

福岡工業大学 学術機関リポジトリ

Experiments to Clarify the Problems of High-speed Wireless LAN technology – Impact of Channel bonding and OFDMA on the performance of Wireless LAN –

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-12-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田村, 瞳, 大神, 達哉, 小野, 彩華, 中島, 千春, 山本, 壮馬 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/11478/00001735

無線 LAN 高速化技術の問題点に関する実験評価 —チャンネルボンディング, OFDMA による通信性能への影響—

田村 瞳 (工学部電子情報工学科)

大神 達哉 (工学研究科 電子情報工学専攻)

小野 彩華 (工学研究科 電子情報工学専攻)

中島 千晴 (工学研究科 電子情報工学専攻)

山本 壮馬 (工学研究科 電子情報工学専攻)

Experiments to Clarify the Problems of High-speed Wireless LAN technology —Impact of Channel bonding and OFDMA on the performance of Wireless LAN—

TAMURA Hitomi (Department of Information Electronics, Faculty of Engineering)

OOGAMI Tatsuya (Department of Information Electronics, Graduate School of Engineering)

ONO Sayaka (Department of Information Electronics, Graduate School of Engineering)

NAKASHIMA Chiharu (Department of Information Electronics, Graduate School of Engineering)

YAMAMOTO Souma (Department of Information Electronics, Graduate School of Engineering)

Abstract

In this paper, we clarify the problems in high-speed techniques of wireless LAN, especially in channel bonding (CB) and Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), through an evaluation experiment of communication performance using an actual IEEE802.11ax wireless LAN. Furthermore, we discuss the improvement method of the CB and the OFDMA in IEEE 802.11ax WLAN.

Keywords : IEEE802.11ax, Channel Bonding, OFDM, OFDMA

1. 序論

動画等のリッチコンテンツの普及や、ユーザによるいつでもどこでもインターネットに接続したい要求に応えるため、近年の高速無線 LAN, 特に、IEEE802.11ax 通信規格においては、広帯域化としてチャンネルボンディング、複数ユーザに対して同時通信を行う Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA, 直行周波数分割多重接続)が採用された。これらの高速化技術は、これまでの無線通信規格における問題点を解決しようとしている一方、デメリットも存在する。

無線 LAN では、周辺の無線電波との干渉を避けるために、Medium Access Control (MAC)として Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)が採用されている。これにより、同じ周波数チャンネルを利用する無線通信端末は、1台ずつ送信権を獲得し、送信権を獲得した端末がフレーム送信時間だけ、周波数チャンネルを占有する。この MAC 制御によって、多くの通信端末が同じ周波数チャンネルを利用するような通信環境では、スループットが

大きく低下する問題がある⁽¹⁾。さらに、これまでの無線通信規格における高速化技術では、送信するビット列を搬送波に乗せる1次変調方式において、1波長で送信可能なビット数を向上させ、2次変調方式として Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)を利用することで狭帯域の複数のサブキャリアを利用して同時に多くのビット列を送信することや、複数のアンテナを利用する Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 技術により、高速化を図ってきた。しかし、これらの技術だけでは高速化に限界があることから、複数チャンネルを束ねて利用するチャンネルボンディング技術が採用された。

チャンネルボンディング⁽²⁾では、1chあたり 20MHz である連続する複数のチャンネルを束ねて利用することが可能であり、IEEE802.11ax では、ボンディング幅として 40MHz (2ch 利用)、80MHz (4ch 利用)、160MHz (8ch 利用)のいずれかを設定して利用することが可能である (図 1)。しかし、ボンディング幅が広帯域であるほど、他の無線 LAN との干渉や競合が生じやすくなる。現状の IEEE802.11ax 準拠の無線 LAN Access Point (AP)では、ほぼすべての AP において、設定し

た全チャンネルが利用できるまで待機してからチャンネルボンディングを行うスタティックチャンネルボンディング (SCB) (図 2) が採用されており, 広帯域であればあるほど, 全チャンネルを利用するまでの待機時間が長くなることでスループットが低下する恐れがある. さらに, 干渉源となる無線 LAN での通信としては, データだけでなく, 無線 LAN における制御, 管理フレームもその対象となる. 特に, 制御, 管理フレームは後方互換のため低レートで送信されることから, データ通信への悪影響となる可能性が高い. よって, 無線 LAN において特に多く発生するビーコンによる影響についても考慮する必要がある.

