

実機を用いた IEEE 802.11ax の基本性能評価

福田 豊^{1,a)} 畑瀬 卓司² 佐藤 彰洋¹ 中村 豊¹ 和田 数字郎²

概要: IEEE 802.11ax は稠密環境での実効スループット特性の向上が図られており、講義棟など AP (Access Point) 密度が高い環境を含むキャンパス無線 LAN で通信特性の向上が期待できる。一方で安定した運用のためには、総スループット特性を考慮したチャンネルボンディングの活用範囲や、後方互換性による旧規格との混在時の通信特性を明らかにする必要がある。そこで本研究では複数台の端末を準備し、異なるチャンネル幅や旧規格との混在時におけるスループット特性を iperf3 を用いて計測し、キャンパス無線 LAN で IEEE 802.11ax を効果的に運用していくための知見を明らかにする。実験の結果、チャンネルボンディングは同時接続端末数が 2, 3 台程度と少なく、電波干渉の影響も低い場合に有効であること、また、IEEE 802.11n 端末が 1 台混在すると総スループット特性は 100 Mb/s 以上低下するため、対策が必要であることがわかった。

キーワード: IEEE 802.11ax, キャンパス無線 LAN, チャンネルボンディング, 後方互換性

Performance evaluation of the the IEEE 802.11ax with measurement-based study

YUTAKA FUKUDA^{1,a)} TAKUJI HATASE² AKIHIRO SATOH¹ YUTAKA NAKAMURA¹ SUJIRO WADA²

Abstract: The primary focus of the IEEE 802.11ax is to improve the throughput performance in a dense environment, which is suitable in a campus wireless LANs that have high densities of the APs (Access Points). However, in order to deploy the IEEE 802.11ax in a real campus, we should clarify both the effective usage of the channel bonding considering the total throughput and the throughput performance with coexisting of IEEE 802.11n/ac STAs (Stations). Therefore, in this study, we measured the throughput performance of IEEE 802.11ax with a different channel bonding and coexisting of IEEE 802.11n/ac by using iperf3 and multiple STAs. From measurement results, we derive the effective operation guideline of IEEE 802.11ax on campus wireless LANs.

Keywords: IEEE 802.11ax, Campus WiFi, Channel bonding, Backward compatibility

1. はじめに

IEEE 802.11ax では最大伝送速度が IEEE 802.11ac の 6.9 Gb/s から 9.6 Gb/s へと高速化される他、稠密環境での

実効スループットの向上が図られている。IEEE 802.11ax が考慮している稠密環境は、講義棟等に多数の AP (Access Point) が設置され、利用者は複数の端末を接続するキャンパス無線 LAN の利用形態に合致しており、導入による通信性能の改善を期待できる。端末側の対応も IEEE 802.11ax 対応モジュールが登場した 2019 年より進んでおり、2021 年 4 月時点では殆どのノートパソコンで IEEE 802.11ax が標準搭載されるか、選択できる状況にある。

この IEEE 802.11ax をキャンパス無線 LAN で運用していくためには、チャンネルボンディングや旧規格との混

¹ 九州工業大学 情報基盤センター
Information Science and Technology Center, Kyushu Institute of Technology,
Sensui 1-1, Tobata, Kitakyushu, Fukuoka 804-8550, Japan

² 九州工業大学 飯塚キャンパス技術部
Iizuka Campus Technical Support Office
Kawazu 680-4, Iizuka, Fukuoka 820-8502, Japan

a) fukuda@isc.kyutech.ac.jp

在を考慮する必要がある。チャンネルボンディングは IEEE 802.11n から導入された複数チャンネルを束ねて高速化する技術で、IEEE 802.11ax では最大 160 MHz (20 MHz チャンネルを 8 個分) を利用することができる。チャンネルボンディングの活用については動的に利用チャンネルとその数を制御することでスループット特性を改善する研究が盛んに行われているが、講義中に無線 LAN 環境が大幅に変化するの安定性の観点からは必ずしも好ましいとは言えず、キャンパス無線 LAN に適したチャンネルボンディングを検討する必要がある。

