

IEEE802.11ac 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

田村 瞳^{1,a)} 藤井 一樹² 野林 大起³ 塚本 和也⁴

受付日 2020年10月7日, 再受付日 2020年12月28日,

採録日 2021年1月25日

概要: IEEE802.11ac 無線通信規格の高速化技術の一つに、隣接する複数のチャンネルをまとめて同時に利用するチャンネルボンディング機能がある。チャンネルボンディングでは複数のチャンネルを同時に利用するため広帯域になる一方で、周囲の無線 LAN との競合や干渉が生じやすくなるため、媒体アクセス制御によって利用するチャンネルがアイドル状態かを確認する必要があるが、その媒体アクセス制御の実装はメーカーによって異なる可能性がある。また、チャンネルボンディング機能を利用したアクセスポイント (AP) のボンディング帯域内に他の AP が競合する場合の通信性能も明らかになっていない。そこで、本研究では市販されている様々なメーカーの AP を用いた通信実験を通して、チャンネルボンディング利用時の媒体アクセス制御を明らかにするとともに、個々の AP の通信性能やチャンネルボンディング帯域内に競合が発生した場合の通信性能を調査した。その結果、媒体アクセス制御の実装は 3 パターンに分類されることが判明し、他の AP との競合時の通信性能よりチャンネルボンディング利用時にオプション機能である拡張 Request To Send (RTS)/Clear To Send (CTS) の利用が各 AP の通信性能に与える影響を低減できることが分かった。

キーワード: IEEE802.11ac, チャンネルボンディング, 媒体アクセス制御, 性能評価

Experimental Evaluation on Practical Effectiveness of IEEE 802.11ac Channel Bonding

HITOMI TAMURA^{1,a)} KAZUKI FUJII² DAIKI NOBAYASHI³ KAZUYA TSUKAMOTO⁴

Received: October 7, 2020, Revised: December 28, 2020,

Accepted: January 25, 2021

Abstract: Channel bonding technology, which bundles multiple adjacent channels, is one of the promising ways for improving throughput performance in IEEE 802.11ac wireless LANs. Since the device using channel bonding tend to be exposed to severe competition and/or interference with other devices due to its wider bandwidth, media access control (MAC), which identifies whether the channel is idle or not, becomes crucial. However, the MAC implementation of channel bonding is vendor matter, and thus it could be different among them. Moreover, the effectiveness of channel bonding when some AP utilizing channel bonding (AP (w/ CB)) collides with APs without channel bonding (C-AP) has not been investigated. Therefore, in this paper, we investigated the MAC implementation on several commercial products of 802.11ac AP and examined how the channel collision between AP (w/ CB) and C-AP affects the communication performance through the practical experiments. Finally, we demonstrated that the MAC implementation is basically classified into three patterns and the use of extended Request To Send (RTS)/Clear To Send (CTS), which is an optional function of IEEE 802.11ac specification, greatly alleviates the degradation in communication performance even under the channel collision between AP (w/ CB) and C-AP.

Keywords: IEEE802.11ac, channel bonding, medium access control, performance evaluation

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末などの普及とともに、YouTubeなどを始めとする動画などのリッチコンテンツも普及し、無線LANの通信速度の高速化が求められている。2014年の1月に標準化された5GHz周波数帯を利用するIEEE802.11ac無線通信規格（以降、11ac）では、変調信号の多値化、チャンネルボンディング、ビームフォーミング、MIMO（Multi-Input Multi-Output）などの機能によって、最大6.93 Gb/sの高速通信を実現することができる[1]。

これらの高速化技術のうち、チャンネルボンディング機能は、物理通信帯域を拡大させるために隣接する複数のチャンネルを束ねて同時に通信に利用する技術である。従来規格のIEEE802.11a/b/g無線通信規格では、常に1チャンネル（20 MHz）で通信を行っていたが、IEEE802.11n無線通信規格から標準化されたチャンネルボンディングでは2チャンネル（40 MHz）、11acでは4チャンネル（80 MHz）が必須機能とされている。また、11ac wave 2からは最大8チャンネル（160 MHz）までチャンネルを束ねて利用可能となり、2020年に標準化完了が予定されている最新規格IEEE802.11ax（Wi-Fi 6）においても継承される。このように複数のチャンネルを同時に利用して帯域幅を増加する場合、データ転送前に使用するチャンネルすべてにおいて競合する通信が存在しないことを確認することが必要となる。

無線LANでは、使用するチャンネルにおけるフレーム衝突や干渉を避けるための媒体アクセス制御としてCarrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance（CSMA/CA）を利用している。また、隠れ端末問題に対応するため、利用するチャンネル上で送受信端末がRequest To Send（RTS）/Clear To Send（CTS）フレームを交換するCSMA/CA with RTS/CTS機構が提案されている。チャンネルボンディング利用時には干渉回避が極めて重要となるため、RTS/CTS機構の利用（拡張RTS/CTSと呼ばれる）が重要となるが、この拡張RTS/CTS機構の使用はオプション機能（必須ではない）となっているため、アクセスポイント（AP）の製造メーカーによって実装方法が異なると予想される。また、これらの媒体アクセス制御の違いがチャンネルボンディング利用時の通信性能に与える影

響も明らかになっていない。

さらに、チャンネルボンディング機能では複数チャンネルを同時に利用するため、他の無線LAN機器との競合が起こりやすいことは避けられない。このとき、前述した媒体アクセス制御の違いが競合発生時の通信に与える性能は明らかになっていない。

そこで、本研究では様々なメーカーの11ac準拠の無線LAN APを用いた実機実験を通して、実装されているチャンネルボンディング利用時の媒体アクセス制御や帯域の利用方法（競合時に設定したボンディング帯域幅をどのように使用するか）といった通信の流れを明らかにする。加えて、チャンネルボンディング時に他の無線LAN通信が競合した場合の通信性能を媒体アクセス制御ごとに評価し、チャンネルボンディングの性能を最大限有効利用するために有効な媒体アクセス制御、ボンディング帯域幅の利用方法について考察する。

以下、2章では本研究の調査対象の11acの高速化技術について説明する。3章において本研究における実験内容について説明し、4章では実験結果と考察を示す。最後に5章で本稿についてまとめる。

2. IEEE802.11acにおける高速化技術

本章では、IEEE802.11acにおけるチャンネルボンディング機能、チャンネルボンディング利用時の媒体アクセス制御、およびフレーム集約技術について説明する。

2.1 チャンネルボンディング

チャンネルボンディングとは物理層の通信帯域幅を拡大させるために隣接する複数のチャンネルをまとめて利用する技術である[1]。図1に5.6GHz帯におけるチャンネルボンディングの利用例を示す。11acでは4チャンネル分の80MHzまでのチャンネルボンディングを必須機能としており、11ac wave2対応の機器ではオプション機能として最大160MHzまで帯域幅を拡大できる製品もあるが、8チャンネルを同時利用することから他の無線LANとの競合が生じやすく、その利用は推奨されていない。そこで本稿では、最大80MHz幅のチャンネルボンディングを実装した機器を取り扱う。

チャンネルボンディング利用時の通信帯域幅は20MHzのプライマリチャンネルと一つ以上のチャンネルで構成されるセカンダリチャンネルに分類される[2]。図2に示すように、

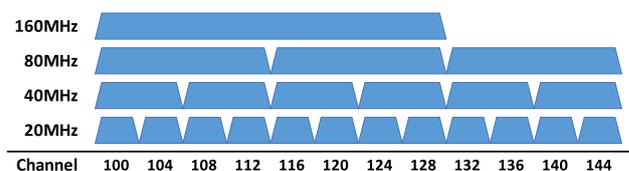


図1 802.11acチャンネルボンディング時のボンディングパターン
Fig. 1 Combination pattern of bonding-channel in IEEE 802.11ac.

1 福岡工業大学
Fukuoka Institute of Technology, Fukuoka 811-0295, Japan
2 株式会社富士通エフサス
Fujitsu FSAS INC., Kawasaki, Kanagawa 211-0012, Japan
3 九州工業大学大学院工学研究院
Kyushu Institute of Technology, Tobata, Fukuoka 804-8550, Japan
4 九州工業大学大学院情報工学研究院
Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Fukuoka 820-8502, Japan
a) h-tamura@fit.ac.jp

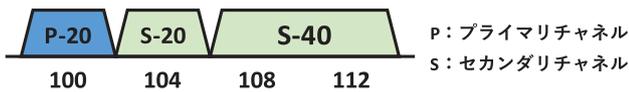


図2 80 MHz チャンネルボンディング時のチャンネル構成
Fig. 2 Channel structure at 80 MHz channel bonding.

