

発表プログラム番号 TB-07

令和6年度 卒業論文

クロスレイヤシミュレータにおける無線LAN評価モデルの検討

A Study of a Wireless LAN Evaluation Model in a  
Cross-Layer Simulator

下沢 亮太郎

指導教員 設楽 勇

東京都立産業技術高等専門学校

# 目次

1. はじめに	1
2. 提案するクロスレイヤシミュレータ	2
2.1. 提案シミュレータの概要	
2.2. 課題	
3. 無線 LAN 通信モデル	3
3.1. CSMA/CA 方式	
3.2. 2 進数バックオフ方式	
3.3. IFS による優先制御	
3.4. フレーム構成モデル化	
3.5. MCS Index	
3.6. マルチレート (複数の伝送レート) をサポート	
4. 実装	10
4.1. 動作環境	
4.2. フローチャート	
4.3. User クラスの設計	
4.4. シミュレーション条件例	
4.5. シミュレーション補助ツール	
5. シミュレーション諸元	14
5.1. シミュレーション 1	
5.2. シミュレーション 2	
6. 結果	16
6.1. シミュレーション 1	
6.2. シミュレーション 2	
7. 考察	18
7.1. シミュレーション 1	
7.2. シミュレーション 2	
8. おわりに	19
9. 今後の課題	20
参考文献	21

## 1. はじめに

近年、無線通信端末の利用者が急増し、多様な場所で無線通信システムが活用されており今後も利用の拡大と機能の高度化が見込まれる。一方で、無線通信技術の進歩に伴いシステム自体はますます高機能化・複雑化している。

これまでの研究開発の現場では物理層、MAC 層、ネットワーク層といった各レイヤごとに評価検討が行われてきた。しかし、無線 LAN(Local Area Network) システムの高機能化・複雑化に伴い、単一レイヤのみ性能が高くなったとしても他レイヤの性能がボトルネックとなる問題が見られるようになった。一例として、IEEE 802.11ac[1] では、MU-MIMO(Multi User Multiple Input Multiple Output) と呼ばれる高速化技術が使用されているが、端末数が増加すると通常の MIMO が有効となるケースもある。また、通信効率の観点から見ると MU-MIMO に比べて通常の MIMO の方が遥かに高効率である [4]。この例のように、単一レイヤのみの性能向上では通信全体の性能を向上・評価できない場合がある。したがって、物理層から上位層まで考慮したクロスレイヤシミュレータの開発が求められている。

本研究では、無線通信全体の品質を総合的に評価するために、実環境の電波伝搬特性を考慮した物理層と MAC(Medium Access Control) 層が連携したシミュレータの開発の一環として、IEEE 802.11 規格 [1] に基づく CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, 衝突回避機能付きキャリア感知多重アクセス) 方式を用いた MAC 層の動作に則った無線 LAN モデルを開発し、その精度を評価することを目指す。

## 2. 提案するクロスレイヤシミュレータ

### 2.1. 提案シミュレータの概要

本研究では電波伝搬特性を考慮した物理層シミュレータと連携して、MAC 層の動作を評価するクロスレイヤシミュレータを提案する。本シミュレータでは物理層シミュレータから受信感度に応じてチャンネルの伝送レートを受け取り、その値に基づいてプロトコルの評価を行う。

### 2.2. 課題

クロスレイヤ評価を行うためには様々な課題がある。図 1 に課題の概要を示す。まず、現実環境に即したクロスレイヤ評価方法として実機実験によるフィールド評価がある。実機実験は無線デバイス等で実際に通信するため、物理層からアプリケーション層までを考慮することができるため、現実環境による評価ができるメリットがある。しかし、実機による実験は時間的制約、人的リソースおよび無線デバイスの開発費用など実験に莫大な費用と手間がかかるのが大きな問題である。また、伝搬実験のみを実際に行う場合でも、フィールド試験を行うには多くの時間と労力が必要である。また、上位層との連携評価が難しいことも課題として残っている。以上のことから実機実験を伴わない計算機上での評価方法の確立が今後必要となっている [5]。



図 1: クロスレイヤシミュレータの課題

### 3. 無線 LAN 通信モデル

#### 3.1. CSMA/CA 方式

IEEE 802.11 無線 LAN(802.11 無線 LAN) では、アクセス制御方式として CSMA/CA が採用されている。802.11 無線 LAN の基本アクセス手順とされている自律分散制御 (DCF : Distributed Coordination Function) では、各局がチャンネルの使用状況を検査して自律的にパケット (フレーム) の送信タイミングを決定するが、その時のアクセス制御プロトコルとして CSMA/CA を使用している。図 3 に CSMA/CA の概要、図 2 に DCF の概要を示す。

フレームを送信していない無線局は、電波を送信していないため、Carrier(搬送波) の使用状況を Sense(検出) し、一定時間未使用 (Idle) であれば、Carrier を誰も使用していないと判断し、各端末がバックオフ時間としてランダムなスロット数を生成し、その時間だけ待った後に再度 CS を行い、チャンネルが Idle であれば送信を開始する。再度 CS を行った結果、無線チャンネルが使用中 (Busy) であれば、フレームを送信できるまでバックオフ時間を待ち越す。複数の端末が同じスロット数となった場合には送信タイミングが同時になり、衝突が発生するため再送制御が必要となる。

また、無線通信では CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) のように衝突を直接検知できないため、送信したフレームに対して ACK(ACKnowledgment) フレームを受信することで、フレームが正常に受信されたかを確認する。ACK フレームを受信できなかった場合、フレームは正常に受信されなかったと判断し、再送処理を行う。

このため、たとえ周辺に同一チャンネルを利用する無線セルが存在したとしても CSMA/CA により、無線セル間で同一チャンネルを共有して通信できる。ただし、CSMA/CA では、偶然同時にフレームを送信してしまう可能性、すなわちフレーム同士が無線上で衝突してしまう可能性がある。衝突によって、フレームが正常に受信されなかった場合、パケットは再送されるが、バックオフ時間の増加がオーバーヘッドの増加に繋がり、スループットが低下する。

CSMA/CA では、フレームの送信を試みようとするそれぞれの無線局が事前にキャリアセンス (CS : Carrier Sense) を行い無線チャンネルの使用状況を確認し、他の無線局による送信が行われている間、送信を見合わせる (送信待機) ことによって、衝突を可能な限り回避する。図 4 にキャリアセンスレベルの概要を示す。無線 LAN においてキャリアセンスレベルは-62 dBm と規定されており、キャリア・センス・エリア内からの-62 dBm 以上の受信電力レベル (干渉源 1) を検出した場合はチャンネルが使用中 (Busy) と判断し、送信を待機する。一方で-62 dBm 未満の受信電力レベルが (干渉源 2) 検出された場合はチャンネルが未使用 (Idle) と判断し、送信を開始する。

