

千葉大学大学院融合理工学府  
修士論文

IEEE 802.11 DCF の双安定状態を解消する  
指数バックオフの検討

平成 31 年 3 月 提出

地球環境科学専攻  
都市環境システムコース

指導教員 : 塩田 茂雄

17WM1307

坪谷 大輝

# ABSTRACT

In a situation where many users use the wireless LAN (WLAN), the throughput of frame transmission may be unexpectedly affected. Therefore, it is necessary to grasp the throughput performance in detail. In the IEEE 802.11 DCF based WLAN, it has been confirmed that two stable states (bistable states) exist in the terminal group using the WLAN. The purpose of this study is to eliminate the bistable state. In the simulation for detailed analysis of the bistable states, it became clear that the exponential backoff which is the mechanism of the retransmission processing is the factor of the decrease of the throughput. As a result of changing factors of exponential backoff and evaluating each throughput, it was found that the bistable states can be eliminated by increasing the enlargement magnification of contention window (CW). In addition, not only in the saturated state in the bistable states but also in the general saturation state, the throughput was improved.

# 概要

多数のユーザが無線LANを利用する際には、フレーム衝突等による端末間の競合関係によりフレーム送信のスループットに予期せぬ影響を及ぼすことがある。このため、多数のユーザが無線LANを利用する際のスループット性能を詳細に把握しておく必要があると考えられる。これまでにIEEE 802.11 DCF ベースの無線 LAN において、無線 LAN を利用する端末群に二つの安定状態（双安定状態）が存在することが確かめられた。双安定状態の一方の安定状態は端末内部にごく少数の送信待ちフレームが存在する非飽和状態に対応し、他方は端末内部に送信待ちフレームが多数存在する飽和状態に対応する。飽和状態では非飽和状態よりもスループットが低下するため、飽和状態の発生を抑制し双安定状態を解消することを本研究の目的とする。双安定状態について詳細に分析するためのシミュレーションでは、フレーム衝突後の再送処理の仕組みである指数バックオフがスループット低下の要因であると明らかになった。このことから、指数バックオフのパラメータを変化させそれぞれのスループットを評価した結果、コンテンションウィンドウサイズを適切に拡大することで双安定状態を解消できることが分かった。また、このとき、双安定状態での飽和状態に限らずより全般の飽和状態でもスループットの向上が得られた。また、同様の効果をもたらす2段階バックオフを提案し、シミュレーションと理論解析モデルともにその性能を確認した。

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	論文構成	2
第 2 章	IEEE 802.11 無線 LAN	3
2.1	IEEE 802.11 諸規格	3
2.2	MAC 層機能	5
2.2.1	DCF	5
2.2.2	PCF	5
2.2.3	EDCA	6
2.2.4	HCCA	7
2.3	DCF の動作手順	8
2.3.1	IFS	8
2.3.2	DCF の動作手順例	9
2.3.3	指数バックオフ	11
第 3 章	双安定状態の性質	12
3.1	シミュレーション実験	12
3.1.1	シミュレーション状況	12
3.1.2	シミュレーション条件	13
3.1.3	初期バイアス	14
3.2	双安定状態の出現	15
3.2.1	非飽和状態と飽和状態	15
3.2.2	双安定状態	16
3.3	双安定状態の出現理由	18

第 4 章	指数バックオフの改良	19
4.1	指数バックオフの各要素検証	19
4.1.1	$CW_{min}$	20
4.1.2	拡大倍率	21
4.1.3	$CW_{max}$	22
4.1.4	最大再送回数	23
4.2	指数バックオフの最適な改良	24
4.2.1	$CW$ 拡大の状況	24
4.2.2	スループット向上の要因	24
4.3	2 段階バックオフの提案	26
4.3.1	2 段階バックオフの効果	26
4.3.2	2 段階バックオフの性質	28
第 5 章	理論解析モデルでの評価	31
5.1	IEEE 802.11 DCF の理論解析モデル	31
5.2	本研究の利用モデル	31
5.2.1	端末のマクロ状態表現	31
5.2.2	状態間の遷移率	32
5.3	理論解析結果	33
5.3.1	双安定状態	33
5.3.2	2 段階バックオフ	34
第 6 章	結論	35
	参考文献	36
	研究成果	38
	謝辞	39

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

インターネットと携帯端末の普及や訪日外国人観光客の増加などから，公衆無線 LAN の整備が進められている．その結果，狭いエリアに多数の無線 LAN が高密度で配置される状態が生じている[1]．今後もさらに無線 LAN のユーザとデータ通信量の増加が見込まれる．こうした多数の様々なユーザが同時に無線 LAN を利用する際には，フレーム衝突等による端末間の競合関係によりフレーム送信のスループットに予期せぬ影響を及ぼす可能性がある．そのため，多数のユーザが無線 LAN を利用する際のスループット性能を詳細に把握しておく必要があると考えられる．

### 1.2 研究目的

これまでに IEEE 802.11 DCF ベースの無線 LAN において，無線 LAN を利用する端末群に初期条件の違いによって二つの安定状態（双安定状態）が存在することが確かめられた[2]．双安定状態の一方の安定状態は端末内部にごく少数の送信待ちフレームが存在する非飽和状態に対応し，他方は端末内部に送信待ちフレームが多数存在する飽和状態に対応する．飽和状態では非飽和状態よりもスループットが低下するため，飽和状態の発生を抑止し双安定状態を解消すること，それによりスループットを向上させることを本研究の目的とする．

## 1.3 論文構成

### 第 1 章 序論

本研究の背景と目的について述べた.

### 第 2 章 IEEE 802.11 無線 LAN

IEEE 802.11 無線 LAN の各規格について概要を述べ, 本研究の対象である DCF について解説する.

### 第 3 章 双安定状態の性質

双安定状態の性質と出現理由について, シミュレーションの結果をもとに考察する.

### 第 4 章 指数バックオフの改良

指数バックオフの各要素を検証し, 双安定状態を解消しスループットを向上させる 2 段階バックオフを提案する.

### 第 5 章 理論解析モデルでの評価

双安定状態の出現と 2 段階バックオフの有効性を理論解析モデルで評価する.

### 第 6 章 結論

本研究をまとめ, 課題を述べる.

## 第2章

# IEEE 802.11 無線 LAN

## 2.1 IEEE 802.11 諸規格

IEEE 802.11 は、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer) のワーキンググループの一つであり、無線 LAN に関する規格を策定している。OSI 参照モデルでの、通信のデータ伝送レートや無線周波数帯域などに関する物理層 (PHY) と、データリンク層のうち通信の分散制御や集中制御を行う MAC 層におけるプロトコルを定めている。IEEE 802.11 規格の無線 LAN は無線でのインターネット通信で主流をなし、ほとんどの携帯端末に機能が搭載されている。ワーキンググループのなかにはタスクグループが設けられ、基本的に発足順によって a からアルファベットが振られている。規格名の末尾のアルファベットは策定したタスクグループ名のアルファベットである。本節では文献[3]をもとに代表的な IEEE 802.11 規格について概説する。

### IEEE 802.11 (オリジナル規格)

1997 年に策定された最初期の規格である。物理層では、2.4GHz 帯で周波数変調方式の違いによる 2 種と赤外線でのデータ伝送の合わせて 3 種が定められ、伝送レートは最大 2Mbps である。MAC 層で採用された CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, 衝突回避式搬送波感知多重アクセス) プロトコルは、現在も広く用いられている

### IEEE 802.11a

1999 年策定。物理層についての規格。802.11 オリジナル規格との互換性にとらわれないう最新規格を目指し、新たに 5GHz 帯を用い伝送レートは最大 54Mbps となった。

### IEEE 802.11b

1999 年策定。物理層についての規格。802.11 オリジナル規格との互換性を保ちながら、周波数変調方式を変更することで最大 11Mbps の伝送レートを実現した。実際の製品の登場は 802.11a よりも早く、無線 LAN 普及のきっかけとなった。



## IEEE 802.11g

2003年策定。802.11bとの互換性を保ちながら、802.11aと同種の変調方式を用いることで伝送レートを最大54Mbpsに高めた。802.11b端末が混在する環境では互換性保証のためスループットが大幅に低下する。

## IEEE 802.11n

2009年策定。802.11a/b/gで物理層における伝送レートが向上したことで、さらにユーザの体感速度を上げるためにMAC層の効率化が必要となった[4]。MAC層では、複数のフレームデータをひとつのフレームにまとめて伝送するA-MPDU (Aggregate MAC Protocol Data Unit)、A-MPSU (Aggregate MAC Service Unit)の追加が重要な変更点である。

物理層でも更なる伝送レート向上のため、複数の送受信アンテナを使用して同一時刻、同一周波数でデータを伝送するMIMO (Multiple Input Multiple Output) や、隣り合う周波数帯のチャンネルを束ねて利用するチャンネルボンディングなどの機能が追加された。伝送路4本のMIMOと2チャンネルボンディングを用いることで最大600Mbpsの伝送レートとなった。802.11a/gとの互換性を確保するため、2.4GHz帯と5GHz帯の両方をサポートする。

## IEEE 802.11ac

現在主流の802.11a/b/g/nの次世代規格として2013年に策定された。802.11nの機能を向上させ、最大8チャンネルのボンディング、伝送路8本のMIMO、さらに複数端末と同時に通信できるMU-MIMO (Multi User MIMO) が用いられる。周波数は5GHz帯で、最大伝送レートは6.93Gbpsである。現在、伝送レート6.93Gbpsを実現する製品は登場していない。

## IEEE 802.11e

前述の規格が主に伝送レートを向上させるためのものだったのに対し、802.11eは従来のMAC層機能を拡張しQoS (Quality of Service, サービス品質) に関する機能を追加するものである。2005年に策定されたこの規格により、フレームに優先順位をつけて送信することが可能となった。802.11eはMAC層に関する規格のため、802.11a/b/gなどの物理層規格と組み合わせて用いる[5]。

このほか、セキュリティ機能の拡張について定めたIEEE 802.11i、自動車環境での無線アクセスについて定めたIEEE 802.11pなどがある。

## 2.2 MAC 層機能

MAC (Medium Access Control, 媒体アクセス制御) は, ケーブルや電波などの通信媒体における送受信を円滑に行うための制御方法である. 本節では IEEE 802.11 無線 LAN の MAC 層機能のうち, 特にアクセス制御に関わるものについて概説する.

### 2.2.1 DCF

DCF (Distributed Coordination Function, 自律分散制御) は, 802.11 オリジナル規格で定められ以降の規格にも必須の機能となっている. DCF のベースとなるのが CSMA/CA である.

