throughput efficiency of IEEE 802.11n wireless LAN

Chun-Xiang CHEN and Nobusuke SASAKI

1 はじめに

高速無線 LAN 規格 IEEE 802.11n [1] が 2009 年 11 月に標準化されてから 2 年間に経ち、それに対応した無線 LAN 製品も出そろっており、高速無線 LAN の構築および利用が手軽にできるようになってきた。普通の戸建て住宅やマンションのような一世帯の住宅空間においては、無線アクセスポイント（以下 AP と記す）一台でほぼ全エリアをカバーできることから、宅内での無線 LAN の利用が非常に普及してきた。一方、ビジネスオフィス環境では、ネットワークに対して高速性、安定性及び安全性などが常に求められる。しかし、無線 LAN では電波の届くところでは受信できるため、第三者による盗聴の危険があること（安全性の問題）；無線 LAN の電波は環境ノイズを拾いやすく、環境の変化に大きく依存し、安定性を保つのが困難であること；また有線 LAN ほどの高速性が得られにくいこと、更に運用管理が煩雑であること、などの理由から、大規模なビジネス環境においては無線 LAN の本格導入はあまり進んでいないのが現状である。

1990 年代から 2000 年代にかけて無線 LAN で比較的広く利用されていた暗号化方式の WEP は解読が可能であると、無線 LAN の脆弱性が指摘されていた。その後、2004 年 4 月に IEEE 802.11i [2] が承認され、暗号化はより安全性の高い AES 方式を利用することが可能となった。また、2010 年 2 月に IEEE 802.1x [3] が改良され、ユーザーや端末の認証の仕組みも継続的に整備が進んでいる。これらの技術の進歩と規格の改良により、無線 LAN のユーザー認証や暗号化の強度もエンタプライズでの利用に十分耐えられるようになってきたといえる。更に、IEEE 802.11n では、MIMO (Multiple Input Multiple Output) [4] という技術を採用し、複数のアンテナで同時にデータの送受信（空間ストリームという）を行い、マルチパスによる送受信の安定性を図り、更に 1 ユーザーで利用できる周波数帯域を広げることによって、通信の速度や通信距離を高め、通信速度が最大 600Mbps となっている。無線 LAN 装置のメーカーではエンタプライズでの本格導入を見据え、無線 LAN の安定性と大規模運用の管理の煩わしさを軽減するため、無線 AP の自動電波調整機能や無線 AP を集中管理するためのコントローラなどの開発に力を入れている。

このような状況から無線 LAN は、LAN に求められる性能要件（高速性、安全性、安定性など）

を満たせるようになってきたと考えられる。しかし無線の特性上、高速で安定した伝送は、個々の伝搬環境、周波数帯域及び実装技術に大きく依存する。現在の主流となっている 802.11n 方式においては、同じ「802.11n 対応」となっている装置でも利用可能な技術・転送速度には様々な違いがある。これは、802.11n は、802.11 a/g ベースの仕様で機器製造メーカーは符号化方式、ガードインターバル（長いか、短いか）、空間ストリームの本数（最大 4 本）などの一部を取捨選択して実装しても、「802.11n 対応」と名乗ることが可能であることがその理由である。更に最大の転送距離や 5 GHz 帯域のチャンネルも国によって違いがある。そのため、導入の際には、環境条件に合わせた測定やサーベイを行った上でネットワークを設計し、目的に合った機能及び性能を満たす製品を用いて構築する必要がある。

本稿では、本学の教育研究棟の 2 つのフロアに無線 LAN を整備することを想定して、802.11n 無線の伝搬特性、無線 AP のカバー可能な範囲、異なる無線クライアントの接続性と通信性能（スループットという）などを実測し、本格導入の基礎データとしてその結果を報告する。

2 測定環境と測定方法

今回測定的环境は本学広島キャンパスの教育研究棟 1 の 2 F（2 階）と 5 F（5 階）とした（図 1、図は南側の廊下と部屋を省略している）。この建物は 9 階建てで鉄筋コンクリートの建物である。2 F は主に教室であり、教室間は壁と黒板で隔てられている。1269 室は学生サロンで、1273 室から 1278 室までは教室である。それに対して 5 F は教員研究室と実験室であり、室内は本棚や実験設備などの多い環境である。部屋の寸法は単位ユニットが横（廊下側のドアが設

