



BYOD 環境整備に向けた無線 LAN 通信実験

福田 豊¹
畑瀬 卓司²
富重 秀樹³
林 豊洋⁴

1 はじめに

大学において BYOD を活用する講義では、学内外のサーバで提供される学習管理システムや電子教科書、外部クラウド等の利用が想定されるため、それらの教材や講義資料といった情報へのアクセス手段は非常に重要となります。通常、端末講義室に設置された講義用端末は 1 Gb/s の有線 LAN により接続されており高速通信が担保されていますが、BYOD を想定した講義では無線 LAN が主な通信手段となるため、その接続性の確保や講義に足る通信速度の提供等、新たな通信環境整備が必要となります。

この要求を満たして講義に活用出来る無線 LAN を整備するためには、講義室を中心としたエリアの拡大だけでは不十分であり、多数の端末の接続と通信による高負荷にも耐えうるような設計が求められることとなります。そのためには Access Point (AP) の敷設や収容端末数に関する指針を定め、IEEE 802.11n 以降導入されているチャンネルボンディングによる高速化の活用を考慮しなければなりません。

そこで我々は BYOD 講義を想定した環境整備の設計指針を得るために、講義室で実際に無線 LAN 通信実験を行いました。具体的には稼働 AP 数や端末数、通信先のサーバ、チャンネルボンディングの有無等を変化させて、wget や iperf3 で端末が通信した時の通信特性を調査しました。得られた計測結果から、クラウドサーバの使用や 1 AP あたりの適切な収容端末数、チャンネルボンディングの有効活用範囲等、具体的な設計指針をまとめました [2]。

2 実験環境

本実験は IEEE 802.11ac [3] 対応 AP が 4 台設置されている本学飯塚キャンパス AV 講義室 (207 m²) で行いました (図 1, 2 参照)[4, 5]。AP は Wave2 に対応した Aruba AP-335 で、Aruba 無線 LAN コントローラ 7210 に PoE Switch である Juniper EX2200-24P を経由して収容されています (図 3)。なお、PoE Switch の上流側の接続は 1 Gb/s です。

実験前に AV 講義室で 5GHz 帯の電波状態を測定し、干渉電波の影響が最も小さかった W56 帯を利用することにして各 AP に 20 MHz 幅のチャンネル (100, 104, 108, 116 チャンネル) を割り当てると共に、実験期間中は競合無線 LAN の利用停止を依頼しました。また実験内容に応じて AP に設定するチャンネル幅は 20 MHz から 80 MHz (全チャンネル幅は 80 MHz から 160 MHz) まで変化させました。

¹情報科学センター 助教 fukuda@isc.kyutech.ac.jp

²情報科学センター 技術職員 hatase@isc.kyutech.ac.jp

³情報科学センター 技術専門職員 tomisige@isc.kyutech.ac.jp

⁴情報科学センター 助教 toyohiro@isc.kyutech.ac.jp

AV 講義室には 1000 BASE-T 有線 LAN で接続された 90 台の端末が設置されており、この端末に IEEE 802.11ac に対応した USB アダプタ (3 種類) を接続し、実験用に準備したアカウントでテスト用無線 LAN に接続後 (IEEE 802.1X 認証)、有線側から指定時刻にジョブを投入して指定するサーバと無線 LAN で通信するようにしました。従って指定時刻に設定台数分の端末がサーバと一斉に通信することになります。端末数は 12 から 90 台まで変化させ、学内サーバまたは AWS (Amazon Web Services) サーバと通信を行いました。稼働させる端末は各台数においてできるだけ物理的に AP に近いものとし、3 種類の USB アダプタは各試行で同数になるように実験を設計しました。

サーバ・端末間の通信には wget と iperf3 を用いました。前者は講義資料や講義に利用するアーカイブファイルをダウンロードする場合を想定しています。一方、後者は講義ビデオ等、連続して常に通信が生じる場合を想定しました。wget を用いた通信の場合は各端末がサーバ上に設置した 40 MBytes のファイルを取得する実験を各 2 回実行し、そのスループットを計測しました。本稿では wget 実験時のスループットを全端末が 40 MBytes の通信を終えるまでに要する時間とし、以下の式に従って求めました。

$$\text{スループット (wget)} = \frac{(\text{端末数} \times 40 \text{ MBytes} \times 8 \text{ bit})}{\text{最後の端末が通信を完了した時間}}$$

なお事前に 90 台の端末が同時に有線 LAN を経由して学内サーバ上の 40 MBytes のファイルを wget で取得する実験を 3 回実行し、その平均スループットは 918.59 Mb/s でした。

一方、iperf3 を用いた通信の場合は、各端末が学内サーバもしくは AWS サーバと TCP 通信を 300 秒間実施し、そのうち前後の 10 秒間ずつを除いた 280 秒間でスループットを計測しました。以上の実験環境を表 1 に示します。

3 実験結果

本節では取得した実験結果について述べます。最初に端末数を 12 ~ 90 台まで変化させ、学内サーバまたは AWS を利用してクラウドに設置したサーバ (以下クラウドサーバ) と通信し、そのスループット特性を調査しました。

次に 1 AP あたりの適切な端末収容数を検討するために、端末数の変化に加えて AP 稼働数を 2 ~ 4 台と変化させ、スループットと通信の完了率を計測しました。

さらに、IEEE 802.11ac によるチャンネルボンディングが有効活用できる範囲を調べるため、チャンネル幅を 80 MHz または 160MHz に設定して AP の稼働数と総スループットの関係を調査しました。

3.1 端末数を変化 (AP x 4 台, 端末 12 ~ 90 台)