次に, OFDMA は OFDM (図 4(a)) の拡張であり, 使用可能な帯域幅内のサブキャリアを束ねて最大 9 つの Resource Unit (RU) と呼ばれるサブキャリアの束にする (図 4(b)). この RU を複数台の無線通信端末に対して割り当てることにより, 使用可能な帯域幅内に複数台の無線通信端末が同時にフレームを送り出すことが可能となる. この OFDMA 技術により, 複数台の無線通信端末の同時通信が可能となった一方, 無線通信端末の台数が多い場合に, RU が狭帯域となることから通信性能が低下する可能性がある.

本稿では上記で述べた無線 LAN の高速化技術における問題点に注目して, 2 節において現状の無線 LAN における管理フレーム, 特に, ビーコンの発生に関連する調査結果について報告する⁽³⁾. さらに, 3 節においてはチャンネルボンディング技術に注目し, 競合発生時に動的にチャンネル幅を変更する Dynamic Channel Bonding (DCB) (図 3) と SCB それぞれが有効となる通信環境を明らかにする⁽⁴⁾. 最後に, 4 節において市販の IEEE802.11ax 準拠の無線 LAN AP を用いた通信実験を通して, 最新の無線通信規格における通信性能⁽⁵⁾ と OFDMA における問題点について言及する.

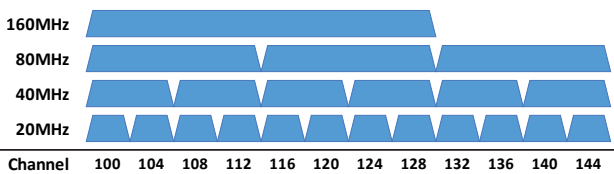


図 1 IEEE 802.11ax チャンネルボンディング時のボンディングパターン

Fig. 1 Combination pattern of bonding-channel in IEEE 802.11ax.

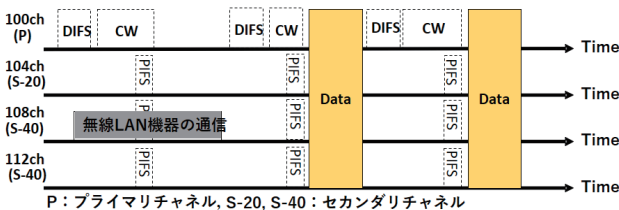


図 2 CSMA/CA によるスタティックチャンネルボンディング
Fig. 2 Static channel bonding (SCB) using CSMA/CA.

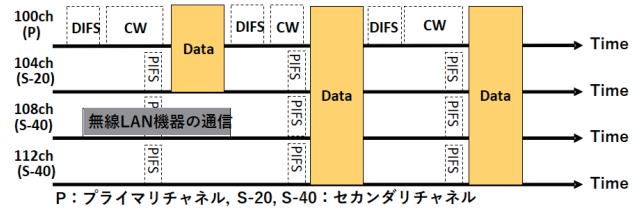
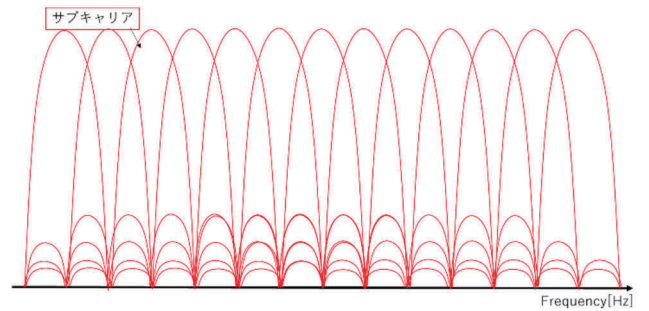
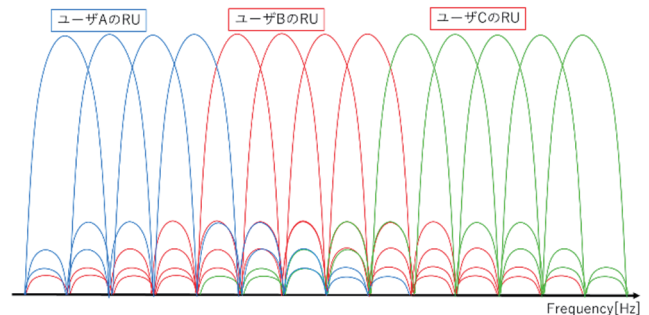


図 3 CSMA/CA によるダイナミックチャンネルボンディング
Fig. 3 Dynamic channel bonding (DCB) using CSMA/CA.



