

BYOD環境整備に向けた無線LAN通信実験

福田 豊^{1,a)} 畑瀬 卓司^{1,b)} 富重 秀樹^{1,c)} 林 豊洋^{1,d)}

受付日 2018年6月25日, 採録日 2018年12月4日

概要: 大学の講義に個人必携 PC 等の移動端末を活用する動きが広がっている。講義においてそれら移動端末の主な通信手段は無線 LAN であり, 講義室等で高密度に端末が存在する状況でも円滑に講義できる通信環境を提供しなければならない。その環境整備のためには, 1 Access Point (AP) あたりの収容端末数やチャンネルボンディングの導入等を考慮した設計指針が必要となる。そこで本稿では端末数や稼働 AP 数, チャンネルボンディングの幅を変えながら無線 LAN 通信実験を行い, AP あたりの収容数の目安やチャンネルボンディングの有効活用法を明らかにした。

キーワード: BYOD, キャンパス無線 LAN, IEEE 802.11ac

WiFi Communication Experiments Considering BYOD in the Campus

YUTAKA FUKUDA^{1,a)} TAKUJI HATASE^{1,b)} HIDEKI TOMISHIGE^{1,c)} TOYOHIRO HAYASHI^{1,d)}

Received: June 25, 2018, Accepted: December 4, 2018

Abstract: The WiFi design guide to introduce the BYOD in the campus is considered in this paper. We measure WiFi communications in the classroom which has IEEE 802.11ac enabled Access Points (APs). From obtained result, we derive the practical guideline such as acceptable number of associations for each AP and effective width of channel bonding.

Keywords: BYOD, campus WiFi, IEEE 802.11ac

1. はじめに

大学における講義に個人必携 PC やタブレット, あるいはスマートフォン等の移動端末を活用する動きが広がっている。それらの移動端末の主な通信手段は無線 LAN であり, 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, 高密度で端末が存在する状況でも円滑な無線 LAN 通信を提供することが, 教育活動上必要となる。

この要求を満たす無線 LAN 環境を整備するためには, 多数端末の同時接続と通信による高負荷にも耐えうよう

な設計が求められる。そのためには Access Point (AP) の設置や収容端末数に関する指針を定めるとともに, IEEE 802.11n 以降導入されたチャンネルボンディングが通信容量の大容量化にどのように寄与するかを調査し, 活用を検討しなければならない。

そこで我々は, 教室における BYOD 講義を想定して, 端末数や稼働 AP 数, チャンネルボンディング幅を変化させながら `wget` と `iperf3` を用いて無線 LAN 通信のスループットを計測し, AP 1 台あたりの収容端末数の目安や実現可能な通信スループット, チャンネルボンディングの有効活用範囲を明らかにした。

2. 実験

本章では, 実験に使用した講義室とその無線 LAN 環境, および実験内容について説明する。

¹ 九州工業大学情報科学センター
Information Science Center, Kyushu Institute of Technology,
Kitakyushu, Fukuoka 804-8550, Japan

a) fukuda@isc.kyutech.ac.jp

b) hatase@isc.kyutech.ac.jp

c) tomisige@isc.kyutech.ac.jp

d) toyohiro@isc.kyutech.ac.jp

2.1 実験環境

本研究では九州工業大学飯塚キャンパスの AV 講義室 (207m²) に設置してある端末で無線通信実験を行った。AV 講義室の見取り図を図 1 に示す。AV 講義室は九州工業大学情報工学部の情報教育用講義室 (1 学科約 90 名) として利用されている。座学と実習が同時に実施できるように講義室中央に座学用の机があり、座学用机を取り囲むように端末用机が据えられている。AV 講義室の四隅の天井には IEEE 802.11ac [1] 規格に対応した Aruba AP-335 が 4 台 (NE, NW, SE, SW) 取り付けられている。

端末用机の上には 1000 BASE-T 有線 LAN で接続された 90 台の端末 (Ubuntu 16.04 LTS) が設置されており、この端末に IEEE 802.11ac に対応した USB WiFi 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 IEEE 802.1X 認証によりテスト用 SSID に接続した (図 2)。各端末は NTP (Network Time Protocol) で同期しており、at コマンドで指定した時刻にサーバと無線 LAN 経由で通信するようにした。よって指定時刻に設定台数分の端末がサーバといっせいに通信することになる。

4 台の Aruba AP-335 は PoE Switch である Juniper EX2200-24P を経由して Aruba 無線 LAN コントローラ 7210 に収容されている (図 2)。EX2200-24P は 1 Gb/s で

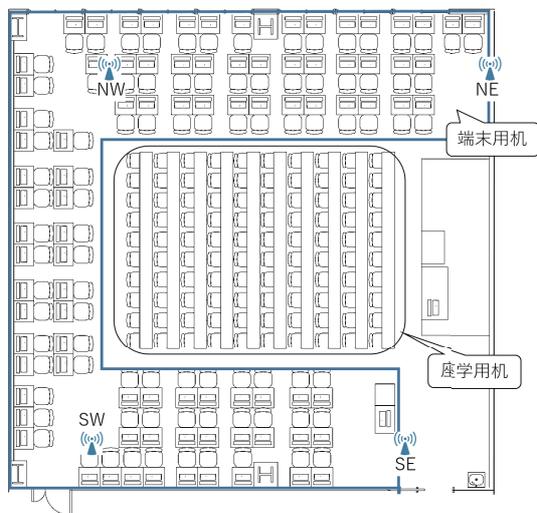


図 1 AV 講義室
Fig. 1 AV lecture room.