まず始めに AP を 4 台稼働させ (W56, チャンネルボンディング無し)、端末数を 12 ~ 90 台まで変化させた時のスループット特性を図 4, 5 に示します。図 4 と 5 を比較すると、iperf3 を用いた図 5 の方がスループット特性が高くなっています。これは、iperf3 では指定時間内で常に設定端末が通信するのに対して、wget を用いた場合は 40 MBytes を取得した端末から通信を終了するためです。

また両図より、端末数の増加に伴って CSMA/CA による送信権獲得のために端末間で発生する衝突も増加し、スループットは低下していくことが分かります [6]。一方で端末 1 台あたりの平均スループットを見てみると、90 台で同時に通信を開始した場合でも wget と iperf3 の双方で平均で 1 Mb/s 以上のスループットは確保できることが分かりました。

次に、学内サーバと AWS クラウドサーバとのスループット特性を比較してみると、wget, iperf3 双方で殆どの場合クラウドサーバと通信した方が高いスループットを獲得していることが分かりました。

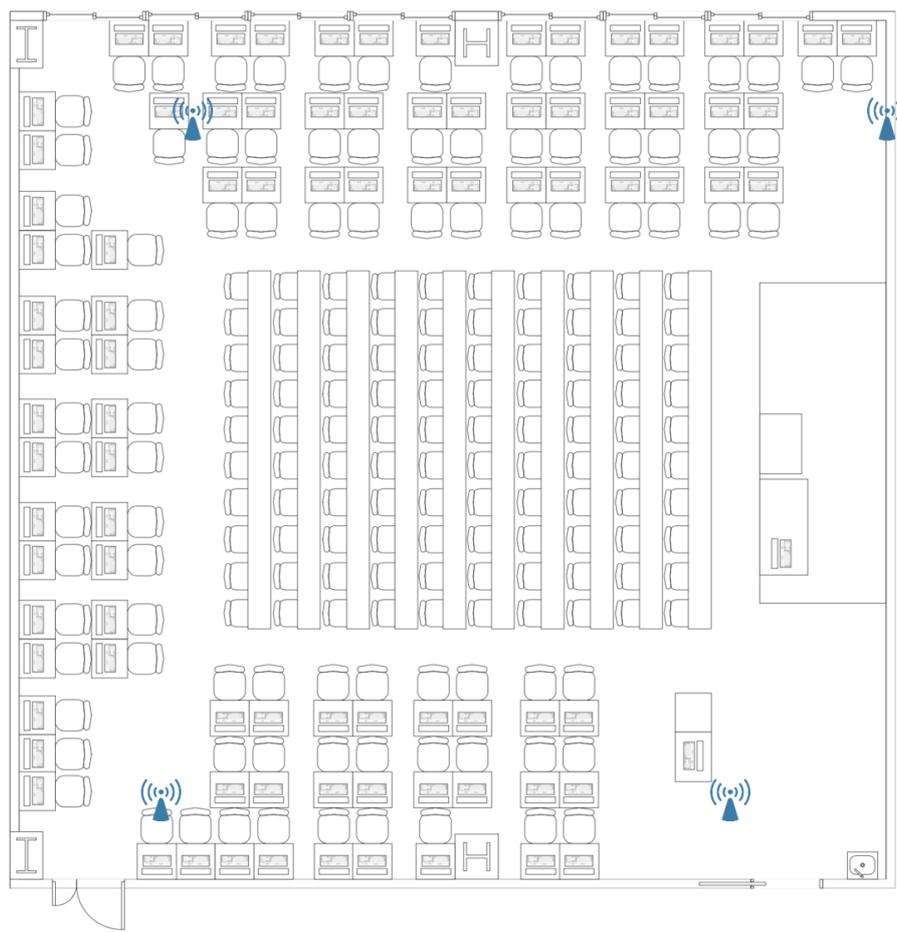


図 1: AV 講義室

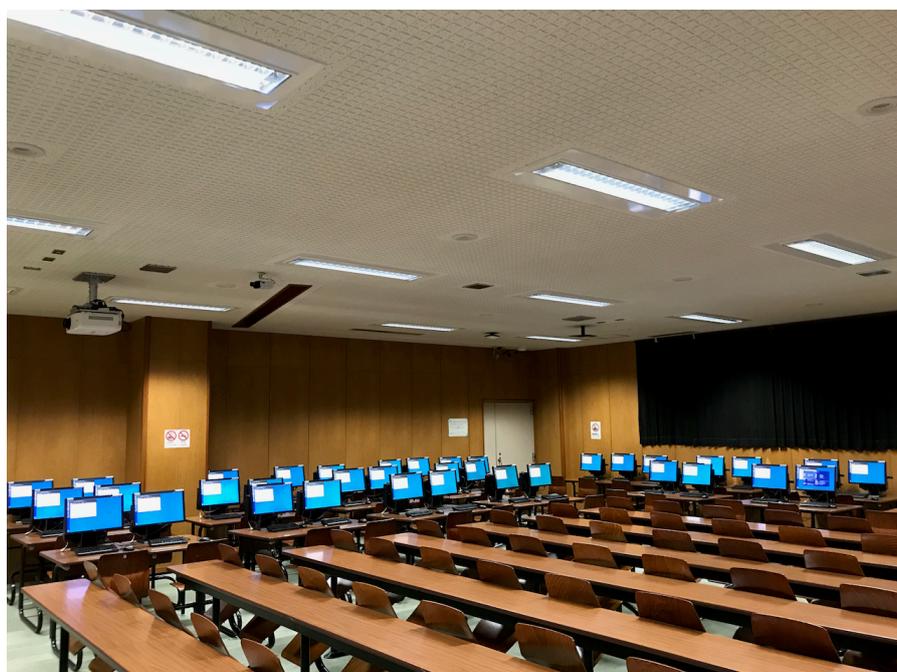


図 2: AV 講義室内の端末

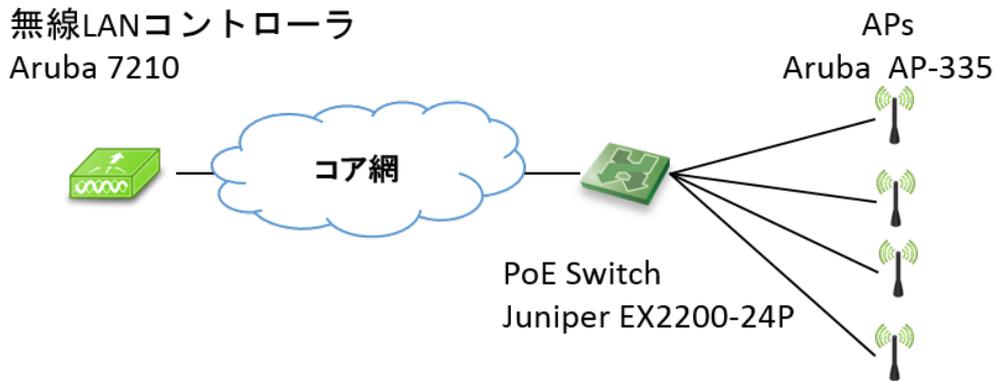


図 3: 接続構成

表 1: 実験環境

無線 LAN
HPE Aruba 7210, AP-335 3x3 MIMO wave2 対応 , W56 (100ch, 104ch, 108ch, 112ch を各 AP に割り当て)
USB アダプタ
NEC PA-WL900U , BUFFALO WI-U3-866DS, I-O DATA WN-AC867U (2x2 MIMO)
学内サーバ
HP ProLiant DL360 Gen9 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2660 v3 @ 2.60GHz, Memory 64 GB, VMware ESXi 5.1.0, OS : Ubuntu Linux Server (Ubuntu 5.4.0-6ubuntu1 16.04.5), CPU : 1vCPU, メモリ : 8192 MB
クラウドサーバ
