

H28 年度卒業論文

BoE法によるテザリングユーザ密集環境でのスループット性能評価

平成 29 年 1 月 提出

千葉大学工学部都市環境システム学科

指導教員 塩田茂雄

13T0232B SUN JINGWEN

目次

第一章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 論文の構成.....	2
第二章 無線LAN.....	3
2.1 ランダムアクセスプロトコル.....	3
2.2 IEEE802.11.....	4
2.3 動作モード.....	5
2.3.1 APとの接続.....	7
2.4 マルチホップ無線LAN.....	8
2.4.1 マルチホップ無線LANとは.....	8
2.4.1 マルチホップ無線LANで生じる問題.....	9
隠れ端末問題.....	9
晒し端末問題.....	10
2.5 MAC プロトコル.....	11
2.5.1 CSMA/CA.....	11
2.5.2 IEEE 802.11 DCF方式.....	12
第三章 Bianchi性能解析法.....	15
第四章 Back-of-the-Envelope.....	18
簡単ネットワーク.....	18
複雑ネットワーク.....	20
第五章 BOEによる理論値とシミュレーション調査.....	21
5.1 シミュレーション概要.....	21
5.2 シミュレーション条件.....	21
5.3 BoEの理論値と実験値.....	22
5.3.1 シナリオ1 規則配置.....	22
5.3.2 シナリオ2 ランダム配置.....	28
5.3.3 結果考察.....	34

第六章 結論.....	35
参考文献.....	36
謝辭.....	37

第一章 序論

1.1 研究の背景

情報通信技術の進歩により、無線機能を持ったスマートフォンやタブレットなどの携帯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ことが増えている。そしてモバイルルータやテザリングなどの無線LANシステムも増加している。モバイルルータとはインターネットを3G回線やWIMAXなどの無線通信技術を用いて接続し、パソコンやゲーム機などの無線LAN対応機器に対して、IEEE802.11を利用して、無線LANのアクセスポイントとして接続させるルータである。またテザリングとは個人の端末を無線LANで携帯電話につないでインターネットに接続することである。無線LANはLANケーブルの接続が不要なため、アクセスポイント(AP)があれば場所に左右されずにインターネットを利用できる。

しかし、近年テザリングの普及によって多くの無線LANシステムが密集し、複数の端末が同時にリソースを利用することも多くなってきた。従来、端末競合がある場合のIEEE802.11 DCFスループットを算出するのに、Bianchiの性能解説法が用いられてきたが、その計算は大変複雑である。Bianchiのほかスループット予測を可能にするBack-of-the-Envelope(BOE)法[1]が提案され、名前通りに封筒の裏でできるほど簡単な計算法であり、スループットの公平性などのテザリング性能評価に近道を提供している。

1.2 研究目的

本研究では、複数のテザリング端末が隣接している場合各端末のスループットをBOE法で計算しまたシミュレーションを用いた結果検証を行う。テザリング(アクセスポイント)1基に対して無線端末1台がアップロードの通信を行う。その組み合わせ本数を近距離で複数組を用意して通信の干渉による混雑を再現し、様々なシナリオでのBOE法による理論スループットの正しさを検証する。

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 無線LAN

無線LANの概要とその特徴を述べる

第3章 Bianchi性能解析法

Bianchi性能解析法によるIEEE802.11 DCFのスループット計算

第4章 Back-of-the-Envelope

BOE法について述べる

第5章 BOEによる理論値とシミュレーション調査

シミュレーションを行い、理論値と実験値を比較する。

第6章 結論

本文をまとめる。

第2章 無線LAN

2.1ランダムアクセスプロトコル

無線LANに限らず、多く無線通信方式では複数の端末が共通の無線チャンネル上で通信を行う。無線チャンネルのようにブロードキャスト型ネットワークリソースを用いた通信においては、端末間の競合をできるだけ回避するためのリソースの利用ルールや、複数の端末が同時にリソースを利用しようとして競合が生じた時の解決方法などを定めておく必要がある。

競合の回避方法には、大きく分けて2つのアプローチが存在する。1つはあらかじめリソースを細かく分割し、同時に行われる通信ごとに異なるリソースを割り当てる方法である。もう一つはリソースを分割せず、データを送信したい端末に自由にデータの送信を許可する方法である。ただし、他の端末が利用中の場合は利用を見合わせる、競合が生じたときはランダムな時間を待って再送するなどの単純なルールを付加する。ランダムアクセスプロトコルと呼ぶ。無線LANは主として後者のランダムアクセスプロトコルを採用している。

無線LANでは、アクセスポイントと、アクセスポイントと通信する端末で構成されるネットワークを基本サービスセットと呼ぶ。基本サービスセット内では、アクセスポイントと端末はデータをフレームという単位に分割して、共通の無線チャンネルを介してフレーム単位でデータを送信する。複数のフレームを連続して送信したい場合も、一つのフレーム送信後はいったん無線リソースの利用権を解放し、改めて次のフレーム送信のために無線リソースを捕捉する。これにより、一つの端末が長時間使い続けることを防ぐ。

2.2 IEEE802.11

IEEE802.11[2]とは、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer：米国電気電子技術者協会) によって1997年に初めて統一された無線LAN規格であり、Wi-Fiとも呼ばれている。

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を目的としている。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転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。

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、CAMA/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。伝送速度や変調方式により、IEEE802.11b[3]、IEEE802.11a、IEEE802.11g[4]、IEEE802.11n、IEEE802.11ac[5]など、複数の派生がある。それぞれが物理層やMAC層のプロトコルに違いがある。一覧を下表に示す。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2.2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	変調方式	策定期間
IEEE802.11	2.4	2	FHSS, DSSS	1997
IEEE802.11b	2.4	11	DSSS/CCK	1999
IEEE802.11a	5	54	OFDM	1999
IEEE802.11g	2.4	54	DSSS/CCD, OFDM	2003
IEEE802.11n	2.4/5	600	MIMO/OFDM	1009
IEEE802.11ac	5	6930	OFDM/MU-MIMO	2014

2.3 動作モード

無線LANにおいて、無線通信の動作モードは大きくインフラストラクチャモードとアドホックモードの2種類に分けられる。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行う。無線間のホップ数は、インフラストラクチャーネットワークは一般的に一ホップであるが、アドホックネットワークは数ホップとなることもある。[6]

インフラストラクチャモード (図 2.1)

このモードで無線端末はAPを介して通信を行い、インターネットへアクセスする。1つのAPが複数の無線端末に対応している場合はBasic Service Set (BSS) と呼ばれる。現在さまざまな場所で利用されている一般的なネットワーク形式はインフラストラクチャモードを用いる。

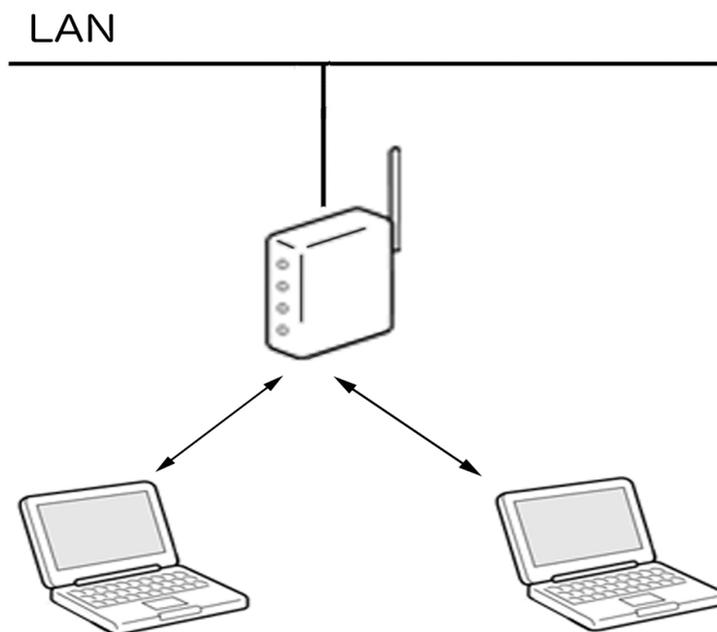


図 2.1 インフラストラクチャモード

アドホックモード (図2.2)

アドホックモードでは、特定の親機（アクセスポイント）を介さずに、無線端末（子機）同士が直接的、対等に相手と通信する。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最も基本的なネットワークであり、Independent Basic Service Set (IBSS) とも呼ばれる。

アドホックネットワークの特徴として、一時的に集まった無線端末でネットワークを随時構築することができる。また、端末同士には自律分散で制御を行うため、ネットワークに参加・離脱することが簡単である。これらの特徴を利用して、自然災害が発生した後、既存の通信インフラが破壊された場合には、柔軟かつ簡单的にネットワークを構築する手段である。

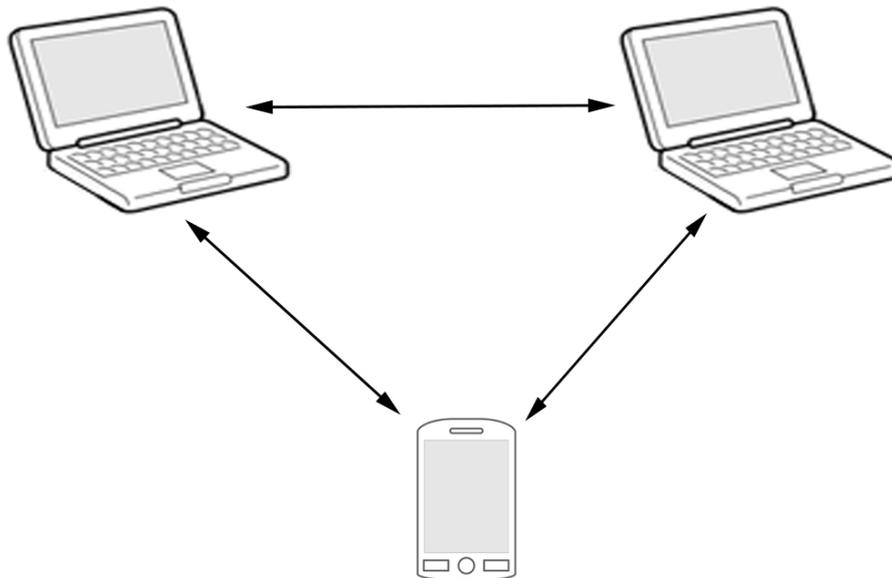


図2.2 アドホックモード

2.3.1 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、スキャンニングと呼ばれる。スキャンニングには2種類ありそれぞれアクティブスキャンニング、パッシブスキャンニングと呼ばれる[7]。

