



## IEEE802.11acチャンネルボンディング機能の有効性に関する実験評価

著者	藤井 一樹, 田村 瞳, 野林 大起, 塚本 和也
雑誌名	電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム
巻	118
号	465
ページ	81-86
発行年	2019-02-25
その他のタイトル	Experimental Evaluation on Effectiveness of IEEE802.11ac Channel Bonding in Competitive Environment
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10228/00007333">http://hdl.handle.net/10228/00007333</a>

## IEEE802.11ac チャネルボンディング機能の有効性に関する実験評価

藤井 一樹† 田村 瞳†† 野林 大起\* 塚本 和也‡

††福岡工業大学大学院 工学研究科 電子情報工学専攻 〒811-0295 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1

\*九州工業大学大学院 工学研究院 ‡九州工業大学大学院 情報工学研究院

E-mail: †mam17106@bene.fit.ac.jp, ††h-tamura@fit.ac.jp, \*nova@ecs.kyutech.ac.jp,  
‡ tsukamoto@cse.kyutech.ac.jp

あらまし IEEE802.11ac 規格の通信高速化技術の 1 つに、隣接する複数のチャネルをまとめて同時に利用できるチャネルボンディング機能がある。しかし、各アクセスポイント (AP) はそれぞれ異なるチャネルを利用するため、チャネルボンディングにより互いの通信が競合する可能性は高くなる。先行研究において、チャネルボンディングで動作する AP はオプション機能である Request To Send (RTS) / Clear To Send (CTS) の実装により、3 つの通信手順があることを示した。そして、RTS/CTS を用いてスタティックチャネルボンディングで動作する AP に対して、異なるチャネルに競合する通信が発生した場合における通信性能を明らかにした。しかし、3 つの通信手順の内、CTS-to-self を利用する AP が競合する場合の通信性能は未だ明らかになっていない。そこで本研究では、実機を用いた実験により、CTS-to-self を利用してチャネルボンディングを行う AP に対して、他の無線 LAN 通信が競合する場合の通信性能を調査した。その結果、本研究で使用した CTS-to-self を利用する AP はダイナミックチャネルボンディングで動作することが判明したが、競合する双方の通信性能の公平性を考慮した場合、プライマリチャネル上で競合させることで通信性能への影響を低減できることがわかった。

キーワード IEEE802.11ac, ダイナミックチャネルボンディング, CTS-to-self, RTS/CTS

## Experimental Evaluation on Effectiveness of IEEE802.11ac Channel Bonding in Competitive Environment

Kazuki FUJII† Hitomi TAMURA†† Daiki NOBAYASHI\* Kazuya TSUKAMOTO ‡

††Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology

3-30-1, Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka 811-0925, Japan

\* Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Japan

‡ Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology, Japan

E-mail: †mam17106@bene.fit.ac.jp, ††h-tamura@fit.ac.jp, \*nova@ecs.kyutech.ac.jp,  
‡ tsukamoto@cse.kyutech.ac.jp

**Abstract** Channel bonding technology, which bundles multiple adjacent channels, is one of the promising way for improving throughput performance in IEEE 802.11ac wireless LANs. However, the device using channel bonding would be highly likely to be exposed to severe competition with other devices. In our prior work, we clarified that there are three types of communication procedures of IEEE 802.11ac AP employing channel bonding due to different implementation among vendors, such as extended RTS/CTS (optional function). Then we clarified the communication performance employing static channel bonding with RTS/CTS in the case where multiple communication with different procedures coexist within channel width. We have observed that an AP using CTS-to-self actually exists, but its communication performance is still unclear in case where the CTS-to-self AP employing channel bonding is competed with another AP without channel bonding in the proximity. Therefore, in this paper, we investigate its behavior in terms of channel bonding to clarify its type, and thus we demonstrated that the AP that we used in our experiments implements dynamic channel bonding, and the impact of competition between AP with channel bonding and that without channel bonding can be alleviated only when they work on the same channel, i.e., primary channel of the AP employing channel bonding.