Amazon EC2, 設置リージョン : ap-northeast (東京リージョン), インスタンスタイプ : m4.large / 2vCPU (2.3 GHz Intel Xeon(r) E5-2686 v4), 8GB RAM, ボリュームタイプ gp2 (100IOPS) / 30GB, パブリック接続
端末
DELL OPTIPLEX 9020, Intel(R) Core(TM) i3-4130 CPU @ 3.40GHz, Memory 8 GB, OS : Ubuntu 16.04 LTS (Ubuntu 5.4.0-6ubuntu1 16.04.4)
通信方法
指定時刻に wget でサーバ上に設置した 40 MBytes のファイルを取得 iperf3 で 300 秒間指定サーバと TCP 通信

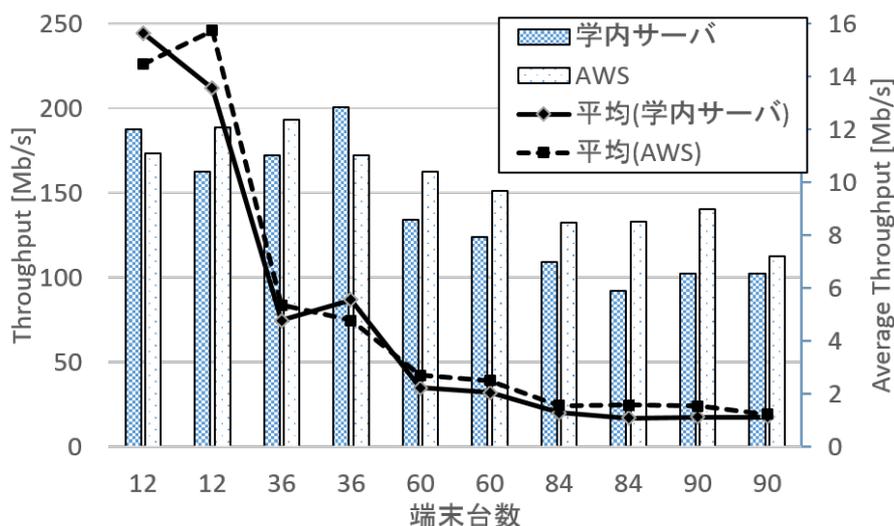


図 4: 端末数を変化させた時のスループット特性 (wget)

これは、今回はクラウドサーバを AWS 東京リージョンに設置したため十分低遅延であったことや、クラウドサーバのディスクを 100 IOPS で確保したことで、学内サーバよりも高速処理が可能であったためだと考えられます。この結果から遅延や電波干渉の影響を受ける無線 LAN でも、クラウドサーバは十分活用できることが分かりました。但し、端末数が 60 台以上で wget により AWS サーバと通信する場合、通信を完了できなかった端末が平均して約 2 台、iperf3 では平均 1 台発生しました。これは遅延や経路上でのパケット廃棄の影響を受けたためではないかと考えられます。

続いて、図 6 に学内サーバと通信した時の端末間におけるスループットの標準偏差を示します。図 6 より wget よりも iperf3 の方が端末間におけるスループットのばらつきが大きいことが分かります。これは先ほど述べたように iperf3 では通信時間内で TCP 輻輳ウィンドウを拡大できた端末が高いスループットを獲得しているのに対して、wget では 40 MBytes のデータを取得した端末から通信を終えていくので、スループットの差が iperf3 よりも広がらないためです。とはいえ、図 6 中、標準偏差が最も小さくなる場合 (wget による通信の 1 回目、端末数が 60 台) でも、最小・最大スループットの差は約 6.5 倍 (最小 2.24 Mb/s, 最大 14.42 Mb/s) と無視できるような差ではありませんでした。よって参加者が多く大容量通信が必要な講義では、班分けすることで通信の重複時間をずらすなどの工夫が必要になると考えられます。