・パッシブスキャンニング

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対して順番に検索を行う。

・アクティブスキャンニング

パッシブスキャンニングにおいて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ニ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を確認する。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 マルチホップ無線LAN

2.4.1 マルチホップ無線LANとは

マルチホップ無線LANとは、無線端末から有線ネットワークにつながっているAPまでの通信の間に、複数のAPを介すネットワークのことである。有線網の最後の1ホップのみを無線化する既存の無線LANでは今後の無線通信への需要をカバーするためのインフラの整備には多大な費用や時間が費やされると予想される。そこで、AP間のケーブルを無線で置き換え、無線リンクで直接通信できないAP間を他のAPを中継点として用いる複数無線リンクを経由したマルチホップ通信を行うネットワークコンセプトが提案されている(図2.5)。このネットワークコンセプトには、次のような特徴が挙げられる[8]:

1. 無線LANのAPは互いに有線でワイヤリンクする必要はなく、無線マルチホップで通信を行う。
2. 自律分散で制御経路を行うため、APを置くだけでよい。
3. 端末へは従来の無線LANサービスを提供し特別な機能を必要としない。
4. 拡張性があり、APを自由に追加できる。
5. 端末へインターネット接続サービスを提供できる。

APは原則として固定した給電力可能な場所に設置されるが、移動や移設する場合もあり、AP間を無線マルチホップで結ぶことにより、より設置や移動・移設に対する自由度が増し、無線LANのサービスエリアを容易に拡大できるというメリットがある。そのため、次世代型のネットワークアーキテクチャとして現在さまざまな研究や提案がされている[9]。

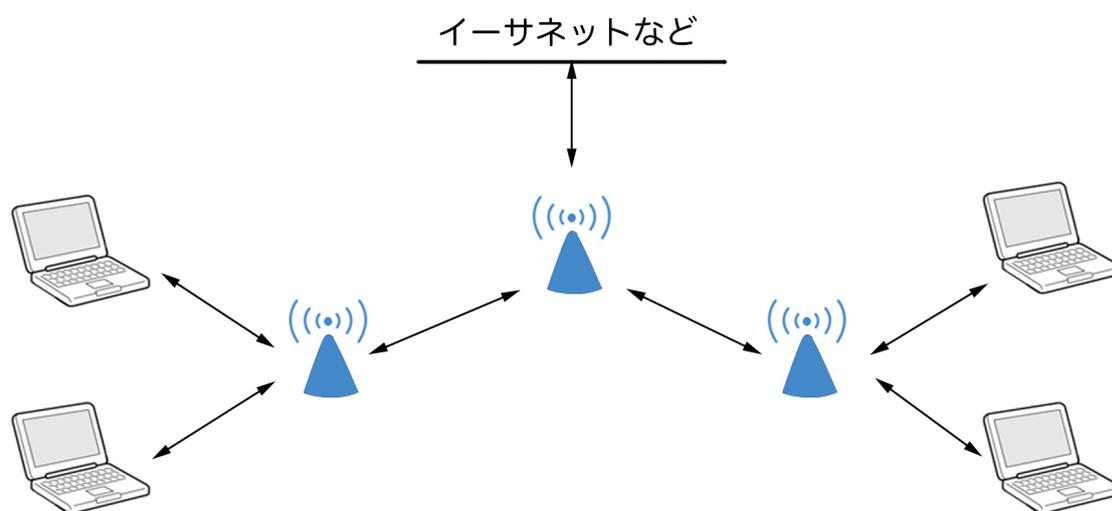


図 2.5 マルチホップイメージ図

2.4.1 マルチホップ無線LANで生じる問題

無線マルチホップネットワークでは既存の有線網の終端だけ無線LANにする方法に比べ通信のスループットが低下する。これは同一の無線チャンネルを複数のAPが共有することにより、隠れ端末やさらし端末問題によるフレーム衝突が頻繁に発生し、その結果、フレーム再送の増加や再送回数超過によるパケット廃棄が起きるからである。このことは、パケットの到着を保証しないUDP通信や、リアルタイムに通信することが必要なVoIPや動画ストリーミング等の通信の品質に重大な影響を及ぼす。そこで、この問題に対して様々なアプローチによる研究や提案がなされている。

隠れ端末問題

現在無線LAN接続において広く使われている規格IEEE802.11では多重アクセス制御にCSMA/CA方式が使用されている。この方式では無線局同士が互いの搬送波を検出できることを前提としているが、障害物の影響や、送波を検出するレベル設定などにより、同一のAPと通信する端末同士が互いの搬送波を検知できない場合がある。図2.6のように、両端の無線端末1、お互いにキャリアを検出できない場合には、中央のAPで衝突が発生する。端末1と2が互いに隠れた存在であるためこれを隠れ端末問題と呼ばれる[9][10]。

隠れ端末問題によるフレーム衝突を軽減するために、IEEE802.11では送信要求RTS (Request To Send) フレームと送信確認CTS (Clear To Send) フレームを使った仮想キャリアセンス方式が規定されている。図2.7の示すように、端末1がAPにデータを伝送する場合、端末はAPからのCTSを受信することから、端末1の送信状態を認識でき、フレーム衝突を防ぐことになる。

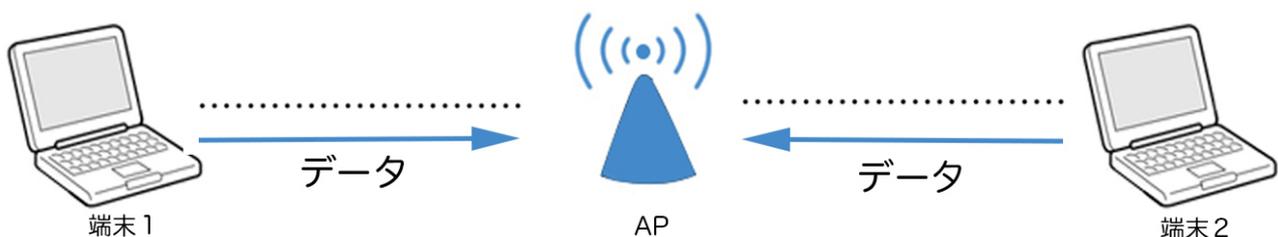


図 2.6 隠れ端末問題の例

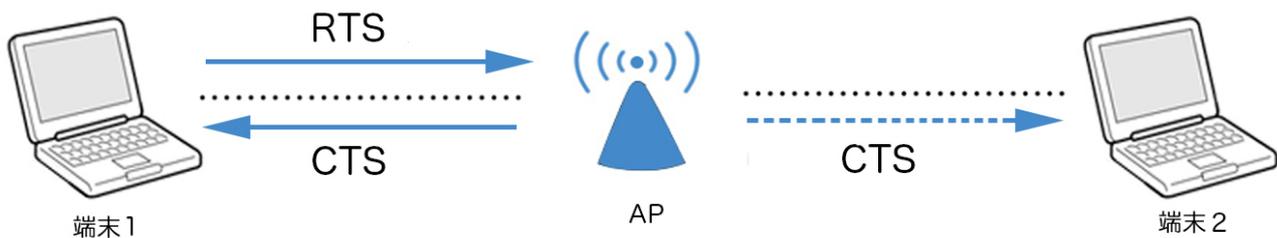


図 2.7 RTS/CTSによる隠れ端末の回避

さらし端末問題

端隠れ端末問題に加え，アドホックネットワークやマルチホップ無線LANなどでは晒し端末問題と呼ばれるものが発生する．実際に送受信を行わない無線端末であってもRTSもしくはCTSフレームを受け取った場合，フレームに規定された期間無線端末は送受信禁止状態(NAV：Network Allocation Vector)となる．マルチホップの環境ではRTS/CTSフレームは全ての無線端末が受け取るとは限らずNAV状態となった無線端末にRTSフレームを再送繰り返すことがある．さらに3ホップ以上のマルチホップでは晒し端末問題に加え偽装キャリアセンスの制御フレームが正常に機能しないことによるフレーム衝突が頻発することが知られている．[11]