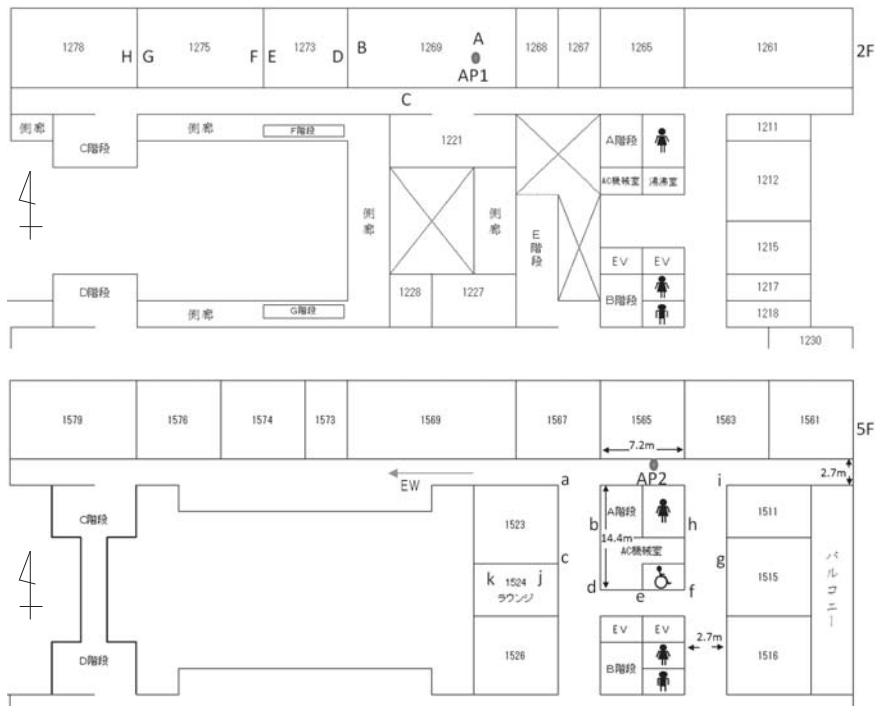


図 1：測定フロアの平面図：2 F（上）と 5 F（下）

置されている面の幅) 3,600mm, 縦(奥行き) 8,100mmである。廊下の幅は 2,700mmである。研究室, 実験室, 教室等は 1 ユニットの単位として, 複数のユニットをまとめて使用するようになっている(例えば, 1273 教室は 2 ユニットの単位であり, 幅が 7,200mmとなり, 縦は 8,100mmのままとなる)。1 フロアの幅(1561 室から 1579 室まで)は 72mである。

測定では以下の無線 AP 及び無線クライアントを使用する。

●無線 AP として, 以下の 2 機種を使用する。

- (1) シスコシステムズ社製の Cisco Aironet 1142 (型番: AIR-LAP1142N-P-K9) [5]: この AP は, 5 GHz および 2.4GHz 帯の IEEE 802.11n 規格に準拠し, 40MHz のチャンネル幅およびガードインターバルが 400ns である時, サポートされるデータレートは最大 300Mbps である。この AP は 2 F の 1269 室の天井に固定され, 無線 LAN サービス用の機器として設置されているものである(図 1, AP1 とする)。
- (2) BUFFALO 社製の WAPM-APG300N [6]: この AP も法人向けの機器であり, IEEE 802.11a/b/g/n をサポートしており, 5 GHz と 2.4GHz 帯域の同時利用ができる。この AP は 2 × 2 の MIMO 方式のダイポール外付けアンテナ(各 11cm)を装備し, ショートガードインターバル及び倍速(40MHz)により, 最大 300Mbps の帯域を実現する仕様になっている。この AP を 5 F の廊下に設置して(図 1, AP2 とする)性能測定を行う。

