

# BYOD 環境整備に向けた無線 LAN 通信実験

福田 豊<sup>1,a)</sup> 畑瀬 卓司<sup>1,b)</sup> 富重 秀樹<sup>1,c)</sup> 林 豊洋<sup>1,d)</sup>

**概要:** 大学において BYOD を活用する講義では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となる無線 LAN の通信環境整備が重要となる. そのために必要となる施策として講義室を中心とした利用可能エリアの拡充だけでは不十分であり, 1 Access Point 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が必要である. そこで本稿では BYOD 講義を想定した無線 LAN 整備の設計指針を得るために講義室で無線 LAN 通信実験を実施し, 得られた知見をまとめて報告する.

**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<sup>1,a)</sup> TAKUJI HATASE<sup>1,b)</sup> HIDEKI TOMISHIGE<sup>1,c)</sup> TOYOHIRO HAYASHI<sup>1,d)</sup>

**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 data, 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である. 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るが, 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る.

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. 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らない.

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 通信実験を行った. 具体的には稼働 AP 数や端末数を変化させて wget や iperf3 で端末が通信した時の通信特性を調査した. このうち [1] では wget を用いた通信に関する計測結果をまとめた. 本稿では, wget と iperf3 双方の通信結果について考察し, 1 AP あたりの適切な収容端末数やチャンネルボンディングの有効活用範囲から, 具体的な設計指針をまとめたので報告する.

<sup>1</sup> 九州工業大学 情報科学センター  
Information Science Center, Kyushu Institute of Technology,  
Sensui 1-1, Tobata, 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. 実験環境

本実験は IEEE 802.11ac [2] 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 m<sup>2</sup>) で行った (図 1 参照)[3], [4]. AP は Wave2 に対応した Aruba AP-335 であり, 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る (図 2). なお, PoE Switch の上流側の接続は 1 Gb/s である.

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) まで変化させた.

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る. 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) サーバと通信を行った. 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設定した.

サーバ・端末間の通信には wget と iperf3 を用いた. 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る. 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ている. 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 であった.

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た. 以上の実験環境を表 1 に示す.



図 1 AV 講義室

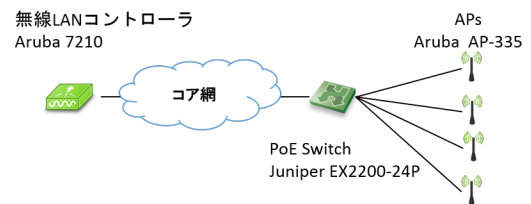


図 2 接続構成

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, ポリュームタイプ 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<br>iperf3 で 300 秒間指定サーバと TCP 通信  |

### 3. 実験結果

本節では取得した実験結果について述べる。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性を調査した。

#### 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 3, 4 に示す。図 3 と 4 を比較すると, iperf3 を用いた図 4 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ある。

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る [5]。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った。

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った。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。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る。

続いて, 図 5 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す。図 5 より wget よりも iperf3 の方が端末間スループットのばらつきが大きいことがわかる。これは先ほど述べたように iperf3 では通信時間内で TCP cwnd 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

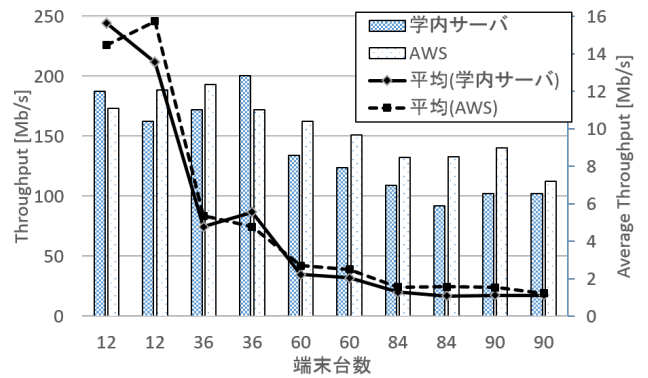


図 3 端末数を変化させた時のスループット特性 (wget)

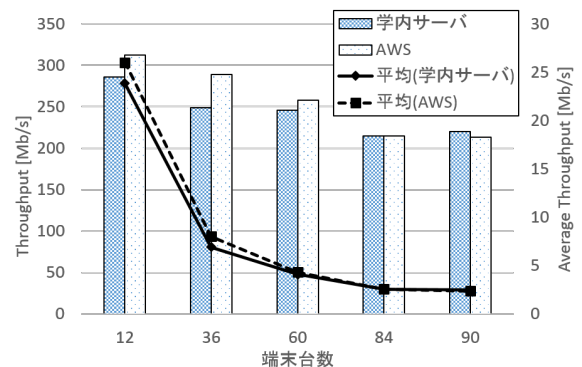


図 4 端末数を変化させた時のスループット特性 (iperf3)