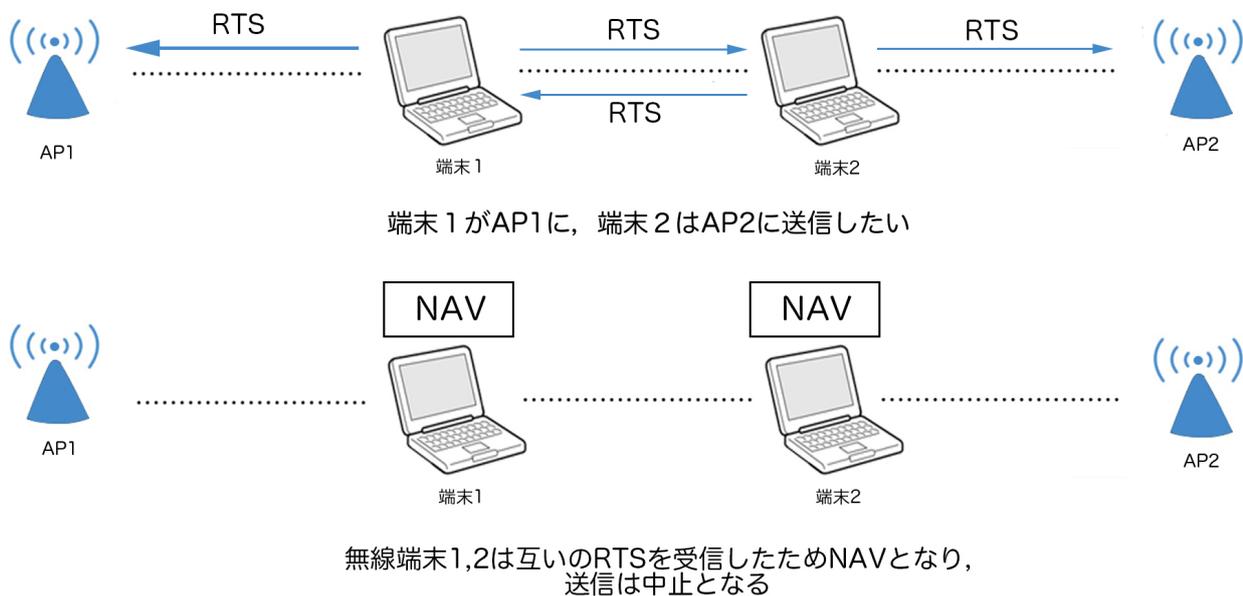


図 2.8 晒し端末問題の例

2.5 MAC プロトコル

MACはMedium Access Controlの略語であり、複数のノードが一つの伝送媒体を効率よく共有するため、送信のタイミングや送信方式を制御するプロトコル。

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すべ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。

2.5.1 CSMA/CA

CSMA方式[12]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を見合わせる。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）を確認する作業を搬送波検知と呼ぶ。

搬送波検知の仕組みにより、フレーム衝突は大幅に減少するが、完全になくなるわけでは無い。端末がフレームを送信すると同時に他の端末がその搬送波を検知できるわけではなく、信号の伝搬に要する時間分だけ遅れて搬送波が検出されるからである。この信号の伝搬に要する時間を伝搬遅延時間と呼ぶ。フレーム送信の開始から伝搬遅延時間の分だけ時間が経過する間に他の端末がフレームの送信を開始すると、フレームの衝突が発生する。IEEE 802.11規格の無線LANではDIFS(Distributed Inter-Frame Space)と呼ばれる期間、無線チャンネルから搬送波が検出されなくなつて初めて各端末は無線チャンネルがアイドルであると認識する仕組みを採用している。

搬送波検知の機能を取り入れても、フレーム衝突を避けることができない。このため、IEEE802.11規格の無線LANではフレーム衝突の検出に次のような仕組みを採用している。フレームを受信した端末はDIFSよりも短い時間(Short Inter-Frame Space : SIFS)経過後に送信元の端末に確認応答(Acknowledgement:ACK)用のフレーム(ACKフレーム)を送信する。フレーム送信元の端末は、このACKフレームが届くか否かによってフレーム衝突の有無を判断し、ACKフレームが届かない場合はランダムな時間待機し、待機後にフレームを再送する。この仕組みをCSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)と呼ぶ。

2.5.2 IEEE 802.11 DCF方式

IEEE 802.11規格は、MAC層(Medium Access Control層)に、CSMA/CAによる自律分散型の無線チャンネルアクセス制御を採用して、このアクセス制御の仕組みはDCF(distributed Coordination Function)と呼ばれている。[12]

・IFS(Inter Frame Space)間隔による制御

IEEE 802.11では、信号を送信するまで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。図2.3にIFS使用例を示す。

① SIFS(Short Inter frame Space)

IEEE 802.11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。

② DIFS(DCF Inter frame Space)

分散制御用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。

③ PIFS(PCF Inter frame 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。

④ EIFS(Extended Inter frame Space)

拡張したフレーム間隔。未使用中かつ未使用の原因がフレーム受信エラーと判断された時DIFSの代わりに送信待機する時間。

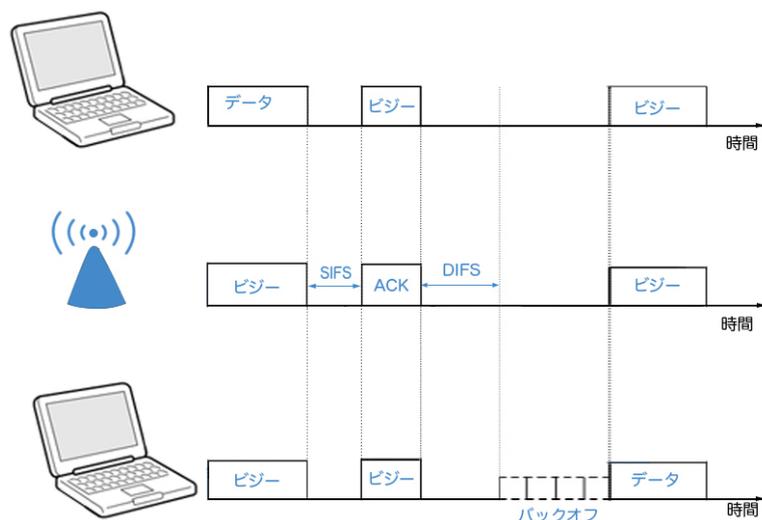


図 2.3 IFS 使用例

・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、802.11規格に定められている。

搬送は検知により搬送波が検出された際の待機時間は $StBc$ に設定される。ここで、 Bc はバックオフカウンターと呼ばれ、0以上 $CWmin$ (CW :Contention Window, IEEE802.11規格では $CWmin$ のデフォルト値は15である。)以下の乱数からランダムに選択される。 St はスロットタイム(802.11企画では $9\mu s$)である。バックオフカウンターはスロットタイム経過ごとに1ずつ減少し、バックオフカウンターが0になると端末はフレームを送信する。ただし、無線チャンネルがビジーの間はバックオフカウンターの動きを停止する。したがって、実際の待機時間は $StBc$ より長い。

フレーム送信後にACKフレームが届かず、フレームの再送を行う際の待機時間も $StBc$ に設定される。 Bc は0以上 CW 以下の整数からランダムに選ばれる。ここで、 CW は連続再送の回数 i (バックオフステージと呼ばれる)に以下のように依存する。

$$CW = \min \{ 2^i (CWmin + 1), CWmax + 1 \} - 1.$$

つまり、フレームの送信に失敗するたびに、 CW は2倍ずつ増加し、それとともにバックオフカウンターも大きく設定される傾向にある。これは各端末のフレーム送信間隔が短いために衝突が頻発していると考えて、フレーム送信間隔を広げて衝突を回避するための措置であり、2進指数バックオフと呼ばれる。 $CWmax$ に達した後は回数が増えても CW は $CWmax$ となる。またフレームの連続再送の回数に制限があり、それを越えるとフレームは廃棄され、端末は次のフレームの送信に

取り掛かる（この時バックオフカウンターは0に初期化される）。フレーム送信成功した場合も、バックオフステージは0に初期化される。

フレーム送信成功、フレーム廃棄のいずれの場合も、端末は次に送信すべきフレームの有無に関わらず、バックオフカウンターを再指定し、送信待機状態に入る。この処理をポストバックオフと呼ばれる。

表 2.2 IEEE802.11a/bのスロット諸元

パラメータ	IEEE802.11a 値	IEEE802.11b 値
スロットタイム	9μs	20μs
SIFS時間	16μs	10μs
PIFS時間	25μs	30μs
DIFS時間	34μs	50μs
CWサイズ	15 ~ 1023	31 ~ 1023

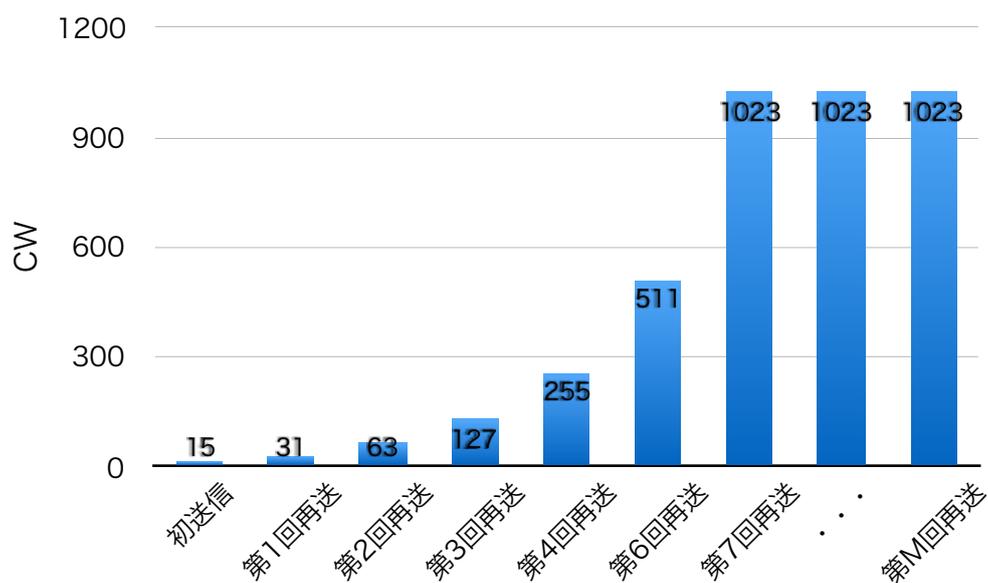


図 2.4 再送回数によるCW変化

第3章 Bianchi性能解析法

IEEE802.11の動作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。IEEE802.11 DCFの性能分析の大半の研究は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ーの二つのパラメータで記述し、端末の状態変化をマルコフ連鎖で記述するアプローチを採用している。フレーム衝突確率は他の端末の状態変化に依存するパラメータであり、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。[12]

