

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

近年では情報通信技術の進歩により、スマートフォンやタブレット、PC といった端末の普及と高性能化によって大量のデータ通信を行う機会が増えている。また、端末はアクセスポイントだけでなく、モバイルルータなどのテザリング機器とも Wi-Fi を利用した通信を行う機会が多く、Wi-Fi 通信を使用する端末が密集している環境ではそれぞれの端末が影響を及ぼし合うことにより端末が獲得することのできるスループットに変化が生じる。このようなネットワークの特性は必ずしも明らかになっておらず、シミュレーション評価だけでなく解析モデルを構築することによってそのメカニズムを把握することは重要である。

ネットワークメカニズム解明のため、現在まで多くの解析モデルの研究がなされてきた。中でも重要な手法として Bianchi による手法がある [1]。この手法の特徴は無線端末の状態をバックオフステージとバックオフカウンタの 2 つで表現して飽和状態 (常に送るべきフレームを所持する) のネットワーク性能評価を行うことである。また、Bianchi の手法を改良することにより、非飽和状態も扱うことのできる手法も発表されている [2][3]。しかし、これらの手法は解析が複雑になりやすく難解である。また、既存のモデルでは仮定として、すべての端末の伝送レートは同一であり、扱うフレーム長も固定のモデルとなっており、フレーム長の異なる端末が混在するネットワークの解析を行うことはできない。

### 1.2 研究目的

本研究では、無線端末の状態を 3 つのマクロな状態に分けて表現する。端末の状態とフレームキュー長の変化を連続時間マルコフ連鎖によってモデル化することで性能解析を行う。提案モデルにより、飽和状態のみならず、(既存の性能評価モデルでは扱いが難しかった) 非飽和状態の性能解析を容易に実現することができる。また、従来の解析モデル ([5]-[8]) では解析することのできなかつた端末のフレーム長の長さや伝送レートの違いを考慮することができるようモデルに拡張を加えた。

本論文ではすべての競合端末が互いにキャリアセンスすることができるシナリオだけでなく、隠れ端末や晒し端末が存在するシナリオについても提案解析手法を適用し、ネットワークの特性を明らかにする。

## 1.3 論文の構成

### 第1章 序論

本研究の概要について述べる.

### 第2章 背景技術

本研究に関連する技術, 既存研究について述べる.

### 第3章 Wi-Fi 性能評価法 全ての端末をキャリアセンス可能なモデル

ネットワーク内において異なるフレーム長を使用しているユーザが競合しあう状況において有効な解析手法を提案する.

### 第4章 Wi-Fi 性能評価法 キャリアセンスできない端末が存在するモデル

異なるフレーム長を使用している端末が競合しているネットワークにおいて, キャリアセンス可能な端末に偏りが発生しているシナリオに対応した解析手法について述べる.

### 第5章 まとめ

本研究のまとめを述べ, 今後の課題を提案する.

## 第 2 章

### 背景技術

本章では本研究に関連する無線 LAN の背景技術について述べる。

#### 2.1 IEEE802. 11

IEEE802. 11 は, The Institute of Electrical and Electronic Engineers (米国電気電子学会) によって定められた無線 LAN の標準規格である。IEEE802. 11 では, 持ち運びできる機器による無線通信に対応させるために, Medium Access Control (MAC) と Physical layer (PHY) の仕様を拡張することが目的である。IEEE802. 11 は, 無線ネットワークにある無線機器の動作を規定している。この標準は, アドホックネットワークとインフラストラクチャネットワークをサポートしている。また, フレーム分割や複数の伝送レートをサポートしている。物理層では, 無線チャネルのシグナル技術を規定している [4]。

IEEE802. 11 では物理層とデータリンク層の一部である MAC 層が定義されている。MAC 層ではフレームの断片化, 暗号化, 電力管理, メディアアクセス制御, 優先制御, ローミング, アクセスポイントとステーション認証や従属関係などの機能がある。特に CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) と呼ばれるメディアアクセス制御方式は重要である。ちなみに, MAC 層のフレームとは別に物理層にフレームを用いるサブレイヤも規定されている。現在利用されている IEEE802. 11 無線 LAN のその他の規格には IEEE802. 11b, IEEE802. 11a, IEEE802. 11g, IEEE802. 11n, IEEE802. 11ac などがあり, 伝送速度や周波数帯, 変調方式 (情報を最適な電気信号に変換する操作の方式) などの数値に差がある。一覧を以下表に示す。本研究では, IEEE802. 11a を用いて実験を行った。周波数帯, 伝送レート, 変調方式, 策定期間を表 2. 1 に示す。

表 2. 1 IEEE802. 11 各規格特徴

規格	周波数帯 [ GHz ]	伝送レート [ Mbps ]	変調方式	策定期間 [ 年 ]
IEEE802.11	2.4	2	FHSS,DSSS	1997
IEEE802.11b	2.4	11	DSSS/CCK	1999
IEEE802.11a	5.0	54	OFDM	1999
IEEE802.11g	2.4	54	DSSS/CCD,OFDM	2003
IEEE802.11n	2.4/5.0	600	MIMO/OFDM	2009
IEEE802.11ac	5.0	6930	OFDM/MU-MIMO	2014

## 2.2 周波数

### 2.2.1 2.4GHz

2400～2483.5MHz には5MHz 間隔で13チャンネルが用意されていて、さらにもとあった2471～2497MHz の1チャンネルを加えて合計14チャンネルが使用可能となっている。しかし、同一の場所で使用する場合、干渉を避けるためにスペクトラムが重ならないように使用すると3チャンネル場合によっては4チャンネルまで同時に使用できる。2.4GHz 近辺の周波数帯はISMバンドと呼ばれ、一般によく使われている周波数であり、Wi-Fi、医療機器、電子レンジ、コードレス電話、Bluetoothなどに広く利用されているので、5Gに比べ電波干渉が発生しやすく通信速度低下をもたらす可能性がある。また5GHzに比べ壁や床等の障害物の透過性がよく届きやすい。

### 2.2.2 5GHz

5180～5320MHz、5500～5700MHz に20MHz 間隔で19のチャンネルが用意されている。無線LAN以外では使用されることが少ない電波帯域であるため、電波干渉が発生しにくく、安定した通信を行うことができる。電波の透過性はよく、電波の跳ね返りがよいため、周波数を高くすると囲まれた空間などの特定の条件下では通信状態は良くなる。

## 2.3 動作モード

IEEE802.11ではインフラストラクチャモードとアドホックモード2種類の動作モードがある。インフラストラクチャモードは通信を行うためにAPなどの通信基盤を利用する、アドホックモードでは無線端末同士がそれぞれ直接無線通信をおこなう。無線間のホップ数は、インフラストラクチャネットワークは一般的に1ホップであるが、アドホックネットワークは数ホップとなることもある。本研究では、APを利用するインフラストラクチャモードを使用する。

### 2.3.1 インフラストラクチャモード

インフラストラクチャモードとは AP を利用して無線通信を行う動作モードである。AP は主に端末が無線ネットワークを利用してインターネットに接続する際に使用されている。複数の無線端末が通信を行っている場合を BSS(Basic ServiceSet) と呼ぶ。以下にインフラストラクチャモードの図 2.1 を示す。

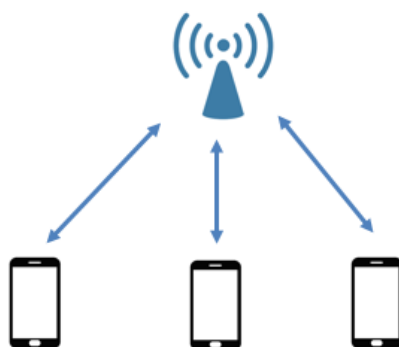


図 2.1 インフラストラクチャモード

### 2.3.2 アドホックモード

アドホックモードは一般的に端末間での直接通信に用いられる。このため容易にネットワークを構築できるが、ネットワーク全体の規模は通信を行う端末同士の電波が互いに届く範囲に限られるため小規模となる。無線 LAN の最も基本的なネットワークであり、IBBS(Independent Basic Service Set)とも呼ばれている。アドホックネットワークでは一時的に集まった無線端末で、素早くネットワークを構築することを目的としている。インフラストラクチャモードでは最初に基盤設備を構築しなければならないが、アドホックネットワークでは基盤設備を必要としないネットワークを構築することができる。以下の図 2.2 にアドホック・ネットワークトポロジを示す。

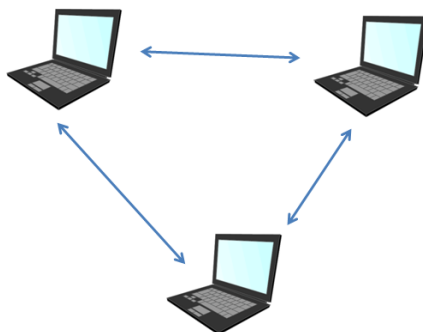


図 2.2 アドホックモード

### 2.3.3 AP との接続

IEEE802.11 では端末がネットワークを探索するための機能があり、スキャンングと呼ばれる。スキャンングには 2 種類ありそれぞれアクティブスキャンング、パッシブスキャンングと呼ばれる。

#### パッシブスキャンング

端末が AP から周期的に送信される制御信号を監視、受信することによってネットワークを検索する方法。制御信号には AP の識別番号、MAC アドレスが記載されている。利用可能なチャンネルが複数ある場合には各チャンネルにたいして順番に検索を行う。

#### アクティブスキャンング

パッシブスキャンングにおいて AP からの制御信号を受信できなかった際に用いられる。アクティブスキャンングはプローブ要求/応答フレームを交換することで周辺に存在する AP を検索する。利用可能なチャンネルそれぞれに対して 802.11 のネットワーク検索信号であるプローブ要求と呼ばれるフレームを送信する。プローブ要求フレームの中には探しているネットワークの SSID (識別番号) またはブロードキャスト SSID が設定されている。プローブ要求を受け取った AP は要求されている SSID が自分のものであるかブロードキャスト SSID である場合、送信端末に対してプローブ応答フレームを返す。

## 2.4 隠れ端末問題及びさらし端末問題

無線 LAN では送受信する方法として IEEE802.11 を利用しているが、これは各端末が送信する搬送波を互いに検出することによって多重アクセス制御を行う CSMA/CA 方式をベースとしている。この CSMA/CA 方式は同じエリア内に存在する無線局同士のキャリアが互いに検出できることを前提としている。しかし無線 LAN ではキャリアセンス半径の外に存在する同じチャンネルを使用している無線端末がある場合フレームの衝突が頻繁に発生しフレームの破棄が頻繁に発生する。フレームの到着を補償しない UDP を利用する際の通信品質に大きな影響を与える。

### 2.4.1 隠れ端末問題

隠れ端末問題とは端末のキャリアセンス範囲外に存在する端末同士が、フレームを送る際に互いの無線使用状況がわからなくなるために、フレームの衝突フレーム破棄が生じる問題である。

隠れ端末問題は RTS/CTS を使用することで解決できる。以下の図 2.3 に示すように 3つの無線局が配置され両端の端末(端末1, 端末3)でキャリアが検出できない場合には、中央の無線局(AP)でパケットの衝突が発生する。隠れ端末問題によるパケット衝突を軽減するために、IEEE802.11 では送受信局間で送信要求 (RTS:Request To Send) フレームと送信確認 (CTS:Clear To Send) フレームを交換する方式をとっている。RTSを受け取った端末はデータを受信可能な状態であれば CTS を各端末に送信する。この際の送受信に関係のない端末は NAV(Network Allocation Vector) となり、決められた時間の送信が禁止された状態となる。端末1が送信したい場合を考える。

- ① 端末1はAPにRTSを送信する
- ② APはすべての端末にCTSを送信する
- ③ 端末1以外はNAVとなる
- ④ 端末1は送信を行う

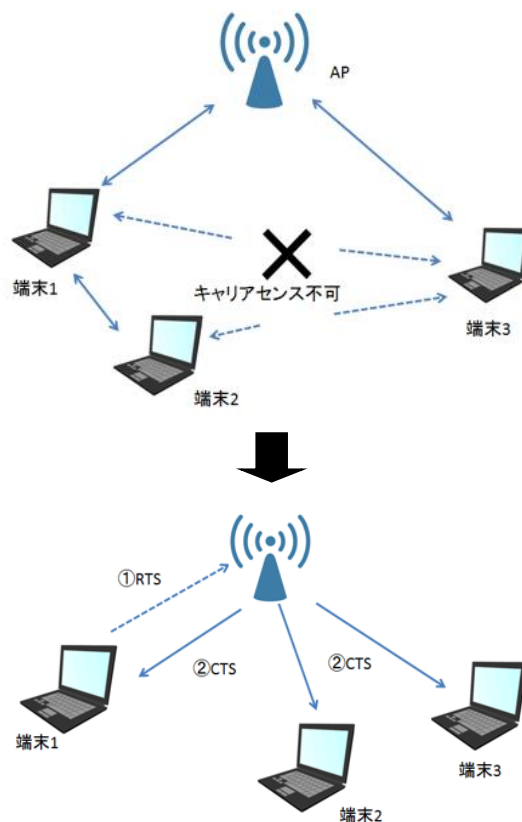


図 2.3 隠れ端末問題に対し RTS/CTS を利用する例

### 2.4.2 さらし端末問題

隠れ端末問題に加えて，さらに端末の数が増えると更なる問題が発生する．以下の図 2. 4 のように 4 つの端末が配置され，すべての端末は隣接する端末のみとキャリア検出が可能であるとする．端末 1 がデータを送る際に，データパケット伝送時の RTS/CTS によって AP2 は AP1 からの CTS フレームを受信し，端末 1-AP1 間の通信が終了するまで，待機状態となる．この待機状態の間に，AP2 は何の対応もできないため，端末 2 は再送を繰り返し該当するパケットは廃棄される．これをさらし問題と呼ぶ．さらし端末の回避法は無線リンクに異なる周波数チャンネルを割り当てればさらし端末問題が回避できる．例のような簡単な構成のネットワークではさらし端末を回避できるチャンネルパターンが容易に見出せるが，ネットワーク構成が複雑化するにつれて，チャンネル割当のパターンも複雑化する．

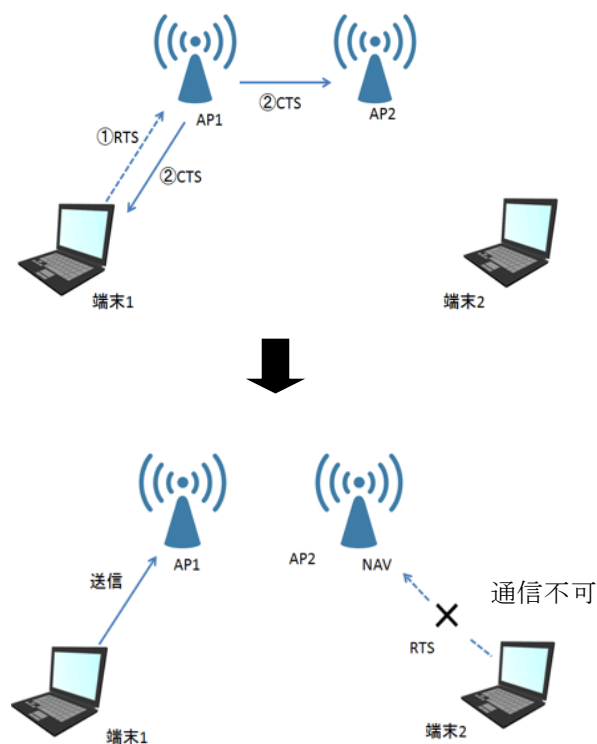


図 2.4 さらし問題の例



## 2.5 MAC (Medium Access Control) プロトコル

MAC 層において有線や無線で直接つながる端末同士のフレームの送信方法を定めたプロトコルを MAC プロトコルと呼ぶ。様々な種類があるが、本研究では IEEE802.11 を使用するため、MAC プロトコルの規格 IEEE802.11 について述べる。MAC 層ではフレームの断片化、暗号化、電力管理、メディアアクセス制御、ローミング機能などの管理を行っている。特にメディアアクセス制御が効率的な無線通信を行う上で最も重要となる。無線 LAN では空間を媒体にして端末同士の通信が行われるため、ある端末がフレームの送信を行う際はその周囲全ての端末は受信することになる。空間を共有している端末が複数ある場合、その端末同士が同時にフレーム送信を行うと、フレームが正常に受信されない場合がある。IEEE802.11 ではこれらの問題を解決するために DCF (Distributed Coordination Function) と呼ばれる CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式を採用した MAC 制御を持ち、オプションとして PCF (Point Coordination Function) を用意している。この制御によって複数の STA が同一の無線チャンネルを使用してもデータ衝突を抑えた効率の良い通信を行うことができる。