(a) OFDM



(b) OFDMA

図 4 OFDM と OFDMA における周波数の利用の例

Fig. 4 Comparison of frequency utilization between OFDM and OFDMA.

2. 管理フレーム・ビーコンに関連する調査～市街地における未使用無線 LAN の調査⁽³⁾

2.1 市街地における未使用無線 LAN の調査：背景と目的
市街地や公共交通機関などユーザが多く集まる場所に敷設されている無線 LAN の中には, 無線 LAN 子機 (Station, STA) が未接続で, 利用されていない無線 LAN AP (本研究では, 未使用 AP と定義) が存在している可能性がある. 無線 LAN AP は様々な通信規格の STA にその存在を知らせるため, 100ms ごとに低レートでビーコンを発信している. その結果, Airtime が長いビーコン送信が, チャンネルボンディングのように帯域幅を拡大するような高速化技術に対して, 特に市街地などの稠密環境において悪影響となる可能性がある. 本研究では, 未使用 AP のビーコンによる他の無線 LAN への通信性能の影響を調査する事前調査として, まず, 2019 年 12 月に実施された市街地における無線 LAN の普及/利用状況の調査結果を用いて, 市街地における未使用 AP の調査を行った.

2.2 実験の概要 市街地における無線 LAN の利用状況や通信規格を定量的に評価するため、2019年12月9日(月)～15日(日)8時、12時、17時に福岡市営地下鉄天神駅、天神南駅で調査を行った。この調査では、NETSCOUT 社 AirMagnet WiFi Analyzer を用いて1カ所あたり1回5分の計測を行った。本研究では、この計測データを利用して、図5に示すフローに従って未使用 AP を判定した。

ここでは、1日中 STA からの接続がない、固定設置された AP を未使用 AP と定義した。図5に示すように、まずは、計測結果の中に存在する移動 AP や遠方にある AP を除くため、3回の計測結果すべてにおいて検知された AP かどうかを判断した。次に、3回の計測結果において検知された AP の中から3回の計測結果において STA が0台である AP を未使用 AP として集計を行った。

2.3 実験結果 図6に地下鉄天神駅中央口付近での調査日別の AP 総数と未使用 AP 数を示す。図6より、地下鉄天神駅では1日あたり約140台の AP が存在しており、そのうちの半数ほどが未使用 AP であることがわかった。また、周波数帯別で見ても、AP 総数に対する未使用 AP 数の割合は2.4GHz 帯、5GHz 帯どちらも約50%であることがわかった。

また、図7に12月9日と12月15日の地下鉄天神駅中央口付近での5GHz帯のチャンネル別の AP 総数と未使用 AP 数を示す。図7より、36ch、48ch、140chには未使用 AP しかなかったため、同チャンネルを利用する他の無線 LAN への影響はないものの、隣接チャンネルでチャンネルボンディングが行われる場合は未使用 AP のビーコンと競合する可能性がある。また、他のチャンネルでは未使用 AP だけでなく STA と接続している AP が存在している。特に40chや44chに存在する AP の大半が未使用 AP であるため、未使用 AP のビーコンが競合することによって、STA と接続している無線 LAN の通信性能が低下する可能性がある。

2.4 2節のまとめ

本研究では市街地において1日中未使用である無線 LAN AP の調査を行った結果、約50%の無線 LAN が未使用でビーコンのみ発生させている状況であることがわかった。今後は、未使用 AP のビーコンと競合する場合の無線 LAN、特に、チャンネルボンディング機能への影響を実験によって明らかにしていく。

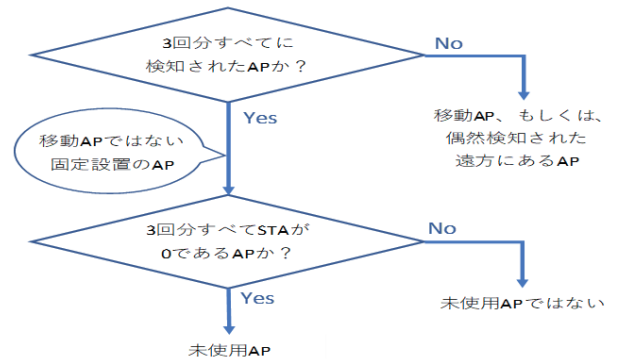


図5 未使用 AP の判定フロー

Fig.5 Flow chart of unused AP Decision.

