

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

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

概要：1997 年に最初の無線 LAN 規格 IEEE 802.11 が策定されて以来、伝送レートを高速化するために数年ごとに新しい規格が登場し、現在では第 6 世代と言われる IEEE 802.11ax の標準化が完了している。標準化は後方互換性を維持しながら進んだため、最新規格 IEEE 802.11ax の AP (Access Point) でも IEEE 802.11a/b 対応機材は接続し通信を行うことができる。この後方互換性と比較的短い年月での世代更新により、キャンパス無線 LAN では多様な IEEE 802.11 規格が混在している。しかし、異なる規格の混在はスループット特性が低下する Performance Anomaly 問題の発生を招くため、可能な限り規格の混在を回避する運用が望ましい。そのためにはまず全接続に対する無線 LAN 規格の混在状況を把握する必要がある。そこで本稿では九州工業大学のキャンパス無線 LAN を利用する端末の規格を調査し、得られた知見から混在を回避するための運用方法を述べる。

キーワード：IEEE 802.11ax, キャンパス無線 LAN, 後方互換性, 旧規格, Performance Anomaly

The Variety of the Wireless LAN Standard at the Campus WiFi Network

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

Abstract: Since the first wireless LAN standard, IEEE 802.11, was established in 1997, all standards provide backward compatibility, so the APs (Access Points) of the latest IEEE 802.11ax can be connected from legacy IEEE 802.11a/b terminals. However, using the different transmission rates in the same APs causes the performance anomaly that degrades the throughput performance drastically. In order to provide the stable operation for campus wireless LAN, it is vital to classify the wifi connection according to the IEEE 802.11 standards as much as possible. In this paper, we analyze the variety of the wireless LAN standards and examine how to avoid or mitigate the sharing the same AP with the different standards.

Keywords: IEEE 802.11ax, Campus WiFi, Backward compatibility, legacy IEEE 802.11, Performance Anomaly

1. はじめに

最初の無線 LAN 規格 IEEE 802.11 は 1997 年に標準化された。それ以降、伝送レートを高速化するために数年ごとに新しい規格が登場し、現在では第 6 世代と言われる IEEE 802.11ax の標準化が 2021 年 2 月に完了している。こうした新しい規格の登場により、伝送レートは 2 Mb/s

から 9.6 Gb/s まで高速化された。加えて標準化は後方互換性を維持しながら進んだため、最新規格 IEEE 802.11ax 対応の AP (Access Point) でも IEEE 802.11a/b 対応機材は接続し通信を行うことができる。

この後方互換性と比較的短い年月での世代更新により、無線 LAN には複数の異なる規格からの接続が一般的に生じている。例えば数年前に購入したノートパソコンは IEEE 802.11ac で、最近購入したスマートフォンは IEEE 802.11ax で接続する、といった具合である。特に学生と教

¹ 九州工業大学 情報基盤センター

² 九州工業大学 飯塚キャンパス技術部

^{a)} fukuda@isc.kyutech.ac.jp

職員が利用するキャンパス無線 LAN では、スマートフォンやタブレット、ノートパソコン等だけでなく、プロジェクトや IoT (Internet of Things) 機材等、様々な端末が接続するため、機材の多様性に応じてその対応する IEEE 802.11 無線 LAN 規格も第 2 世代から第 6 世代まで幅広くなると考えられる。

しかし、異なる規格が混在する無線 LAN では Performance Anomaly 問題が発生し、総スループット特性が低下することが知られている [1]。我々も先行研究 [2] で、最新規格の IEEE 802.11ax と 2 つ前の世代である IEEE 802.11n の端末を 1 台ずつ混在させて通信を行った結果、スループット特性は 2 台とも IEEE 802.11ax 端末であった場合と比較して 100 Mb/s 以上低下することを明らかにしている。端末の多様性が高いキャンパス無線 LAN では混在による通信性能の低下が生じる可能性は高く、できる限り混在を回避するような運用を検討する必要がある。

そこで本稿ではまず、本学キャンパス無線 LAN において混在による通信性能の低下が潜在的に発生し得るのかを調査した。具体的には端末の接続規格を調べ、各規格の割合や時間的な変化等を調べた。無線 LAN コントローラから取得した接続規格を分析した結果、(1) 最も多いのは IEEE 802.11ac で約半数を占めており、続いて IEEE 802.11n が約 30%、次に IEEE 802.11ax、IEEE 802.11a/g の順である、(2) 本学では IEEE 802.11a/g のみに対応する端末の定常的な接続は観測されなかった、(3) 時間変化を調査したところ、IEEE 802.11ac/ax といった新しい規格に対応する端末も、旧規格 IEEE 802.11a/g で接続していることがわかった。この結果から、本学でも Performance Anomaly が常時生じ得るため、混在を回避する運用方法として接続規格による接続制御や設定伝送レートを絞る等の対策について述べる。