●無線クライアントパソコン(あるいは無線 Wi-Fi カード)は, 以下の 4 種類を使用する。

- (1) インテル Centrino Advanced-N 6250 AGN (以下, Intel 6250 AGN と記す): この無線クライアントはノート PC (Panasonic Let's Note) に内蔵されているカードで, IEEE 802.11a/b/g/n に準拠し, 40MHz チャンネル幅をサポートしている。またレッツノートの実装では, 送受信のアンテナを 2 本天板部分に内蔵し, 受信感度のよい方に切り替えながら高速で安定した通信を実現している。周波数帯域は 2.4GHz, 5 GHz の両方が利用可能である。
- (2) DW1501 Wireless-N WLAN Half-Mini Card (以下, DW1501 と記す): この無線クライアントは, Dell ノート PC (Vostro 3400) に内蔵されているカードである。Broadcom 社の BCM4313 チップを使用して, IEEE 802.11b/g/n に準拠しているが, IEEE 802.11n では 2.4GHz 帯域のみで, 20MHz のシングル帯域幅であり, 最大リンク速度は 72Mbps になっている。
- (3) NEC Aterm WL300NC (以下, NEC WL300NC と記す): この無線クライアントは, IEEE 802.11a/b/g/n に準拠の Cardbus 型カードである。アンテナは送信 2 本×受信 3 本を内蔵しており, 802.11n では最大 300Mbps の仕様になっている。周波数帯域は 2.4GHz, 5 GHz の両方が利用可能である。
- (4) BUFFALO WLP-UC-AG300 (以下, BUFFALO と記す): この無線クライアントは, IEEE 802.11 a/b/g/n に準拠して, 2 × 2 の MIMO アンテナにより USB (2.0/1.1) 接続で最大 300Mbps の仕様になっている。周波数帯域は 2.4GHz, 5 GHz の両方が利用可能である。

●AP からの受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indication) およびカバーエリアの測定では, 以下のツールを使用する。

- (1) Ekahau Site Survey (ESS, Standard): ESS は Ekahau 社製の Wi-Fi 無線ネットワークの計画, 検証及び最適化のツールである。今回はこのツールを利用して, AP のカバー範囲の測定に使用する。
- (2) Ekahau DBx Pro Spectrum Analyzer [7]: このスペクトラムアナライザは, 無線 AP の実効受信電界強度 (RSSI) の測定に使用する。また, この装置では Wi-Fi 以外の無線機器(電子

レンジ、コードレス電話、無線カメラなど)の電波測定にも使用することができる。

- (3) スループット(実効転送速度)の測定には、iperfというツールを使用する。但しiperfのデフォルトTCPウィンドウサイズは8KBであり、このウィンドウサイズが小さいと、転送性能の足かせになって転送性能が頭打ちになる場合がある[8]。そのためTCPウィンドウサイズは128KBを使用する。

3 測定結果及び分析

本節では上記の機器構成及び測定ツールを用いて、IEEE 802.11n 準拠のAPの無線伝搬特性および異なるクライアント使用時の実効スループットを実測し、その特性を明らかにする。

3.1 ESSによる802.11n APのカバレッジ測定

まず、ESSを用いて無線APの電波カバーエリア(エリア内のRSSI及び推定データレート)を測定する。ESSサーベイツールは、測定用のソフトウェアとそれに対応したWi-Fi無線カードをノートPCにインストールして使用する。測定の際には測定環境の対象図面を読み込み、寸法などを設定してから、ノートPCを用いて測定エリア内を移動しながら測定する。無線データの収集が終わったら、サーベイを行い、電波の強度(RSSI)を色分けして可視化する。このツールは、RSSI以外に、ノイズや最高スループット、推定データレートなどの測定・算出も可能である。

図2に5Fの廊下に設置したAP2のカバレッジ特性(RSSI)を示している。図中の緑の矢印パスはESSを作動させながらデータ収集に移動したルートである。RSSIの表示は信号の最も強い領域を青で、最も弱いところを赤で示し、その間は、-5db刻みで色分けして表示している。全く受信のできない(信号なし)領域は、色付けをしない(白地のままである)。AP2に一番近い内側のエリアの信号強度は、-50.0dBm~-45dBmになっている。一番外側の赤いエリアは-80.0dBm~-75.0dBmになっている。また図3にAP2のカバーするエリアの推定データレート(Intel 6250AGN使用時のクライアントの推定データレート)を示している。広範囲にわたって142Mb/s~150Mb/sの青になっていることがわかる。図2、3を見ればわかるようにESSツールは、エリア内のAPのカバレッジと推定データレートを非常にわかりやすく視覚的に示してくれる。但し、ESSのマニュアルによると、この推定データレートはAPとクライアント間の通信する速度の理論値であり、実効スループットはこのデータレートの半分以下となると説明されている。可視化されたRSSIでは「信号無し」となっている領域でも、推定データレートが通信可能な速度として表示されている部分がある。また、この後の節で述べる通り、実効スループットは「推定データレートの半分以下」とはかなり異なっている場所もあった。