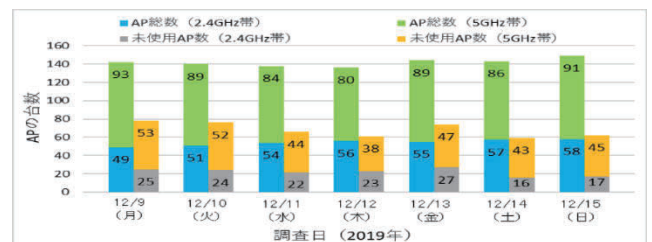


図6 調査日別の AP 総数と未使用 AP 数

Fig. 6 Number of total APs and unused APs from 2019/12/9 to 2019/12/15.

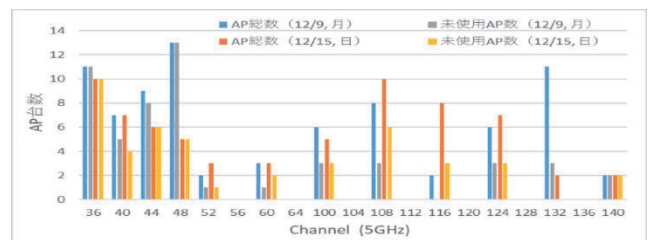


図7 チャンネル毎の AP 総数と未使用 AP 数 (5GHz 帯)

Fig. 7 Number of total APs and unused APs on each channel (5GHz).

3. 無線 LAN におけるチャンネルボンディング方式の適用環境に関する一検討⁽⁴⁾

3.1 無線 LAN におけるチャンネルボンディング方式の適用環境に関する調査：背景と目的

近年の無線 LAN では、高速化のため連続するチャンネルを複数束ねるチャンネルボンディングが採用されている。チャンネルボンディングでは他の無線 LAN との競合時に、全チャンネルを使用できるまで待機するスタティックチャンネルボンディング (Static Channel Bonding, SCB) と使用可能なチャンネル幅に縮退するダイナミックチャンネルボンディング (Dynamic Channel Bonding, DCB) が提案されている [1]。SCB は競合時に安定した転送レートで通信する一方で全チャンネルがクリアとなるまで待機し、DCB は競合時に使用できるチャンネル幅のみ利用するため転送レートが変動する。よって、転送レートが安定的な SCB と転送レートが変動しやすい DCB

の適応環境は、ユーザが使用するビデオデータやセンサーデータなどのアプリケーションに依存する。本節ではチャンネルボンディングを行う無線 LAN のスループットを数値計算によって定量的に評価し、SCB と DCB の適用環境を示す。

3.2 評価方法

評価対象ネットワークとして、近接する通信範囲内に2つの無線 LAN が存在し、1 台の無線 LAN AP (AP1) がプライマリチャンネルを 36ch, セカンダリチャンネルを 40ch とした 40MHz の CB を行う場合、もう一方の競合 AP (AP2) が 40ch のみを利用して通信する環境を想定する。AP x ($x = 1, 2$)に到着率 λ_x ($x = 1, 2$)でフレームサイズ f_x ($x = 1, 2$) [Byte]のフレームが届き、CSMA/CA によって送信権を獲得してフレームを転送する。ここで、AP x のフレーム送信前の平均オーバーヘッドは、DIFS 時間 (50 [μs]) + 平均バックオフ時間 (t_b) である。この後、AP x が物理転送帯域 R_{phy_x} [b/s] でフレーム送信 (データフレーム送信時間 t_{f_x}) 後、確認応答のため SIFS 時間 (10 [μs]) + ACK 送信時間 (t_{ack}) を要する。よって、AP x が 1 フレーム送信時に要する時間 T_x は、次の通りとなる：

$$T_x = DIFS + t_b + t_{f_x} + SIFS + t_{ack}, \quad (1)$$

$$t_{f_x} = f_x / R_{phy_x}. \quad (2)$$

3.2.1 AP1 が SCB を使用する場合

AP1 が SCB を使用する場合、使用チャンネル内に競合する通信を検出すると、競合する通信が終了し、使用する全チャンネルの送信権を獲得できるまで待機する (図 8)。CSMA/CA による送信権の獲得は全 AP に均等であるため、AP1 の実効スループット Th_{s1} は、式 (3) で表現される：

$$Th_{s1} = R_{phy_1} \left(\lambda_1 t_{f_1} / (\lambda_1 T_1 + \lambda_2 T_2) \right). \quad (3)$$