また、キャンパス無線 LAN には IEEE 802.11ac 以下の旧規格にのみ対応している端末の接続も多い。例えば本学では 2018 年度から BYOD を導入しているが、新入生の約 7 割が購入する生協推奨パソコン [1] の IEEE 802.11ax 対応は 2021 年度からであり、それまでは IEEE 802.11ac 対応であった。また、BYOD 端末の必要スペック (既に端末を所有している場合に最低限必要なもの) は IEEE 802.11n 対応となっている。よって IEEE 802.11n/ac 等の旧規格が混在した時に、IEEE 802.11ax 通信がどのような影響を受けるのかを明らかにしておく必要がある。

そこで本研究では、キャンパス無線 LAN における IEEE 802.11ax 対応 AP の運用を想定した通信特性の評価を行う。具体的にはチャンネルボンディング幅を変化させながら複数の IEEE 802.11ax 端末の通信特性を iperf3 により計測し、総スループットを最大化するための有効なチャンネルボンディング幅についての知見を得る。また旧規格と混在した時のスループット特性を調査し、IEEE 802.11ax 通信が受ける影響を明らかにする。実験の結果から、(1) 同時接続端末数が 2, 3 台程度と少なく、電波干渉の影響も低い場合は 40 MHz のチャンネルボンディングが有効である、(2) IEEE 802.11n 端末が 1 台混在すると総スループット特性は 100 Mb/s 以上低下するため、対策が必要であることがわかった。

2. IEEE 802.11ax 関連研究

稠密環境における実効スループットの改善のために IEEE 802.11ax に新たに採用された技術としては、OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), MU-MIMO (Multi User - Multiple-Input Multiple-Output), 空間再利用 (Spatial Reuse) 等がある [2], [3], [4]。OFDMA は使用するチャンネルのサブキャリアをグループ化して複数の端末に割り当てる技術で、端末の同時通信が可能となる。MU-MIMO は複数のアンテナを個々の端末に振り分けて同時通信を実現するが、IEEE 802.11ax では従来からのダウンリンクに加えてアップリンクにも対応し、最大 8 端末までの同時接続を提供する。空間再利用は稠密環境でチャンネルが重複している際、互いの通信に支障が出ない場合は通信を開始することで通信効率を高める手法である。

これまで IEEE 802.11ax の通信特性の分析は、主に解析モデルや ns3[5] 等を用いたシミュレーションを中心に行われてきた。例えば [6], [7], [8] は解析モデルやシミュレーションにより、MCS (Modulation and Coding Sets) や距離、端末数を変化させた時のスループット特性を明らかにし、MIMO や OFDMA の効果を検証している。

また [9], [10], [11] は稠密環境におけるチャンネルボンディング性能を明らかにし、不連続なチャンネルも動的に利用することで高い周波数利用効率を達成出来ることを示している。さらに [12] は異なる規格が混在する場合、OFDMA に対応しない端末はチャンネルアクセスに成功する確率が低下することを指摘し、解決手法を提案している。[13] も同様に解析モデルと MATLAB を用いたシミュレーションにより、IEEE 802.11ax 端末と CSMA/CA で通信する端末の割合が総スループット特性や遅延に与える影響を調査し、AP への EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) 適用により混在時の総スループット特性を改善できることを示している。

これらの先行研究は主に物理層やデータリンク層の要素技術の評価しているのに対して、[14] は 1 台の AP (ASUS RT-AX88U) と端末を用いて、AP と端末間の距離やチャンネルボンディングの有無を変化させながら iperf3 による計測を行っている。しかしながら端末は 1 台のみで、異なる規格が混在した場合の計測は行っていない。そこで本研究では、IEEE 802.11ax をキャンパス無線 LAN で運用するための知見を得るために、複数の実機端末を用いた実験を行う。具体的には、チャンネルボンディングや旧規格との混在時が IEEE 802.11ax 端末の通信に与える影響を iperf3 を用いて計測する。

3. 実験環境

実験は IEEE 802.11ax に対応した 1 台の AP と 4 台の計測クライアント、計測サーバと管理サーバ各 1 台を用いて行った。AP は HPE 社製の AP-515 であり、4 x 4 MIMO に対応している [15]。計測クライアントはいずれも IEEE 802.11ax (2 x 2 MIMO) に対応する 2 種類の端末をそれぞれ 2 台用いた。計測クライアントと計測サーバ、及び管理サーバの構成は表 1 に示す通りである。

