

目次

1. はじめに	1
2. 無線 LAN 通信モデル	2
2.1. CSMA/CA 方式	
2.2. 2 進数バックオフ方式	
2.3. IFS による優先制御	
2.4. フレーム構成モデル化	
2.5. MCS Index	
3. 実装	7
3.1. 動作環境	
3.2. フローチャート	
3.3. User クラスの設計	
3.4. シミュレーション条件例	
4. シミュレーション	10
4.1. シミュレーション 1	
4.2. シミュレーション 2	
5. 評価	11
6. まとめ	13
参考文献	14

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。

しかし、研究開発の現場では各レイヤごとに検討が行われており、単一レイヤのみの評価では通信システム全体の性能を十分に把握することができない。

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(Local Area Network) モデルを開発し、その精度を評価することを目指す。

2. 無線 LAN 通信モデル

2.1. CSMA/CA 方式

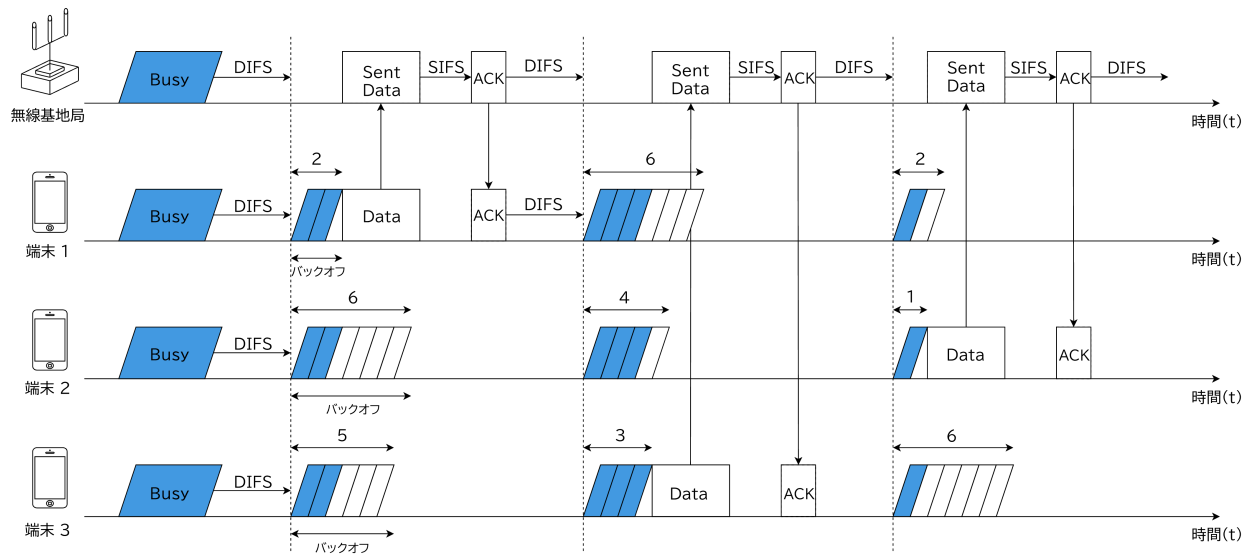
IEEE 802.11 無線 LAN(802.11 無線 LAN) では、アクセス制御方式として CSMA/CA が採用されている。図 1 に CSMA/CA の概要を示す。802.11 無線 LAN の基本アクセス手順とされている自律分散制御 (DCF : Distributed Coordination Function) では、各局がチャネルの使用状況を検査して自律的にパケット (フレーム) の送信タイミングを決定するが、その時のアクセス制御プロトコルとして CSMA/CA を使用している。

このため、たとえ周辺に同一チャ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衝突の発生する確率は無線局数と通信トラフィック (通信情報量) の増加につれて大きくなり、スループット (データの転送能力) の低下を招く。