2. 無線 LAN における Performance Anomaly

無線 LAN の基本的なメディアアクセス技術である CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) では、全ての端末に対して均等なチャンネルアクセスを提供する。言い換えれば、送信する機会は全ての端末で等しくなる。ここで電波環境が悪い等の理由で低伝送レートを選択する端末が送信機会を獲得すると、送信時間は他端末よりも長くなるため単位時間あたりのスループット特性は低下してしまう。この異なる伝送レートに起因する性能低下は、Performance Anomaly として知られている [1]。

Performance Anomaly の主な対策としては、端末がチャンネルにアクセスするまでの待機時間を決める CW (Contention Window) の長さを伝送レートや負荷、電波干渉

情報等に応じて制御する手法が提案され、送信時間の公平性を考慮する airtime fairness や、比例的公平を考慮する proportional fairness 等を用いた評価が盛んに行われている。例えば [3] では端末が自身の CW を proportional fairness を達成するように自立的に調整する手法を提案している。しかし独立して運用される無線 LAN では近隣の電波状況の取得には限界があり、その中で刻々と変化していく通信状態に応じて CW を適切に選択することは一般的に困難である。また CW の制御は AP や端末側にも対応が必要であるため、これまでの所標準化された規格の中には組み込まれてはいない。

一方で伝送レートは新しい規格の登場と共に高速化されており、規格間の伝送レート差による通信特性低下の影響は拡大している。例えば [4] では、780 Mb/s の伝送レートで接続する IEEE 802.11ac 端末と、6 Mb/s の伝送レートで接続する IEEE 802.11g 端末が混在する時、IEEE 802.11ac 端末は IEEE 802.11g 端末と同程度のスループットしか獲得できないことを解析を通して示している。また [5] はバルセロナとその周辺で調査した約 12,000 台の AP の内、IEEE 802.11b にのみ対応する AP は全体の僅か 0.08 % であったが、95 % 近くの APs が IEEE 802.11b による接続を許可しているため、Performance Anomaly が容易に生じることを指摘している。

こうした混在による通信性能の低下を避けるためには、IEEE 802.11b 等の古い規格でのみサポートされる低伝送レートを AP の設定から外す方法があり、本学でも低レートによる接続は除外する設定を投入している。しかしながら [6] では実機実験により IEEE 802.11ac 端末同士でも伝送レートに差が生じると Performance Anomaly が発生することを報告している。また我々も先行研究 [2] で IEEE 802.11ax と IEEE 802.11n の混在時にスループット特性が 100 Mb/s 以上低下することを確認しており、第 4 世代以降の IEEE 802.11n/ac/ax でも伝送レート差による Performance Anomaly は生じる。

そこで本研究では Performance Anomaly 対策を念頭に、本学キャンパス無線 LAN に接続する端末の規格調査を行う。具体的には IEEE 802.11a/g/n といった旧規格のみに対応する端末がどの程度存在し、どのような影響を与えているのかを分析する。加えて各規格の割合や時間変化等も調べ、得られた知見に基づいて混在を回避する運用方法を検討する。

3. 九州工業大学における全学無線 LAN

本節では本学のキャンパス無線 LAN の概要と、利用者数や端末数の推移について述べる。

3.1 全学用無線 LAN

九州工業大学は 2019 年 10 月から新しいキャンパス

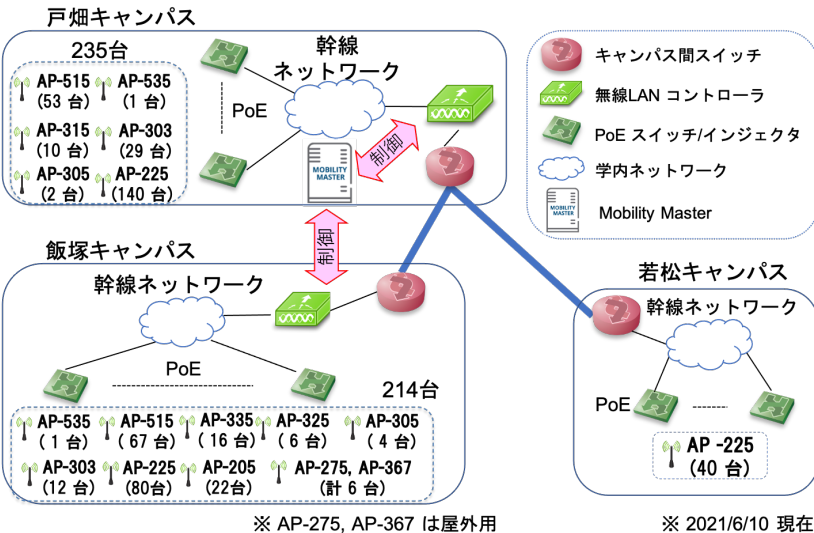


図 1 無線 LAN 構成図 (2021 年 6 月現在)