### DCF (Distributed Coordination Function)

DCF はキャリアセンシングを用いる自律分散型チャンネルアクセス制御を提供する MAC プロトコルである。周辺に同一チャンネルを利用する無先端末が存在したとしても CSMA/CA によって同一チャンネルを共有して通信でできる。CSMA/CA の説明は後述する。

### PCF (Point Coordination Function)

PCF では無先端末ネットワーク内においてポーリングに基づく集中制御によるアクセス制御が行われる。ポーリングとは AP が各端末に順番にポーリング信号を送信し、AP からポーリング信号を受け取った端末のみがフレーム送信の許可をされるアクセス制御方式である。

AP がネットワーク内の端末に対して順番にポーリングを行うためパケット同士の衝突は発生しないが、周辺に同一のチャンネルを利用する AP が存在した場合、それぞれのポーリングが衝突してしまう可能性がある。

### 2.5.1 CSMA/CA

CSMA/CA ではフレームの送信を試みようとする無線端末は事前にキャリアセンスを行い無線チャンネルの使用状況を確認し他の端末による送信が行われている間は送信を見合わせることで衝突をできるだけ回避する。フレームを送信していない無線端末は搬送波（送信するデジタル信号を乗せた電波）の使用状況をセンスして一定期間未使用 (Idle 状態) であればキャリアを誰も使用していないと判断して送信を開始する。無線チャンネルが使用中 (Busy 状態) であれば送信を延期する。

### 2.5.2 キャリアセンス・レベル

キャリアセンスを行うに当たってチャンネルが使用中であるかを判断するために受信信号の電力レベルを用いている。例として IEEE802.11a ではキャリアセンス・レベルは-62dBm と規定されている。これはキャリアセンスエリア内から-62dBm 以上の電力レベル波を検出した場合にはチャンネル使用中と判断し、-62dBm 未満の電力レベルであれば未使用であると判断する。キャリアセンス・レベルが以上に低く設定されている場合では遠方からの微小な信号に対しても敏感に反応してしまうため、送信機会の減少を引き起こす。CSMA が正常に動作するために IEEE802.11 では適当な値が設定されている。

#### 伝送レート規定

IEEE802.11 無線 LAN では、受信レベルに応じてデータ伝送速度を変化させるフォールバック方式が採用されている。フォールバック閾値はシステムごとに異なるが、ここでは本研究で使用する IEEE802.11a 規格について説明する。

フォールバック閾値はパケットを伝送した場合にパケット誤り率 10%を得る最低受信レベルとして規定されている。データ伝送速度ごとに規定されている必要最小受信レベル以上の受信レベルが得られる範囲で、以下表 2.2 に示す伝送レートが実現される。

表 2.2 IEEE802.11a 伝送レート

データ伝送速度	必要最小受信レベル
6Mbps	-82dBm
9Mbps	-81dBm
12Mbps	-79dBm
18Mbps	-77dBm
24Mbps	-74dBm
36Mbps	-70dBm
48Mbps	-66dBm
54Mbps	-65dBm

### 2.5.3 IFS(Inter Frame Space)間隔による制御

IEEE802.11では、信号を送信するまでに最低限の信号間隔としてIFSを定義している。IFSにはSIFS, DIFS, PIFS, EIFSの4種類があり、それぞれは長さが異なりフレームの種類によって分けられている。IFSが短いフレームほど先に送信権を獲得できる。これにより、フレームに優先度をつけて制御することができる。

#### SIFS(Short Interframe Space)

IEEE802.11規格で定義されているフレーム送信間隔の中で最小のものであり、データフレームに対するACKフレームやRTSに対するCTSフレームなどを送信する際に使用する。

#### DIFS(DCF Interframe Space)

分散制御用のフレーム間隔である。DCFにおいてキャリアセンスを行う際に、使用中のチャンネルから未使用のチャンネルに変化したと判断されるまでに必要なチャンネル連続未使用期間である。

表 2.3 IEEE802.11a/bのスロット諸元

パラメータ	IEEE802.11a	IEEE802.11b
スロットタイム	9 $\mu$	20 $\mu$
SIFS 時間	16 $\mu$	10 $\mu$
PIFS 時間	25 $\mu$	30 $\mu$
DIFS 時間	30 $\mu$	50 $\mu$
CW サイズ	15 ~ 1023	31 ~ 1023

#### PIFS(PCF Interframe Space)

PCFによる集中で制御に使用する。DIFSと同様にキャリアセンスを行う際のアイドルと判断するまでに必要なチャンネルの連続未使用期間である。

#### EIFS(Extended Interframe Space)

拡張したフレーム間隔。未使用中かつ未使用中の原因がフレーム受信エラーと判断されたときDIFSの代わりに送信待機する時間。EIFS時間は以下に示す期間である。

$$EIFS = SIFS + ACK + DIFS$$

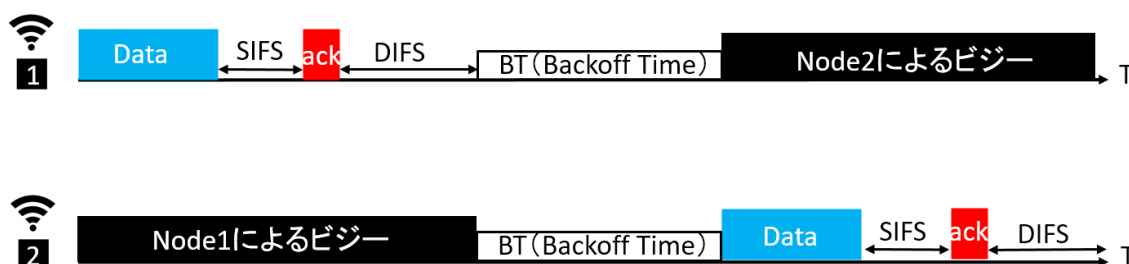


図 2.5 IFS 使用例

### 2.5.4 バックオフ制御

バックオフ制御はキャリア・センスに加えて衝突を回避するための方法として、IEEE802.11規格に定められている。バックオフ制御では、無線チャンネルが DIFS 時間または EIFS 時間だけアイドル状態になった後、フレームを送信しようとする無線端末は、規定の CW (Contention Window: 乱数発生範囲) 範囲内で乱数を発生させ、その乱数値を基にしたランダム時間(バックオフ時間)が決められる。バックオフ時間は一定時間(スロットタイム)の倍数であり、無線チャンネルが未使用であれば乱数値をスロットタイムが経過する度に減算する。最後にバックオフ時間が 0 になった時に、その無線端末はチャンネル未使用であれば送信を行うことができる。減算の途中でチャンネル使用中になった場合、その送信が終わるまで減算を一旦止め、チャンネル未使用になったとき、再び減算を開始する。キャリアセンスをランダムな時間だけ行うことにより、各無線端末には公平な送信機会が与えられることになる。フレームが衝突した場合は、再送を行う毎にバックオフ制御の CW の範囲を 2 倍に増加させ、フレームが再衝突する確率を低減させる。ここで、バックオフ時間は

$$\text{バックオフ時間} = \text{Random}() \times \text{スロットタイム}$$

となる。Random() (乱数値) は 0 から CW までの範囲の一様な分布から生成されたランダムな整数値となる。CW の値は最小値  $CW_{min}$ 、最大値  $CW_{max}$  に設定される。この値は、フレームの再送ごとに CW の値は

$$(CW = CW_{min} + 1) \times 2^n - 1 \quad (n \text{ は再送回数} \geq 0)$$

となる。  $CW_{max}$  に達した後は再送回数が増えても CW は  $CW_{max}$  となる。また再送回数の限界は予め決められた最大再送回数 M 回を超えた場合フレームは破棄される。

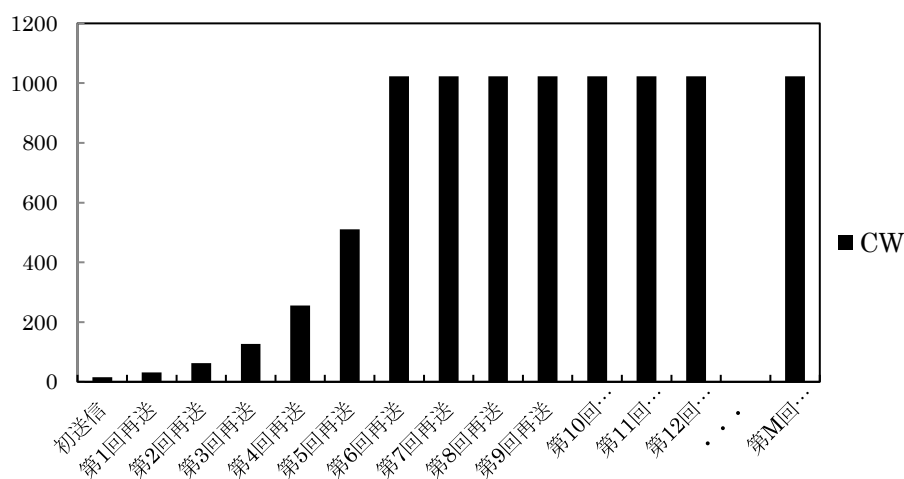


図 2.6 再送回数による CW 変化

## 2.6 既存研究

Wi-Fi 通信ネットワーク解析手法の代表的なものに Bianchi による性能解析手法がある。Bianchi の性能解析モデルは、無線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の2つの状態で表現している。また、状態遷移を離散時間マルコフ連鎖によってモデル化することにより飽和状態（常を送るべきフレームを所持している）を仮定したスループットなどを評価することができる。Bianchi の性能解析手法が扱うことのできる状態は飽和状態のみであり、Bianchi の手法を改良したモデルとして Malone のモデルがある。Malone は Bianchi の手法を拡張し、非飽和状態を扱うことのできるモデルを提案している。Malone のモデルはバックオフカウンタ、バックオフステージ情報に加え、フレームを所持するか否かの情報を状態表現に用いる。Malone の提案手法はフレーム送信後に端末がフレームを所持する確率が、過去の履歴や直前のバックオフステージの値とは独立に決まるものと仮定している。しかし、実際にはフレーム送信後に端末がフレームを所持している確率は、バックオフステージ情報などに依存していることから正確な解析とはなっていない。端末の送信バッファ内にはフレームの待ち行列が形成されており、フレーム所持確率や送信バッファでの遅延時間を正確に評価するためには、送信バッファ内のフレーム待ち行列長を考慮する必要がある。Liu らは Malone のモデルをフレームの待ち行列長が考慮できるモデルへの拡張モデルを提案した。このモデルでは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、状態の遷移を3次元マルコフ連鎖でモデル化している。この Liu らのモデルは Malone のモデルよりも正確な解析手法であるが、性能評価には3次元マルコフ連鎖の定常解を導出する必要があり、非常に複雑な計算が必要となる。またこれらの解析モデルでは競合する端末のフレーム長は一定であり、異なるフレーム長を使用する端末が競合するネットワークや伝送レートの異なる端末の競合するネットワークにおける性能評価を行うことはできない。

飽和状態の Wi-Fi 性能評価法として Bianchi の解析とはアプローチが異なる手法として Liew らによる BoE (Back of Envelope) 手法も紹介しておく[9]。BoE 手法ではネットワーク全体をキャリアセンスできない状態での Wi-Fi の性能評価を簡易に行っているものである。この手法ではネットワーク内で同一のチャネルを競合している端末同士がキャリアセンス関係にあるかどうかを考慮することでグラフを作成し、MIS(Maximum Independent sets)を考慮することにより、すべての端末のキャリアセンスを行うことができない状況においても、飽和状態に限り簡易にスループットの評価を行うことができる手法である。しかし、この手法では Wi-Fi プロトコルに使用する各パラメータを厳密に考慮されておらずパラメータとスループットなどの関係性を明らかにすることはできない。また、飽和状態のみの大まかなスループットの予測であり、シミュレーション等の結果とは大きな乖離結果を示すことも多い。

### 2.6.1 Bianchi の性能解析手法

従来の代表的な Wi-Fi 性能評価の手法である Bianchi の手法について説明する。

複数の端末の IEEE802.11 動作を考慮することは大変複雑であるため、厳密な解析を行うことは困難である。そこで Bianchi の手法では端末の状態をバックオフステージ、バックオフカウンタの二つのパラメタで記述し、端末の状態変化をマルコフ連鎖で記述する方法を採用する。フレーム衝突確率は他の端末に依存するパラメタであり、一般に端末の状態変化には相関があるため、各端末の状態変化を記述するマルコフ連鎖を独立に解くことはできない。ここで平均場近似を利用することによって、各端末の状態確率が互いに独立であるとして、マルコフ連鎖を解きフレーム衝突確率を決定する。平均場近似では、端末の状態が他の端末に依存するため、端末数が増えると、問題規模が指数関数的に増大して解くことが困難になるため、端末が独立にふるまうとして、他の端末に依存するパラメタ状態方程式に存在する場合、他の端末が定常状態にあると考えて、そのパラメタの平均値をとり、定数として扱う。

端末の状態をバックオフステージ  $i$ 、バックオフカウンタ  $k$  のペアを用いて表す。平均場近似のもとではフレームを送信したときの衝突確率は定数  $p$  とすることができる。確率  $p$  でバックオフステージが一つ増え、確率  $(1-p)$  でバックオフステージが  $0$  に戻る。このとき状態  $(i, k)$  から状態  $(j, l)$  への遷移確率は  $k \neq 0$  のとき

$$P(i, k; j, l) = \begin{cases} 1 & (l = k - 1, j = i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

と表すことができる。

バックオフステージが  $m$  に達した後は、再大コンテンションサイズ  $CW_{max}$  のまま再送を繰り返すとすると

$$P(i, k; j, l) = \begin{cases} \frac{1-p}{CW_0+1}, & (j = 0, l \in (0, \dots, CW_0)) \\ \frac{p}{CW_{i+1}+1}, & (j = i + 1, i < m, l \in (0, \dots, CW_{i+1})) \\ \frac{p}{CW_m+1}, & (j = i = m, l \in (0, \dots, CW_m)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

となる。次に  $\pi_{i,k}$  をスロットの先頭にいる定常状態確率とすると

$$\pi_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1)+pW(1-2p^m)}$$

ここで  $W=CW_{min}+1$  を意味する。

また

$$\sum_{i=0}^m \pi_{i,0} = \frac{\pi_{0,0}}{1-p} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1)+pW(1-2p^m)}$$

となる。

平均場近似のもとでは

$p = 1 - (1 - \tau)^{\frac{1}{n-1}}$  が成立するので

$$1 - (1 - \tau)^{\frac{1}{n-1}} = \pi_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1)+pW(1-2p^m)}$$

これを数値的に解くと衝突確率  $p$  が求まる。スループットは平均フレーム送信サイクル長をフレームの平均ペイロード長で割ったものに等しいので

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Average payload length} * \pi_{0,0}}{E_s}$$

$$E_s = (1 - \tau)^N S_t + N\tau(1 - \tau)^N T_s + \{1 - (1 - \tau)^N - N\tau(1 - \tau)^{N-1}\} T_c,$$

$$T_s = \text{ACK} + \text{DATA} + \text{SIFS} + \text{DIFS},$$

$$T_c = \text{DATA} + \text{EIFS}.$$

ここで、ACK および DATA は ACK フレームの送信時間及び、データフレームの送信時間である。IEEE802.11a, では、送信待機状態の平均長は

$$CW_{min} \frac{S_t}{2} = 67.5 \mu\text{s}$$

となる。1500 バイトの IP パケットをフレームに格納して送信する場合、フレームの送信にかかる時間は

$$(16 + (35 + 1500) \times 8 + 6) / 54 + 16 + 4 + 6 = 254.0 \mu\text{s}$$

に等しい。ACK フレームは物理ヘッダ、Frame Control Duration, 受信局アドレス, FCS で計 14 バイトのフレームであり、送信にかかる時間は

$$(16 + 14 \times 8 + 6) / 54 + 16 + 4 + 6 = 28.5 \mu\text{s}$$

以上により、ネットワーク中の端末数を増加させていくことにより獲得できるネットワーク全体のスループットを図 3.1 に示す。

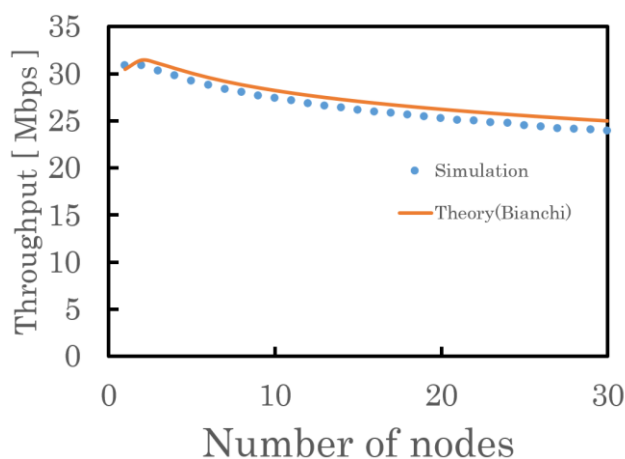


図 2.7 Bianchi 性能評価によって求めた理論結果

解析結果図より端末台数の増加にともない、ネットワーク内の総スループットも減少していることがわかる。これは端末の増加によるフレーム衝突率も増加することに起因している。