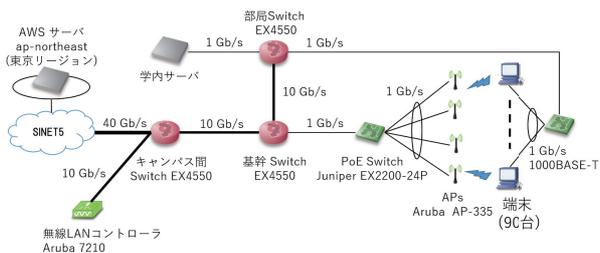


図 2 接続構成
Fig. 2 Network diagram.

九州工業大学の基幹 Switch である Juniper EX4550 と接続しており、EX4550 はキャンパス間接続用 Switch である EX4550 を経由して無線 LAN コントローラ 7210 と接続されている [2], [3]。また基幹 Switch の EX4550 からコントローラ間の接続速度はすべて 10 Gb/s、コントローラのスループット性能は 20 Gb/s [4] である。学内サーバは基幹 Switch から部局 Switch を経由して接続されており、通信速度は基幹 Switch と部局 Switch 間は 10 Gb/s、部局 Switch と学内サーバ間は 1 Gb/s である。以上より、無線 LAN を除く有線部分の接続速度は 1 Gb/s 以上を確保している。

図 3 に示すとおり、日本において 5 GHz 帯は 20 MHz の帯域を使う場合、W52, W53, W56 の合計 19 チャンネルを利用することができる。よって 20 MHz の帯域を AP に設定する場合は、19 台まで相互干渉なしに設置できることになる。チャンネルボンディングを利用して 40 MHz に拡張する場合は、W52/53 それぞれ 2 チャンネルずつ合計 4 チャンネル、W56 で 5 チャンネル、全体で 9 チャンネル確保できる。より高速化のために 80 MHz を用いる場合は、W52/53 それぞれで 1 チャンネルずつ合計 2 チャンネル、W56 で 2 チャンネル、合計 4 チャンネル、160 MHz を用いる場合は W52/53 あわせて使用して 1 チャンネル、W56 で 1 チャンネル、合計 2 チャンネルとなる (図 3)。

本実験では事前に AV 講義室で 5 GHz 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、実験期間中はテスト用 SSID のみを AP に設定するとともに競合無線 LAN の停止を依頼した。W56 帯では 20 MHz のチャンネルを 11 確保できるが、表 3 の構成 A~F に示すとおり、実験内容に応じてチャンネルボンディングの幅や AP 稼働数を変化させた。

なお、他の無線 LAN システムとの競合による干渉が発生する場合、IEEE 802.11ac ではチャンネルボンディング時にプライマリチャンネルで競合が発生するのか、それともセカンダリ以降で発生するのかによって挙動が異なり、また

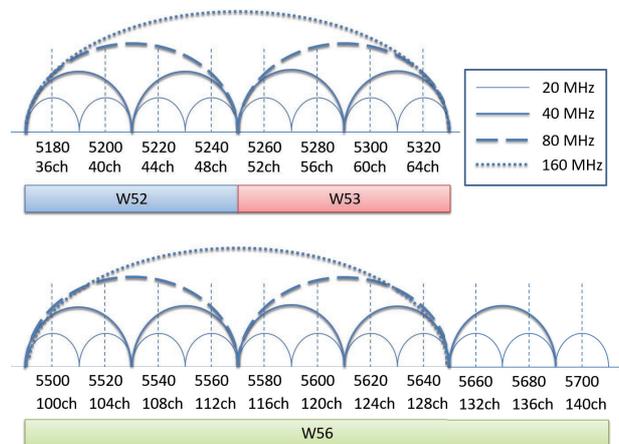


図 3 5 GHz 帯チャンネル構成 (日本)
Fig. 3 5 GHz channel allocation in Japan.

表 1 実験環境

Table 1 Experimental environment.

無線 LAN
HPE Aruba 7210, AP-335 3 × 3 MIMO wave2 対応, W56 帯を利用
USB WiFi アダプタ
NEC PA-WL900U, BUFFALO WI-U3-866DS, I-O DATA WN-AC867U (2 × 2 MIMO)
学内サーバ
HP ProLiant DL360 Gen9 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2660 v3 @ 2.60 GHz, 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 : 8,192 MB
クラウドサーバ
Amazon EC2, 設置リージョン : ap-northeast-1 (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) / 30 GB, パブリック接続
端末
DELL OPTIPLEX 9020, Intel(R) Core(TM) i3-4130 CPU @ 3.40 GHz, Memory 8 GB, OS : Ubuntu 16.04 LTS (Ubuntu 5.4.0-6 ubuntu1 16.04.4)
通信方法
wget : サーバ上に設置した 40 MBytes のファイルを取得 iperf3 : サーバと 300 秒間 TCP 通信 (セッション数は 1, ダウンリンク方向)

機材の実装方法によって性能が異なる等問題が複雑となる [5]. そこで本実験では適切な収容台数の調査を優先させ, 他無線 LAN との競合時における通信特性調査は今後の調査項目とした.