表 1 各 SSID 利用者数と接続端末数 (年度ごと)

年度	学内用		若松キャンパス用		eduroam		学外者		全体	
	利用者数	端末数	利用者数	端末数	利用者数	端末数	利用者数	端末数	利用者数	端末数
2014	2036	4966	372	372	431	631	341	411	3180	6165
2015	3542	9555	773	773	646	882	309	386	5270	11186
2016	4597	12471	973	973	708	1018	345	428	6623	14424
2017	5872	14420	1152	1152	614	772	256	323	7894	16072
2018	6513	16348	762	762	844	1152	203	261	8322	17938
2019	6886	17460	548	548	998	1414	101	141	8533	18994
2020	6708	21769	369	369	325	498	77	65	7479	22367

無線 LAN の運用を開始している。現在の無線 LAN システム構成図を図 1 に示す。現行のシステムでは IEEE 802.11ax に対応した HPE (Hewlett Packard Enterprise) 社製の AP-515[7] を講義室や福利施設等の利用者が多い箇所を中心に 120 台 (戸畑キャンパスに 53 台、飯塚キャンパスに 67 台)、AP-535[8] を 2 台 (戸畑、飯塚各キャンパスに 1 台ずつ) 導入している。またその他の AP (367 台) は全て IEEE 802.11ac に対応しており、3 キャンパスで合計 489 台が稼働している。加えて、IEEE 802.11b はサポートから除外し、IEEE 802.11a/g/n/ac/ax での接続を提供している。AP の増設箇所や機材の選定については [9] の 5 節に、また導入した無線 LAN の概要は [10] にまとめている。

3.2 利用動向

無線 LAN コントローラは端末が接続すると、接続時刻と接続先 AP、SSID (Service Set Identifier) とユーザ名、MAC address を log に出力する。この log から適切な IP address を DHCP より取得したものを対象にして分析し、全学無線 LAN の利用者数や接続端末数の動向を述べる。

表 1 は年度ごとのユニークな利用者数と接続端末数を SSID ごとに示している。2020 年度は 2019 年度と比較して学内用 SSID の利用者数が 178 名減少した。また eduroam や学外者用の利用も大幅に減少している。これは COVID-19 によりキャンパスの入構者数が減少したためである。一方、ユニークな MAC address から導出した端末数は大幅に増加している。これは iOS14 (2020 年 9 月 17 日より提供開始) で SSID ごとの private MAC address の使用が有効化された影響であると考えられる。

この点を確認するために HPE 社の統合管理ソフトウェアである AirWave[11] を用いて iOS 14 提供前後の端末種別を比較する。図 2 に提供直前の 3 ヶ月間 (2020 年 6 月 1 日 ~ 8 月 31 日)、図 3 に提供後の 3 ヶ月間 (2020 年 11 月 1 日 ~ 2021 年 1 月 31 日) に取得した端末種別を示す。図 2 では 50 % 以上の端末が Apple 社製品であることが分かるが、図 3 では約 40 % の端末が unknown となっており、private MAC address の使用が進んでいることがわかる*1。本学では 5 GHz 帯と 2.4 GHz 帯で異なる SSID を提供しているため、双方に接続する端末は別個に

*1 期間中に iOS 14 に更新した端末は重複してカウントされていることに注意

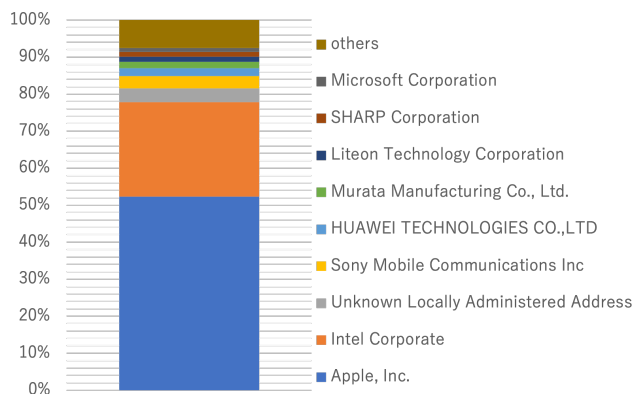


図 2 端末種別 (2020 年 6 月 1 日 ~ 2020 年 8 月 31 日)