## 第3章 Wi-Fi 性能評価法

### すべての端末をキャリアセンス可能なモデル

Bianchi のモデル，およびその改良版は，無線端末の状態を少なくともバックオフカウンタとバックオフステージの2つで表現しており，これが解析モデルを複雑化する1つの要因となっている．また，フレーム遅延時間の評価やバッファ溢れによるフレーム損失を考慮するためには，フレームの待ち行列長を正しく把握しておくことが重要である．

本研究で提案する Wi-Fi 性能評価手法は，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の2つで表現することを放棄する．代わりに，少数のマクロな状態を定義し，端末のマクロ状態とフレームのキュー長の変化を連続時間マルコフ連鎖でモデル化して，定常状態確率を求めるアプローチを取る．複数の端末の連結状態確率を求めることは困難であるので，各端末独立に定常状態確率を計算し，端末の相互関係は平均場近似により表現する．

#### 3.1 モデルの詳細

$n$  台の無線端末が共通のチャネルを介して，フレームを相互に送信し，すべての端末は互いの送信が検知できるものとする．各端末は最大  $K$  個のフレームを格納することができるバッファを持ち，フレーム長  $L_i$  のフレームを使用し，端末の伝送レートは  $R_i$  である．端末  $i$  には到着率  $\lambda_i$  のポアソン仮定に従ってフレームが発生する．

提案モデルでは端末の状態をチャネルアイドル状態，送信状態，キャリアセンス状態 の3つのマクロな状態に分類する．

チャネルアイドル状態は端末が他端末によるチャネルの使用がないことを検出中の状態を意味し，端末はバックオフカウンタをカウントダウンしている状態（状態 0），もしくはカウントダウンが終了し，バックオフカウンタが 0 で停止しているが送信すべきフレームを所持しておらず待機中の状態(状態 0\*)のいずれかである．

送信状態は，端末がフレームを送信中の状態を意味し，送信が成功している場合は，状態 1，送信に失敗している場合は状態 2 に分類する．キャリアセンス状態は同じチャネルを使用する他の端末の送信をキャリアセンスしている状態であり，送信成功の場合は状態 3，送信失敗の場合は状態 4 に分類する．このとき，バックオフカウンタが 0 で停止し，送信すべきフレームを所持しておらず待機中の状態(0\*)からキャリアセンス状態に遷移した場合は，状態 3\*(他端末の送信成功)，または状態 4\*(他端末の送信失敗)と分類する．状態遷移図を図 3.1 に示す．



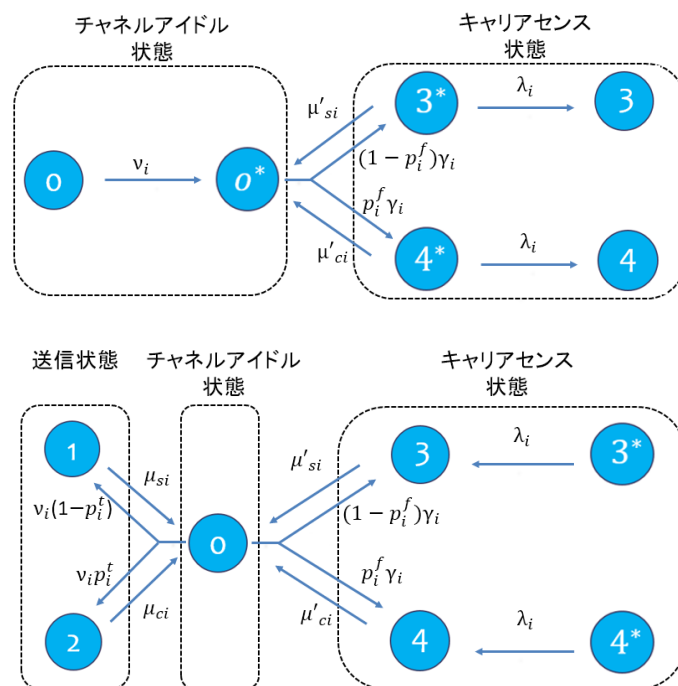


図 3.1 状態遷移関係

チャンネルアイドル状態からは、遷移率 $v_i$ で送信状態に遷移し、キャリアセンス状態には遷移率 $\gamma_i$ で遷移する。 $p_i^f$ は送信状態への遷移の際に、状態 2 (送信失敗状態) に入る確率である。また $p_i^f$ はキャリアセンス状態への遷移の際に、状態 4(他端末の送信失敗)に入る確率を表している。

状態 1 の継続時間 (フレーム送信期間長:フレーム送信を開始してから受信した相手からのACKを受け取り終わるまでの期間)は指数分布に従い、その期間は $1 / \mu_{si}$ に等しいとする。そして、状態 2, 状態 3, 状態 4 の継続時間については端末との関係から詳しく見ていく必要がある。次にフレーム長が異なる場合に発生する特性について説明する。

## 3. 2 フレーム長の異なる端末が混在する状況での注意事項

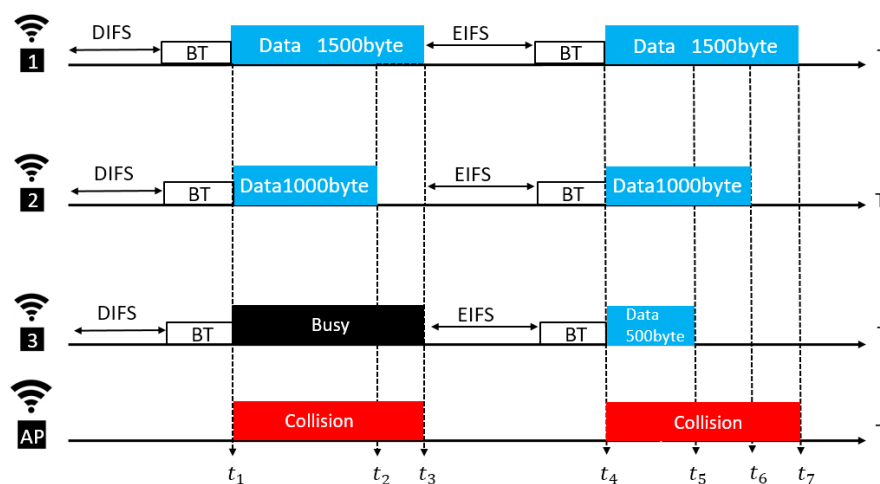


図 3.2 フレーム長が異なるフローが混在している例

3つの端末(端末1, 端末2, 端末3)が同じチャネル内でアクセスポイント(AP)と通信を行っている状況を考える. この際, 1500byteのフレームを送信する端末1, 1000byteのフレームを使用する端末2, 500byteのフレームを使用する端末3であるものとする. 各端末はそれぞれバックオフタイマを減らしている. 上の図の時刻  $t_1$  に注目すると端末1, 端末2のバックオフカウンタが0となり, 2つの端末が同時に送信することによる衝突が発生する. この際に2つの端末のフレーム長の違いから送信期間が異なるためネットワーク内のすべての端末はフレームサイズの大きい端末1の送信が終了する時刻  $t_3$  まで待機した後, EIFSを減らす. 同様に時刻  $t_4$  に注目すると端末1, 2, 3がそれぞれ同時に送信を試み, 衝突が発生する. この時の, 衝突状態による待機は衝突したフレームの中で最大の端末1のものに合わせる必要がある. このように, ネットワークで競合している端末のフレームサイズが異なる場合には, 送信失敗の期間は衝突したフレームの中で最大の端末の送信期間から影響を受ける特徴がある.

### 3.2.1 状態継続期間長導出

本モデルでは端末*i*のフレーム送信期間長 $t_i$ を考える。そして、端末の送信期間長ごとに種別分けを行う。 $t_i$ は以下で得る。

$$t_i = L_i / R_i$$

$K$  種類の送信期間長を扱う端末が混在しているネットワークを考える。

$$t_i = t_k$$

であるとき、端末*i*は種類*k*に属すると考える。また、 $k$ 番目の種類の端末は $N_k$ 台存在するとする。以下では $t_1 \geq t_2 \geq \dots \geq t_K$ であることを仮定する。

#### 送信失敗時（状態 2）のフレーム送信時間

まず、送信失敗時におけるフレーム送信時間を求める。種類*k*の端末がフレーム送信を試み、衝突によりフレーム送信に失敗したときの平均フレーム送信時間を $T_{DATA(k)}^{(f)}$ とする。種類  $k$  の 1 台の端末(以下、端末 A)がフレーム送信を試みたときに、種類 1 から  $j-1$  の(端末 A 以外の)どの端末も送信を行わないが、種類  $j$  の(端末 A 以外の)少なくとも 1 台以上の端末が送信を行う事象を $F_k^{(j)}$ と記す。 $F_k^{(1)}, \dots, F_k^{(K)}$ は互いに背反な事象であり、また衝突により送信に失敗する事象を $F_k$  とすると

$$F_k = \bigcup_{j=1}^K F_k^{(j)}.$$

が成り立つ。従って  $P(F_k)$  は以下のように表すことができる。

$$P(F_k) = \sum_{j=1}^K P(F_k^{(j)}).$$

$$P(F_k^{(j)}) = e^{-\sum_{i=1}^{j-1} N_i r_i T_s} (1 - e^{-N_i^j r_j T_s}).$$

ここで

$$N_i^j = \begin{cases} N_i - 1 & (i = k) \\ N_i & (i \neq k) \end{cases}$$

よって $T_{DATA(k)}^{(f)}$ は以下のように得る.

$$\begin{aligned} T_{DATA(k)}^{(f)} &= \frac{\sum_{j=1}^{k-1} t_j P(F_k^{(j)}) + \sum_{j=k}^K t_k P(F_k^{(j)})}{P(F_k)} + EIFS \\ &= \frac{\sum_{j=1}^{k-1} t_j e^{-\sum_{i=1}^{j-1} N'_i r_i T_s} (1 - e^{-N'_j r_j T_s})}{(1 - e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s})} + t_k \frac{\sum_{j=k}^K e^{-\sum_{i=1}^{j-1} N'_i r_i T_s} (1 - e^{-N'_j r_j T_s})}{(1 - e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s})} + EIFS. \end{aligned}$$

### 待機中 (状態 3) での他端末のフレーム送信期間

次に, 種類 $k$ の端末がアイドル状態で待機中に, 他の端末がフレーム送信を試みた際の平均フレーム送信時間(送信成功の場合は $T_{DARA(k)}^{(s)}$ , 送信失敗の場合は $T_{DARA(k)}^{(f)}$ と記す)を求める.

種類 $k$ の1台の端末が待機中に, 種類 $j$ の1台の端末のみが送信を行う事象を $S_k^{(j)}$ とすると

$$T_{DATA(k)}^{(s)} = \frac{\sum_{j=1}^K t_j P(S_k^{(j)})}{\sum_{j=1}^K P(S_k^{(j)})}.$$

$P(S_k^{(j)})$ は次のように表される.

$$P(S_k^{(j)}) = N'_j (1 - e^{-r_j T_s}) e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s}.$$

従って

$$T_{DATA(k)}^{(s)} = \frac{\sum_j t_j N'_j (1 - e^{-r_j T_s}) e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s}}{\sum_{j=1}^K N'_j (1 - e^{-r_j T_s}) e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s}} + SIFS + T_{ACK} + DIFS.$$

### 待機中 (状態 4) での他端末のフレーム送信期間

次に種類 $k$ の1台の端末(端末A)が待機中のときに, 種類1から種類 $j-1$ の(端末A以外の)どの端末も送信を行わないが, 種類 $j$ の(端末A以外の)少なくとも1台以上の端末が送信を試み, 衝突により送信に失敗する事象を $F_k^{(j)}$ と記す. 種類 $k$ の1台の端末(端末A)が待機中のときに, 端末A以外のいずれかの端末が送信を試み, 送信に失敗する事象を $F_k'$ とすると $F_k^{(1)}, \dots, F_k^{(K)}$ は互いに背反な事象であり,

$$F'_k = \bigcup_{j=1}^K F'_k{}^{(j)}$$

が成り立つ。従って

$$P(F'_k) = \sum_{j=1}^K P(F'_k{}^{(j)})$$

$$P(F'_k{}^{(j)}) = e^{-\sum_{i=1}^{j-1} N'_i r_i T_s} (1 - e^{-N'_j r_j T_s} - N'_j (1 - e^{-r_j T_s}) e^{-\sum_{i=j}^K N'_i r_i T_s}).$$

なお,

$$P(F'_k) = 1 - \sum_{j=1}^K N'_j (1 - e^{-r_j T_s}) e^{-\sum_{i=j}^K N'_i r_i T_s} - e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s}.$$

事象 $F'_k{}^{(j)}$ が発生したときのフレーム送信時間は $L_j/R_{DATA} + DIFS$ に等しいことに注意すると,

$$\begin{aligned} T'_{DATA(k)} &= \frac{\sum_{j=1}^K t_j P(F'_k{}^{(j)})}{P(F'_k)} + EIFS \\ &= \frac{\sum_{j=1}^K t_j e^{-\sum_{i=1}^{j-1} N'_i r_i T_s} (1 - e^{-N'_j r_j T_s} - N'_j (1 - e^{-r_j T_s}) e^{-\sum_{i=j}^K N'_i r_i T_s})}{(1 - \sum_{j=1}^K N'_j (1 - e^{-r_j T_s}) e^{-\sum_{i=j}^K N'_i r_i T_s} - e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s})} + EIFS. \end{aligned}$$

なお, 種類 $k$ に属する端末の状態1の平均継続期間長 $T_{DATA(k)}^{(s)}$ は

$$T_{DATA(k)}^{(s)} = t_k + SIFS + T_{ACK} + DIFS.$$

以上より, 各状態の平均フレーム送信期間はそれぞれ以下のように求まる.

$$\begin{aligned} 1/\mu_{si} &= T_{DATA(k)}^{(s)}, \\ 1/\mu_{ci} &= T_{DATA(k)}^{(f)}, \\ 1/\mu'_{si} &= T'_{DATA(k)}^{(s)}, \\ 1/\mu'_{ci} &= T'_{DATA(k)}^{(f)}. \end{aligned}$$

### 3.3 平衡方程式

端末*i*がバッファ内に*k*個のフレームを保持し状態*l*にいる定常状態確率を $\pi_i(k, l)$ と表す．平衡方程式は以下ようになる．

[  $0 < k < K$  ]

$$\begin{aligned}
(\lambda_i + \nu_i + \gamma_i)\pi_i(k, 0) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 0) \\
&\quad + \mu_{si}\pi_i(k+1, 1) + \mu_{ci}\pi_i(k, 2) \\
&\quad + \mu'_{si}\pi_i(k, 3) + \mu'_{ci}\pi_i(k, 4), \\
(\lambda_i + \mu_{si})\pi_i(k, 1) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 1) + \nu_i(1 - p_i^t)\pi_i(k, 0) \\
&\quad + 1(k=1)((1 - p_i^t)\lambda_i\pi_i(0, 0^*)), \\
(\lambda_i + \mu_{ci})\pi_i(k, 2) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 2) + \nu_i p_i^t \pi_i(k, 0) \\
&\quad + 1(k=1)(p_i^t \lambda_i \pi_i(0, 0^*)), \\
(\lambda_i + \mu'_{si})\pi_i(k, 3) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 3) + \gamma_i(1 - p_i^f)\pi_i(k, 0) \\
&\quad + 1(k=1)\lambda_i\pi_i(0, 3^*), \\
(\lambda_i + \mu'_{ci})\pi_i(k, 4) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 4) + \gamma_i p_i^f \pi_i(k, 0) \\
&\quad + 1(k=1)\lambda_i\pi_i(0, 4^*). \tag{3.1}
\end{aligned}$$