図 1 に接続構成を示す。AP は NBASE-T 5 Gb/s で PoE Switch と接続し、幹線 Switch からキャンパス Switch を経由して無線 LAN コントローラ HPE Aruba 7210 に收容されている。PoE Switch から無線 LAN コントローラまで、及び計測サーバと幹線 Switch 間は 10 Gb/s で接続されている。よって、AP から計測サーバ間のリンク速度は最低でも 5 Gb/s となる。

4 台の計測クライアントと計測サーバの OS には Ubuntu 20.04.01 (Linux ubuntu-1 5.8.0-48) を採用した。また管理サーバの OS は Mac OSX Catalina (10.15.7) である。4

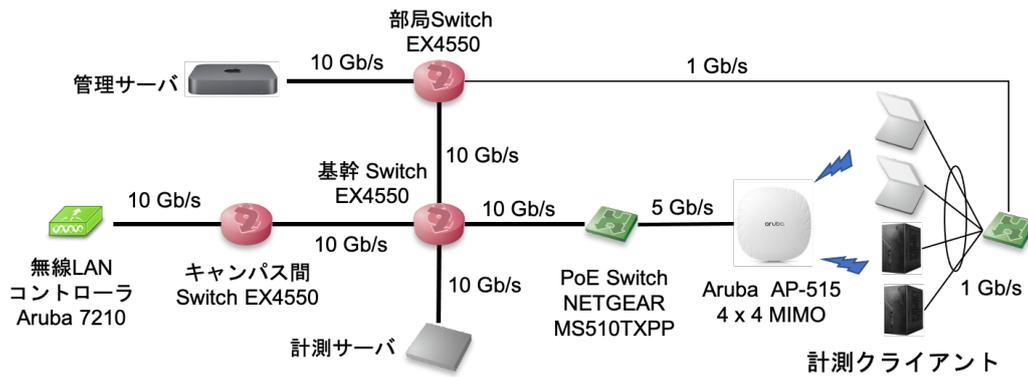


図 1 接続構成

表 1 計測サーバ, クライアントの仕様

	型番	台数	CPU	メモリ [GByte]	LAN
管理サーバ	Mac mini (2018)	1	Intel Corei7-8700B 3.2 GHz	64	10GBASET-T
計測サーバ	CTO PC サーバ	1	Intel Corei7-9700K 3.6 GHz	32	10GBASET-T 1000BASE-T
計測クライアント	ASRock DeskMini H470	2	Intel Coei7-10700 2.9 GHz	16	IEEE 802.11ax 2 x 2 MIMO 1000BASE-T
計測クライアント	ThinkPad T14 Gen1	2	Intel Corei7-1165G7 2.8 GHz	16	IEEE 802.11ax 2 x 2 MIMO 1000BASE-T

表 2 チャネル割当

チャネル幅 [MHz]	チャネル
20	W56 (116)
40	W56 (116, 120)
80	W56 (116, 120, 124, 128)

台の計測クライアントは管理サーバと 1000BASE-T の有線 LAN で接続されており, 管理サーバから指示を受けて iperf3 により無線 LAN を経由して計測サーバと通信を行う。管理サーバから計測クライアントへの指示は構成管理ツールである ansible を用いた。また計測のための iperf3 通信は無線 LAN を経由するように計測クライアントのルーティングテーブルを設定した。計測クライアントで実行した iperf3 コマンドは以下に示す通りである。

```
iperf3 -c A.B.C.D -p X -V -i 1 -O 5 -t 30 -R
```

ここで iperf3 のコマンドオプション -c A.B.C.D は iperf3 サーバの ip address, -p X は iperf3 サーバのポート番号である。-V -i 1 は 1 秒ごとの詳細表示を指定している。-O 5 は通信開始から 5 秒間は計測に含めないこと, -t 30 は計測時間を 30 秒 (よって実際の通信時間は 35 秒) に指定している。最後に -R はサーバからクライアントへの通信を指定している。以上のオプション指定により通信プロトコルは TCP, 各計測クライアントからのセッション数は 1, TCP 通信開始時の影響を省くため最初の 5 秒間は無視