図4に2F 1269室(学生サロン)の天井に設置したAP1のカバレッジ特性(RSSI)を示している。AP1の真下のエリア(図4のア)は信号が一番強く(-30dBm~-25dBm)、-5dBmずつ減衰していくエリアを色分けしている。順にイ:-35dBm~-30dBm、ウ:-55dBm~-50dBm。エ:-70dBm~-65dBm、オ(最も弱い、赤いエリア):-80dBm~-75dBmとなっている。また、推定データレートは紙面の関係で省略するが、ア、イ、ウのエリアまですべて最高のデータレート:142.0Mb/s~150.0Mb/sとなっている。順にエ:126.0Mb/s~134.0Mb/s、オ:36.0Mb/s~48.0Mb/sになっている。



図 2 : 5 F WAPM-APG300N のカバレッジ (RSSI)

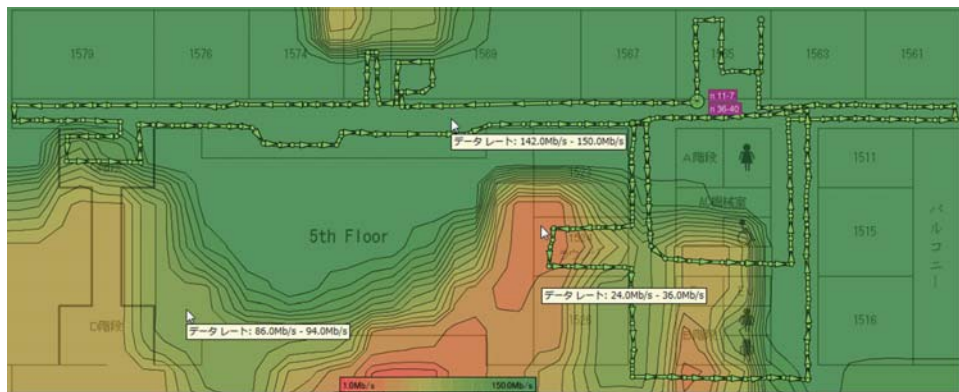


図 3 : 5 F WAPM-APG300N のカバレッジ (推定データレート)



図 4 : 2 F Cisco Aironet 1142 のカバレッジ (RSSI)

3. 2 スループット実測及び比較

本節では異なる無線クライアントを用いてスループットの実測及び比較を行い、その結果を示す。

図 5 に AP2 において細長い廊下 (図 1 の AP2 から矢印 EW への方向で大きな障害物はない) に沿った実測平均スループットを示している。

この測定では、先にあげた 4 種類の無線クライアント装置のうち、Dell Vostro 3400 内蔵の DW1501 と BUFFALO USB 型無線クライアントを用いて行った。AP2 のチャンネル設定では、

