

飽和/非飽和境界領域における IEEE 802.11 DCF の双安定現象

坪谷 大輝[†] 李 想^{††} 塩田 茂雄[†]

[†] 千葉大学 大学院融合理工学府 地球環境科学専攻, 〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

^{††} 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

E-mail: †{daikitubotani,lixiang}@chiba-u.jp, ††shioda@faculty.chiba-u.jp

あらまし IEEE 802.11 DCF ベースの無線 LAN において, 端末からのフレーム送信量が無線 LAN の処理能力を上回り始める領域 (飽和/非飽和境界領域) で, 無線 LAN を利用する端末群の安定状態が二つ存在する現象 (双安定現象) を, シミュレーションと解析モデルにより詳細に分析する. その結果, 例えば, 双安定状態はそれぞれ飽和状態及び非飽和状態に対応すること, 飽和状態から非飽和状態への遷移や, その逆の遷移が生じうること, フレーム生成レイトが端末により異なる Inhomogeneous な場合でも双安定現象が生じることなどを示す. さらに, フレーム送信処理を相型分布により表現する解析モデル (M/PH/1 モデル) においても双安定現象が説明できることを示す.

キーワード IEEE 802.11, DCF, 双安定現象, 飽和状態, 非飽和状態, 相型分布

Bistability of IEEE 802.11 DCF in a Saturated/Non-saturated Boundary Region

Daiki TSUBOTANI[†], Xiang LI^{††}, and Shigeo SHIODA[†]

[†] Graduate School of Science and Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage, Chiba, 263-8522 Japan

^{††} Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage, Chiba, 263-8522 Japan

E-mail: †{daikitubotani,lixiang}@chiba-u.jp, ††shioda@faculty.chiba-u.jp

Abstract There exist two stable states of a IEEE-802.11-DCF-based wireless LAN (WLAN) in a region where the amount of frames transmitted from the terminals is almost equal to the processing capacity of the WLAN. In this work, we focused on this bistable phenomenon and make the following observations; the two stable states respectively correspond to the saturated and the unsaturated states, transitions between the bistable states can occur in some cases, and that the bistable phenomenon occurs also in inhomogeneous cases where the frame generation rate differs for each terminal. Furthermore, we show that the bistable phenomenon can be explained also in the analytical model (M/PH/1), in which the frame transmission time is represented by the phase distribution.

Key words IEEE 802.11, DCF, bistable, mean field approximation, saturated, nonsaturated

1. ま え が き

2020 年の東京オリンピック開催に向け, 公衆無線 LAN の整備が進められており, 屋内外でシームレスに無線 LAN を利用できる環境が整いつつある. 日本では 4G の普及が進んでいることから, 公衆無線 LAN の個人利用者数の伸びは落ち着きつつあるが, 今後, 訪日外国人旅行者等の増加により, 都心や観光地などにおいて公衆無線 LAN の利用者数が飛躍的に増大する可能性がある. 無線 LAN の整備を更に進める上で, 多数の様々なユーザが無線 LAN を利用する際のスループット性能を, シミュレーションや解析モデルにより詳細に把握しておく必要があると考えられる.

IEEE 802.11 DCF をはじめとする無線 LAN の多くのプロトコルでは, 一つの無線リソースを複数の端末がランダムアクセス方式により共有する手法が採用されている. このため, 無

線 LAN が混みあってくると, 端末間で (フレーム衝突等による) 競合が発生し, 端末間の競合関係が無線 LAN の性能に予期せぬ影響を及ぼす.

以前, 我々は, IEEE 802.11 DCF ベースの無線 LAN を複数の端末が利用する場合に, 2 つの安定状態 (双安定状態) が出現することを解析モデルから予想し, 実際に双安定状態が出現することをシミュレーションにより確認した [4]. 双安定現象は, 無線 LAN を利用する端末からのフレーム送信量が無線 LAN の処理能力を上回り始める領域 (飽和/非飽和境界領域) で発生する. 双安定状態の 1 つでは各端末は非飽和状態 (端末がフレームを滞りなくアクセスポイント (Access Point: AP) に送信している状態) にあり, もう 1 つでは各端末は飽和状態 (端末が AP にフレームを送信する量よりも端末に生成されるフレームの量の方が多く, 端末内部に送信待ちフレームがスタックしている状態) にある. 我々は [4] において, 解析モデ

ルでは飽和/非飽和境界領域で飽和状態と非飽和状態に相当する二つの安定解が存在すること、またシミュレーションでは、シミュレーション開始直後の状態に依存して、端末が全て飽和する状態もしくは端末が全て非飽和にある状態のいずれかに落ち着くことを報告した。

本稿では、前回の報告 [4] を踏まえ、双安定現象についてより詳細に分析した結果について報告する。例えば、双安定状態（飽和状態、非飽和状態）は必ずしも安定ではなく、例えば飽和状態から非飽和状態への遷移や、逆に非飽和状態から飽和状態への遷移を繰り返す場合があること、送信待ちフレームを格納する端末のバッファのサイズが双安定現象の出現に影響すること、端末にフレームが生成されるレイトが全て同一の homogeneous な場合だけでなく、フレーム生成レイトが異なる端末が混在する Inhomogeneous な場合にも双安定状態が出現しうることなどをシミュレーションに現象示す。さらに、フレーム送信処理にかかる時間を相型分布で近似する新たな解析モデルを提示し、提案する解析モデルにおいても双安定現象が確認できることを明らかにする。