IEEE 802.11n から導入されたアンテナ技術である MIMO (Multiple Input Multiple Output) は, IEEE 802.11ac では 8 × 8 まで拡張されたが, 本実験で使用した Aruba AP-335 では 4 × 4 MIMO を有している. 一方, USB WiFi アダプタは 2 × 2 MIMO であるため, 2 本のアンテナを用いた通信となる. この MIMO 数や電波強度, チャネルボンディングの有無等によって定まる IEEE 802.11ac のデータレートを表 2 に示す. 今回使用した USB WiFi アダプタ (全機種 2 × 2 MIMO 対応) では, 標準の 20 MHz を用いる場合 (チャネルボンディングなし) の最大データレートは 173.3 Mb/s, 40 MHz のチャネルボンディングを用いると 400 Mb/s, 80 MHz のチャネルボンディングでは 866.7 Mb/s となる.

一般的に無線 LAN AP の通信性能はデータリンク層の通信速度で表記されるが, 実際に達成できるデータリンク層のスループットは CSMA/CA によるオーバーヘッドが加味されるため, 上記のデータレートの約半分となることが知られている. また同一 AP に接続する端末が増えると, 端末間の競合によるフレーム衝突が発生し総スループットはさらに低下する [6]. なお, 今回の実験でデータレートが

表 2 IEEE 802.11ac におけるデータレート [Mb/s] (Short Guard Interval, 400 ns)

Table 2 IEEE 802.11ac data rates [Mb/s] (Short Guard Interval, 400 ns).

Spatial Stream	VHT MCS	Modulation	Coding	データレート [Mb/s]		
				20 MHz	40 MHz	80 MHz
1	0	BPSK	1/2	7.2	15	32.5
	1	QPSK	1/2	14.4	30	65
	2	QPSK	3/4	21.7	45	97.5
	3	16 QAM	1/2	28.9	60	130
	4	16 QAM	3/4	43.3	90	195
	5	64 QAM	2/3	57.8	120	260
	6	64 QAM	3/4	65	135	292.5
	7	64 QAM	5/6	72.2	150	325
	8	256 QAM	3/4	86.7	180	390
2	9	256 QAM	5/6	n/a	200	433.3
	0	BPSK	1/2	14.4	30	65
	1	QPSK	1/2	28.9	60	130
	2	QPSK	3/4	43.3	90	195
	3	16 QAM	1/2	57.8	120	260
	4	16 QAM	3/4	86.7	180	390
	5	64 QAM	2/3	115.6	240	520
	6	64 QAM	3/4	130.3	270	585
	7	64 QAM	5/6	144.4	300	650
3	8	256 QAM	3/4	173.3	360	780
	9	256 QAM	5/6	n/a	400	866.7
	0	BPSK	1/2	21.7	45	97.5
	1	QPSK	1/2	43.3	90	195
	2	QPSK	3/4	65	135	292.5
	3	16 QAM	1/2	86.7	180	390
	4	16 QAM	3/4	130	270	585
	5	64 QAM	2/3	173.3	360	780
	6	64 QAM	3/4	195	405	n/a
7	64 QAM	5/6	216.7	450	975	
	8	256 QAM	3/4	260	540	1170
	9	256 QAM	5/6	288.9	600	1300

最も高いのは AP 2 台に 80 MHz のチャネルボンディングを設定 (866.7 Mb/s × 2 AP) した場合で, 合計スループットが有線の 1 Gb/s を超える可能性がある. この点は事前評価を行う 3.1 節で確認する.

サーバと端末間の通信には wget と iperf3 を使い, サーバから端末方向へ通信を行った. 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, 後者は動画視聴等, 連続してつねに通信が生じる場合をそれぞれ想定している.

wget を用いた通信では, at コマンドで指定した時刻に各端末がサーバ上に設置した 40 MBytes のファイルをいっせいに取得する実験を 2 回実行し, 全台が完了するまでの時間を date コマンドで計測した. サーバの同一のファイルを全端末が取得するので実質的にはサーバのディスクキャッシュバッファからの転送になると考えられる. 一

表 3 チャンネル割当て (W56)
Table 3 Channel assignment (W56).

構成 ID	AP 稼働数	チャンネル幅 [MHz]	総チャンネル幅 [MHz]	AP NE channel	AP NW channel	AP SE channel	AP SW channel
A	4	20	80	100	108	116	124
B	2	20	40	停止	停止	116	124
C	3	20	60	100	停止	116	124
D	2	40	80	停止	停止	116–120	124–128
E	4	40	160	100–104	108–112	116–120	124–128
F	2	80	160	停止	停止	100–112	116–128

方, 端末では取得したファイルをディスクに書き込まず /dev/null へ出力し, ディスク I/O 性能が影響を与えないようにした. 実行した wget コマンドを以下に示す.

```
wget --output-document=/dev/null
-c http://A.B.C.D:8080/40mb
```

A.B.C.D はサーバの IP Address, 40mb はファイル名である. 通信が中断した場合はダウンロードが完了しているところから再開するように -c オプションを付けている. なお, オプションで明示的に指定していないが, タイムアウトは 900 秒, 再試行回数は 20 回 (それぞれ wget コマンドの初期値) である.

wget 実験時の総スループットは全端末が 40 MBytes の通信を終えるまでに要する時間を wget の標準出力から確認し, 以下の式に従って求めた.