3.2.2 AP1 が DCB を使用する場合

AP1 が DCB を使用する場合、競合時に送信権を獲得できたチャンネルのみにボンディング幅を縮退させる (図 9) ため、AP1 の物理帯域 R_{phy_1} は変動する。よって、AP1 の実効スループット Th_{d1} は、式 (4) で表すことができる：

$$Th_{d1} = \left(\left(\frac{\lambda_1}{2} \right) t_{f_1} + \left(\frac{\lambda_1}{2} \right) 2t_{f_1} \right) / \left(\left(\frac{\lambda_1}{2} \right) T_1 + \left(\frac{\lambda_1}{2} \right) 2T_1 \right). \quad (4)$$

3.3 評価結果：フレームサイズによる SCB/DCB の性能への影響

フレーム到着率 $\lambda_1 = \lambda_2$ の場合の AP1 と AP2 へのフレームサイズによる実効スループットへの影響を図 6 に示す。ここでは、AP1 のフレームサイズ $f_1 = 1KB, 5KB, 32KB, 64KB, 1MB$ とし、 $f_2 = \alpha f_1$ ($0 < \alpha \leq 1$) とした。評価指標は正規化スループット $Th^* = Th_{s1} / Th_{d1}$ とし、 $Th^* \geq 1$ の場合 DCB よりも SCB の方が、スループット性能が良好であるといえる。

図 10 より、AP1 のフレームサイズが 5KB 以上で、かつ、 α が小さい場合に SCB が有効であることがわかる。つまり、AP2 のフレームサイズが AP1 のフレームサイズと比較して非常に小さい場合は SCB が有効であり、AP1 のフレームサイズが 5KB 未満で AP2 のフレームサイズとの差が大きい

場合は DCB が有効であることが示された。

3.4 3 節のまとめ

本研究では、40MHz で SCB, DCB を行う無線 LAN AP の実効スループットを数式で表現し、到着フレームサイズによる影響を定量的に評価した。結果より、競合通信としてセンサーデータのような小さいフレームが発生する場合は、DCB ではなく SCB が有効であることが示された。

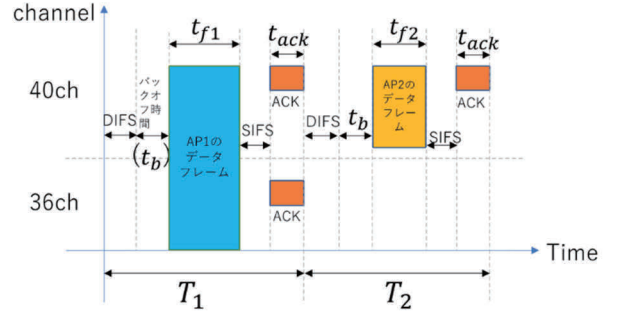


図 8 AP1 が SCB で通信する場合の通信の流れ

Fig. 8 Time sequence of data frame transmission of AP1 with SCB.

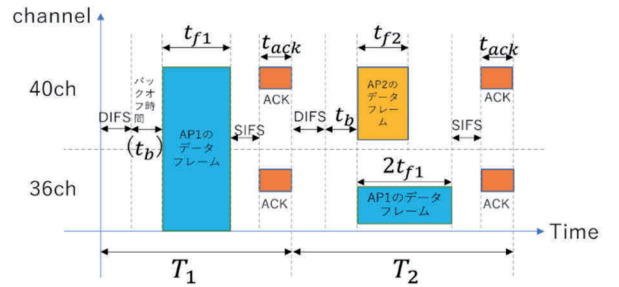


図 9 AP1 が DCB で通信する場合の通信の流れ

Fig. 9 Time sequence of data frame transmission of AP1 with DCB.