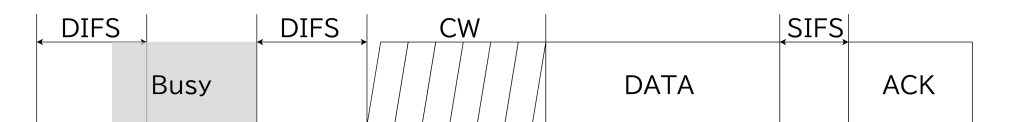
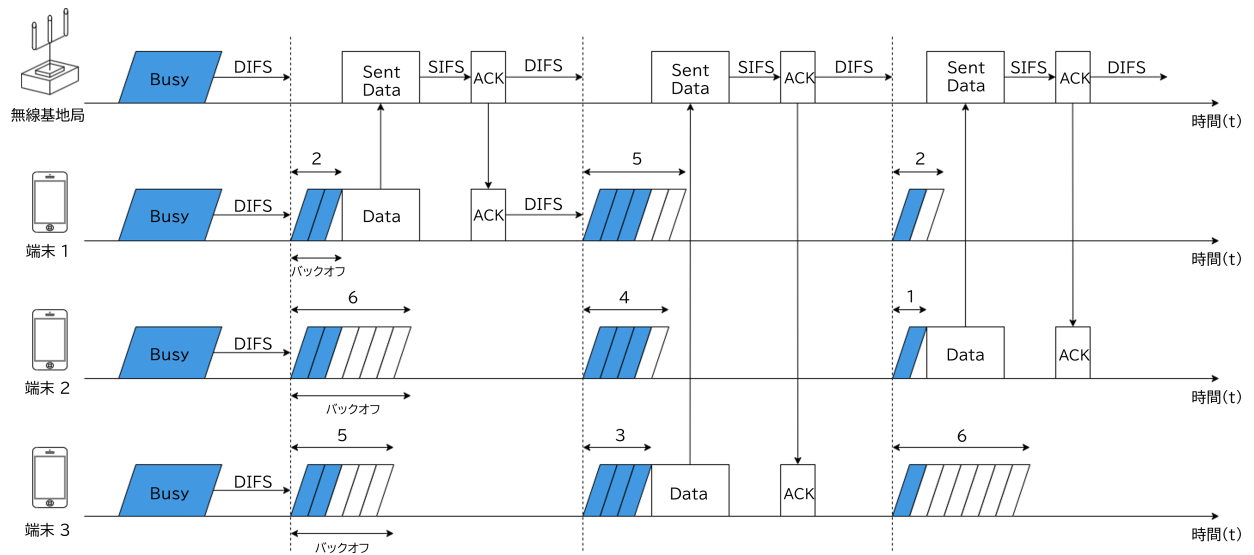
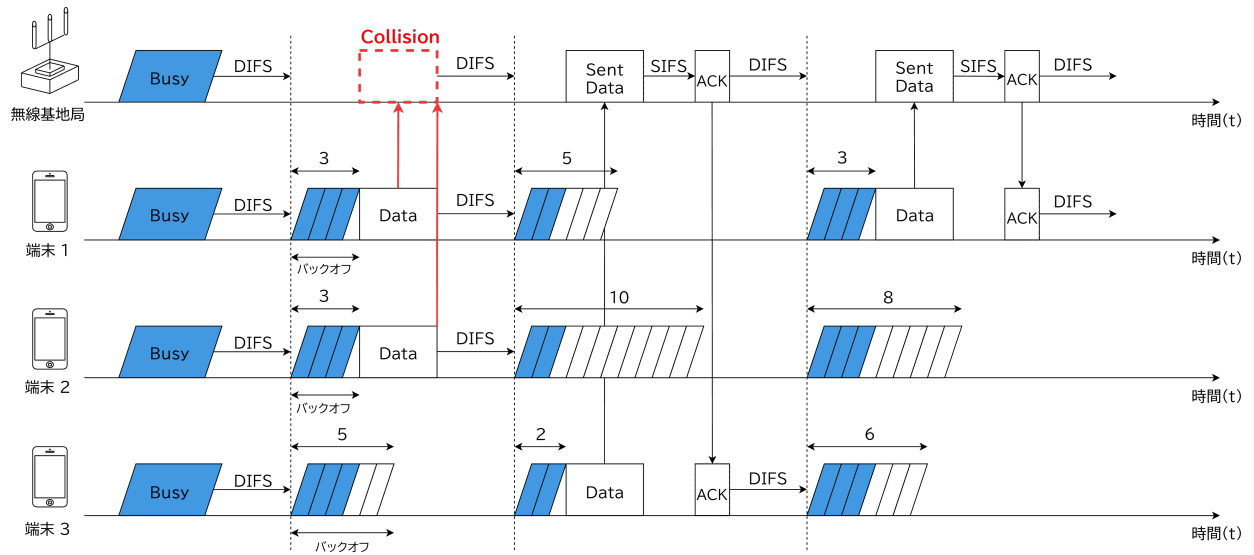