3.2 AP 稼働数を変化 (2 ~ 4 台)

次に AP 1 台あたりの適切な端末収容数をどのように定めることができるか検討しました。本学ではこれまでの運用経験や実験結果 [7] から 1 AP あたりの収容端末数は 50 台を目安にしてきました。しかし、BYOD による講義を想定すると 1 AP あたりの収容数を下げて余裕を持たせる必要があると考えられます。そこで端末数の変化に加えて AP の稼働数を 2, 3, 4 と変化させた時のスループット特性と、各試行における通信の完了率を調査しました。結果を図 7, 8 に示します。なお以降の実験での通信先は学内サーバです。

図 7 より、wget では端末数が 12 台の場合は AP 稼働数が 2 台であっても、4 台の時と比較して約 80 ~ 90 % のスループットを獲得できますが、36 台以上になると約半分程度まで低下しました。さらに通信の完了率を見ると、AP の稼働数が 2 台の場合、60 台以上で完了できない端末が生じ、90 台ではそれぞれの試行で約 10 % と 20 % の端末が通信を完了できませんでした。

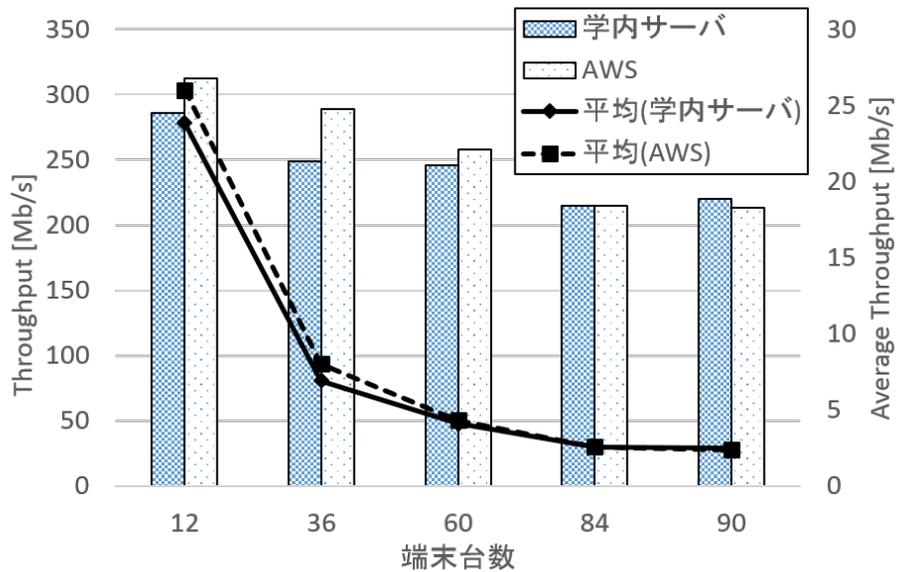


図 5: 端末数を変化させた時のスループット特性 (iperf3)

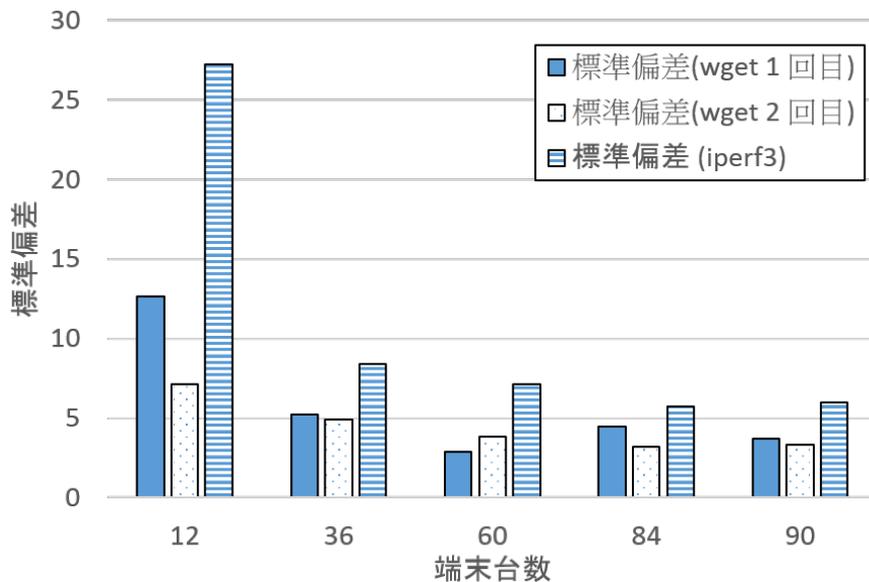


図 6: 端末数を変化させた時の標準偏差 (AWS サーバ)

一方, iperf3 では図 8 より端末数が 36 台以上となると通信を完了できない端末が発生すること, また端末数の増加に伴って総スループット特性は低下するが, AP の稼働数が 2 台の場合は他の場合よりも低下率が高いことが分かりました。そこで AP の稼働数と総スループットの比率がどのように変化するかを調べるため, AP の稼働数が 2 台の時の総スループットで AP の稼働数が 3, 4 台時の総スループットを割って正規化したものを図 9 に示します。図 9 より端末数が 36 台以下の場合, 総スループットは AP の稼働数にほぼ比例しており, それぞれ約 1.5 倍, 2 倍です。一方, 端末数が 60 台を超えると, AP の稼働数が 3, 4 台の総スループットは 2 台と比較して稼働数の比よりも高くなっています。例えば端末数が 90 台の場合, AP 稼働数 2 台の総スループットは 71.87 Mb/s であるのに対して, 4 台では 220.25 Mb/s と約 3 倍であり, 稼働数の比である 2 倍よりも高くなっています。よって, 本実験では 1 AP あたりの端末収容数が 30 を超えるとフレーム衝突によるスループット低下が顕著になり,