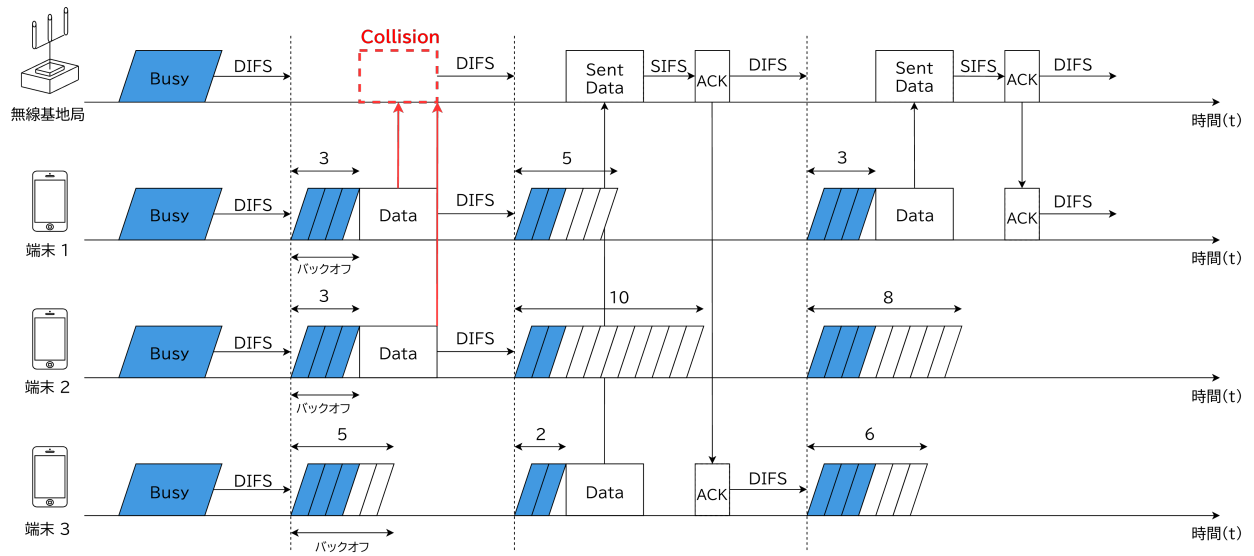
(これいる?) CSMA/CA では、フレームの送信を試みようとするそれぞれの無線局が事前にキャリアセンス (CS : Carrier Sense) を行い無線チャネルの使用状況を確認し、他の無線局による送信が行われている間、送信を見合わせる (送信待機) ことによって、衝突を可能な限り回避する。

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持ち越す。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。



(a) CSMA/CA 成功例



(b) CSMA/CA 衝突例

図 1: CSMA/CA の概要

2.2. 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 2 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 CW サイズは、再送回数を n とすると、CW サイズの最大値 CW_{\max} とスロット数 s は