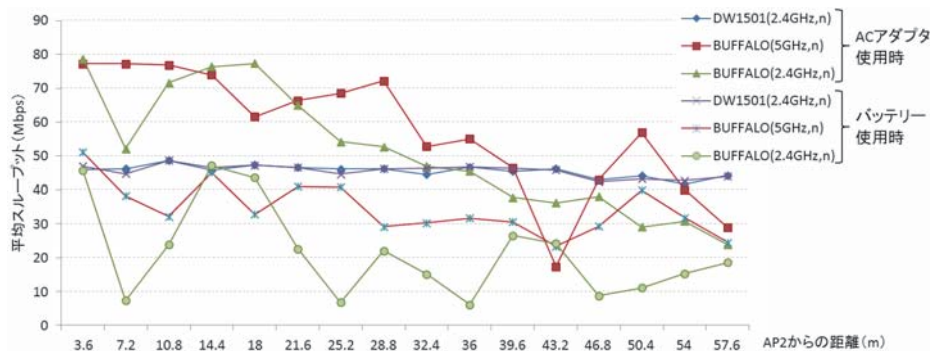


図5：802.11nの平均スループット（細長い廊下の場合）

802.11n 5 GHz帯で36 + 40ch, 2.4GHz帯で11 + 7chでの同時接続とした。802.11n 2.4GHz帯はDW 1501およびBUFFALOの両方が対応しており、802.11n 5 GHz帯はBUFFALOのみ対応している。この3通り（DW 1501 2.4GHz, BUFFALO 2.4GHz, BUFFALO 5 GHz）のクライアントについて、それぞれ測定PCの電源をACアダプターから供給している時とバッテリー使用時の2つのケース、全部で6通りの設定で測定を行った。図5縦軸は平均スループットであり、各パターンにおいてiperfで5回（不安定な場合は、10回程度、以下同様）測定したスループットの平均値である。横軸は、AP2と測定場所の距離である。1ユニット単位の横幅3.6m毎に行なっている。同図から以下のことがわかる。(1) 無線クライアントによってスループットにかなり違いがあることがわかる。同じ802.11n準拠であっても実装上の違いによるものと考えられる。(2) BUFFALO USBクライアントではバッテリー使用時とACアダプター使用時に大きな差があることがわかる¹。これは、この無線クライアントのドライバーの詳細設定の画面では調整する項目は見つからないものの、バッテリー使用時に省電力モードで動作する仕様になっているのではないと思われる。(3) 平均スループットは距離と共に減少していくが、DW1501においては、シングル帯域幅及び1ストリームで72Mbpsの仕様であるが、平均スループットはバッテリーを使用するかACアダプターを使用するかによる差がないことがわかる。しかも今回測定した細長い廊下全体にわたって、スループットが非常に安定していることがわかる。

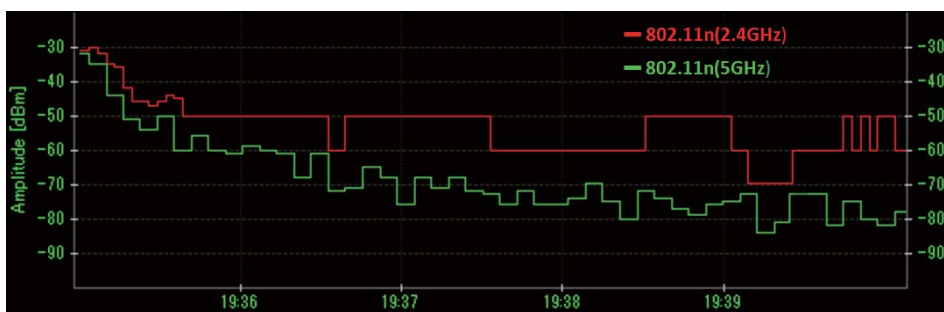


図6：AP2のRSSIの減衰特性（細長い廊下の場合）

¹ 図にデータをプロットしていないが、NEC WL300NC及びIntel 6250 AGNでは、バッテリー使用時とACアダプター使用時によるスループットの差は見当たらなかった。

図 6 に図 5 のスループットを測定するときの廊下内の RSSI を示している。左側の -30dBm のところは、AP2 とほぼ同一地点（横平行して 50cm ）で、最右端は AP2 から 57.6m 先の廊下の壁のところである。この間を Ekahau Chanalyzer 3.4 [7] を使用して、5 分間等速で測定したグラフである。図から、AP から離れていくにつれ、無線信号が減衰していくのがわかるが、 2.4GHz 帯域と比較して 5GHz 帯域の減衰が大きいがわかる。また、 2.4GHz 帯は RSSI の変化が穏やかで、 5GHz 帯の方は小刻みに振動していることがわかる。一般的な電波特性として、 5GHz の方が距離による減衰が大きく、また障害物による影響を受けやすいためと考えられる。