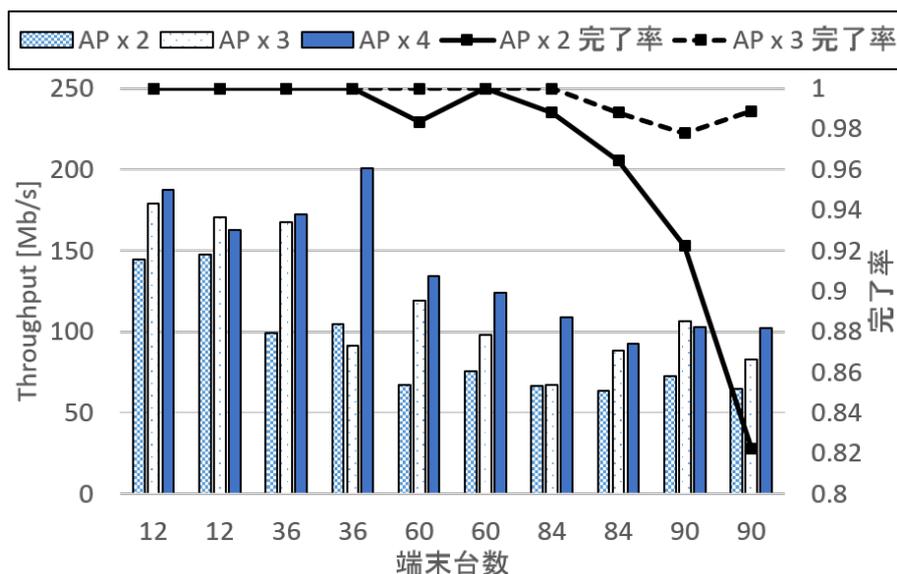


図 7: AP 稼働数を変化させた場合のスループット特性と完了率 (wget)

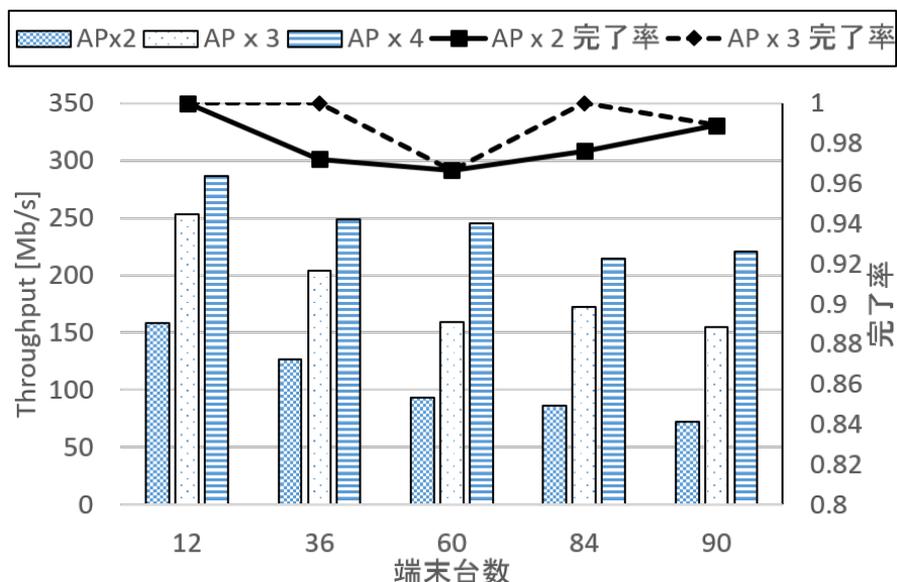


図 8: AP 稼働数を変化させた場合のスループット特性と完了率 (iperf3)

AP 稼働数に比例したスループットの獲得が困難になることが分かりました。

以上の結果から、高い通信負荷が想定される講義に対応するためには、1 AP あたりの端末収容数の目安は約 30 台までに抑える必要があると考えられます。但し講義中に Windows Update や iOS update 等により大容量通信を継続的に行う端末が存在すると、この条件をそれらの通信だけで満たしてしまい講義に支障を来す恐れがあるため、講義用の無線 LAN に帯域制御やフィルタリングなどを実施することも検討する必要があります。

3.3 チャンネルボンディングの利用

本節では、チャンネルボンディングを用いることで総スループットを改善し収容端末数を拡大できるかどうかについて調査しました。以前行った本学における無線チャンネルの使用状況調査 [8] から、他無線

