

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11769

研究課題名(和文) IEEE 802.11ax におけるチャネルと同時通信端末数の割当手法

研究課題名(英文) Channel assignment scheme considering interference and number of terminals in IEEE 802.11ax

研究代表者

福田 豊 (Fukuda, Yutaka)

九州工業大学・情報基盤センター・准教授

研究者番号：90372763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：高速化のため複数チャネルを束ねるチャネルボンディングは、多端末で干渉がある環境では伝送エラー等により総スループット特性が低下する。そこで本研究ではIEEE 802.11 ax 対応Access Points (APs) の実運用を想定し、電波資源の効率的利用を実現するチャネル幅と同時通信端末数の割当手法を提案した。実機実験により複数のAPを用いた方がチャネルを分割するよりも総スループット特性は向上するが、電波干渉が無く同時通信端末数が少なければ40MHzチャネルボンディングは有効であることがわかった。この結果に基づき提案手法を実際に適用し、電波干渉が無い場合は運用に問題無いことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IEEE 802.11ax は実効スループット特性の改善を目的に開発された。その性能を実際の運用環境で十分に引き出すためには、要素技術であるOFDMAによる同時通信端末数とチャネルボンディングによる増速が効果的に作用する範囲を調査し、その知見に基づいてチャネルを割り当てる必要がある。本課題では応募者が無線LANの運用にも携わっているため、実機実験により取得した結果から割当手法を考案し、実際に運用環境へ適用してその有効性の検証までを行った。この検証により提案手法の可用性と実用性を高めることができる。また社会の共有財産である電波の利用効率向上にも貢献できる。

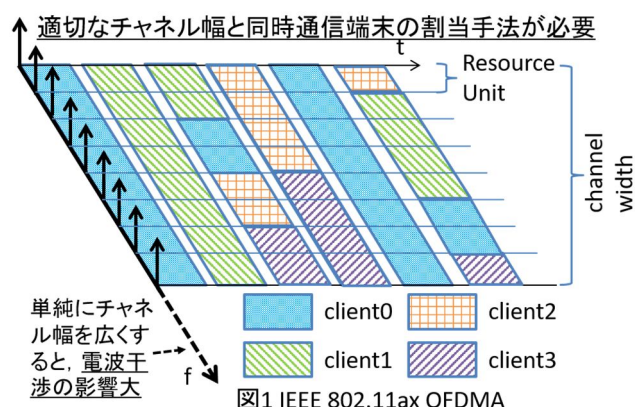
研究成果の概要(英文)：IEEE 802.11ax, which was designed to improve effective throughput in dense environments. However, stable operation will require careful consideration of how overall throughput is affected by channel-bonding configurations and coexistence with older wireless networking standards. To this end, in the present study, we prepared multiple terminals and used iperf3 to measure throughput for various channel widths and in coexistence with older standard, obtaining insight into the optimal deployment of 802.11ax. Our experimental results show that the use of 40-MHz channel bonding can improve overall throughput when the number of simultaneously connected terminals is small - on the order of 2 or 3 - and electromagnetic interference from the environment is minimal.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：無線LAN IEEE 802.11ax チャネルボンディング

1. 研究開始当初の背景

新しい無線 LAN 規格である IEEE802.11ax では稠密環境での実効スループットの向上を目指しており、従来の CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) から MIMO (Multi Input Multi Output) と OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) による双方向の同時通信へと通信技術が大きく変化する[1][2][3]。AP (Access Point) は RU (Resource Unit) を複数端末に割り当てることで同時通信を実現 (図 1) するが、その際割り当て可能な RU はチャンネル幅によって異なる。IEEE 802.11ax でも標準チャンネル幅の 20 MHz を 2, 4, 8 チャンネル分束ねて広帯域化するチャンネルボンディングが規定されており、当然チャンネル幅が広ければ最高伝送レートは高速になる。しかし我々の先行研究[4]において IEEE 802.11ac におけるチャンネルボンディングの通信特性を調査したところ、多数の端末が通信する環境でチャンネルを束ねて高速化すると衝突や電波干渉による伝送エラーが増加し、束ねない場合よりも総スループット特性は低下するため、効率的な電波資源管理のためにはチャンネル幅を適切に設定する必要があることがわかった。IEEE 802.11ax ではチャンネル幅に加えて同時通信端末数も変化するため、稠密環境での端末収容数を最大化しながら全体と個々のスループット特性を向上するチャンネル幅と同時通信端末数の割り当て手法が必要である。