図 2: DCF



(a) CSMA/CA 成功例



(b) CSMA/CA 衝突例

図 3: CSMA/CA の概要

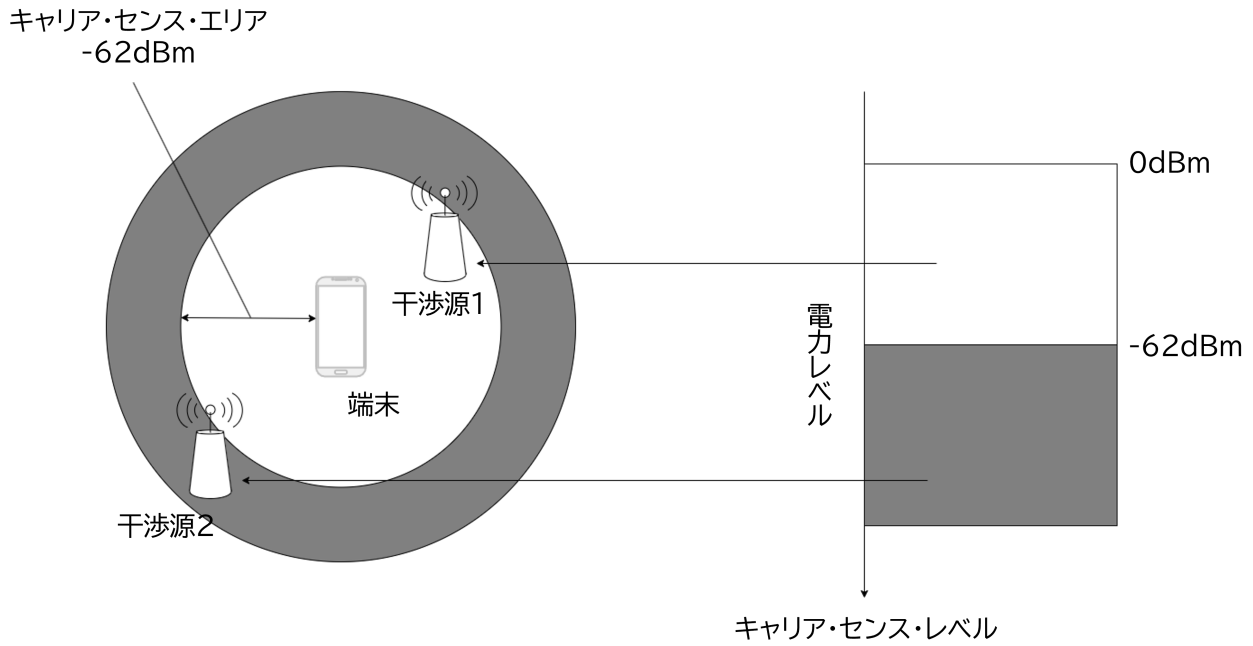


図 4: キャリアセンスレベル [2]

### 3.2. 2 進数バックオフ方式

無線 LAN システムでは 2 進数バックオフ方式を採用している。バックオフ制御では、チャンネルが一定時間 Idle であれば、フレームを送信しようとする無線局は、規定の Contention Window(CW) 範囲内で乱数を発生させ、その乱数値を元にしたランダム時間 (バックオフ時間) が決められる。概要を図 5 に示す。

CW サイズは、最小値 ( $CW_{\min}$ ) を 15 とし、最大値の上限 ( $CW_{\max}$ ) を 1023 スロットとして衝突回数の増加に従いスロット数  $s$  は

$$CW_{\max} = 2^{4+n} - 1 \quad (1)$$

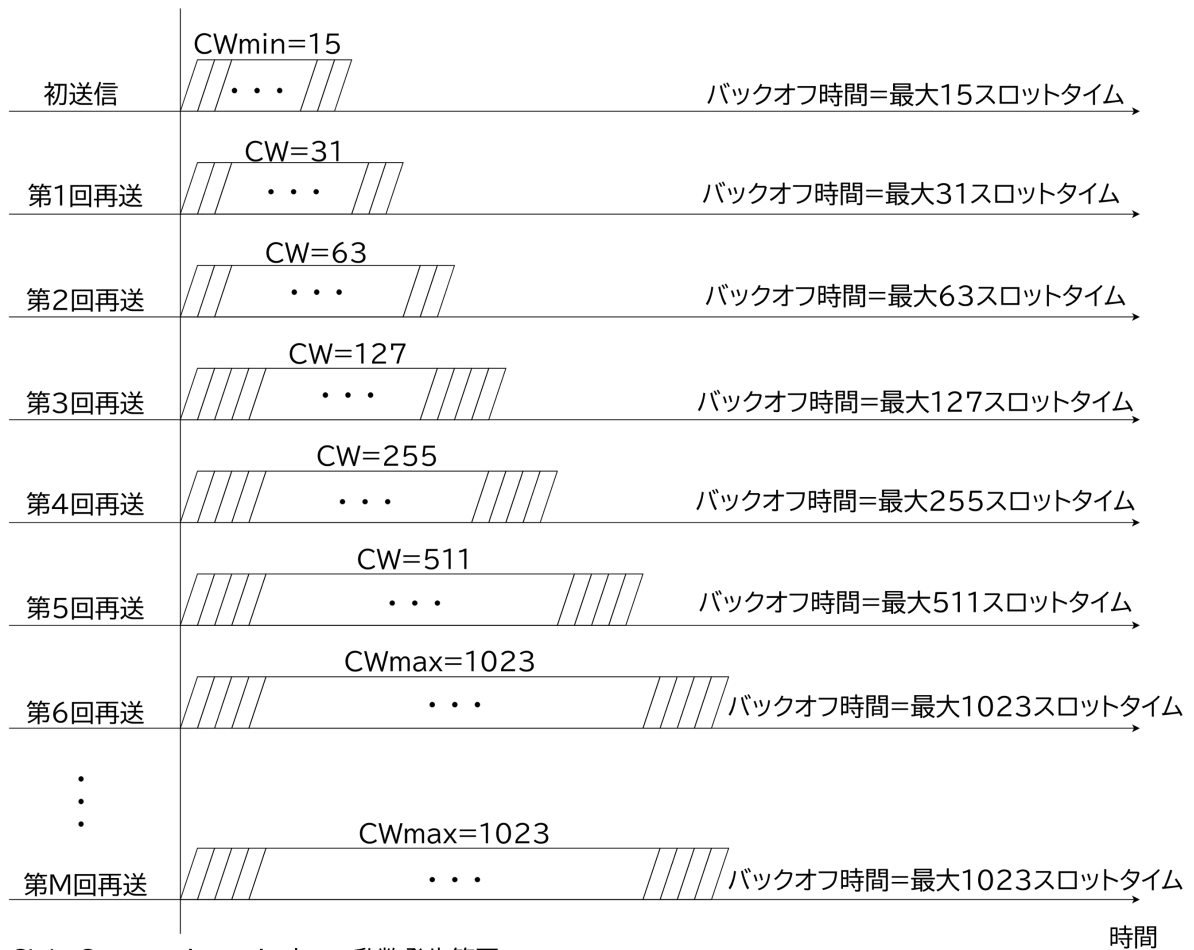
$$s = \text{randint}(0, \min(CW_{\max}, 1023)) \quad (2)$$

で求められる。ここで、 $n$  は再送回数、 $CW_{\max}$  は CW サイズの最大値である。

再送を繰り返し、 $CW_{\max}$  に達したときはあらかじめパラメータで決められた最大再送回数  $M$  回となるまで CW サイズは  $CW_{\max}$  のままで再送を繰り返し、 $M$  回を超えると送信失敗となり、フレームが破棄される。

衝突が発生するたびに CW サイズの最大値は 2 倍に増加するため、再送回数が増えるほどバックオフ時間が長くなることで他端末と同じ CW サイズを生成することがなくなり、衝突確率を低減することができる。一方で、2 進数バックオフ方式では CW サイズの増加がオーバーヘッドを引き起こし、スループットの低下につながる。