[  $k = 0$  ]

$$\begin{aligned}
(\lambda_i + \gamma_i + \nu_i)\pi_i(0, 0) &= \mu_{si}\pi_i(1, 1) + \mu'_{si}\pi_i(0, 3) \\
&\quad + \mu'_{ci}\pi_i(0, 4), \\
(\lambda_i + \gamma_i)\pi_i(0, 0^*) &= \nu_i\pi_i(0, 0) + \mu'_{si}\pi_i(0, 3^*) \\
&\quad + \mu'_{ci}\pi_i(0, 4^*), \\
\pi_i(0, 1) &= \pi_i(0, 2) = 0, \\
(\lambda_i + \mu'_{si})\pi_i(0, 3) &= \gamma_i(1 - p_i^f)\pi_i(0, 0), \\
(\lambda_i + \mu'_{ci})\pi_i(0, 4) &= \gamma_i p_i^f \pi_i(0, 0), \\
(\lambda_i + \mu'_{si})\pi_i(0, 3^*) &= \gamma_i(1 - p_i^f)\pi_i(0, 0^*), \\
(\lambda_i + \mu'_{ci})\pi_i(0, 4^*) &= \gamma_i p_i^f \pi_i(0, 0^*). \tag{3.2}
\end{aligned}$$

[  $k = K$  ]

$$\begin{aligned}
(\gamma_i + \nu_i)\pi_i(K, 0) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 0) + \mu_{ci}\pi_i(K, 2) \\
&\quad + \mu'_{si}\pi_i(K, 3) + \mu'_{ci}\pi_i(K, 4), \\
\mu_{si}\pi_i(K, 1) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 1) + \nu_i(1 - p_i^t)\pi_i(K, 0), \\
\mu_{ci}\pi_i(K, 2) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 2) + \nu_i p_i^t \pi_i(K, 0), \\
\mu'_{si}\pi_i(K, 3) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 3) + \gamma_i(1 - p_i^f)\pi_i(K, 0), \\
\mu'_{ci}\pi_i(K, 4) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 4) + \gamma_i p_i^f \pi_i(K, 0). \tag{3.3}
\end{aligned}$$

平衡方程式から定常状態確率を求める方法は本論文の付録に記している．平衡方程式中に含まれている未知のパラメタ $\gamma_i$ ,  $\nu_i$ については後述する．

### 3.4 未知パラメタ $(\nu_i, p_i^t, p_i^f, \gamma_i)$ 導出方法

#### 平均バックオフ期間長の逆数の計算

$1/\nu_i$ (バックオフ期間長)は自端末送信時の衝突率 $p_i^t$ を使用することにより得られることが知られており、以下で得る[10].

$$\nu_i = \frac{2}{(1-p_i^t)(\sum_{n=0}^{\infty} (p_i^t)^n CW(n))}$$

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

#### 単位時間での平均フレーム送信回数

端末 $i$ のチャネルアイドル状態でのフレーム送信レート $r_i$ (単位時間当たりの平均フレーム送信回数)は以下の式で得る.

$$r_i = \frac{\lambda_i \pi_i(0,0^*) + \sum_{k=1}^K \nu_i \pi_i(k,0)}{\pi_i(0,0^*) + \sum_{k=1}^K \pi_i(k,0)}$$

#### 自端末送信時の衝突率 $p_i^t$ の計算

このモデルではネットワーク中のすべての端末をキャリアセンスすることが可能であるため、ある端末の送信時刻の前後でいずれかの端末が送信を試みると衝突が発生する. 今、フレームの発生はポアソン過程に従って発生しているので、期間  $(-T_s/2, T_s/2)$ に種類 $k$ に属する 1 台の端末以外のどの端末もフレームを送信しない確率は種類 $k$ の端末がフレーム送信を試みた際に、送信失敗する確率 $p_k^t$ に等しい.  $p_k^t$ は以下のように計算できる.

$$p_k^t = 1 - e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s}.$$

端末 $i$ が種類 $k$ に属しているとき、端末 $i$ の衝突率 $p_i^t$ は、

$$p_i^t = p_k^t.$$

となる.

#### 他端末送信時の衝突率 $p_i^f$ の計算

種類 $k$ に属する端末(端末) A がキャリアセンスしているときに他端末同士の衝突が起きる確率は種類  $k$  の 1 台の端末(端末 A)が待機中のときに、端末 A 以外のいずれかの端末が送信を試みるという条件の下で、送信に失敗する確率ということが出来る. よって $p_k^f$ は以下で得る.

$$p_k^f = \frac{P(F'_k)}{1 - e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s}}$$

$$= \frac{1 - \sum_{j=1}^K N'_j (1 - e^{-r_j T_s}) e^{-\sum_{i=j}^K N'_i r_i T_s} - e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s}}{1 - e^{-\sum_{i=1}^K N'_i r_i T_s}}.$$

そして、端末*i*が種類*k*に属しているとき、

$$p_i^f = p_k^f.$$

となる。

### 他端末の状態を考慮した $\gamma_i$ の導出方法

キャリアセンス状態への遷移率 $\gamma_i$ は、端末*i*以外の定常状態確率を用いて計算する。まず、平衡方程式から、以下の式を得ることができる。

$$\begin{aligned} \mu_{si}\pi_i^{(3)} &= \gamma_i(1 - p_i^f)\pi_i^{(idle)}, \\ \pi_i^{(3)} &= \pi_i(k, 3^*) + \sum_{k=0}^K \pi(k, 3), \pi_i^{(idle)} = \pi_i(0, 0^*) + \sum_{k=0}^K \pi(k, 0). \end{aligned}$$

$\pi_i^{(3)}$ は状態 3 にいる確率を $\pi_i^{(idle)}$ はチャネルアイドル状態にいる確率を表している。端末*i*と他端末との関係性から $\pi_i^{(3)}$ は端末*i*以外の端末がフレーム送信を成功している状態の確率に等しいことから、

$$\pi_i^{(3)} = \sum_{j \neq i} \sum_{k=1}^K \pi_j(k, 1).$$

と表すことができる。以上より $\gamma_i$ を以下のように導出することができる。

$$\gamma_i = \frac{\mu_{si} \sum_{j \neq i} \sum_{k=1}^K \pi_j(k, 1)}{(1 - p_i^f)(\pi_i(0, 0^*) + \sum_{k=0}^K \pi(k, 0))}.$$

### スループット、平均キュー長計算式

平衡方程式から定常状態確率を求めることで、端末*i*のスループット及び平均キュー長を以下の式で得ることができる。

$$\begin{aligned} \text{Throughput} &= \mu_{si} L_i \sum_{k=1}^K \pi_i(k, 1), \\ \text{Queue length} &= \sum_{k=1}^K \sum_l k \pi_i(k, l). \end{aligned}$$

## 3.5 計算手順

提案モデルは平衡方程式自身に、その定常状態確率に依存するパラメタが含まれているため、定常状態とこれらのパラメタが自己無矛盾に決定されるように、繰り返しの計算が必要になる。まず、パラメタに適当な初期値(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。次にパラメタを再決定し、その結果を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。収束は非常に早く、計算時間は数秒に収まる。



### 3.6 数値評価

無線端末が1つのアクセスポイント(AP)に接続されるシングルホップシナリオを考える。各無線端末は端末からAPに向けて通信を行うものとする。各端末に送信負荷を同様に与えていき、飽和状態となるまでの実験を行う。各端末はIEEE802.11aに基づいて動作し、すべての端末は互いにキャリアセンス範囲内にあるとする。

以上について異なるフレーム長を使用する端末が存在するシナリオ1, 異なる伝送レートを使用する端末が存在するシナリオ2を適用し, C言語で作成されたネットワークシミュレータによるシミュレーションとの比較を行う。各端末で獲得できるスループット, 平均キュー長についての結果を取得し, 提案モデルを評価する。以下にシナリオの詳細を示す。各端末の使用するフレームサイズ, 伝送レートは表3.1 - 表3.6に示す。

#### ◇シナリオ1

シナリオ1ではフレームサイズの異なるフローが競合しているネットワークを解析する。伝送レート54Mbpsを使用する3つの端末(node1, node2, node3)がそれぞれフレームサイズ1500, 1000, 500[byte]を使用して通信を行っているものとする。同様に4つの端末, 5つの端末が競合している環境についても結果を取得する。

#### ◇シナリオ2

シナリオ2では異なる伝送レートを使用している端末が競合しているネットワークを解析する。フレームサイズ1500byteを使用している3端末のうち2台(node1, node2)が伝送レート54Mbpsを使用し, 1台(node3)が初めに54Mbps, 次に36Mbps, 最後に24Mbpsを使用していることを考え, 結果を取得する。

結果をシナリオ1の結果を図3.4から図3.9, シナリオ2の結果を図3.10から図3.15に示す。

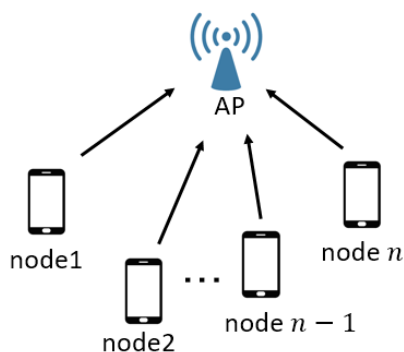


図 3.3 シングルホップシナリオ

表 3.1 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3
Frame Size[byte]	1500	1000	500
Transmission rate[Mbps]	54	54	54

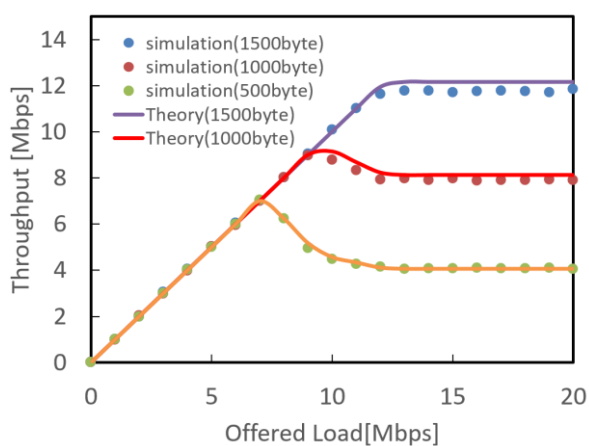


図 3.4 スループット (3台)

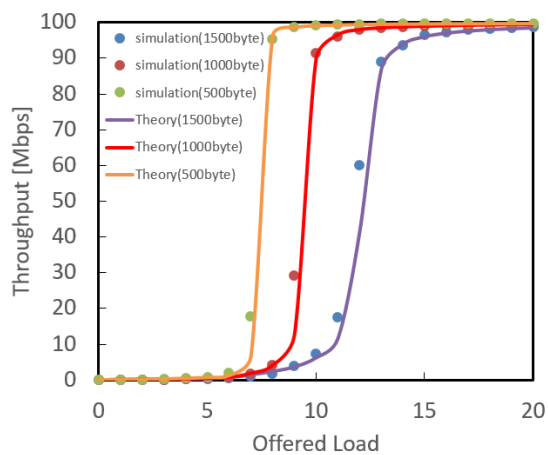


図 3.5 平均キュー長 (3台)

表 3.2 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3	node4
Frame Size[byte]	1500	1500	1000	1000
Transmission rate[Mbps]	54	54	54	54

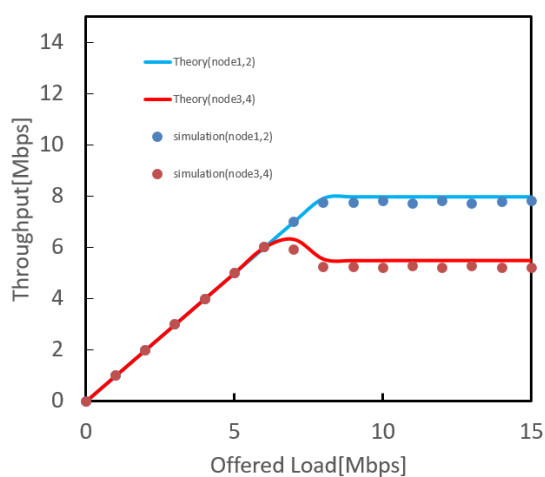


図 3.6 スループット (4台)

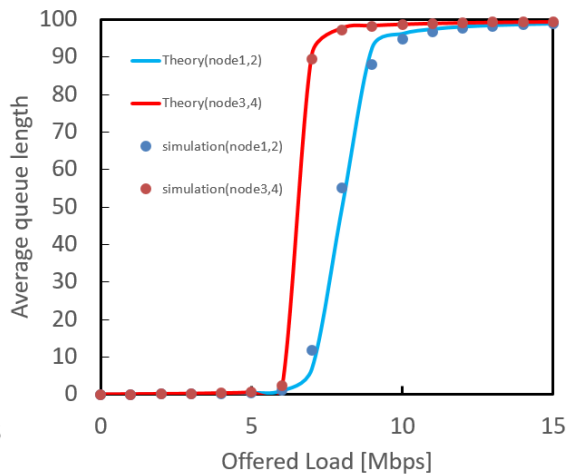


図 3.7 平均キュー長 (4台)

表 3.3 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3	node4	node5
Frame Size[byte]	1500	1500	1000	1000	500
Transmission rate[Mbps]	54	54	54	54	54

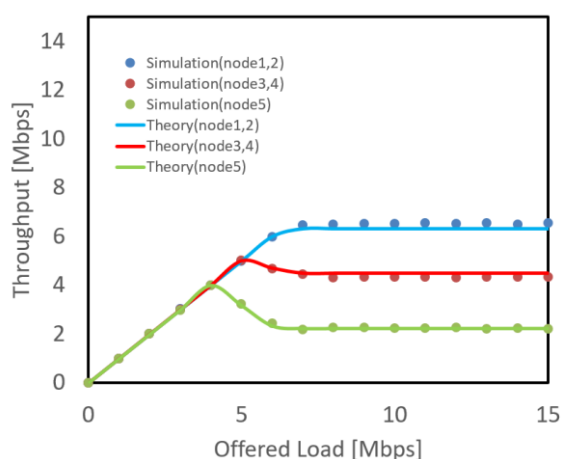


図 3.8 スループット (5 台)

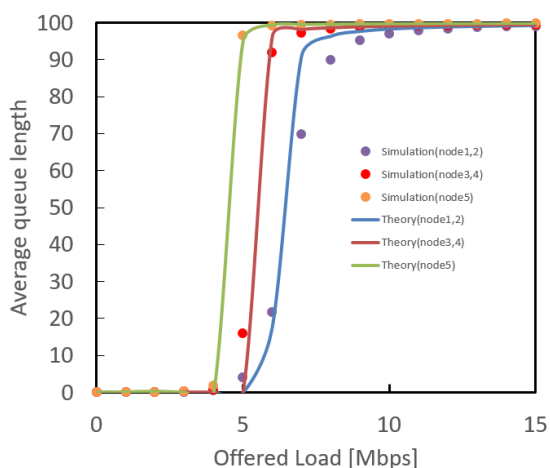


図 3.9 平均キュー長 (5 台)

表 3.4 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3
Frame Size[byte]	1500	1500	1500
Transmission rate[Mbps]	54	54	54

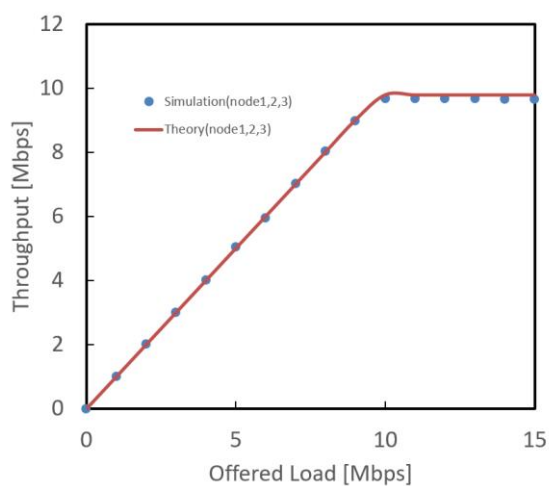


図 3.10 スループット

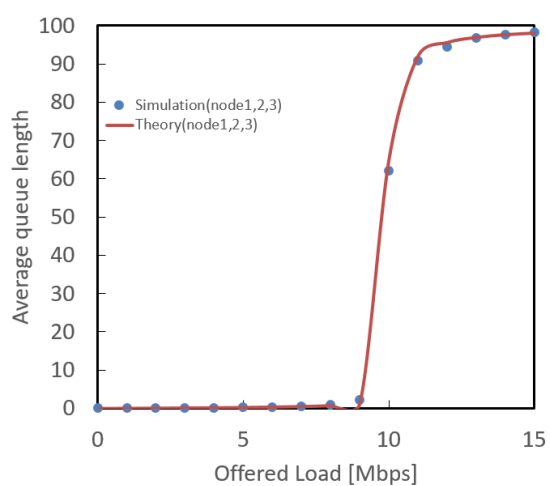


図 3.11 平均キュー長

表 3.5 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3
Frame Size[byte]	1500	1500	1500
Transmission rate[Mbps]	54	54	36