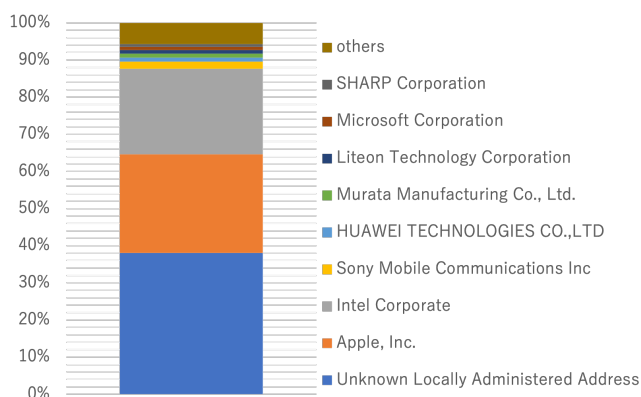


図 3 端末種別 (2020 年 11 月 1 日 ~ 2021 年 1 月 31 日)

カウントされることになる。同様に private MAC address を使用する動きは Android や Windows 10 でも見られるため、今後ユニークな端末数をどのように推定するかは検討が必要である。

次に各月のユニークな利用者数を図 4、ユニークな端末数を図 5 に示す。両図より、2020 年は最初の緊急事態宣言が出された 4 月から 6 月にかけて利用者数、接続端末数は大幅に減少している。さらに後期からは対面授業も増え回復傾向にあったが、2021 年 5 月には福岡県における感染者数が増加したことから緊急事態宣言が発令され、再び低下に転じている。

最後に、2019 年 1 月から 1 日ごとのユニークな利用者数を示したものを図 6 に示す。図 6 より、COVID-19 により 2020、2021 年の利用者数は大幅に減少していることが分かる。また本学では 5 月 12 日に福岡県に出された緊急事態宣言より遠隔講義となったため、利用者は再び 30% 程度減少している。なお、COVID-19 下の無線 LAN と VPN の利用状況は [12] で報告している。

4. 九州工業大学無線 LAN における接続規格

本節では本学無線 LAN に接続する端末の接続規格を調査する。無線 LAN の接続規格情報は、無線 LAN コントローラから REST API 経由で取得することにした。取得

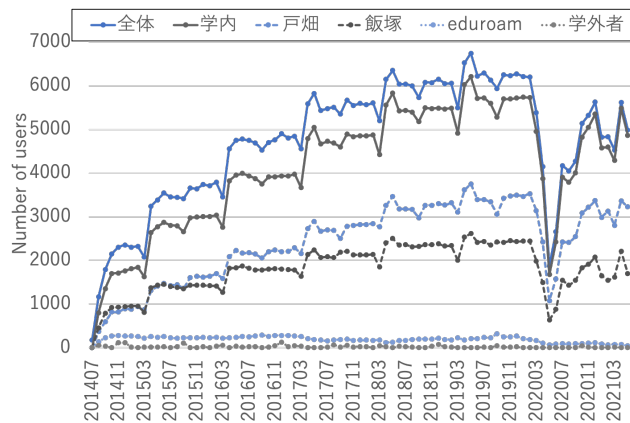


図 4 利用者数の推移 (2014 年 7 月 ~ 2021 年 5 月)

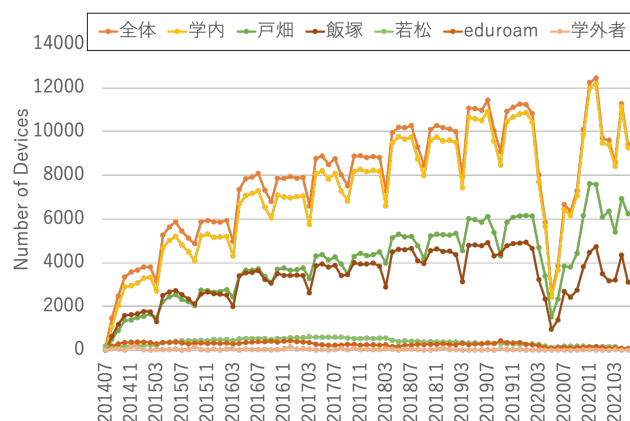


図 5 接続端末数の推移 (2014 年 7 月 ~ 2021 年 5 月)