以下、2. において、シミュレーションにより確認した双安定現象の様々な性質について詳述する。次いで、3. において、フレーム送信処理にかかる時間を相型分布で近似する解析モデルを提案し、提案モデルに基づき双安定現象に関して解析した結果を述べる。最後に、4. でむすびとする。

2. シミュレーションによる IEEE 802.11 DCF の双安定現象の検証

2.1 シミュレーション条件

各端末が IEEE 802.11 DCF に基づいて動作する (C 言語で作製した) シミュレーターによりシミュレーションを行った^(注1)。シミュレーターは、 $1\mu s$ 単位での離散時間軸上で各端末が IEEE 802.11 DCF の仕様に基づき) バックオフ待機とフレーム送信の動作を繰り返すものであり、同一のスロットにおいて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の送信失敗は生じないものとする。シミュレーションシナリオとして、複数端末にそれぞれ一定のレイトでポアソン過程に従ってフレームが生成され、生成されたフレームを各端末が1台の AP に対して次々と送信する場合を想定した。表1はシミュレーション条件をまとめたものである (IEEE 802.11g を想定した)。表1における送信負荷は以下で定義されるものとする。

$$\text{送信負荷} = L \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (1)$$

ここで L はフレーム長、 λ_i は端末 i にフレームが生成されるレイト、 N は端末数である。1つのシミュレーションは (シミュレーション上の時間で) 600 秒間行う。双安定現象の存在を確認するため、送信負荷を一定にしてシミュレーションを実施した場合 (初期バイアスなし) と、最初の 50 秒間だけ送信負荷を 40 Mbps に設定し (無線 LAN は過負荷となる)、50 秒経過後に元々予定した送信負荷に変更して、その後は送信負荷を一定とする場合 (初期バイアスあり) の二通りのシミュレーションを行い (図1)、その結果を比較した。なお、(最初の 50 秒間の影響を取り除くため)、スループット、フレーム衝突率、(送信待ちフレーム格納用) バッファ内の平均フレーム数などは、シミュレーション開始後 200 秒経過してからの結果に基づいて

(注1): NS2 などに比べて、端末内部のフレームの待ち行列長の評価が容易であることから自作シミュレータを利用した。なお、各シナリオにおいて、スループットは NS2 とほぼ同じ結果が得られることを確認している。

表 1: シミュレーション条件

フレーム長	1500 byte
端末数	15, 30
送信待ちフレーム用バッファ	0 - 100 フレーム分
スロット時間	9 μs
Basic Rate	6 Mbps
Data Rate	54 Mbps
送信負荷	20 Mbps - 30 Mbps

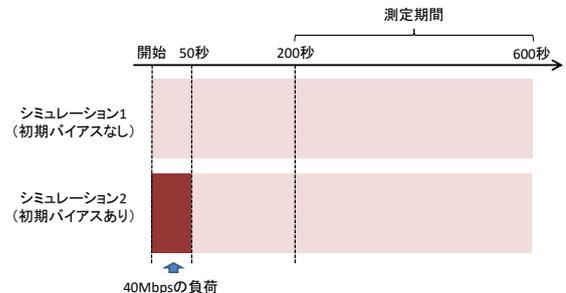


図 1: 初期バイアスの有無

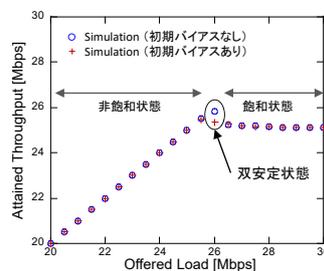


図 2: 送信負荷とスループットの関係 (端末数 15)

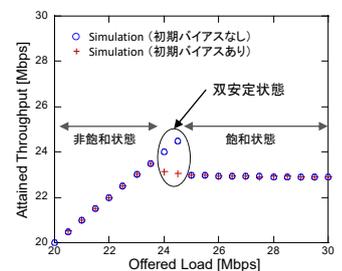


図 3: 送信負荷とスループットの関係 (端末数 30)

評価した。

2.2 結果: Homogeneous なケース

各端末に同一のレイトでフレームが生成される Homogeneous なケースにおいてシミュレーションを行った。送信待ちフレーム格納用バッファのサイズは 100 フレーム分とした。また、送信負荷は 20 Mbps から 30 Mbps まで 0.5 Mbps 刻みで 21 通りの値に設定し、それぞれシミュレーションを実施した。