以下に、Bianchiの性能解析法を用いて競合する端末が存在する場合のスループットを求める。この場合端末はいつも送信すべきフレームを持つ飽和条件となる。この過程の元では端末が保持するフレーム数を考慮する必要がないので解析を大幅に簡略化することができる。

端末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、フレーム送信した時の衝突確率は定数*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。この時状態(*i*, *k*)から状態(*j*, *l*)への遷移確率は*k* ≠ 0の時

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

と表すことができる。

また、バックオフステージが上限*M*に足した後は、最大コンテンションウィンドウサイズ*CW_{max}*のままで再送を繰り返すとすると、

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

となる。 π_{ik} をスロットの先頭で状態(*i*, *k*)にいる定常状態確率とすると、このマルコフ連鎖を解くことができる。

$$\pi_{00} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)}$$

ここで, $W = C_{\text{min}} + 1$ である.

$$\sum_{i=0}^m \pi_{i0} = \frac{\pi_{00}}{1-p} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)}$$

$\sum_{i=0}^m \pi_{i0}$ はスロット先頭でバックオフカウンタが0である確率, すなわち任意のスロットでフ

レームの送信を試みる確率 τ に等しいことに注意したい. 平均場近似のもとでは

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1}$$

が成立するので

$$1 - (1-p)^{1/(n-1)} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)}$$

が得られる

これを数値的に解くと衝突確率 p がもとまる. 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

$$\text{スループット} = \frac{\text{平均パイロット長} \times \pi_{00}}{E_s}$$

ここで E_s とは平均スロット長であり,

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

となる

また T_s , T_c はそれぞれ以下のようなになる

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

$$T_c = \text{DATA} + \text{DIFS}$$

以上により得られるチャンネル内の端末数とそれに起因する競合によるスループットを図 3.1 に示す。

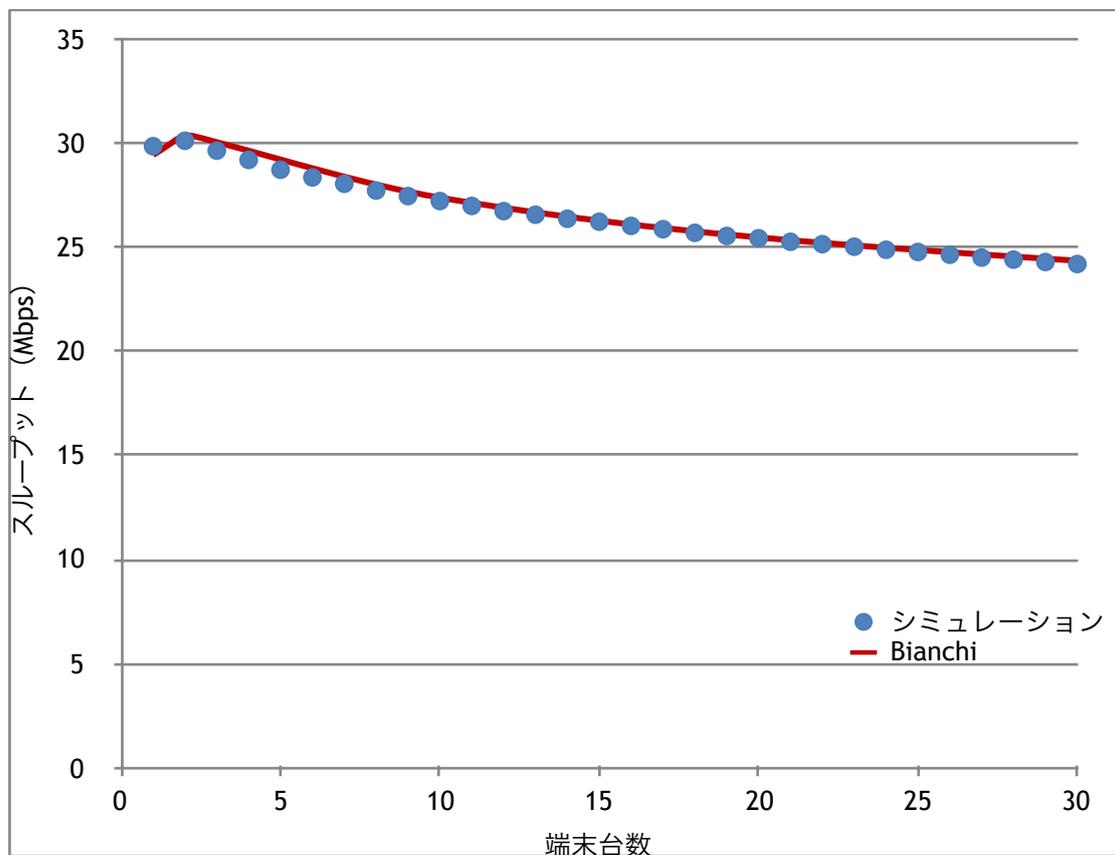


図 3.1 Bianchi 性能評価によって求めた理論結果

この通り、Bianchi性能解析法による全スループットはシミュレーションとかなり一致しているが、Bianchi適応できるのは全端末お互いキャリアセンスできる状態のみで、端末別のスループットも計算できない。

ここで、多様なトポロジーで端末別のスループットを計算できる方法がある、次の章で詳しく説明する。

第4章 Back-of-the-Envelope

従来Bianchi法で計算すると大変複雑なスループットはBOEを使うと簡単に近似値を予測できる。小規模なネットワークなら、わずか数分で結果を出せる。

簡単ネットワーク

図 4.1 (a) のようなネットワークで、全端末は常にフレームを所持するという飽和状態にあると想定する。CSMA medium access control(MAC) protocol条件下の各端末のスループットはいくらか、BOEで計算してみる。

CSMAネットワークでは、端末のキャリアセンス範囲内にほかの端末が送信しているのを検出すると、データの送信を開始しない。キャリアセンシング関係は図 4.1 (b)競合グラフの通りで、お互いキャリアセンスできる端末は直線で結ばれている。端末1~4の“標準化”スループット (Th1 Th2 Th3 Th4)は(1 1 0.5 0.5)だと数秒で計算できる。

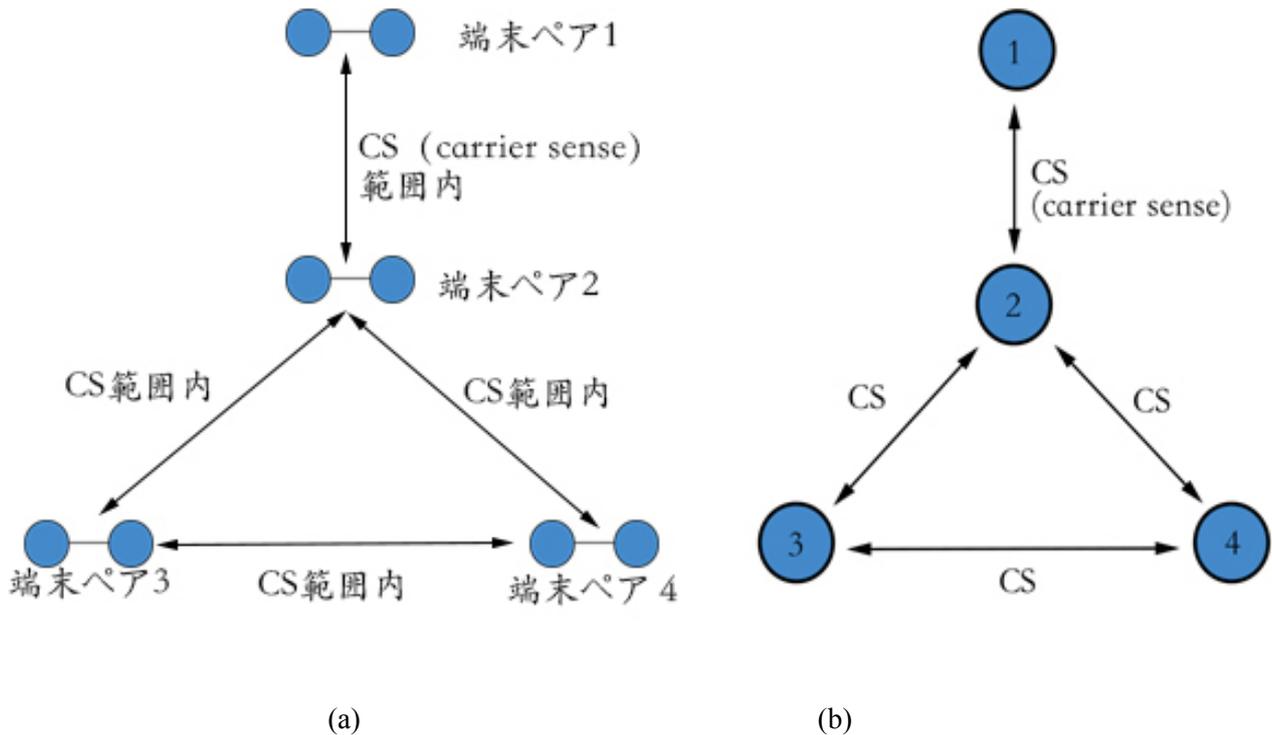


図 4.1 (a) ネットワーク構成 (b) 競合グラフ

具体的な計算として，“1”は送信状態，“0”はアイドル状態を意味し，そしてなるべく多くの端末に“1”をつける．線で結ばれている端末はお互いキャリアセンスできるため同時に送信できない．可能な配列はこの2パターン(最大独立集合): (1 0 1 0) と (1 0 0 1)である．この2パターンを足して2を割り，平均値(1 0 0.5 0.5)が標準化スループットになる．