し, 続く 30 秒間で計測を行うとした。また通信はサーバからクライアント宛でのダウンリンク方向とした。通信開始及び計測クライアント数は管理サーバで指定し, ansible を通して計測クライアントに指示するようにした。

実験に先立ち, 最初に実験を実施する部屋の電波状態を確認するため, 無線 LAN テスターを用いて 5 GHz 帯の電波状態を測定した。実験を行った部屋はキャンパス内でも他の建屋から離れた位置にあり, 鉄扉があるため近傍の電波が殆ど検出されなかった。その中でも干渉源となる AP が存在しなかった W56 帯のチャネル 116 を利用することにした。よって本実験では他無線 LAN システムによる電波干渉による影響はほぼ無視できると考える。W56 帯では 20 MHz のチャネルを 12 確保できるが, 実験内容に応じてチャネルボンディングは 40 MHz (チャネル 2 つ) と 80 MHz (チャネル 4 つ) を用いた。使用したチャネルは表 2 に示す。

また, 今回の計測においてボトルネックが無線 LAN 区間であることを確認するため, 計測クライアント全 4 台から有線経由で iperf3 による通信を 3 回行ったところ, 総スループットの平均は 3.75 Gb/s であった。これに対して, 今回の実験でデータレートが最大になるのはチャネルボンディングを 80 MHz とした場合で, そのときの最大伝送レートは 1.2 Gb/s であるため, 計測サーバや有線ネットワーク機材は無線 LAN に対して十分な転送能力を持っていると言える。

4. 実験結果

本節ではまず最初に IEEE 802.11ax 通信でチャンネル幅と端末数を変化させた時のスループット特性を調査し、基本性能を確認すると共にキャンパス無線 LAN におけるチャンネルボンディング活用範囲について考察する。続いて IEEE 802.11n/ac 端末と混在させた場合も同様に計測を行い、相互への影響を明らかにする。

4.1 チャンネルボンディングとスループット

チャンネル幅を表 2 に示すように 20, 40, 80 MHz とし、端末台数を 1 ~ 4 台に変化させて iperf3 により計測を行った。総スループット特性の平均 (5 回試行) を図 2 に示す。図 2 よりチャンネル幅が 20, 40 MHz の場合、端末数が増加しても総スループットは大きく変化していない。台数が増加すると衝突が増えスループットが低下する旧規格とは異なり、IEEE 802.11ax では台数が増加しても実効スループットの低下を軽減できることを確認できた。特に端末数が 2 の場合、総スループットは若干向上しているが、これは MU-MIMO による同時通信効果であると考えられる。実験に使用した AP-515 は 4 x 4 MIMO、端末は 2 x 2 MIMO をそれぞれ有しているため、端末数 2 では AP の MIMO アンテナを全て利用することができる。

一方、チャンネル幅を 80 MHz とした場合、端末数 1 の時 861 Mb/s と 1 Gb/s に迫るスループットを達成しているが、台数の増加による総スループットの低下は 20, 40 MHz の場合よりも大きいことがわかった。これは以前実施した IEEE 802.11ac の実験結果 [16] と同じく端末が使用するデータレートの選択が原因ではないかと考えられる。

次に図 2 を基にチャンネルボンディングの有効性について検討する。表 3 に示すように総端末数は 4 台に固定、総チャンネル幅は 40, 80 MHz とし、40 MHz の場合は 1, 2 台の AP に、80 MHz の場合は 1, 2, 4 台の AP に割り当てる。この時に得られる総スループット特性を図 2 より抜き出したものを図 3 に示す。図 3 より、1 台の AP でチャンネルボンディングを行うよりも、同じチャンネル幅を複数台の AP に分割して割り当てた方が総スループット特性は高いことがわかる。この結果からすると、配線や費用に問題が無いのであればチャンネルボンディングを用いるよりも AP を設置した方が総スループット特性は高くなると言える。なおチャンネル幅を 80 MHz とした時、総スループット特性が最も高くなるのは 80 MHz のチャンネル幅を 40 MHz ずつ 2 台の AP に割り当てた場合であった。これも図 2 で考察したように 1 台の AP に端末が 2 台接続し、AP の MIMO アンテナを全て利用できる為である。