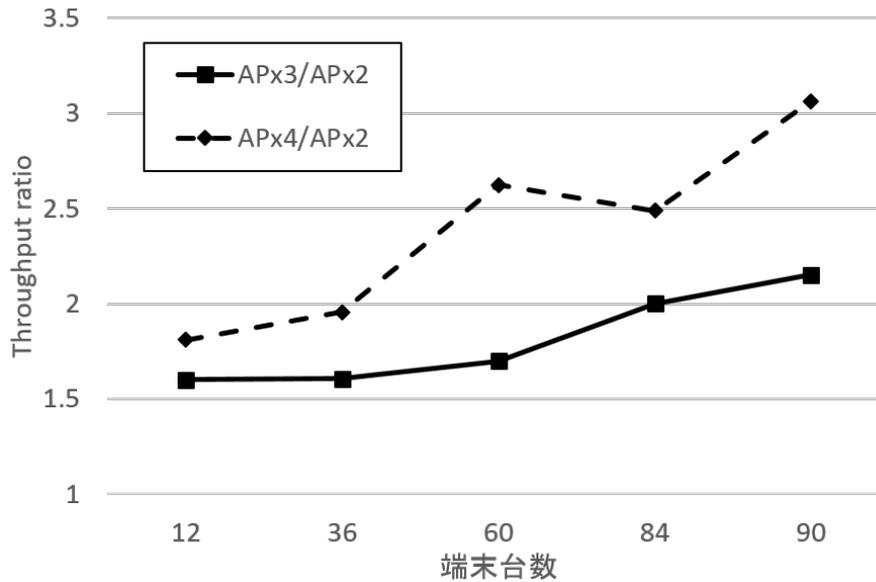


図 9: 正規化スループット特性 (iperf3)

LAN システムからの電波干渉が少ない場合と多い場合を想定して使用する総チャンネル幅は 80 MHz と 160 MHz とし、稼働させる AP 数とチャンネルボンディングを表 2 に示すように変化させてスループットを計測しました。

総チャンネル幅を 80 MHz (AP に設定するチャンネル幅は 20 MHz ないし 40 MHz) とした場合の結果を図 10, 11 に示します。図 10 より, wget の場合は AP を 2 台にしてチャンネルボンディングした方が総スループットは高いのに対して, 図 11 から iperf3 では殆ど差は無いもののチャンネルボンディングせずに AP を 4 台にした方が総スループットは高くなりました。これは 3.1 節で述べたように指定時刻まで通信を継続する iperf3 では稼働 AP 増加による端末数の分散と CSMA/CA 送信機会増の効果が出たためであると考えられます。一方で大きな差は無いことから, 40 MHz のチャンネル幅を利用できる電波環境であれば, AP 台数はチャンネルボンディング無しの場合よりも半分に削減可能であると言えます。言い換えれば 1 AP あたりの想定収容数を 60 台に拡張できることとなります。

続いて総チャンネル幅を 160 MHz (AP に設定するチャンネル幅は 40 MHz ないし 80 MHz) とした場合の結果を図 12, 13 に示します。図 12, 13 より 160 MHz のときは AP を 4 台にした方が総スループットは高いことが分かります。この理由を調査するために, 80 MHz のチャンネルボンディングを設定した AP を 2 台稼働させ, wget により通信する端末数を 90 とした場合のデータレートを OmniPeek を用いて計測しました。

プライマリチャンネルである 100 チャンネルを最初の 50 秒間計測した時のデータレート累積度数分布を図 14 に示します。この図 14 より, 端末は 80 MHz 幅を活かした高速なデータレートで送信している場合もありますが, 一方で全体の 80 % が 400 Mb/s 以下のデータレートで送信していることが分かります。これは衝突によるパケットロスを検知した端末がデータレートを低下させているためだと考えられます。実際この試行におけるフレームの再送率は約 23 % と非常に高くなっていました。よって多数の端末が接続し高負荷状態が続く場合は 1 AP につき 80 MHz のチャンネル幅を利用して 2 台の AP を稼働させるよりも, AP の追加設置は必要となるがチャンネル幅を半分の 40 MHz として 4 台の AP を稼働させ CSMA/CA による送信機会を 2 倍にした方が総スループット特性は高くなる可能性が高いことが分かりました。

本節で取得した結果より, 1 AP あたり 40 MHz のチャンネルボンディングは積極的に活用することで収容端末数を増やすことができるが, 80 MHz のチャンネルボンディングでは電波干渉や高負荷による端

表 2: チャンネルボンディング幅と稼働 AP 数

総チャンネル幅	AP 稼働数
80 MHz	2 (40 MHz × 2)
	4 (20 MHz × 4)
160 MHz	2 (80 MHz × 2)
	4 (40 MHz × 4)

未間のフレーム衝突が見込まれる場合、高速なデータレートを活かせず十分なメリットを得ることが難しいことが分かりました。

また、これまでに得られた実験結果からキャンパス内における BYOD を想定した無線 LAN 運用指針としては、電波環境が許すなら 40 MHz のチャンネルボンディングを活用しつつ見込まれる収容端末数に応じて AP を増設し、併せて講義用無線 LAN に優先制御や帯域制御を実施することがあげられます。

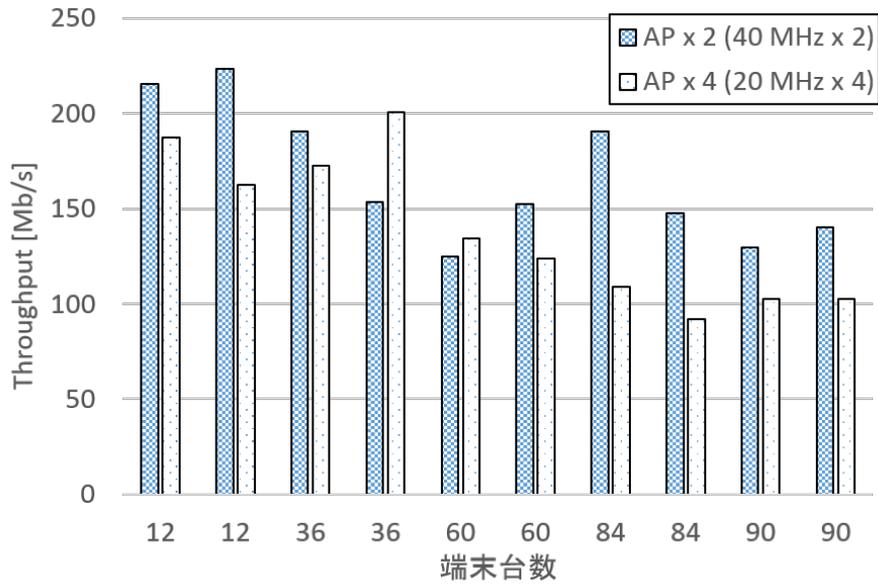


図 10: スループット特性 (wget, 総チャンネル幅 80 MHz)

