

Wi-Fi IoT システム構築に関する一考察

馬場 伸一

第一工科大学 情報・AI・データサイエンス学科 (〒 899-4332 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

A study on IoT system deployment using Wi-Fi network

Shinichi Baba

Department of Information, Artificial Intelligence and Data Science, Daiichi Institute of Technology

Abstract : Digital Transformation (DX) with Internet of Things (IoT) is expected to bring many innovations to our daily work and life. IoT devices require a communication mean to deliver a collecting data to a server. In office and home environment, Wi-Fi should be the best candidate for that because it is very popular now and provides a huge number of installed base. A key question is how it is feasible to add a new IoT service onto an existing Wi-Fi network, if the network is used actively. In this paper, we try to provide a resolution to that by a study with a network simulator, ns-3. In conclusion, not only an amount of data generated by IoT devices but also the number of them and other aspects are necessary taken into consideration to find out an exact impact of IoT system implementation to the current Wi-Fi services.

Key words : Internet of Things (IoT), Wi-Fi, Smart home, Smart Office, IEEE 802.11be, ns-3, IoT device deployment

1. はじめに

仕事や生活のデジタル化、それによる利便性、生産性の向上、つまりデジタルトランスフォーメーション (DX) への期待が高まっている。それを支える Internet of Things (IoT) 端末数の伸びも著しい。情報通信白書令和 6 年度版 [データ編 第 II 部 第 1 章 第 5 節][1] によれば、世界の IoT デバイス数は 2023 年に 378 億台に達しており、2027 年には 572.6 億台まで増えると予測されている。しかも産業用途、コンシューマ向け IoT デバイスは共に年平均成長率も 10 数 % の高い伸びが予測されており、職場や家庭の中の IoT デバイスが増加し、新しい利便性が提供される。IoT デバイスはネットワークを介してデータをリアルタイムで収集するが、その設置や移動の簡便さから無線通信が利用される場合が多い。職場や家庭で既に普及している無線通信インフラとして Wi-Fi がある。産業用途やコンシューマ向け IoT を導

入する場合もこの Wi-Fi 利用による IoT デバイスのインターネット接続が効率的である。近年は Wi-Fi の普及で IC や技術が進展し、計算能力の低いデバイスやプログラミング環境に制限のあるデバイスでも Wi-Fi の利用が可能になっている。Wi-Fi の技術標準を定める IEEE 802.11 委員会でも Wi-Fi の IoT 利用を意識した機能の拡張が行われている。2024 年 9 月に承認された IEEE 802.11be 規格でも、新しい機能や工夫が導入されている [2][3]。

そこで今回、IoT デバイスがどのように Wi-Fi ネットワークを活用できるか、最新の標準規格がどのように IoT デバイスの導入に貢献するかを、シミュレーションにより検証し、その結果を報告する。IEEE 802.11be の性能については、種々の視点から評価されているが、今回の検証では身近な IoT 活用のシナリオをベースとする。特に、IoT デバイスを既設の Wi-Fi ネットワークに追加導

入した場合に、すでに Wi-Fi を利用している通信サービスに与える影響に注目した。Wi-Fi は現代生活における不可欠な技術となり、家庭や公共の場、職場などあらゆる場所で広く普及しており、IoT の導入にあたっては、既存サービスの品質を維持することは重要である。そこで最新の Wi-Fi 規格における既存の利用環境を維持した IoT デバイス追加の指針を探索する。本研究は、有木らの研究 [4] と同じ目的、シナリオを持ち、それを補完・発展させたものである。

以下、第 2 章では検討する IoT システム導入シナリオと Wi-Fi IoT アーキテクチャについて述べ、第 3 章で、使用するシミュレーション環境について詳述する。第 4 章では、検証の結果を示し、考察を行い、最後に第 5 章でまとめる。

2. Wi-Fi IoT システムアーキテクチャ

本章では、検討する IoT システム導入シナリオとそれに基づく Wi-Fi を用いた IoT システムアーキテクチャ、および、そこで使用する Wi-Fi 技術について述べる。

2.1 検証システムアーキテクチャ

Wi-Fi IoT システム導入では、IoT システム専用に Wi-Fi ネットワークを構築できる場合もあるが、すでに Wi-Fi を使用しているオフィスやホームでの IoT システム導入のケースも多いと考えられる。つまり Wi-Fi を使って Web 検索、ファイルダウンロード・アップロード、動画などのストリーミングなどが行われているところに、データセンサや測定・観察用 Web カメラなどの IoT デバイスが追加される。IoT デバイスのデータ通信はファイルダウンロードや動画視聴に比較して低速であり、高速化の進んだ Wi-Fi の通信容量を圧迫する可能性は低い。しかし、接続されるデバイスの数が多い場合、その通信回数の多さが、それまでに Wi-Fi を使っている既存サービスに影響を与える可能性がある。