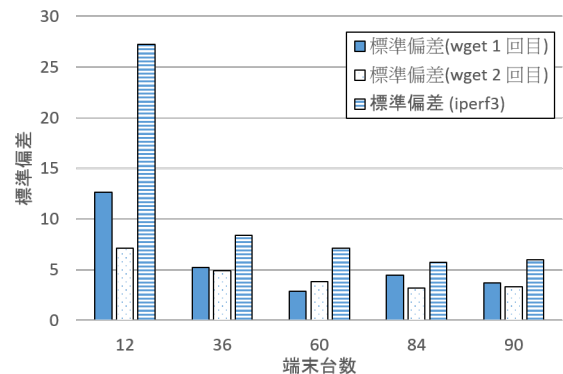


図 5 端末数を変化させた時の標準偏差 (AWS サーバ)

トの差が iperf3 よりも広がらないためである。とはいえ, 図 5 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る。

#### 3.2 AP 稼働数を変化 (2 ～ 4 台)

次に各 AP の適切な収容数を検討する。本学ではこれまでの運用経験や実験結果 [6] 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 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た。結果を図 6, 7 に示す。なお通信先は学内サーバとした。

図 6 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ているが, 36 台以上になると約半分程度まで低下している。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なかった。

一方, iperf3 では図 7 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わかる。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 8 に示す。図 8 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 倍となっている。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る。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る。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, 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った。

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る。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る。

### 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 [7] 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た。

総チャンネル幅を 80 MHz (AP に設定するチャンネル幅は

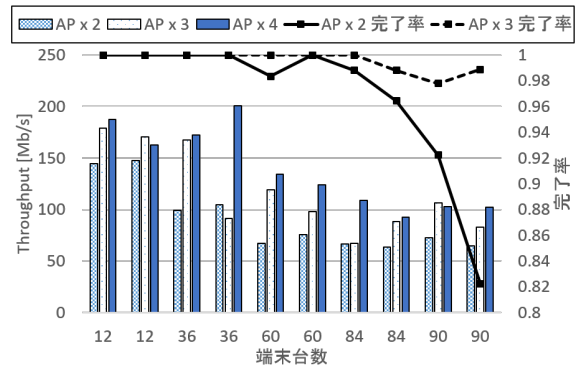


図 6 AP 稼働数を変化させた場合のスループット特性と完了率 (wget)

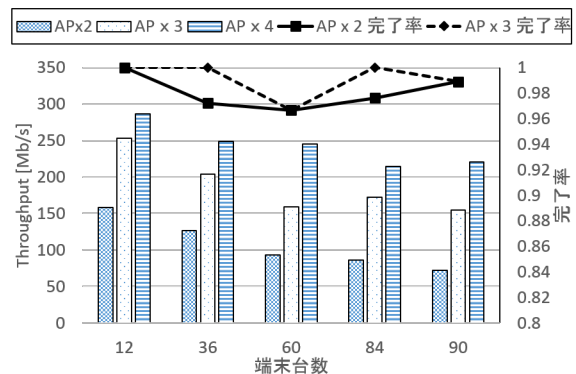


図 7 AP 稼働数を変化させた場合のスループット特性と完了率 (iperf3)

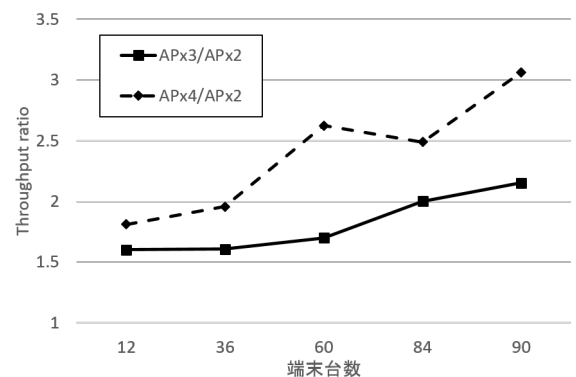


図 8 正規化スループット特性 (iperf3)