図2 (端末数 15) と図3 (端末数 30) は送信負荷とスループットの関係を示したものである。図において、青の丸印は送信負荷が一定の場合の結果 (初期バイアスなし) を、赤のプラス記号は最初の 50 秒間の送信負荷が 40 Mbps の場合の結果 (初期バイアスあり) を表している。端末が 15 台のときは (図2)、送信負荷がちょうど 26 Mbps のときに、初期バイアスなしのスループットと初期バイアスありのスループットが異なることが確認された。これは、初期バイアスなしでシミュレーションを継続したときの最終状態と、初期バイアスを加えてシミュレーションを継続したときの最終状態が異なること、つまり双安定現象を示唆する結果である。なお、送信負荷が 26 Mbps 未満では送信負荷とスループットが等しく、端末に生成されたフレームがそのまま送信される非飽和状態にあること、一方、送信負荷が 26 Mbps を超えると送信負荷を増加させてもスループットの変化がない、つまり端末に生成されたフレームが端末内部でスタックしている飽和状態にあることもわかる。つまり、双安定現象は非飽和状態と飽和状態の境界付近で生じている。

端末が 30 台のときは (図3)、送信負荷が 24 Mbps もしくは 24.5 Mbps とすると、やはり初期バイアスの有無によりスループットが異なる状態にそれぞれ落ち着くこと、つまり双安定現

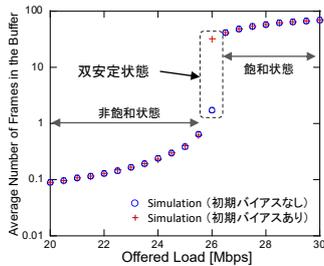


図 4: 送信負荷とフレームキュー長の関係 (端末数 15)

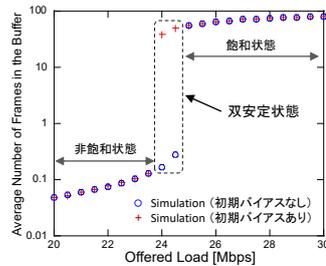


図 5: 送信負荷とフレームキュー長の関係 (端末数 30)

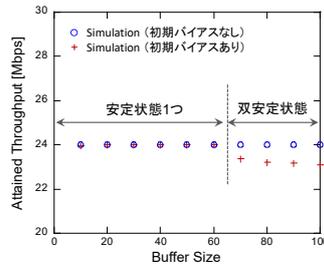


図 8: バッファサイズの影響 (端末数 30, 送信負荷 24 Mbps)

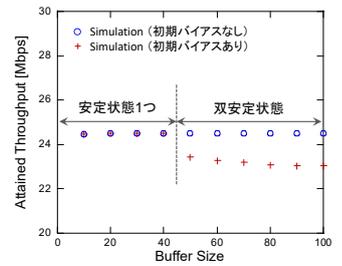


図 9: バッファサイズの影響 (端末数 30, 送信負荷 24.5 Mbps)

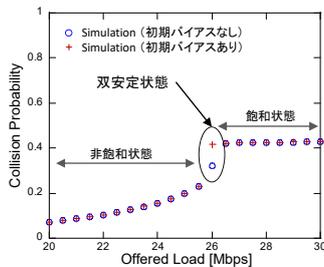


図 6: 送信負荷と衝突率の関係 (端末数 15)

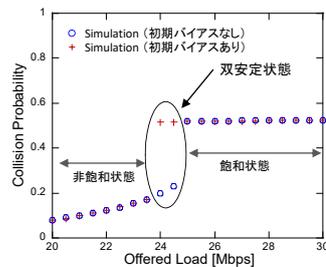


図 7: 送信負荷と衝突率の関係 (端末数 30)

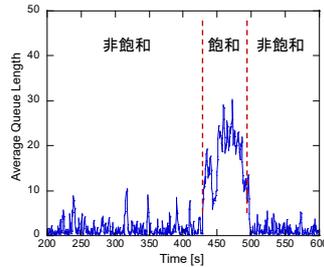


図 10: 双安定状態間の遷移 (バッファ内フレーム数)

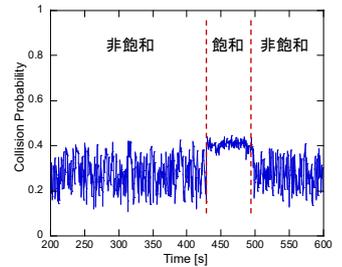


図 11: 双安定状態間の遷移 (衝突率)

象が出現することが確認された。同様に、送信負荷が 24 Mbps 未満では端末は非飽和状態に、また送信負荷が 24.5 Mbps を超えると端末は飽和状態になることも確認された。

図 4 (端末数 15) と図 5 (端末数 30) には、送信負荷と送信待ちフレーム格納用バッファ内の平均フレーム数 (フレームキュー長) の関係を示した。端末 15 台、送信負荷 26 Mbps のときは、初期バイアスなしでは端末のバッファには平均して数フレームしか存在しない非飽和状態にあり、初期バイアスが加わるとバッファには平均して数十フレーム以上存在する飽和状態となることが確認できる。これは、初期バイアスなしでは端末は非飽和状態に継続してとどまること、また (初期バイアスを加えて) 端末をいったん過負荷状態にすると、その状態が継続して保持されることを意味している。興味深いことに、スループットは非飽和状態の方が高く、飽和状態の方が低い。つまり、双安定現象が出現し得る領域では、非飽和の方が得られるスループットが高くなる。図 5 (端末数 30) では、双安定状態の一方はフレームキュー長が小さい非飽和状態であり、もう一方はフレームキュー長の大きい飽和状態であることが、より明瞭に確認できる。