端末はフレーム送信前に無線チャネルの使用状況を確認 (キャリアセンス) する. 他端末の搬送波 (キャリア) を検知すればチャネルは使用中 (ビジー) と判断する. 搬送波を一定の DIFS (DCF Inter Frame Space) 時間にわたって検知できなければチャネルは未使用 (アイドル) と判断する. ビジー状態であればアイドル状態になるまでフレームの送信を延期する. アイドル状態であれば, 規定の *CW* (Contention Window) 範囲内からランダムに整数値を取り, この値をもとにバックオフ時間を設定し待機する. バックオフ時間が終了した端末からフレームを送信することができる. アイドル状態になってからランダムなバックオフ時間待機することで, 同時に送信を行いフレームが衝突してしまうことを避けている. フレームを送信した端末は送信先から ACK フレーム (ACKnowledgment frame, 確認応答フレーム) が返されることで送信成功を認識する. フレームの衝突が発生し送信に失敗した場合は, この ACK フレームが返されないため送信失敗を認識する. 送信に失敗した場合は, 再衝突の可能性を下げるため指数バックオフの仕組みに従って *CW* を拡大して再送処理を行う. 以上のバックオフアルゴリズムで用いられる *CW* の具体的な数値は 802.11 の規格ごとに定められている. DCF については次節で詳説する.

### 2.2.2 PCF

PCF (Point Coordination Function, 中央集中制御) は, 必須機能の DCF に対しオプションとして定められている. PCF ではポイント・コーディネーター (Point Coordinator) と呼ばれる端末が自分の無線領域下の端末を制御する. ポイント・コーディネーターは一般に基地局 (アクセスポイント) が行う.

基地局は送信権を付与する端末に問い合わせ (ポーリング) を行う. 端末は基地局と接続する際に PCF での通信を要請し, 基地局は要請のあった端末をポーリングリストに追加する. 基地局はポーリングリストに基づいて順にポーリングを行い, ポーリング

を受けた端末のみがフレームを送信することができる。したがって DCF で発生するようなフレームの同時送信はなく、衝突は発生しない。これにより送信負荷が高いときでも衝突を発生させずに確実にフレームを送信することができる。一方、一部の端末だけが送信を行いたい負荷の低いときでも、ポーリングが回ってくるまで待機しなければならないため効率が悪いという点もある。

実際には無線 LAN 通信のほとんどすべてが DCF で行われており、オプションの PCF を用いることは実質的にない。

以下の EDCA と HCCA は、従来の DCF と PCF を統合し新たに QoS 機能を追加する HCF (Hybrid Coordination Function) として IEEE 802.11e で定められている。これらの QoS 機能は、IP 電話や動画ストリーミングなどのリアルタイム性が求められるデータを低遅延時間で送りたいという要求に応えるものである。

## 2.2.3 EDCA

EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) は従来の DCF を拡張し、フレームの種類によって優先順位をつける優先制御型の QoS 機能である。フレームは 4 つの AC (Access Category) に分類され、優先度が高い順に AC\_VO (音声データ用)、AC\_VI (ビデオデータ用)、AC\_BE (ベストエフォートデータ用)、AC\_BK (バックグラウンドデータ用) である。EDCA では DIFS に代わり、AC の優先度に応じた AIFS (Arbitration IFS) を用いる。優先度の高い AC ほど短い AIFS に設定され、待機時間の短い優先制御を行うことができる。また、CW サイズ下限である  $CW_{min}$  と上限である  $CW_{max}$  も AC ごとに異なり、優先度の高い AC ほど短いバックオフ時間となるように設定されている。バックオフ時間は 4 つの AC それぞれで減算していき、複数の AC のバックオフ時間が同時に終了した場合 (内部衝突) は優先度の高い AC のフレームが送信される。送信したフレームが他端末のフレームと衝突を起こす (外部衝突) 可能性は依然として残り、衝突が発生した場合は DCF と同様に CW を拡大し再送制御を行う。

さらに、EDCA には TXOP (Transmission Opportunity) という、ある端末が排他的にチャネルを利用できる時間が定められている。バックオフ時間を終了し送信権を得た端末はその後 TXOP Limit の時間内はフレームの送信を連続して行うことができる。この間、端末は AIFS よりも短い SIFS (Short IFS) の最短間隔でフレームを送り続けることができ、バックオフ時間を待機する必要もない。TXOP Limit は AC ごとに設定され、802.11a/b/g では AC\_BE、AC\_BK のとき 0 で、1 つのフレーム送信ごとにバックオフ時間の待機が必要である。AC\_VO、AC\_VI では TXOP による連続送信が可能で、それぞれ想定されるフレームサイズから TXOP の時間が決められている。音声用データはフレームサイズが短く送信間隔を短くすることができることから、AC\_VO の TXOP は AC\_VI のそれよりも短くされている。

## 2.2.4 HCCA

HCCA (HCF Controlled Cannel Access) は従来の PCF を拡張し、あらかじめ指定された帯域幅や遅延時間などのパラメータを保証するパラメータ保障型 QoS 機能である。PCF と同様にフレーム衝突の発生しない非競合アクセス制御であり、データ転送前に基地局と端末のあいだで通信品質の交渉を行うことが可能となった。

データ転送開始前に基地局と端末のあいだで ADDTS (ADD TSPEC) というフレームでやり取りを行う。まず、端末は基地局に ADDTS リクエストフレームで要求を送る。これに基地局は ADDTS レスポンスフレームを送り返し、最終的に決定した値を端末に伝える。TSPEC (Traffic Specification) にはデータ送信の方向、パケットのサイズやサービス間隔、許容遅延時間、データレート、最低伝送速度などの情報を載せることができる。

HCCA でのポーリングは 1 フレームごとではなく各端末に与えられる TXOP 終了ごとに行われる。したがって、端末はポーリングを受けると許可された TXOP のあいだはフレームを連続して送信することができる。ADDTS フレームでのやり取りの結果をもとに基地局がスケジューリングを行い、TXOP を決定する。このように、与えられる TXOP の長さによって優先制御を実現している。

## 2.3 DCF の動作手順

### 2.3.1 IFS

IEEE 802.11 規格では、データ送信前の待機時間や最低限の送信間隔としていくつかの IFS (Inter Frame Space) が定義されている。それぞれの IFS 時間長は固定であるが、これらを使い分けることで優先制御や効率的な制御を行うことができる。IFS の優先度は高い順におおむね SIFS, PIFS, DIFS or AIFS, EIFS である。

#### SIFS (Short IFS)

最も短い IFS である。SIFS はデータフレームを受信したあとの ACK フレームの返送など、最優先で送信を行うときに用いる。PIFS や DIFS の間隔で送信を行う端末に割り込まれることがない。

#### PIFS (PCF IFS)

PCF で用いられる。基地局が最初にポーリングを送信するときの間隔である。PIFS は DCF で用いられる DIFS よりも短いため、PCF と DCF が混在する環境では PCF を優先して開始することができる。

#### DIFS (DCF IFS)

DCF で用いられる。DCF で通信を行う端末は、DIFS 時間にわたって他端末の搬送波を検知できなければ、チャンネルがアイドル状態と判断し送信前のバックオフ待機に入る。

#### AIFS (Arbitration IFS)

EDCA で用いられる。DIFS と同じ役割を持ち、優先度の高い AC ほど短くすることで送信間隔を短くできる。

#### EIFS (Extended IFS)

拡張したフレーム間隔である。チャンネル状態がビジーで、ビジーとなった原因のフレームがエラーと検出された場合は、DIFS に代わり EIFS のあいだ待機する。これは、エラーを検出した端末が DIFS 時間後にフレームを送信しようとする時、正常に受信できた端末が送り返す ACK フレームと衝突してしまう可能性があり、この衝突を防ぐためである。EIFS は次の計算式で定められる。

$$EIFS = SIFS + ACK \text{ 送信時間} + DIFS.$$

DIFS に SIFS と ACK 送信時間を加えて待機することで、正常に受信した端末が送信する ACK を妨げることがない。

## 2.3.2 DCF の動作手順例

DCF の動作を、AP (Access Point, 基地局) 1 台と端末 2 台 (STA1, STA2) が通信を行う図 2.1 の状況を例に説明する。

まず、端末はチャンネルの使用状況確認のため DIFS 時間待機する。DIFS 時間搬送波が検出されなければチャンネルはアイドルであるとしてバックオフ時間の待機に入る。バックオフ時間の長さはランダムに決まるため、ここでは STA1 が先にバックオフ時間を終えたとする。STA1 はバックオフ時間終了後にフレームの送信を開始する。STA1 がフレームを送信している間はチャンネルビジーとなり、STA2 はバックオフの減算を一時停止する。AP は STA1 のフレームを受信してから SIFS 時間後に ACK フレームを STA1 に返送する。SIFS は DIFS よりも短いため、ほかの端末がアイドル状態と判断する前に ACK の送信を行うことができる。STA1 は ACK を受け取り自身の送信が成功したことを認識する。

続いてフレームの送信に失敗する状況を説明する。AP が ACK を送信し終えてから DIFS 後に端末は再びチャンネルアイドルになったと判断する。このとき、送信に成功した STA1 は新たにバックオフを設定し、STA2 は一時停止したバックオフの減算を再開する。バックオフの減算が進み、偶然 2 台とも同時にバックオフが 0 になったとする。このとき 2 台は同時にフレームの送信を開始するためフレームは衝突する。この時点では両端末ともフレームの衝突を認識できないため、フレームの送信は最後まで行う。AP は同時にフレームが送られてきたため、それぞれのデータを識別できずどちらも受信することができない。したがってどちらの端末に対しても ACK の返送は行わない。両端末は、送信終了からあらかじめ設定された ACK timeout の期間内に ACK を受信できないことをもって、フレームの送信失敗を認識する。送信に失敗した端末は DIFS 時間待機後に再送のためのバックオフを設定する。このときバックオフのランダム値選択範囲である  $CW$  を 2 進指数的に拡大し、再びフレームが衝突することを避けている。このような、再送における指数的なバックオフ拡大の仕組みを指数バックオフという。