**Keywords** IEEE802.11ac, Dynamic channel bonding, CTS-to-self, RTS/CTS

## 1. はじめに

IEEE802.11 無線通信規格で利用されている ISM バンド周波数帯は無線局免許不要であるため、IEEE802.11 準拠の無線 LAN 機器は多くの製造メーカーによって製品化され、広く普及している。その中でも 5 GHz の周波数帯のみを利用する IEEE802.11ac 無線通信規格[1] (以降, 11ac) は最大 6.93 Gb/s の高速通信を実現する。

11ac の通信高速化技術の 1 つに IEEE802.11n[2]から標準化されているチャンネルボンディング機能がある。これは、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まとめて利用する技術である。しかし、複数チャンネルを利用するため、他の無線 LAN 機器との競合が発生しやすい環境となる。なお、無線 LAN 機器との競合や干渉を避けるために、Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) を利用している。また、利用する全チャンネル上で送受信端末が拡張 Request To Send (RTS) / Clear To Send (CTS) フレームを利用する CSMA/CA with RTS/CTS 機構がある。しかし、この機構はオプション機能であるため、製造メーカーによって実装方法が異なっている。

これまでの先行研究[3]において、11ac 準拠の異なる製造メーカーの無線 LAN アクセスポイント (AP: Access Point) と無線 LAN 子機 (STA: Station) を用いて、各メーカーの通信の挙動とそれによる通信性能を調査した。この調査では、1 台の AP に 1 台の STA が接続する、競合が発生しない環境で通信実験を行った。その結果、製造メーカーによって AP の通信手順と通信性能が異なることがわかった。

また、CSMA/CA with RTS/CTS 機構を用いてチャンネルボンディングを行う AP に対して、チャンネルボンディングしない AP が競合する場合の通信性能の調査[4]において、競合チャンネルがプライマリチャンネルでもセカンダリチャンネルでも双方の AP における通信性能への影響に大きな差がないことがわかった。しかし、RTS を利用せず CTS-to-self を用いてチャンネルボンディングを行う AP のボンディング幅内で競合が発生する場合の通信性能は明らかになっていない。

そこで本研究では、チャンネルボンディング機能を有する CTS-to-self の AP に対して、通信手順の異なる 3 パターンの AP をチャンネルボンディングせずにそれぞれ競合させた場合の通信性能の調査を行った。このとき、80 MHz でチャンネルボンディングする AP のプライマリチャンネルとセカンダリチャンネルの合計 4 チャンネルを競合チャンネルとした場合の双方の AP への通信性能の影響を示し、CTS-to-self を用いてチャンネルボンディングする AP や競合する AP を設置するときの各 AP のチャンネル設計などについて議論する。

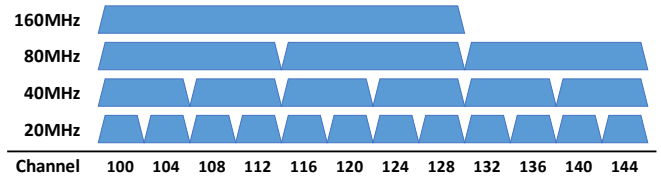


図 1 802.11ac AP がチャンネルボンディングを行う場合のチャンネル利用例

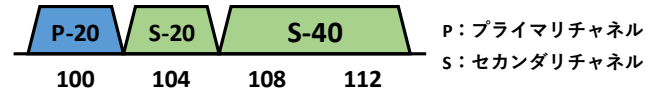


図 2 80MHz 幅ボンディング時のチャンネル構成

以降、2 節では 11ac のチャンネルボンディング機能とボンディング時のチャンネルアクセスについて説明し、3 節でこれまでの先行研究について説明をする。そして、4 節で実験内容を説明し、5 節でその結果を示す。その後 6 節で考察を述べ、最後に 7 節でまとめる。

## 2. IEEE802.11ac 無線通信規格

11ac は 2014 年 1 月に標準化された無線通信規格で、従来規格の通信速度より高速化するための代表的な技術の 1 つにチャンネルボンディング機能がある。本稿では、その機能の説明とチャンネルボンディング時の通信手順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機能

チャンネルボンディングとは物理層の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まとめて利用する技術である。図 1 に 5.6 GHz 帯におけるチャンネルボンディング機能利用時の例を示す。11ac でのボンディング幅は 4 チャンネル分の 80 MHz 幅までを必須機能としており、オプション機能によっては 160 MHz 幅まで拡大可能である。また、チャンネルボンディング利用時は 20 MHz のプライマリチャンネルと 1 つ以上のセカンダリチャンネルで構成される[6]。例えば図 2 のように、80 MHz 幅で 100 ch を 20 MHz のプライマリチャンネル (P-20) とすると、104 ch が 20 MHz のセカンダリチャンネル (S-20) となり、108 ch と 112 ch は 40 MHz のセカンダリチャンネル (S-40) で構成される。