最後は標準化スループットを実際のスループットに転換する．”1”標準化スループットはシングルリンクスループット $Th_{\text{single link}}$ (全ネットワーク中端末が独立である時のスループット)と一致する．

$$Th_{\text{single link}} = \begin{aligned} &6.06 \text{ Mbps (for 11 Mbps 802.11b)} \\ &25.38 \text{ Mbps (for 54 Mbps 802.11g)} \\ &29.45 \text{ Mbps (for 54 Mbps 802.11a)} \end{aligned}$$

実際のスループットは以下の公式で計算できる．

$$Th_{\text{actual}} = Th_{\text{norm}} \cdot Th_{\text{single link}}$$

図 4.2 はBOEの理論値とシミュレーション実験値の比較となる．UDPにおいても，TCPにおいても理論値とかなり一致していることが分かる．

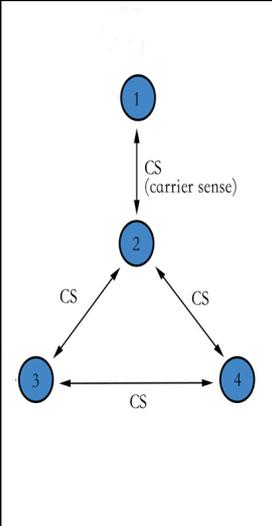
	BoE	(1, 0, 0.5, 0.5)
	NS2, UDP	(0.99, 0, 0.50, 0.51)
	NS2, TCP	(0.99, 0, 0.49, 0.51)

図4.2 比較

BOEの計算手順

1. ネットワークの端末競合関係グラフを書く.
2. 端末競合グラフから最大独立集合 (Maximum independent sets略してMISs)を求める.
3. 端末 i の標準化スループットは n_i/n . (n : ステップ2で求めたMISsの数, n_i : 端末 i を含むMISsの数)
4. 標準化スループットを実際のスループットに変換する.

複雑ネットワーク

複雑なネットワークでは、グループ分けして端末競合関係を簡易化にするという方法がある。図4.3 (a)の端末競合グラフは(b)のようなバーチャル競合グラフに変形できる。バーチャル競合グラフは4つのバーチャル端末{1,2,3}, {4}, {5,6}, {7}を有する。グループ分けのルールとして、同じグループにある端末1, 2, 3はお互いキャリアセンスできて、端末1, 2, 3は同時に4とキャリアセンスもできる。

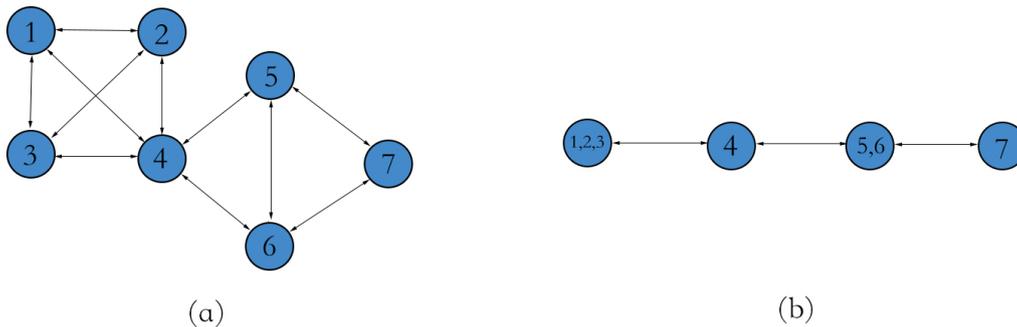


図 4.3 (a)端末間実際の競合関係 (b) 簡易化競合関係図

バーチャル競合グラフのバーチャルMISsは(1 0 1 0), (1 0 0 1), (0 1 0 1). バーチャル頂点集合{1,2,3}, {4}, {5,6}, {7}の濃度はそれぞれ3, 1, 2, 1で、バーチャル競合関係図によるバーチャルMISs (1 0 1 0), (1 0 0 1), (0 1 0 1)のそれぞれの濃度は $3 \cdot 2 = 6$, $3 \cdot 1 = 3$, $1 \cdot 1 = 1$ になる。MISsの数 n は全バーチャルMISの濃度の和、つまり $6 + 3 + 1 = 10$ である。各バーチャル端末の標準化スループットはこの公式で求められる。

$$\sum_k (\text{MIS}_k \times \text{MIS}_k \text{の濃度}) / n$$

この例では、 $[(1 0 1 0) \times 6 + (1 0 0 1) \times 3 + (0 1 0 1)] / 10 = (0.9 0.1 0.6 0.4)$ になる。実際の端末1, 2, 3の標準化スループットは $0.9/3 = 0.3$, 端末4の標準化スループットは0.1, 端末5, 6の標準化スループットは $0.6/2 = 0.3$, そして端末7の標準化スループットは0.4と算出できる。

第5章 BOEによる理論値とシミュレーション調査

5.1 シミュレーション概要

本研究では複数のテザリング端末にそれぞれ1台ずつ端末が送信しているペアを近距離で複数組を配置し、それぞれのスループットがどうなるかシミュレーションを行った。また、シミュレーション結果をBoE法で求めた理論値との比較を行った。本研究で使用したシミュレーターは、千葉大学大学院融合科学研究科関屋・小室研究室から提供して頂いた自作無線LANシミュレーターを使用した。

シミュレーションは以下の2つのシナリオにおいて実施した。

- ・シナリオ1

端末が規則正しく配置されている場合に、各端末のスループットをBoE法で求め、またその結果をシミュレーションで検証する。

- ・シナリオ2

端末がランダムに配置されている場合に、各端末のスループットをBoE法で求め、またその結果をシミュレーションで検証する。

5.2 シミュレーション条件

表 4.1 シミュレーション諸元

物理層プロトコル	IEEE802.11a
通信プロトコル	UDP
データレート	54Mbps
パケットサイズ	1500byte
通信半径	15m

シミュレーションの諸元は表4.1に示す通りである。なお、送信端末でのパケット発生はポアソン分布に従い、端末はいつも送信すべきフレームを持つ飽和条件とする。

5.3 BoEの理論値と実験値

5.3.1 シナリオ 1 規則配置

シナリオ1では、端末ペアごとの距離は30mで、キャリアセンス範囲は45mとする。テザリング端末と送信を行う端末を直線状に10フロー配置した場合、および4×4の格子状フロー配置した場合の2通りのトポロジーを想定した。

直線状トポロジー

直線上に10フロー配置した場合のトポロジーを図4.1に表す。またフローごとのスループットを調べるために直線上では各フローに1~10としてフロー番号を付け区別した。各端末は隣の端末のみキャリアセンスできる。

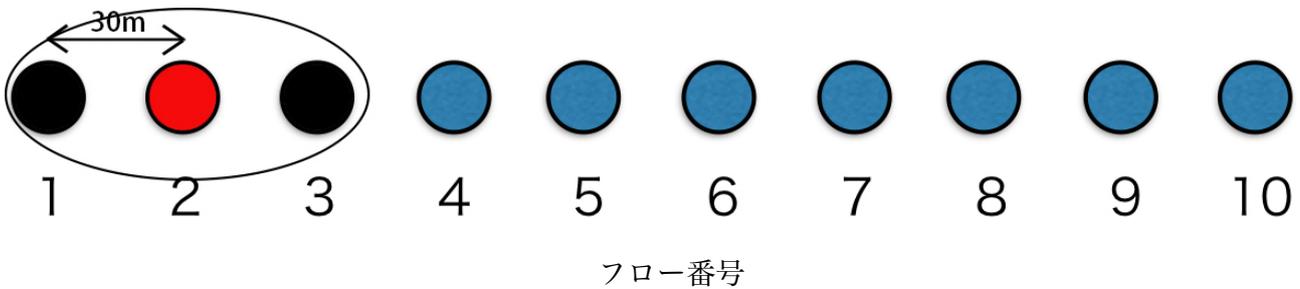


図 4.1 直線上に10組配置した場合

最大5つの端末が同時に送信できる。可能な配列は以下のこの6パターンで、つまりMISsの数 n は6である。

```
(1 0 1 0 1 0 1 0 1 0)
(1 0 0 1 0 1 0 1 0 1)
(1 0 1 0 0 1 0 1 0 1)
(1 0 1 0 1 0 0 1 0 1)
(1 0 1 0 1 0 1 0 0 1)
(0 1 0 1 0 1 0 1 0 1)
```

そして1~10の n_i の値は

$$n_i = (5 \ 1 \ 4 \ 2 \ 3 \ 2 \ 4 \ 1 \ 5)$$

端末1~10の標準化スループット $Th_{norm(i)} = n_i / n$

```
(0.83 0.16 0.67 0.33 0.5 0.5 0.33 0.67 0.16 0.83)
```

となる

$$Th_{actual} = Th_{norm} \cdot Th_{single\ link}$$

本研究の無線LAN規格はIEEE802.11aということで、 $Th_{single\ link}$ は29.45で計算する。

端末1~10の実際のスループット Th_{actual} は

(24.44 4.71 19.73 9.72 14.73 14.73 9.72 19.73 4.71 24.44)

以上の条件でシミュレーションを行った。結果は

(23.94 5.34 18.52 9.96 14.19 14.10 10.06 18.45 5.36 23.91)