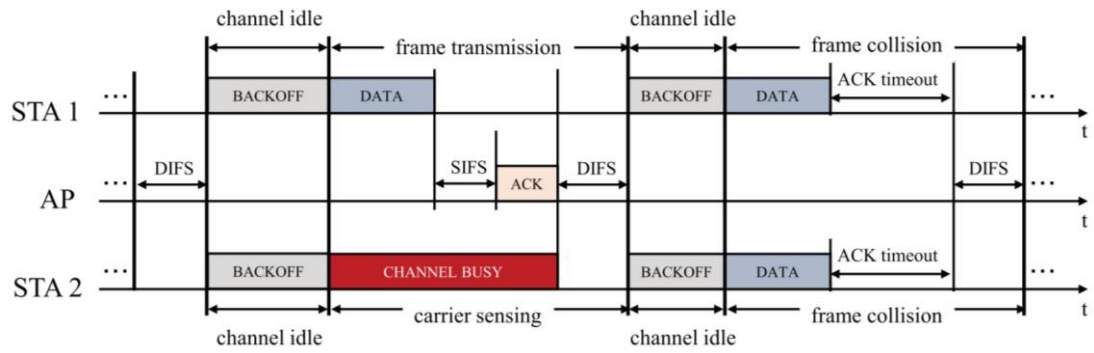


図 2.1 DCF の動作手順例

### 2.3.3 指数バックオフ

指数バックオフはフレームの再衝突を避ける役割を持つ。指数バックオフの各パラメータ値は用いる物理層規格によって異なる。

バックオフ時間 (Backoff time) は、0 から  $CW$  までの範囲のランダムな整数値にスロットタイム (Slot time) をかけることで与えられる。

$$\text{Backoff time} = \text{Random}(0, CW) \times \text{Slot time}.$$

また、 $CW$  の値は再送回数  $n$  によって次の式で求められる。

$$CW = \min\{2^n(CW_{min} + 1), CW_{max} + 1\} - 1 \quad (n \geq 0).$$

以下、802.11a の標準値をもとにバックオフ時間の取り得る  $[0, CW]$  の範囲 (図 2.2) を具体的に説明する。

- フレームが初送信 (再送回数 0) のとき、 $[0, CW_{min}]$  とする。  $CW_{min}$  は通常 15 である。
- フレームの送信に失敗 (再送) するごとにウィンドウサイズを 2 倍ずつ指数的に拡大する。  $[0, 31]$ ,  $[0, 63]$  …となる。
- $CW$  は、 $CW_{max}$  を上限としてそれ以上拡大しない。  $CW_{max}$  は通常 1023 である。
- 最大再送回数 (通常 7 回) を超えたフレームは破棄し、あらたに初送信から処理を行う。

指数的に  $CW$  を拡大させることでフレームの再衝突確率を減少させ、ネットワークの輻輳状況の防止、緩和や解消をすることができる。

本研究では、 $CW_{min}$ 、拡大倍率、 $CW_{max}$ 、最大再送回数の 4 つを指数バックオフの要素としている。

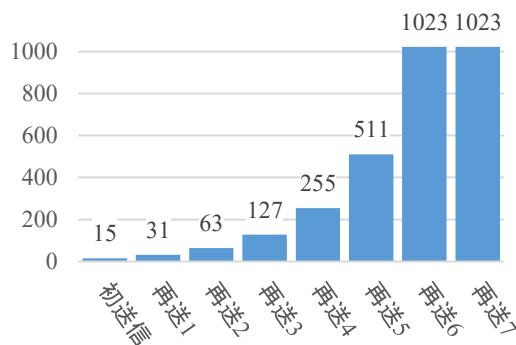


図 2.2 指数バックオフの標準



## 第3章

# 双安定状態の性質

### 3.1 シミュレーション実験

これまでに DCF ベースの IEEE 802.11 無線 LAN において、無線 LAN を利用する端末群の初期条件の違いによって二つの安定状態（双安定状態）が存在することが確かめられた[2]. 本研究では双安定状態の性質を明らかにするため、C 言語で作成したシミュレータを用いてシミュレーション実験を行った.

#### 3.1.1 シミュレーション状況

本シミュレーション実験は、DCF で通信を行う 802.11 無線 LAN 環境を対象としている. 1 台の AP に対し複数の端末が上り方向（端末→AP）にのみフレームを順次送信する状況（図 3.1）を想定する. 端末は  $1\mu\text{s}$  単位の離散時間軸上で DCF の動作に基づきバックオフ待機とフレーム送信の動作を繰り返し、同一時間に複数の端末がフレームを送信すると衝突が生じたと判断する. ビットエラーによるフレーム送信の失敗はないとする.

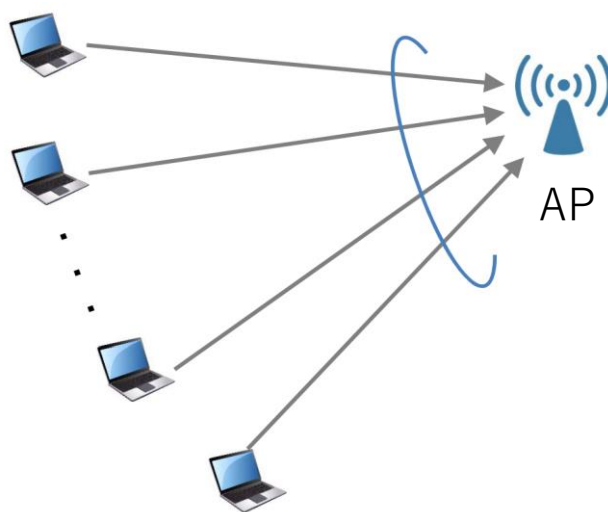


図 3.1 シミュレーション状況

### 3.1.2 シミュレーション条件

本シミュレーションでは 802.11a のパラメータを用いる。端末にフレームが生成されるレートである送信負荷を変化させ、得られたスループット（単位時間あたりに送信成功したフレームレート）を評価する。送信負荷は以下の式で定義し、このうち送信成功のものがスループットである。

$$\text{送信負荷} = \sum_{i=1}^N L_i \lambda_i$$

ここで  $N$  は端末数、 $L_i$  は端末  $i$  が送信するフレームサイズ、 $\lambda_i$  は端末  $i$  にフレームが生成されるレートである。1 回のシミュレーションは、シミュレーション上の時間で 600 秒間行い、初期変動の影響を除去するため 200 秒から 600 秒の間の平均値を結果とする。端末  $i$  が送信するレート、フレームサイズ、負荷はシミュレーションのあいだ一定とする。

シミュレーション条件を表 3.1 にまとめた。送信するフレームサイズは 1500byte、送信待ちフレームを格納するバッファサイズは 100 フレーム分とする。端末台数を 5, 15, 30 台とし、総負荷を 20~30Mbps で変化させて得られるスループットを評価した。

表 3.1 シミュレーション条件

DataRate, BasicRate	54 Mbps, 6 Mbps
SIFS, DIFS	16 $\mu$ s, 34 $\mu$ s
SlotTime	9 $\mu$ s
CWmin, CWmax	15, 1023
RetryLimit	7
FrameSize	1500 bytes
BufferSize	100 frames

### 3.1.3 初期バイアス

初期条件の違いとして「初期バイアス」を設ける。「初期バイアスなし」はシミュレーション開始から終了まで一定の実験負荷をかけ、「初期バイアスあり」はシミュレーション開始から 50 秒間は 40Mbps の高負荷をかけその後一定の実験負荷とする。初期バイアスの過負荷によって、端末のバッファ内には送信待ちフレームの長い待ち行列ができる。

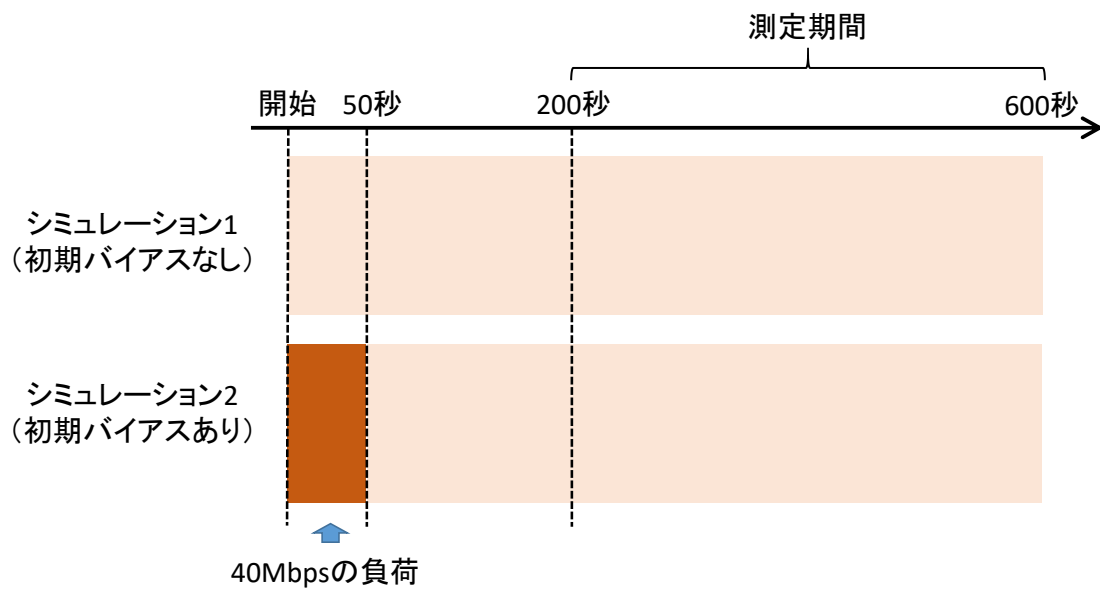


図 3.2 初期バイアスの有無

## 3.2 双安定状態の出現

### 3.2.1 非飽和状態と飽和状態

双安定状態の説明に先立ち、負荷の変化による端末の一般的な状態変化を説明する。図 3.3(a)は端末数 30 台、初期バイアスなしの場合の、全端末合計の総負荷と総スループットの関係である。20Mbps から負荷を上昇させるにしたがってスループットも上昇し、この条件では 24.5Mbps でスループットがピークとなる。さらに負荷を上昇させるとピークの直後にスループットが若干低下し、それ以上負荷を上げててもスループットは頭打ちとなり一定の値を取る。

衝突率と、バッファ内の送信待ちフレーム数を表す平均キュー長の結果から、スループットがピークとなった負荷の直後に両者とも急激に値が上昇していることがわかる。このことから、スループットがピークを迎えるまでは送信負荷がネットワークのキャパシティを下回っている非飽和状態であり、ピークを超えた後は送信負荷がキャパシティを上回りネットワークが輻輳している飽和状態であるといえる。一般に、負荷の上昇に伴って状態が非飽和から飽和に転じ、飽和状態においてスループットは一定の値となることが確認できた。この挙動は、送信するレート、フレームサイズ、端末数によらずおむね同様である。