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

iperf3 を用いた実験では, 通信プロトコルは TCP, サーバからのセッション数は 1 とし, at コマンドで指定した時刻に端末に向けてデータを送信した. この実験での iperf3 はオンメモリのダミーデータを通信帯域の制限を設けずに送信し続け, 転送バイト数にかかわらずオプションで指定する秒数経過後に通信を打ち切る. 各端末で実行した iperf3 コマンドを以下に示す.

```
iperf3 -c A.B.C.D -V -t 300 -i 1 -R -p X
```

X は端末ごとに指定する iperf3 サーバのポート番号で, 全端末異なっている. 端末側からコマンドを実行するので, -R オプションでサーバからデータが送信されるよう指定している. また, 通信時間は -t オプションで 300 秒に設定した.

iperf3 実験時の総スループットは, -i オプションにより標準出力に 1 秒間隔で出力される転送量を用い, 通信時間 300 秒のうち, 前後の 10 秒間ずつを除いた 280 秒間の全端末の転送量から以下の式に従って導出した.

$$\text{総スループット (iperf3)} = \frac{(\text{各端末の } 10 \sim 290 \text{ 秒間の総転送量の合計})}{280 \text{ 秒}}$$

なお, 今回の計測対象である無線 LAN 以外の部分が十分な性能を持っているかどうかを有線通信で確認した. 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 500 MBytes のファイルを wget で取得する実験を 3 回実行したところ, 総スループットの平均は 918.59 Mb/s であった. 同様に iperf3 も学内サーバから 90 台の端末に向けて 300 秒間通信を行う実験を 3 回行い, 総スループットの平均は 943.7 Mb/s であった. よって, スループットは図 2 より学内サーバと端末間の有線接続のボトルネックである 1 Gb/s に律速されていると考えられ, サーバや有線ネットワーク機器はこれに対して十分な能力を持っているといえる. 以上の実験環境を表 1 に示す.

2.2 実験内容

まず始めに AP と端末を 1 台ずつにしてチャンネル幅を 20~80 MHz まで変化させ, iperf3 で学内サーバと通信して本実験環境における基本性能を確認した.

次に 4 台の AP を用いて実験を行った. 各 AP のチャンネルは表 3 の構成 A に示すとおり AP 稼働数 4, 総チャンネル幅 80 MHz (20 MHz × 4 APs) とし, AP 間の干渉が発生しないようチャンネルを割り当てた. 端末数は図 4, 図 5, 図 6, 図 7, 図 8 に示すように 12, 36, 60, 84, 90 台と段階的に変化させ, 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 WiFi アダプタは各試行で同数になるように設定した. 各端末は学内サーバまたは AWS (Amazon Web Service) 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た.

続いて収容端末数について検討した. 九州工業大学では一斉アクセスへの対応 (Moodle へのログイン等) を想定して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 台を目安にしてきた. しかし, BYOD 講義では同時に大容量の通信が発生する可能性があり, 1 AP あたりの収容数を下げて通信容量に余裕を持たせる必要があ

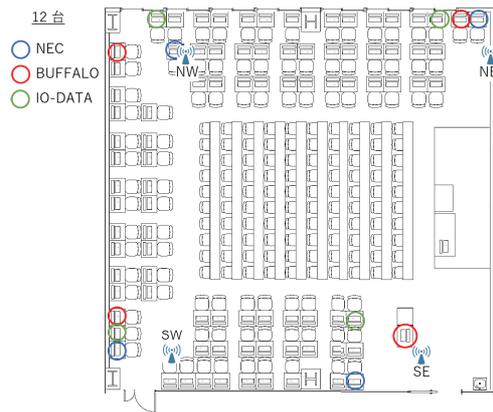


図 4 12 台稼働
Fig. 4 12 stations.

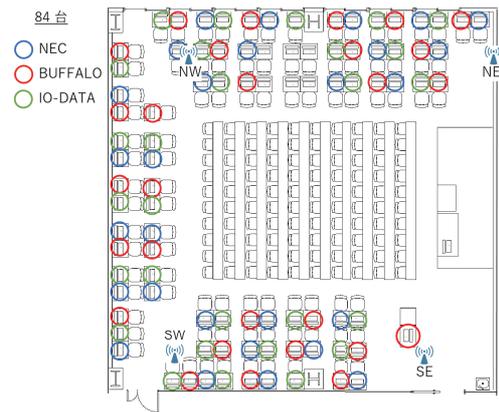


図 7 84 台稼働
Fig. 7 84 stations.

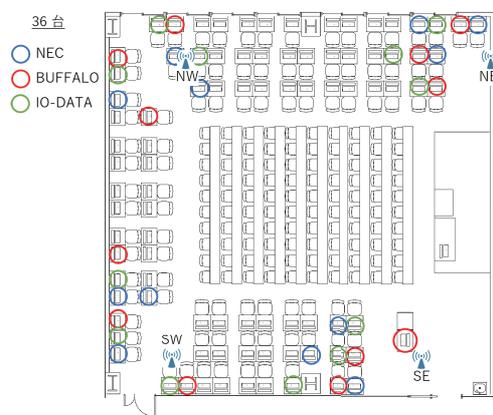


図 5 36 台稼働
Fig. 5 36 stations.

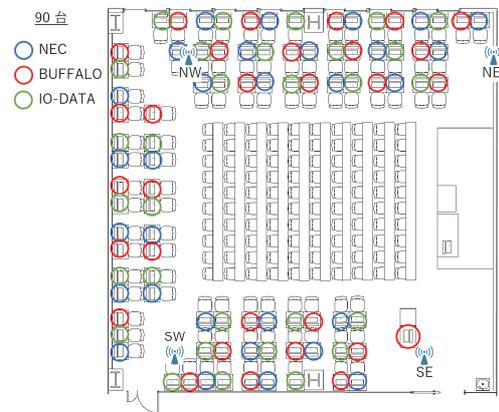


図 8 90 台稼働
Fig. 8 90 stations.