2. 研究の目的

本研究の目的は IEEE 802.11ax 運用環境における電波資源の効率的利用を実現するチャンネル幅と同時通信端末数の割り当て手法を提案することにある。そのためにはチャンネルボンディングや OFDMA の同時通信端末数を变化させた通信実験が必要であり、調査方法としてはシミュレーションが考えられる。しかし代表的なシミュレータ QualNet や Scenargie ではチャンネルボンディングの実装が限定的であり、様々なチャンネル幅を設定する評価が困難であったため、本研究では実機実験による評価を行い、割り当て手法の提案を行うことにした。なお、実施者は所属大学で無線 LAN 管理を担当しており、2019 年 9 月に IEEE 802.11ax 対応機材を 100 台導入済である。さらに IEEE 802.11ac における有効なチャンネルボンディング幅について実機実験[4]の経験を有している。

3. 研究の方法

本研究ではチャンネル割り当て手法の設計のために IEEE 802.11ax 対応端末を用いた通信実験を行う。具体的には AP 稼働台数、チャンネル幅、同時通信端末数、規格の混在等を変化させて通信特性を取得し、得られた結果から各要素間の関係性を明確にし、端末収容数を最大化しながら干渉の影響を軽減する方式を提案する。

(1) 実機実験環境の構築

AP には 4 x 4 MIMO に対応する HPE 社製の AP-515[5]を、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 2 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 [6] に収容されている。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 5 Gb/s を確保している。なお 4 台の計測クライアントと計測サーバの OS は Ubuntu 20.04.01 (Linux ubuntu-1 5.8.0-48)、管理サーバの OS は Mac OSX Catalina (10.15.7) である。

表 1 計測サーバ，クライアントの仕様

	台数	CPU	メモリ	LAN
管理サーバ	1	Intel Corei7-8700B 3.2 GHz	64 GB	10GBASE-T
計測サーバ	1	Intel Corei7-9700K 3.6 GHz	32 GB	10GBASE-T 1000BASE-T
計測クライアント A	2	Intel Corei7-10700 2.9GHz	16 GB	IEEE 802.11ax 1000BASE-T
計測クライアント B	2	Intel Corei7-1165G7 2.8 GHz	16 GB	IEEE 802.11ax 1000BASE-T

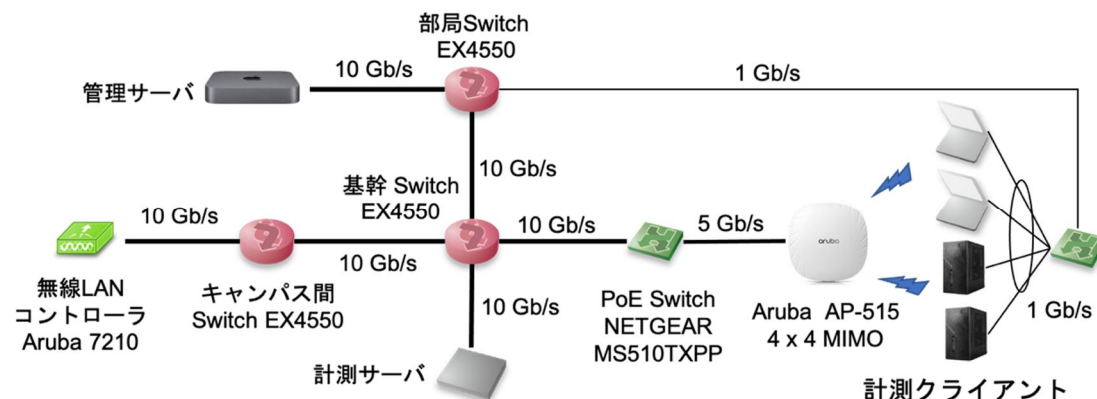


図 2 接続構成

(2) スループット特性の計測方法

4 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 でサーバからクライアントのダウンリンク方向に通信，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．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 を通じて計測クライアントに指示するようにした．