本シミュレータでは、端末単位でスロット数と再送回数  $n$  を保持することで、各端末が送信を試みる際の待機時間を動的に設定する処理を実装した。



CW : Contention window, 乱数発生範囲  
 CWmin : CWの最小  
 Cwmax : CWの最大

図 5: 2 進数バックオフ方式



### 3.3. IFS による優先制御

フレーム間には IFS(Inter Frame Space) と呼ばれる待機時間が設定されている。IFS の長さは 6 種類存在し、代表的なものに DIFS(Distributed Inter Frame Space) と SIFS(Short Inter Frame Space) がある。これらは、フレームの優先順位に基づいてどの IFS を選択するかが決定される。

DIFS はデータフレーム送信時に適用される IFS であり、端末は送信開始前に DIFS 時間 ( $34\mu\text{s}$ ) 待機してからデータフレームを送信する。一方、ACK フレームのように失敗すると再送制御が必要となる優先度の高い制御フレームは、DIFS 時間待つと他端末のデータフレームと競合する可能性があるため、より短い SIFS 時間 ( $16\mu\text{s}$ ) を用いることで優先的に送信するように設定されている。

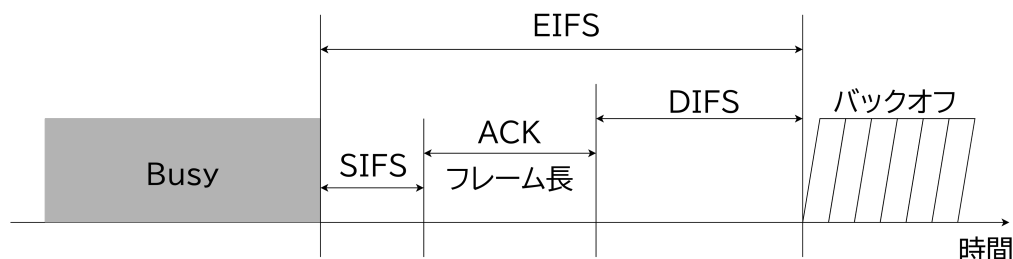


図 6: EIFS の送出信号間の間隔

### 3.4. フレーム構成モデル化

本研究では、MAC 層に着目した無線 LAN 通信の挙動を評価するため、UDP(User Datagram Protocol) レベルのフレーム構成をモデル化し、図 7 にその構成図を示す。

無線 LAN フレームには PLCP(Physical Layer Convergence Protocol) プリアンブルや MAC ヘッダ、FCS(Frame Check Sequence) に加え、LLC(Logical Link Control) ヘッダや IP ヘッダなども含まれるが、シミュレーションの都合上省略し、モデル化した。

無線 LAN 通信では、データ送受信時に PLCP(Physical Layer Convergence Protocol) プリアンブルや MAC ヘッダ、FCS(Frame Check Sequence) などの制御情報のオーバーヘッドに加え、ACK フレームの送信や CSMA/CA 特有の DIFS・SIFS などのフレーム間隔、バックオフ動作も必要となる。

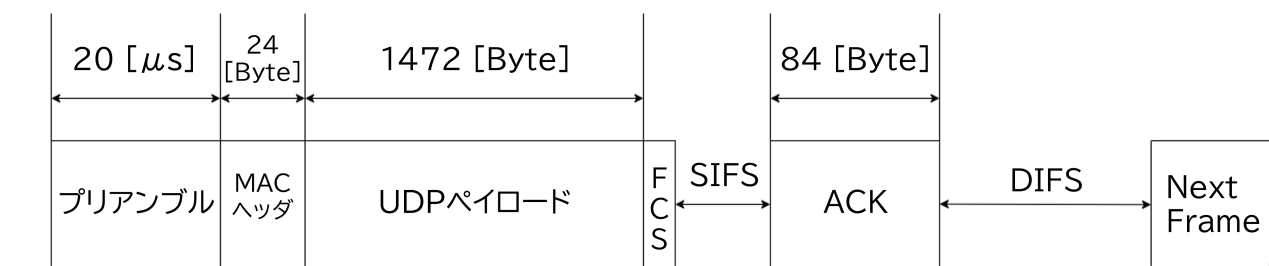


図 7: フレーム構成図

### 3.5. MCS Index

MCS(Modulation and Coding Scheme) Index は、変調方式と符号化率の組み合わせを示す指標である。IEEE 802.11 規格では、環境に応じて適応的に変更可能な MCS インデックスが定義されており、これにより通信の信頼性と伝送速度の最適化を図ることが可能である。MCS インデックスは 0 から最大値 (規格により異なる) まで定義され、値が大きくなるほど高次の変調方式 (QPSK, 16QAM, 64QAM 等) と高符号化率が採用される。これにより理論上の伝送速度は向上するが、必要とされる信号対雑音比 (SNR : Signal-Noise Ratio) も増加する。実際の通信では、受信電力レベルや干渉状況に基づいて適切な MCS インデックスを選択することで、安定した通信品質を確保することが重要となる。

表 1 に MCS INDEX の例を示す。本シミュレータでは、実際の通信環境をより現実的に模擬するために同様の MCS インデックスを定義し、RSSI (Received Signal Strength Indicator) から決定された伝送レートを受け取る。

表 1: IEEE 802.11a/g の MCS インデックスと要求 RSSI

IEEE 802.11a				IEEE 802.11g		
変調方式	符号化率	レート (Mbps)	RSSI (dBm)	変調方式	レート (Mbps)	RSSI (dBm)
BPSK	1/2	6	-82	DBPSK/CCK	1	-94
BPSK	3/4	9	-81	DQPSK/CCK	2	-91
QPSK	1/2	12	-79	CCK	5.5	-89
QPSK	3/4	18	-77	CCK	11	-85
16-QAM	1/2	24	-74	BPSK-OFDM	6	-82
16-QAM	3/4	36	-70	QPSK-OFDM	12	-79
64-QAM	2/3	48	-66	16QAM-OFDM	24	-74
64-QAM	3/4	54	-65	64QAM-OFDM	54	-65

### 3.6. マルチレート (複数の伝送レート) をサポート

802.11 無線 LAN では、無線局が複数の伝送レートをサポートすることが可能。例として 802.11b では、11, 5.5, 2, 1 Mbps の 4 つ、802.11a では 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9, 6 Mbps の 8 つ (54, 48, 36, 18, 9Mbps はオプション) の伝送レートが規定されている。

伝送レートが低いほど長距離の通信を行うことができるので、図 8 に示すように、基地局は自局近傍の端末とは高い伝送レートで通信を行い、遠くの端末とは低いレートに切り替えて通信を行うと、広いエリアで効率的に通信を行うことができる。なお、適切な伝送レートを選択するアルゴリズムについては、802.11 で規定されていないため、無線 LAN ベンダが独自に実装する必要がある。