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

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

で求められる。

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。

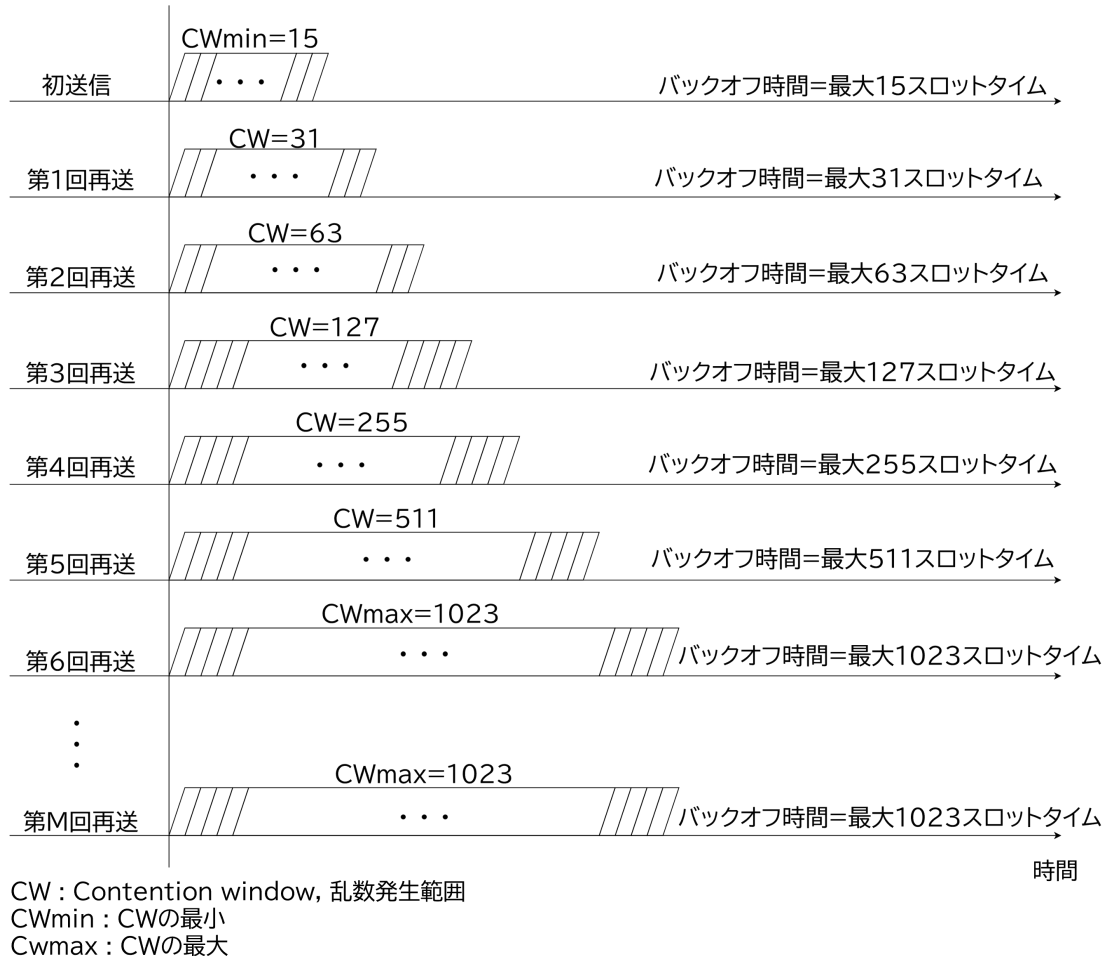


図 2: 2 進数バックオフ方式

2.3. 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。

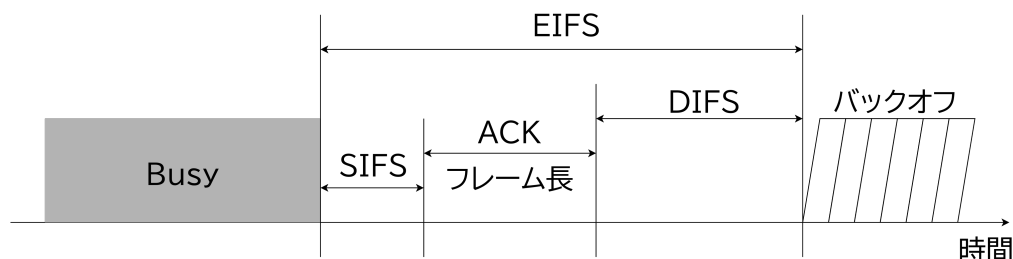


図 3: EIFS の送出信号間の間隔

2.4. 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 4 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 ヘッダー、FCS(Frame Check Sequence) に加え、LLC(Logical Link Control) ヘッダーや IP ヘッダーなども含まれるが、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 ヘッダー、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。

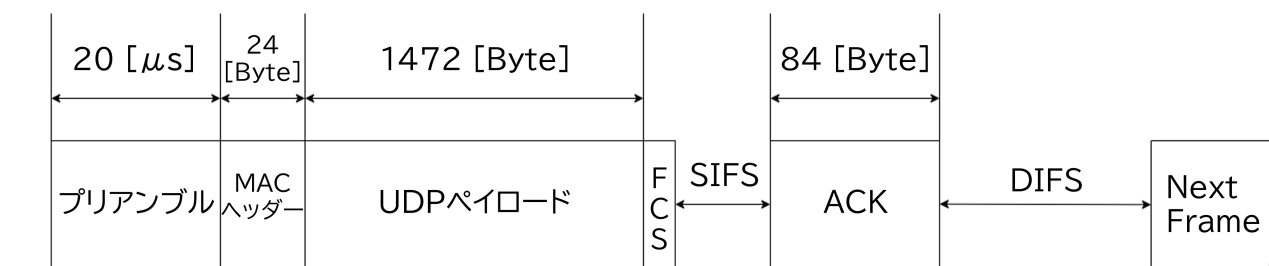


図 4: フレーム構成図

2.5. 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. 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。

3.1. 動作環境

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
OS	Ubuntu	22.04 LTS
	Debian	11 (Bullseye)
Python	Python	3.10.12
		3.11.11
ライブラリ	random	