続いて端末ごとの平均スループット特性を端末数 1 の時のスループットで正規化したものを図 4 に示す。図 4 より、スループットの低下率は 20 MHz が最も小さく、80

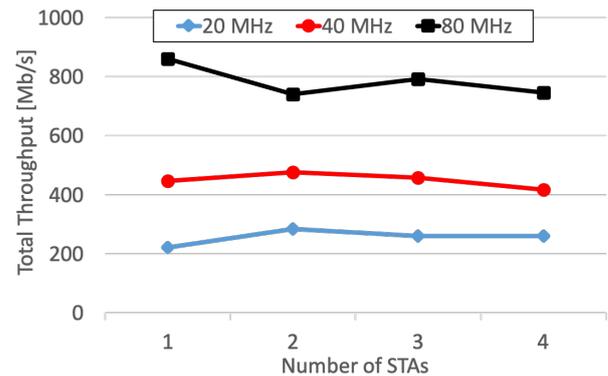


図 2 総スループット特性

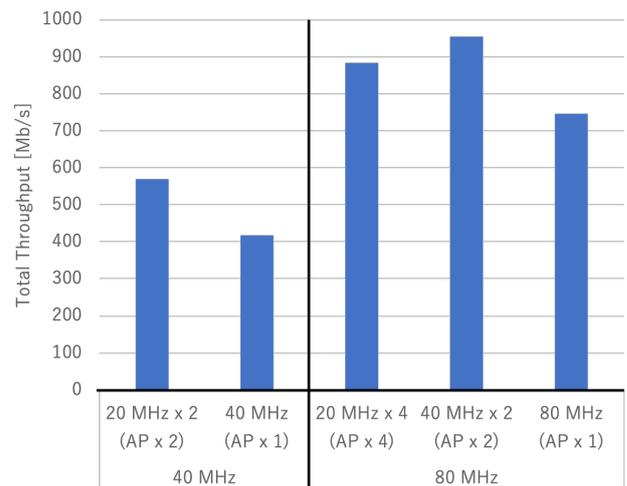


図 3 総スループット特性 (チャンネルボンディング有無)

MHz が最も大きくなった。またチャンネル幅が 20, 40 MHz で端末数を N とした時、端末数が 2, 3 台と少ない時の平均スループットは $1/N$ よりも大きくなり、旧規格のように $1/N$ 以下にはならないことがわかった。例えばチャンネルが 20 MHz の場合、端末数 4 でも正規化スループットは約 0.29 であった。また 40 MHz の場合は端末数 3 で正規化スループットは 0.34 であった。正規化スループットが $1/N$ よりも大きいことは、総スループット特性が増加することを意味する。これは図 2 で考察したように、IEEE 802.11ax では複数端末への同時通信が提供されるためである。

現在の所、MIMO アンテナはスマートフォンでは 1 x 1、ノートパソコンでは 2 x 2、AP では 4 x 4 が主であることを考慮すると、同時に通信する端末数が 2 ~ 4 台程度と比較的少なく、電波干渉の影響も低い場合は、キャンパス無線 LAN でも 40 MHz のチャンネルボンディングを活用することで総スループット特性は改善できると考えられる。

以上の結果から、総スループット特性の最大化を目指す場合はチャンネルボンディングを用いず、AP に 20 MHz のチャンネルを割り当てた方が良いと言える。また、同時接続端末数が 2, 3 台程度と比較的少なく、周辺からの電波干渉

表 3 チャンネル割当

総チャンネル幅 [MHz]	チャンネルボンディング	チャンネル幅 [MHz]	AP 数	クライアント数
40	有	40	1	4
	無	20	2	4 (1 AP 2 台)
80	有	80	1	4
	有	40	2	4 (1 AP 2 台)
	無	20	4	4 (1 AP 1 台)