4. 研究成果

(1) チャネルボンディングの有効範囲

まずチャネル幅を 20, 40, 80 MHz，端末台数を 1~4 台に変化させて iperf3 により計測を行って得られた総スループット特性（5 回試行の平均）を図 3 に示す．図 3 よりチャネル幅が 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．

次にチャネルボンディングについて検証を行った．総端末数は 4 台に固定，総チャネル幅は 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 に割り当てた場合に得られる総スループット特性を図 3 の結果から抜き出したものを図 4 に示す．図 4 より，1 台の AP でチャネルボンディングを行うよりも，同じチャネル幅を複数台の 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った．一方で総スループットが最も高くなるのは 80 MHz のチャネル幅を 40 MHz ずつ 2 台の AP に割り当てた場合であった．これは 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だと考えられる．以上の結果から 1 台の AP でチャネルボンディングを行うよりも，同じチャネル幅を複数台の AP に分割して割り当てた方が総スループット特性は向上できるが，電波干渉が無く同時通信端末数が少なければ 40 MHz のチャネルボンディングは有効であることがわかった．

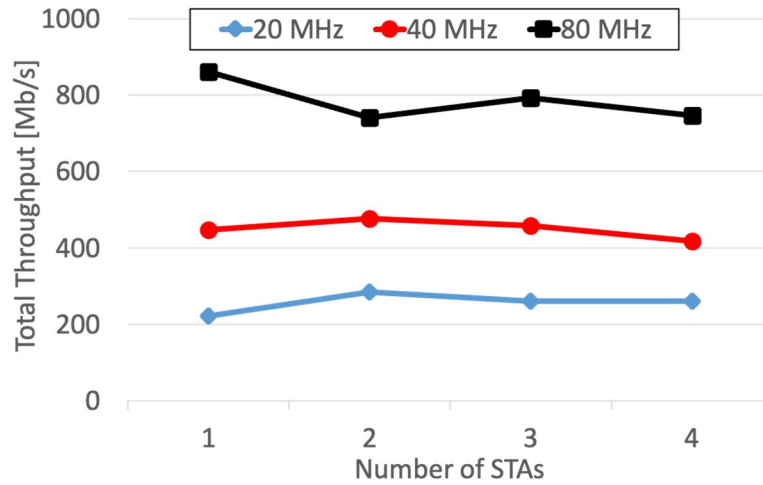


図3 総スループット特性

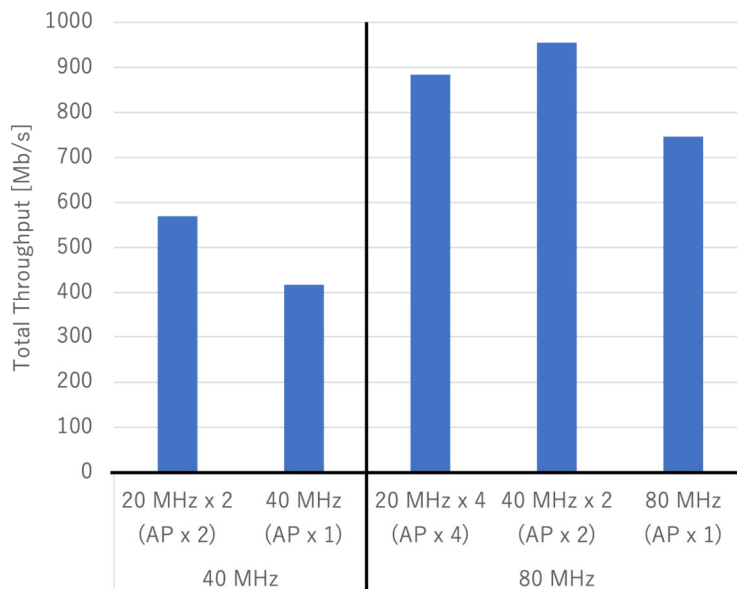


図4 総スループット特性 (チャンネルボンディング有無)