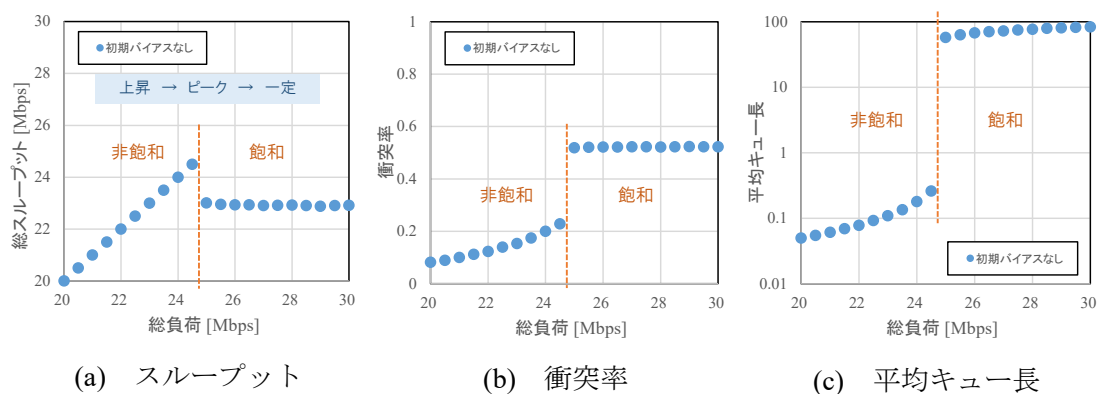


図 3.3 非飽和状態と飽和状態

### 3.2.2 双安定状態

全端末が同一のパラメータを用い同一のレートでバッファにフレームが生成される Homogeneous (均質) な場合においてシミュレーションを行った。スループット、フレーム衝突率、平均キュー長の挙動から、初期バイアスありの場合も初期バイアスなしの場合と同様に、負荷の上昇に伴って状態が非飽和から飽和に転じ、飽和状態においてスループットは一定の値となることがわかる。ところが、初期バイアスありの場合はスループットがピークとなるときの負荷 (端末数 30 台で 23.5Mbps) が初期バイアスなしの場合 (同 24.5Mbps) よりも低い。このため、非飽和と飽和状態の境界領域において初期バイアスの有無によってスループットが異なる状態が発生し、これを双安定状態と呼ぶ。

これまで、初期バイアスの有無のような異なる負荷から同一の負荷へ変化させた場合、両者は同一の状態に収束すると考えられていた。本実験でも非飽和と飽和の境界領域以外では初期バイアスの有無にかかわらず同一の状態に収束しているが、境界領域において異なる状態に安定している点が従来にはない結果である。

端末数 15 台, 30 台では、送信するレート、フレームサイズによらず双安定状態が発生した。さらに、送信レート、フレームサイズ、負荷のいずれかが端末によって異なる Inhomogeneous な場合においても双安定状態が発生した。端末数 5 台では双安定状態は発生しなかった。また、双安定状態において、初期バイアスなしの場合は非飽和状態にあり、初期バイアスありの場合は飽和状態にある。このときの飽和状態は他方の非飽和状態よりもスループットが低下しているため、双安定状態を解消することでスループットの向上が見込まれる。

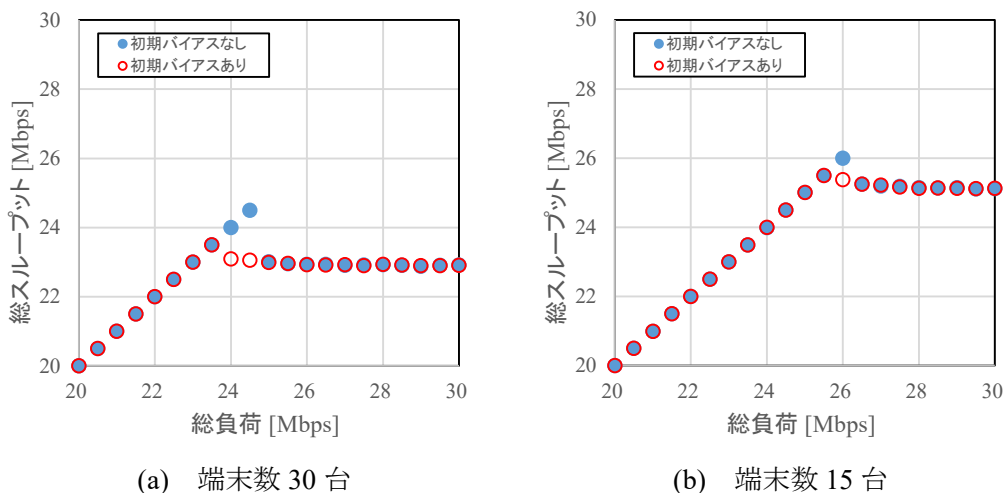
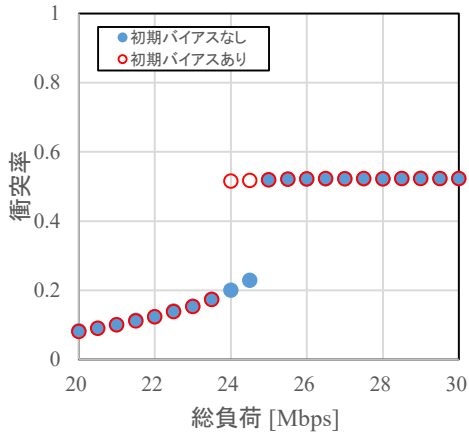
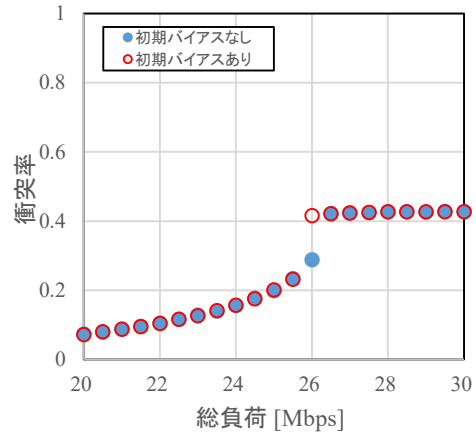


図 3.4 双安定状態 (スループット)

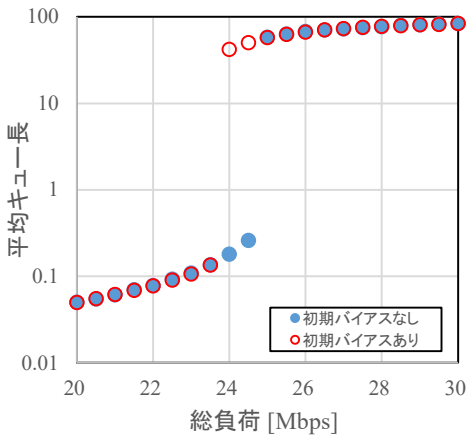


(a) 端末数 30 台

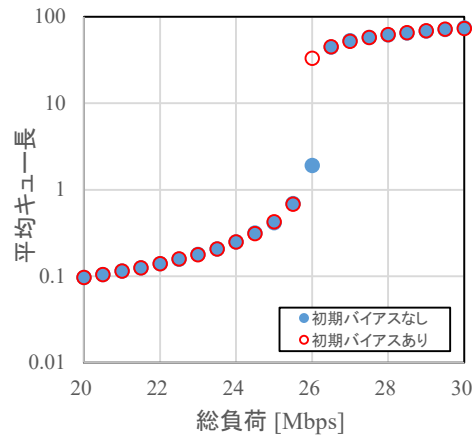


(b) 端末数 15 台

図 3.5 双安定状態 (フレーム衝突率)



(a) 端末数 30 台



(b) 端末数 15 台

図 3.6 双安定状態 (平均キュー長)

### 3.3 双安定状態の出現理由

3.2 節のシミュレーション結果から、双安定状態の出現理由を以下のように考察した。

- i. (初期バイアスによって) バッファ内にフレームの長い待ち行列ができる。
- ii. 各端末はバックオフ終了後に一斉にフレーム送信を試みるため、フレーム衝突率が高まり送信に失敗する。
- iii. 再送処理では指数バックオフによりバックオフ時間が延びフレーム送信間隔が広がる。
- iv. フレーム送信頻度が減り、バッファ内のフレーム待ち行列が解消されない。

以上のサイクルが正のフィードバックとしてかかり、スループットが低い状態にとどまると考える。

シミュレーション結果から、**Homogeneous** な場合で送信レート、フレームサイズを変えた場合や、**Inhomogeneous** な場合においても双安定状態が出現することが分かった。したがって、これら送信レート、フレームサイズ、負荷の要素は双安定状態出現の直接的な要因ではなく、フレームの送信アルゴリズムそのものに要因があると考えた。双安定状態の初期バイアスありの場合では、シミュレーション開始直後からバッファ内にフレームの長い待ち行列が存在し、多くの端末が送信を試みるため衝突率が高い状況にある。通常のフレーム送信と衝突発生後のフレーム再送信とでは、指数バックオフの仕組みによって  $CW$  が拡大されているか否かが大きな違いである。このことから、特に指数バックオフの仕組みに双安定状態出現の要因があると考え、指数バックオフの改良を行うこととした。

# 第4章

## 指数バックオフの改良

本章では, 双安定状態を解消しスループットを向上する指数バックオフについて検討する. DCF の指数バックオフを改良する手法には  $CW$  を変更するものが多く, 通信範囲内の端末数によって  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$  を調整する手法[6], 無線帯域の使用時間であるビジー率を用い最適な  $CW$  を導出する手法[7]などがある. また QoS 制御が可能な EDCA において無線帯域のトラフィック状況に応じて動的に  $CW$  を拡縮し通信品質を高める手法[8]がある

### 4.1 指数バックオフの各要素検証

2.3.3 項より, 指数バックオフの要素を,  $CW_{min}$ , 拡大倍率,  $CW_{max}$ , 最大再送回数の4つとした. 本節ではこれらの要素を 802.11a の標準値から変化させ双安定状態の有無とスループットの向上を評価する. 各要素は一つだけ変化させ, 複数を組み合わせて変化させることはない. 以下, 要素ごとに結果を述べる. なお, 飽和状態でのスループットは総負荷 30Mbps での値を示す.