図 6 (端末数 15) と図 7 (端末数 30) は送信負荷とフレーム衝突率の関係を示したものである。いずれの図においても、非飽和状態 (初期バイアスなし) のフレーム衝突率は、飽和状態 (初期バイアスあり) のフレーム衝突率よりも有意に小さい。このフレーム衝突率の差は双安定現象の出現と大きく関係することを 2.4 節において考察する。

図 8 は、端末数が 30、送信負荷が 24 Mbps の場合に、送信待ちフレーム格納用バッファのサイズを変えてスループットをプロットしたものである。バッファサイズは双安定現象に深くかかわっており、バッファサイズが 60 フレーム以下では安定状態は 1 つしか出現しない (この状態は非飽和である)。バッファサイズが 60 フレームを超えると非飽和と飽和の両方の状態 (つまり双安定状態) が出現する。双安定現象の出現はスループットの低い飽和状態の出現を招くことを意味するので、スループットを高く保つためには、バッファサイズはせいぜい数十フレーム以下に抑えた方が良くともいえる。図 9 は、端末数が 30 で送信負荷が 24.5 Mbps の場合の結果を示したもので

あり、同様の傾向が確認できる。

非飽和と飽和の両方の状態は必ずしも安定しておらず、互いの状態を行き来するケースが観察される。図 10 (バッファ内フレーム数) と図 11 (衝突率) は、端末数が 15、送信負荷が 26 Mbps、バッファサイズが 80 フレーム分のときに、1 つのシミュレーションの中で非飽和と飽和の二つの状態が交互する様子を示したものである。この遷移はバッファサイズが 100 フレーム分の場合には見られない。つまり、バッファサイズが増えるほど、飽和/非飽和境界領域における二つの状態 (飽和状態と非飽和状態) はより安定して存在する。

2.3 結果: Inhomogeneous なケース

双安定現象は、全ての端末に同一のレートでフレームが生成される Homogeneous なケースにのみ出現するわけではない。無線 LAN を利用する多くの端末が非飽和状態と飽和状態の境界付近の負荷に置かれている場合であれば、負荷の異なる端末が存在しても双安定現象は生じ得る。このことを示すため、30 台中 25 台の端末 (端末群 A) のフレーム生成レートと残り 5 台の端末 (端末群 B) のフレーム生成レートが異なる状況でのシミュレーションを実施した。具体的には端末群 A の端末について、端末あたりの送信負荷を 0.6 Mbps から 1Mbps まで (0.02 Mbps 刻みで) 21 通りの値に設定し、それぞれ (21 通りの) シミュレーションを行った。端末群 B については、全てのシミュレーションについて端末あたりの送信負荷 (フレーム長 × フレーム生成レート) を 0.5 Mbps に設定した (30 台全体の送信負荷は最小 17.5 Mbps, 最大 27.5 Mbps)。

図 12 (フレームキュー長) と図 13 (衝突率) は、端末群 A の 1 台の端末あたりの送信負荷とフレームキュー長および衝突率の関係を示したものである。1 台の端末あたりの送信負荷が 0.76 Mbps および 0.78 Mbps の場合に、初期バイアスなしのときの結果と初期バイアスありのときの結果が有意に異なり、初期バイアスなしではフレームキュー長は充分小さい非飽和状態にあること、初期バイアスありではフレームキュー長が大きく飽和状態にあることが確認された。

図 14 (フレームキュー長) と図 15 (衝突率) には、端末群 B のフレームキュー長と衝突率をそれぞれ示した。なお、両方の図とも横軸は端末群 A の 1 台の端末あたりの送信負荷を表し

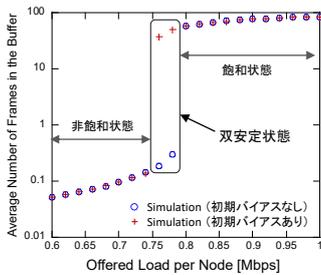


図 12: Inhomogeneous ケース (フレームキュー長: 端末群 A)

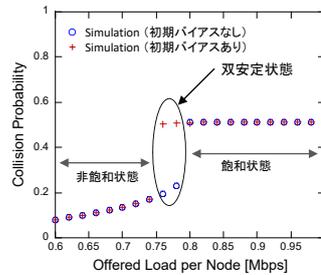


図 13: Inhomogeneous ケース (衝突率: 端末群 A)

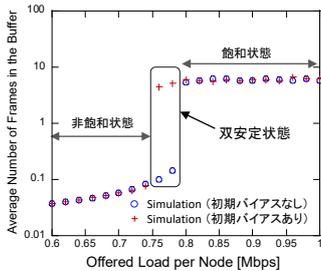


図 14: Inhomogeneous ケース (フレームキュー長: 端末群 B)

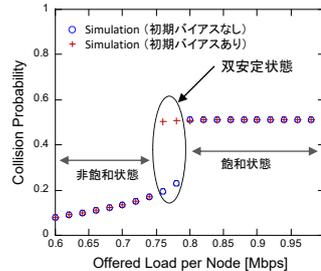


図 15: Inhomogeneous ケース (衝突率: 端末群 B)