ここでは、既設 Wi-Fi を使用していたサービスとして 8 台のファイルダウンロード端末を仮定する。これはアクセスポイント (AP) から端末に

向けた大容量の下り通信が継続的に行われている状態に相当する。この下りサービスに対して、各種のセンサを仮定した IoT デバイスを追加し、発生データを AP 経由でクラウドに向けて通信する上りサービスを加えた場合の通信品質の変化をシミュレーションにより検証する。

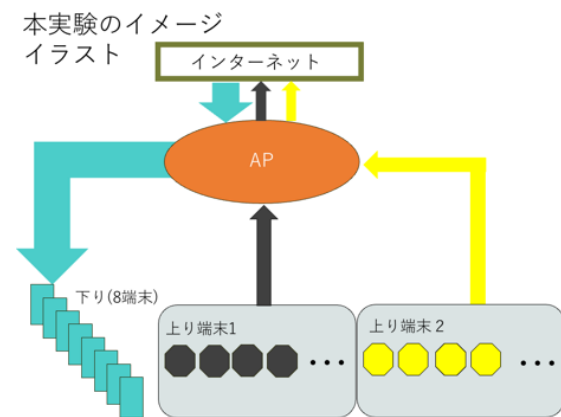


図1 検証用 Wi-Fi IoT システムの基本構成 [4]

本検証のための Wi-Fi IoT システムの基本構成を図 1 に示す。1 つの Wi-Fi アクセスポイント (AP) と接続している下りサービス用の端末と上りサービス用の IoT デバイスを仮定、特に上りサービスについては複数の特性の通信が追加されることも想定し、複数のサービスに対応する。

検証に用いる Wi-Fi は、2024 年 9 月に承認された最新規格の IEEE 802.11be に準拠している。

2.2 IEEE 802.11be

世界中の Wi-Fi デバイス数増加に対応するために登場した無線 LAN 規格として IEEE 802.11ax があった。IEEE 802.11be は、IEEE 802.11ax で多くのデバイスが通信を行ったとき通信速度が落ちてしまう現象を改善し、すべての種類のデバイスで超高速通信を可能にする最新の無線 LAN 規格である。表 1 にその主要スペックを示す。最大通信速度は理論値で 46Gbps だが、そのために必要な機能の一部であるマルチリンク機能 (Multi-Link Operation, MLO) や MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) の複数ストリームの利用は、図 1 のアーキテクチャを用いる本検証は考慮していない。

MLO は、2.4GHz、5GHz、6GHz の周波数帯

表 1 IEEE 802.11be の主要スペック

仕様項目	802.11ax	802.11be
最大通信速度	9.6Gbps	46Gbps
最大帯域幅	160MHz	320MHz
変調方式（最大値）	1024QAM	4096QAM
MIMO（最大ストリーム数）	8	16
多元接続	CSMA/CA, OFDMA	CSMA/CA, OFDMA
マルチリンク機能 (MLO)	なし	あり

から複数の帯域を同時に使うことを可能にする。2.4GHz、5GHz、6GHz を併せて用いることによって、通信容量が拡大する。あるいは、複数の周波数帯の中から干渉を受けても問題のない帯域を使うことで、遅延や混雑が生じにくくなるなど、通信の安定化も期待できる。これは、IoT の中でも信頼性や低遅延性を必要とするサービスには大きな利点となる。

MIMO の最大 16 ストリームもマルチユーザのアップリンクでの利用を考えれば、AP 当りで従来の 2 倍のアップリンクを収容可能にする機能であり、IoT への適応に利点がある。2 倍のストリームとなることでデータを運べる経路が増え、より安定した無線通信を可能とする。

Wi-Fi で使える最大帯域幅が従来の 160MHz 幅から 320MHz 幅に拡張されている。そのため、従来の IEEE 802.11ax と比べて約 2 倍の通信速度向上を実現する。

変調方式においても改善があり、通信効率が向上した。1 シンボルで伝送できる情報量が従来の 10bit (1024QAM) から、4096QAM の実現により 12bit に増加した。これによって、通信速度が 1.2 倍に向上、特に近距離通信を行う際に有効な機能となっている。

また、これまでは端末が利用するチャンネルが同じ場合、電波干渉により通信が滞っていたが、Preamble Puncturing という、電波干渉を避けた残りの帯域を利用する新しい仕組みを実現しており、多数の端末や Wi-Fi システムが存在する環境