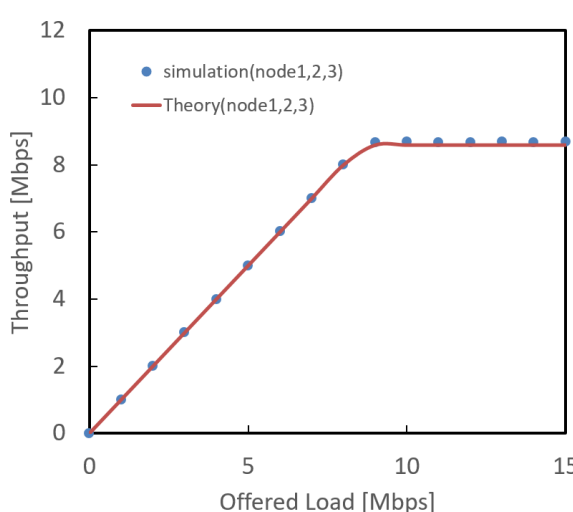


図 3.12 スループット

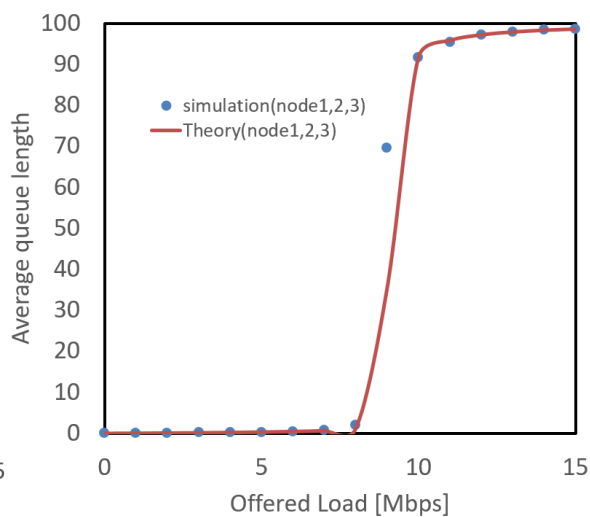


図 3.13 平均キュー長

表 3.6 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3
Frame Size[byte]	1500	1500	1500
Transmission rate[Mbps]	54	54	24

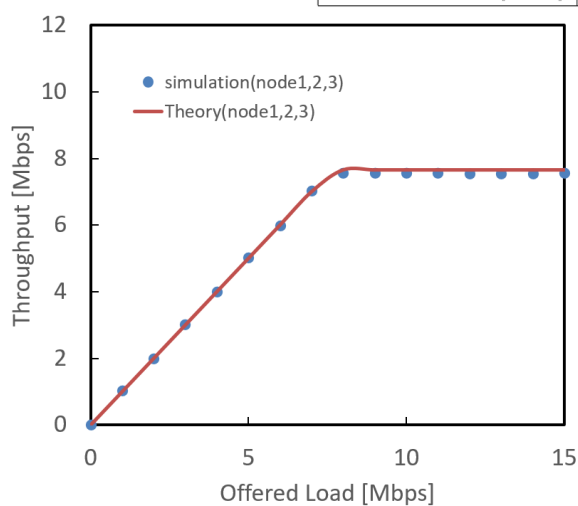


図 3.14 スループット

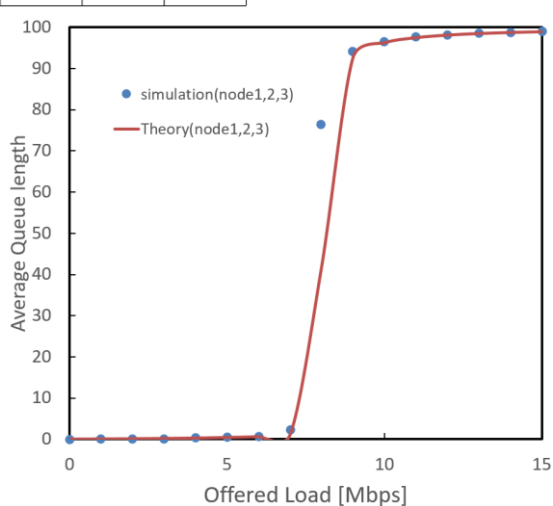


図 3.15 平均キュー長

### 考察

図 3.4 から図 3.15 よりシミュレーション結果との比較から提案モデルは端末ごとの異なるフレーム長，伝送レートの影響を扱うことのできる解析モデルであるといえる．図 3.5，図 3.7，図 3.9 よりフレーム長の異なる端末が競合しているシナリオ 1 ではフレームサイズの小さい端末が低 Offered Load で飽和している．これは，各端末が同一 Offered Load な状態ではフレーム長が小さい端末の方が単位時間あたりに発生するフレーム数が多くなることが低 Offered Load で飽和した要因であると考えられる．また，異なる伝送レートを使用する端末が競合するシナリオ 2 結果図 3.10，図 3.12，図 3.14 から競合している端末の中に伝送レートの低い端末が存在することで伝送レートの高い端末のスループットも減少していることがわかる．図 3.11，図 3.13，図 3.15 を比較すると図 3.15 結果の方が低 Offered Load で飽和していることがわかる．これは伝送レートの低い端末がネットワークに混在することでネットワーク使用効率が低下していることが要因であると推測できる．

### 3.7 飽和状態を扱う簡易性能評価モデル

ここで、飽和状態であることを仮定した IEEE802.11 無線 LAN 性能評価モデルについての紹介と説明を行う。簡易性能評価モデルではキュー長情報を使用することを放棄することで少数の端末の状態によって表現し、連億時間マルコフ連鎖でモデル化する。

#### 3.7.1 簡易性能評価モデル説明

端末（無線端末、アクセスポイント）が常に送信バッファ内にフレームを所持している（飽和状態）であるシングルホップ無線 LAN を考える。このモデルはキュー長情報を使用することを放棄している点に特徴がある。このことから、バックオフカウンタが 0 で停止中にフレームを所持する状態を考える必要がなくなり、考慮すべき状態数が減少することにより、簡易に IEEE802.11 無線 LAN 性能評価を行うことができる。

以下にこのモデルの状態遷移図を図 3.16 に示す。

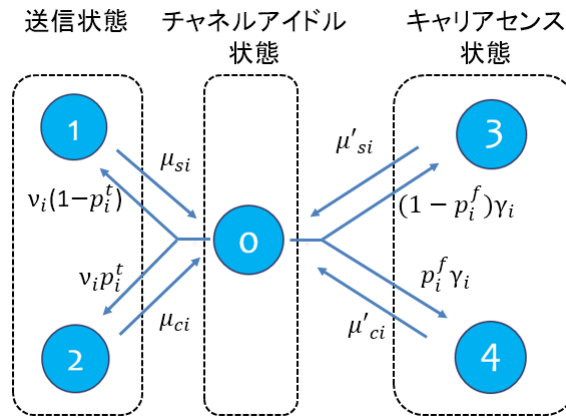


図 3.16 状態遷移関係（簡易性能評価モデル）

状態遷移図からバックオフタイマを 0 で停止している状態を考慮する必要がなくなり、考慮すべき状態数が減っていることがわかる。

#### 3.7.2 平衡方程式

キュー長情報を用いない簡易性能評価モデルでは平衡方程式は以下のようになる。このモデルでは、端末  $i$  が状態 1 にいる定常状態確率を  $\pi_i^{(1)}$  と表す。

$$\begin{aligned}
 (\gamma_i + \nu_i)\pi_i^{(0)} &= \mu_{si}\pi_i^{(1)} + \mu_{ci}\pi_i^{(2)} + \mu'_{si}\pi_i^{(3)} + \mu'_{ci}\pi_i^{(4)}, \\
 \mu_{si}\pi_i^{(1)} &= \nu_i(1-p_i^t)\pi_i^{(0)}, \\
 \mu_{ci}\pi_i^{(2)} &= \nu_i p_i^t \pi_i^{(0)}, \\
 \mu'_{si}\pi_i^{(3)} &= \gamma_i(1-p_i^f)\pi_i^{(0)}, \\
 \mu'_{ci}\pi_i^{(4)} &= \gamma_i p_i^f \pi_i^{(0)}.
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

### 3.7.3 未知パラメタ ( $v_i, p_i^t, p_i^f, \gamma_i$ ) 導出法

$p_i^t, p_i^f, v_i$  はキュー長を使用するモデルと同様に算出する.

なお, ここでは

$v_i = r_i$  であることに注意する.

$\gamma_i$  は状態 3 と状態 1 の関係性から以下で得られる.

$$\gamma_i = \frac{\mu_{si} \sum_{i \neq j} \pi_j^{(1)}}{(1 - p_i^f) \pi_i^{(0)}}.$$

定常状態確率を求めた後, 簡易モデルではスループットは以下で得る.

$$\text{Throughput} = \mu_{si} L_i \pi_i^{(1)}.$$

### 3.7.4 数値評価

提案した簡易性能評価モデルをシングルホップ無線 LAN スループット評価に適用し, 以下に示す 2 つのシナリオに対する結果を評価する. なお, 端末は IEEE802.11a を使用するものとする. 各端末の使用フレームサイズ, 伝送レートは表 3.7 - 表 3.8 に示す.

#### ◇シナリオ 1

無線端末が 1 つのアクセスポイント(AP)に接続されるシングルホップシナリオを考える. チャンネルを共有する飽和状態の端末が AP に対し, 通信を行う. 端末数を増加させていき, 獲得する端末の総スループットについて提案モデルとシミュレーション及び, 飽和状態の解析を行う既存の手法(Bianchi による手法)との比較を行う.

#### ◇シナリオ 2

シングルホップシナリオにおいて, フレームサイズの異なるフローが競合しているネットワークを解析する. 伝送レート 54Mbps を使用する 3 つの端末 (node1, node2, node3) がそれぞれフレームサイズ 1500, 1000, 500[byte]を使用して通信を行っているものとする. 同様に 4 つの端末 (node1, node2, node3, node4) がそれぞれフレームサイズ 1500, 1500, 1000, 1000[byte]を使用している結果も取得した.

シナリオ 1 の結果を図 3.17, 図 3.18 に, シナリオ 2 の結果を図 3.19, 図 3.20 に示す.

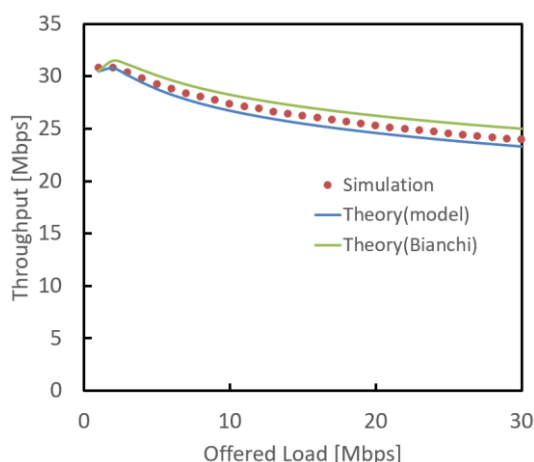


図 3.17 総スループット結果

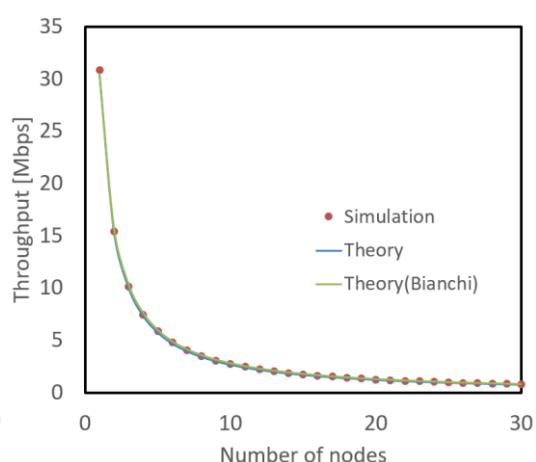


図 3.18 端末ごとスループット結果

表 3.7 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3
Frame Size[byte]	1500	1000	500
Transmission rate[Mbps]	54	54	54

表 3.8 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3	node4
Frame Size[byte]	1500	1500	1000	1000
Transmission rate[Mbps]	54	54	54	54

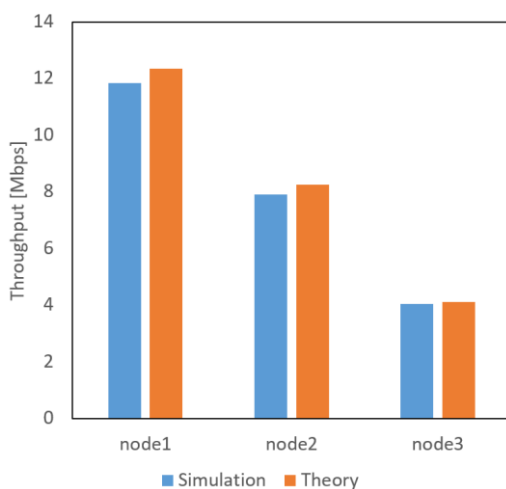


図 3.19 スループット結果

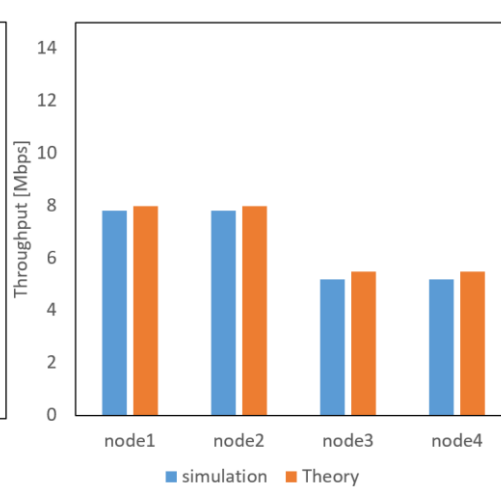


図 3.20 スループット結果

### 考察

シナリオ 1 結果図 3.17, 図 3.18 からキュー長情報を用いない提案モデルは同様の解析を行う Bianchi の無線 LAN 性能解析手法と同等並みのスループット評価を行うことができることを示した。また, 提案した解析手法は非常に簡易なモデルとなっており, 複雑な計算を必要とする Bianchi の手法に比べて性能面で優れていると考えられる。また Bianchi の手法では競合する端末は全て同一のフレームサイズを使用しているシナリオのみ解析することができるが, 提案した手法ではシナリオ 2 結果図 3.19, 図 3.20 からわかるように, 複数のサイズのフレームが混在するネットワークについて解析することが可能である。



## 4 章 Wi-Fi 性能評価法

### キャリアセンスできない端末が存在するモデル

本章では同じチャネルを使用する送信端末間においてキャリアセンス不可能な端末がある場合に有効な性能解析モデルについて紹介する。

#### キャリアセンス範囲に認識できない端末が存在する環境

すべての端末をキャリアセンスできない状況について以下の例を用いて説明する。

まず、テザリングユーザが干渉しあう状況を考える。ユーザは直線状に並び、それぞれのユーザは隣のユーザの送信をキャリアセンスすることができるとする。この状況ではユーザ  $i-1$  はユーザ  $i$  の送信をキャリアセンスすることはできるが、ユーザ  $i+1$  の送信は検知することができない。ユーザ  $i+1$  も同様にユーザ  $i-1$  の送信をキャリアセンスすることはできない。このときユーザ  $i$  はユーザ  $i-1$ ,  $i+1$  の 2 つの端末の送信を両方ともキャリアセンスすることになる。このようなキャリアセンス範囲に認識するユーザ数の違いによってそれぞれの端末間では獲得できるスループットに不公平な差が発生することが報告されている [11]。本章ではこのようなキャリアセンス関係の偏りに注目した解析手法について説明する。