続いて障害物の多いところとして、5 F AP2 前の階段・トイレや機械室の周囲（図 1 の a, b から h, i, j, k までの箇所）を選んで、実効スループットを測定した。無線 LAN クライアントは 4 種類全てを利用し、また、以下の測定では PC は全てバッテリー駆動の状態で行っている。

図 7 から図 13 に、4 種類のクライアント全てについて、各地点の RSSI とその時に測定した平均スループットの結果を示す。DW1501 は対応しているのが 2.4GHz 帯のみなので、 2.4GHz 帯の測定結果を示し、他のクライアントは 2.4GHz , 5GHz 両方の結果を示す。図中の直線は平均スループットと RSSI の関係を直線で近似した場合の実線である。a（AP2 から直線距離は約 7.27m である）と i（AP2 から直線距離は約 6.15m である）の 2 ヶ所は AP2 との間に障害物がない場所である。障害物の陰になっている場所 j, k は、図 11 の DW1501 のみ接続できたが、他のクライアントでは接続自体ができず、したがって図のグラフにもプロットされていない。

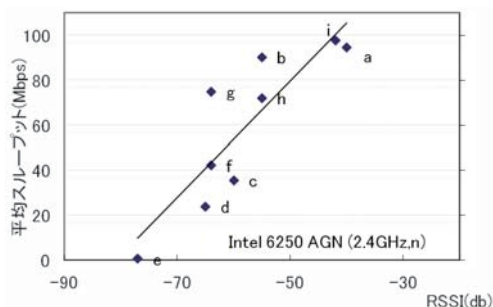


図 7 : 平均スループット (Intel 6250 AGN 2.4GHz)

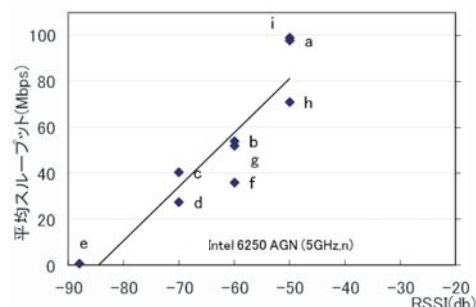


図 8 : 平均スループット (Intel 6250 AGN 5GHz)

図 7 から図 13 まで比較すると、以下のことがわかる。(1) 同じ 802.11n 準拠、2 つの空間ストリームで最大 300Mbps のクライアントであっても、今回比べた 3 種類のうち、製品（メーカー）の実装の違いによる性能の違いが確認された。Intel 6250 AGN クライアントにおいては、 2.4GHz 帯（図 7）及び 5GHz 帯（図 8）のどちらでも良好なスループットを得られた。特に信号の強い（ $\geq -60\text{dBm}$ ）範囲では非常に高いスループットが得られた。場所 a で 5GHz 帯と 2.4GHz 帯においてそれぞれ、 97.78Mbps と 94.74Mbps のスループットを記録した。これはファーストイーサネット有線 LAN と同等以上のスループットといえる。(2) 一方、場所 e（AP2 からトイレや機械室などの壁、障害物の反対側）では、RSSI がかなり低下し、NEC WL300NC と DW1501 以外のクライアントはほとんど接続出来なかった（ $\text{RSSI} \leq -80\text{dBm}$ ）。d, f 点に比べて距離的にほとんど変わっていない（AP2 からの直線距離はむしろ e の方が近い）が、RSSI が相当違うのがわかる。これは d, f に対して、e は AP2 から隠れて、空間マルチパスの形成しにくい場所と考えら

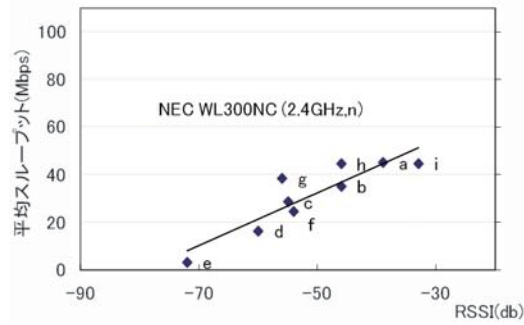


図9：平均スループット (NEC WL300NC 2.4GHz)