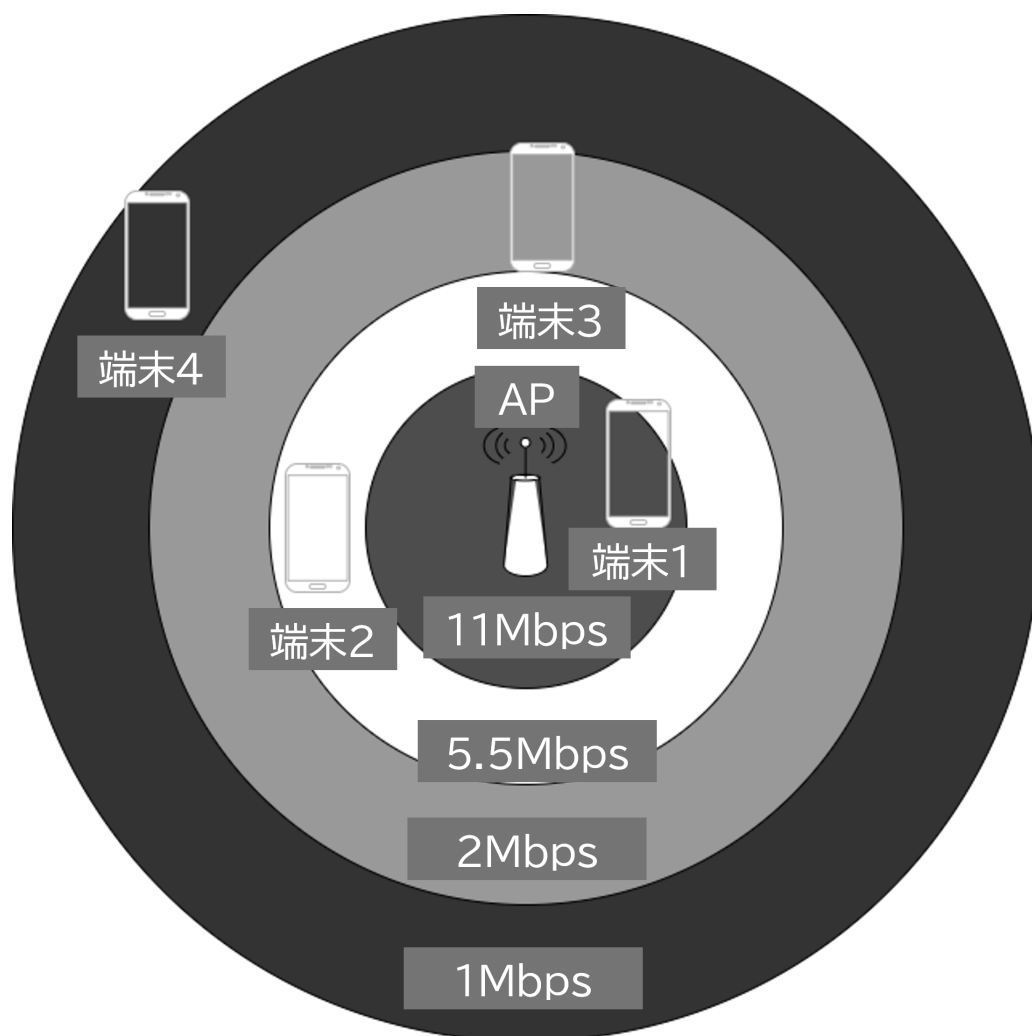


図 8: 複数の伝送速度が可能なマルチレート通信環境 (802.11b の例)

## 4. 実装

本研究では、CSMA/CA 方式を用いた無線 LAN を再現するために、Python を用いてシミュレータを作成した。シミュレータには、各端末を管理する端末クラスを導入し、端末ごとの CW サイズや再送回数の管理、バックオフ時間を決定するためのスロット数の管理、再送処理などの機能を実装している。

また、シミュレータ本体は標準ライブラリである `random` のみに依存するように設計した。これにより、バージョン差異による影響を受けにくい後方互換性のあるシミュレータを実現した。

### 4.1. 動作環境

表 2 に本シミュレータの動作環境と使用ライブラリを示す。

表 2: 動作環境と使用ライブラリ

カテゴリ	項目	バージョン
Language	Python	3.10.12
		3.11.11
ライブラリ	random	
OS	Ubuntu	22.04 LTS
	Debian	12