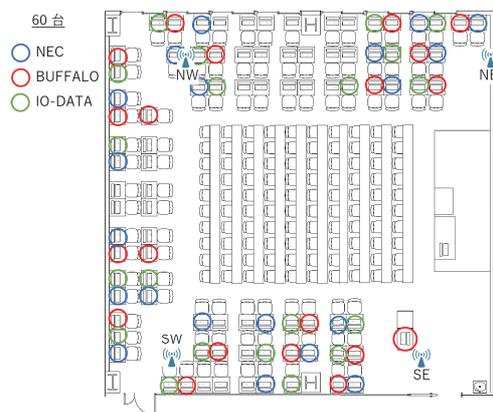


図 6 60 台稼働
Fig. 6 60 stations.

ると考えられる。そこで端末数の変化に加えて AP の稼働数を 2, 3, 4 と変化させたときの AP 1 台あたり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た。各 AP におけるチャンネルは表 3 の構成 A, B, C (総チャンネル幅は 40 (20 MHz × 2 APs) ~ 80 MHz (20 MHz × 4 APs)) とし、AP 間の干渉が発生しないよう設定した。

最後に、IEEE 802.11ac チャンネルボンディングの有効活用

範囲について調査した。以前行った九州工業大学における無線チャンネルの使用状況調査 [3] から、他無線 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、使用する総チャンネル幅は 80 MHz と 160 MHz とした。そして表 3 よりチャンネル幅 80 MHz の場合は、構成 A (20 MHz × 4 APs) と D (40 MHz × 2 APs)、チャンネル幅 160 MHz の場合は、構成 E (40 MHz × 4 APs) と F (80 MHz × 2 APs) としてチャンネルを設定し、各チャンネルボンディング利用時の AP の稼働数と 1 AP あたりのスループットについて調査した。

3. 実験結果

本章では取得した実験結果について述べる。最初に AP と端末を 1 台にして学内サーバと通信を行い、実験環境の基本性能を確認した。次に AP を 4 台稼働させ、異なる数の端末が学内およびクラウドサーバと通信したときのスループット特性を示す。続いて端末数に加えて AP 稼働数も変化させ、1 AP あたりの端末収容数の目安を調査した。最後に AP 稼働数とチャンネルボンディングの関係を明らかにするためにチャンネルボンディング幅を 80 MHz と 160 MHz に設定し、取得結果から AP 稼働数とチャンネルボンディングの利用について考察する。

表 4 各チャネルボンディング幅におけるスループット (端末 1 台)

Table 4 Throughput performance with channel bonding.

チャネル幅	Throughput
20 MHz	105 Mb/s
40 MHz	197 Mb/s
80 MHz	243 Mb/s

3.1 事前実験

基本特性を確認するための事前実験として、AP と端末は 1 台、USB WiFi アダプタは BUFFALO とし、チャネル幅を 20~80 MHz まで変化させ iperf3 で 300 秒間学内サーバと通信したときのスループットを表 4 に示す。端末間の競合が発生しないため表 4 は、以降の各節で検討する 1 AP あたりのスループットの最大値の目安となる。加えてデータレートと実効スループットの関係については、たとえばチャネル幅が 20 MHz の場合、表 2 より最大データレートは 177 Mb/s だが、スループットは 105 Mb/s なので実効スループットは約 60% であり、得られるスループットは最大データレートの約半分程度となることも確認できる。

また、本実験における最大のデータレートは 80 MHz のチャネルボンディングを利用した 866.7 Mb/s であるが、表 4 より 1 AP あたりのスループットは 243 Mb/s であった。よって 3.4 節で考慮する AP 2 台に 80 MHz のチャネルボンディングを設定した場合でも総スループットは約 500 Mb/s となり、900 Mb/s 以上が計測された 2.1 節での有線ネットワーク実験と比較してはるかに低い値である。よって、本実験全体でボトルネックは AP と端末の無線 LAN 通信部分であることを確認できた。なお、他の USB WiFi アダプタでも同程度のスループットを獲得することを確認している。

3.2 端末数を変化 (構成 A (AP × 4 台), 端末 12~90 台)

APs を表 3 の構成 A に設定し、端末数を 12~90 台まで変化させたときの、wget の総スループットの 2 回の試行の平均と各端末でのスループットの平均を図 9 に示す。また同様に端末を変化させたときの、iperf3 による 300 秒間の通信のうち 10~290 秒分の総スループットと各端末でのスループットの平均を図 10 に示す。まず図 9 と図 10 を比較すると、iperf3 を用いた図 10 の方がスループット特性が高くなっている。これは、iperf3 では指定時間内につね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ある。また両図と表 4 を比較すると、端末数の増加にともなって 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る [6]。

次に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 双方で平均 1 Mb/s 以

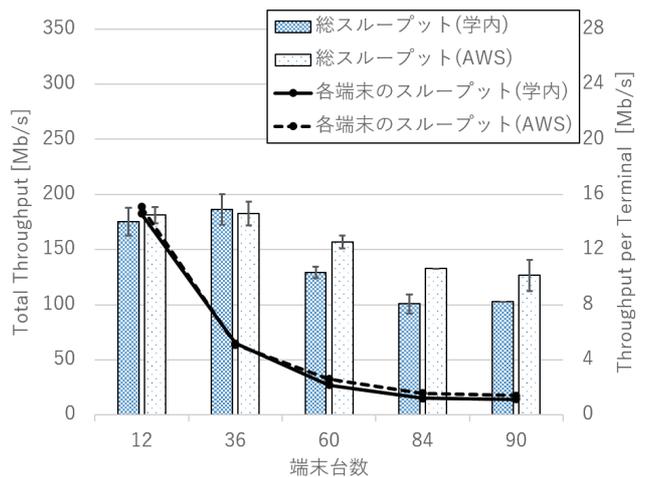


図 9 端末数を変化させたときのスループット特性 (wget)
Fig. 9 Throughput versus number of stations (wget).