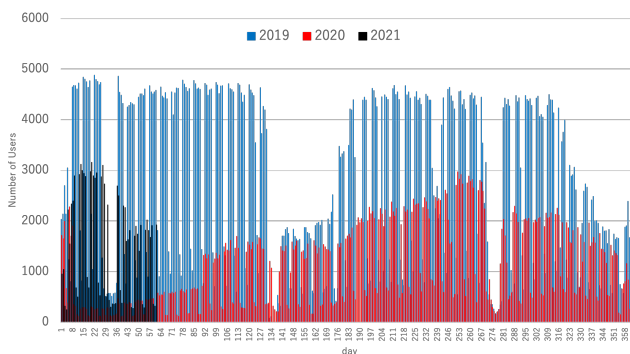


図 6 利用者数の推移 (2019 年 1 月 ~ 2021 年 5 月)

間隔は 5 分、データ取得期間は 2021 年 5 月の 1 ヶ月間である。

4.1 各規格の接続状況

接続規格を調べたところ、1 日に複数の規格で接続していたため、まず初めに各 MAC address が使用した規格の内、最も新しいものを 1 日ごとに集計して接続数やその割合を調査した。図 7 に各規格の接続数を、図 8 に各規格の割合を示す。なお、IEEE 802.11a/g は規格自体は異なるが、最高伝送レートは同じであるのでここではまとめて扱

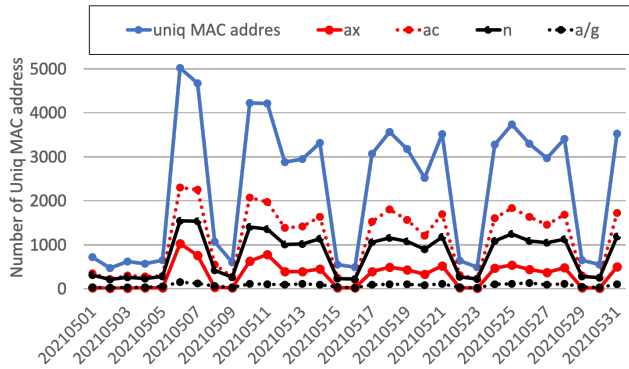


図 7 接続規格数 (2021 年 5 月, 日ごと)

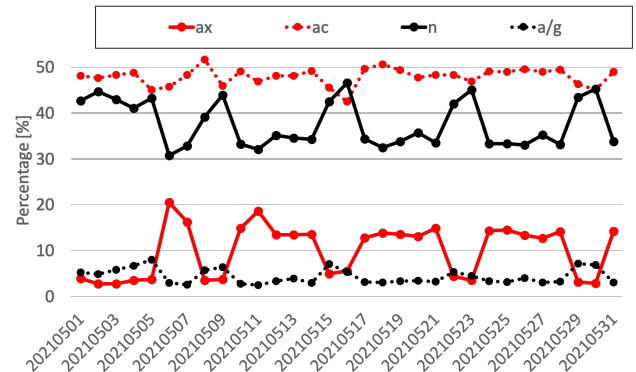


図 8 接続規格の割合 (2021 年 5 月, 日ごと)

う。図 7 より, 接続規格で最も多いのは IEEE 802.11ac で, 続いて IEEE 802.11n, IEEE 802.11ax, IEEE 802.11a/g の順となった^{*2}。

また図 8 より接続規格の約半分は IEEE 802.11ac であり, 平日は IEEE 802.11ax の割合が増加し, 反対に IEEE 802.11n の割合が減少している。この増減は研究室等の学内で使用される端末の規格は主に IEEE 802.11n か IEEE 802.11ac であり, IEEE 802.11ax は BYOD 端末に多いためだと考えられる。

両図より接続の半分は IEEE 802.11ac であったが, IEEE 802.11n も 30% 以上接続しており, 2 章で述べた Performance Anomaly 対策が必要である。そのためにはエンタープライズ製品に搭載されているシステムレベルでの情報収集に基づく端末と AP 間の接続制御 [13] を活用することが考えられる。ベンダーはこの機能により規格に応じて接続 AP を振り分けることで, 混在によるスループット特性の低下を回避できるとしている。具体的な設定としては, IEEE 802.11ac/ax とその他に分ける仕組みが有効であると考えられる。一方でこうした設定の導入によって接続の安定性が低下したり, 規格間の通信性能に著しい差が生じることが好ましくない。また無線 LAN 環境はそれぞれ全く異なるため, 推奨設定からのチューニングも必要だと考えられる。加えて導入判断のためには, 本機能による通信性能の改善効果をどのように評価するかの検討も必要である。よって実際の運用に入るためにはこれらの課題を解決しなければならない。