### 4.1.1 $CW_{min}$

$CW_{min}$  は初送信時の  $CW$  の値である。QoS 制御を用いる場合や、使用する物理層規格によって値は異なる。802.11a の標準値は「15」である。 $CW_{min}$  を 7 から 511 の範囲で標準値から段階的に小さくさせて評価した。

端末数 30 台のとき、127 より大きくすると双安定状態が解消された。さらに 255 までは  $CW_{min}$  を大きくするにつれて飽和状態でのスループットも向上した。511 では 255 のときよりもスループットが減少した。端末数 15 台のときも  $CW_{min}$  を大きくするにつれスループットも向上し、127 でピークとなった。双安定状態は 63 より大きくすると解消された。

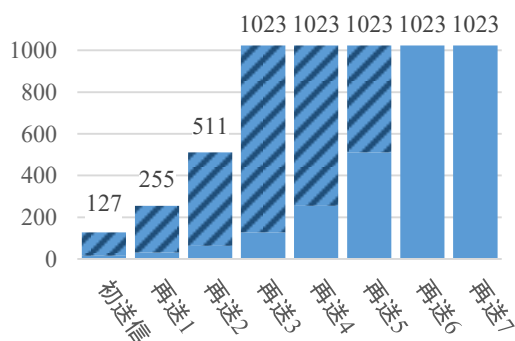


図 4.1  $CW_{min}=127$  の例

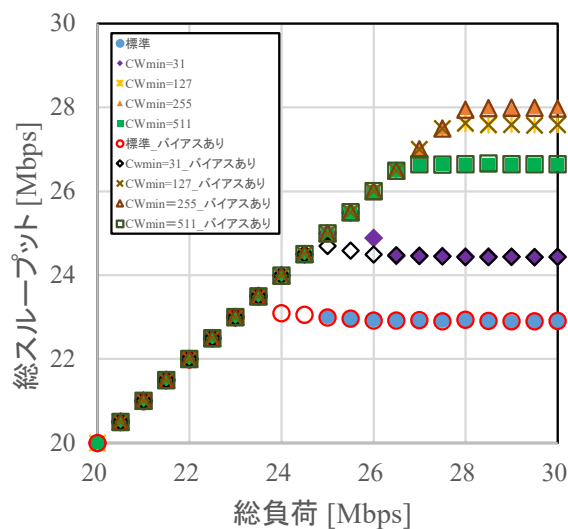


図 4.2 各  $CW_{min}$  のスループット

## 4.1.2 拡大倍率

再送を1度行うごとに  $CW$  の値は2倍にされる。この2倍の拡大倍率はすべてのプロトコルにおいて同じで、基本的に変更することはない。拡大倍率を1.5倍から64倍まで標準値から段階的に拡張し評価した。なお、 $CW_{min}=15$ 、 $CW_{max}=1023$  では拡大倍率64倍が最大である。

端末数15台、30台ともに拡大倍率を高くすると双安定状態が解消された。また、拡大倍率を高めるにつれ飽和状態でのスループットも向上し、30台のとき拡大倍率64倍では標準の場合より5.7Mbps上昇した。

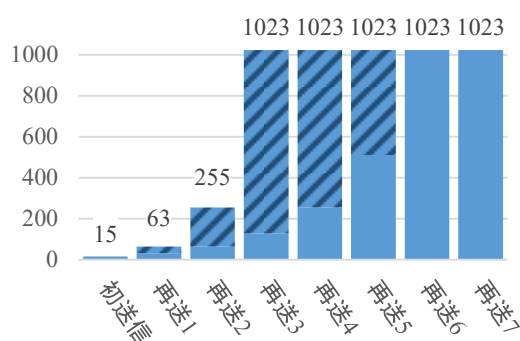


図 4.3 拡大倍率 4 倍の例

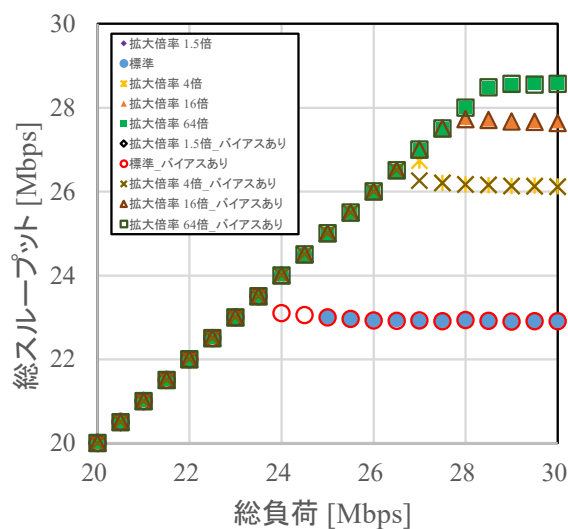


図 4.4 各拡大倍率のスループット

### 4.1.3 $CW_{max}$

$CW_{max}$ は $CW$ を拡大する上限値である。QoS制御で優先度の高いものは $CW_{max}$ を小さくする。802.11aの標準値は「1023」である。 $CW_{max}$ を127から2047の範囲で標準値から段階的に小さくさせて評価した。なお、最大再送回数7回的时候は $CW_{max}=2047$ より大きくすることはできない。

端末数30台のとき、2047に拡大することでわずかに飽和状態でのスループットが向上したが、双安定状態は解消されなかった。端末台数15台でも同様の結果であったが、2つの安定状態のスループット差はわずかであった。 $CW_{max}$ を縮小するといずれの場合もスループットが低下し、双安定状態も解消されなかった

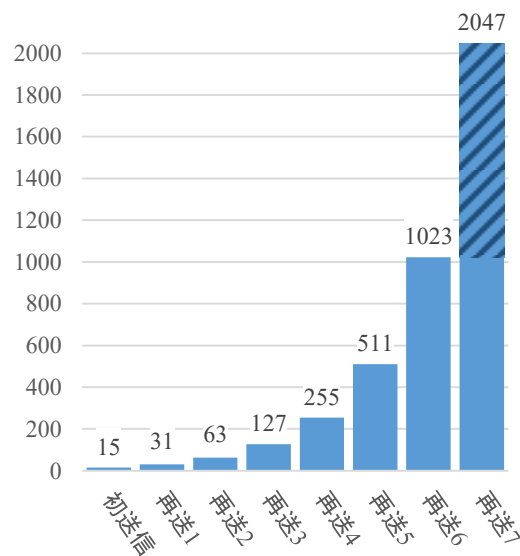


図 4.5  $CW_{max}=2047$  の例

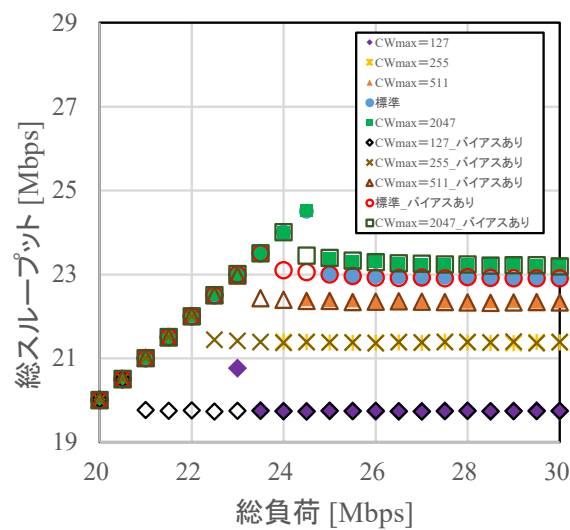


図 4.6 各  $CW_{max}$  のスループット

## 4.1.4 最大再送回数

最大再送回数はプロトコルによって異なり、802.11aの標準値は7回である。最大再送回数を3回から15回の範囲で標準値から段階的に増減させて評価した。

端末数15台、30台ともに最大再送回数を増やすにつれ飽和状態でのスループットは向上するが、わずかな上昇幅にとどまった。また、いずれの場合も双安定状態は解消しなかった。最大再送回数を減らすと、スループットは大幅に減少した。

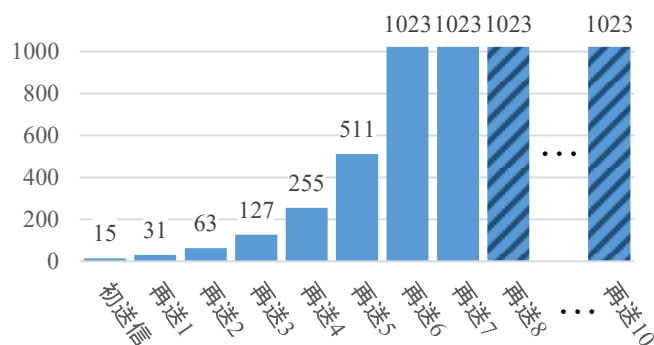


図 4.7 最大再送回数 10 回の例

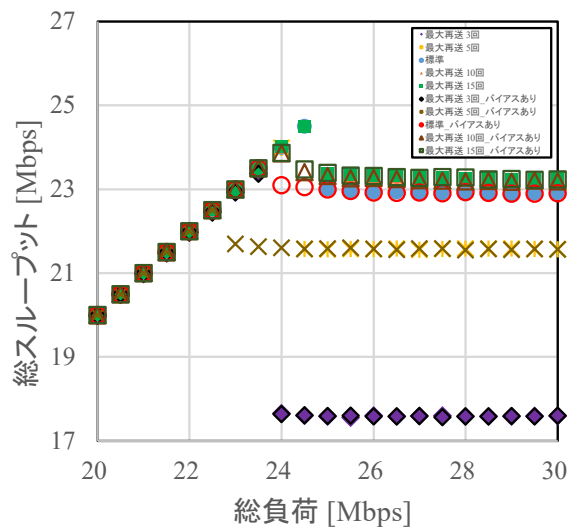


図 4.8 各最大再送回数のスループット

## 4.2 指数バックオフの最適な改良

前節の結果から，指数バックオフの各要素を  $CW$  が標準値よりも拡大する方向に変更することでスループットが向上することが分かった．ただし，スループットの上昇幅は要素によって差が見られる．本節では各要素のスループット向上理由を考察し，指数バックオフの最適な改良について述べる．

### 4.2.1 $CW$ 拡大の状況

前節の検証結果のうち，端末数 30 台で最もスループットが向上した条件での  $CW$  拡大の様子を示す．検証ではスループットの向上はそれぞれ最大で， $CW_{min}$  の変更が 5.1Mbps，拡大倍率の変更が 5.7Mbps， $CW_{max}$  の変更が 0.3Mbps，最大再送回数の変更が 0.4Mbps であった．前者 2 つはスループットが大幅に向上し，後者 2 つはわずかなスループットの上昇にとどまった． $CW$  拡大の様子を見ると，前者 2 つは送信回数が少ない段階で  $CW$  が拡大し，後者 2 つは最大再送回数に近い段階で  $CW$  が拡大する (図 4.9)．したがって，送信回数が少ない段階から大きな  $CW$  とすることがスループットの向上に有効であるといえる．事実，衝突率が 50% の場合に再送回数が 7 回となるのは，全送信回数の 1% 未満である．したがって，再送回数が増えてから  $CW$  を拡大させても全体のスループットにはわずかな影響しかもたらさない．