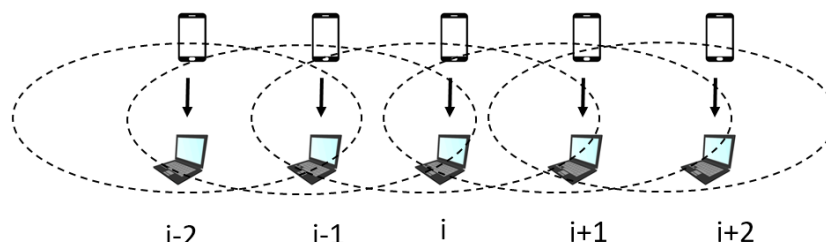


図 4.1 隣の端末までキャリアセンスできるネットワーク

#### 4.1 本章モデルの詳細

前章で紹介したすべてのネットワーク中の端末をキャリアセンスできるモデルではキャリアセンス状態の継続期間は  $1/\mu'_{si}$ ,  $1/\mu'_{ci}$  のいずれかになる。しかし、先ほど述べたように、キャリアセンスできる端末とキャリアセンスできない端末が混在しているネットワークでは端末が複数の他端末の送信を連続してキャリアセンスする可能性があることから、この限りではない。よって、この章で紹介するモデルではすべての端末をキャリアセンスすることができない状況においては端末  $i$  がキャリアセンス状態の際に  $i$  以外の端末による送信が成功か失敗かを区別しない状態遷移図 (図 4.2) を用いる。キャリアセンス状態の継続時間は指数分布に従い、期待値は  $1/\mu_{fi}$  であるとする。また、前章で紹介したモデルではネットワーク中のすべての端末の使用しているフレーム送信期間長を考慮していたのに対して、この章のモデルでは各端末はそれぞれの端末のキャリアセンス範囲内に認識する端末に対し、送信期間長を扱う端末が混在しているネットワークを考慮する必要がある。

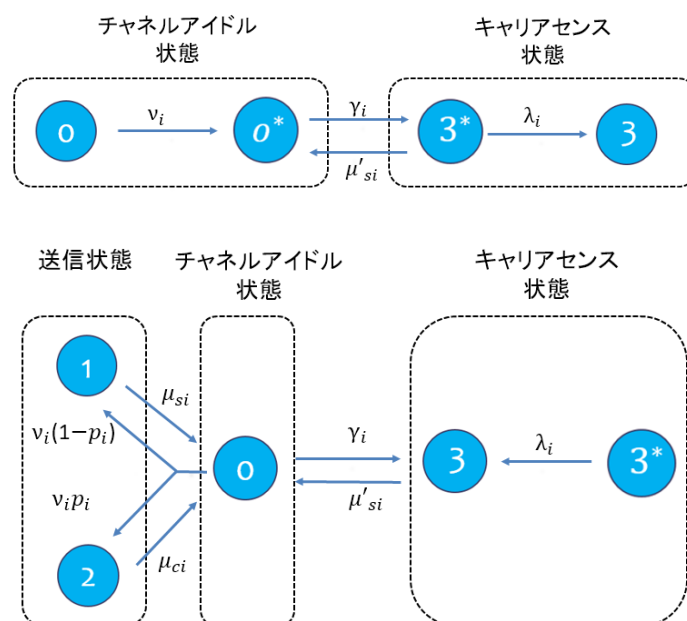


図 4.2 状態遷移関係

チャンネルアイドル状態からは、遷移率 $v_i$ で送信状態に遷移し、キャリアセンス状態には遷移率 $\gamma_i$ で遷移する。 $p_i$ は送信状態への遷移の際に、状態2(送信失敗状態)に入る確率である。

状態1の継続時間(フレーム送信期間長:フレーム送信を開始してから受信した相手からのACKを受け取り終わるまでの期間)は指数分布に従い、その期間は $1/\mu_{si}$ に等しいとする。そして、状態2、状態3、状態4の継続時間については、他端末との関係から詳しく見ていく必要がある。次にこのモデルでのフレーム長が異なる場合に考慮すべきことについて説明する。

## 4.2 フレーム長が異なるフローを扱うための考え方

### 各状態の平均継続期間長

ネットワーク全体の端末をキャリアセンスすることのできないモデル, 例えば Wi-Fi 通信を行うユーザが直線状に位置し, ユーザ*i*が隣のユーザの通信を検知できる場合では, ユーザ*i*の両隣の端末との関係性を考える必要がある. このことから端末*i*の状態の継続期間は, 端末*i-1*, 端末*i+1*の送信確率を考慮することによって求めることができる. いま, 端末*i*が送信を試みるとき, 端末*j*と衝突する確率を $F_i^{(j)}$ とすると状態 2 の平均継続期間長は以下のようにして求めることができる.

$$\frac{1}{\mu_{ci}} = \frac{\max[t_{i-1}, t_i] P(F_i^{(i-1)}) + \max[t_i, t_{i+1}] P(F_i^{(i+1)}) + \max[t_{i-1}, t_i, t_{i+1}] P(F_i^{(i-1, i+1)})}{P(F_i^{(i-1)}) + P(F_i^{(i+1)}) + P(F_i^{(i-1, i+1)})} + \text{EIFS}.$$

$P(F_i^{(i-1, i+1)})$ は端末*i*が端末*i-1*, 端末*i+1*の両端末と同時に衝突する確率である.

また, 例えば $P(F_i^{(i-1)})$ は以下で得る.

$$P(F_i^{(i-1)}) = (1 - e^{-r_{i-1}P(T_{i-1}=0|T_i=0)T_s})e^{-r_{i+1}P(T_{i+1}=0|T_i=0)T_s}.$$

ここで例えば $P(T_{i-1}=0|T_i=0)$ は端末*i*がチャネルアイドル状態のときに, 端末*i-1*がチャネルアイドル状態である確率を表し, 端末*i*がチャネルアイドル状態のときは, 端末*i-1*はアイドル状態かキャリアセンス状態であり, キャリアセンス状態にあるときは端末*i-2*が送信状態にある場合に限られる. このことから $P(T_{i-1}=0|T_i=0)$ ,  $P(T_{i+1}=0|T_i=0)$ は以下のように得る.

$$P(T_{i-1}=0|T_i=0) \approx \frac{\pi_{i-1}^{(0)}}{\pi_{i-1}^{(0)} + \pi_{i-1}^{(3)} * (\pi_{i-2}^{(1)} + \pi_{i-2}^{(2)})},$$

$$P(T_{i+1}=0|T_i=0) \approx \frac{\pi_{i+1}^{(0)}}{\pi_{i+1}^{(0)} + \pi_{i+1}^{(3)} * (\pi_{i+2}^{(1)} + \pi_{i+2}^{(2)})},$$

$$\pi_i^{(1)} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=0}^K \pi_i(k, 1), \quad \pi_i^{(2)} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=0}^K \pi_i(k, 2),$$

$$\pi_i^{(3)} \stackrel{\text{def}}{=} \pi_i(0, 3^*) + \sum_{k=0}^K \pi_i(k, 3).$$

また、端末*i*が待機中に端末*j*のみが送信する確率を $S_i^{(j)}$ とすると端末*i*の状態 3 の平均継続期間長は以下で求まる。

$$1/\mu_{fi} = \frac{t_{i-1}P(S_i^{(i-1)}) + t_{i+1}P(S_i^{(i+1)})}{P(S_i^{(i-1)}) + P(S_i^{(i+1)})} + SIFS + ACK + DIFS.$$

例として $(S_i^{(i-1)})$ は以下のように得る。

$$P(S_i^{(i-1)}) = (1 - e^{-r_{i-1}\pi_{i-1}^{(idle)}T_s})e^{-r_{i+1}\pi_{i+1}^{(idle)}T_s}.$$

$$\pi_i^{(idle)} \stackrel{\text{def}}{=} \pi_i(0, 0^*) + \sum_{k=0}^K \pi_i(k, 3).$$

なお、状態 1 の継続期間長は 2 章と同様にして得る。

### 4.3 平衡方程式

状態遷移図より平衡方程式は以下のようになる。

[  $0 < k < K$  ]

$$\begin{aligned} (\lambda_i + \nu_i + \gamma_i)\pi_i(k, 0) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 0) + \mu_{si}\pi_i(k+1, 1) + \mu_{ci}\pi_i(k, 2) + \mu_{fi}\pi_i(k-1, 3), \\ (\lambda_i + \mu_{si})\pi_i(k, 1) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 1) + \nu_i(1-p_i)\pi_i(k, 0) + 1(k=1)((1-p_i)\lambda_i\pi_i(0, 0^*)), \\ (\lambda_i + \mu_{ci})\pi_i(k, 2) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 2) + \nu_i p_i \pi_i(k, 0) + 1(k=1)(p_i \lambda_i \pi_i(0, 0^*)), \\ (\lambda_i + \mu_{fi})\pi_i(k, 3) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 3) + \gamma_i\pi_i(k, 0) + 1(k=1)\lambda_i(0, 3^*). \end{aligned} \tag{4. 1}$$

[  $k = 0$  ]

$$\begin{aligned} (\lambda_i + \gamma_i + \nu_i)\pi_i(0, 0) &= \mu_{si}\pi_i(1, 1) + \mu_{fi}\pi_i(0, 3), \\ (\lambda_i + \gamma_i)\pi_i(0, 0^*) &= \nu_i\pi_i(0, 0) + \mu_{fi}\pi_i(0, 3^*), \\ \pi_i(0, 1) &= \pi_i(0, 2) = 0, \\ (\lambda_i + \mu_{fi})\pi_i(0, 3) &= \gamma_i\pi_i(0, 0), \\ (\lambda_i + \mu_{fi})\pi_i(0, 3^*) &= \gamma_i\pi_i(0, 0^*). \end{aligned} \tag{4. 2}$$

[  $k = K$  ]

$$\begin{aligned} (\gamma_i + \nu_i)\pi_i(K, 0) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 0) + \mu_{fi}\pi_i(K, 3) + \mu_{ci}\pi_i(K, 2), \\ \mu_{si}\pi_i(K, 1) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 1) + \nu_i(1-p_i)\pi_i(K, 0), \\ \mu_{ci}\pi_i(K, 2) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 2) + \nu_i p_i \pi_i(K, 0), \\ \mu_{fi}\pi_i(K, 3) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 3) + \gamma_i\pi_i(K, 0). \end{aligned} \tag{4. 3}$$

定常状態確率を求めた後、スループット、平均キュー長を以下の式で得る.

$$\begin{aligned} \text{Throughput} &= \mu_{si} L_i \sum_{k=1}^K \pi_i(k, 1), \\ \text{Queue length} &= \sum_{k=1}^K \sum_l k \pi_i(k, l). \end{aligned}$$

#### 4.4 未知パラメタ ( $\nu_i, p_i, \gamma_i$ ) の導出方法

##### 平均バックオフ期間長の逆数の計算

平均バックオフ期間長の逆数 $\nu_i$ は3章と同様にして衝突率 $p_i$ を用いて以下で得る.

$$\begin{aligned} \nu_i &= \frac{2}{(1-p_i)(\sum_{n=0}^{\infty} (p_i)^n CW(n))}, \\ CW(n) &= \min\{2^n(CW_{min} + 1), CW_{max} + 1\} - 1. \end{aligned}$$

また、単位時間当たりのフレーム送信回数 $r_i$ は以下で計算する.

$$r_i = \frac{\lambda_i \pi_i(0, 0^*) + \sum_{k=1}^K \nu_i \pi_i(k, 0)}{\pi_i(0, 0^*) + \sum_{k=1}^K \pi_i(k, 0)}.$$

##### 衝突確率導出方法

ネットワーク全体の端末をキャリアセンスすることのできないモデルでは、ユーザ $i$ の端末と衝突する可能性があるのはユーザ $i-1$ 、ユーザ $i+1$ となる。ここでこのような状況ではユーザ $i$ がチャネルアイドル状態にあったとしても、ユーザ $i-1$ 、 $i+1$ の端末もチャネルアイドル状態であるとは限らないとする。例として、ユーザ $i-2$ の端末がフレーム送信している状態では、ユーザ $i$ から見るとチャネルアイドル状態であっても、ユーザ $i-1$ の端末はキャリアセンス状態である。このような特性を考慮すると

$$p_i = 1 - \exp(-(r_{i-1}P(T_{i-1} = 0|T_i = 0) + r_{i+1}P(T_{i+1} = 0|T_i = 0))T_s).$$

他端末の状態を考慮した $\gamma_i$ の導出方法

平衡方程式から以下の関係が得られることがわかる.

$$\mu_{fi}\pi_i^{(3)} = \gamma_i\pi_i^{(0)}.$$

そして状態 3 にいる確率は端末  $i$  が検知できる  $i$  以外の端末の送信状態の確率から導出することができる. このときユーザ  $i-1$  の送信をユーザ  $i$  が検知している時間とユーザ  $i+1$  の送信をユーザ  $i$  が検知している時間が重なることから, この重なりに十分注意した導出をする必要がある.

ユーザ  $i-1$  もしくはユーザ  $i+1$  の端末が送信状態にある場合に限り, ユーザ  $i$  の端末はキャリアセンス状態として存在する. このことから

$$\pi_i^{(3)} = \pi_{i-1}^{(1)} + P(\{T_{i-1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}) + \pi_{i+1}^{(1)} + P(\{T_{i+1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}) \\ - \frac{(\pi_{i-1}^{(1)} + P(\{T_{i-1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}))(\pi_{i+1}^{(1)} + P(\{T_{i+1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}))}{1 - \pi_i^{(1)} - \pi_i^{(2)}}.$$

ここで, 右辺の最後の項はユーザ  $i-1$ ,  $i+1$  の送信期間が重なることを考慮した補正項である. また  $P(T_{i-1} = 2 | T_i = 3)$  は端末  $i$  がキャリアセンス状態にあり, かつ端末  $i-1$  が送信失敗状態にある確率を表している. 端末  $i-1$  が送信失敗状態のときは, 端末  $i$  は送信失敗状態, もしくはキャリアセンス状態にあることから

$$P(\{T_{i-1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}) = P(\{T_i = 3 | T_{i-1} = 2\}P\{T_{i-1} = 2\}) \approx \frac{\pi_{i-1}^{(2)}\pi_i^{(3)}}{\pi_i^{(2)} + \pi_i^{(3)}}, \\ P(\{T_{i+1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}) = P(\{T_i = 3 | T_{i+1} = 2\}P\{T_{i+1} = 2\}) \approx \frac{\pi_{i+1}^{(2)}\pi_i^{(3)}}{\pi_i^{(2)} + \pi_i^{(3)}}.$$

ここから式 ( ) を計算することができる. なお, 端末数の少ない場合は注意が必要である. 例えば端末が 3 台の場合

$$\pi_3^{(3)} = \pi_2^{(1)} + \pi_3^{(2)}, \quad \pi_3^{(3)} = \pi_2^{(1)} + \pi_1^{(2)}, \quad \pi_2^{(3)} = \pi_1^{(1)} + \pi_3^{(1)} - \frac{\pi_1^{(1)}\pi_3^{(1)}}{1 - \pi_2^{(1)} + \pi_2^{(2)}}.$$

4 台の場合,

$$\pi_1^{(3)} = \pi_2^{(1)} + \frac{\pi_2^{(2)}\pi_1^{(3)}}{\pi_1^{(2)} + \pi_1^{(3)}}, \quad \pi_2^{(3)} = \pi_1^{(1)} + \pi_3^{(1)} - \frac{\pi_3^{(2)}\pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}} - \frac{\pi_1^{(1)}\left(\pi_3^{(1)} + \frac{\pi_3^{(2)}\pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}}\right)}{1 - \pi_2^{(1)} - \pi_2^{(2)}}, \\ \pi_3^{(3)} = \pi_2^{(1)} + \pi_4^{(1)} - \frac{\pi_2^{(2)}\pi_3^{(3)}}{\pi_3^{(2)} + \pi_3^{(3)}} - \frac{\pi_4^{(1)}\left(\pi_2^{(1)} + \frac{\pi_3^{(2)}\pi_3^{(3)}}{\pi_3^{(2)} + \pi_3^{(3)}}\right)}{1 - \pi_3^{(1)} - \pi_3^{(2)}}, \quad \pi_4^{(3)} = \pi_3^{(1)} + \frac{\pi_3^{(2)}\pi_4^{(3)}}{\pi_4^{(2)} + \pi_4^{(3)}}.$$

のように補正を行う.