(2) 旧規格との混在の影響

実際の運用環境では旧規格との混在による影響が懸念される．そこで計測クライアントの無線 LAN 規格を旧規格である IEEE 802.11n に変更し、取得した総スループット特性 (試行回数 5 回の平均) を図 5, 6 に示す．図 5 では IEEE 802.11ax 端末は 1 台固定, IEEE 802.11n 端末は 0~3 台に変化, 図 6 では反対に IEEE 802.11n 端末は 1 台固定, IEEE 802.11ax 端末は 0~3 台に変化させた．

図 5 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 6 より, 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．よって, IEEE 802.11ax 端末が少ない状況で IEEE 802.11n 端末が 1 台でも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 では実験機材等による IEEE802.11n 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工夫が必要である．

(3) チャンネル割当手法の検証

実験結果より, チャンネル割当手法として電波干渉が無く, 接続履歴から旧規格の混在が少ない場合にチャンネルボンディングを割り当てることにし, 運用環境で影響が少ない箇所に上記の割当手法に基づいてチャンネルボンディングを設定した．また, 現時点では運用機材において規格によるチャンネル分離を実施することができなかったため, 旧規格との混在を回避するために低伝送レートの設定を確認し, 旧規格の低速レートは可能な範囲で接続を除外するように設定した．現在の所良好な通信性能を確認しているが, 一部持込端末 (モバイルルータ等) による干渉によりスループット特性が低下することが報告された．そこで干渉の影響が最も少なくなるようなチャンネルの重複状態を確認して設定を適用し, 経過を確認中である．

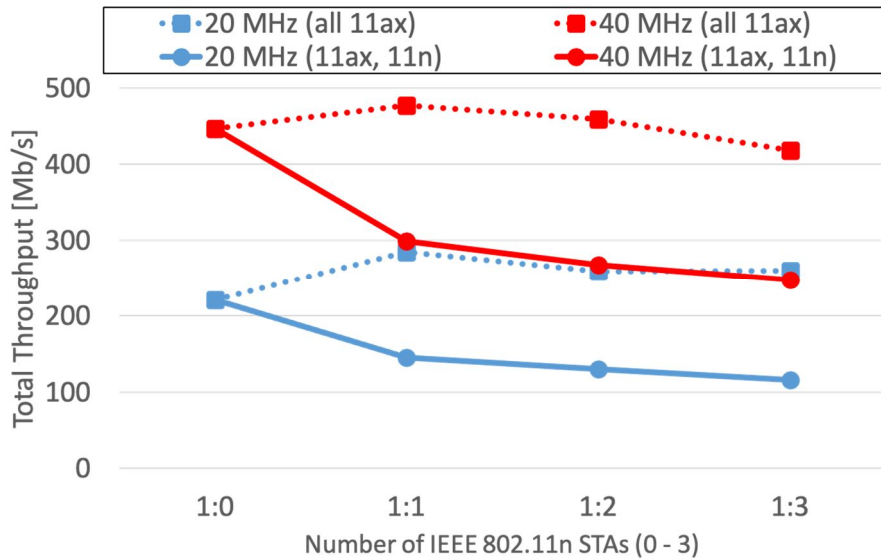


図5 総スループット特性 (IEEE 802.11ax 1 台, IEEE 802.11n 0 ~ 3 台)