100～112ch を利用する 80 MHz チャンネルボンディングの例において、100ch を 20 MHz のプライマリチャンネル (P-20) と設定すると、104ch が 20 MHz のセカンダリチャンネル (S-20) となり、108ch, 112ch が 40 MHz のセカンダリチャンネル (S-40) と自動的に設定される。

802.11ac 準拠の AP におけるチャンネルボンディングでは、競合発生時のセカンダリチャンネルの利用方法に関して以下の 2 種類が提案されている。

(1) スタティックチャンネルボンディング [3] :

この方式では、常にボンディングした全帯域幅を用いて通信しようとする。そのため、2.1.1 項で説明する媒体アクセス制御の結果、一部のチャンネルに他の通信が競合する (ビジー) 場合に、そのチャンネルが使用可能になるまで通信自体を待機する。その後、全チャンネルが利用可能になった時点でチャンネルボンディングによる通信を行う。このように、常にボンディングした全チャンネルを利用して通信を行うため、送信機会獲得時の通信速度は高速となるものの、セカンダリチャンネル上で競合が頻発する場合は待機時間の増加によって通信性能が劣化する。

(2) ダイナミックチャンネルボンディング [4], [5], [6] :

一方、この方式では、媒体アクセス制御の結果、一部のチャンネルにビジーを検出した場合において、使用可能なチャンネルのみを用いてボンディングチャンネル幅を動的に変更する。ただし、“隣接”チャンネルのみしかボンディングできないという制約から、ビジーチャンネルの場所に応じてボンディング帯域幅が異なる (S-20 でビジーを検出した場合、プライマリチャンネル (図 2 中の P-20) のみ、S-40 でビジーを検出した場合 40 MHz 幅 (図 2 中の P-20, S-20) でのボンディングとなる)。この方式では、一部のチャンネルにおけるビジー検出時においても全チャンネルのアイドルを待機せずに利用可能なチャンネルを用いてボンディング通信を実施するため、チャンネル利用効率は良い一方で、通信速度が変動することになる。

2.1.1 チャンネルボンディング時の媒体アクセス制御

(1) チャンネルボンディング利用時のキャリアセンス

11ac のチャンネルアクセスには従来規格から採用されている Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)、もしくは、拡張 Request To Send (RTS)/Clear To Send (CTS) を利用する CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS が実装されている。CSMA/CA では、フレーム衝突や電波干渉を避けるために通信開始前に同一チャンネル帯で他の端末が通信しているかを確認する信号検出 (キャリアセンス) を行う。このキャリアセンスには

表 1 802.11ac キャリアセンスにおける CCA 閾値 [8]

Table 1 CCA threshold for carrier-sense in IEEE 802.11ac [8].

CCA-mode	P-20	S-20	S-40
SD-th	-82dbm	-72dbm	-72dbm
ED-th	-62dbm	-62dbm	-59dbm

Clear Channel Assessment (CCA) を用いた物理キャリアセンスと Network Allocation Vector (NAV) を用いた仮想キャリアセンスが利用される。

11ac では、ボンディング帯域幅内でのキャリアセンスが必要で、プライマリチャンネルとセカンダリチャンネルにおいて検出方法が異なる。20 MHz のプライマリチャンネル上においては物理キャリアセンスの信号検出 (Physical Layer Convergence Procedure (PLCP) プリアンブル検出) に加え、復号したヘッダ内から得た Duration Time (NAV) を用いた仮想キャリアセンスの双方を実施する。一方、セカンダリチャンネルでは物理キャリアセンスのみが実行される [1]。表 1 に 11ac のプライマリチャンネル、セカンダリチャンネルそれぞれにおける物理キャリアセンスで利用される CCA 閾値を示す [6]。物理キャリアセンスでは信号検出の閾値 (SD-th) とエネルギー検出の閾値 (ED-th) が用いられる。SD-th は 802.11 プリアンブルの検出のために設定されており、無線 LAN 以外の復号ができない信号の場合は SD-th より高い ED-th を使用して無線 LAN 以外の信号を積極的に検出するようにしている。また、11ac では表 1 に示すようにプライマリチャンネルのほうがセカンダリチャンネルよりも SD-th, ED-th とともに低く設定してあるため、ボンディング帯域幅内においてプライマリチャンネルでは他の無線 LAN を検出しやすく、セカンダリチャンネルでは他の無線 LAN を検知しにくい。これによって、チャンネルボンディング利用時にセカンダリチャンネルにおいて他の無線 LAN 存在する場合にフレーム衝突が起こりやすくなる可能性がある。

(2) チャンネルボンディング利用時の CSMA/CA

無線 LAN において、送信したいフレームを持つ各送信端末はキャリアセンス (2.2.1 項 (1)) によって DIFS 時間継続してアイドル状態だと判断すると、フレーム衝突を避けるためにランダムな時間 (Contention Window: CW, バックオフ時間) を待ち、それまでに他端末が送信を開始しなかった場合にデータフレームを送信する。一方で、バックオフ時間中に他端末が送信を開始した場合には、バックオフのカウンターを停止したうえでキャリアセンスを行い、再度 DIFS 時間のアイドル状態を確認した後で、バックオフのカウンタを再開し、バックオフ時間が経過するとフレームを送信する。受信側はデータフレームを受信すると、SIFS 時間後に BA (Block ACK, 確認応答) を送信し、送信側に対してデータ受信完了を通知する。この

とき、ランダムな時間 (CW) は CW の最大値をフレームの送信回数に応じて指数的に増加させる (2 進指数バックオフアルゴリズム) ことで再送フレームの更なる衝突確率を低減させている。ただし、最大 CW 値が 1023 に達した後は一定値としたうえで、規定された回数まで再送される。

このような動作を行う CSMA/CA による媒体アクセス制御を適用したチャンネルボンディング時の通信の流れについて説明する [7]。また、図 3、図 4 に、80 MHz 幅 (4 チャンネル分) を用いてスタティックチャンネルボンディング、ダイナミックチャンネルボンディングで通信を行った際の通信の流れを示す。

チャンネルボンディング時は、プライマリチャンネルは前述した CSMA/CA によってフレーム送信が制御されるが、セカンダリチャンネルではプライマリチャンネルにおけるバックオフ時間が終わる直前に “PIFS 時間だけキャリアセンス” のみを行い、利用の可否を判断する。セカンダリチャンネルがビジーと判断された場合、図 3 に示すようにスタティックチャンネルボンディングの場合は再度プライマリチャンネルのキャリアセンスに戻り、80 MHz すべてのチャンネルがアイドルとなった時点で通信を開始する。これに対し図 4 に示すダイナミックチャンネルボンディングの場合は、ビジーと判断されたチャンネルを除いて隣接で利用可能なチャンネルのみ (100+104ch の 40 MHz) をボンディングしたうえで通信する。

このように、セカンダリチャンネルでは、キャリアセンスのための時間がプライマリチャンネルよりも短時間であるうえに、プライマリチャンネルよりも SD-th や ED-th が高いことによって、セカンダリチャンネルにおいて正確なキャリアセンスができない可能性がある。

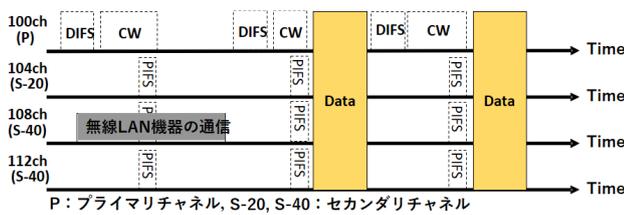


図 3 CSMA/CA によるスタティックチャンネルボンディング
Fig. 3 Static channel bonding (SCB) using CSMA/CA.

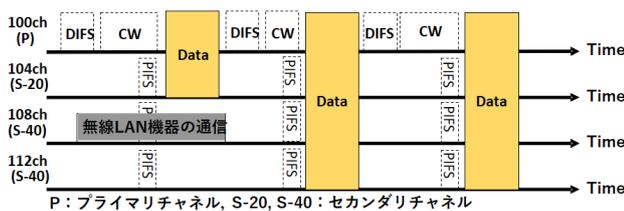


図 4 CSMA/CA によるダイナミックチャンネルボンディング
Fig. 4 Dynamic channel bonding (DCB) using CSMA/CA.

(3) チャンネルボンディング利用時の CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS

2.2.1 項 (2) で説明した CSMA/CA 方式では、セカンダリチャンネルの利用判断がキャリアセンス (2.2.1 項 (1) で説明した物理キャリアセンス) のみで行われ、チャンネル占有 (Network Allocation Vector, NAV) 期間を用いた仮想キャリアセンスが行われないため、セカンダリチャンネルの利用判断に問題があると考えられる。

これまでに、この仮想キャリアセンス (NAV 期間) を用いて主に隠れ端末問題の回避を目的として RTS (Request To Send, 送信許可要求)/CTS (Clear To Send, 送信許可) 手法が提案されてきた。そこで、この RTS/CTS 手法をチャンネルボンディング利用時に適用した CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS の媒体アクセス制御について本項で述べる。基本的な動作は、送信側が利用するチャンネル上において DIFS 時間とバックオフ時間の間、継続してチャンネルがアイドルであることを確認した後、RTS を送信する。この RTS を受信後、受信側が CTS を返送することで送信側にデータフレーム送信を許可する。この RTS/CTS フレーム送信時には他の無線 LAN 機器によるフレーム送信を禁止するために、NAV 期間を通知する Duration time をデータフレームの送信開始から BA (Block ACK, 確認応答) の受信までの時間が設定される。その結果、RTS/CTS を受信した他の無線 LAN 機器は設定されている NAV 期間だけ通信を待機することで隠れ端末発生時においてもフレーム衝突を回避することができる。

図 5 に RTS/CTS 手法をボンディングする全チャンネルに適用する媒体アクセス制御 (以降、CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS 手法と呼ぶ) を示す [1], [2], [7]。この場合、送信側はボンディングに使用する全チャンネル上に RTS を送信する。このとき、プライマリチャンネルにおいて DIFS 時間+バックオフ時間の間、継続してチャンネルがアイドルであることを確認した後 RTS を送信するが、セカンダリチャンネルにおいては PIFS 時間だけチャンネルがアイドルであることを確認した後 RTS を送信する。この RTS フレームを受け取った受信側はそのチャンネルが利用可能であることを送信側に通知するために、RTS フレームを受信したチャンネル上で CTS フレームを返送する。このとき、送信

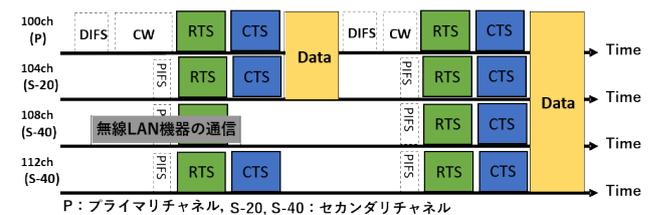


図 5 CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS によるダイナミックチャンネルボンディング
Fig. 5 Dynamic channel bonding (DCB) using CSMA/CA with extended RTS/CTS.