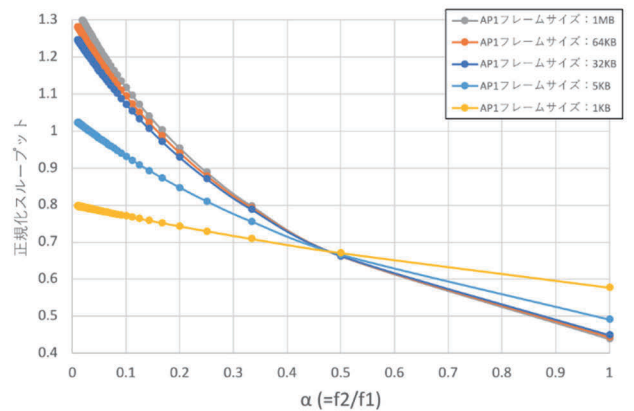


図 10 フレームサイズ比 α と AP1 と AP2 の正規化スループットの関係

Fig. 10 Impact of α on the normalized throughput of AP1 and AP2.

4. IEEE802.11ax 準拠の無線 LAN におけるダウンリンク通信に関する性能評価⁽⁵⁾

4.1 背景と目的 2021年2月に標準化が完了した IEEE802.11.ax では、2次変調方式として OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, 直行周波数分割多重接続)を使用することで、最高伝送速度やスループット(時間当たりのデータ処理能力)の向上だけでなく、複数の子機(STA)と同時通信を行うことができる。本研究室では過去に様々な製造メーカーの IEEE802.11ac 規格の無線 LAN AP (Access Point) を使用して性能評価を行った結果、通信手順や発生する制御フレーム、フレーム集約方法が異なることに起因して、通信性能も異なることを明らかにした[1]。本節では 11ax 準拠の各種メーカーの無線 LAN 機器においても同じ問題が生じるかを検証するため、11ax 準拠無線 LAN 単体におけるダウンリンク通信に関する実験を通して、機器の通信手順と通信性能に関する調査を行う。さらに、IEEE802.11ax 準拠の AP1 台と複数台の子機(STA)を用いた実験を通して、IEEE802.11.ax ダウンリンク OFDMA の通信性能を明らかにする。

4.2 実験概要 図 11 に実験環境を示す。実験では 11ax 準拠の無線 LAN AP として ASUS 社、IO-DATA 社、BUFFALO 社の AP を利用し、無線接続した PC1 と有線接続した PC2 との間でネットワーク性能計測ツールである iperf3 を用いて PC2 から PC1 方向に CBR/UDP トラフィックを生成した。AP の設定として、チャンネルボンディングの帯域幅を 40MHz に固定して実験を行った。無線子機は PC1 に内蔵の Intel 社 WiFi6 AX200 で、アンテナ数を 2 とした。よって、40MHz 2xSS の MCS11 と想定して iperf3 の通信レートを 600[Mb/s]と設定した。無線区間におけるフレーム発生状況を確認するため、無線 LAN アナライザ (Tamosoft 社 Commview for wifi) を用いてフレームキャプチャを行った。40 秒間の実験を 5 回実施し、5 回の平均スループットを性能指標として評価を行った。

次に、ダウンリンク OFDMA の性能評価のため、無線 LAN AP として ASUS 社 TUF-AX3000 を使用し、AP を介して無線接続した受信側 PC n 台 (n=1~4) と有線接続した送信側 PC n 台との間でネットワーク性能計測ツールである iperf3 を用いて各送受信 PC ペア間に CBR/UDP トラフィックを生成した。AP の設定として、OFDM, OFDMA, OFDMA+MU-MIMO それぞれの設定時にチャンネルボンディング時の帯域幅 40MHz として実験を行った。

上記の実験は、無線環境がクリアである本学 総合研究機構 電波遮蔽室にて実施した。

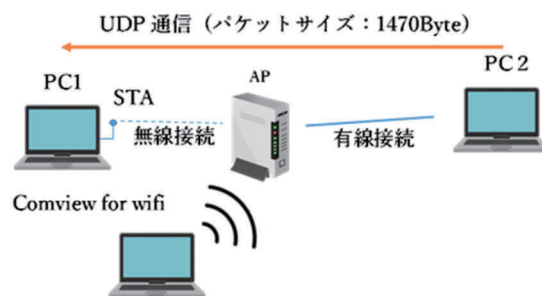


図 11 実験環境

Fig. 11 Experimental Environment.