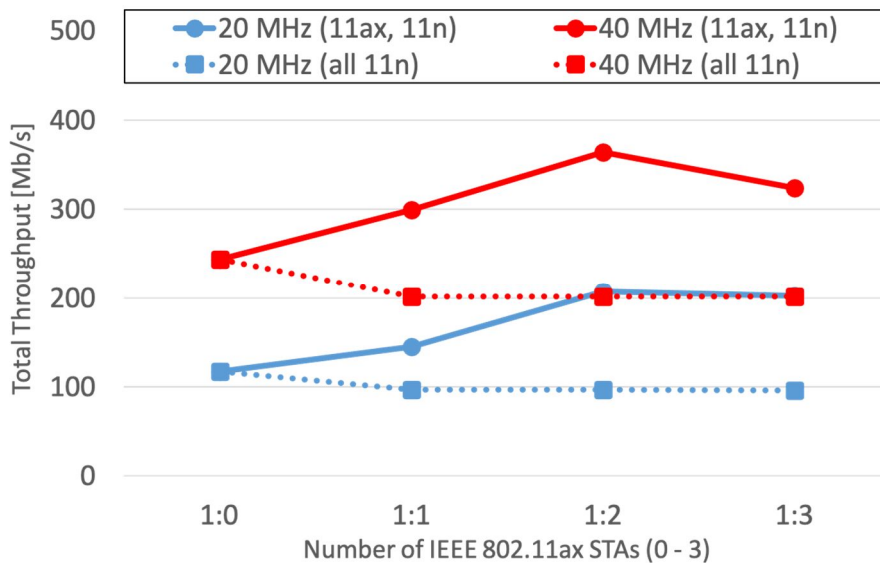


図6 総スループット特性 (IEEE 802.11n 1 台, IEEE 802.11ax 0 ~ 3 台)

< 引用文献 >

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 福田,他, "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, Mar. 2019.
- [5] Aruba: Aruba AP-515, (online), available from <https://www.arubanetworks.com/products/wireless/access-points/indoor-access-points/510-series/> (accessed 2023-05-18).
- [6] Aruba : Aruba 7210 Specification (online), available from (<https://www.arubanetworks.com/products/networking/controllers/7200-series/>) (accessed 2023-05-18).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 福田 豊, 中村 豊, 佐藤 彰洋, 和田 数字郎, 岩崎 宣仁	4. 巻 3
2. 論文標題 無線LAN利用状況調査に基づいて策定した改善策の検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 情報処理学会 デジタルプラクティス	6. 最初と最後の頁 1 - 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 富重 秀樹, 井上 純一, 畑瀬 卓司, 和田 数字郎, 林 豊洋, 福田 豊	4. 巻 25
2. 論文標題 無線LAN接続情報を利用した密集度表示システムとその改良	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 学術情報処理研究	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24669/jacn.25.1_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福田 豊, 中村 豊, 佐藤彰洋, 和田数字郎	4. 巻 11
2. 論文標題 九州工業大学全学ネットワークの更新に向けた無線LAN利用動向調査	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会 デジタルプラクティス	6. 最初と最後の頁 636 - 656
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. Fukuda, T. Hatase, A. Satoh, Y. Nakamura, S. Wada
2. 発表標題 Characterizing the basic performance of IEEE 802.11ax using actual hardware measurements
3. 学会等名 NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田 豊, 佐藤 彰洋, 中村 豊, 和田 数字郎
2. 発表標題 COVID-19 影響下での利用動向に基づく全学無線LAN 整備
3. 学会等名 情報処理学会九州支部火の国シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福田豊, 畑瀬卓司, 佐藤彰洋, 中村豊, 和田数字郎
2. 発表標題 実機を用いた IEEE 802.11ax の基本性能評価
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田 豊, 畑瀬 卓司, 和田 数字郎, 佐藤 彰洋, 中村 豊
2. 発表標題 九州工業大学キャンパス無線LAN における端末の無線LAN 規格調査
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田 豊, 中村 豊, 佐藤 彰洋, 和田 数字郎, 岩崎 宣仁
2. 発表標題 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 更新 (2019年) とその改善策の検証
3. 学会等名 インターネットと運用技術シンポジウム論文集 (IOTS 2020, 査読有り)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田 豊, 佐藤 彰洋, 畑瀬 卓司, 中村 豊, 和田 数字郎
2. 発表標題 COVID-19下の無線LANとVPNの利用状況-九州工業大学の場合
3. 学会等名 インターネットと運用技術シンポジウム論文集 (IOTS 2020, ポスターセッション, 査読有り)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

藤村記念ベストプラクティス賞, 情報処理学会 IOT研究会, 福田 豊, 畑瀬 卓司, 佐藤 彰洋, 中村 豊, 和田 数字郎, "実機を用いた IEEE 802.11ax の基本性能評価", 2022年07月12日
<https://www.ipsj.or.jp/award/iot-award.html>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関