### 4.2.2 スループット向上の要因

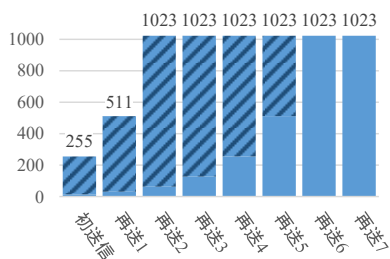
$CW_{min}$  と拡大倍率を大きくすることがスループットの向上に有効であることが分かった．この要因を  $CW$  拡大の状況を踏まえ以下のように考察する．

- i. 送信回数が少ない段階で  $CW$  を拡大することで，衝突が繰り返し発生することを防ぎ衝突率を下げる．
- ii. 初送信時の  $CW$  は小さくすることで，短い送信間隔を確保する．

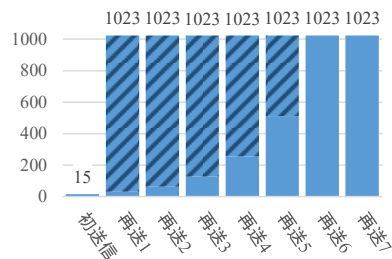
i. について，再送回数 1 回目での  $CW$  に着目すると， $CW_{min}=255$  のとき標準の 8 倍，拡大倍率 64 倍のとき標準の 32 倍にそれぞれ拡大している．こうした大きな  $CW$  によって衝突率が低く抑えられている．

$CW_{min}$  を大きくすることは ii. の要因と相反する．したがって， $CW_{min}$  を大きくしすぎるとかえってスループットが低下してしまうと考えられる．くわえて， $CW_{min}$  をどの程度まで大きくすればスループットが最大となるかは端末数によって異なる．このため適切な  $CW_{min}$  に設定しておくことが難しく実用的でない．一方，拡大倍率は大きくすれば

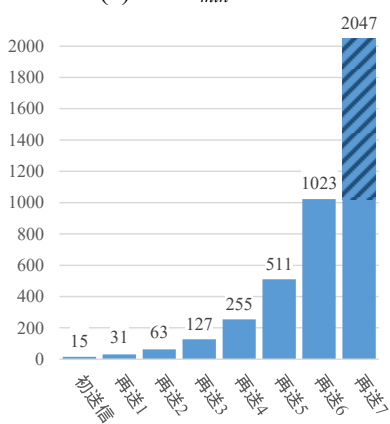
するほどスループットが向上していることから実用性が高い。以上の理由から、拡大倍率を大きくすることが最適な指数バックオフの改良であると考える。



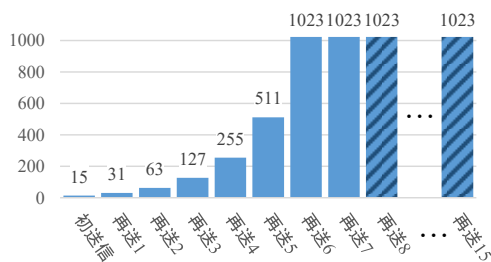
(a)  $CW_{min}=255$



(b) 拡大倍率 64 倍



(c)  $CW_{max}=2047$



(d) 最大再送回数 15 回

図 4.9 各要素の CW 拡大の様子

## 4.3 2段階バックオフの提案

前節までに、スループットの向上には拡大倍率を大きくすることが有効であるとした。本節では、スループットをより高める「2段階バックオフ」について提案する。

### 4.3.1 2段階バックオフの効果

拡大倍率を最大限高めた指数バックオフは、初送信時が  $CW=CW_{min}$ 、再送1回目以降は常に  $CW=CW_{max}$  となり、実質的に2段階のウィンドウサイズを取る。このようなバックオフ制御を「2段階バックオフ」として提案する。例えば、4.1節の検証において、拡大倍率64倍のバックオフは初送信時に  $CW=15$ 、以降は  $CW=1023$  となる2段階バックオフである (図4.10(b))。

2段階バックオフでは初送信時は小さい  $CW$  で速やかな送信を確保し、再送時は大きな  $CW$  で更なる衝突を避ける効果があると考えられる。このうち初送信時の  $CW$  をより小さくすることで更に効果が高まるかを検証する。 $CW_{min}$  を15よりも小さくした2段階バックオフについて、スループットの向上があるかをシミュレーションで評価する。条件は3.1節のシミュレーションと同じである。

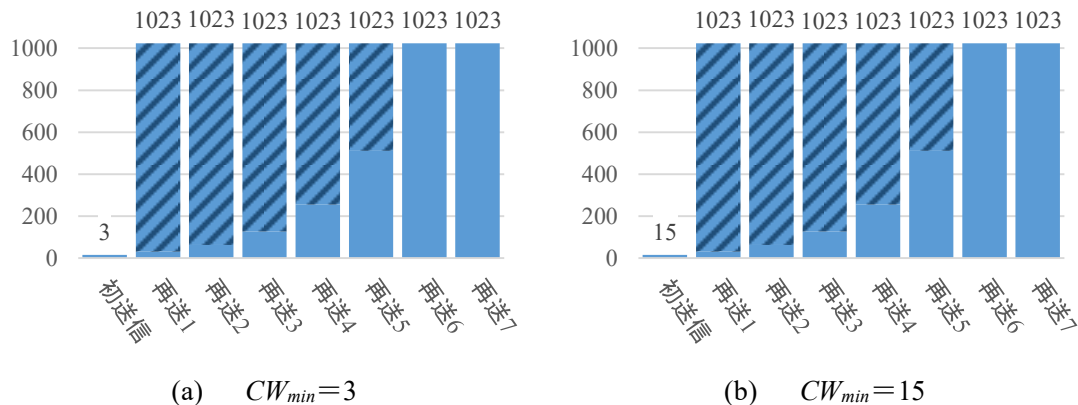
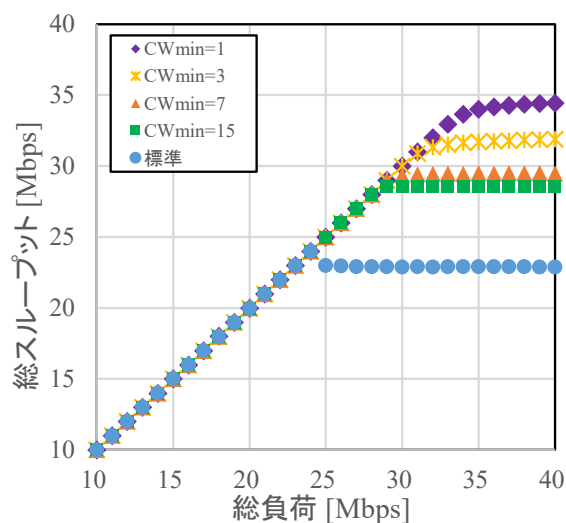


図4.10 2段階バックオフの例

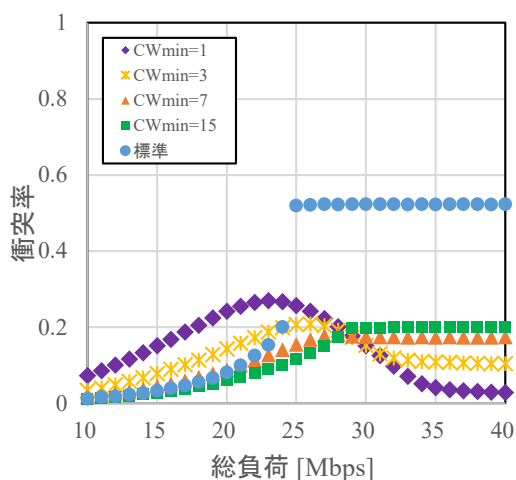
総負荷を10Mbpsから40Mbpsまで1Mbpsごとに変化させて端末数30台で評価した。飽和状態(総負荷40Mbps)でのスループットは、指数バックオフの標準の場合と比較しすべての条件で向上し、 $CW_{min}$ を15よりも小さくするにつれてさらに向上した。最もスループットの高い $CW_{min}=1$ のときスループットは最も高く34.5Mbpsで、指数バックオフ標準の22.9Mbpsと比較し11.6Mbps上昇し(図4.11(a))、非常に高い効果が得られた。本シミュレーションにおける考え得る最大スループットは、フレームサイズや送信レートが同じ条件で、フレーム衝突0、バックオフ時間0で送信し続けた場合

の 35.4Mbps である。このことから、 $CW_{min}=1$  の 2 段階バックオフは非常に高い効率で送信を行っていることがわかる。また、 $CW_{min}=1, 3$  のときは負荷が 35Mbps を超えて明らかに飽和状態となったあとも、負荷を上昇させるとわずかずスループットが上昇する。

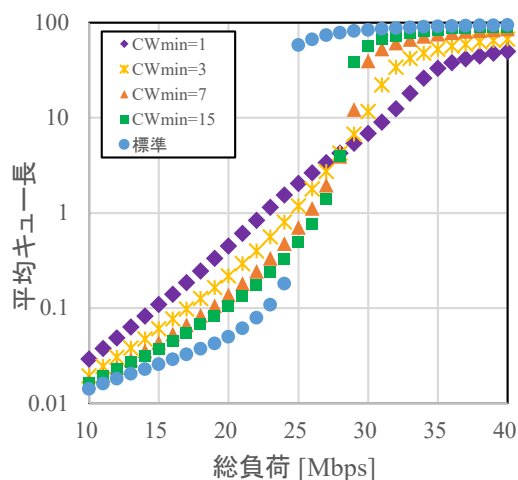
2 段階バックオフでは衝突率や平均キュー長が負荷とともに緩やかに上昇し、急激に跳ね上がることがない。非飽和から飽和状態への遷移も緩やかであるため、衝突率と平均キュー長からでは非飽和状態と飽和状態の境界が読み解きにくい。特に  $CW_{min}=1, 3$  のときは衝突率が負荷 25Mbps で最大値を取ったあと下降しており、これまでにない挙動を示す。この点についての 2 段階バックオフの性質は次項で詳しく分析する。



(a) スループット



(b) 衝突率



(c) 平均キュー長

図 4.11 2 段階バックオフ (端末数 30 台)



### 4.3.2 2 段階バックオフの性質

2 段階バックオフはスループットの向上に非常に効果的であることが分かった。また、非飽和から飽和状態への遷移が緩やかでこれまでにない挙動を示した。この性質について、各端末のフレーム送信タイミングをもとに分析する。