。理論値と実験値を棒グラフに描いた結果は図4.2になる

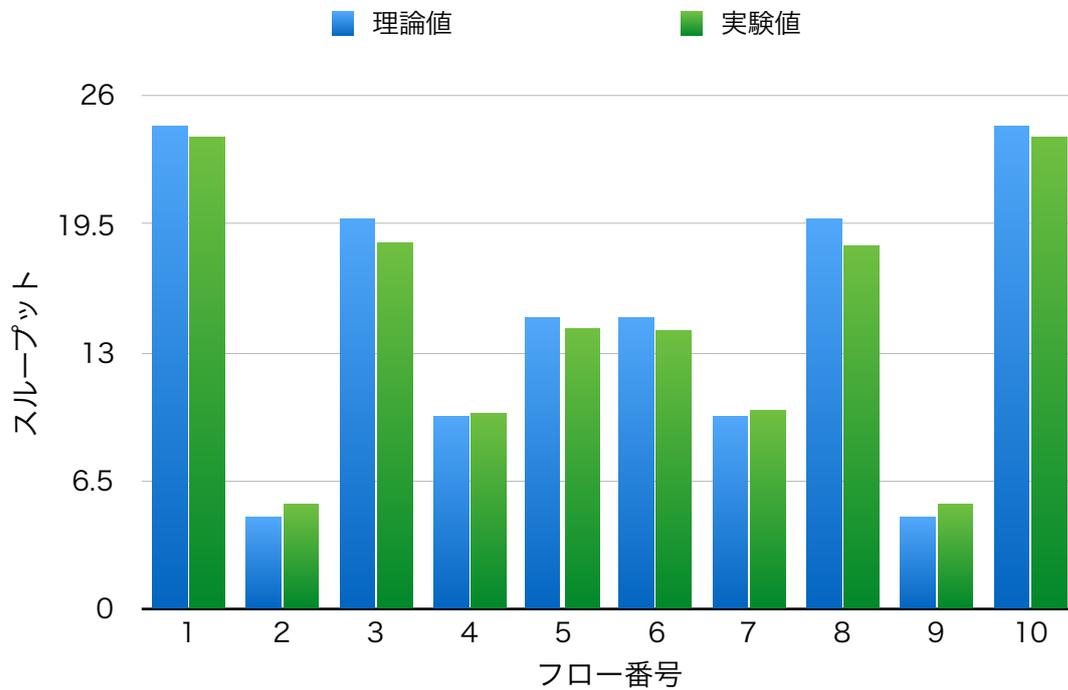


図4.2直線状トポロジー結果

格子状トポロジー

4×4の格子状にフローを配置した場合のトポロジーは図4.3に示している通りで、端末は最大隣の8端末を認識できる。

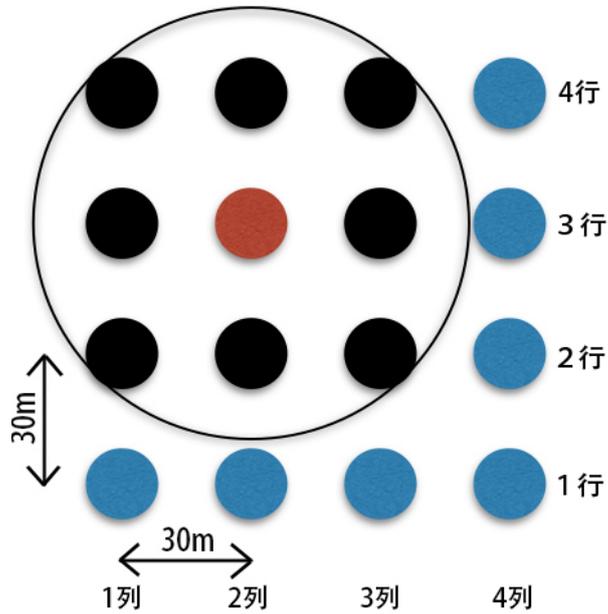


図 4.3 4×4の格子状に配置した場合

最大4つの端末が同時に送信できる。可能な配列は79パターンもあり、つまりMISsの数 n は79になる

$$n = 79$$

79個の最大独立集合は以下の通り

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

端末1~16 $n_i =$

$Th_{norm(i)} = n_i / n$

$$\begin{pmatrix} 35 & 18 & 18 & 35 \\ 18 & 8 & 8 & 18 \\ 18 & 8 & 8 & 18 \\ 35 & 18 & 18 & 35 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0.44 & 0.23 & 0.23 & 0.44 \\ 0.23 & 0.10 & 0.10 & 0.23 \\ 0.23 & 0.10 & 0.10 & 0.23 \\ 0.44 & 0.23 & 0.23 & 0.44 \end{pmatrix}$$

端末1~16の 実際のスループット $Th_{actual} =$

$$\begin{pmatrix} 12.96 & 6.77 & 6.77 & 12.96 \\ 6.77 & 2.94 & 2.94 & 6.77 \\ 6.77 & 2.94 & 2.94 & 6.77 \\ 12.96 & 6.77 & 6.77 & 12.96 \end{pmatrix}$$

BoEで出した理論値とシミュレーションの実験値の結果比較は図4.4である。

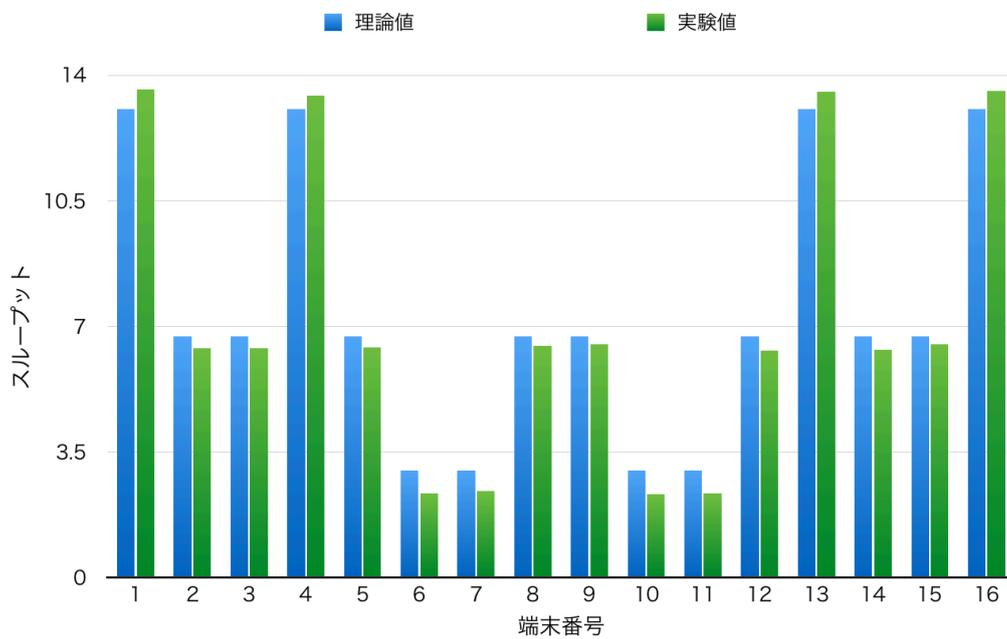


図 4.4 格子状トポロジー 結果

5.3.2 シナリオ 2 ランダム配置

ランダム配置1

20×20という範囲内に20台の端末がランダムに発生するようプログラミングし、キャリアセ
ンス範囲は5mとする。1~20各テザリング端末の座標は

(11 19), (10 15), (5 15), (3 11), (2 10), (0 8), (1 4), (0 0), (1 0), (3 1)

(5 1), (8 0), (8 4), (8 8), (11 8), (11 10), (13 9), (14 5), (16 2), (16 14)

各端末の横0.1mのところへ送信している端末がある。端末ペア間の競合関係は図4.5に示す通
り。

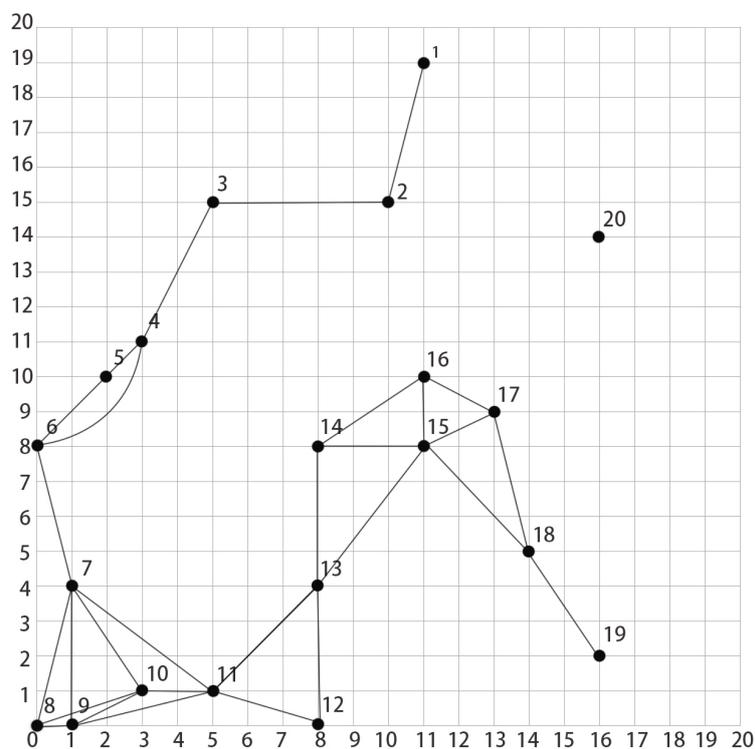


図4.5 ランダム配置1-1

最大9つの端末が同時に送信できる。可能な配列は9パターンがあり、つまりMISsの数(n)は79であ
る

$$n = 9$$

最大独立集合MIS:

- (1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1)
- (1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1)
- (1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1)
- (1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1)
- (1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1)
- (1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1)
- (1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

端末1~20 $n_i =$

$$(9 \ 0 \ 9 \ 0 \ 5 \ 4 \ 1 \ 4 \ 2 \ 2 \ 2 \ 7 \ 0 \ 9 \ 0 \ 0 \ 9 \ 0 \ 9 \ 9)$$