4.2 IEEE 802.11a/g 接続

次に現在接続を提供している中で接続レートが最も低速な IEEE 802.11a/g に着目する。図 7, 8 より一定の割合で毎日 IEEE 802.11a/g 接続されていることがわかる。そこでより詳細に IEEE 802.11a/g 接続数を調査するため, 5 月の全接続に対して IEEE 802.11a/g のみで接続されたユ

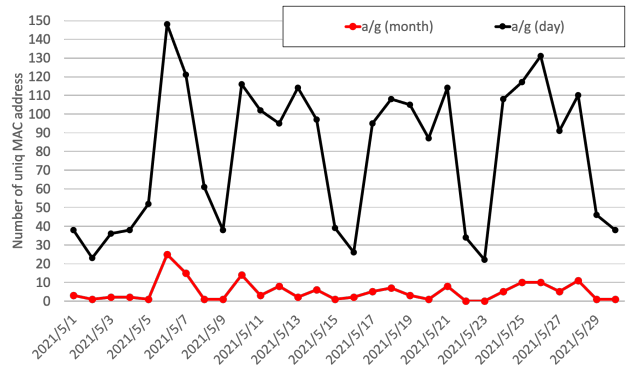


図 9 接続規格数 (2021 年 5 月全体集計)

ニークな MAC address 数を集計すると, 140 であった^{*3}。

この IEEE 802.11a/g 接続について, 1 月単位で集計した MAC address からの接続数 (140 個の MAC address からその日に接続した数) と, 1 日単位で集計した MAC address からの接続数 (その日 IEEE 802.11a/g のみで接続した数) を図 9 に示す。図 9 より, 接続数は月ごとの集計よりも 1 日ごとに集計した方が多い。これは, IEEE 802.11n 以降の規格に対応する端末が移動等による電波環境の変化に応じて伝送レートを選択した結果, ある 1 日は IEEE 802.11a/g のみで接続し, 別の日にはそれ以外の規格で接続するためである。この接続規格の変化については次の節でさらに分析する。

加えて図 9 より, 1 月単位で集計した MAC address からの接続数 (140 個の MAC address からその日に接続した数) を見ると, 5 月 22, 23 日は接続が検出されていない。そこでこの 140 個の MAC address の接続が記録された時間帯を図 10 に示す。図 10 より, 深夜帯の接続はほぼ無く講義時間帯に接続は集中している。よって, 本学では IEEE 802.11a/g のみに対応する端末の定常的な接続はなく, BYOD 端末か, または学内複数箇所で使用される端末から接続されている。接続数は少なく影響は限定的ではあるが, 最も低速な規格であるので, 今後も接続先 AP 及び混在状況の確認を継続的に行っていく必要がある。

^{*2} 但し IEEE 802.11ax 接続は一部 AP (講義室を中心とした 120 台) での提供である。

^{*3} 5 月全体では 10317 個のユニークな MAC address を検出した。

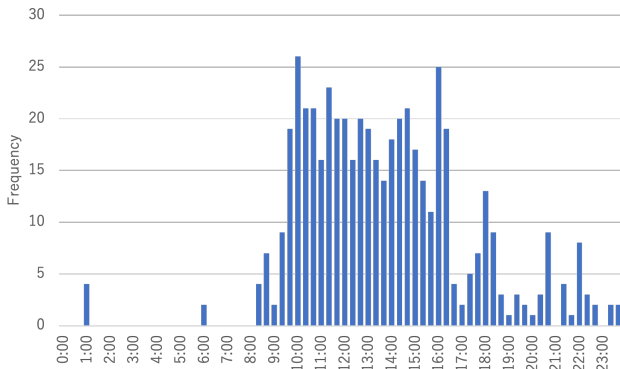


図 10 IEEE 802.11a/g 接続数 (時間帯)

4.3 接続規格の 1 日における変化

本節では接続規格の時間変化を調査する。図 7 よりユニークな端末数が最も多かった 5 月 6 日における各接続規格数の 24 時間の変化を図 11 に、各規格の割合の変化を図 12 に示す。図 11, 12 より 8 時過ぎから出勤や通学によって端末数が増加し、接続規格数は図 7 と同じく IEEE 802.11ac, IEEE 802.11n, IEEE 802.11ax, IEEE 802.11a/g の順である。

また両図より、接続規格が急激に変化する時間帯がある。特に 10:30, 12:00, 14:40, 16:20, 18:00 頃に IEEE 802.11a/g の接続数が急増し、反対に IEEE 802.11n/ac/ax 接続が減少している。この時間帯はちょうど講義と講義の合間にあたり、移動に伴って一時的に電波環境が悪化して低伝送レートを選択するため、旧規格により接続していると考えられる。