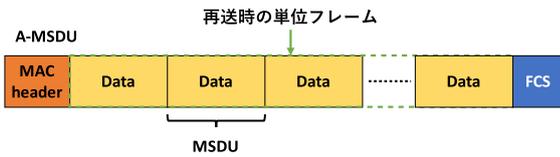


図 6 A-MSDU の構成

Fig. 6 Frame structure of A-MSDU.

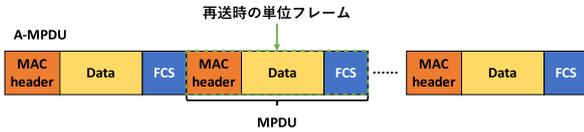


図 7 A-MPDU の構成

Fig. 7 Frame structure of A-MPDU.

側でキャリアセンスによってビジーと判断されたチャンネルでは RTS が送信されないうえ、RTS が送信できても受信側でビジーと判断されたチャンネルでは CTS が返送されない。送信側では CTS の受信状況から利用可能なチャンネルを判断できるため、図 5 に示すようにダイナミックチャンネルボンディングではプライマリチャンネルを含めた使用可能なチャンネルのみを用いてデータフレームを送信する。一方、スタティックチャンネルボンディングでは、使用する全チャンネルにおいて CTS が受信できるまで待機し、常に全チャンネルをボンディングして通信を行う。なお、この CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS 手法は IEEE802.11ac 標準規格においては、オプション機能（必須機能ではない）[1] となっているため、実装の有無、および実装方法についてもメーカー依存となっている。

2.2 フレームアグリゲーション

フレームアグリゲーションとは複数個のデータフレームを集約することで、フレーム単位で実施される CSMA/CA や CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS 制御に伴う時間的なオーバーヘッドを低減し、高速化を図る機能である [1]。集約方法は Aggregation MAC Service Data Unit (A-MSDU) と Aggregation MAC Protocol Data Unit (A-MPDU) が規定されており、図 6 に示すように A-MSDU は一つの MAC ヘッダに対し、複数の MSDU を集約し一つの MPDU として送信する（末尾に Frame Check Sequence : FCS を追加）。一方、A-MPDU は図 7 のように MAC ヘッダから FCS までで構成される MPDU を複数個集約して送信する。なお、この二つを組み合わせると A-MSDU を複数個集約し、A-MPDU として送信することもできる（図 8）。また、フレームの送信後には、圧縮された ACK である Block ACK (BA) が返送される。BA によってパケットエラーが検出された場合、A-MSDU では集約したデータフレームを再送しなければならないのに対し、A-MPDU は該当するデータフレームのみの再送で

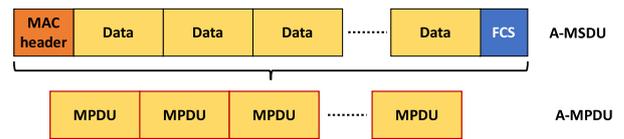


図 8 A-MSDU と A-MPDU の併用

Fig. 8 Frame structure of combination of A-MSDU and A-MPDU.

済むという違いがある。

3. 実験

本研究では、11ac 準拠の市販の無線 LAN アクセスポイント (AP) と無線 LAN 子機 (Station, STA) を使用してチャンネルボンディング時の AP の媒体アクセス制御を確認し、競合時の通信性能に関する通信実験を実施した。実験は福岡工業大学工学部 電子情報工学科 田村研究室において、実験に使用した機器以外の無線通信がないクリアなチャンネルを使用して実験を行った。

3.1 実験環境

実験構成を図 9、図 10 に示し、使用した機器を表 2 に示す。本研究では、実験 1 として AP の使用チャンネルが競合しない場合の 1 ペアの AP-無線子機 (STA) 間の性能評価を行い、チャンネルボンディング時の媒体アクセス制御を明らかにするとともに、チャンネルボンディングの性能評価を行った。次に、実験 2 としてチャンネルボンディングで使用するチャンネル帯域幅内に競合する AP (チャンネルボンディングなし, C-AP) が存在する場合の実験を行った。なお、実験 1, 2 では、フレームロスによる影響をなくし良好な無線環境下で評価するため、AP-STA 間を 2 m、実験 2 の競合時は AP 間の距離を 1.5 m と設定した。

実験 1 では、市販の AP が採用しているチャンネルボンディング時の媒体アクセス制御を確認し、各媒体アクセス制御による通信性能への影響を評価するための実験を行った。図 9 のように AP1 台とトラフィック生成・受信 PC を 1 ペア使用し、AP から STA 方向へのチャンネルボンディング時のデータフレーム送信手順、スループットを計測するため、トラフィック生成用 PC (Sender 1) を AP に有線接続し、AP から無線接続した PC (Receiver 1) を受信側として、スループット計測ソフトウェア・iperf3 を使用してトラフィックを発生させた。iperf3 におけるトラフィック送信レートは、1 ストリームでチャンネルボンディングを行うときの最大物理伝送レートに基づいて表 3 のとおりを設定した。なお、チャンネルボンディングを行う AP を経由して STA へ送信されるトラフィックの最大物理伝送レートは、ボンディング幅が 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz の場合にそれぞれ 86.7 Mb/s (MCS index : 8), 200 Mb/s, 433.3 Mb/s (MCS index : 9) である。AP のプライマリチャンネルは 100ch とし、80 MHz のボンディング帯域幅で

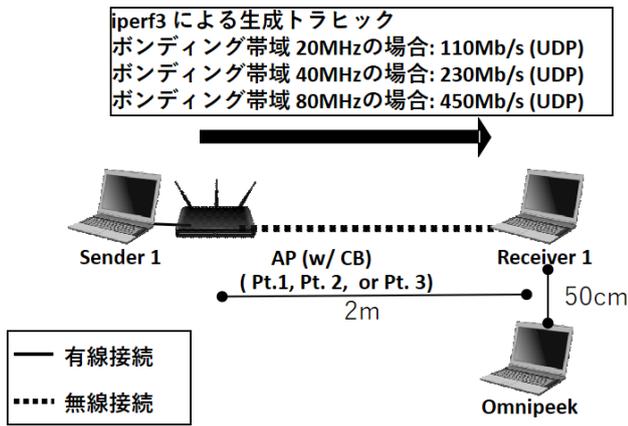
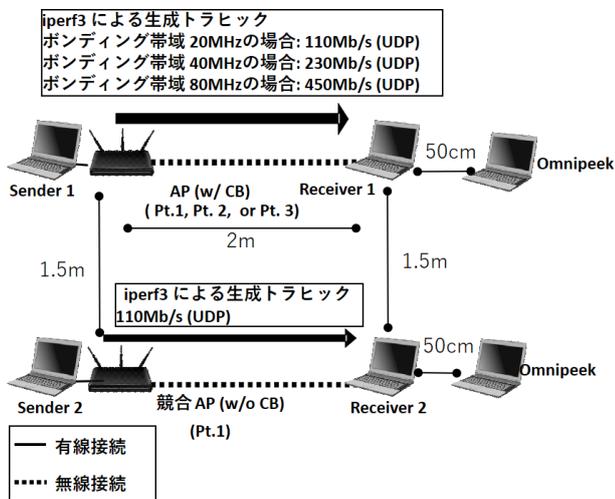
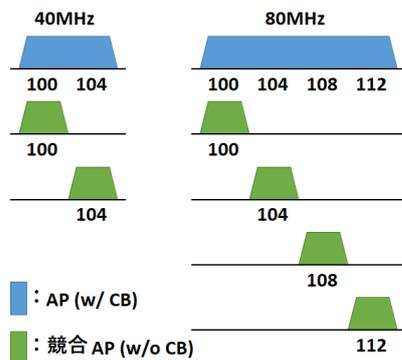


図9 実験1における実験構成

Fig. 9 Experimental Environment of ex. 1.



(a) 競合実験(実験2)における実験構成



(b) 競合チャンネルの構成

図10 競合実験(実験2)における実験構成と競合チャンネル

Fig. 10 (a) Experimental environment of ex. 2 and (b) channel configuration both AP (w/ CB) and C-AP.

は100~112chを使用した。

実験2では、競合時にチャンネルボンディングで設定した帯域幅の利用方法について確認するため、セカンダリチャンネルで競合が生じる場合の実験を行った。さらに、競合発生時に媒体アクセス制御やボンディング帯域幅の変更方法

表2 実験に使用した機器

Table 2 Equipment used at experiments.

機器	メーカー名	型番
AP1	I-O DATA	WN-AC 1600DGR
AP2	Buffalo	WZR-1750DHP2
AP3	Cisco	AIR-AP1832I-Q-K9C
STA	I-O DATA	WN-AC433UK
トラフィック生成用 PC (Sender1, 2 / Receiver 1, 2)	東芝	Dynabook R634
無線 LAN アナライザ用 PC	VAIO	VAIO S13
無線 LAN 解析ソフトウェア	LiveAction	OmniPeek Professional [9]

表3 iperf3における設定パラメータ

Table 3 Parameter setting on iperf3.