### 4.2. フローチャート

図 9 に本シミュレータのフローチャートを示す。

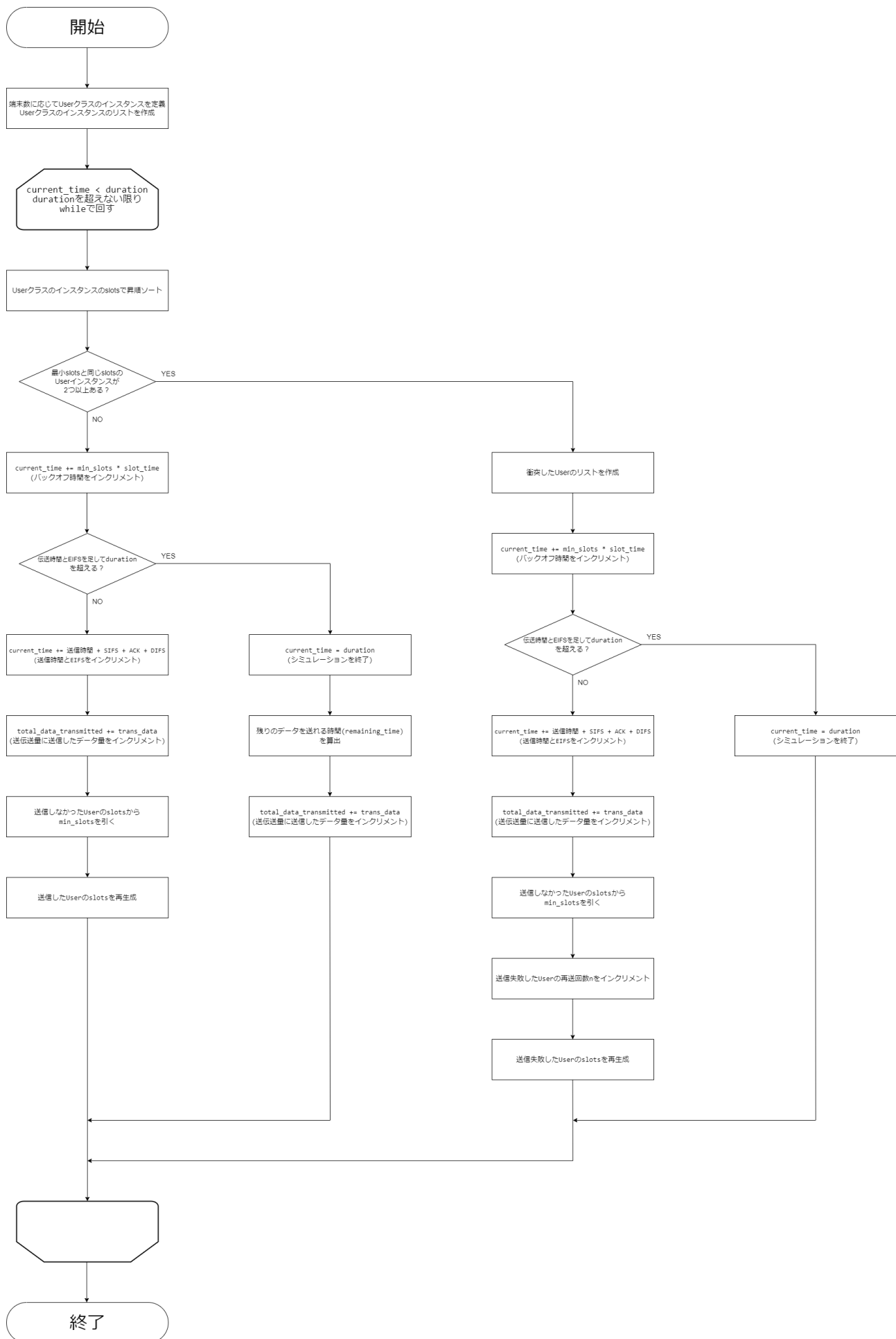


図 9: フローチャート

### 4.3. User クラスの設計

本研究のシミュレータ実装では、各端末を **User** クラスとして定義し、端末ごとの CW や再送回数などを管理している。表 3 に主なメンバ変数と役割をまとめる。

各端末を端末クラスのインスタンスとして定義することで、個別のバックオフ制御を実現している。新しいプロトコルや機能を追加する際にも、**User** クラスを継承することで容易に拡張できるように設計した。

表 3: User クラスのメンバ変数とメソッドの一覧

名称	概要
メンバ変数	
id	端末を識別するための ID
num_re_trans	再送回数
slots	スロット数
num_transmitted	送信成功回数
data_transmitted	送信したデータ量 [bit]
主なメソッド	
calc_slots()	(2) 式に従い slots を決定
re_transmit()	再送処理
reset_slots()	新たに slots を割り当てる

### 4.4. シミュレーション条件例

表 4 に、本研究で用いたシミュレーション条件を示す。モードを選択することでそれぞれの無線 LAN 規格 (IEEE 802.11a/b/g) に対応できるように設計した。

また、各モードに対応するパラメータはシミュレータプログラム内の辞書型で管理されているため、新しい規格やパラメータを追加する際には辞書型に追加することで容易に対応できるように設計した。

表 4: シミュレーション条件の例

パラメータ	値・例
シミュレーション時間	60 s
モード	a
スロット時間 (802.11a)	9 $\mu$ s
DIFS (802.11a)	34 $\mu$ s
SIFS (802.11a)	16 $\mu$ s
伝送レート	24 Mbps
端末数	80 台

## 4.5. シミュレーション補助ツール

同条件でのシミュレーションを繰り返し行うための補助ツールを Python で作成した。このツールは、シミュレーションのパラメータを設定し、指定回数のシミュレーションを自動で実行することができる。シミュレーション結果は CSV ファイルとして出力され、様々なツールで容易に解析を行えるようにした。

threading や multiprocessing を用いて並列処理を行うことで、複数のシミュレーションを同時に実行することが可能である。これにより、複数のシミュレーションを同時に実行することで、シミュレーションの実行時間を短縮することができる。

また、tqdm を用いて進捗状況を表示することで、図 10 のようにシミュレーションの進行状況をリアルタイムで確認することができる。

表 5 に本ツールの動作環境と使用ライブラリを示す。

表 5: 動作環境と使用ライブラリ

カテゴリ	項目	バージョン
Language	Python	3.10.12
		3.11.11
ライブラリ	numpy	2.1.3
	pandas	2.2.3
	tqdm	4.67.1
	threading	
	multiprocessing	
	queue	
OS	Ubuntu	22.04 LTS
	Debian	12

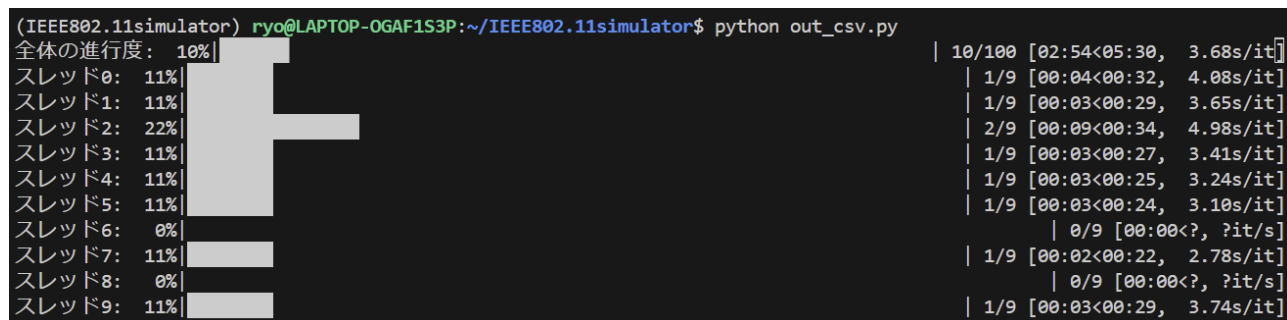


図 10: tqdm による進捗表示

## 5. シミュレーション諸元

図 11 に本シミュレーションのトポロジーを、表 6 に本シミュレータの諸元を示す．今回のシミュレーションではプロトコルのみを評価するために全ての端末を見通し内として電力を加味せず，同一の伝送レートとして扱った．