ボンディング時のチャンネルアクセスは CSMA/CA またはオプション機能である RTS/CTS を利用した CSMA/CA with RTS/CTS を用いることも可能である[7]。図 3, 4 に 100 ch をプライマリチャンネルとして 80 MHz で CSMA/CA with RTS/CTS を用いた場合のスタティックチャンネルボンディングとダイナミックチャンネルボンディングの通信手順を示す。

表 1 11ac で使用される CCA 閾値 [dBm]

CCA mode	P-20	P-40	P-80	S-20	S-40	S-80
SD-th	-82	-79	-76	-72	-72	-69
ED-th	-62	/	/	-62	-59	-56

- (1) プライマリチャネル上で DIFS 間のキャリアセンスを行い、ランダムなバックオフ時間 (CW) だけ待機する。
- (2) その CW が終わる直前に、セカンダリチャネル上で同時に PIFS 時間キャリアセンスを行う。
- (3) その後、全チャネル上に RTS を送信し、受信側の CTS の返答に応じて利用するチャネル幅を決定し、データを送信する。
- (4) チャネルがビジーと判断された場合
  - スタティックチャンネルボンディングの場合、再度 (1) が実行される (図 3)。
  - ダイナミックチャンネルボンディングの場合はプライマリチャネルを含む 20 MHz または 40 MHz で通信できるか判断する (図 4)。

また、キャリアセンスに 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を利用する。

## 2.2. Clear Channel Assessment (CCA)

11ac では、20 MHz のプライマリチャネル上で物理キャリアセンスの信号検出 (PLCP プリアンブル検出) と復号を行い、復号した情報 (NAV) によって仮想キャリアセンスが実行される。一方、セカンダリチャ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 の物理キャリアセンスで利用される CCA 閾値を示す。11ac では表 1 のようにプライマリチャネルとセカンダリチャネルで使用する閾値が異なる。また、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 は信号の復号が可能である場合に使用されるが、信号の復号ができない場合のみ ED-th が使用される。

## 2.3. フレーム集約技術

11ac のフレームアグリゲーションの必須機能に Aggregation MAC Protocol Data Unit (A-MPDU) がある[1]。図 5 のように、MAC ヘッダから FCS まで構成される MPDU を複数個集約して送信する。フレームの送信後は受信側から圧縮された ACK である Block ACK (BA) が返送される。MPDU を複数集約しているため、フレーム衝突やビットエラーが発生し、再送を

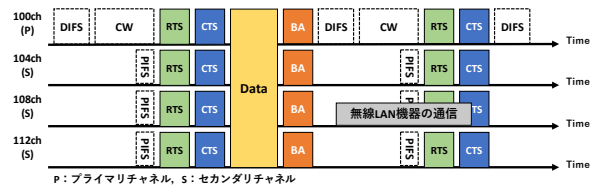


図 3 スタティックチャンネルボンディング

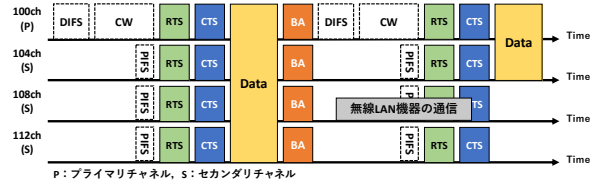


図 4 ダイナミックチャンネルボンディング

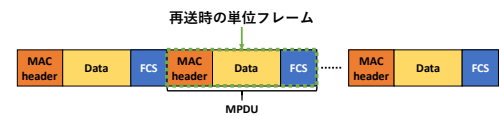


図 5 A-MPDU の構成

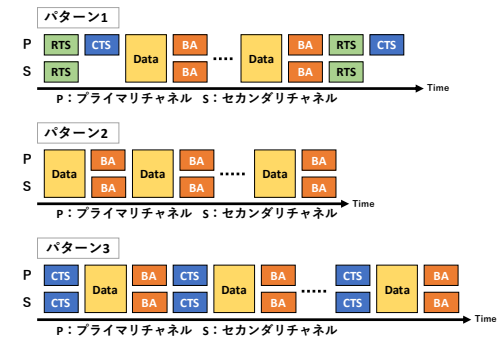


図 6 先行研究で明らかにした通信手順

求められた場合、集約されたデータフレームの中で該当するフレームだけの再送で済む。

## 3. 先行研究

これまでの先行研究[3]より、製造メーカーによってオプション機能である拡張 RTS/CTS の実装方法が異なるため、その実態を調査するために複数の AP を使用して競合しない環境における通信実験を行った。その結果、以下の 3 パターンに分類されることがわかった (図 6)。