UDP パケットのペイロードサイズ	1470 Byte	
トランスポートプロトコル	UDP	
送信レート	AP (w/ CB) 20 MHz	110 Mb/s
	AP (w/ CB) 40 MHz	230 Mb/s
	AP (w/ CB) 80 MHz	450 Mb/s
	競合 AP (20MHz)	110 Mb/s

による通信性能への影響を調査した。図10に示す構成でAP2台とトラフィック生成・受信PCを2ペア使用し、チャンネルボンディングを行うAP (AP (w/ CB)) のボンディング帯域幅内のうちの1チャンネルを、チャンネルボンディングを行わない競合AP (C-AP) の使用チャンネルとして設定した。AP (w/ CB) のプライマリチャンネルは100chとし、80 MHzのボンディング帯域幅では100~112chを使用した。AP (w/ CB)、競合AP (C-AP) ともに802.11acで稼働させた。

実験では1回あたり30秒間トラフィックを発生させ、同様の実験を5回実施した。それぞれの実験において、通信の様子を無線LAN解析ソフトウェアのOmniPeek [9]を用いてフレームキャプチャを行い、媒体アクセス制御を解析した。OmniPeekでは一つの無線LANインタフェースで1チャンネルを計測できるため、OmniPeekをインストールしたPCを2台用意し、それぞれのPCに二つの無線LANインタフェースを取り付けることで同時に4チャンネル分(80 MHz)の計測を行った。

3.2 性能指標

実験1では、フレーム送信時に送信されるRTS/CTSフ

フレームとデータフレーム (A-MPDU サイズ等), BA の発生状況をチャンネルごとに確認する。また, 通信性能に関してはエンドツーエンドの UDP スループットと無線区間の物理伝送レートに着目する。実験 2 では, 競合時における双方の AP のスループット性能を評価した。ここでは, 非競合環境のスループットを「非競合時スループット」とし, チャンネルボンディング機能が有効な AP 以外で, ボンディング帯域幅の中で競合する AP の台数を N とすると CSMA/CA による送信権の獲得率が $1/(N+1)$ となることより, 「理想スループット」として非競合時スループットを $N+1$ で除算した値と定義する。そして, 競合時のスループットの実測値を理想スループットで正規化したスループットを性能指標とする。よって, 正規化スループットは, 最大 1.0 となる。

- (1) 理想スループット = 非競合時スループット / $N+1$ (N : 競合 AP 数)
- (2) 正規化スループット = 競合時スループット / 理想スループット

4. 実験結果

4.1 実験 1: チャンネルボンディング時の媒体アクセス制御の評価

実験 1 では, ボンディング帯域幅内に競合 AP が存在しない場合に, 各メーカーの AP に実装されている媒体アクセス制御を調査した。その結果, 媒体アクセス制御は図 11 に示すように, 大きく分けて 3 パターンに分類できることが判明した。

- AP1: パターン 1 (Pt.1), RTS/CTS を利用しない。
- AP2: パターン 2 (Pt.2), RTS/CTS を利用。
- AP3: パターン 3 (Pt.3), CTS-to-self を利用。

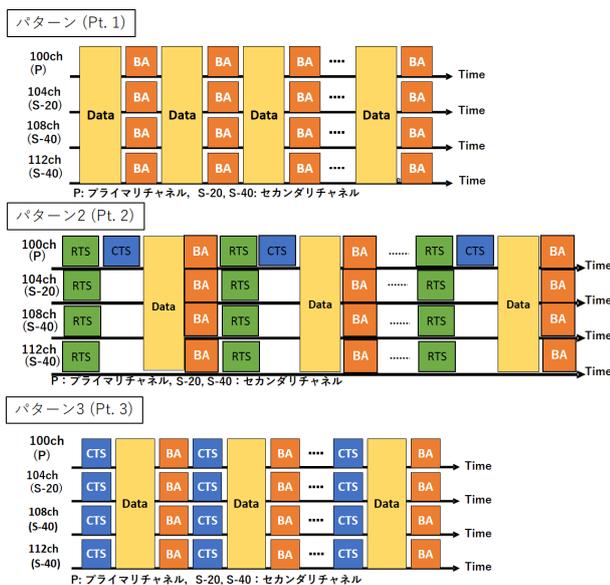


図 11 各 AP における通信の流れ

Fig. 11 MAC and data transmission procedures of each AP.

パターン 1 の AP1 では, RTS/CTS を利用せず CSMA/CA による媒体アクセス制御が採用されていた。次に, AP2 では, 802.11ac ではオプション機能とされている拡張 RTS/CTS を利用していることから CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS と言えるが, RTS に対して返信される CTS がプライマリチャンネルのみで送信されているため, 文献 [1], [2] で規定された規格とは厳密には該当しないことが分かった。最後に, パターン 3 の AP3 では, CTS-to-self [10] と呼ばれる, CTS フレームのみを利用する媒体アクセス制御が採用されていた。この CTS-to-self フレームは, 後方互換性を確保するためだけに Cisco 社の製品で独自に採用されており [12], 媒体アクセス制御としては CSMA/CA と同様であるとみなすことができる。このように, 同じ 802.11ac 準拠の AP を用いたとしても, 各メーカーが実装する媒体アクセス制御が異なっており, 標準で定められた仕様と異なるものもあるが, これらは一般的に運用されている無線 LAN AP であり, これらの媒体アクセス制御やチャンネルボンディング時のボンディング帯域幅の変更方法による通信性能への影響を調査することは妥当である。実験 2 では, チャンネルボンディング利用時に競合が発生した場合, 競合が通信性能に与える影響について調査を行う。

次に, 媒体アクセス制御による通信性能への影響を調査するため, 図 12 にボンディング帯域幅に対するパターン別のスループットを示し, 表 4, 5, 6 に各 AP の A-MPDU の通信時間を示す。図 12 より, Pt. 2 の AP2 や Pt.3 の AP3 よりも Pt.1 である AP1 のスループットが若干低下している。そこで AP1 の通信時間について, 表 4 に示す A-MPDU 送信時間に注目すると, AP1 ではボンディング帯域幅にかかわらず, 必ず 0.6 ms で通信するように A-MPDU 集約数を調節していることが分かった。この通信時間は表 5 に示す Pt.2 の AP2 や表 6 に示す Pt.3 の AP3 よりも短くなっていることが分かる。この場合, A-MPDU 単位で必要となる媒体アクセス制御

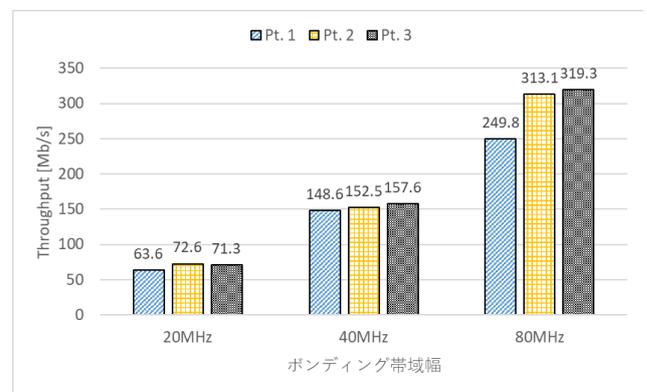


図 12 各 AP のスループットの比較

Fig. 12 Throughput comparison of each AP (bonding width is varied from 20 MHz to 80 MHz).

表 4 パターン 1 の AP における A-MPDU 集約数や通信時間

Table 4 The number of aggregated frames in a A-MPDU and its airtime of Pattern 1 AP.

ボンディング幅	物理伝送レート [Mb/s]	A-MPDU 集約数	A-MPDU の通信時間 [msec]
20MHz	86.7	4	0.6
40MHz	200	10	0.6
80MHz	433.3	22	0.6

表 5 パターン 2 の AP における A-MPDU 集約数や通信時間

Table 5 The number of aggregated frames in a A-MPDU and its airtime of Pattern 2 AP.

ボンディング幅	物理伝送レート [Mb/s]	A-MPDU 集約数	A-MPDU の通信時間 [msec]
20MHz	86.7	32	4.6
40MHz	200	32	2.0
80MHz	433.3	32	0.9

表 6 パターン 3 の AP における A-MPDU 集約数や通信時間

Table 6 The number of aggregated frames in a A-MPDU and its airtime of Pattern 3 AP.