でも通信品質の劣化を抑制できる。

3. シミュレーション環境

オープンソースソフトウェアの ns-3[5] を利用して、シミュレーション環境を構築する。ns-3 は通信ネットワーク研究で利用されており、多くのボランティアにより機能が日々更新され、OpenFlow、Wi-Fi、WiMAX、5G 等の最新のネットワーク技術に対応している特徴を有する。Wi-Fi 技術では新規規格である 802.11be の機能の実装が進んでおり、その一部がすでに公開されているため、今回の検証で用いる。使用するバージョンは、2024 年 5 月にリリースされた ns-3.42 である。

ns-3 を稼働させる計算機環境は、CPU に 12 世代 Intel Core i7 を装備し、32GB のメインメモリを搭載する Windows11 PC の上で、仮想化ソフトウェアである VirtualBox を用いて仮想マシンを構成し、そこに Linux オペレーティングシステム (OS) の 1 つである Ubuntu (Ubuntu 24.04 LTS 64bit) をインストールして構築した。仮想マシンとしては、プロセッサコア数 14、メインメモリサイズ 24GB の設定である。

4. IoT サービス追加の影響

4.1 既存サービス

本検証は、既存サービスが Wi-Fi を利用している環境に IoT システムを追加した際の既存サービスへの影響の評価を目的としている。そのため、まず最初に既存サービスの通信品質を確認する。2.1 節で説明した 8 端末がファイルダウンロードやストリーミングなどのサービスで AP からの下り通信を通信帯域を最大限に利用していると仮定する。その場合のシミュレーションパラメータを表 2 に示す。

表 2 の中で Modulation and Coding Scheme (MCS) は、変調方式と符号化率の組合せを示す指標である。IEEE 802.11be では、MCS0 から MCS13 まで定義があり、この内 MCS12 と MCS13 が IEEE 802.11be で追加されたものである。MCS13 が最も高速な通信を可能とする組合

表2 下りサービスのパラメータ

仕様	値
端末数	8
端末アンテナ数	1
使用周波数	5GHz 帯
MCS	13
使用帯域幅	160MHz
ガードタイム	800ns
AP アンテナ数	1
トランスポート層プロトコル	User Datagram Protocol (udp)

せで、変調方式は 4096-QAM、符号化率は 5/6 を意味する。表 2 の条件における MCS13 の理論上の通信容量は、約 1441Mbit/s である。従って、これを 8 台の端末で等分すると、端末当たり約 180Mbit/s の通信容量を使えることになる。そこでシミュレーションでは、アプリケーションは各受信端末に向けてそれぞれ毎秒約 180Mbit のデータを送信するように設定する。また、使用帯域幅は、シミュレータの機能実装の制限から 160MHz とした。

この条件でのシミュレーションを、ns-3 で提供されているサンプルコード wifi-ehc-network.cc を用いて実行すると、8 受信端末合計の実効的な通信容量は約 840Mbit/s であった。これは理論上の通信容量の約 60% であり、フレーム受信確認やビーコン信号の通信、衝突回避のための待ち時間など、802.11 プロトコルが求める諸動作により、この様な使用効率になっていると考えられる。

4.2 IoT サービスの追加

次に、この環境に IoT デバイスを導入・追加した場合の影響を調べる。IoT デバイスは測定したデータをクラウドに送信する上り通信を行う。使用する MCS は最も低い通信速度を提供する MCS0 を用いるものとする。最も低い通信速度であっても表 2 に示された下り通信と同じ条件である、使用帯域幅 160MHz、ガードタイム 800ns では、理論上の最大通信容量は約 72Mbit/s となる。

まず初めに、IoT デバイスを 1 台から増やした場合の下り通信への影響を検証する。図 2 に、IoT デバイスを 1 台から 64 台まで増やした場合

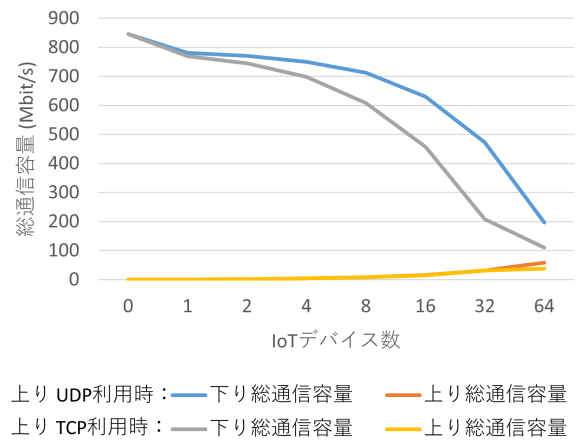


図2 IoT デバイス追加時の下り通信容量への影響 (上りデータ発生量 1Mbps/デバイス)