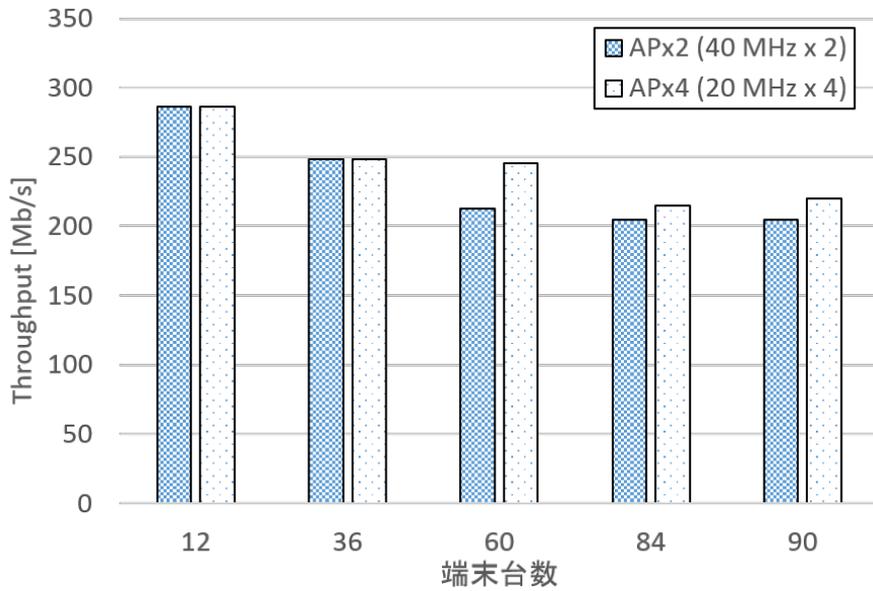


図 11: スループット特性 (iperf3, 総チャンネル幅 80 MHz)

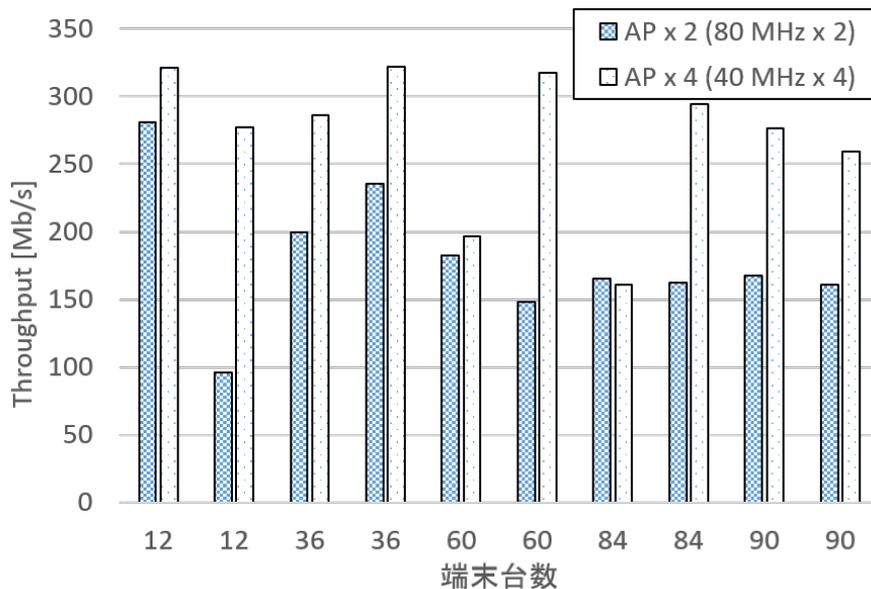


図 12: スループット特性 (wget, 総チャンネル幅 160 MHz)

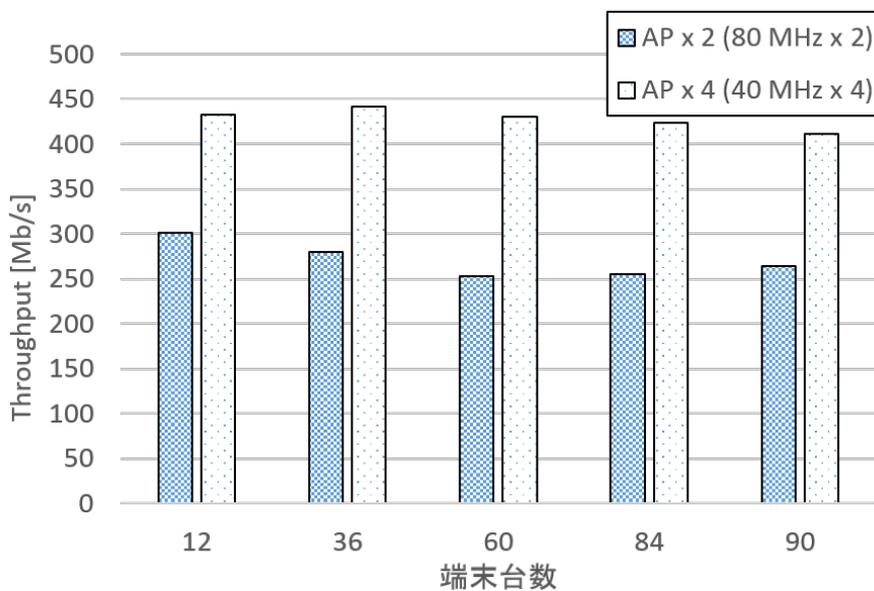


図 13: スループット特性 (iperf3, 総チャンネル幅 160 MHz)