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

次に、チャンネルボンディングする Pt.1 の AP に対して、チャンネルボンディングしない Pt.1~3 の AP がそれぞれ競合した場合の通信性能を調査した[4]。その結果、以下のことがわかった。

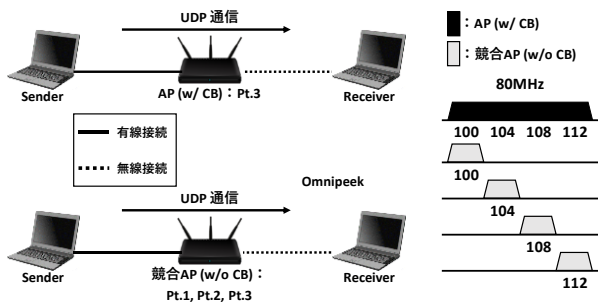


図 7 実験構成と競合チャネル位置

- Pt.1-AP 同士の通信性能は送信機会毎の通信時間に依存するため、通信時間が長い AP の方が時間の占有率は高くなり、通信性能も高くなる。
- Pt.2-AP は連続して送信する A-MPDU の数を動的に変更することで、チャネルボンディングする Pt.1-AP に与える影響を低減することができる。
- チャネルボンディングする Pt.1-AP は全チャンネルに RTS を送信するため、セカンダリチャネル競合時の通信性能への影響はプライマリチャネル競合時と比べても小さい。

## 4. 実験評価

### 4.1. 実験環境

本研究では、CTS-to-self で 80 MHz 幅のチャンネルボンディング (CB) 機能を有する Pt.3 の AP (以降、AP (w/ CB)) に対して、Pt.1~3 の通信手順の異なる 20 MHz の AP (以降、競合 AP) が競合する場合における通信性能への影響を調査する。図 7 に実験構成を示す。AP (w/ CB) は 100 ch をプライマリチャネルに設定し、各チャネルに対して競合 AP を設定する。以降、Pt.1, 2, 3 の競合 AP が競合する場合を Case1, 2, 3 とする。

実験手順として、送信側と受信側の PC ではスループット計測ソフトの iperf3 を用いて 1470 バイトの UDP フローをチャンネル幅に応じた最大伝送レートに合わせて 30 秒間送信する。実験は 5 回行い、無線通信の様子を計測するために Omnipeek[8]を用いて、チャネル毎に発生するフレームをキャプチャして分析を行った。

また、競合実験を行う前に、20 MHz の競合 AP (Pt.1~3) の信号強度を調査するために、スペクトラム計測ソフトの AirMagnet Spectrum XT[9]を用いて計測した。

### 4.2. 性能指標

本研究では競合時における双方の通信性能の公平性に着目する。そこで、スループットに関する性能指標として、以下の式を用いて競合時の通信性能を評価した。まず、競合しない環境のスループットを「競合

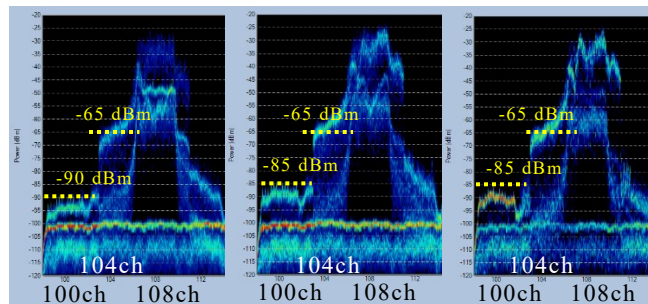


図 8 108ch に設定した競合 AP (w/o CB) の

### スペクトラム

前スループット」とすると、「理想スループット」は競合前スループットを共存する AP の台数  $N$  で除算した値とする。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。

- 理想スループット  
= 競合前スループット /  $N$  ( $N$ : AP の台数)
- 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