端末数 5 台、総負荷 30Mbps における、0.2 秒 (200,000 $\mu$ s) 間の各端末の送信タイミングを図 4.12 に示す。縦軸は 5 台の端末、横軸は時間で、点のプロットがフレームを送信したタイミングである。折れ線は送信タイミングを順に繋いだものであり、送信権の遷移を表す。

標準の指数バックオフにおいては送信権の遷移が頻繁に行われていることがわかる。0.2 秒間に全端末で 633 回フレームの送信を行い、501 回送信権が遷移した。従って送信権 1 回当たりの送信フレーム数は 1.3 である。一方、2 段階バックオフでは送信権 1 回当たりの送信フレーム数が、 $CW_{min}=15$  のとき 2.8,  $CW_{min}=1$  のとき 15.7 である。送信権の遷移回数が減り、1 回当たりの送信フレーム数が大幅に増えている。これは、1 度衝突を起こした端末は再送処理によって長いバックオフ時間待機するため、衝突を起こさなかった端末が連続してフレームを送信し続けられるからである。特に  $CW_{min}$  を小さくするほど送信間隔を狭められるため、送信権 1 回当たりの送信フレーム数が増える。

$CW_{min}=1$  の 2 段階バックオフにおける 19,000  $\mu$ s から 24,000  $\mu$ s にかけてのように、ところどころ折れ線の傾きが緩くなっている箇所がある。これは、この間フレームの送信が行われていないことを示すが、その理由として、

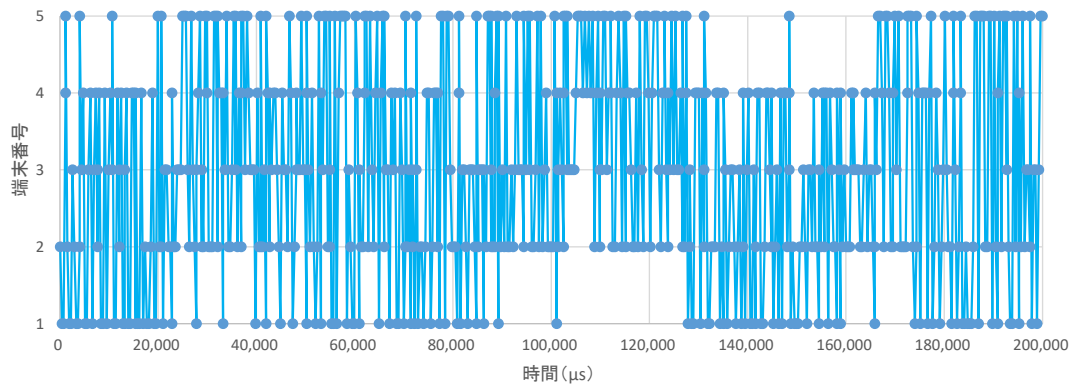
- i. フレームの衝突によって全端末がバックオフ時間の待機に入った。
- ii. 送信を行っていた端末のバッファが空になり送信するフレームがなくなった。

の 2 つが考えられる。i. の場合は先にバックオフ時間を終えた端末が送信を行うことになる。ii. の場合はバッファが空になった端末にフレームが生成されるか、いずれかの端末がバックオフ時間を終えると送信が行われる。負荷が高くなるとバッファ内に次々とフレームが生成されるため、ii. の理由で生じていたフレーム送信の空白が埋められることになる。したがって、負荷が高くなるほど送信されるフレーム数が多くなり、すなわちスループットが向上する。2 段階バックオフの  $CW_{min}=1, 3$  において飽和状態になったあとも、負荷を上昇させるとスループットがわずかに上昇するのは、こうした理由であると考えられる。

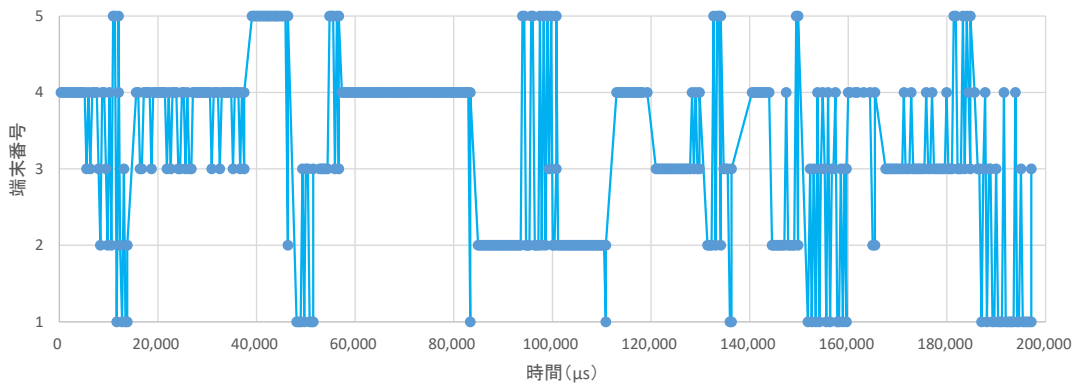
また、フレーム送信の空白が埋められることで、全体のフレーム衝突回数は変わらずにフレーム送信回数のみが増えるため、フレーム衝突率が減少する。したがってフレーム衝突率が最大となる負荷が、非飽和状態と飽和状態の境界であると考えられる。この境界は  $CW_{min}=1$  のとき 23Mbps,  $CW_{min}=3$  のとき 26Mbps であるが、この負荷はそれぞれ平均キュー長が 1 を超える負荷とほぼ一致する。平均キュー長が 1 を超えると、複

数の送信待ちフレームがバッファに存在する可能性が高いと考えられるため、この点からも非飽和と飽和の境界であると考えられる。

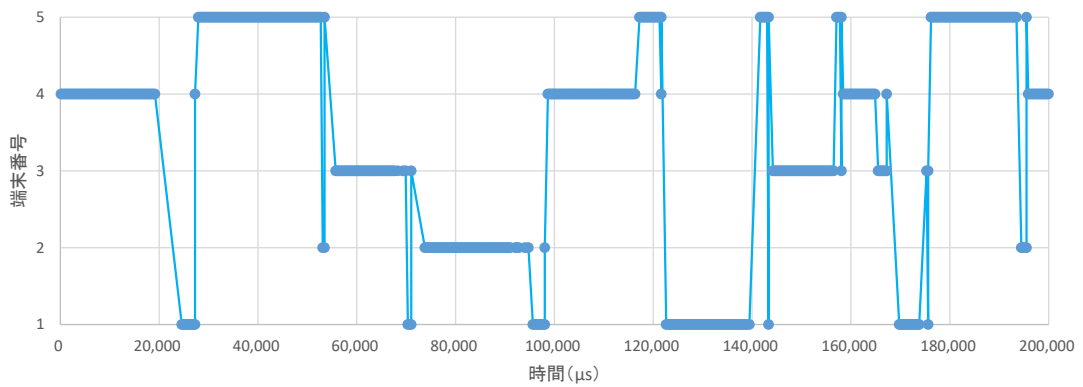
2段階バックオフでは、 $CW$ を小さくすると送信権1回当たりの送信フレーム数が増えることが特徴である。これは全体の送信フレーム数が増えスループットが向上するという点で利点であるが、一方で送信権を獲得できる周期は長くなってしまふ。送信権獲得の周期が長くなると、バッファ内に長くとどまるフレームとすぐに送信されるフレームが混在し、フレームによって遅延時間にばらつきが生じる。IP電話や動画配信などの等時性（リアルタイム性）が求められるサービスでは、フレームを一定の間隔で送信し遅延時間のばらつきが少ないほうが好ましい。したがって2段階バックオフはメールの送信、画像の投稿など、等時性の要求が低いサービスに適していると考えられる。



(a) 指数バックオフ標準



(b) 2段階バックオフ  $CW_{min}=15$



(c) 2段階バックオフ  $CW_{min}=1$

図 4.12 フレームの送信タイミング (端末数 5 台)

# 第5章

## 理論解析モデルでの評価

### 5.1 IEEE 802.11 DCF の理論解析モデル

IEEE 802.11 DCF の動作を解析するモデルは、これまでに多くの提案がされてきた。なかでも代表的なのが、2000年に Bianchi により提案されたモデル[9]である。Bianchi モデルは端末の状態をバックオフカウンタと（再送回数を表す）バックオフステージの2つで表現し、状態遷移を離散時間マルコフ連鎖によりモデル化してスループットなどを評価する。しかし、Bianchi モデルでは端末が常に飽和状態にあることが前提とされている。Bianchi モデルを拡張した手法も多く提案されており、Malone らのモデル[10]はバックオフカウンタとバックオフステージに加え、フレームを所持するか否かを端末の状態表現に用いる。このモデルではフレームを所持する確率をもとに端末の状態を表現するが、フレーム所持確率を正しく評価するにはフレームの待ち行列長を把握する必要がある。Liu ら[11]は Malone のモデルを改良し、端末の状態をバックオフカウンタ、バックオフステージ、フレームの待ち行列長の3つで表現し、3次元離散時間マルコフ連鎖でモデル化した。ただし、3次元マルコフ連鎖の定常解を求めるには複雑な計算が要求される。

双安定状態は非飽和と飽和の2つの状態がともに存在するため、本研究では非飽和と飽和の両状態を扱えるモデルとして Li らのモデル[12]を利用した。

### 5.2 本研究の利用モデル

本研究で用いるモデルは、端末のマクロ状態の遷移とフレームの待ち行列長の変化を連続時間マルコフ連鎖でモデル化している。以下、文献[12]をもとに手法を説明する。

#### 5.2.1 端末のマクロ状態表現

本解析モデルは、Bianchi モデルに代表される端末の状態をバックオフカウンタとバックオフステージで表現する手法を放棄する。代わりに、以下のように端末のマクロ状態を定義する。

— チャネルアイドル状態 (状態 0, 状態 0\*)

— 送信状態 (状態 1, 状態 2)

— キャリアセンス状態 (状態 3, 状態 4, 状態 3\*, 状態 4\*)

チャネルアイドル状態は端末がチャネルの空きを検出中の状態を意味し、端末はバックオフカウンタを減算している状態 (状態 0), もしくはバックオフカウンタが 0 で待機状態 (状態 0\*) のいずれかにある。

送信状態とは、フレームの送信を開始してからフレームの送信が (成功, 失敗にかかわらず) 終了してバックオフカウンタを再設定後, カウントダウンを再開するまでの状態を指し, 送信成功 (状態 1) と送信失敗 (状態 2) の 2 つの状態に分けられる。チャネルアイドル状態にある端末は, バックオフカウンタが 0 になった時点で少なくとも 1 つの送信フレームを持つ場合は送信状態に遷移する。ポストバックオフ状態で待機している端末にフレームが到着すると, 端末がキャリアセンスを行いチャネルがアイドルのままであれば送信状態に遷移する。