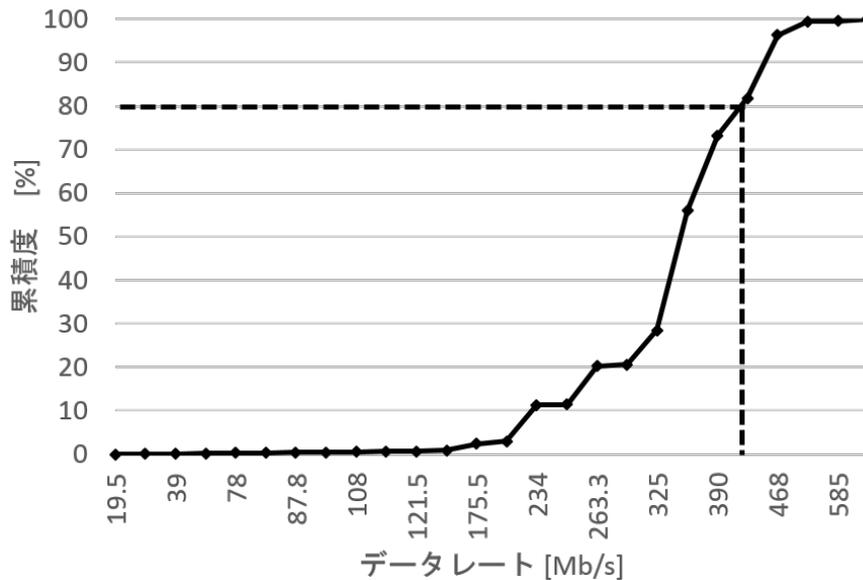


図 14: データレート累積分布図 (wget, 総チャネル幅 160 MHz, channel 100)

4 まとめ

本稿では大学での BYOD を活用した講義を想定し、無線 LAN 整備の設計指針を得るために講義室で実施した通信実験について報告しました。まず端末数を変化させて学内サーバとクラウドサーバとの無線 LAN 通信を調査し、クラウドサービス利用が十分実用的であることを示しました。また稼働 AP 数を変化させた計測結果より、1 AP あたりの収容端末数としては約 30 台を目安にできることを示しました。続いてチャネルボンディングによる総スループットの改善と収容端末数拡大の可能性について調査しました。使用する総チャネル幅を 80 MHz と 160 MHz として取得した実験結果から、1 AP あたり 40 MHz のチャネルボンディングを積極的に活用することで収容端末数を増やすことができるが、80 MHz のチャネルボンディングでは電波干渉や端末間のフレーム衝突が見込まれる場合は高速なデータレートを活かせず十分なメリットを得ることが難しいことを明らかにしました。以上の実験結果より、BYOD を想定した無線 LAN の整備運用指針としては、1 AP につき 30 台の収容端末数を想定して AP を整備しつつ、電波環境が許すなら 40 MHz のチャネルボンディングを活用し、併せて講義用無線 LAN には優先制御や帯域制御を導入することが考えられます。本学ではこの指針に従って BYOD に対応する無線 LAN 整備を進めていく予定です。

謝辞

本実験を実施するにあたっては本学情報科学センター甲斐郷子准教授、飯塚キャンパス技術部職員の井上純一氏と和田数字郎氏に協力頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 福田 豊, 畑瀬 卓司, 富重 秀樹, 林 豊洋: BYOD による講義を想定した無線 LAN 通信実験, 情報処理学会研究報告, 情報処理学会第 80 回全国大会, 2D-01, 2018.

- [2] 福田 豊, 畑瀬 卓司, 富重 秀樹, 林 豊洋: BYOD 環境整備に向けた無線 LAN 通信実験, 情報処理学会技術研究報告 (インターネットと運用技術研究会 通算第 40 回), 2018.03.05.
- [3] IEEE: *IEEE Standard for Information technology– Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks– Specific requirements–Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications–Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz*, IEEE 802.11ac-2013, 2013.
- [4] 中村 豊, 福田 豊, 佐藤 彰洋: 九州工業大学における全学セキュア・ネットワークの導入について, 情報処理学会技術研究報告 (インターネットと運用技術研究会), Vol. 2015-IOT-28, No. 20, pp. 1-6, 2015.03.06.
- [5] 福田 豊, 中村 豊, 佐藤 彰洋: 九州工業大学・全学セキュアネットワーク導入における無線 LAN 更新, 情報処理学会技術研究報告 (インターネットと運用技術研究会), Vol. 2015-IOT-28, No. 21, pp. 1-6, 2015.03.06.
- [6] G. Bianchi, “ Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, ” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, pp. 535–547, March 2000.
- [7] 大西淑雅 他: mPage を用いた小テスト実施のための予備実験, 情報処理学会研究報告, 教育学習支援情報システム, Vol.2010-CLE-2, No.8, pp.1-8, 2010.
- [8] 福田 豊, 中村 豊: 九州工業大学・全学セキュアネットワークにおける無線 LAN 利用について, 情報処理学会技術研究報告 (インターネットと運用技術研究会), Vol. 2016-IOT-32, No. 1, pp. 1-8, 2016.03.03.