## 5. 実験結果

### 5.1. 競合 AP (w/o CB) のスペクトラム調査

最初に、本実験で使用した競合 AP の Pt.1, Pt.2, Pt.3 の競合しない環境におけるスペクトラムを図 8 に示す。図 8 に示している横軸はチャネル、縦軸は電力 [dBm] を表している。また、ここでは、108 ch に設定した場合のスペクトラムを示している。図 8 より、各競合 AP の電波は 100 ch, 104 ch にまで漏れていることがわかった。104 ch 上ではどの競合 AP も -65 dBm 以上の電波が届いているが、100ch においては Pt.1 は約 -90 dBm, Pt.2, 3 は約 -85 dBm の電波が届いていることを確認した。このことから、競合 AP の信号は、利用チャネルの左隣のチャネルにおいて -82 dBm または -72 dBm の閾値 (表 1) でボンディングする AP から信号を検出される可能性があり、2 チャネル離れたチャネルでも SD-th で示される -82 dBm の閾値を超える可能性があることがわかった。

### 5.2. AP (w/CB) の動作検証

本実験において、競合時における厳密な評価を行うために、実験に使用する AP (w/ CB) の動作を調査した。図 9 には 80 MHz のボンディング幅内に Pt.1 の競合 AP が 112 ch で競合した場合における双方のフレーム送信時間を示している。図 9 では横軸に経過時間を示しており、AP (w/ CB) と競合 AP が送信したフレームが送信されている実時間を直線で示している。図 9 の結果から競合 AP が 112 ch 上で通信してい

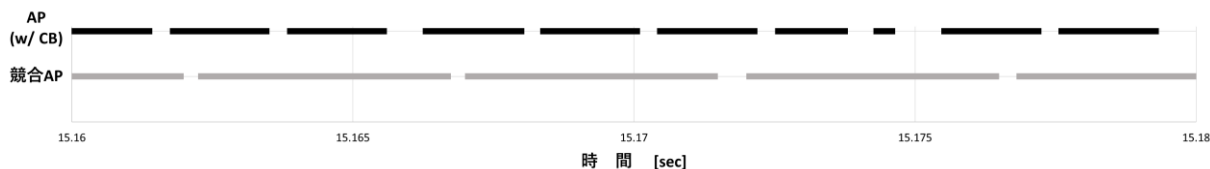


図 9 112 ch 競合時に各 AP が送信したデータフレームのフレーム送信時間

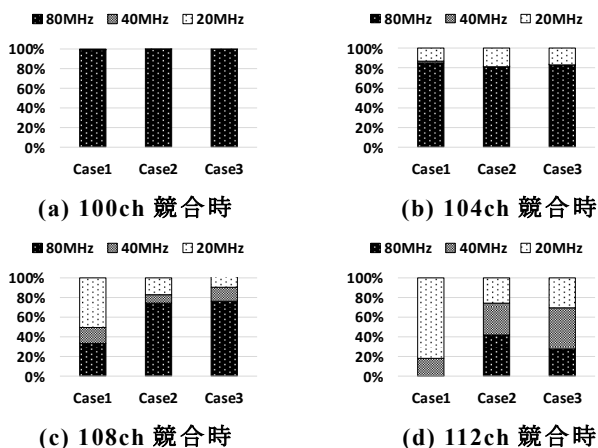


図 10 競合チャンネル別の AP (w/ CB) のボンディング幅使用率

る間であっても、AP (w/ CB) が同時に通信していることがわかった。このとき、108 ch や 112 ch には AP (w/ CB) の CTS や BA は発生しておらず、20 MHz または 40 MHz に縮小して通信していることを確認した。このことから、AP (w/ CB) はダイナミックチャンネルボンディングをしていることがわかった。また、CTS に設定されている Duration time は 0 sec であることから、本実験で使用した AP (w/ CB) に用いられる CTS は、他の競合 AP に NAV 期間を通知するためでなく、自身が利用するチャンネルの状況を確認するためのフレームであることがわかった。

### 5.3. 80 MHz 幅内の競合時における通信性能

5.2 の検証結果を踏まえて、競合時の通信性能について調査した。図 10 に競合 AP の通信手順が異なる Case1~3 における AP (w/ CB) のボンディング幅の使用率を競合 AP が共存するチャンネル別に示す。