4.3 実験結果 無線 LAN アナライザによって無線区間の通信状況を確認した結果、今回調査した AP はすべて、CSMA/CA with RTS/CTS を利用したスタティックチャネルボンディングを採用していることがわかった。また、フレーム集約手法は IO-DATA 社が A-MPDU であったが、ASUS 社、BUFFALO 社の AP で A-MSDU と A-MPDU の併用であり、RTS/CTS 発生後の集約フレーム転送時のエアタイムはほぼ 10 [msec] 程度と通信手順としては製造メーカーによらずほぼ共通化されていることがわかった。

次に、図 12 に平均スループットを示す。図 12 より AP によって最大 100Mb/s 程度の平均スループットの差が見られた。ASUS 社、BUFFALO 社 AP において通信手順、フレーム集約手法、エアタイムが共通化されていることから性能差の要因を調査するために、データフレーム送信毎に選択される物理伝送レートの使用割合を調査した(図 13)。図 13 より、各社の AP において物理伝送レートの使用割合が大きく異なることがわかった。また、IO-DATA 社の AP では A-MPDU を採用していることにより、ヘッダ分のオーバーヘッドが大きいことと物理伝送レートの使用割合が低いためスループットが低下している。よって、11ax 規格の無線 LAN においては、フレーム集約手法、物理伝送レートの制御方法が通信性能に大きく影響していることがわかった。

次に、図 14 に STA 数 n に対する STA 毎の平均スループットへの影響を示す。STA 数が 1 台の場合は旧規格で採用されていた OFDM, 11ax 規格から採用された OFDMA や OFDMA に加え、MU-MIMO を行った場合の平均スループットに大きな差はなかった。しかし、STA 数が増加するにつれて、STA 1 台あたりの平均スループットは減少し、特に、OFDM では STA 数 n に対する減少度合いが急激である。一方で、STA 数=4 となると、OFDMA よりも OFDM の方が平均スループットが若干高い。OFDMA では STA が増加した場合に、全 STA に対して使用可能な帯域内のサブチャネルを束ねた RU を割り当てることで、各 STA の帯域が狭帯域となってしまう。STA 数が増加したことによって、狭帯域で継続的に通信を行う OFDMA よりも、OFDM で全帯域幅を 1 台の STA に割り当て、時分割多重で各 STA に対する通信を行ったほうがオーバーヘッドが少なくなったため、OFDM の方がスループットが高くなったと予想される。以上より、STA 数が増加した場合に必ずしも

OFDMA が良好なスループット特性が得られるわけではないことがわかった。従って、OFDMA 利用時は同時通信ユーザ数に依存して、OFDM と OFDMA の切り替えを行うことにより、無線 LAN 全体の通信性能が向上する可能性がある。本研究室では、今後、OFDM と OFDMA の切り替え手法について検討していく。

4.4 4 節のまとめ 本研究において 11ax 準拠無線 LAN 機器の実機による通信性能の評価を行った結果、MAC 制御、チャンネルボンディング手法、エアタイムは共通化されていることがわかり、通信性能はフレーム集約手法、データフレームの転送レート制御に依存していることを明らかにした。また、1 台の AP に複数台の STA を接続して同時にダウンリンク通信を行った結果、STA 台数が多くなった場合に RU 割当による狭帯域化が要因となり、OFDMA におけるスループット性能が低下する可能性があることがわかった。

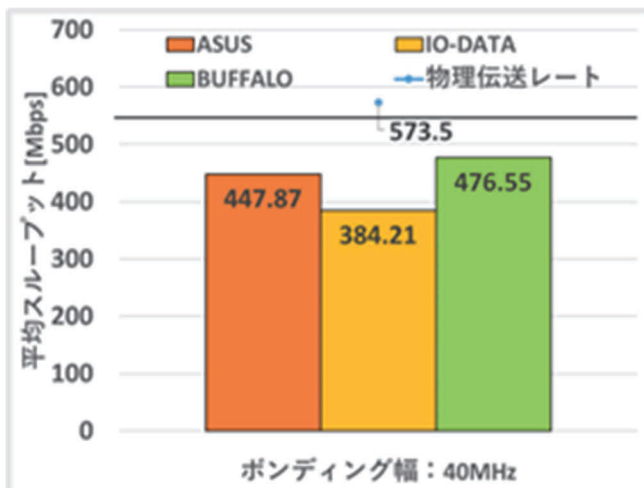


図 12 各 AP 利用時の平均スループット
Fig. 12 Average throughput of each AP.