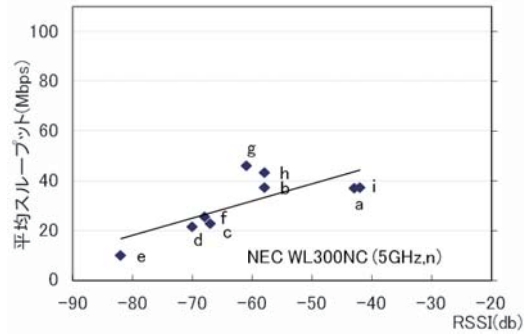


図10：平均スループット (NEC WL300NC 5 GHz)

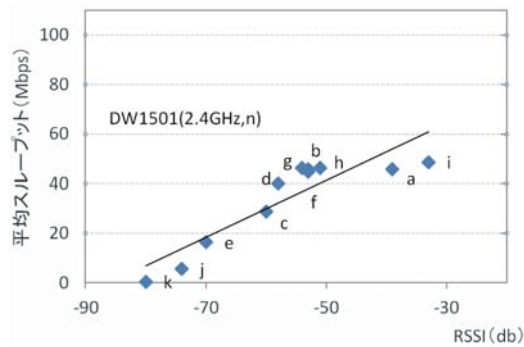


図11：平均スループット (DW1051 2.4GHz)

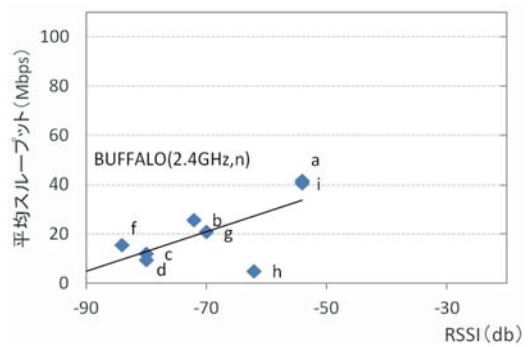


図12：平均スループット (BUFFALO 2.4GHz)

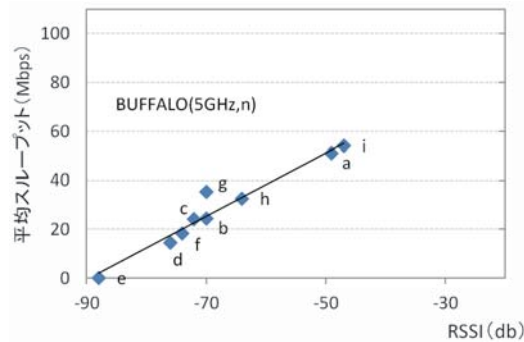


図13：平均スループット (BUFFALO 5 GHz)

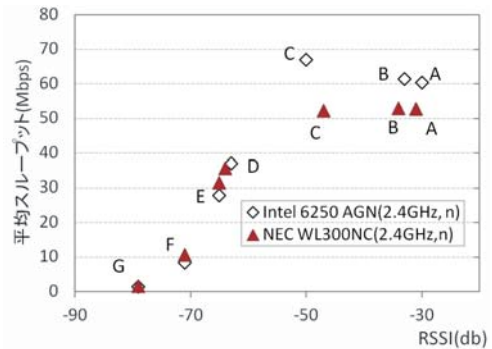


図14：平均スループットと信号強度の関係

れる。(3) 図2のRSSIサーベイデータでは、場所eはやはり信号が届かないことがわかる。しかしESSサーベイの推定データレート(図3)では、eでの推定データレートが54Mb/s～62.0Mb/sになっており、eでの推定スループットは40.0Mb/s～42.0Mb/sになっている。実測と大きな違いがあることがわかる。(4)1524ラウンジ内の場所j、kについて、接続できたのはWD1501クライアントのみであった。ほかの無線クライアントは接続できなかった(図7～図13にj、kをプロットしなかった)。ESSサーベイツールで場所j、kの1524ラウンジ内はAP2でカバーできていないことも確認できる(図2)。但し、ESSによる推定データレートは24.0Mb/s～36.0Mb/sに