表 6: シミュレーション諸元

対応規格	IEEE 802.11a/b/g
周波数	a 5.2 GHz b/g 2.4 GHz
ガードインターバル	800 ns
端末台数	1 ～ 80 台

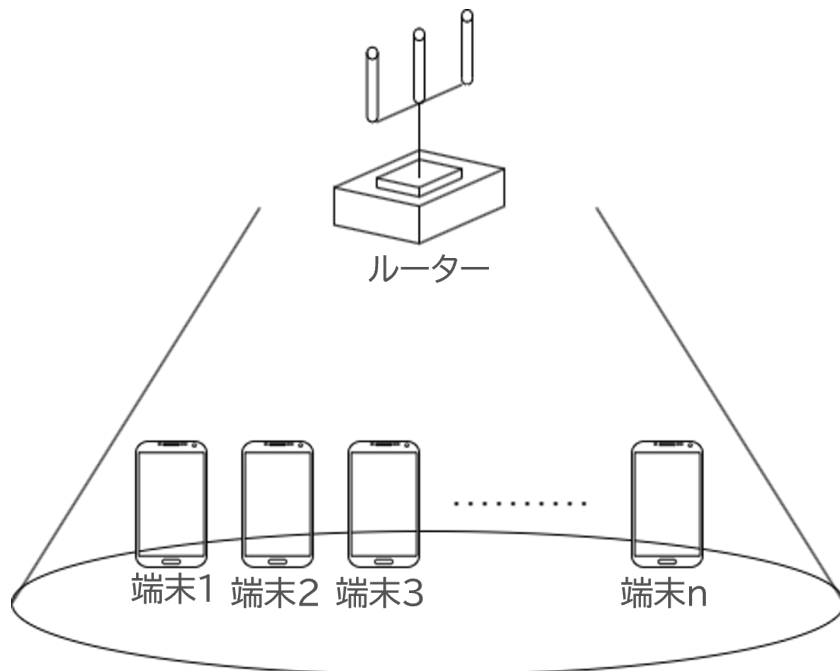


図 11: 本シミュレーションのトポロジー



## 5.1. シミュレーション 1

今回作成したシミュレータの精度を確認するために、端末数を 1 台から 80 台まで 10 台ずつ変化させ、試行回数 1000 回としてシミュレーションを行い、理論値 [3] との比較を行った。

以下に本シミュレーションのパラメータを示す。

表 7: シミュレーション 1 パラメータ

パラメータ	値・例
シミュレーション時間	60 s
モード	a
スロット時間 (802.11a)	9 $\mu$ s
DIFS (802.11a)	34 $\mu$ s
SIFS (802.11a)	16 $\mu$ s
伝送レート	24 Mbps
端末数	1~80 台

## 5.2. シミュレーション 2

MCS Index で定義されている IEEE 802.11a に対応する全ての伝送レートに対して、端末数を 1 台から 80 台まで 10 台ずつ変化させ、試行回数 1000 回としてシミュレーションを行い、24 Mbps の場合と同様の傾向を示すか確認を行った。

以下に本シミュレーションのパラメータを示す。

表 8: シミュレーション 2 パラメータ

パラメータ	値・例
シミュレーション時間	60 s
モード	a
スロット時間 (802.11a)	9 $\mu$ s
DIFS (802.11a)	34 $\mu$ s
SIFS (802.11a)	16 $\mu$ s
伝送レート	6~54 Mbps
端末数	1~80 台

## 6. 結果

### 6.1. シミュレーション 1

横軸を端末数、縦軸をスループットとした 1~80 台まで 10 台ずつ試行回数 1000 回 24 Mbps 固定としてシミュレーションした結果の平均と理論値を図 12 に示す。

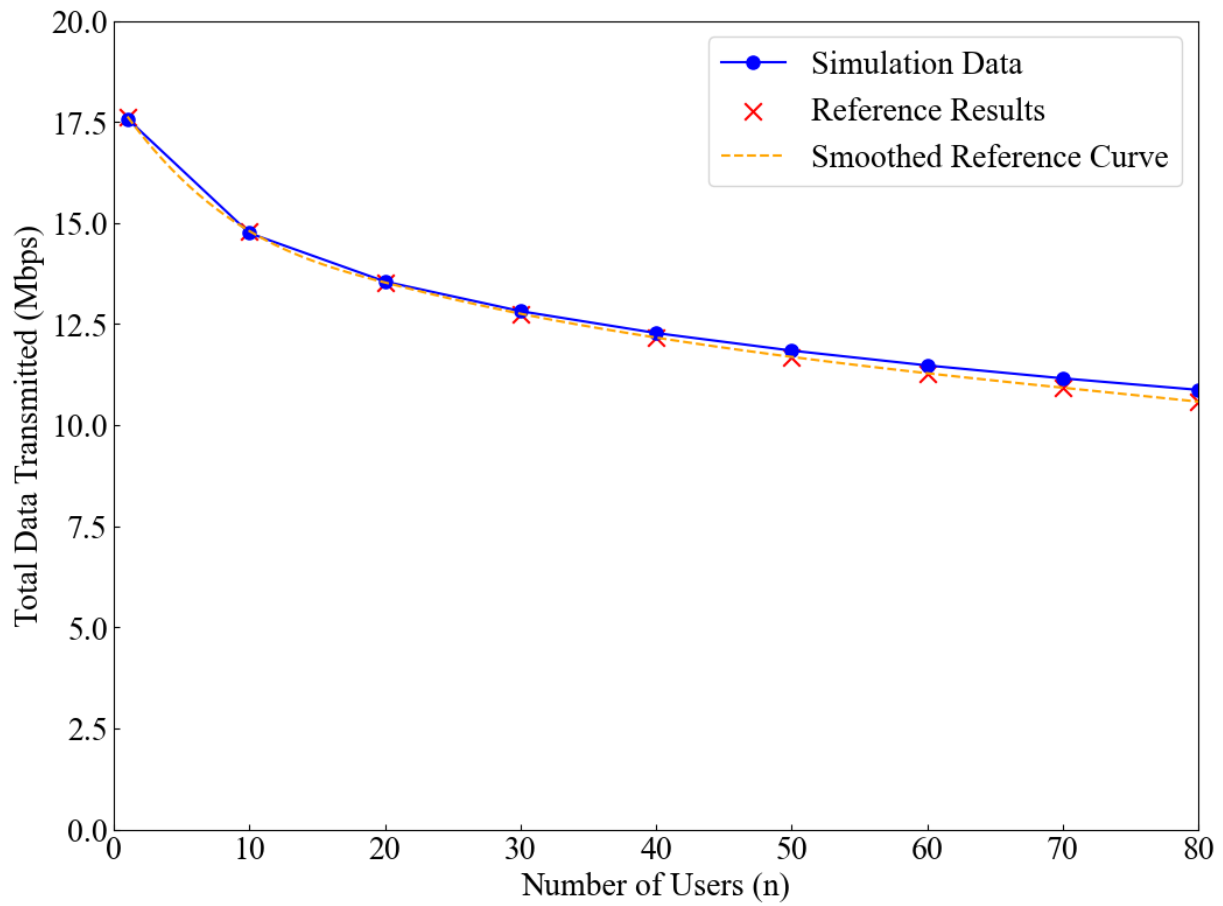


図 12: シミュレーション結果

## 6.2. シミュレーション 2

MCS Index で定義されている IEEE 802.11a に対応する全ての伝送レートで 1~80 台まで 10 台ずつ試行回数 1000 回としてシミュレーションした結果のを図 13 に示す.