の下りサービス (8 端末へのファイルダウンロード等) と上りサービス (IoT データ送信) の通信特性のシミュレーション結果を示す。横軸が追加される IoT デバイスの数で、縦軸の総通信容量は下り或いは上りサービスの各デバイスが得られた実効的な通信容量の合計である。IoT デバイスの数は、その変化範囲を広くすることを想定して 2 のべき乗で増やしている。

IoT デバイスはデバイス数の変化に依らず、1 デバイスあたり 1Mbit/s のデータを発生すると設定した。これはネットワークカメラ (解像度 1280×720 ドット程度) の IoT デバイスを仮定した場合に相当する [6]。また、IoT デバイスからのデータ送信は上位層プロトコルに HyperText Markup Language (HTML) や Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)[7] などを使い、そのトランスポート層としては信頼性の高い通信を提供する Transmission Control Protocol (TCP) を使うことが一般的であることから、上りサービスでは、UDP を使用する場合と TCP を使用する場合の 2 種類を比較している。シミュレーションにはトランスポート層より上位層のプロトコルは組込まれておらず、トランスポート層出力のところで受信データ量を測定している。

図 2 から、IoT デバイスあたりの生成データ量が 1Mbit/s と Wi-Fi システムが持つ最大伝送速度に対して十分小さい場合でも、IoT デバイス数の増加につれて既存の下りサービスの実効的な総

通信容量が低下することが分かる。しかも低下量は、上り総通信容量の増加量よりも大きく、上りの総通信容量以外の要素も下り総通信容量に影響を与えていると考えられる。また、IoT デバイスが行う上り通信が TCP 利用時の方が、下り総通信容量の低下量が多い。これも下り総通信容量に影響を与える要素が上りの総通信容量だけでないことを示し、上り通信のプロトコルがその要素の 1 つであるといえる。

図 2 では、上り TCP 使用時で IoT デバイス数が 1 の時に下り総通信容量が約 770Mbit/s であるが、64 の時に下り総通信容量が約 110Mbit/s まで低下している。この IoT デバイス数 64 の時の全 IoT デバイスからのデータ発生量合計は 1 秒あたり 64Mbit であるので、1 秒あたりのデータ発生量が 64Mbit である IoT デバイスを 1 台のみ既存サービスに追加した場合のシミュレーションも行った。この場合、下り総通信容量は約 530Mbit/s となった。つまり上り総通信容量は 64Mbit/s で変わらないが、下り総通信容量はデバイス数 64 の時ほど通信容量低下の影響を受けない。下りサービスの品質低下には、上り総通信容量だけでなく、IoT デバイス数の影響も大きいことを示唆している。この結果を IoT デバイス数が 1 のところで比較すれば、上りのデータ発生量が増えている一方で、下り総通信容量は約 770Mbit/s から約 530Mbit/s に低下しており、この低下量は上りのデータ発生量、総通信容量の増加が原因として支配的な部分とみられる。

図 3 は、図 2 と同様だが、IoT デバイスあたり 0.1Mbit/s のデータ発生に設定した場合の IoT デバイス数と総通信容量の関係をシミュレーションした結果を示している。図 2 と比較して、上り総通信容量が 1/10 になっているため、IoT デバイス追加が下り総通信容量に与える容量低下の影響は軽減されている。しかし IoT デバイス数が 32 を超えるあたりから容量低下が明確になると共に、上り通信のプロトコルの違いによる容量低下量の違いも明確になっている。従って、IoT デバイス数が下り総通信容量に与える影響が顕著になる領

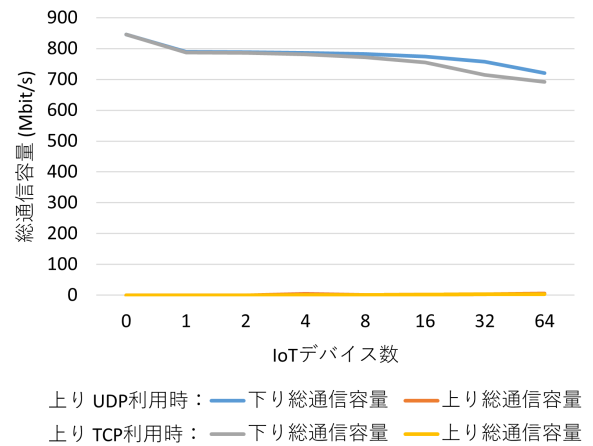


図 3 IoT デバイス追加時の下り通信容量への影響 (上りデータ発生量 0.1Mbps/デバイス)