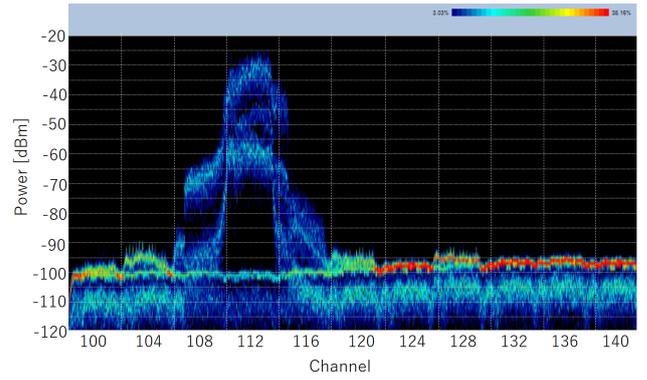
ボンディング幅	物理伝送レート [Mb/s]	A-MPDU 集約数	A-MPDU の通信時間 [msec]
20MHz	86.7	13	1.9
40MHz	200	31	1.9
80MHz	433.3	64	1.8

(DIFS+CW 時間) や BA に関するオーバーヘッドが大きくなる。その結果、Pt. 1 である AP1 のスループットは Pt.2, 3 よりも低くなることが分かった。

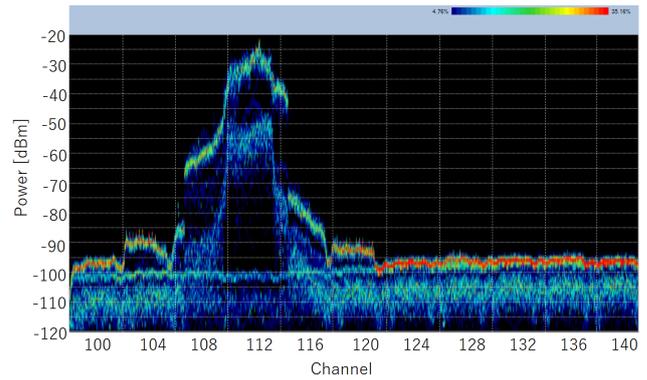
4.2 実験 2：競合時のチャンネルボンディングの性能評価

本実験では 40 MHz, 80 MHz でチャンネルボンディングを実施する AP (以降, AP(w/ CB)) の利用帯域幅内において、20 MHz でチャンネルボンディングを実施しない AP (以降, 競合 AP) が競合する環境における通信性能を調査する。

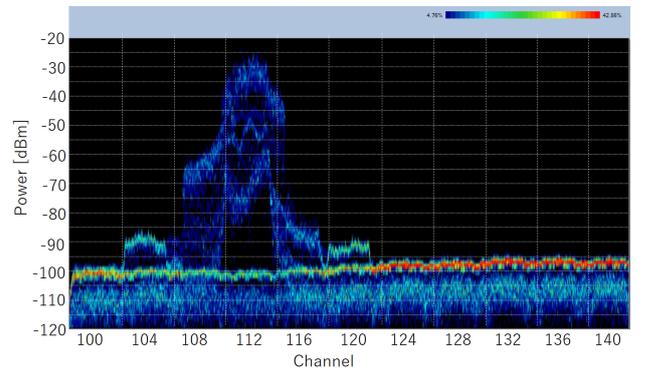
実験 1 より、チャンネルボンディングで運用される AP の媒体アクセス制御が 3 パターン存在することが判明したため、各種パターンのボンディング AP (w/ CB) とチャンネルボンディングを行わない 802.11ac の競合 AP (Pt. 1, 2, 3) を組み合わせて通信性能を評価する。AP (w/ CB) のプライマリチャンネル 100ch, ボンディング帯域幅を 80 MHz に設定して、その各チャンネルに競合 AP (Pt. 1, 2, 3) を設定して競合させるが、通信パターンが膨大であ



(a) Pt.1



(b) Pt.2



(c) Pt.3

図 13 112ch に設定した競合 AP のスペクトラム

Fig. 13 Power spectrum of output signal from C-AP (112ch).

るため本稿では AP の組み合わせを絞って性能評価を行う。

4.2.1 信号強度の調査

競合時のキャリアセンスについて考察するための事前調査として、競合 AP の使用チャンネルを 112ch, チャンネル帯域幅を 20 MHz としたときに発生する信号の電波強度を調査した。本実験では、スペクトラム計測ソフトの AirMagnet Spectrum XT [11] を用いて計測した。

実験結果を図 13 に示す。図 13 より、Pt.1, Pt.2, Pt.3 の競合 AP は設定したチャンネル上で -30 dBm 以上の受信電波強度となることが分かった。また、隣接チャンネル (120, 116, 108, 104 チャンネル) に信号が漏れており、

1ch 隣の 116, 108 チャンネルでは -65 dBm 以上, 2ch 離れた 120, 104 チャンネルでも -90 dbm 以上の電波として検出されることが分かった。

ここで、漏れた信号を実際にビジーと検出する条件としては、信号を送出するチャンネルとの関係性によって規定されている CCA 閾値 (表 1) によって決まる。これより、現在市販されている機器に実装されている送信スペクトラムマスクは隣接チャンネルに信号が漏洩しており、現状の物理キャリアセンスにおいて CCA 閾値を用いると誤検知が発生し、チャンネルボンディング時の送信制御に影響を与える可能性があることが分かった。ただし、今後のスペクトラムマスクの性能改善によって信号漏洩は減少するため、誤検知の発生は小さくなると予想される。

4.2.2 競合チャンネルと競合 AP の通信パターン

次に、80 MHz のチャンネルボンディングを用いて通信を行う AP の媒体アクセス制御や通信性能が利用チャンネル上に存在する競合 AP の通信によってどのような影響を受けるかを調査する。ここで、プライマリチャンネル上での競合は、ボンディングの有無に関わらず、通常 AP 間の競合と同様の制御となるため、本研究では AP (w/ CB) (100ch~112ch 使用) のセカンダリチャンネル上に競合 AP が存在する場合に着目する。また、4.2.1 項の結果から、(a) セカンダリチャンネルの信号をプライマリチャンネル上で検出可能な 104ch と (b) プライマリチャンネル上で検出できない 112ch の 2 パターンで評価する。競合 AP としては、キャリアセンスによってパケット送信を積極的に決定する Pt.1 (CSMA/CA) の AP を使用した。

4.2.3 ボンディング AP が Pt.1 (CSMA/CA) の場合

本項では、チャンネルボンディングを行う AP (w/ CB) が図 11 の Pt.1 である CSMA/CA で動作する場合について調査する。まず、OmniPeek を用いた無線フレームの解析結果から、図 14 に示すように、pt.1 の AP は競合チャンネルが 104ch, 112ch の違いに関わらず、スタティックチャンネルボンディングによって動作することが分かった。

次に、競合 AP が 104ch で動作する場合に着目すると、AP (w/ CB) のプライマリチャンネル上でキャリアセンスによって競合 AP の信号を検出することができるため、プライマリ上での競合と同様の動作となり、競合 AP と AP (w/ CB) が公平にチャンネル送信権を獲得することになる。その結果、図 15 に示すように AP (w/ CB)、および競合

AP の正規化スループットは 1 に近い値となっていることが分かる。

これに対し、競合 AP が 112ch で動作する場合、AP (w/ CB) のプライマリチャンネル上で競合 AP の送信を検知できず、さらに、セカンダリチャンネルにおける PIFS 時間内のキャリアセンスによって送信権を得られないことによって AP (w/ CB) は全く通信ができていなかった。AP (w/ CB) は 2.1.1 項で説明したスタティックチャンネルボンディングの動作に従って、80 MHz すべてがアイドルになることを確かめるまで送信を待機する。この間に競合 AP が送信権を獲得することが多くなるため、競合 AP の正規化スループットの増加が 104ch 競合時に比べて高くなっていることが分かる。

以上の結果から、2 章でも述べたように、チャンネルボンディング利用時の CSMA/CA では、セカンダリチャンネル上での他通信のキャリアセンスの回数と時間が少ないことに起因して、ほぼ競合 AP の通信を検知できないため、AP (w/ CB) の通信性能が劣化していることが分かる。

4.2.4 ボンディング AP が Pt.2 (CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS) の場合

本項では、チャンネルボンディングを行う AP (w/ CB) が図 11 の Pt.2 である CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS で動作する場合について調査する。この手法では、図 11 のように、送信側は利用中の全セカンダリチャンネル上に対して RTS パケットを送信し、プライマリチャンネル上で返送される CTS フレームからセカンダリチャンネルの利用状況を直接的に把握できる。そのため、Pt.1 のキャリアセンスのみの手法よりもセカンダリチャンネルの利用状況を正確に把握可能となる。

つまり、Pt.1 とは異なり、競合 AP が 112ch で稼働していることを確実に把握することが可能であるため、図 16 に示すように、104ch でも 112ch に関わらず競合 AP

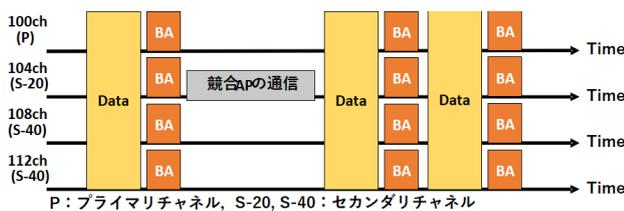


図 14 Pt.-1-AP (w/ CB) の競合時の動作

Fig. 14 MAC control and data transmission of Pt.-1 AP.

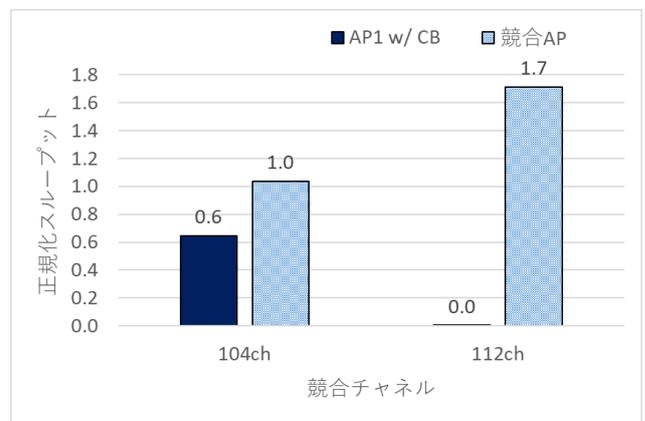


図 15 Pt.1-AP (w/ CB) ボンディング帯域幅内における競合時の正規化スループット

Fig. 15 Normalized throughput under competition between Pt.1-AP (w/ CB) and C-AP.