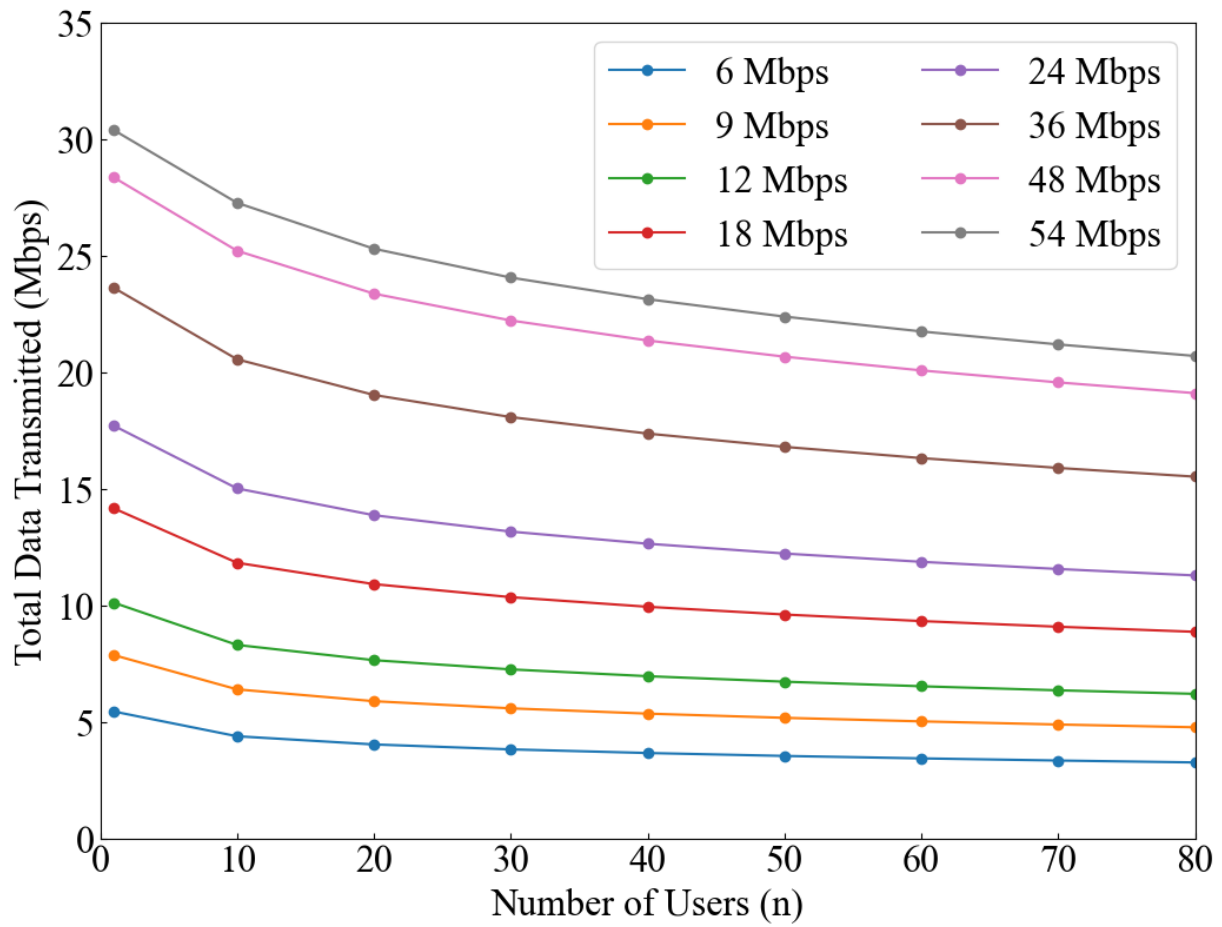


図 13: シミュレーション結果

## 7. 考察

### 7.1. シミュレーション 1

理論値との差が一番大きい端末数が 80 台の場合でも +2.75% 程度の誤差に収まっていることが確認できる。また、端末数が増加するにつれて理論値との差が徐々に拡大することに対しては、参考とした文献 [3] との IP(Internet Protocol) レベルと UDP レベルのプロトコル上の違いからくるペイロード長の差などモデル化方法の違いが影響していると考えられる。以上の結果から、本研究で構築した CSMA/CA ベースの無線 LAN モデルは、理論値に対して概ね一致し、最大でも誤差がおよそ 3% にとどまることが示された。

また、本シミュレータでは文献よりもより現実に近いモデルを使用しているため、より実際の通信環境に近い状況を再現することができていると考えられる。

### 7.2. シミュレーション 2

全ての伝送レートの場合で、24Mbps の場合と同様の傾向を示すことが確認できた。

## 8. おわりに

本研究では、クロスレイヤシミュレータにおける CSMA/CA を中心とした無線 LAN システムのモデル化とそのシミュレータを開発し、精度を検証した。

物理層シミュレータと組み合わせてクロスレイヤ評価するための無線 LAN シミュレータを開発することができた。また、開発したシミュレータでは理論値との差が最大で 2.75% の精度を実現できた。

## 9. 今後の課題

今後の課題としては、連続送信ではなくポアソン分布などに従った送信間隔を導入し、より実際の通信頻度に近い状況を再現することが挙げられる。さらに、端末ごとに伝送速度を変えられるようにすることや、各端末やアクセスポイントの位置情報を踏まえて受信時の SNR を考慮し、衝突時でもフレームの複合が可能となるキャプチャ効果を導入することで、より実環境に近い通信環境を再現することが挙げられる。

## 参考文献

- [1] IEEE 802.11 Standard for Local and Metropolitan Area Networks, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” IEEE Std. 802.11, Mar. 2012.
- [2] 守倉正博, 久保田周治, 『インプレス標準教科書シリーズ 改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書』, 株式会社インプレスコミュニケーションズ, 2016 年
- [3] Y. Morino, T. Hiraguri, H. Yoshino, K. Nishimori, T. Matsuda, “A Novel Collision Avoidance Scheme Using Optimized Contention Window in Dense Wireless LAN Environments\*” *IEICE TRANS. COMMUN.*, VOL.E99-B, NO.11 NOVEMBER 2016
- [4] 西森健太郎, 平栗健史, 『MIMO から Massive MIMO を用いた伝送技術とクロスレイヤ評価手法』, コロナ社, 2017 年.
- [5] 設樂勇, 平栗健史, 谷口諒太郎, 西森健太郎, 『レイトレースを用いた 3 次元クロスレイヤシミュレータの開発』, 社団法人 電子情報通信学会 信学技報