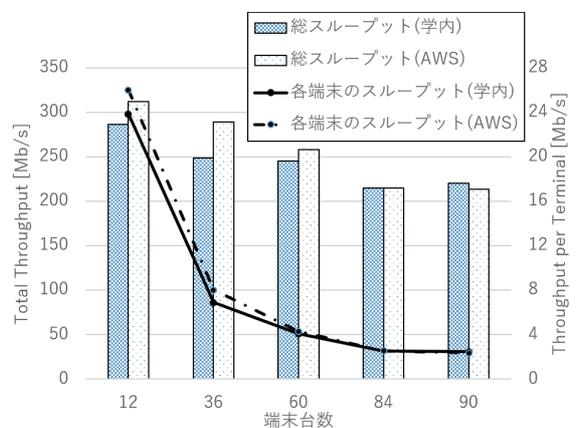


図 10 端末数を変化させたときのスループット特性 (iperf3)
Fig. 10 Throughput versus number of stations (iperf3).

上となった。iperf3 は動画を視聴する講義を想定しているが、端末台数が 90 台でも AP が 4 台あれば SD 画質程度の動画を視聴する環境は確保できることが分かった。しかしながら、たとえばより高画質の 3 Mb/s 以上を要求する HD 画質の場合は、図 10 の平均スループットより端末台数は約 60 台 (1 AP あたり 15 台) が目安となる。よって講義で HD 画質以上を用いる場合は、画質と受講者数を考慮して同時視聴が可能か検討しなければならない。

続いて、学内サーバと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 双方でほとん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った。これは、SINET5 との接続が 40 Gb/s と高速でありクラウドサーバを 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と、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る。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った。ただし、端末数が 60 台以上で wget によりクラウドサーバと

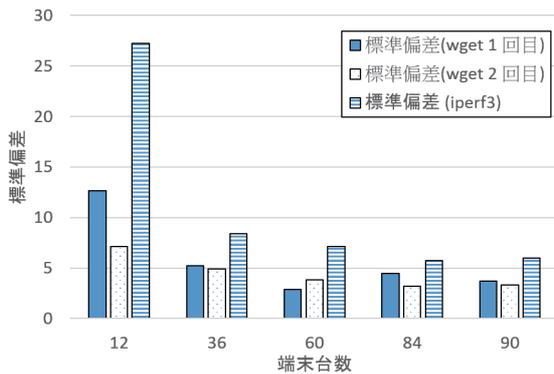


図 11 端末数を変化させたときの標準偏差 (クラウドサーバ)

Fig. 11 Standard deviation of throughput versus number of stations (cloud server).

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 台発生した。これは経路上でのパケット廃棄により通信を開始できなかったか、タイムアウトが発生して通信が中断してしまったためだと考えられる。

ここまでは総、平均スループット特性を見てきたが、各端末の獲得したスループットのばらつきを調査するため、学内サーバ通信時における各端末ごとのスループットをもとに導出した標準偏差を図 11 に示す。図 11 より wget よりも iperf3 の方が端末間のスループットのばらつきが大きいたことが分かる。iperf3 では一斉通信開始後、競合が悪化していく前に TCP cwnd (congestion window) サイズを拡大することができた端末は大きな cwnd サイズを維持するが、拡大前に輻輳に遭遇した端末は小さな cwnd サイズのままとなって端末間のスループット差が固定化され、図 11 のように端末間のスループットのばらつきが大きくなる。

一方、wget では 40 MBytes のデータを取得した端末から順次通信を終えていくので、最終的なスループット差は iperf3 よりも小さくなる。とはいえ、図 11 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) と大きい。よって wget で想定した講義資料等の一斉配布を行う場合は、受講者を班分けしていっせいの同時通信を回避する等の講義運営の工夫が必要になると考えられる。たとえば端末数が 90 台、配布するファイルサイズが 100 MBytes の場合、いっせいにダウンロードすると図 9 より端末が 90 台のときの総スループットは約 100 Mb/s なので、以下の式より 12 分かかることになる。

$$\begin{aligned} & \text{完了に要する時間} \\ &= \frac{(90 \times 100 \text{ MBytes} \times 8 \text{ bit})}{100 \text{ Mb/s}} = 720 \text{ 秒} \end{aligned}$$

そこで 30 台ずつ 3 つの班に分け、1 台の AP に 7 ないしは 8 台が接続すると、図 9 より端末が 36 台の総スループットは約 170 Mb/s なので、以下の式より 1 班あたり約 170

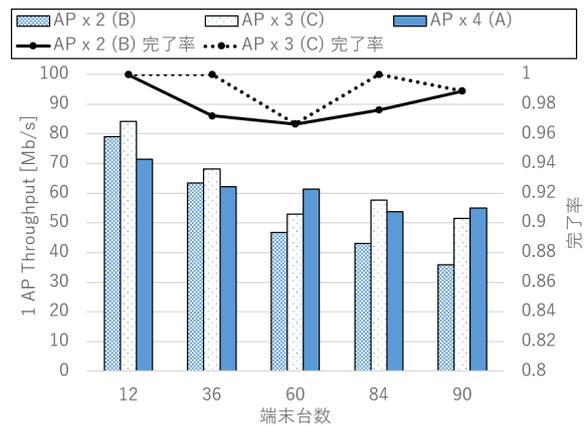


図 12 1 AP あたりのスループット特性と完了率 (iperf3)

Fig. 12 Throughput and connection completion rate an AP (iperf3).