域がこのあたりからだと推測される。

これは、既存の下りサービスと追加された IoT サービスの間で、Wi-Fi の通信容量の獲得競争が生じると同時に、ランダムアクセス方式を用いている Wi-Fi では端末間の通信機会の獲得競争も発生しているためと考えられる。この点において IoT デバイス数も通信品質を決める重要な要素となることがわかる。

以上、シミュレーションにより、Wi-Fi ネットワークへの IoT システムの追加導入が既存サービスの通信品質に与える影響を示した。さらに、その影響は、IoT システムが必要とする通信容量だけでなく、IoT デバイスの数や IoT デバイスを使用するプロトコルの影響も受けていることが示された。

5. まとめ

IoT システムの追加導入を支援するため、既存の Wi-Fi ネットワークに IoT システムを追加した場合の通信品質への影響について計算機シミュレーションにより検証した。その結果、IoT システムの追加が既存サービスの通信品質に与える影響は、IoT システムが必要とする通信容量だけでなく、使用する IoT デバイスの数やその使用するプロトコルによっても異なることが示された。まだ基礎的な検証であり、今後確認すべき項目として、以下が挙げられる。

○ シミュレーションには、簡単な電波伝搬モデルが組み込まれているが、すべての端末の位置は AP から距離 1m の設定で、無線通信環境としては理想的な状態と考えられる。各端末の配置を実際に合わせ、電波強度の分布やマルチパスの影響、隠れ端末問題などを考慮すると、より実環境に近いシミュレーションが実行できる。

○ 今回は IEEE 802.11be の機能の 1 つである直交周波数分割多重アクセス (Orthogonal Frequency Division Multiplex Access, OFDMA) を使用していない。OFDMA は、データ量の少ないデバイス向けに使用中のチャンネルを複数のサブチャンネルに分けて、複数の端末が同時に AP との間で通信ができる機能である。シミュレーション結果では、IoT デバイス数が 32 あたりから下り総通信容量に明確な影響が発生しているが、OFDMA の利用により、この影響が顕著になる IoT デバイス数を大きくできる可能性がある。

○ IoT サービスにより、使用する IoT デバイスの特性は異なる。従って、複数種類のサービスを仮定する場合、シミュレーションのモデル構築を複雑にする。その点で、上り総通信容量の影響と IoT デバイス数の影響についてその度合いを切り分けることができれば、複数種類のサービスのモデル化が簡単になり、効率的な影響予測が可能になる。

○ さらに IoT デバイスに、スマートスピーカや自動運搬車など収集したデータを基に動作を起こすアクチュエータデバイスを含む場合、下り通信にも複数種類のサービスを仮定する必要がある。

○ 工場やオフィスなどでは、面をカバーして不感地帯を無くすために複数の AP を設置する。複数 AP が存在する環境では、異なる AP にアクセスする IoT デバイスの間で電波の干渉により通信が制限される、いわゆる隠れ端末問題やさらし端末問題があり、IoT デバイス追加は全体の Wi-Fi ネットワーク構成を考慮して検討する必要がある。IEEE 802.11be は AP が密集した場合の通信性能劣化を防ぐ機能として、カラーリングやビームフォーミングを新規に装備している。これらの

最適化により性能を上げられる可能性がある。

参考文献

- [1] 総務省, 情報通信白書 令和 6 年版, July 2024
- [2] "IEEE Approved Draft Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT)," in IEEE P802.11be/D7.0, August 2024, 3 Oct. 2024
- [3] D. Lopez-Perez, A. Garcia-Rodriguez, L. Galati-Giordano, M. Kasslin, and K. Doppler, "IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax," IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 9, pp. 113 – 119, Sept. 2019
- [4] 有木 紳之亮, 松下 幸人, 宮園 天恵「Wi-Fi における IoT 通信実現に関する研究」第一工科大学 卒業研究報告, 2025
- [5] ns-3 Network Simulator, <https://www.nsnam.org/> (2025.5.10 閲覧)
- [6] Motto クラウドカメラ「ネットワークカメラの通信量の目安は? ビットレートの意味や計算法を解説」セーフィー株式会社, 2025, https://safie.jp/article/post_6649/ (2025.5.10 閲覧)
- [7] OASIS Open, "MQTT Version 5.0", March 2019, <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt-v5.0/mqtt-v5.0.html> (2025.5.10 閲覧)