3.2. フローチャート

図 5 に本シミュレータのフローチャートを示す。

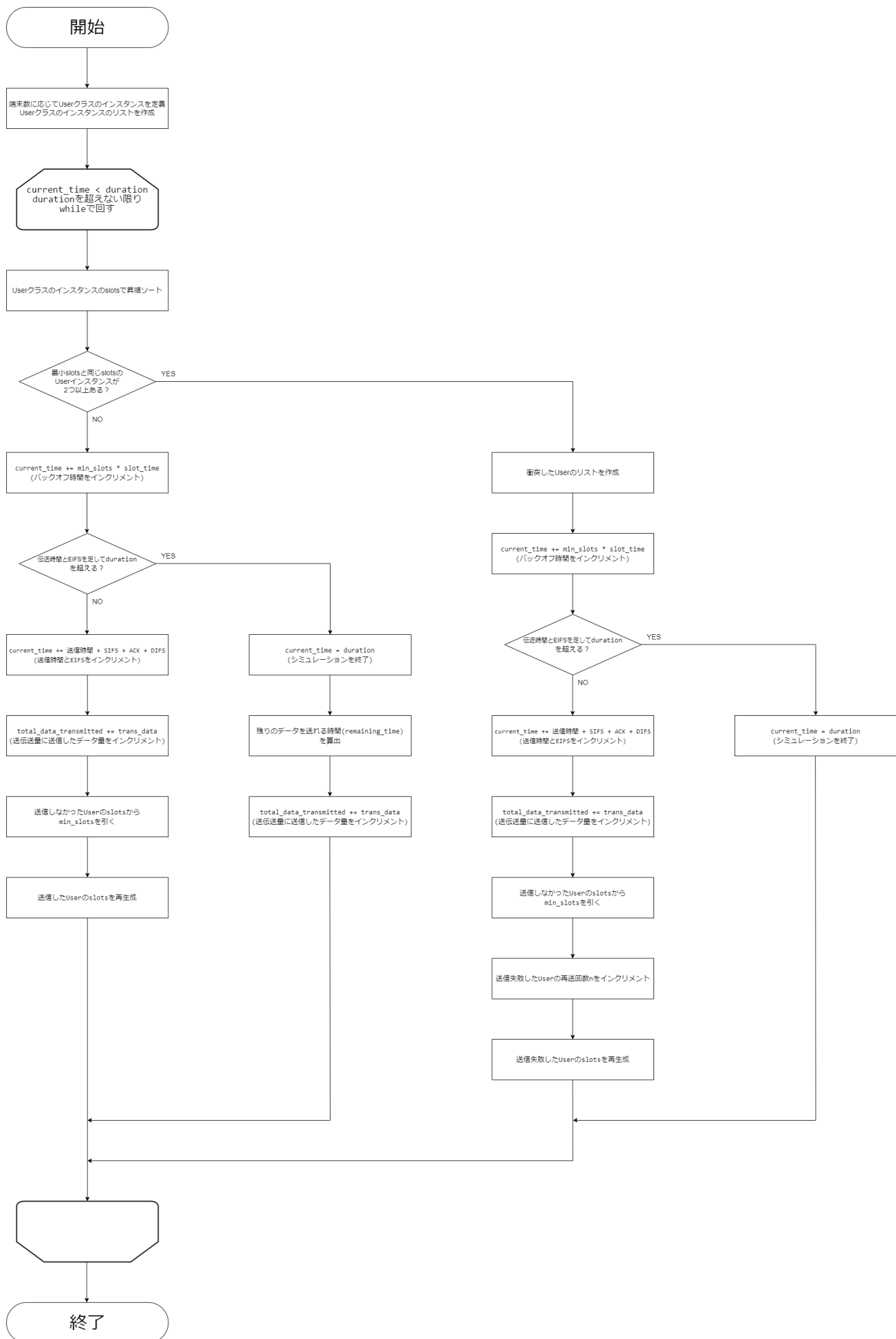


図 5: フローチャート

3.3. 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、

表 3: User クラスのメンバ変数とメソッドの一覧

名称	説明
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

3.4. 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。

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 μ s
DIFS (802.11a)	34 μ s
SIFS (802.11a)	16 μ s
伝送レート	24 Mbps
端末数	80 台

4. シミュレーション

4.1. 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、1000 回のシミュレーションを行った。

以下に本シミュレーションのパラメータと概要図を示す。

表 5: 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 μ s
DIFS (802.11a)	34 μ s
SIFS (802.11a)	16 μ s
伝送レート	24 Mbps
端末数	1~80 台

4.2. 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、1000 回のシミュレーションを行った。

以下に本シミュレーションのパラメータと概要図を示す。

表 6: 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 μ s
DIFS (802.11a)	34 μ s
SIFS (802.11a)	16 μ s
伝送レート	6~54 Mbps
端末数	1~80 台

5. 評価

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 1000 回シミュレーションした結果の平均と理論値を図 6 に示す。

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 [2] 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、最大でも誤差がおおよそ 3% にとどまることが示された。