20 MHz ないし 40 MHz) とした場合の結果を図 9, 10 に示す。図 9 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 10 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った。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る。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る。言い換えれば 1 AP あたりの想定収容数を 60 台



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) |

に拡張することができる。

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 11, 12 に示す。図 11, 12 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、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 13 に示す。この図 13 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 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 23% 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、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る。

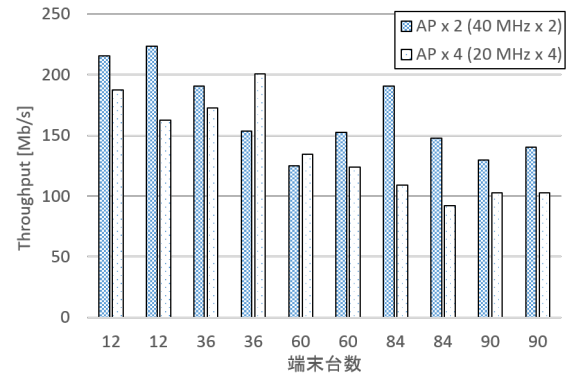


図 9 スループット特性 (wget, 総チャンネル幅 80 MHz)

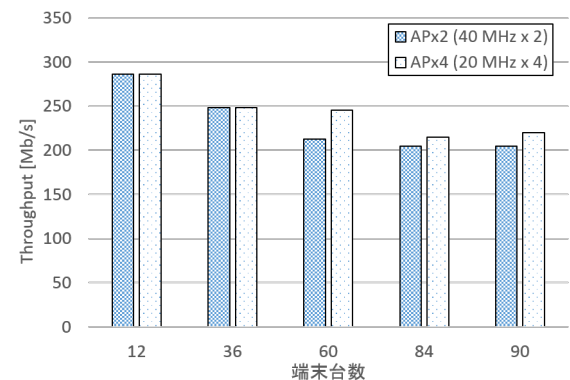


図 10 スループット特性 (iperf3, 総チャンネル幅 80 MHz)

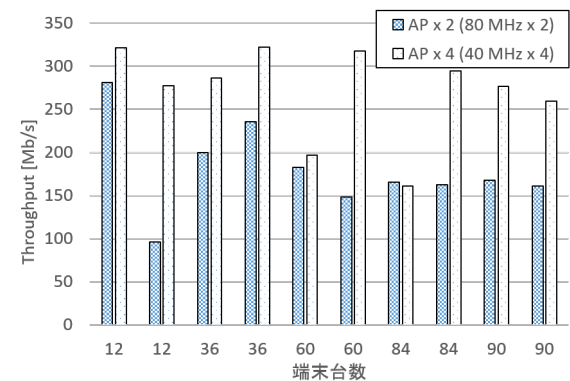


図 11 スループット特性 (wget, 総チャンネル幅 160 MHz)

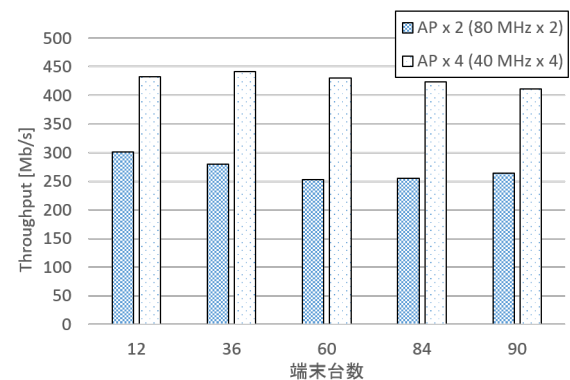


図 12 スループット特性 (iperf3, 総チャンネル幅 160 MHz)

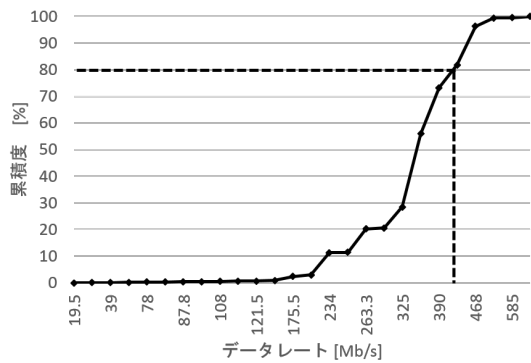


図 13 データレート累積分布図 (wget, 総チャンネル幅 160 MHz, channel 100)

#### 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約 30 台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 として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、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る。

#### 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いた。ここに謝意を表す。

#### 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] 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.*

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.