端末1~16の標準化スループット $Th_{norm(i)} =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0.56 & 0.44 & 0.11 & 0.44 & 0.22 & 0.22 \\ 0.22 & 0.78 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

端末1~20 の実際のスループット $Th_{norm(i)} =$

$$\begin{pmatrix} 29.45 & 0 & 29.45 & 0 & 16.36 & 13.09 & 3.27 & 13.09 & 6.54 & 6.54 \\ 6.54 & 22.91 & 0 & 29.45 & 0 & 0 & 29.45 & 0 & 29.45 & 29.45 \end{pmatrix}$$

シミュレーションを行い実験値はこの通り：

$$\begin{pmatrix} 27.39 & 1.85 & 26.49 & 1.43 & 15.68 & 12.07 & 2.95 & 13.22 & 6.21 & 6.13 \\ 5.98 & 22.16 & 0.37 & 0.25 & 5.97 & 13.86 & 8.63 & 6.70 & 22.57 & 29.34 \end{pmatrix}$$

BoEで出した理論値とシミュレーションの実験値を比較した結果は図4.6である。

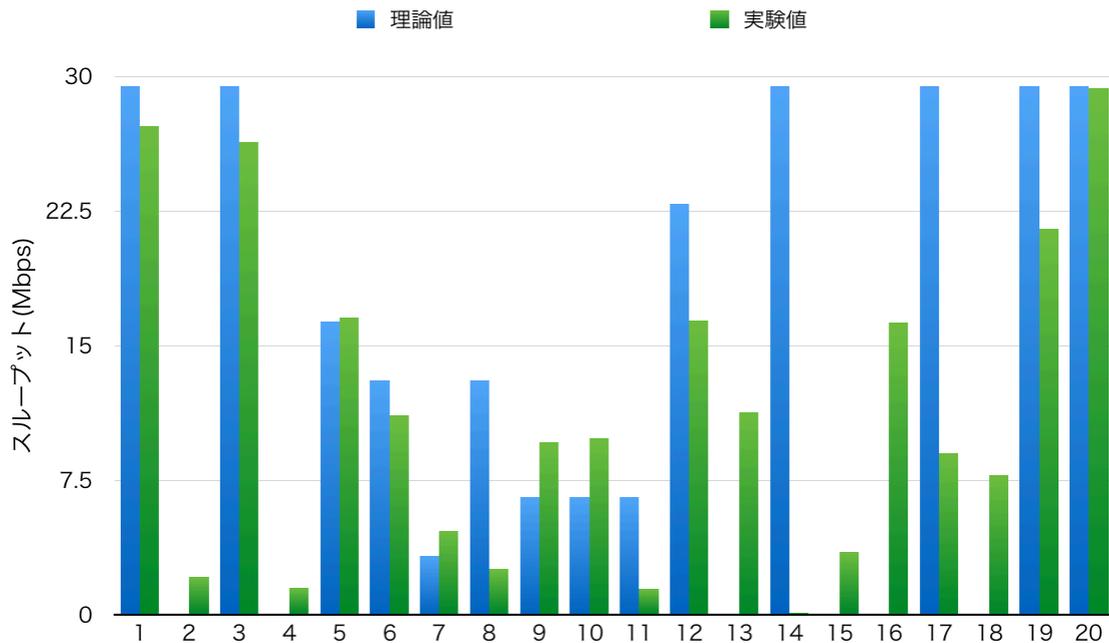


図4.6 ランダム配置 結果1-1

グラフ通り大きなズレが生じ、値がまったく逆の結果も出た。原因として、端末ペアを一つのノードとして扱っているのが考えられる。端末ペア間の距離とキャリアセンス範囲がぴったり一致すると、キャリアセンシングの精度に影響を及ぼす。

本研究で使うシミュレータはキャリアセンス範囲を整数としか設定できないため、端末間の競合関係を変えずに、ノード間距離とキャリアセンス範囲がぴったり一致しないように端末ペアの座標を修正し、改めてシミュレーションを行った。

端末ペア1~20の新しい座標は

(10 19), (9 16), (5 15), (3 11), (2 10), (0 8), (1 4), (0 0), (1 0), (3 1),
 (5 2), (9 2), (8 5), (8 8), (11 8), (11 10), (13 9), (14 5), (16 2), (16 14).

新しい端末座標は図4.7に示す通り。

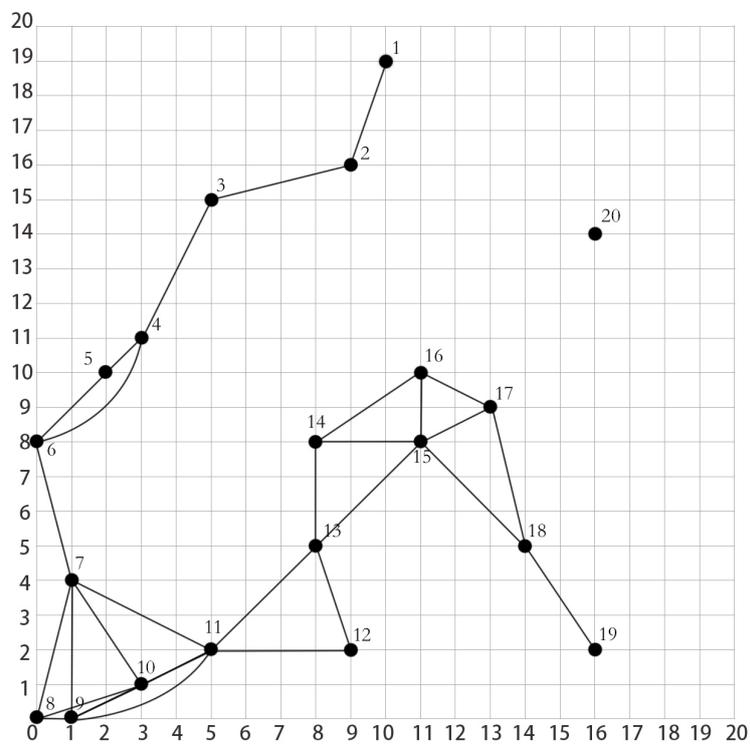


図 4.7 ランダム配置1-2

シミュレーションによる実験値その二：

(27.39 1.85 26.50 1.41 15.74 12.07 2.98 13.02 6.20 6.26
5.71 21.24 2.23 24.02 0.73 3.33 23.83 2.62 26.65 29.33)

シミュレーション再実行した結果を図4.8に書いた通り実験値理論値に近づいてきた。

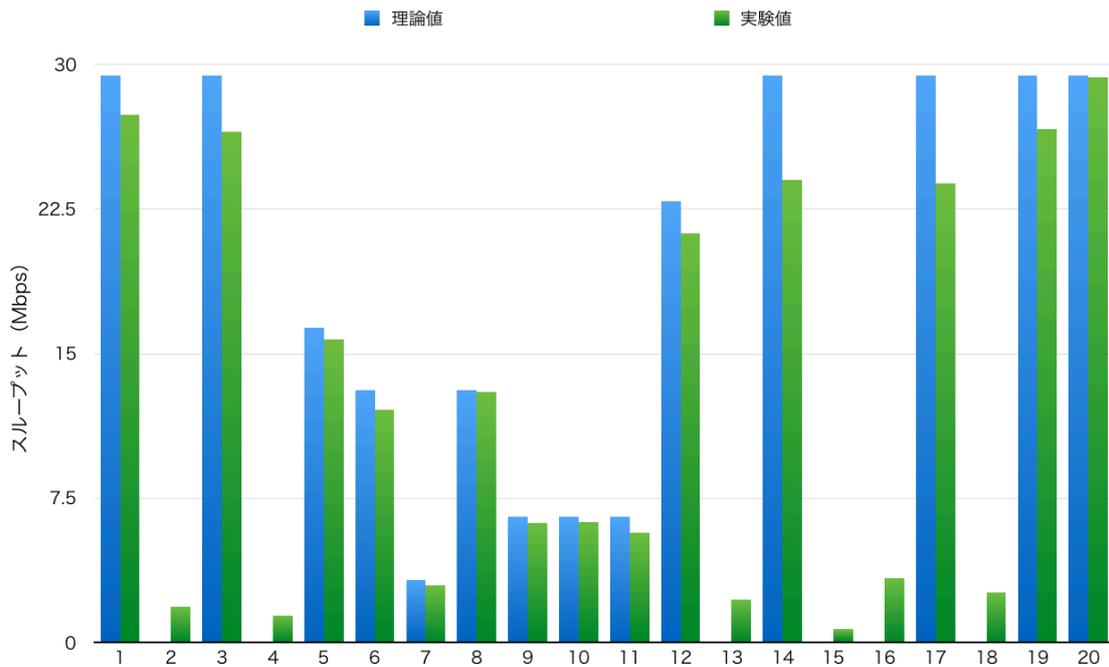


図 4.8 ランダム配置 結果 1-2

キャリアセンス範囲のギリギリのところに端末ペアが存在するのがズレの原因だと確認するため、ランダムトポロジーの領域を拡大し、再度検証する。

ランダム配置2

100×100四方の範囲内に20台の端末がランダムに発生させ、キャリアセンス範囲は5mとする。1~20各テザリング端末の座標は

(14 78), (28 66), (41 77), (12 53), (28 60), (38 55),
 (54 60), (33 44), (51 42), (67 54), (78 51), (37 28), (6 11),
 (75 98), (82 87), (89 84), (83 29), (80 17), (88 7), (94 15).