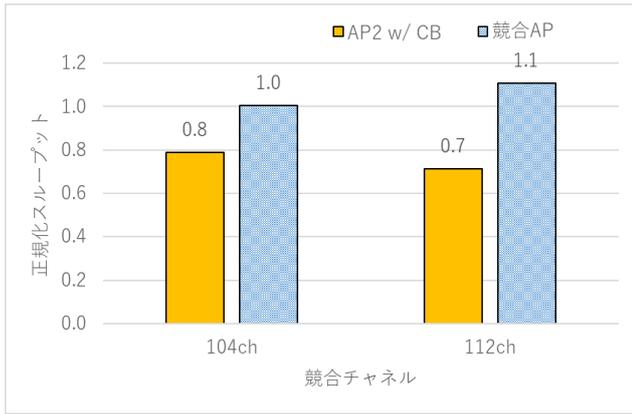


図 16 Pt.2-AP (w/ CB) の競合時の正規化スループット

Fig. 16 Normalized throughput under competition between Pt.2-AP (w/ CB) and C-AP.

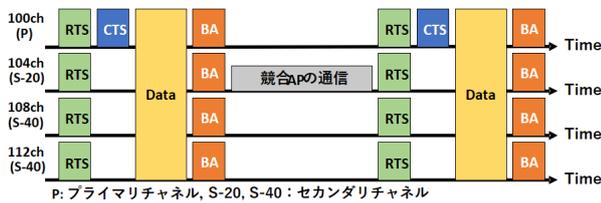


図 17 Pt.2-AP (w/ CB) の競合時の動作

Fig. 17 MAC and data transmission procedures of Pt. 2 AP.

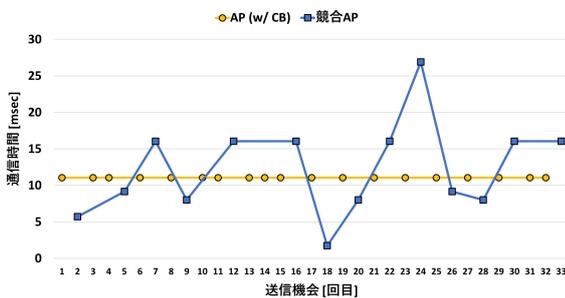


図 18 104ch 競合時における各 AP の送信機会ごとの通信時間

Fig. 18 Airtime of AP (w/ CB) and C-AP with the time series variation (competition at 104ch).

の正規化スループットは 1 付近を維持できていることが分かる。

これに対し、AP (w/ CB) のフレーム送信挙動に着目すると、図 17 に示すように、競合時においてはスタティックチャンネルボンディングで動作することが分かった。次に、正規化スループットに着目すると、104ch、112ch に関わらず 0.7~0.8 程度まで劣化していることが分かる。この原因を調査するために、図 18 に AP (w/ CB) と競合 AP の送信機会ごとの Airtime を示す。この図より、競合 AP では送信機会ごとに Airtime を変更している一方で、AP (w/ CB) は常に固定の Airtime となっていることが分かる。ここで競合 AP 上の通信の再送フレーム発生状況を示す図 19 との比較から、競合 AP では再送フレーム数の

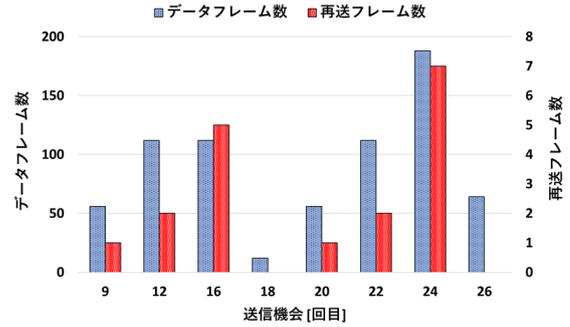
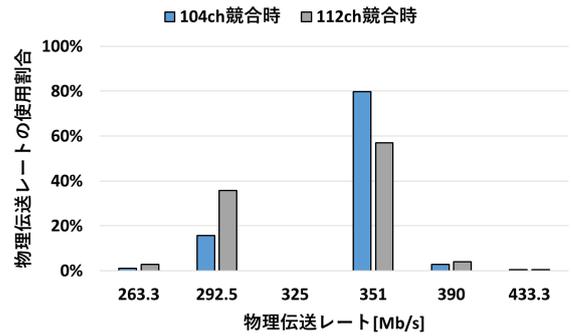
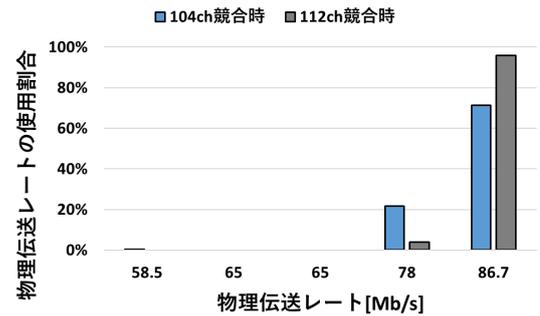


図 19 Pt.2-AP (w/ CB) の競合時の再送フレーム数

Fig. 19 The number of retransmission frames of Pt. 2 AP (w/ CB).



(a) AP2 (w/ CB) の物理伝送レート使用割合



(b) 競合 AP の物理伝送レート使用割合

図 20 Pt.2-AP (w/ CB) 競合時の伝送レート、競合 AP の物理伝送レート使用割合

Fig. 20 Utilization rate of phy. rate of Pt. 2 AP (w/ CB) and C-AP.

増加時に Airtime を小さく、減少時に大きくなるように調整していることが分かる。また物理伝送レートに着目すると、図 20 に示すように競合 AP は常に最大伝送レート (86.7 Mb/s) で送信しているのに対し、AP (w/ CB) の伝送レートは衝突が発生しているにも関わらず、同一 Airtime で低い伝送レート (351 Mb/s や 292.5 Mb/s) で送信しているため、正規化スループットが劣化していることが分かった。

以上のことから、競合時において正規化スループットを維持するためには、(i) Airtime が公平になるように調整することが重要であることが分かる。また、さらなる改善を目指すためには、競合時にも一部の利用可能なチャンネルを

用いて通信を継続可能な(ii)ダイナミックチャンネルボンディングの確実な利用, が重要であることが分かる.

4.2.5 ボンディング AP が Pt.3 (CTS-to-Self) の場合

次に本項では, チャンネルボンディングを行う AP (w/ CB) が図 11 の Pt.3 である CSMA/CA with CTS-to-Self で動作する場合について調査する. この手法では, AP (w/ CB) が送信時にセカンダリチャンネルに対して CTS-to-Self パケットを送信することでチャンネル利用を競合 AP に確実に通知できるため, 競合 AP からのパケット送信を抑制することが可能な手法といえる.

まず, この手法におけるフレーム送信手順を解析した結果, 図 21 に示すように, 競合発生時においてダイナミックチャンネルボンディングが実装されていることが分かった. 図 22 に AP (w/ CB) が使用しているチャンネル幅の割合を示しているが, この図からも競合の発生に応じて利用チャンネル幅が変動していることが分かる.

次に, 図 23 に示す正規化スループットに着目すると, 競合 AP の正規化スループットは CTS-to-Self によってボンディングの利用を通知されるため, フレーム衝突を回避できた結果, 競合チャンネルの違い (104ch/112ch) に関わらず, 1.0 以上を維持できていることが分かる. これに対し, AP (w/ CB) の正規化スループットに着目すると, 104ch 競合時に 0.3, 112ch 競合時に 0.5 まで劣化していることが分かる. この劣化要因について調査するために, 4.2.4 項と同様に競合時の Airtime を調査したところ, Pt.3 の Airtime が競合による再送の発生に関わらず 1.9 ms と

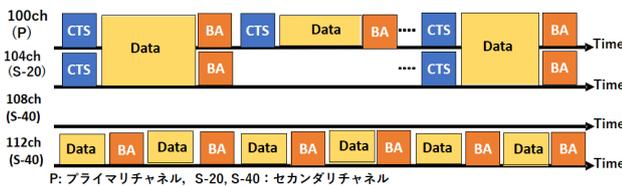


図 21 Pt.3-AP (w/ CB) の競合時の通信の流れ

Fig. 21 MAC and data transmission procedures of Pt. 3 AP.

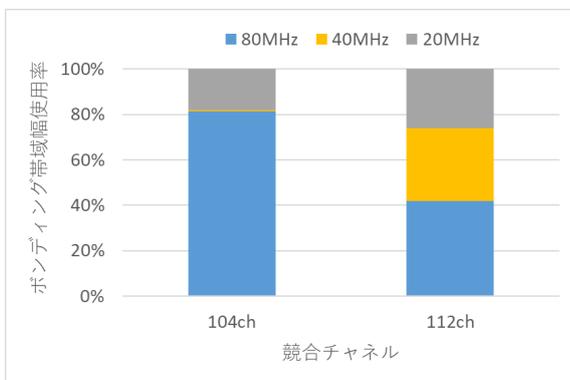


図 22 Pt.3-AP (w/ CB) の競合時のボンディング帯域幅利用率

Fig. 22 Utilization rate of channel bonding width of Pt.3-AP. (w/ CB) under competition

固定値を取っていた. さらに, 図 24 に示している通信時の物理伝送レートを見ると, ダイナミックチャンネルボンディングによるチャンネル幅の変動に伴って, 104ch 競合時に物理伝送レートが最大 433.3 Mb/s から最低 6.5 Mb/s まで大きく変動していることが分かる. 112ch 競合時は 104ch 競合時よりも 40 MHz でのチャンネルボンディングが可能となることから, 104ch 競合時よりも高い物理伝送レートが選択されやすくなり, 正規化スループットが 0.5 と若干増加していた. このように, Airtime が固定値の 1.9 ms であるにも関わらず, ダイナミックチャンネルボンディングによって送信ごとの物理伝送レートが大きく変動することで, 正規化スループット値が 0.3, 0.5 まで劣化したことが分かった.