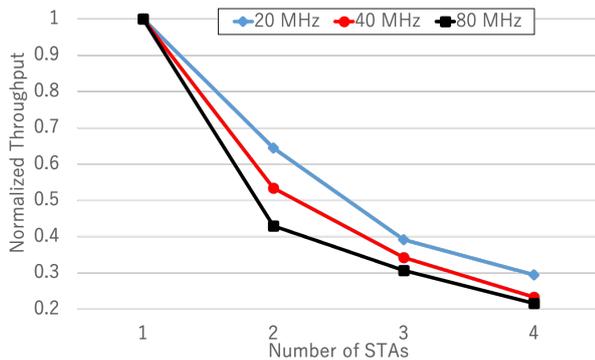


図 4 正規化平均スループット特性

の影響も低い場合は、40 MHz のチャンネルボンディングを利用することで総スループット特性は改善できると考えられる。但し、本実験では端末数が限られているため、端末数が 10 ～ 数十台に増えた場合についても、今後検証する予定である。

4.2 旧規格との混在

本節では旧規格と混在した時のスループット特性を調査する。まず最初に IEEE 802.11ac と混在した場合の総スループット特性の平均を図 5, 6 に示す。図 5 では IEEE 802.11ax 端末は 1 台固定、IEEE 802.11ac 端末は 0 ～ 3 台に変化、図 6 では反対に IEEE 802.11ac 端末は 1 台固定、IEEE 802.11ax 端末は 0 ～ 3 台に変化させた。なお、本節でもそれぞれの試行回数は 5 である。

図 5 より全台が IEEE 802.11ax 端末であった場合と比較すると、いずれも総スループット特性は低下している。特にチャンネル幅が 80 MHz である場合、その差が最も大きいことがわかる。一方図 6 では IEEE 802.11ax 端末の割合が高まるにつれ、全台が IEEE 802.11ac であった場合よりも総スループット特性は向上している。よって 1 AP に対して IEEE 802.11ac の割合の方が高い場合は IEEE 802.11ax 導入による改善効果は低く IEEE 802.11ac の転送性能に縛られること、またチャンネル幅が広い程総スループットの低下も大きいことがわかった。

次に IEEE 802.11n との混在した場合の総スループット特性の平均を図 7, 8 に示す。図 5, 6 と同様、図 7 では IEEE 802.11ax 端末は 1 台固定、IEEE 802.11n 端末は 0 ～ 3 台に変化、図 8 では IEEE 802.11n 端末は 1 台固定、

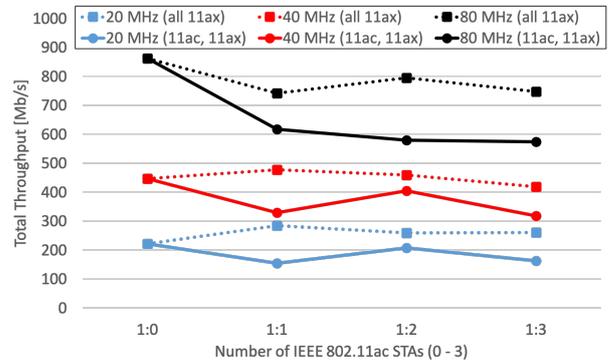


図 5 総スループット特性

(IEEE 802.11ax 1 台, IEEE 802.11ac 0 ～ 3 台)

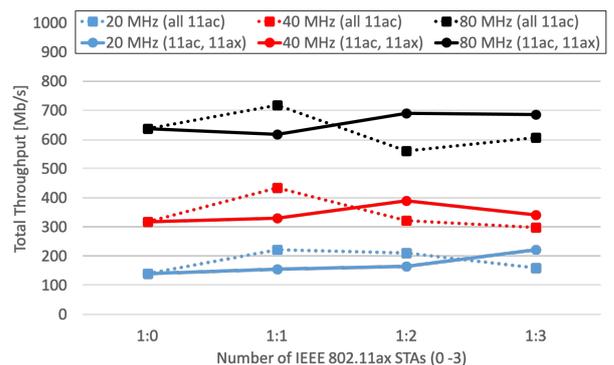


図 6 総スループット特性

(IEEE 802.11ac 1 台, IEEE 802.11ax 0 ～ 3 台)