秒となり、3 つの班合計でも 8 分 30 秒で完了することができる。

$$\begin{aligned} & \text{完了に要する時間} \\ &= \frac{(36 \times 100 \text{ MBytes} \times 8 \text{ bit})}{170 \text{ Mb/s}} = 170 \text{ 秒} \end{aligned}$$

3.3 AP 稼働数を変化 (構成 A, B, C (AP 2~4 台))

本節からは異なる AP 稼働数におけるスループットを評価するため、全端末が試行期間中に通信を継続する iperf3 により評価を行う。本稿では、1 AP あたりに収容できる端末数およびスループットについて考察を行う観点から、本節におけるスループットの評価基準として、総スループットを AP 稼働数で割った 1 AP あたりの平均値を用いる。APs を表 3 の構成 A~C に設定し、稼働数を変化させた場合の 1 AP あたりのスループットと通信の完了率を図 12 に示す。

図 12 より AP 稼働数 2 台で端末数が 36 台以上となると通信を完了できない端末が 2~4%程度発生すること、また端末数の増加にともなってスループットは低下するが、AP 稼働数が多いほど 1 AP あたりの収容数は少なくなるためスループットの低下率は低くなること分かる。特に端末数が 60 台以上になると、AP 稼働数が 2 台である場合、1 AP あたりのスループットは 4 台であるときと比較して約 30%程低下している。なお、端末台数 12 で AP 稼働数 4 のとき、スループットがほかと比較して低いのは、無線 LAN コントローラでの分散処理の結果、遠くの AP へ接続しデータレートが低下したためである。

ここで AP 稼働数と端末数によって総スループットがどのように変化するかを調べるため、AP 稼働数 2 台のときの総スループットを AP 稼働数 3, 4 台時の総スループットで割って正規化したものを図 13 に示す。

図 13 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、AP 稼働数 2 台の総ス

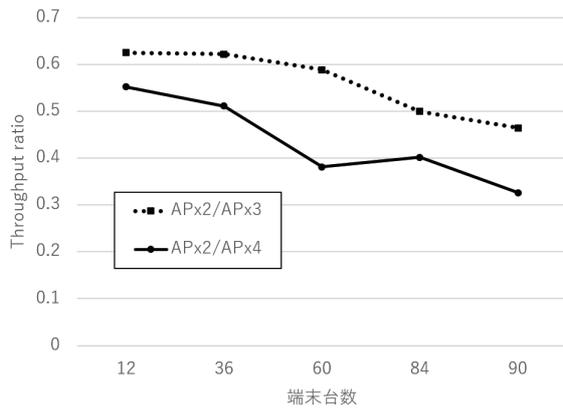


図 13 正規化スループット特性 (iperf3)
Fig. 13 Normalized throughput (iperf3).

ループットは 3 AP 稼働時と比較して約 60% (=2/3), 4 AP と比較して約 50% (=2/4) を達成している。一方、端末数が 60 台以上となると、AP 稼働数 2 台の総スループットは稼働数の比よりも低くなっている。たとえば端末数が 90 台の場合、AP 稼働数 4 台の総スループットは 220.25 Mb/s であるのに対して、2 台では 71.87 Mb/s であり、稼働数の比である 50% よりも少ない約 30% しか達成できない。

これは 1 AP あたりの収容端末数が増えたことによる競合の増加が原因である。たとえば端末台数が 90 台である場合、1 AP あたりの端末収容数は 2 AP 稼働で 45 台、4 AP 稼働では 22.5 台となり、当然 2 AP 稼働時の方が競合は 2 倍発生しやすくなる。その結果、図 12 に示すとおり、2 AP 稼働時のスループットは端末数の増加にともなって大きく低下していくことになる。よって、図 13 より競合によって AP 稼働数の比よりもスループットが低下し始めるのは 36~60 台の範囲からであるため、1 AP あたり 18~30 台以下にすることが望ましいことになる。

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、当該講義が実施される講義室の 1 AP あたりの端末収容数の目安は 30 台以下までに抑えて設計する必要があると考えられる。ただし講義中に 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等を実施することも検討する必要がある。

なお、Aruba コントローラで設定できる 1 AP あたりの収容数の上限値は 255 だがデフォルトでは 64 となっており、九州工業大学もこの設定を用いている。一方、推奨同時接続数を 30 台と明示しているメーカーもある。

3.4 チャンネルボンディングの利用 (構成 A と D, E と F)

チャンネルボンディングを利用して総チャンネル幅を 80 MHz (表 3 の構成 A と D) と 160 MHz (表 3 の構成 E と F) と

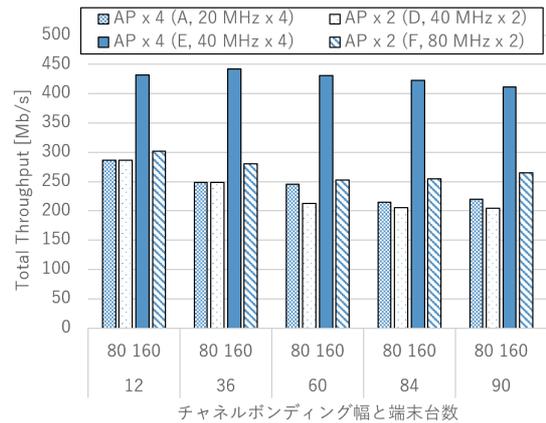


図 14 総スループット特性 (iperf3, 総チャンネル幅 80, 160 MHz)
Fig. 14 Total throughput (iperf3, total channel bandwidth of 80, 160 MHz).