ている。やはり、1 台の端末あたりの送信負荷が 0.76 Mbps および 0.78 Mbps の場合では、初期バイアスなしのときの結果と初期バイアスありのときの結果（特に衝突率）が有意に異なる。ただし、端末群 B は元々送信負荷が小さいので、いずれの場合もフレームキュー長は小さな値に留まる。つまり、端末群 B についても（端末群 A と同じ負荷領域で）二つの安定状態が生じるものの、いずれの状態においても端末は非飽和状態にある。

2.4 考察

本節では、本章で示された双安定現象の出現理由について考察する。図 6 や図 7 で示したように、飽和状態の衝突率は非飽和状態に比べて有意に高い。つまり、飽和状態ではフレームの送信の際に衝突に遭遇しやすく、そのためバックオフ待機（つまりフレーム送信待機）の時間が増加し、端末内に送信待ちフレームが蓄積されやすい状態であると推察される。事実、図 8 や図 9 に示すように、飽和状態では送信待ちフレームが端末内に多数蓄積されている。この結果、どの端末もバックオフ期間終了後直ちにフレームの送信を試みるので、チャンネルアイドル状態での送信頻度が高く、衝突率が高い状態に保持されやすい。

一方、非飽和状態は、飽和状態に比べてフレーム衝突が生じにくいので、バックオフ待機時間も短く、端末内の送信待ちフレームも少ない。従って、（送信待ちフレームがないため）バックオフ期間終了後も送信待機が続き、チャンネルアイドル状態でのフレーム送信頻度も低く、フレーム衝突もおきにくい。

このように、飽和/非飽和境界領域では、いったん飽和状態もしくは非飽和状態に入ると、それぞれの状態が継続しやすくなるメカニズムが働き、安定してその状態が継続する。これが双安定現象の基本的な出現メカニズムであると考えられる。

3. 解析モデルによる双安定現象の考察

3.1 前提条件

本稿では、[4] で用いた解析モデル [1-3] を若干簡略化したモデルを用いて、非飽和現象の存在性について考察する。N 台の無線端末と 1 台の AP から構成されるシングルホップ無線 LAN を考える。隠れ端末やさらし端末は存在しないものとする。端末は最大 K 個のフレームを格納できる送信バッファを

持ち、全ての端末には到着率 λ のポアソン過程に従ってフレームが発生する（アプリケーションがフレームを生成、もしくは有線経由でフレームを受信する）とする。フレームは固定長とする（フレームの送信を開始してからフレームの送信終了までの時間を T_D で表す: T_D には ACK の受信などにかかる時間は含まない）。

3.2 フレーム送信処理時間の相型分布によるモデル化

IEEE 802.11 DCF では、以下の手順によりフレームを送信する。

1. 送信待機用タイマーを $[0, CW]$ 間のランダムな値に設定してカウントダウンを開始
2. 他の端末がフレーム送信中はタイマーの動きを停止
3. タイマーが 0 になった時点でフレームを送信
4. 送信先からの確認応答が届かない場合は 1~3 の処理を繰り返す

以上の処理は必ずしもシーケンシャルに行われるわけではない。例えば処理が $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ と進んだあと 2 に戻り、また $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ と進んだあと 1 に戻る、といったことを繰り返しながら処理が進み、しかもこの処理の遷移は確率的である。

本稿では、このフレーム送信処理の特徴を考慮し、フレーム送信処理にかかる時間（以下、フレーム送信処理時間）を表現 (α, U) を持つ相型分布 [5] でモデル化する。相型分布の相の空間は $\{1, 2, 3, 4\}$ とし、それぞれ以下の意味を持たせる。

- 相 1 送信待機中（タイマーカウントダウン中）
- 相 2 送信待機中（他端末送信中）
- 相 3 フレーム送信中（送信成功）
- 相 4 フレーム送信中（送信失敗）

(α, U) は以下で与えられるとする。

$$U \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} -(\nu + \gamma) & \gamma & (1-p)\nu & p\nu \\ \mu & -\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu & 0 \\ \mu & 0 & 0 & -\mu \end{pmatrix},$$

$$\alpha \stackrel{\text{def}}{=} (1, 0, 0, 0).$$

相 1 から相 3 もしくは相 4 への遷移（遷移率 ν ）はタイマーが 0 となりフレーム送信を開始することに相当する。p はフレーム送信に失敗する確率である。相 1 から相 2 への遷移（遷移率 γ ）は、他の端末が送信を開始することに相当する。相 2 および相 4 から相 1 への遷移は（遷移率 μ ）、フレームの送信が開始されてから ACK 受信終了（もしくは ACK が到達せず、送信失敗が判別する）までの処理に相当する。また相 3 からは吸収状態のみ遷移し（遷移率 μ ）、これによりフレーム送信処理が終了する。この相 3 から吸収状態への遷移は送信の成功に相当し、吸収状態への遷移のあと相 1 に戻って次のフレーム送信処理を開始する。

3.3 M/PH/1 モデルによる解析

フレームの到着はポアソン過程に従うことを仮定しているのので、端末のフレーム処理は M/PH/1 モデル [5] により表現される。時刻 t におけるバッファ内フレーム数^(注2)を $L(t)$ 、フレーム送信処理時間が従う相型分布の相を $J(t)$ で表す。またバッファ