IEEE 802.11ax 端末は 0 ～ 3 台に変化させた。図 7 より、混在の有無で比較するとスループット差がもっとも開くのは IEEE 802.11n 端末が 1 台混在した場合で、チャンネル幅が 40 MHz の場合は 170 Mb/s、20 MHz の場合は 140 Mb/s 低下している。一方、図 8 より、図 6 と同様 IEEE 802.11ax 端末の割合が高まるにつれ、総スループット特性は向上している。

以上の結果から、IEEE 802.11ac と混在する場合は IEEE 802.11ax の割合が高まるにつれ総スループット特性の改善が見込まれること、IEEE 802.11n 端末が 1 台混在すると総スループット特性は 100 Mb/s 以上低下してしまうことがわかった。特にキャンパス無線 LAN では IEEE 802.11n を搭載した AV 機器や実験機材等による接続も考慮しなければならないため、IEEE 802.11ax との混在をできるだけ回避するように設計する必要がある。

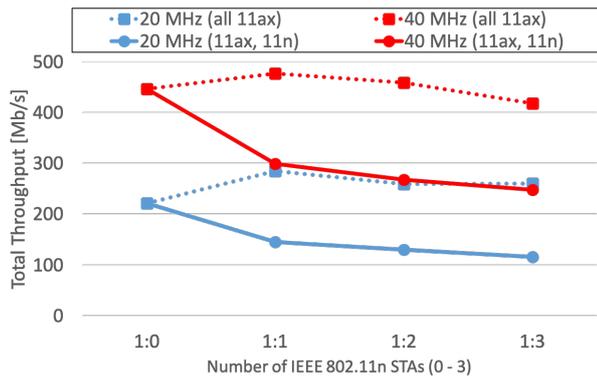


図 7 総スループット特性
(IEEE 802.11ax 1 台, IEEE 802.11n 0 ~ 3 台)

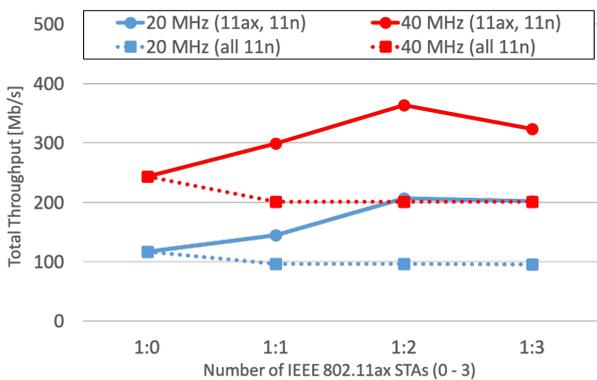


図 8 総スループット特性
(IEEE 802.11n 1 台, IEEE 802.11ax 0 ~ 3 台)

5. まとめ

稠密環境での実効スループットの向上が図られている IEEE 802.11ax は、講義棟等 AP 密集度が高い箇所を含むキャンパス無線 LAN に導入することで通信性能の向上を期待することができる。一方で安定運用のためには、総スループット特性を考慮したチャネルボンディングの活用範囲や、後方互換性による旧規格との混在時の通信特性を明らかにする必要がある。そこで本研究では複数台の端末を準備し、異なるチャネル幅や旧規格との混在時におけるスループット特性を iperf3 を用いて計測した。まずはじめにチャネルボンディングによる通信特性を調査した結果、IEEE 802.11ax では台数が増加しても実効スループットの低下を軽減できることや、全 AP の総スループットを最大化する場合はチャネルボンディングを使用しない方が良いことがわかった。また、同時接続端末数が 2, 3 台程度と比較的少なく、周辺からの電波干渉の影響も低い場合は、40 MHz のチャネルボンディングを利用することで総スループット特性を改善できることがわかった。次に IEEE 802.11n/ac 端末との混在が IEEE 802.11ax 端末に与える影響を調査した所、IEEE 802.11ac との混在は IEEE 802.11ax 端末の比率の上昇に伴い総スループット特性の向上が見込めることがわかった。一方で、IEEE