した場合の結果を図 14 に示す。横軸は各端末台数を表しており、各台数において左側 2 つが総チャンネル 80 MHz の場合、右側 2 つが 160 MHz の場合である。

図 14 からまず総チャンネル幅を 80 MHz とした場合の結果を見ると、ほとんど差はないものの端末台数が増加すると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った。これは 3.2 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ためであると考えられる。一方で大きな差はないことから、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なしの場合よりも半分に削減可能であるといえる。いい換えれば 1 AP あたりの想定収容数を 2 倍に拡張することができる。

一方、総チャンネル幅を 160 MHz とした場合は AP を 4 台にした方が総スループットは高いことが分かる。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、iperf3 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通信解析ソフトウェアである OmniPeek [8] を用いて計測した。

プライマリチャンネルである 100 チャンネルを最初の 50 秒間計測したときのデータレート累積度数分布を図 15 に示す。この図 15 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るが、一方で全体の 70% が 390 Mb/s 以下のデータレートで送信していることが分かる。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る。実際この試行におけるフレームの再送率は約 24% と非常に高くなっていて、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

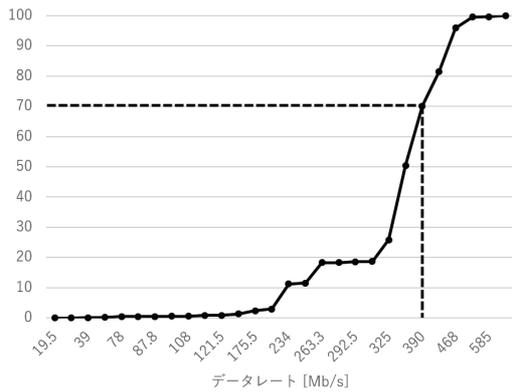


図 15 データレート累積分布図 (iperf3, 総チャンネル幅 160 MHz, channel 100)

Fig. 15 Cumulative distribution of transmission rates (iperf3, total channel bandwidth of 160 MHz, 100 channel).

ループット特性は高くなる可能性が高いことが分かった。

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 のチャンネルボンディングでは電波干渉や高負荷による端末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った。

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、あわせて講義用無線 LAN に優先制御や帯域制御を実施することがあげられる。

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 30 台以下を目安にできることを示した。続いてチャン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た。使用する総チャンネル幅を 80 MHz と 160 MHz とし取得した実験結果から、1 AP あたり 40 MHz のチャン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 のチャン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示した。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 台以下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 のチャンネルボンディングを活用し、あわせて講義用無線 LAN には優先制御や帯域制御を導入することが考えられる。

今後の調査項目としては、多様な端末の収容を想定し、端末の MIMO が 2×2 から 4×4 等の組合せになるときの挙動調査、競合無線 LAN システムからの競合時の通信特性調査、また同等の他社機材を用いた性能比較調査がある。

謝辞 本実験を実施するにあたっては九州工業大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上上純一氏と和田数字郎氏に協力いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Aruba: Aruba 7210 Specification (online), available from (<https://www.arubanetworks.com/products/networking/controllers/7200-series/>) (accessed 2018-06-18).
- [5] 藤井一樹, 田村 瞳, 野林大起, 塚本和也: 競合発生時のスタティックチャンネルボンディングの有効性に関する実験評価, 電子情報通信学会研究報告, Vol.118, No.6, NS2018-1, pp.1–6 (2018).
- [6] Bianchi, G.: Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.18, pp.535–547 (2000).
- [7] 大西淑雅, 戸田哲也, 福田 豊, 山口真之介, 西野和典: 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] savvius: savvius OMNIPEEK (online), available from (<https://www.savvius.com/product/omnipeek/>) (accessed 2018-06-18).



福田 豊 (正会員)

1977 年生。2003 年九州工業大学情報科学センター助手。2005 年九州工業大学大学院情報工学研究科情報システム専攻博士後期課程修了。2007 年同助教。現在に至る。情報ネットワーク、無線 LAN に関する研究に従事。博士 (情報工学)。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



畑瀬 卓司

1984年生。2009年九州工業大学大学院情報工学研究科情報工学専攻修了。2014年九州工業大学採用。同年九州工業大学情報科学センターに配属。2015年より九州工業大学飯塚キャンパス技術部に配属。情報科学センター機器運用管理、遠隔システムの運用管理業務に従事。技術職員。



富重 秀樹

1975年生。1994年九州工業大学採用。同年九州工業大学情報科学センターに配属。2015年より九州工業大学飯塚キャンパス技術部に配属。情報科学センター機器運用管理、全学統合ID管理システムに従事。技術専門職員。



林 豊洋

1978年生。2006年九州工業大学大学院情報工学研究科情報科学専攻博士後期課程修了。同年九州工業大学情報科学センター助手。2007年同助教。現在に至る。情報システム、ロボットビジョン、パターン認識手法に関する研究に従事。博士（情報工学）。電子情報通信学会、日本ロボット学会各会員。