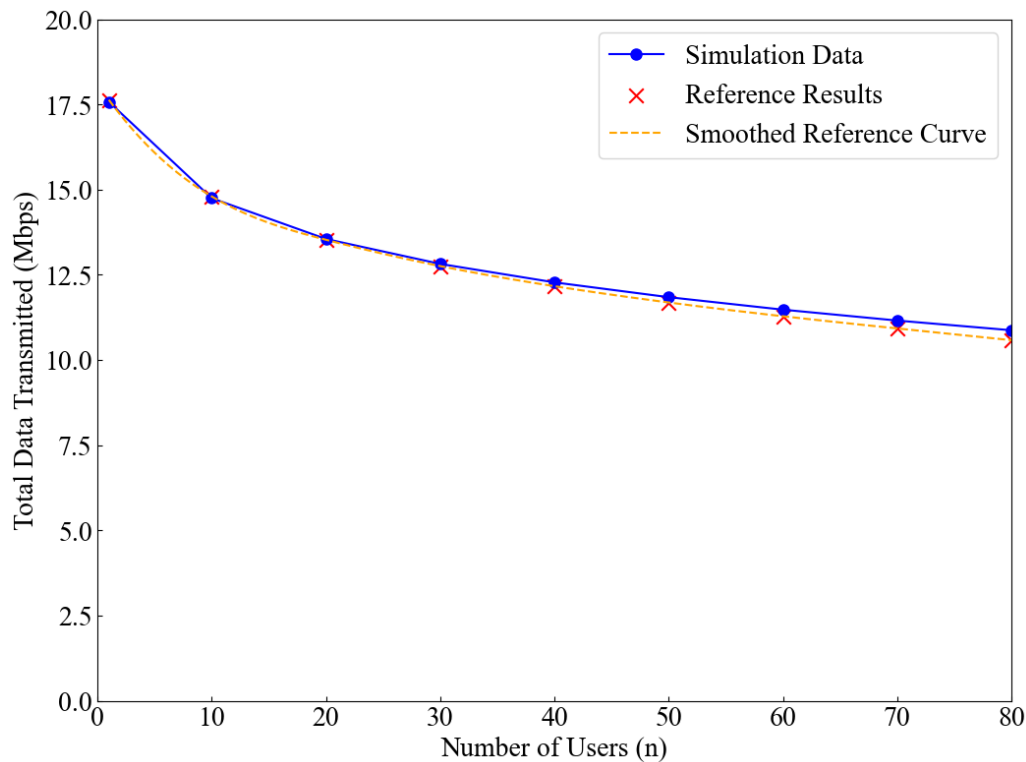


図 6: シミュレーション結果

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

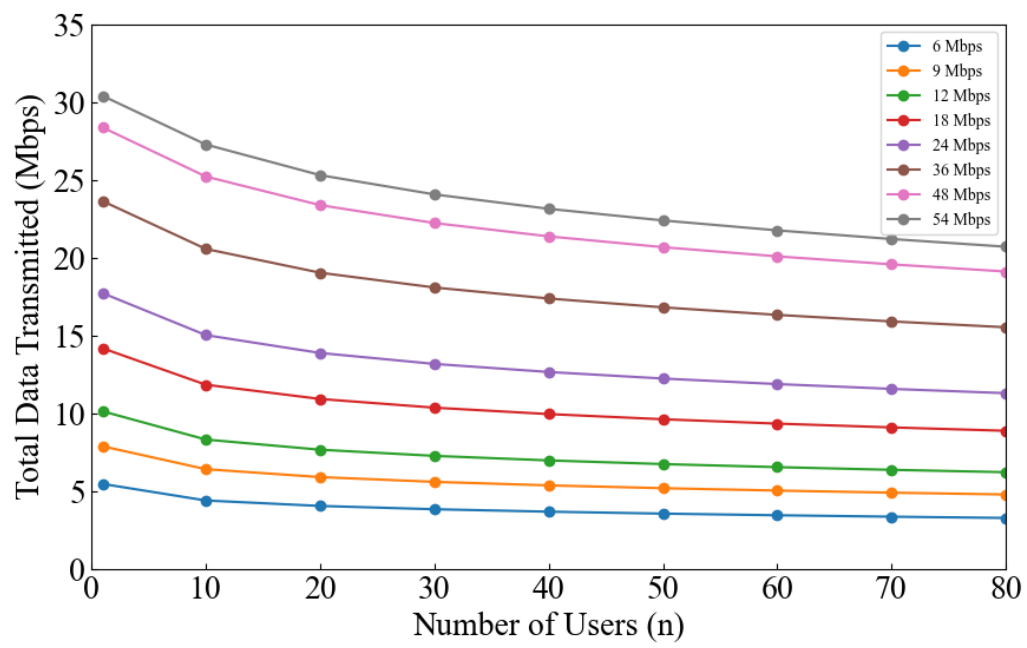


図 7: シミュレーション結果

6. まとめ

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。

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] 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
- [2] 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
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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