#### 4.5 数値評価

直線状に位置し，異なるフレーム長を扱うテザリングユーザ 3 人，4 人が通信している状況を考える．各ユーザは IEEE802.11.a に従い通信を行う．フレーム伝送レート 54Mbps を使用し，それぞれのユーザは隣の送信をキャリアセンスできるものとする．各ユーザ端末のトラフィック量を徐々に増加していき，各ユーザが獲得できるスループット，平均キュー長についてシミュレーション結果との比較を行う．ユーザの使用するフレームサイズ，伝送レートは表 4.1 - 表 4.3 に示す．

結果を図 4.3 から図 4.8 に示す．

表 4.1 使用したフレームサイズ，送信レート

User	User1	User2	User3
Frame Size[byte]	1500	1000	500
Transmission rate[Mbps]	54	54	54

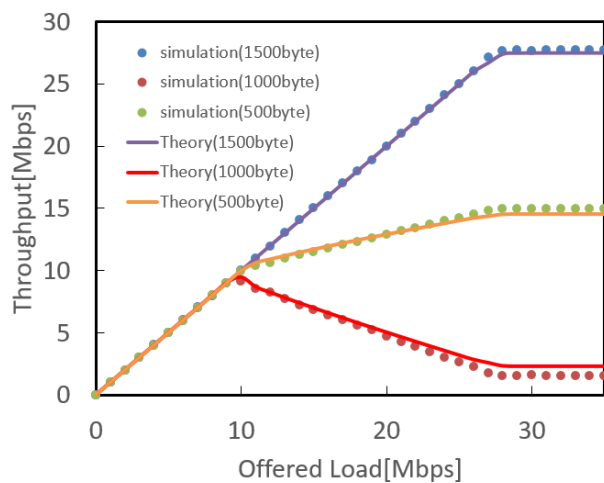


図 4.3 スループット

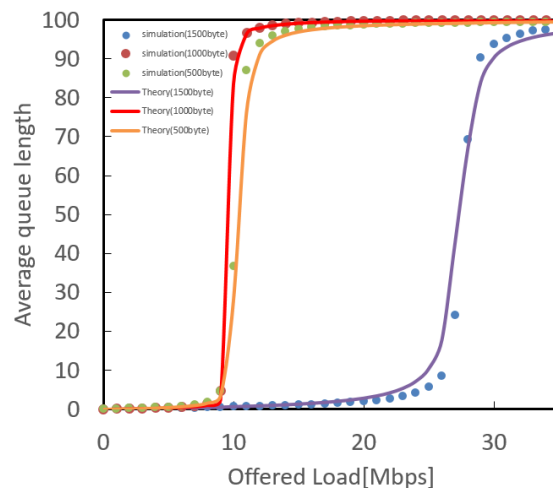


図 4.4 平均キュー長

表 4.2 使用したフレームサイズ, 送信レート

User	User1	User2	User3	User4
Frame Size[byte]	1500	1500	1000	1000
Transmission rate[Mbps]	54	54	54	54

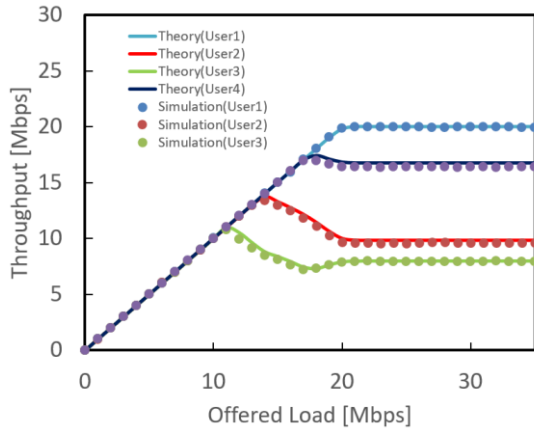


図 4.5 スループット

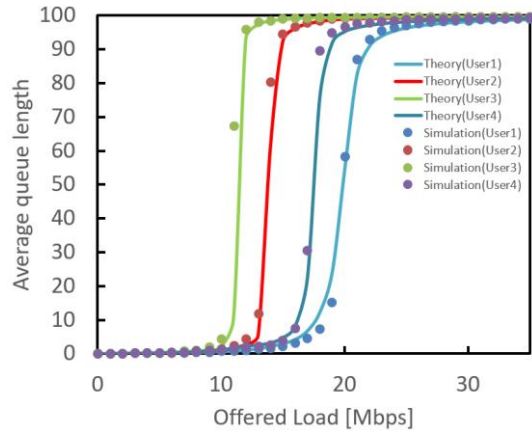


図 4.6 平均キュー長

表 4.3 使用したフレームサイズ, 送信レート

User	User1	User2	User3	User4
Frame Size[byte]	1500	1000	1000	500
Transmission rate[Mbps]	54	54	54	54

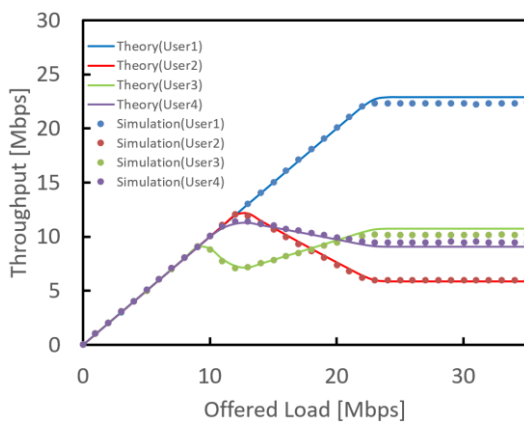


図 4.7 スループット

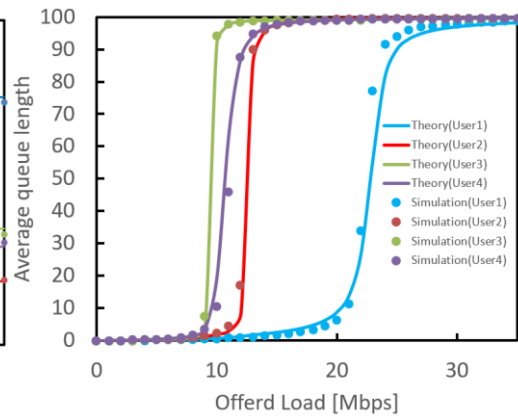


図 4.8 平均キュー長

### 考察

図 4.3-図 4.8 から提案モデルとシミュレーションとの結果はよく一致しており, 提案モデルは異なるフレーム長を用いる端末が存在し, キャリアセンスできない端末が存在する状況の解析にも有効な結果を示すことがわかる. なお, 図 4.3 に見られる, 中心に位置するユーザ (ユーザ 2) のスループットが減少する現象は, ユーザ 2 が両端のユーザの送信に晒されることにより, バックオフタイムを減らす機会を失ってしまうことにより発生する. このような晒し現象によるスループットの低下は既存の研究で報告されている内容と一致する.



#### 4.6 飽和状態を扱う簡易性能評価モデル

ここで、3 章で紹介した簡易性能評価モデルと同様にして、キャリアセンスできない端末が存在する状況において、飽和状態であることを仮定した Wi-Fi 簡易性能評価モデルについての紹介と説明を行う。簡易性能評価モデルではキュー長情報を使用することを放棄することで少数の端末の状態によって表現し、連億時間マルコフ連鎖でモデル化する。

##### 4.6.1 簡易性能評価モデル説明

端末 (無線端末, アクセスポイント) が常に送信バッファ内にフレームを所持している (飽和状態) であるシングルホップ無線 LAN を考える。このモデルはキュー長情報を使用することを放棄し、考慮すべき状態数が減少することにより、簡易にキャリアセンスできない端末が存在する状況における Wi-Fi 無線 LAN 性能評価を行うことができる。

図 4.9 にこのモデルの状態遷移図を示す。

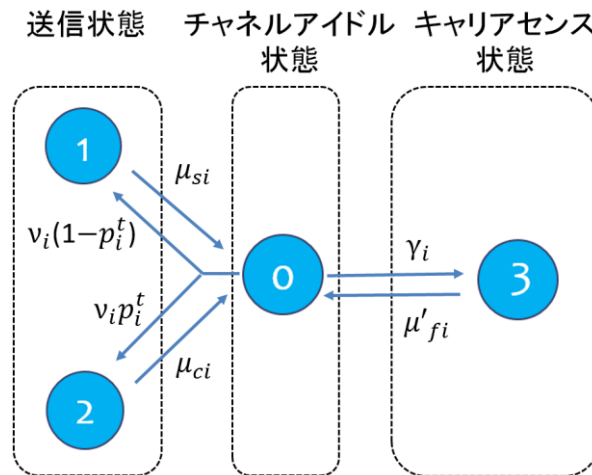


図 4.9 状態遷移関係 (簡易性能評価モデル)

状態遷移図からバックオフタイムを 0 で停止している状態を考慮する必要がなくなり、考慮すべき状態数が減っていることがわかる。

##### 4.6.2 平衡方程式

キュー長情報を用いない簡易性能評価モデルでは平衡方程式は以下のようになる。このモデルでは、端末  $i$  が状態 1 にいる定常状態確率を  $\pi_i^{(1)}$  と表す。

$$\begin{aligned}
 (\gamma_i + \nu_i)\pi_i^{(0)} &= \mu_{si}\pi_i^{(1)} + \mu_{ci}\pi_i^{(2)} + \mu_{fi}\pi_i^{(3)}, \\
 \mu_{si}\pi_i^{(1)} &= \nu_i(1 - p_i)\pi_i^{(0)}, \\
 \mu_{ci}\pi_i^{(2)} &= \nu_i p_i \pi_i^{(0)}, \\
 \mu_{fi}\pi_i^{(3)} &= \gamma_i \pi_i^{(0)}.
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

定常状態確率を求めた後, 簡易モデルではスループットは以下で得る.

$$\text{Throughput} = \mu_{si} L_i \pi_i^{(1)}.$$

#### 4.6.3 未知パラメタ ( $v_i, p_i, \gamma_i$ ) 導出法

$p_i, v_i, \gamma_i$  は 4.4 で紹介したキュー長を使用するモデルと同様に導出する.

#### 4.6.4 数値評価

提案した簡易性能評価モデルを以下に示すシナリオに適用し, 結果を評価する. なお, 端末は IEEE802.11a を使用するものとする.

シナリオ

直線状に位置し, 異なるフレーム長を扱うテザリングユーザ 3 人, 4 人が通信している状況を考える. 各ユーザは IEEE802.11.a に従い通信を行う. フレーム伝送レート 54Mbps を使用し, それぞれのユーザは隣のスループットをキャリアセンスできるものとする. 各ユーザ端末は飽和状態にあるものとし, 各ユーザが獲得できるスループットについてシミュレーション結果との比較を行う. ユーザの使用するフレームサイズ, 伝送レートは表 4.4 - 表 4.5 に示す.

表 4.4 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3
Frame Size[byte]	1500	1000	500
Transmission rate[Mbps]	54	54	54

表 4.5 使用したフレームサイズ, 送信レート

node	node1	node2	node3	node4
Frame Size[byte]	1500	1500	1000	1000
Transmission rate[Mbps]	54	54	54	54

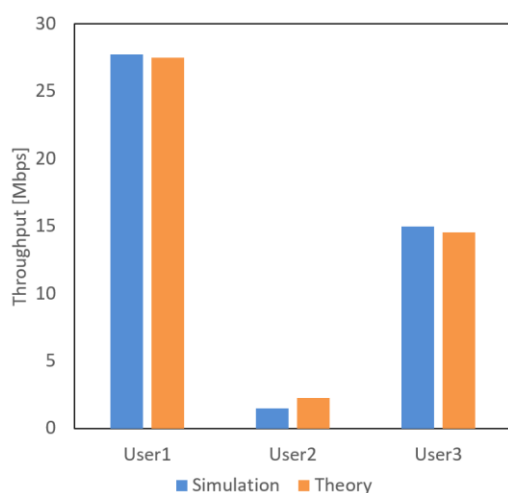


図 4.10 スループット結果

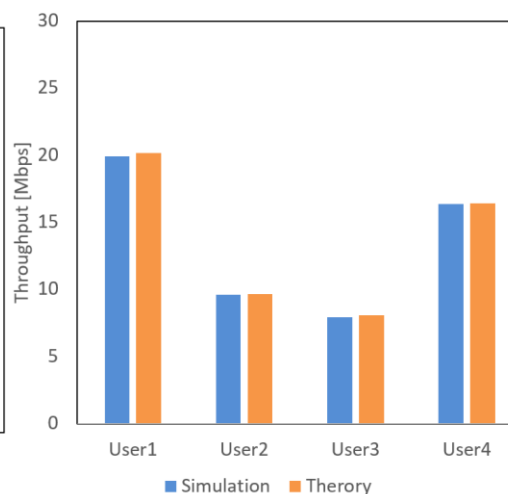


図 4.11 スループット結果

#### 考察

図 4.10, 図 4.11 より提案手法の結果とシミュレーション結果はほぼ一致しており, 提案した簡易性能評価法がキャリアセンスできない端末が存在する状況においてフレーム長の異なるフローが競合しているシナリオについても解析が可能であるとわかる.

## 第5章 まとめ

本研究ではフレーム長の異なるフロー間の競合を考慮した Wi-Fi 性能評価法を提案した。提案モデルでは端末をマクロな状態で表現し、状態とキュー長を連続時間マルコフ連鎖によってモデル化することで難解であった非飽和状態のスループットや平均キュー長の解析を簡単に得ることを示しただけでなく、今まで解析することのできなかつたフレームサイズの異なる端末が競合するネットワークについての評価、解析も可能であることを示した。伝送レートの異なる端末が競合するシナリオの解析結果からは、ネットワーク中に存在する低伝送レートを使用する端末の存在がネットワークの効率を下げてしまうことを示し、高伝送レートを使用している端末のスループットにも負の影響となることを解析的にも明らかにし、指摘した。また、提案モデルをネットワーク中のすべての端末をキャリアセンスできる状況だけでなく、キャリアセンスできない端末が存在する状況へも適用することで提案モデルの有用性を示し、端末ごとのフレーム長や伝送レートによってネットワークのダイナミクスが変化していく現象を明らかにした。

そして、論文中ではより簡易に飽和状態を解析することのできる簡易性能評価モデルについても紹介し、既存の手法よりも簡易にスループット評価ができるモデルとして、その有用性を示した。

今後は隠れ端末問題を扱う解析モデルへの拡張等が考えられる。また、解析モデルの利点であるパラメタとネットワークの特性を陽に把握することができる利点を利用することにより、MAC プロトコル設計への活用が考えられる。

## 参考文献

- [1]. 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.
- [2]. 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.
- [3]. R. Liu, G. J. Sutton, and I. Collings, "A new queueing model for qos analysis of IEEE 802. 11 DCF with finite buffer and load, " IEEE Trans. Wireless Communications, vol. 9, no. 8, pp. 2664–2675, 2010.
- [4]. 守倉正博, 久保田修治 "改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書,"
- [5]. X. Li, et al., "A simple model and analysis of Wi-Fi tethering with offloading through Wi-Fi access network, " IEICE General Conference, pp. BS-3-2, 2015.
- [6]. X. Li, et al., "Light-weight performance analysis of Wi-Fi offload using mean-field approximation, " APCC, pp. 120–125, 2015.
- [7]. 成田侑樹, 後藤優太, 李想, 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 IEEE802. 11DCF 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, pp. NS2015–125, 2015.
- [8]. 成田侑樹, 後藤優太, 李想, 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, "テザリングユーザ密集環境におけるスループット性能異常, " 電子情報通信学会 ソサエティ大会, pp. B-6-36, 2015
- [9]. Soung Chang Liew, "Back-of-the-Envelope Computation of Throughput Distributions in CSMA Wireless Networks, " IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 9, Issue. 9, pp. 1319 - 1331, Sept. 2010.
- [10]. A. Kumar, E. Altman, D.Mirandi, and M. Goyal,"New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE802.11Wireless LANs," IEEE/ACM Trans.Networking , vol.15.no.3,pp.588-600,Jun.2007.
- [11]. 後藤優太, 成田侑樹, 李想, 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, "テザリングユーザ密集環境におけるスループット性能異常, " 電子情報通信学会 ソサエティ大会, B-6-36, 2015.