(注2): サービス（送信処理）中のフレームもバッファ内フレームに含めることとする。

$$R \stackrel{\text{def}}{=} \lambda(\lambda I - \lambda \mathbf{1}^\top \boldsymbol{\alpha} - U)^{-1} = \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)\mu\nu(1-p)} \begin{pmatrix} (\lambda + \mu)^2 & (\lambda + \mu)\gamma & (\lambda + \mu)(1-p)\nu & (\lambda + \mu)p\nu \\ (\lambda + \mu)^2 & (\lambda + \mu)\gamma + \mu\nu(1-p) & (\lambda + \mu)(1-p)\nu & (\lambda + \mu)p\nu \\ \lambda(\lambda + \mu) & \lambda\gamma & (\lambda + \mu)(1-p)\nu & \lambda p\nu \\ (\lambda + \mu)^2 & (\lambda + \mu)\gamma & (\lambda + \mu)(1-p)\nu & (\lambda p + \mu)\gamma \end{pmatrix}. \quad (2)$$

に n 個のフレームが存在し、フレーム送信処理時間の相が j のときの端末の状態を (n, j) で表す。本来、相はフレーム送信処理のモデル化のために導入した概念であるが、端末がフレームを持たないとき ($L(t) = 0$ のとき) も、チャンネルが空きならば $J(t) = 1$ 、占有中 (他端末がフレーム送信中) ならば $J(t) = 2$ と相の状態を定める。このとき、確率過程 $\{L(t), J(t)\}$ は連続時間マルコフ連鎖になる。

状態 (n, j) の定常分布を $\pi_{n,j}$ で表し、保持するフレーム数が n の定常分布ベクトルを $\boldsymbol{\pi}_n = (\pi_{n,1}, \pi_{n,2}, \pi_{n,3}, \pi_{n,4})$ と定める。フレームが到着率 λ のポアソン過程に従って到着するならば、定常分布の大域平衡方程式は次のように行列形式に書き下すことができる。

$$\boldsymbol{\pi}_0(U_0 - \lambda I) + \boldsymbol{\pi}_1 \mathbf{u}^\top \boldsymbol{\alpha} = \mathbf{0}, \quad (3)$$

$$\lambda \boldsymbol{\pi}_{n-1} + \boldsymbol{\pi}_n(U - \lambda I) + \boldsymbol{\pi}_{n+1} \mathbf{u}^\top \boldsymbol{\alpha} = \mathbf{0}, \quad n = 1, \dots, K-1, \quad (4)$$

$$\lambda \boldsymbol{\pi}_{K-1} + \boldsymbol{\pi}_K U = \mathbf{0}. \quad (5)$$

ここで I は単位行列、 \top は転置記号であり、

$$U_0 \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} -\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ \mu & -\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{u}^\top \stackrel{\text{def}}{=} -U \mathbf{1}^\top = (0, 0, \mu, 0)^\top, \quad \mathbf{1} \stackrel{\text{def}}{=} (1, 1, 1, 1).$$

この大域平衡方程式を解くことで以下が求まる (付録)。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\pi}_0 &= c \left(\frac{\lambda + \mu}{\lambda + \gamma + \mu}, \frac{\gamma}{\lambda + \gamma + \mu}, 0, 0 \right), \\ \boldsymbol{\pi}_n &= \boldsymbol{\pi}_0 R^n, \quad n = 1, \dots, K-1, \\ \boldsymbol{\pi}_K &= \boldsymbol{\pi}_0 \lambda R^{K-1} (-U)^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

ここで c は正規化定数である。また公比行列 R は (2) で表される。なお、平均サービス時間 T は

$$T = \boldsymbol{\alpha}(-U)^{-1} \mathbf{1} = \frac{\mu + \nu + \gamma}{\mu(1-p)\nu},$$

であるから、本待ち行列モデルの使用率 ρ は以下で定まる

$$\rho = \lambda T = \frac{\lambda(\mu + \nu + \gamma)}{\mu(1-p)\nu}.$$

3.4 指数バックオフ等の考慮

端末が送信待機のためにバックオフタイマをカウントダウンする時間は、1回のフレーム送信処理中に端末が相1に滞在する時間の和に相当し、その期待値は ν の逆数に等しい。フレーム送信失敗時に送信待機時間を指数的に増大させる指数バックオフ処理を考慮すると

$$\nu^{-1} = \frac{(1-p)T_s}{1-p^{n_{max}+1}} \sum_{n=0}^{n_{max}} p^n \left(\frac{CW(n)}{2} + 1 \right). \quad (7)$$

ここで、 $CW(n)$ は以下で定義される n 回連続再送時のコンテ

ンションウィンドウサイズ、 n_{max} は最大再送回数、 T_s はスロット時間である。

$$CW(n) \stackrel{\text{def}}{=} \min \{2^n (CW_{min} + 1), CW_{max} + 1\} - 1.$$

CW_{min} および CW_{max} は最小および最大コンテンションウィンドウサイズである。

フレーム送信失敗の原因はフレーム衝突である場合、(7)に含まれる送信失敗確率 p は IEEE 802.11 DCF を共通に利用する端末間の相互関係により決定され、端末数が N のとき p は以下で見積もることができる。

$$p = 1 - e^{-(N-1)rT_s}, \quad r = \nu \frac{\sum_{k=1}^K \pi_{k,1}}{\pi^{(1)}}.$$