各端末の横0.1mのところへ送信している端末がある。端末ペア間の競合関係は図4.9に示す通り。今度のランダムシナリオでは

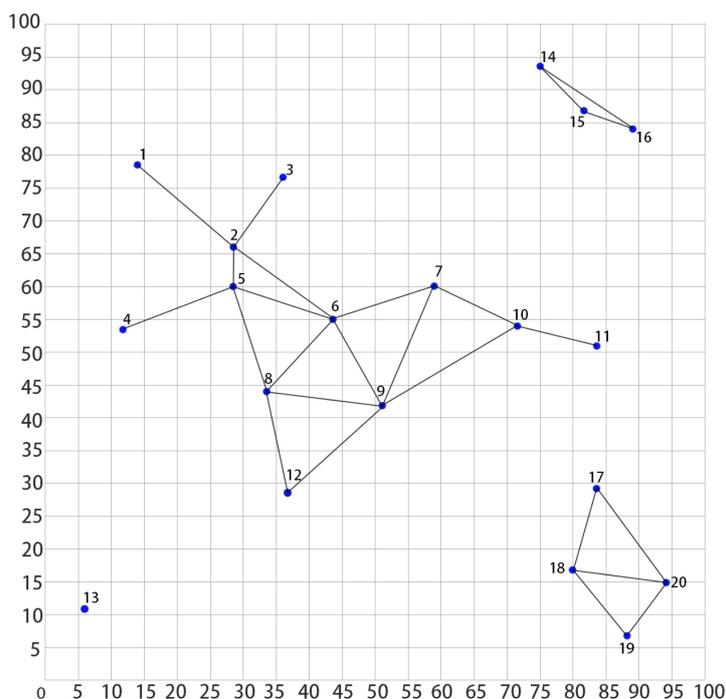


図 4.9 ランダム配置2

このランダムトポロジーでは、いくつかの小さい集合に分けて考える必要がある。

• 端末1~12

最大六つの端末が同時に送信できる。可能な配列は5パターンがあり、つまり

MISsの数(n)=5

最大独立集合MIS:

```
(1 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1)
(1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 1)
(1 0 1 1 0 1 0 0 0 0 1 1)
(1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0)
(1 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1)
```

$n_i =$

(5 0 5 4 1 2 3 1 0 1 4 4)

端末1~12標準化スループット：

(1 0 1 0.8 0.2 0.4 0.6 0.2 0 0.2 0.8 0.8)

・ **端末13**

端末13が独立であるため、標準化スループットは1である。

・ **端末14~16**

最大独立集合MIS：(1 0 0) (0 1 0) (0 0 1)

MISsの数(n)=3, $n_i=(1 1 1)$

端末14~16の標準化スループット：

(0.33 0.33 0.33)

・ **端末17~20**

最大独立集合MIS：(1 0 1 0)

MISsの数(n)=1, $n_i=(1 0 1 0)$

端末17~20の標準化スループット：

(1 0 1 0)

まとめると、全端末のスループットの理論値は以下となる。

(29.45 0 29.45 23.56 5.89 11.78 17.67 5.89 0 5.89
23.56 23.56 29.45 9.71 9.71 9.71 29.45 0 29.45 0)

理論値をシミュレーションの実験値との比較の結果を図4.10に示す。

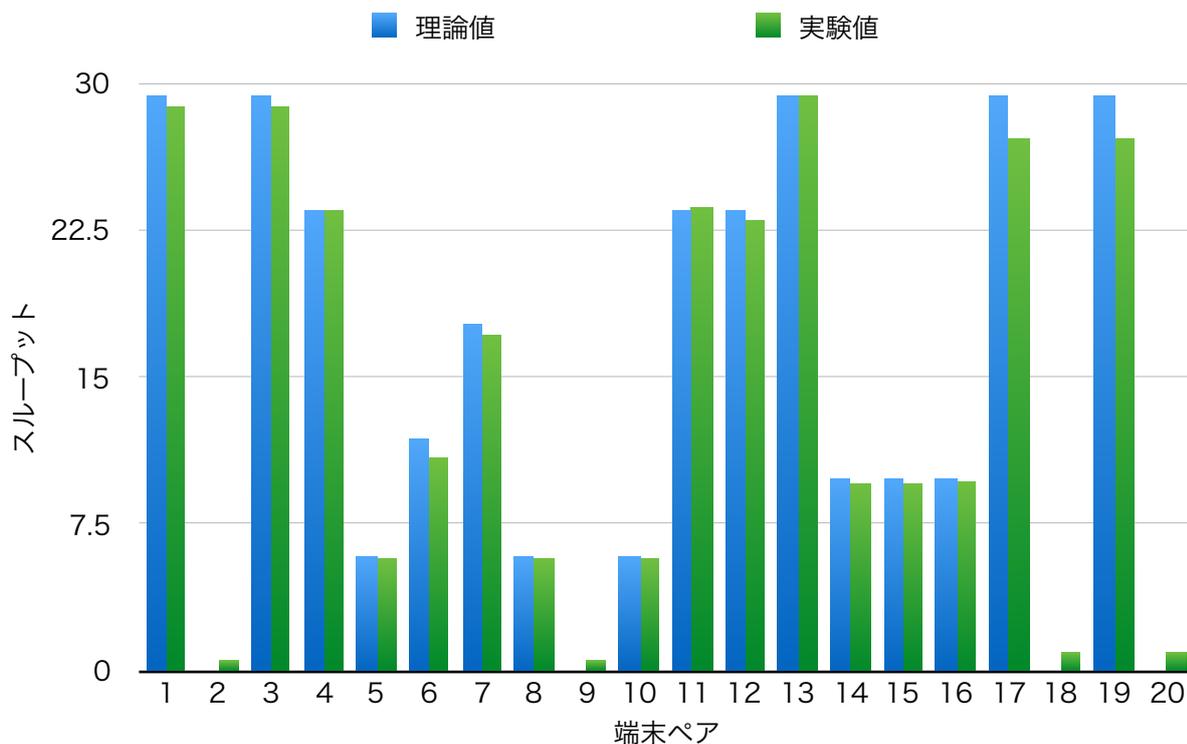


図 4.10 ランダム配置2 結果

5.3.3 結果考察

規則配置のトポロジーでは、直線状でも格子状でもBoEはかなりいい結果を出している。端末別のスループットも配置と同様に対称性を示している。ランダム配置は現実テザリングの使用を想定した問題設定だが、ランダム配置1のキャリアセンス範囲5mは現実よりやや狭かった。キャリアセンス範囲のギリギリのところに端末ペアが多く存在するせいで、実際の競合関係が理論と相違なった結果、1回目のシミュレーションでは実験値と理論値の間も大きなズレが生じた。キャリアセンス範囲のギリギリの所の端末ペアがちゃんとキャリアセンスされるよう、座標を修正して再実験したら望ましい結果が出た。ランダム配置2では、キャリアセンス範囲をより現実と近い数値20mとし、空間も広めた。やはり理論値と実験値が大変よく一致している。

第六章 結論

本研究は、テザリングユーザが密集している場合各端末のスループットをBoE法で計算し、シミュレーションを行なってその結果を検証した。

飽和状態にある複数の端末が隣接して全ての端末がキャリアセンス可能な場合、Bianchi性能解析法でスループットのトタルを計算できるが、一部の端末しか認識できないより複雑なトポロジーだとBoE法しか計算できない。飽和状態、端末ペア間の競合関係がはっきりしているなどの条件が整っている場合、BoE法で出した端末別のスループットは実験値大変一致することが確認できた。

参考文献

- [1] Soung Chang Lieu, Cai Hong Kai, Hang ching Leung and Piu Wong, “ Back-of-the-Envelope Computation of Throughput Distributions in CSMA Wireless Networks ,” IEEE Transaction on Mobile Computing, vol 9, no.9 , september 2010.
- [2] “IEEE Standard 802.11 : Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications.” IEEE 802.11 Std., 1999.
- [3] “IEEE Standard 802.11 : Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications : Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4GHz Band,” IEEE 802.11b] Std., 1999.
- [4] “IEEE Standard 802.11 : Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications.” IEEE 802.11g Std., 1999.
- [5] 浅井祐介, 井上保彦, 鷹取泰司, “ IEEE 802.11における無線LAN標準化動向, ” NTT技術ジャーナル Vol . 25 No . 8 , August 2013.
- [6] 守倉正博, 久保田周治, “802.11 高速無線LAN教科書, ” 丸善株式会社, 2004.
- [8] 大和田 泰伯, 照井 宏康, 間瀬 憲一, 今井 博英, “マルチホップ無線LANの提案と実装, ”電子情報通信学会論文誌B Vol.J89-B No.11, pp.2092-2102, 2006.
- [9] 藤原 淳, 大矢 智之, “無線メッシュネットワークにおけるVoIPトラヒックの呼受付制御, ”信学技報 RCS2006-93, pp.205-208, July 2006.
- [10] Dragos Niculescu, Samrat Ganguly, Kyungtae Kim and Rauf Izmailov, “Performance of VoIP in a 802.11 Wireless Mesh Network, ”IEEE INFOCOM, 2006.
- [11] 成田侑樹, “WiFiオフロード時のテザーリングの性能評価”, 千葉大学, 工学部, 都市環境システム学科, 平成25年度, 卒業論文.
- [12] 塩田茂雄, 川西憲一, 豊泉洋, 会田雅樹, “待ち行列理論の基礎と応用, ”共立出版, 2014.
- [13] G. Bianchi, “Performance analysis of the IEEE802.11 distributed coordination function, ” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, Issue 3, pp.535-547(2000),

謝辞

本研究にあたり、ご指導をいただいた塩田茂雄教授に深く感謝を申し上げます。本研究で使用したネットワークシミュレーターを提供していただいた千葉大学大学院融合学科研究科関屋・小室研究室にも御礼をも申し上げます。また、日頃の議論で多くの知識や示唆を頂いた塩田研究室の皆様感謝いたします。誠にありがとうございました。