## 謝辞

本研究において、長くご指導をいただいた塩田茂雄教授に深く感謝いたします。また無線LAN 関係の研究を行っていた先輩方、特に李さんは、研究に関する多くの助言をしていただきありがとうございました。そして日ごろから支えてくれた塩田研究室の皆様のご協力に心から感謝いたします。

## 定常状態確率導出法

すべての端末をキャリアセンス可能なモデルの定常状態確率計算方法を説明する。

式(3.2)より

$\pi_i(0,0^*)$ を用いて $\pi_i(0,0)$ 、 $\pi_i(0,3^*)$ 、 $\pi_i(0,4)$ を次式で計算する。

$$\pi_i(0,3^*) = \frac{\gamma_i(1-p_i^f)}{\lambda_i + \mu'_{si}} \pi_i(0,0^*), \quad \pi_i(0,4) = \frac{\gamma_i p_i^f}{\lambda_i + \mu'_{ci}} \pi_i(0,0^*),$$

$$\pi_i(0,0) = \left[ (\lambda_i + \gamma_i) - \frac{\gamma_i(1-p_i^f)}{\lambda_i + \mu'_{si}} - \frac{\gamma_i p_i^f}{\lambda_i + \mu'_{ci}} \right] \frac{\pi_i(0,0^*)}{\nu_i}.$$

$\pi(0,0)$ が得られたことにより、式(3.2)の4番目と5番目の式より $\pi_i(0,3)$ と $\pi_i(0,4)$ が次のように求められる。

$$\pi_i(0,3) = \frac{\gamma_i(1-p_i^f)}{\lambda_i + \mu'_{si}} \pi_i(0,0), \quad \pi_i(0,4) = \frac{\gamma_i p_i^f}{\lambda_i + \mu'_{ci}} \pi_i(0,0).$$

次に式(3.2)の総和をとることにより、以下の式が得られる。

$$\lambda_i \pi_i(0) = \mu_{si} \pi_i(1,1),$$

$$\pi_i(0) = \sum_{j=0}^4 \pi_i(0,j) + \pi_i(0,3^*) + \pi_i(0,4^*).$$

従い、 $\pi_i(1,1)$ が次のように求まる。

$$\pi_i(1,1) = \frac{\lambda_i \pi_i(0)}{\mu_{si}}.$$

$\pi_i(1,1)$ が求まれば式(3.1)の2番目の式より、 $\pi_i(1,0)$ を求めることができる。

$$\pi_i(1,0) = \frac{\lambda_i + \mu_{si}}{\nu_i(1-p_i^f)} \pi_i(1,1) - \frac{\lambda_i}{\nu_i} \pi_i(0,1).$$

$\pi_i(1,0)$ が求まれば式(3.1)の3、4、5番目の式より $\pi_i(1,2)$ 、 $\pi_i(1,3)$ 、 $\pi_i(1,4)$ が求まる。そして

式(3m1)の総和をとることにより、次が得られる。

$$\lambda_i \pi_i(1) = \mu_{si} \pi_i(2,1),$$

$$\pi_i(1) = \sum_{j=0}^4 \pi_i(1,j).$$

従い、 $\pi_i(2,1)$ が次のように求まる。

$$\pi_i(2,1) = \frac{\lambda_i \pi_i(1)}{\mu_{si}},$$

以降は $\{\pi_i(j, 0), \pi_i(j, 1), \pi_i(j, 2), \pi_i(j, 3), \pi_i(j, 4)\}_{j=0}^{k-1}$  が求まっていれば、同様の手順で $\pi_i(k, 0), \pi_i(k, 1), \pi_i(k, 2), \pi_i(k, 3), \pi_i(k, 4)$ が漸化的に計算することができる。まず式(3.1)より、任意の $2 < k < K$ について、

$$\lambda_i \pi_i(k-1, 1) = \mu_{si} \pi_i(k, 1).$$

が成立することがわかる。従って、 $\pi_i(k, 1)$ は以下のようになる。

$$\pi_i(k, 1) = \frac{\lambda_i \pi_i(k, 1)}{\mu_{si}}.$$

次に式(3.1)の2番目の式から、 $\pi_i(k, 0)$ を以下の式で計算する。

$$\pi_i(k, 0) = \frac{\lambda_i + \mu_{si}}{\nu_i(1-p_i^t)} \pi_i(k, 1) - \frac{\lambda_i}{\nu_i(1-p_i^t)} \pi_i(k-1, 1).$$

$\pi_i(k, 0)$ が求まれば、式(3.1)の3, 4, 5番目の式から、 $\pi_i(k, 2), \pi_i(k, 3), \pi_i(k, 4)$ が求まる。また、 $k = K$ の時には、 $\pi_i(K, 1)$ を求めた後、式(3.3)の2番目の式から、 $\pi_i(K, 0)$ を以下の式で計算する。

$$\pi_i(K, 0) = \frac{\lambda_i + \mu_{si}}{\nu_i(1-p_i^t)} \pi_i(K, 1) - \frac{\lambda_i}{\nu_i(1-p_i^t)} \pi_i(K-1, 1).$$

その後、式(3.3)の3, 4, 5番目の式より $\pi_i(K, 2), \pi_i(K, 3), \pi_i(K, 4)$ を求める。 $\pi_i(0, 0^*)$ の値は、全確率が1であることから求まる。

### 簡易モデルの定常状態確率導出法

式(3.4)の2, 3, 4, 5番目の式より

適当な初期値を与えた $\pi_i(0)$ を用いて $\pi_i(1), \pi_i(2), \pi_i(3), \pi_i(4)$ を以下で計算する。

$$\begin{aligned} \pi_i^{(1)} &= \frac{\nu_i(1-p_i^t)}{\mu_{si}} \pi_i^{(0)} \\ \pi_i^{(2)} &= \frac{\nu_i p_i^t}{\mu_{ci}} \pi_i^{(0)} \\ \pi_i^{(3)} &= \frac{\gamma_i(1-p_i^f)}{\mu_{si}} \pi_i^{(0)} \\ \pi_i^{(4)} &= \frac{\gamma_i p_i^f}{\mu_{ci}} \pi_i^{(0)} \end{aligned}$$

次に $\pi_i(1), \pi_i(2), \pi_i(3), \pi_i(4)$ を式(3.4)の1番目の式に適用し $\pi_i(0)$ を計算する。

## 定常状態確率導出法

キャリアセンスできない端末が存在するモデルの定常状態確率導出法を説明する。

式(4.2)より $\pi_i(0,0^*)$ を用いて $\pi_i(0,0)$ ,  $\pi_i(0,3^*)$ 式で算する

$$\pi_i(0,3^*) = \frac{\gamma_i(1-p_i^f)}{\lambda_i + \mu'_{si}} \pi_i(0,0^*), \quad \pi_i(0,0) = \left[ (\lambda_i + \gamma_i) - \frac{\gamma_i}{\lambda_i + \mu'_{si}} \right] \frac{\pi_i(0,0^*)}{\nu_i}.$$

$\pi_i(0,0)$ が得られたことにより, 式(4.2)の4番目と5番目の式より $\pi_i(0,3)$ が次のように得られる

$$\pi_i(0,3) = \frac{\gamma_i}{\lambda_i + \mu'_{si}} \pi_i(0,0).$$

次に式(4.2)の総和をとることにより, 以下の式が得られる.

$$\begin{aligned} \lambda_i \pi_i(0) &= \mu_{si} \pi_i(1,1), \\ \pi_i(0) &= \sum_{j=0}^3 \pi_i(0,j) + \pi_i(0,3^*). \end{aligned}$$

$\pi_i(0)$ が求まったので,  $\pi_i(1,1)$ が次のように求まる.

$$\pi_i(1,1) = \frac{\lambda_i \pi_i(0)}{\mu_{si}}.$$

$\pi_i(1,1)$ が求まると式(4.1)の2番目の式より,  $\pi_i(1,0)$ を求めることができる.

$$\pi_i(1,0) = \frac{\lambda_i + \mu_{si}}{\nu_i(1-p_i)} \pi_i(1,1) - \frac{\lambda_i}{\nu_i} \pi_i(0,0^*).$$

$\pi_i(1,0)$ が求まれば式(4.1)の3, 4番目の式より $\pi_i(1,2)$ ,  $\pi_i(1,3)$ が求まる

式(4.1)の総和をとることにより, 次が得られる.

$$\begin{aligned} \lambda_i \pi_i(1) &= \mu_{si} \pi_i(2,1), \\ \pi_i(1) &= \sum_{j=0}^3 \pi_i(1,j). \end{aligned}$$

$\pi_i(1)$ が求まったことから,  $\pi_i(2,1)$ が次のように決まる.

$$\pi_i(2,1) = \frac{\lambda_i \pi_i(1)}{\mu_{si}}.$$



以降は $\{\pi_i(j, 0), \pi_i(j, 1), \pi_i(j, 2), \pi_i(j, 3)\}_{j=0}^{k-1}$  が求まっていれば、同様の手順で $\pi_i(k, 0)$ ,  $\pi_i(k, 1)$ ,  $\pi_i(k, 2)$ ,  $\pi_i(k, 3)$ は漸化的に計算することができる。  
式(4. 2)より、任意の $2 < k < K$ について、

$$\lambda_i \pi_i(k-1, 1) = \mu_{si} \pi_i(k, 1).$$

が成立することがわかる。従って、 $\pi_i(k, 1)$ は以下のようになる。

$$\pi_i(k, 1) = \frac{\lambda_i \pi_i(k, 1)}{\mu_{si}}.$$

次に式(4.2)の 2 番目の式から、 $\pi_i(k, 0)$ で計算する。

$$\pi_i(k, 0) = \frac{\lambda_i + \mu_{si}}{\nu_i(1-p_i)} \pi_i(k, 1) - \frac{\lambda_i}{\nu_i(1-p_i)} \pi_i(k-1, 1).$$

$\pi_i(k, 0)$ が求まったことから、式(4.2)の 3, 4 番目の式より、 $\pi_i(k, 2)$ ,  $\pi_i(k, 3)$ が求まる。  
また、 $k = K$ の時には、 $\pi_i(K, 1)$ を使用して、式(4. 3)の 2 番目の式から、 $\pi_i(K, 0)$ する。

$$\pi_i(K, 0) = \frac{\lambda_i + \mu_{si}}{\nu_i(1-p_i)} \pi_i(K, 1) - \frac{\lambda_i}{\nu_i(1-p_i)} \pi_i(K-1, 1).$$

その後、式(4.3)の 3, 4 番目の式より $\pi_i(K, 2)$ ,  $\pi_i(K, 3)$ を求める。 $\pi_i(0, 0^*)$ 値は、全確率が 1 であることから求まる。

### 簡易モデルの定常状態確率導出法

式(4.4)の 2, 3, 4 番目の式より

適当な初期値を与えた $\pi_i(0)$ を用いて $\pi_i(1)$ ,  $\pi_i(2)$ ,  $\pi_i(3)$ を以下で計算する。

$$\begin{aligned} \pi_i^{(1)} &= \frac{\nu_i(1-p_i)}{\mu_{si}} \pi_i^{(0)}, \\ \pi_i^{(2)} &= \frac{\nu_i p_i}{\mu_{ci}} \pi_i^{(0)}, \\ \pi_i^{(3)} &= \frac{\gamma_i}{\mu_{fi}} \pi_i^{(0)}. \end{aligned}$$

次に $\pi_i(1)$ ,  $\pi_i(2)$ ,  $\pi_i(3)$ を式(4.4)の 1 番目の式に適用し $\pi_i(0)$ を計算する。

## 研究成果

後藤優太, 成田侑樹, 李想, 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, "テザリングユーザ密集環境におけるスループット性能異常," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-6-36, 2015年9月9日(仙台) .

X. Li, Y. Narita, Y. Gotoh, S. Shioda, N. Komuro, H. Sekiya S. Sakata, K. Miyoshi, and T. Murase, "Light-weight performance analysis of Wi-Fi offload using mean-field approximation," APCC, 2015.

X. Li, Y. Narita, Y. Goto, S. Shioda, N. Komuro, H. Sekiya, S. Sakata, K. Miyoshi, T. Murase, "A simple model and analysis of Wi-Fi tethering with offloading through Wi-Fi access network," 電子情報通信学会 総合大会, 2015年3月(大津) .

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, 2015年11月27日(新潟) .

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," 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2015年度待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, 2015年1月21日(東京) .

李想, 後藤優太, 塩田茂雄, "マクロ状態表現による IEEE 802.11 DCF 性能評価モデル," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-11-31, 2016年9月22日(札幌) .

# ABSTRACT

In many existing wireless LAN performance evaluation models, the state of the wireless terminal is represented by two stages, a back-off stage and a back-off counter, but this state representation is one factor complicating the performance analysis of the wireless LAN. In this paper, we describe the state of the wireless terminal in a few macro states such as the idle state, the transmission state, and the channel idle state. The state of the terminal and the frame queue length is governed by continuous-time Markov chain. Our proposed model can evaluate not only saturated state (There is always a frame to send) but also non-saturated state. It can also handle environments where terminals using different frame lengths. In this paper, we apply the proposed model not only to a simple scenario where all competing terminals are able to sense carriers from each other but also to scenarios where hidden terminals and exposed terminals are present, obtained the results from the simulation and the proposed model. We show the usefulness of the proposed model by comparing the results.

# 概要

異なるアプリケーションを利用する複数のユーザが、一つの Wi-Fi を共有して使用することが一般的となっている。Wi-Fi で使用されるフレームの長さはアプリケーションに依存し、またスループットはフレーム長に依存するため、ユーザが様々なアプリケーションを利用する際に、ユーザが獲得するスループットに格差が生じる問題が発生する。この問題が発生するメカニズムを明らかにし、発生を防止するためには、性能評価モデルを用いて理論的に Wi-Fi の挙動を解析することが有用である。本論文では、異なるフレーム長を使用する端末が混在する環境に適用できる Wi-Fi 性能評価モデルを提案する。

多くの既存の無線 LAN 用性能評価モデルでは、無線端末の状態をバックオフステージとバックオフカウンタの2つで表すが、この状態表現は、無線 LAN の性能解析を複雑化する1つの要因となっている。本論文では無線端末の状態をアイドル状態、送信状態、チャンネルアイドル状態という少数のマクロな状態で表現し、端末の状態とフレームキュー長の変化を連続時間マルコフ連鎖によってモデル化することで性能解析を行う。提案モデルにより、飽和状態（端末が常に送るべきフレームを所持している状態）のみならず、（既存の性能評価モデルでは扱いが難しかった）非飽和状態での性能評価が容易になる。

本論文ではすべての競合端末が互いにキャリアセンス可能な単純なシナリオだけでなく、隠れ端末やさらし端末が存在するシナリオに対しても提案モデルを適用し、シミュレーションで得られた結果と提案モデルから得られた結果を比較することにより、提案モデルの有用性を示す。

千葉大学大学院工学研究科

修士論文

フレーム長の異なるフロー間の競合を考慮した

Wi-Fi 性能評価法

平成 29 年 2 月提出

建築・都市科学専攻  
都市環境システムコース

指導教員：塩田 茂雄

15TM0324

後藤 優太

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 論文の構成.....	2
第2章 背景技術.....	3
2.1 IEEE802. 11.....	3
2.2 周波数.....	4
2.2.1 2.4GHz.....	4
2.2.2 5GHz.....	4
2.3 動作モード.....	4
2.3.1 インフラストラクチャモード.....	5
2.3.2 アドホックモード.....	5
2.3.3 AP との接続.....	6
2.4 隠れ端末問題及びさらし端末問題.....	6
2.4.1 隠れ端末問題.....	7
2.4.2 さらし端末問題.....	8
2.5 MAC(Medium Access Control)プロトコル.....	9
2.5.1 CSMA/CA.....	10
2.5.2 キャリアセンス・レベル.....	10
2.5.3 IFS(Inter Frame Space)間隔による制御.....	11
2.5.4 バックオフ制御.....	12
2.6 既存研究.....	13
2.6.1 Bianchi の性能解析手法.....	14
第3章 Wi-Fi 性能評価法 全ての端末をキャリアセンス可能なモデル.....	16
3.1 モデルの詳細.....	16
3.2 フレーム長の異なる端末が混在する状況での注意事項.....	18
3.2.1 状態継続期間長導出.....	19
3.3 平衡方程式.....	22
3.4 未知パラメタ ( $v_i, p_{it}, p_{if}, \gamma_i$ ) 導出方法.....	23
3.5 計算手順.....	24
3.6 数値評価.....	25
3.7 飽和状態を扱う簡易性能評価モデル.....	30
3.7.1 簡易性能評価モデル説明.....	30

---

3.7.2	平衡方程式 .....	30
3.7.3	未知パラメタ ( $v_i, p_{it}, p_{if}, \gamma_i$ ) 導出法 .....	31
3.7.4	数値評価 .....	31
4章	Wi-Fi 性能評価法 キャリアセンスできない端末が存在するモデル .....	33
4.1	本章モデルの詳細 .....	33
4.2	フレーム長が異なるフローを扱うための考え方 .....	35
4.3	平衡方程式 .....	36
4.4	未知パラメタ ( $v_i, p_i, \gamma_i$ ) の導出方法 .....	37
4.5	数値評価 .....	39
4.6	飽和状態を扱う簡易性能評価モデル .....	41
4.6.1	簡易性能評価モデル説明 .....	41
4.6.2	平衡方程式 .....	41
4.6.3	未知パラメタ ( $v_i, p_i, \gamma_i$ ) 導出法 .....	42
4.6.4	数値評価 .....	42
第5章	まとめ .....	43
	参考文献 .....	44
	謝辞 .....	45
	研究成果 .....	50