この点を確認するため、IEEE 802.11a/g による接続が最多となった 14:35 に着目する。この時間に IEEE 802.11a/g により接続していた端末は 420 台であった。そこでこの 420 台の端末が当日使用した接続規格を図 13 に示す。図 13 より、全体の 40 % と最も多かった接続規格は IEEE 802.11a/ac であった。次いで IEEE 802.11g/n, IEEE 802.11a/ac/ax, IEEE 802.11g/n/ax, IEEE 802.11g/ax の順で、この 5 パターンで全体の約 90% を占めている。さらに IEEE 802.11ac/ax で接続した端末の 70 % 以上が IEEE 802.11a/g でも接続している。

一方で、同時時間帯の IEEE 802.11n の接続を図 12 で確認すると、大幅な変化は見られていない。また図 13 より IEEE 802.11ac/ax 接続した端末が IEEE 802.11n でも接続した割合は約 10% であった。よって IEEE 802.11ac/ax 端末の多くは移動等によって電波環境が悪化すると、規格内で低伝送レートを選択したり、IEEE 802.11n で接続するよりも、IEEE 802.11a/g といった古い規格での接続を選択していることがわかった。

こうした移動等による旧規格接続を回避するためには、提供している伝送レートを絞る方法が考えられる。図 11 の 14:35 に端末が IEEE 802.11a/g で接続した AP は全部

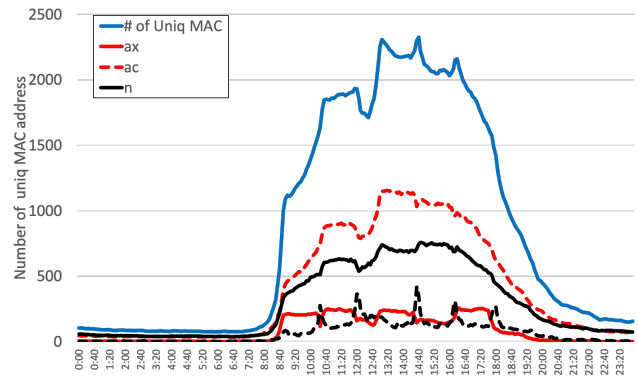


図 11 接続規格数 (2021 年 5 月 26 日)

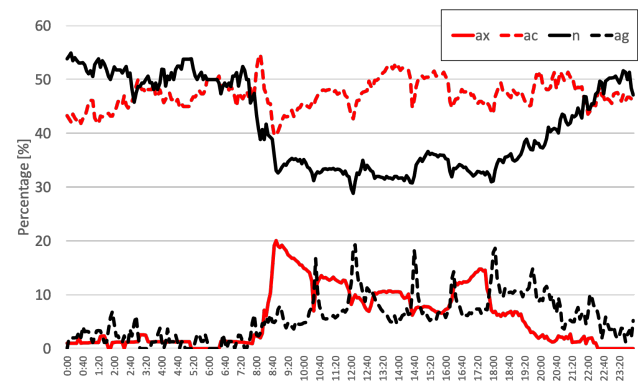


図 12 接続規格の割合 (2021 年 5 月 26 日)

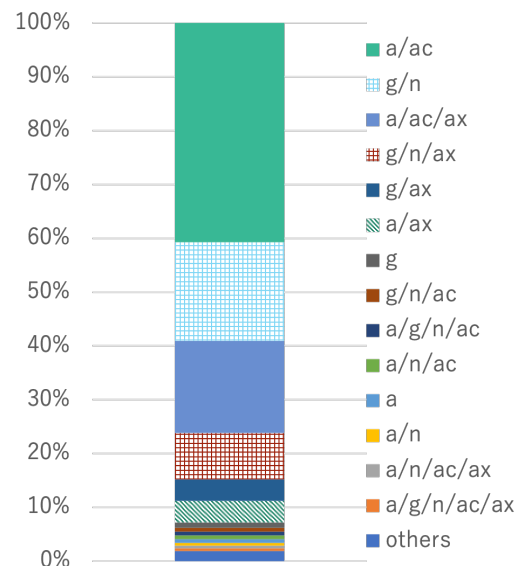


図 13 14 時 35 分に確認された端末の接続規格の変化 (2021 年 5 月 26 日)

で 135 台であったが、そのうち 56 台 (約 40 %) は講義室に設置されている。そこで講義室に設置された AP の伝送レートを見直すことで、同じ規格内の低伝送レートを選択するよう促すことができる。今後、候補の AP を選定して伝送レートの変更を行い、効果を検証する予定である。