キャリアセンス状態は他の端末がフレーム送信中の状態に対応し, 送信成功フレームをキャリアセンス中 (状態 3) と送信失敗フレームをキャリアセンス中 (状態 4) の 2 つの状態を有する。なお, バックオフカウンタが 0 で待機状態 (状態 0\*) からキャリアセンス状態に遷移した場合は, 送信成功 (状態 3\*) と送信失敗 (状態 4\*) に分類する。

## 5.2.2 状態間の遷移率

本モデルにおける状態間の遷移率パラメータは以下である。

- $p_t$  : 自端末の送信失敗確率
- $p_f$  : 他端末の送信失敗確率
- $\gamma$  : チャネルアイドル状態からキャリアセンス状態への遷移率
- $v$  : チャネルアイドル状態から送信状態への遷移率

上記以外の状態遷移は端末へのフレーム到着率とフレーム送信時間で定まる。また,  $v$  は  $p_t$  から求まるため,  $p_t, p_f, \gamma$  を未知パラメータとする大域平衡方程式を解き, 端末の定常状態確率を求める。未知パラメータは定常状態確率に依存するため, 繰り返し計算が必要である。まずパラメータに適当な初期値 (0 など) を与え, 平衡方程式を解いて定常状態確率を求める。続いて, パラメータを再決定し, その結果を解いて平衡方程式に代入して定常状態確率を再計算する。これを収束するまで繰り返す。

## 5.3 理論解析結果

双安定状態と2段階バックオフについて、理論解析したスループットの結果を示す。

### 5.3.1 双安定状態

初期バイアスを再現するため、チャンネルアイドル状態からキャリアセンス状態への遷移率 $\gamma$ が高い初期値 ( $10^6$ ) と低い初期値 (0) とで比較をした。

端末数 30 台における理論解析モデルの結果を、シミュレーションの結果と合わせて図 5.1 に示す。これより、理論解析モデルでも双安定状態が出現することが確かめられた。ただし、シミュレーションの結果とはやや乖離があり、特に初期バイアスなしの場合で差が大きい。

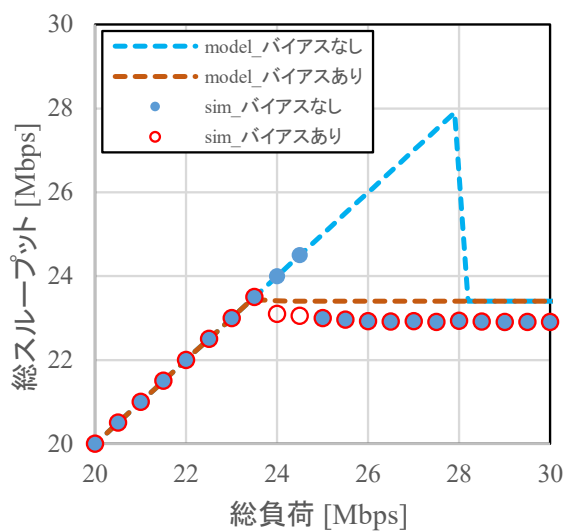


図 5.1 双安定状態 (理論解析)

### 5.3.2 2段階バックオフ

端末数 30 台において 2 段階バックオフの  $CW_{min}$  を変化させて、指数バックオフの標準値と比較した。2 段階バックオフでは指数バックオフよりもスループットが向上することが、理論解析モデルでも確認できた。また、いずれの条件でも双安定状態は出現しなかった。ただし、 $CW_{min}$  を 15 から小さくしてもスループットの向上は得られなかった。 $CW_{min}=15$  の結果はシミュレーションの結果とよく一致している。

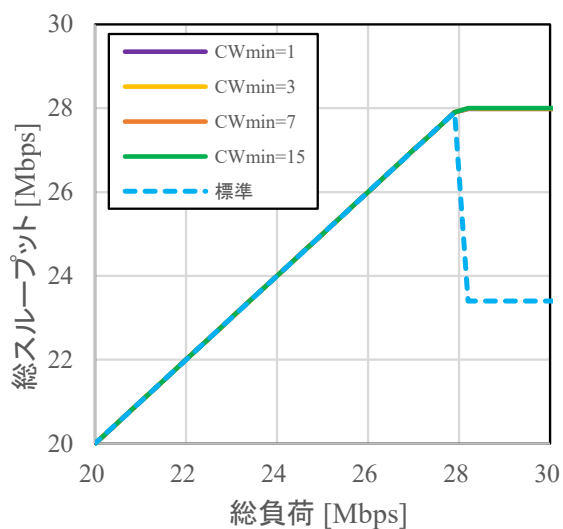


図 5.2 2 段階バックオフ (理論解析)

# 第6章

## 結論

本研究では、双安定状態の性質について詳細に分析し、双安定状態を解消しスループットを向上するバックオフアルゴリズムを提案した。

双安定状態における2つの安定状態はそれぞれ非飽和状態と飽和状態にあり、飽和状態ではスループットが低下する。シミュレーションの結果から双安定状態の出現は、フレーム再送のアルゴリズムである指数バックオフの仕組みが要因であると考察し、指数バックオフの改良を試みた。指数バックオフの各要素を検証した結果、 $CW$ の拡大倍率を大きくすることが双安定状態を解消しスループットを向上させることに有効であることが分かった。さらに、拡大倍率を最大限大きくし、実質的に2つの $CW$ を取る2段階バックオフを提案した。2段階バックオフでは、 $CW_{min}$ を小さくすることでさらにスループットを向上させることが可能であり、指数バックオフの標準値と比較してスループットが11.6Mbps上昇した。また、理論解析モデルでの評価も行い、シミュレーションの結果とやや乖離があるものの、双安定状態の出現と2段階バックオフの有効性を確認した。

一方で、良好な通信品質のためには高スループットだけでなく、低遅延や低衝突率であることも重要である。特にIP電話や動画配信といった等時性（リアルタイム性）が問われるサービスでは低遅延や低衝突率が特に重要となる。本研究では高スループット化に重点を置いたため、部分的に遅延時間が悪化している。今後は高スループット化だけでなく遅延時間や衝突率も考慮して通信品質の向上を目指すことが求められる。



## 参考文献

- [1] S. Sagari, A. Baid, I. Seskar, T. Murase, M. Oguchi, and D. Raychaudhuri, “Performance evaluation of mobile hotspots in densely deployed WLAN environments,” in PIMRC, pp. 2935–2939. IEEE, 2013.
- [2] 李想, 塩田茂雄, “飽和/非飽和境界領域における IEEE 802.11 DCF の平均場近似解析と双安定現象,” 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会, CQ2018-25, pp.43-48, 2018.
- [3] 守倉正博, 久保田周治, “802.11 高速無線 LAN 教科書,” 株式会社インプレス R&D 発行, 2008.
- [4] 足立朋子, “標準化現場ノート 第 15 回 IEEE802.11n,” 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.7, pp.74-77, 2011.
- [5] 大谷昌弘, 浦野直樹, 上田徹, “QoS を実現する無線 LAN 規格 IEEE802.11e,” 映像情報メディア学会誌, Vol.57, No.11, pp.61-66, 2003.
- [6] 又吉哲次, 川原憲治, “コンテンツションウィンドウ制御による広域無線アクセス方式の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, 信学技報 113(473), 349-354, 2014-03-06.
- [7] 森野善明, “衝突回避/検出方式を用いた高効率無線伝送の研究,” 日本工業大学研究報告, 第 46 巻 第 1 号, pp.125-128, 2016 年 6 月.
- [8] 河村憲一, 平栗健史, 小笠原守, “無線 LAN の EDCA パラメータ動的更新技術,” NTT 技術ジャーナル, 2007 年 8 月号, pp.45-48.
- [9] G. Bianchi, “Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.

- [10] D. Malone, K. Duffy, and D. Leith, "Modeling the 802.11 distributed coordination function in nonsaturated heterogeneous conditions," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 15,no. 1, pp. 159–172, 2007.
  
- [11] R. Liu, G. Sutton, and I. Collings, "A new queueing model for qos analysis of IEEE802.11 DCF with finite buffer and load," *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 9,no. 8, pp. 2664–2675, 2010.
  
- [12] X. LI, Y. Narita, Y. Gotoh, and S. Shioda, "Performance analysis of IEEE 802.11 DCF based on a macroscopic state description," *IEICE Trans. Commun.* Vol. E101-B, No.8, 2018.

# 研究成果

- 坪谷大輝, 塩田茂雄, "指数バックオフの改良による IEEE 802.11 DCF の双安定状態の解消," 電子情報通信学会 総合大会, 2019 年 3 月 (東京) .
- 坪谷大輝, 塩田茂雄, "指数バックオフの改良による IEEE 802.11 DCF の双安定状態の解消とスループット性能改善," 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, 2019 年 3 月 (沖縄) .
- 坪谷大輝, 塩田茂雄, "飽和/非飽和境界領域における IEEE 802.11 DCF の双安定現象," 第一回 QoS に関する (名大, NII, 早稲田大, 電通大, 芝浦工大, 千葉大合同) 学生技術交流会, 2018 年 10 月 (東京) (優秀発表賞受賞) .
- 坪谷大輝, 李想, 塩田茂雄, "飽和/非飽和境界領域における IEEE 802.11 DCF の双安定現象," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-6-12, 2018 年 9 月 (金沢) .
- 坪谷大輝, 李想, 塩田茂雄, "飽和/非飽和境界領域における IEEE 802.11 DCF の双安定現象," 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, NS2018-101, 2018 年 9 月 (仙台) .
- 塩田茂雄, 坪谷大輝, "M/PH/1 による CSMA/CA フレーム送信処理のモデル化と解析," 日本オペレーションズ・リサーチ学会 秋季研究発表会, 1-C-11, 2018 年 9 月 (名古屋) .

# 謝辞

本研究にあたっては、塩田茂雄先生に研究テーマから方向性まで多くの御助言をいただき、心から感謝申し上げます。事前知識の少ないところからの研究だったため、先生のご指導には多分にお世話になりました。

研究室の同輩、後輩の方々には、ゼミでの意見で気づかされたことがあったほか、ともに研究を進める上で大いに刺激を受けました。ありがとうございました。

また、本研究で使用した無線 LAN シミュレータは千葉大学の関屋研究室からご提供いただきました。深く御礼申し上げます。