以上の結果から, Pt.3 の AP では, ダイナミックチャンネルボンディングで動作するものの, 112ch 競合時においても 20% 程度が 20 MHz のボンディング幅で通信しており, 保守的にボンディング幅を決定していることが分かる. すなわち, 正確なボンディング幅の決定に問題があると言える. そのうえ, Airtime が固定であるにも関わらず物理伝送レートを低下させるためスループット性能が劣化

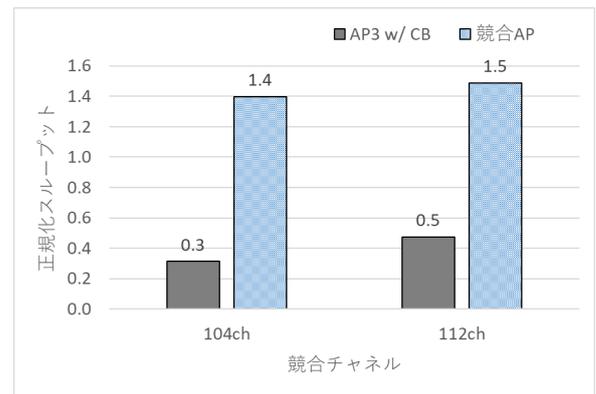


図 23 Pt.3-AP (w/ CB) の競合時のスループット

Fig. 23 Normalized throughput under competition between Pt.3-AP (w/ CB) and C-AP.

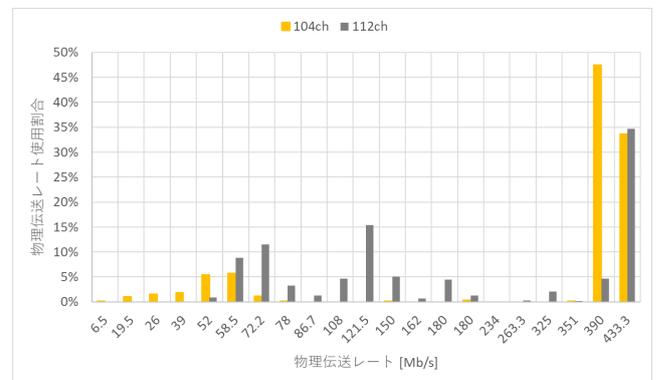


図 24 Pt.3-AP (w/ CB) の競合時の物理伝送レート

Fig. 24 Utilization rate of phy. Rate of Pt. 3-AP (w/ CB) under competition at 104ch and 112ch.

する、という問題が生じていることが分かった。

以上のことから、ダイナミックチャネルボンディングで動作する AP は存在するものの、4.2.4 項で示した (i)(ii) の要件を満足する AP は存在しないことが分かった。

5. 議論

本章では、4 章の実験結果についてまとめ、実環境において IEEE802.11ac 無線 LAN を運用する場合の性能の予測や性能の改善のために必要な機能についてまとめる。最後に、本実験における注意点についてまとめる。

5.1 各 AP の媒体アクセス制御

本研究を通して、製造メーカーごとの AP の媒体アクセス制御の調査を行った結果、以下の 3 パターンの媒体アクセス制御が採用されていることが分かった。

- パターン 1 (Pt.1) : CSMA/CA
- パターン 2 (Pt.2) : CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS
- パターン 3 (Pt.3) : CSMA/CA with CTS-to-Self

パターン 1 では、AP における A-MPDU サイズ、そしてその送信時間 (Airtime) が小さい場合に CSMA/CA によるオーバーヘッドが大きくなってしまい、パターン 2、パターン 3 よりもスループットが低下することが分かった。

5.2 競合時におけるボンディング AP の利用帯域幅

5.1 節で述べた媒体アクセス制御を採用している AP を用いて、ボンディング幅内の競合時の通信性能を調査した結果、CSMA/CA で動作する AP (w/ CB) (Pt.1) と CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS (Pt.2) はスタティックチャネルボンディングで動作しており、競合発生時にボンディングが行えていないことが分かった。スタティックチャネルボンディングを行うこれらの AP の通信性能については、CSMA/CA で動作する AP であるパターン 1 ではプライマリチャネル上で競合 AP の信号を検知できないこと、セカンダリチャネル上において PIFS 時間しかキャリアセンスを行わないことに起因して、ボンディング AP の通信性能が劣化することが分かった。これに対して、CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS で動作するパターン 2 では、セカンダリチャネル上の競合通信を確実に把握できるものの、フレーム衝突時の物理伝送レートの低下や、ボンディングする AP と競合 AP との Airtime が不均衡であることによって、スループット性能が低下することが分かった。

最後に、CSMA/CA with CTS-to-Self (Pt.3) でボンディングを行うパターン 3 では、ダイナミックチャネルボンディングで動作しており、競合発生時においても継続して通信を実施していることが分かった。しかし、縮退するボンディング幅の決定が保守的 (必要よりも小さい幅) であることに加えて、パターン 2 の場合と同様にフレーム衝

突時の物理伝送レートの低下や競合 AP との Airtime が不均衡であることにより、スループット性能が低下することが分かった。

以上のように、市販の IEEE802.11ac 無線 LAN AP を利用して、媒体アクセス制御やチャネルボンディング時のボンディング帯域幅の利用方法に対する通信性能を明らかにするとともに、チャネルボンディング時に必要な制御について明らかにすることができた。

5.3 干渉源が多い場合の通信性能

5.1 節、および、5.2 節で述べたチャネルボンディング時の媒体アクセス制御、ボンディング帯域幅の利用方法より、これらの AP のボンディング帯域幅内に干渉源が多い一般的な無線 LAN 環境に設置された場合の通信性能について議論する。

5.3.1 チャネルボンディングを行う AP の媒体アクセス制御が CSMA/CA (パターン 1) の場合

現状の IEEE802.11ac の製品を用いる場合、競合通信の信号の検知の可否によって性能が変わる。まず、プライマリチャネルにおいて競合信号を検知できる場合は、チャネルボンディングを行う AP のスループットは非競合時と比較して 1/競合数の性能に減少する (図 15)。一方、プライマリチャネルにおいて競合信号を検知できない場合は、衝突確率がアロハ方式と同様になる。この場合、干渉源が 1 の場合であってもチャネルボンディングを行う AP のスループットがほぼ 0 まで減少する。以上より、干渉源が増加した場合は、ボンディングを行う AP が検知できる競合であれば「1/競合数」のスループットとなり、同様に検知できない範囲の競合であれば「スループットがほぼ 0」となることは明らかである。

5.3.2 チャネルボンディングを行う AP の媒体アクセス制御が CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS (パターン 2) の場合

セカンダリチャネルを含む全チャネル上で RTS フレームが送信されるため、競合する AP や STA に対しても RTS フレームに含まれる NAV 期間を通知でき、競合による性能の低下度合いは抑制される。しかし、CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS の製品は競合時にスタティックチャネルボンディングで動作することが実験から明らかになったため、競合 AP が増えるほど通信機会が減少してしまい、結果的にチャネルボンディングの効果を発揮できない可能性が高い。

さらに、図 18 に示すように、チャネルボンディングを行うことで競合 AP とチャネルボンディングを行う AP との間での Airtime が不均衡となる場合があり、Performance Anomaly によって性能が劣化してしまう。干渉源の数が増加するのに比例して Airtime が不均衡となる度合いが高まるため、Performance Anomaly による性能の劣

化がより深刻になると予想される。

5.3.3 CTS-to-self (パターン3) の場合

競合 AP が存在する場合、ダイナミックチャンネルボンディングのボンディング幅を競合チャンネルが存在するチャンネルよりも過剰に小さくする（過剰に保守的な動作をする）傾向があることが今回の実験結果から明らかになった。よって、多くの干渉源がある場合はダイナミックチャンネルボンディングに利用するチャンネル幅を 20 MHz に縮退した通信が大半となることが予想され、チャンネルボンディングを有効活用できないことが予想される。

5.4 チャンネルボンディングを行う無線 LAN 機器に必要な機能

本節では、2018 年時点で市販されていた無線 LAN AP の性能評価を通して、チャンネルボンディング機能の性能を向上させるために必要となる機能として以下の 4 項目について述べる。