**100 ch 競合時:** 競合 AP はプライマリチャンネル上の競合であるため、図 10 (a) より Case1~3 においてボンディング幅は縮小されず 80 MHz の通信のみであることを確認した。

**104 ch 競合時:** AP (w/ CB) はセカンダリチャンネル上で PIFS 間のキャリアセンスが行われる。また、CTS は NAV 期間を通知しないため、競合 AP は通信を続けることができる。よって、競合 AP を検知した AP (w/ CB) は図 10 (b) の Case1~3 のように、20 MHz

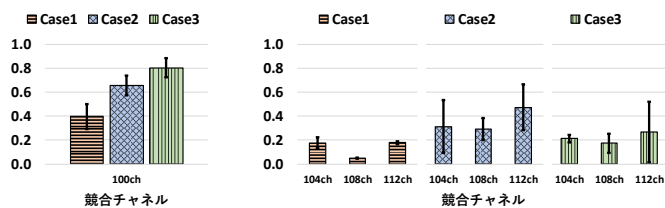
表 2 競合 AP の A-MPDU 当たりの通信時間

競合 AP	通信時間 [msec]
Case1	4.6
Case2	0.6
Case3	1.9

の通信をしていることがわかった。しかし、20 MHz の通信に対して、80 MHz の通信が約 80 % 以上も占めている。この原因は、図 8 のように 104 ch に設定した競合 AP は、左隣の 100 ch に約 -65 dBm の電波が漏れており、AP (w/ CB) のプライマリチャンネルの CCA 閾値 (表 1) は -82 dBm であるため、プライマリチャンネル上でキャリアセンスされるからである。

**108 ch 競合時:** 図 10 (c) より、Case1 の 20 MHz の使用率が Case2, 3 よりも高いことがわかった。表 1 より、セカンダリチャンネルの CCA 閾値は -72 dBm である。そして、競合 AP の電波は図 8 より、104 ch に約 -65 dBm の電波が漏れているため、キャリアセンスで検出することができる。また、競合 AP の A-MPDU, 1 つ当たりの通信時間に着目すると表 2 のように Case1 の通信時間が最も長く PIFS 間のキャリアセンスで検出されやすいことがわかった。一方、Case2, 3 の 80 MHz の使用率が 70 % 以上ある原因は競合 AP の電波が 100 ch に約 -85 dBm の強度で漏れているからである。AP (w/ CB) のプライマリチャンネルの CCA 閾値は -82 dBm であるため、競合 AP の電波が 100 ch 上で偶発的に -82 dBm 以上で漏れていた可能性がある。よって、AP (w/ CB) はプライマリチャンネル上のキャリアセンスで検出することができることがわかった。ただし、Case1 においては、100 ch 上の電波は約 -90 dBm でありプライマリチャンネル上のキャリアセンスでは検出することが難しいため、80 MHz の通信の割合が Case2, 3 よりも低くなった。

**112 ch 競合時:** 競合 AP の電波は 100 ch まで届かないため、プライマリチャンネルのキャリアセンスでは検出されない。そのため、AP (w/ CB) は競合 AP の A-MPDU 送信直後の時間に PIFS 間のキャリアセンスでアイドル状態であると判断する必要がある。表 2 の A-MPDU の通信時間に着目すると、Case2 の場合が最も短いことがわかった。そして、図 10 (d) に着目すると、80 MHz の通信が Case1, 3 よりも高く約 40 %



(a) プライマリチャンネル (100ch) 競合時

(b) セカンダリチャンネル (104, 108, 112 ch) 競合時

図 11 AP (w/ CB) の正規化スループット

の割合で通信していることがわかった。また, Case1 は 112 ch で競合しているにもかかわらず, 20 MHz の通信が 80 %以上占めている。Cyclic Redundancy Check (CRC) エラーに着目すると, 20 MHz 通信時のエラー率は約 0.29 % に対して, 40 MHz 通信時のエラー率は約 0.72 % と 2 倍以上になっていることがわかった。つまり, AP (w/ CB) が保守的に通信を行うために, 20 MHz 通信の割合が高くなることがわかった。