5. まとめ

異なる規格が混在する無線 LAN では Performance Anomaly 問題が発生し、総スループット特性は低下することが知られている。そこで本研究では本学キャンパス無線 LAN において混在による通信性能の低下が潜在的に発生し得るのかを調査した。端末の接続規格数とその割合を分析した所、最も多いのは IEEE 802.11ac で約半数を占めており、続いて IEEE 802.11n が約 30%、次に IEEE 802.11ax, IEEE 802.11a/g の順であった。また本学では IEEE 802.11a/g のみに対応する端末の定常的な接続は観測されなかった。さらに接続規格の時間変化を調査したところ、IEEE 802.11ac/ax といった新しい規格に対応する端末も、旧規格 IEEE 802.11a/g で接続していることがわかった。この結果から、本学でも Performance Anomaly が常時生じ得るため、エンタープライズ製品にて提供されている接続規格によって AP を振り分ける機能が有効であると考えられる。しかし、全学的な運用に入るには規格間の公平性や、機能の有効性をどのように評価するかに課題が残る。また IEEE 802.11ac/ax に対応する端末が移動等による電波環境の変化のため IEEE 802.11a/g でも接続しており、単純な振り分けでは適切で無い AP への接続を継続してしまう可能性がある。対策としては移動経路沿いにあり IEEE 802.11a/g 接続が多い AP を抽出し、設定する伝送レートを絞る方法が考えられる。今後の課題としては、検討した対策を幾つかの AP に設定し、効果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] Heusse, M., Rousseau, F., Berger-Sabbatel, G. and Duda, A.: Performance anomaly of 802.11b, *IEEE INFOCOM 2003*, pp. 836–843 vol.2 (online), DOI: 10.1109/INFCOM.2003.1208921 (2003).
- [2] 福田豊, 畑瀬卓司, 富重秀樹, 林豊洋: 実機を用いた IEEE 802.11ax の基本性能評価, 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), Vol. 2021-CSEC-93, No. 19, pp. 1–7 (2021).
- [3] Gawłowicz, P., Walrand, J. and Wolisz, A.: Distributed Learning for Proportional-Fair Resource Allocation in Coexisting WiFi Networks, *arXiv:2102.05149 [cs]* (2021).
- [4] Patras, P., Garcia-Saavedra, A., Malone, D. and Leith, D. J.: Rigorous and practical proportional-fair allocation for multi-rate Wi-Fi, *Ad Hoc Networks*, Vol. 36, pp. 21–34 (online), DOI: 10.1016/j.adhoc.2015.06.002 (2016).
- [5] Lopez-Aguilera, E., Garcia-Villegas, E. and Casademont, J.: Evaluation of IEEE 802.11 coexistence in WLAN deployments, *Wireless Networks*, Vol. 25, No. 1, pp. 87–104

- (online), DOI: 10.1007/s11276-017-1540-z (2019).
- [6] Safdari, F. and Gorbenko, A.: Experimental Evaluation of Performance Anomaly in Mixed Data Rate IEEE802.11ac Wireless Networks, *2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, pp. 82–87 (online), DOI: 10.1109/DESSERT.2019.8770038 (2019).
- [7] Aruba: Aruba AP-515, (online), available from <https://www.arubanetworks.com/products/wireless/access-points/indoor-access-points/510-series/> (accessed 2021-06-10).
- [8] Aruba: Aruba AP-535, (online), available from <https://www.arubanetworks.com/products/wireless/access-points/indoor-access-points/530-series/> (accessed 2021-06-10).
- [9] 福田豊, 中村豊, 佐藤彰洋, 和田数字郎: 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, *デジタルプラクティス*, Vol. 11, No. 3, pp. 636–656 (2020).
- [10] 福田豊, 中村豊, 佐藤彰洋, 和田数字郎, 岩崎宣仁: 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, *インターネットと運用技術シンポジウム論文集*, Vol. 2020, pp. 41–48 (2020).
- [11] Aruba: Aruba AirWave, (online), available from <https://www.arubanetworks.com/products/network-management-operations/airwave/> (accessed 2021-06-10).
- [12] 福田豊, 佐藤彰洋, 畑瀬卓司, 中村豊, 和田数字郎: COVID-19 下の無線 LAN と VPN の利用状況-九州工業大学の場合, *インターネットと運用技術シンポジウム論文集*, Vol. 2020, pp. 113–114 (2020).
- [13] Aruba: Aruba CLIENTMATCH, (online), available from https://www.arubanetworks.com/assets/tg/TB_EnhancedClientMatch.pdf (accessed 2021-06-10).