- (1) 無線フィルタの高性能化：現在の市販の AP では、無線フィルタの性能が良好ではなく隣接チャンネルに電波漏れが生じている。それに伴い、本実験では 1 チャンネルだけで競合している影響が隣接チャンネルにも広がってしまった結果、通信性能への影響が生じている。よって、今後の無線 LAN AP では、無線フィルタの性能を向上し、隣接チャンネルへの電波漏れを解消することが望ましい。しかし一方で、無線フィルタの高性能化は高コストであるため、競合 AP による電波漏れが解消できないことを前提とした上で、次の 3 点の機能の実装が必要である。
- (2) チャンネルボンディング時の媒体アクセス制御：4.2.4 項で示したパターン 2 の AP の競合時の媒体アクセス制御や性能から、チャンネルボンディングを行う AP のスループットの低下を抑制するためには、双方の AP の存在を確実に通知することが必要であることが分かった。よって、ボンディングに使用する全チャンネル上での媒体アクセス制御として、拡張 RTS/CTS の利用を必須とする必要がある。
- (3) チャンネルボンディング時の帯域の利用方法：本実験で使用した市販の AP（2018 年導入）の大半は、スタティックチャンネルボンディングを採用していたため、ボンディング帯域幅内に競合通信が存在する場合、すべてのチャンネルがアイドルになるまで待機する必要がある。今後、さらに競合する干渉源が多くなることを考えると、この待機時間の増加によってチャンネルの利用効率が激減することが予想される。これに対して、パターン 3 は利用可能なチャンネルを有効活用するダイナミックチャンネルボンディングを採用していたものの、利用帯域幅を過剰に縮退していたため、スループットが低下していた。そのため、特に干渉源が多く

なる今後の無線 LAN 環境を想定すると、より積極的にチャンネル幅を広帯域に設定する緻密なダイナミックチャンネルボンディングの導入が必要不可欠であると言える。

- (4) Airtime 制御や物理伝送レート制御機能：4.2.4 項では、ボンディング AP と競合 AP との間の Airtime が不均衡であること、また、競合時に物理伝送レートを過剰に低く設定することによって、ボンディング AP の通信性能が劣化することが明らかとなった。よって、ボンディング AP が Airtime や物理伝送レートである MCS Index 値をより高く設定するための制御を導入することで、競合 AP とボンディング AP が公平に送信時間を得ることを実現し、通信性能の低下を抑制することが可能となる。つまり Airtime Fairness を向上し、競合なしのスループットを 1 としたときに、競合時スループットを「1/競合数」とするような Airtime 制御や物理伝送レート制御の実現が重要である。我々はすでにこの実現を目指す手法を提案している [13], [14]。

5.5 実験時の注意点

本節では、本実験において注意した点についてまとめる。

- (1) 無線上のフレームキャプチャを試みた際に、キャプチャできたフレームが送信フレーム数の 50% 程度にとどまることが分かった。このことより、無線フレームのキャプチャには、超高性能 PC や高速 USB インタフェースが必要であることが分かった。本実験結果はこの影響を含んでいるが、同じ実験を 5 回ずつ実施した結果を分析しているため、キャプチャできたフレームのみの分析でも特性を十分に把握できている。
- (2) チャンネルボンディング利用時の媒体アクセス制御や通信の流れを確認するためにフレームキャプチャが必要となるが、キャプチャするために 1 チャンネルあたり 1 計測インタフェースを準備する必要があった。さらに、無線 LAN アナライザ・OmniPeek では、1 ライセンスによって同時に 2 インタフェース（2 チャンネル、40 MHz）に対するフレームキャプチャしか実現できなかったため、80 MHz のボンディング帯域幅で実施した本実験では、2 台の計測用 PC（OmniPeek 2 ライセンス）を準備し、合計 4 インタフェースを利用して無線フレームをキャプチャした。
- (3) 80 MHz のボンディング帯域幅での実験時は、他の無線 LAN からの干渉をなくすために 4 チャンネル連続で空きのあるチャンネルを確保する必要があったが、実環境において干渉がないチャンネルを見つけることが困難であった。効率のよい実験を実施するには、電波暗室などの設備を用いた実験が望ましかった。

- (4) 干渉源となる AP の媒体アクセス制御方式が 3 種類、ボンディングする AP の媒体アクセス制御方式が 3 種類のすべてを組み合わせる実験を行ったため、3×3 パターンの実験が必要となり、実験や結果の分析に時間を要した。
- (5) 競合時の通信性能の分析において、隣接チャネルへの電波漏れがないという前提が間違えていることが判明した結果、フレームキャプチャだけでは通信性能の分析が不可能となったため、電波レベルでの調査のために専用の機材を用いた無線スペクトラムの調査を行った。
- (6) 新しく導入した IEEE802.11ac 準拠の製品を用いる実験を行う場合、機器ごとに非公開で実装されている媒体アクセス制御やチャネルボンディング時の帯域幅制御が異なることが分かったため、まずこれらを明らかにするための基礎調査をする必要があった。

6. おわりに

本研究では市販の 11ac 準拠の AP を用いて媒体アクセス制御の実装方法の調査と、チャネルボンディングにおけるボンディング帯域幅内における競合発生時の帯域幅の利用方法の調査、また、これらの制御の違いによる通信性能への影響を調査するための実験を調査した。

製造メーカーごとの AP の媒体アクセス制御の調査の結果、以下の 3 パターンを明らかにし、それぞれの媒体アクセス制御によるスループット性能への影響を示した。

- パターン 1 (Pt.1) : CSMA/CA
- パターン 2 (Pt.2) : CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS
- パターン 3 (Pt.3) : CSMA/CA with CTS-to-Self

また、これらの媒体アクセス制御の AP を用いて、ボンディング幅内の競合時の通信性能を調査した結果、CSMA/CA で動作する AP (w/ CB) (Pt.1) と CSMA/CA with 拡張 RTS/CTS (Pt.2) はスタティックチャネルボンディング、CSMA/CA with CTS-to-Self (Pt.3) でボンディングを実施する AP は、ダイナミックチャネルボンディングで動作しており、競合時の動作としては、前者はチャネルボンディングが行えておらず、後者は競合時においても継続して通信を実施していることが分かった。しかし、ダイナミックチャネルボンディングが採用されている AP であっても縮退するボンディング幅の決定が保守的(必要よりも小さい幅で利用)であることに起因して、スループット性能が低下することが分かった。

以上の結果から、チャネルボンディングを有効に利用するためにチャネルボンディングを行う無線 LAN 機器に必要な機能を示した。

参考文献

- [1] Cisco: 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi Technical White Paper, (http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html) (参照 2019-02-28).
- [2] Byeon, S., Yang, C., Lee, O., Yoon, K. and Choi, S.: Enhancement of Wide Bandwidth Operation in IEEE 802.11ac Networks, 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp.1547–1552 (2015).
- [3] Deek, L., Garcia-Villegas, E., Belding, E., Lee, S.-J. and Almeroth, K.: Intelligent Channel Bonding in 802.11n WLANs, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.13, No.6, pp.1242–1255 (2014).
- [4] Park, M.: IEEE 802.11 ac: Dynamic bandwidth channel access, 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp.5–9 (2011).
- [5] Faridi, A., Bellalta, B. and Checco, A.: Analysis of dynamic channel bonding in dense networks of WLANs, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.16, No.8, pp.2118–2131 (2017).
- [6] Kai, C., Liang, Y., Huang, T. and Chen, X.: To bond or not to bond: An optimal channel allocation algorithm for flexible dynamic channel bonding in WLANs, 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), pp.1–6 (2017).
- [7] Wang, W., Zhang, F. and Zhang, Q.: Managing channel bonding with clear channel assessment in 802.11 networks, IEEE International Conference on Communications (ICC) (2016).
- [8] Zeng, Y., Pathak, P. H. and Mohapatra, P.: Throughput, energy efficiency and interference characterisation of 802.11ac, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, Vol.28, No.2 (2017).
- [9] LiveAction: Omnipack Professional, (<https://www.liveaction.com/products/omnipack-network-protocol-analyzer/>) (参照 2020-10-01).
- [10] Chousidis, C., Nilavalan, R. and Lipan, L.: Expanding the use of CTS-to-Self mechanism for reliable broadcasting on IEEE 802.11 networks, International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (2014).
- [11] NetAlly: AirMagnet Spectrum XT, (<https://www.netally.com/products/airmagnet-spectrum-xt/>) (参照 2020-10-01).
- [12] Cisco: 802.11ac : 第 5 世代の Wi-Fi 規格 テクニカル ホワイト ペーパー, (https://www.cisco.com/c/ja_jp/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html) (参照 2020-12-24).
- [13] Shimizu, Y., Nobayashi, D., Tamura, H. and Tsukamoto, K.: Dynamic A-MPDU adaptation method for airtime-fairness in channel bonding-ready WLANs, 2019 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (2019).
- [14] 久保諒平, 野林大起, 池永全志: ダイナミックチャネルボンディングにおけるチャネル縮退を考慮した適応型レート制御手法に関する研究, 電子情報通信学会 2020 年ソサイエティ大会, B-16-7 (2020).



田村 瞳 (正会員)

2005年九州工業大学大学院情報工学研究科博士後期課程修了。博士(情報工学)。福岡工業大学工学部電子情報工学科助教。情報ネットワークに関する研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会会員。



藤井 一樹 (非会員)

2019年福岡工業大学大学院工学研究科電子情報工学専攻修士課程修了。修士(工学)。株式会社富士通エフサス。ネットワークインテグレーションに関する業務に従事。



野林 大起 (非会員)

2011年九州工業大学大学院工学府博士後期課程修了。博士(工学)。2011年4月より、JSPS特別研究員として九州工業大学に勤務。2012年4月より九州工業大学工学研究院電気電子工学研究系助教として勤務。現在に至る。情報ネットワーク、マルチホップ無線網、無線LAN技術、IoTに関わる無線通信技術の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会会員。



塚本 和也 (正会員)

2006年九州工業大学大学院情報工学研究科博士後期課程修了。博士(情報工学)。2006年4月より、JSPS特別研究員として九州工業大学に勤務。2007年4月より九州工業大学大学院電子情報工学科助教、2013年4月より同学科の准教授として勤務。現在の研究テーマは計算機、無線ネットワークの性能調査。IEEE, ACM, 電子情報通信学会会員。