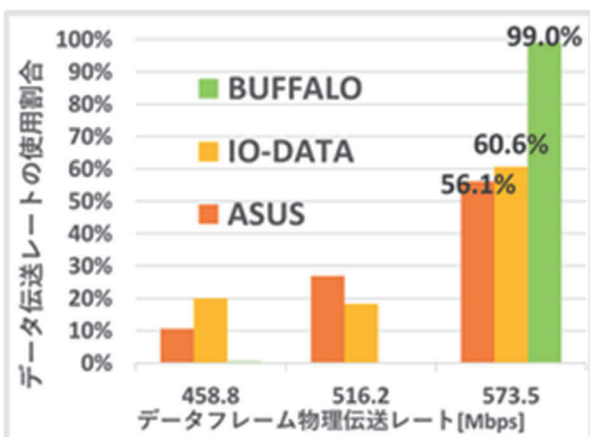


図 13 各 AP 利用時のデータフレーム送信時の物理伝送レート
Fig. 13 Ratio of PHY rate used by each data frame transmission.

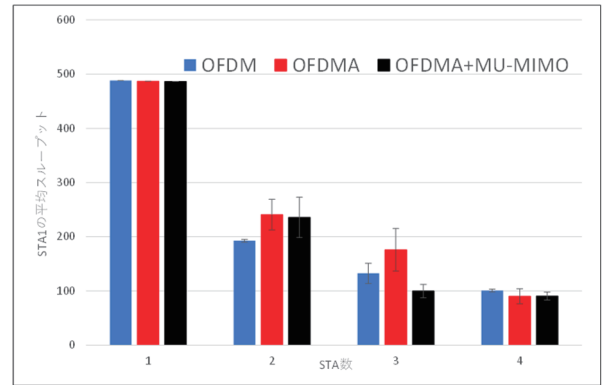


図 14 複数 STA 存在時の 1STA あたりの平均スループット
Fig. 14 Average throughput of 1STA in case that multiple STAs connected on an AP.

5. まとめ

本稿では IEEE802.11ax 無線通信規格で採用されている無線 LAN の高速化技術の中でも、チャンネルボンディング、OFDMA に注目して、実験を通して現状の問題点を明らかにするための調査を行った。結果から、市街地のような多数の無線 LAN が存在する環境において、STA が接続しない未使用 AP が多数存在しており、それらが発するビーコンによるチャンネルボンディングへの悪影響について議論した。また、チャンネルボンディング技術の 2 つの手法について、競合が生じるような通信環境では、競合する通信のフレームサイズやフレーム到着率によって SCB/DCB の有効となる環境が異なることを示し、これらを切り替える手法によってよりよいスループット性能が得られる可能性を示唆した。最後に、市販の IEEE802.11ax 準拠の無線 LAN AP を用いた通信実験を通して、11ax ではフレーム集約手法とレート制御が重要であること、さらに、AP と通信するユーザ数に応じて OFDM、OFDMA を切り替えることでよりよいスループット性能が得られる可能性を示唆した。今後は本研究の成果をもとに、新たな無線 LAN 通信制御を提案し、有効性を示す予定である。

謝辞: 本研究は本学エレクトロニクス研究所の 2021 年度科研費リトライ制度による支援を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Y. Fukuda, Y. Oie, "Decentralized Access Point Selection Architecture for Wireless LANs," IEICE Transactions on Communications, E90-B(9), pp. 2513-2523, 2007 年 9 月.
- (2) 田村 瞳, 藤井 一樹, 野林 大起, 塚本 和也, 『IEEE802.11ax 準拠の機器におけるチャンネルボンディング機能の性能評価』IPSJ 論文誌デジタルプラクティス, Vol. 2(2), pp. 99-113, 2021 年 4 月.
- (3) 小野 彩華, 田村 瞳, 塚本 和也, 『市街地における未使用 AP の調査』2021 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2021 年 9 月.
- (4) 山本 壮馬, 田村 瞳, 塚本 和也, 『無線 LAN におけるチャンネルボンディング方式の適用環境に関する一検討』2021 年電子情報通信学会九州支部学生会講演会, 2021 年 9 月.
- (5) 中島 千晴, 田村 瞳, 野林 大起, 塚本 和也, 『IEEE802.11ax 無線 LAN AP の通信手順と通信性能に関する性能評価』, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2022 年 9 月 (投稿済, 発表予定).