なっており、ここでも実測と大きな違いがあることがわかる。

ESS による RSSI の測定の結果から得られた推定データレートは先に書いた通り電波が検出できなかつた場所でも一定のスループットが出るような推定となっており、推定データレートがそのまま当てはまるわけではない。しかし、ESS の測定で得られた RSSI が大きければ、実際に測定されるスループットも大きい傾向は間違いなく一致している。したがってこのような測定・可視化ツールは無線 LAN の設置・運用における調査の際には非常に力を発揮すると考えられる。

図 14 には、2 F の学生サロン (図 1 の 1269 室) に設置した AP1 に対して、Intel 6250 AGN 及び NEC WL300NC の 2 つのクライアントにおいて、A、B から G、H までの場所で測定された RSSI と平均スループットの値を示している。クライアントによる実効スループットの違いがあるが、いずれも、地点 G (AP1 から教室の 2 枚壁に隔てて約 30m 先) まで、安定して接続できた。H 地点ではいずれのクライアントもたまたまに接続ができてはすぐ切れるので、ほとんど接続出来なかつた。これは図 4 でも確認できる。

4 まとめ

本稿では無線 LAN の本格導入のための基礎データの収集及び分析を行った。アクセスポイントはシスコシステムズ社製の Cisco Aironet 1142 及び国内メーカーである BUFFALO 社製の WAPM-APG300N を使用した。無線クライアントについては、パソコンに内蔵型の 2 種類 (Intel 6250 AGN 及び DW1051)、CardBus 型の 1 種類 (NEC WL300NC) 及び USB 型の 1 種類を使用した。エリアサーベイ、データの収集及び信号測定に、ESS サーベイツール、Chanalyzer 及び iperf を使用した。教室の環境のフロア及び研究室 (実験室のフロア) で実測及び分析を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 同じ 802.11n 準拠のクライアントでも、メーカーによって受信の感度とスループットに大きな差があることが確認された。
- (2) 一部のクライアントではファーストイーサネットと同等以上の実効スループットが得られた。今後 3 空間ストリーム (最大 450Mbps) や 802.11n 仕様最大の 4 空間ストリーム (最大 600Mbps) の製品も徐々に出揃うと考えられ、実効スループットは、現在普及しているギガビットイーサネットに及ばなくても、ファーストイーサネット LAN を凌ぐ無線 LAN の構築と利用が可能だと思われる。
- (3) 実測と比較してサーベイツール ESS では、推定データレートや最大スループットは実測データと幾分差があるが、信号の電界強度マップは無線 LAN 環境の構築に非常に有用であることが確認できた。
- (4) 今回使用した AP のいずれも、クライアント側の電界強度 (RSSI) が -75dBm 以上であれば、非常に安定して接続ができた。今回対象の教室や研究室において、壁が 2 枚程度で 30m 以内なら安定に接続ができた。

今回の実証実験では AP 間の干渉もなく、環境ノイズも少ない環境で単純に 802.11n の伝搬特性及び実効スループットの測定・比較を行なっている。今後の課題としては複数 AP の運用、AP 間のローミング及び同時接続ユーザーが多い (例えば、数十人の授業で一斉アクセス) 場合における接続性及び実効スループットの検証が必要であろう。

謝 辞

本研究は科学研究補助金（基盤研究(C)：22500066）の研究助成を受けて行なったものである。

参考文献

- [1] IEEE 802.11n-2009, available at <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11n-2009.pdf>.
- [2] IEEE 802.11i, <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11i-2004.pdf>.
- [3] IEEE 8802.1x, <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1X-2010.pdf>.
- [4] 小川恭孝, 大鐘武雄, 西村寿彦: “MIMO による超高速化”, 信学会, 通信ソサイエティマガジン, Vol.2009, No.11, pp.32-38。
- [5] Cisco Aironet 1142 仕様: <http://www.cisco.com/web/JP/product/hs/wireless/airo1140/index.html>
- [6] <http://buffalo.jp/products/catalog/network/wapm-apg300n/index.html>
- [7] <http://www.ekahau.com/products/ekahau-site-survey/spectrum.html>
- [8] 陳春祥, 佐々木宣介: “OPNET による広帯域ネットワーク環境における TCP 性能の一考察”, 県立広島大学経営情報学部論集, No.3, pp.183-194, Feb. 2011。