802.11n 端末が 1 台混在すると総スループット特性は 100 Mb/s 以上低下するため、混在を回避するための設計が必要になることがわかった。今後の課題としては、端末数を 10 ~ 数十台に増やして同様の実験を行い、今回得られた知見が台数が増加した場合でも適用できるのかを検証する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20K11769 の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] 大橋健, 甲斐郷子, 久代紀之, 鶴正人: 九州工業大学におけるノートパソコン必携化について, 九州工業大学情報科学センター広報, Vol. 30, pp. 3-12 (2019).
- [2] Omar, H. A., Abboud, K., Cheng, N., Malekshan, K. R., Gamage, A. T. and Zhuang, W.: A Survey on High Efficiency Wireless Local Area Networks: Next Generation WiFi, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 18, No. 4, pp. 2315-2344 (online), DOI: 10.1109/COMST.2016.2554098 (2016).
- [3] Bellalta, B.: IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANs, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 23, No. 1, pp. 38-46 (online), DOI: 10.1109/MWC.2016.7422404 (2016).
- [4] Deng, D., Lin, Y., Yang, X., Zhu, J., Li, Y., Luo, J. and Chen, K.: IEEE 802.11ax: Highly Efficient WLANs for Intelligent Information Infrastructure, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, No. 12, pp. 52-59 (online), DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700285 (2017).
- [5] NS3: The ns-3 Network Simulator, (online), available from (<https://www.nsnam.org/>) (accessed 2020-04-04).
- [6] Natkaniec, M., Prasnal, L. and Szymakowski, M.: A Performance Analysis of IEEE 802.11ax Networks, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, Vol. vol. 66, No. No 1, pp. 225-230 (online), DOI: ijet.2020.131867 (2020).
- [7] Daldoul, Y., Meddour, D.-E. and Ksentini, A.: Performance evaluation of OFDMA and MU-MIMO in 802.11ax networks, *Computer Networks*, Vol. 182, p. 107477 (online), DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107477 (2020).
- [8] Bellalta, B. and Kosek-Szott, K.: AP-initiated multi-user transmissions in IEEE 802.11ax WLANs, *Ad Hoc Networks*, Vol. 85, pp. 145-159 (online), DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.10.021 (2019).
- [9] Barrachina-Muñoz, S., Wilhelmi, F. and Bellalta, B.: Online Primary Channel Selection for Dynamic Channel Bonding in High-Density WLANs, *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 9, No. 2, pp. 258-262 (online), DOI: 10.1109/LWC.2019.2952100 (2020).
- [10] Barrachina-Muñoz, S., Wilhelmi, F. and Bellalta, B.: Dynamic Channel Bonding in Spatially Distributed High-Density WLANs, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 19, No. 4, pp. 821-835 (online), DOI: 10.1109/TMC.2019.2899835 (2020).
- [11] Khairy, S., Han, M., Cai, L. X., Cheng, Y. and Han, Z.: A Renewal Theory Based Analytical Model for Multi-Channel Random Access in IEEE 802.11ac/ax, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 18, No. 5, pp. 1000-1013 (online), DOI: 10.1109/TMC.2018.2857799 (2019).

- [12] Khorov, E., Loginov, V. and Lyakhov, A.: Several EDCA parameter sets for improving channel access in IEEE 802.11ax networks, *2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 419–423 (online), DOI: 10.1109/ISWCS.2016.7600940 (2016).
- [13] Lee, K.-h.: Performance Analysis of the IEEE 802.11ax MAC Protocol for Heterogeneous Wi-Fi Networks in Non-Saturated Conditions, *Sensors*, Vol. 19, No. 7 (online), DOI: 10.3390/s19071540 (2019).
- [14] Muhammad, S., Zhao, J. and Refai, H.: An Empirical Analysis of IEEE 802.11ax, *International Conference on Communications, Signal Processing and their Applications* (2020).
- [15] Aruba: Aruba AP-515, (online), available from (<https://www.arubanetworks.com/products/wireless/access-points/indoor-access-points/510-series/>) (accessed 2020-04-04).
- [16] 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, *情報処理学会論文誌*, Vol. 60, No. 3, pp. 758–767 (2019).