次に, AP (w/ CB) の正規化スループットをプライマリチャンネル競合時とセカンダリチャンネル競合時でそれぞれ図 11 (a) と図 11 (b) に示す。図 11 (a) より, Case1 の正規化スループットが最も小さいことがわかった。これは AP (w/ CB) の A-MPDU, 1 つ当たりの通信時間と関係する。AP (w/ CB) の通信時間は約 1.9 msec に対して, Case1 の競合 AP の通信時間は表 2 より, 4.6 msec であるため, Case1 の場合は競合 AP によって通信時間が占有されていることがわかった。

また, セカンダリチャンネル競合時, 全チャンネル上で AP (w/ CB) の CTS が返送されても NAV 期間を通知しないため競合 AP と衝突しやすくなる。また, AP (w/ CB) はダイナミックチャンネルボンディングするため, Case 1~3 における図 11 (a) のプライマリチャンネル競合時と比べると図 11 (b) のセカンダリチャンネル競合時の性能はそれぞれ低くなることがわかった。

## 6. 考察

以上の結果から, CB を利用して無線 LAN を運用する際の競合環境における AP やチャンネル設定による改善について考察する。AP (w/ CB) が 80 MHz で既に運用している場合, セカンダリチャンネル上の競合は双方の通信性能に影響する。そこで競合 AP は, AP (w/ CB) のプライマリチャンネルに設定することで双方の通信性能の公平性を保つことができる。

一方で, 競合 AP が不特定に存在する環境内で AP (w/ CB) を設置する場合, セカンダリチャンネルで競合が発生する可能性がある。その場合は双方の通信性能に悪影響を及ぼすため, 80 MHz のチャンネルボンディングでの運用は控えるべきである。

## 7. まとめ

本研究では, CTS-to-self の AP がチャンネルボンディングした場合の競合発生時における通信性能を調査した。その結果, 本実験で使用した Pt.3 の AP はダイナミックチャンネルボンディングで動作していることがわかった。また, 「通信性能の公平」を考慮した場合, プライマリチャンネル上で競合させた方が双方の通信性能への影響は低減できることがわかった。ただし, RTS/CTS を利用することでセカンダリチャンネル上の競合時においても通信性能への影響は低減される。

## 謝 辞

本研究の一部は, 福岡工業大学 総合研究機構, 公益財団法人 電気通信普及財団 研究調査助成, および JSPS 科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号 17K12674) 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] “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](http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html).
- [2] IEEE802.11n, <http://www.infraexpert.com/study/wireless15.html>.
- [3] 藤井 一樹, 田村 瞳, 野林 大起, 塚本 和也, “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”, “電子情報通信学会 技術研究報告, Vol. 117, No. 131, NS2017-43, pp. 87-92, 2017 年 7 月.
- [4] Kazuki Fujii, Hitomi Tamura, Daiki Nobayashi, Kazuya Tsukamoto, “Experimental Investigation of Static Channel Bonding Performance in Competitive Environment – Impact of Different MAC Procedures in 802.11ac -”, Smartcom2018, Vol IEICE-118, No. 274, IEICE-SR2018-58, pp.1-2, October, 2018.
- [5] “Expanding the use of CTS-to-Self mechanism for reliable broadcasting on IEEE 802.11 networks”, [https://www.researchgate.net/publication/260848436\\_Expanding\\_the\\_use\\_of\\_CTS-to-Self\\_mechanism\\_for\\_reliable\\_broadcasting\\_on\\_IEEE\\_80211\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/260848436_Expanding_the_use_of_CTS-to-Self_mechanism_for_reliable_broadcasting_on_IEEE_80211_networks)
- [6] “Enhancement of Wide Bandwidth Operation in IEEE 802.11ac Networks”, <http://www.mwnl.snu.ac.kr/~schoi/publication/Conferences/15-ICC-SHBYEON.pdf>
- [7] “Throughput, energy efficiency and interference characterisation of 802.11ac”, [https://www.researchgate.net/publication/276298004\\_Throughput\\_energy\\_efficiency\\_and\\_interference\\_characterisation\\_of\\_80211ac](https://www.researchgate.net/publication/276298004_Throughput_energy_efficiency_and_interference_characterisation_of_80211ac).
- [8] Savvius Omnipeek, [https://www.savvius.com/products/network\\_visibility\\_performance\\_diagnostics/omnipeek\\_family](https://www.savvius.com/products/network_visibility_performance_diagnostics/omnipeek_family).
- [9] AirMagnet Spectrum XT, <https://enterprise-jp.netscout.com/enterprise-network/wireless-network/airmagnet-spectrum-xt>.