ここで r は端末が相1においてフレーム送信を試みるレートである。また、1台の端末が他の端末のフレーム送信中 (送信成功) のため送信待機している事象は、他の $N-1$ 台中のいずれか1台が相3にいる事象と等しい。このことから

$$(1-p_f)\pi^{(2)} = (N-1)\pi^{(3)},$$

$$\pi^{(2)} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=0} \pi_{k,2}, \quad \pi^{(3)} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=1} \pi_{k,3}.$$

ここで、 p_f は、任意の端末が送信待機状態 (相2) にある条件で他の端末がフレームの送信に成功している条件付確率である。大域平衡方程式より $\gamma\pi^{(1)} = \mu\pi^{(2)}$ が導かれることから、

$$\gamma = \frac{\mu\pi^{(2)}}{\pi^{(1)}} = \frac{\mu(N-1)\pi^{(3)}}{(1-p_f)\pi^{(1)}}, \quad \pi^{(1)} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=0} \pi_{k,1}.$$

なお p_f は以下で見積もることができる。

$$p_f = 1 - \frac{(N-1)(1-e^{-rT_s})e^{-(N-2)rT_s}}{1-e^{-(N-1)rT_s}}.$$

μ は以下で与えられる。

$$\mu_s = \frac{1}{T_D + SIFS + T_{ACK} + DIFS}.$$

ここで $SIFS$, $DIFS$, T_{ACK} は、それぞれ SIFS 時間、DIFS 時間、ACK フレーム送信時間である。

3.5 モデルパラメタの決定と双安定現象の出現

3.4節で述べたように、3.3節のモデルに含まれる3つのパラメタ (ν, γ, p) のうち ν は p から (7) により定まるので、実質的なパラメタは (γ, p) の二つであり、この二つは端末の定常分布に依存する。いま、 $\mathbf{x} \stackrel{\text{def}}{=} (\gamma, p)$ と定義し、パラメタ \mathbf{x} を有する M/PH/1 モデルの定常分布から定まるパラメタを \mathbf{x}_{new} とすると、 \mathbf{x}_{new} と \mathbf{x} との間には関数関係が存在するので、これを $\mathbf{x}_{new} = G(\mathbf{x})$ と記載することとすると、パラメタ値は最終的には

$$\mathbf{x} = G(\mathbf{x}), \quad (8)$$

を満たさなければならない。(8)の解は、例えばパラメタの初期値 \mathbf{x}_0 をある値に定め、

$$\mathbf{x}_{n+1} = (1-\alpha)G(\mathbf{x}_n) + \alpha\mathbf{x}_n, \quad (9)$$

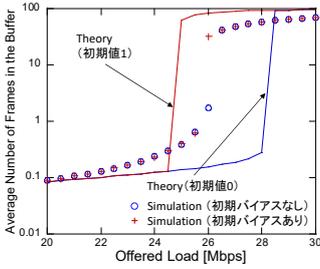


図 16: 解析 vs. シミュレーション: キュー長 (端末数 15)

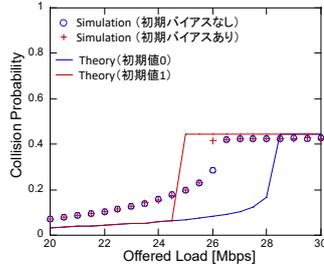


図 17: 解析 vs. シミュレーション: 衝突率 (端末数 15)

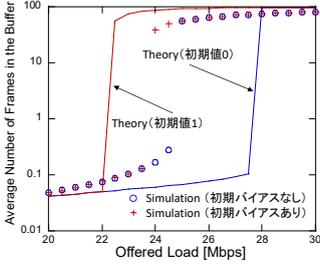


図 18: 解析 vs. シミュレーション: キュー長 (端末数 30)

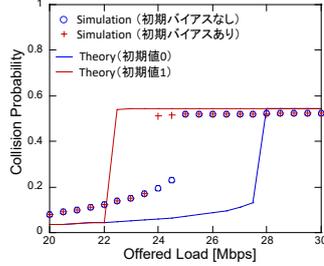


図 19: 解析 vs. シミュレーション: 衝突率 (端末数 30)

によりパラメタを収束するまで順次更新することにより求めることができる。

(8) のような方程式を満たす解を求める手順は、本解析モデルに限らず IEEE 802.11 DCF の性能評価を扱う解析モデルに共通に存在し、解の一意性 ((8) による逐次代入で解を求める場合は初期値非依存性) について幾つかの研究が行われている。例えば、IEEE 802.11 DCF の代表的な解析モデルである Bianchi モデル [6] では解の一意性が証明されており、Bianchi モデルを一般化したモデルにおいても、一般的な条件では解が一意であることが示されている [7]。一方、我々は、非飽和状態を扱うモデル (本モデルの詳細版: ポストバックオフを考慮したもの) [1-3] において、飽和/非飽和境界領域で二つの解が存在することを報告している [4]。

3.6 シミュレーション結果との比較

2.2 節と同じ条件 (Homogeneous ケース) で解析モデルにより、送信待機フレーム用バッファ内フレーム数 (キュー長) と衝突率を求め、シミュレーションと比較した。双安定現象の有無を調べるため、以下の二通りのパラメタの初期値について、それぞれ評価を行った。

$$\mathbf{x}_0^0 \stackrel{\text{def}}{=} (0, 0), \quad \mathbf{x}_0^1 \stackrel{\text{def}}{=} (1.0 \times 10^5 (N-1), 0).$$

ここで \mathbf{x}_0^0 (初期値 0) は他端末の送信がない状態、 \mathbf{x}_0^1 (初期値 1) は他端末の送信が頻繁に行われる状態に対応する。端末が 15 台のときの結果を図 16 (キュー長) と図 17 (衝突率) に示す。送信負荷が 25 Mbps から 28 Mbps の間で初期値 0 と初期値 1 は異なる結果に収束し、いわゆる双安定現象が本解析モデルによっても確認された。初期値 0 による結果はシミュレーションの初期バイアスなしに、初期値 1 による結果がシミュレーションの初期バイアスありに概ね対応する。ただし、解析モデルによる結果とシミュレーション結果とはやや乖離がある。図 18 (キュー長) と図 19 (衝突率) は端末が 30 台のときの結果を示したものである。同様の傾向が確認できる。

4. むすび

端末からのフレーム送信量が無線 LAN の処理能力と同程度

になると、無線 LAN に二つの異なる状態が安定に存在するようになる双安定現象について、シミュレーションにより詳細に分析するとともに、フレーム送信処理を相型分布により表現する解析モデルにおいても双安定現象が出現することを確認した。今後は、双安定状態の出現を防ぐ (安定な状態をただ一つとする) 方策などについても検討を進める予定である。

文 献

- [1] 成田侑樹, 李想, 後藤優太, 塩田茂雄, 小室信喜, 関屋大雄, 阪田史郎, 村瀬勉, 本吉彦, 山垣則夫, “連続時間マルコフ連鎖による IEEE 802.11 DCF 用性能評価モデル,” 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, NS2015-125, pp.81-86, 2015.
- [2] 成田侑樹, 李想, 後藤優太, 塩田茂雄, 小室信喜, 関屋大雄, 阪田史郎, 村瀬勉, 本吉彦, 山垣則夫, “連続時間マルコフ連鎖を用いた Wi-Fi 性能評価法の提案と Wi-Fi 間干渉評価,” 待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, pp.25-34, 2016.
- [3] X. Li, Y. Narita, Y. Gotoh, and S. Shioda, “Performance analysis of IEEE 802.11 DCF based on a macroscopic state description,” IEICE Transactions on Communications, vol.E101-B, no.8, pp.1923-1932, 2018.
- [4] 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オリティ研究会, CQ2018-25, pp.43-48, 2018.
- [5] 塩田茂雄, 河西憲一, 豊泉洋, 会田雅樹, 待ち行列理論の基礎とその応用, 共立出版, 2014. 川島幸之助 (監修).
- [6] 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.
- [7] A. Kumar, E. Altman, D. Miorandi, and M. Goyal, “New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs,” IEEE/ACM Trans. Networking, vol.15, no.3, pp.588-601, 2007.

付 録

(3) と (4) の両辺に右から $\mathbf{1}^\top$ を乗じることで次を得る。

$$\lambda \pi_n \mathbf{1}^\top = \pi_{n+1} \mathbf{u}^\top, \quad n = 0, 1, \dots, K-1. \quad (\text{A}\cdot 1)$$

(A-1) の両辺に右から α を乗じると

$$\lambda \pi_n \mathbf{1}^\top \alpha = \pi_{n+1} \mathbf{u}^\top \alpha, \quad n = 0, 1, \dots, K-1. \quad (\text{A}\cdot 2)$$

これを (3) と (4) に代入して

$$\begin{aligned} \mathbf{0} &= \pi_0 (\lambda \mathbf{I} - \lambda \mathbf{1}^\top \alpha - U_0), \\ \lambda \pi_{n-1} &= \pi_n (\lambda \mathbf{I} - \lambda \mathbf{1}^\top \alpha - U), \quad n = 1, \dots, K-1. \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 3)$$

ここで

$$\begin{aligned} \lambda \mathbf{I} - \lambda \mathbf{1}^\top \alpha - U_0 &= \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma & 0 & 0 \\ -\lambda - \mu & \lambda + \mu & 0 & 0 \\ -\lambda & 0 & \lambda & 0 \\ -\lambda & 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}, \\ \lambda \mathbf{I} - \lambda \mathbf{1}^\top \alpha - U &= \begin{pmatrix} \nu + \gamma & -\gamma & -(1-p)\nu & -p\nu \\ -\lambda - \mu & \lambda + \mu & 0 & 0 \\ -\lambda & 0 & \lambda + \mu & 0 \\ -\lambda - \mu & 0 & 0 & \lambda + \mu \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

正規化定数を c とすると, (A-3) の最初の式から (6) の 1 番目の式が, (A-3) の 2 番目の式より (6) の 2 番目の式が, また (5) より (6) の 3 番目の式が導かれる。