

## エアタイムを用いた無線ネットワークスループット解析

関屋 大雄<sup>†</sup> 眞田 耕輔<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 千葉大学大学院融合科学研究科情報科学専攻

〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

<sup>††</sup> 三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻

〒 514-8507 津市栗真町屋町 1577

E-mail: <sup>†</sup>sekiya@faculty.chiba-u.jp, <sup>††</sup>k.sanada@elec.mie-u.ac.jp

あらまし 本稿では IEEE802.11 Wireless Local Area Network(WLAN) のスループット解析についてその解析手法を考察する。スループットは MAC 層の特性であるフレーム衝突とキャリアセンスによりその特性が制限される。したがって、フレーム衝突およびキャリアセンス時間を解析的に表現することがスループット解析の本質となる。その中で、マルチホップネットワークの解析手法として提案された「エアタイム」の考え方を WLAN の解析に適用することを提案し、その有効性について議論する。エアタイムの考え方をを用いることで、端末間のキャリアセンスの関係性を平易に表現できるため、特に非対称性を持つネットワーク解析にその威力を発揮することを示す。

キーワード スループット解析, IEEE802.11, WLAN, MAC 層

## Throughput Analysis of WLANs With Airtime Concept

Hiroo SEKIYA<sup>†</sup> and Kosuke SANADA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

1-33, Yayoi-cho, Inage-u, Chiba, 263-8522 Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Engineering, Mie University

1577, Kurimamachiya-cho, Mie, 514-8507 Japan

E-mail: <sup>†</sup>sekiya@faculty.chiba-u.jp, <sup>††</sup>k.sanada@elec.mie-u.ac.jp

**Abstract** This manuscript discusses the throughput-analysis approaches for WLANs, namely single-hop networks. Network throughput is limited by frame collisions and carrier sensing durations, which are MAC-layer properties. Namely, the throughput analysis narrows to how to express the frame collision probability and carrier sensing durations. From this background, We propose that the concept of airtime, which is developed in the multi-hop network analyses, is applied to WLAN analyses. By applying the airtime concept, it is easy to express carrier-sensing relationships among network nodes. The effectiveness and usefulness of the proposed analysis method appear in throughput analysis of LAN with the heterogeneous conditions, in particular.

**Key words** Throughput analysis, IEEE802.11, WLAN, MAC layer

### 1. はじめに

IEEE802.11 無線ネットワークは、ネットワークを構成している端末がそれぞれ独立に動作することで、ネットワークの全体の挙動を生み出す自律分散型ネットワークである。Wireless Local Area Network(WLAN) はシングルホップネットワークトポロジを持つ。稠密性が高まり、また個々の端末が扱うデータが多岐に渡る中で、ネットワークの特性を把握する重要性はますます高まってきている。

ネットワークダイナミクスを把握する手段として最も広く用

いられている手法はシミュレーションによりその動きを調べることであろう。シミュレーションは複雑なモデリングも可能であり、近似を使わずともシステムとしての特性やダイナミクスを再現できる。一方でシミュレーションはあくまで特定のパラメータについてのネットワークの挙動を模擬するツールである。計算コストとの兼ね合いにはなるが、システムパラメータとネットワークの特性の関係性をシミュレーションから陽に把握することは極めて困難である。ネットワーク特性の理解への肝はまさにこの関係性の把握であり、逆に言えばそこには厳密性は求められず近似があっても構わない。この前提のもとに立っ

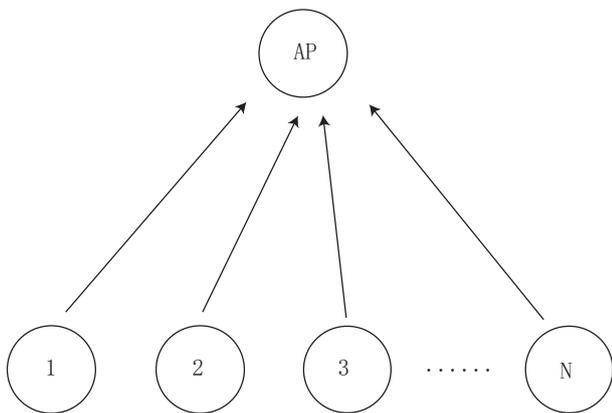


図1 WLANのネットワークトポロジ

たとき、ネットワークの挙動を解析的に表現することは、ネットワークの動作を把握するための有効な手段となる。通信システムを解析的に表現することにより、パラメータと特性の関連性を高速にかつ直観的に把握することができる。また、それらの結果から特性のボトルネックとなる要因を特定でき、さらにはそれを回避する勘所を探ることもできる。定性性を失わない中での単純化による数理モデル化は、シミュレーションでは得られない多くの利点を含むといえる。

これまで WLAN のスループット特性や遅延特性について多くの解析が行われてきた [1]–[5]。これまでの解析では、1 つの WLAN 内の端末の相互作用を解析することがほとんどであった。隠れ端末のない最も単純なネットワーク構成の飽和スループット解析から始まり [1]、非飽和モデル [3]、端末ごとにフレーム長が異なる非対称モデル *citernalone* などへと発展していった。一方で、ネットワークの稠密化に伴い、今後は単独の WLAN 内の議論にとどめず、WLAN 間の干渉を考慮することも重要となってくる [5]。以上の背景を考えたとき、現在主流となっている WLAN のスループット解析手法だけでは片手落ちの側面があり、とくに干渉 (キャリアセンス) を表現するのに適した解析手法を確立する必要が出てくる。

本稿では IEEE802.11 Wireless Local Area Network (WLAN) のスループット解析についてその解析手法を考察する。スループットは MAC 層の特性であるフレーム衝突とキャリアセンスによりその特性が制限される。したがって、フレーム衝突およびキャリアセンス時間を解析的に表現することがスループット解析の本質となる。その中で、マルチホップネットワークの解析手法として提案された「エアタイム」[6] の考え方を WLAN の解析に適用することを提案し、その有効性について議論する。エアタイムの考え方をを用いることで、端末間のキャリアセンスの関係性を平易に表現できるため、特に非対称性を持つネットワーク解析や WLAN 間の干渉を考慮した解析に適していると考えられる。

## 2. WLAN の解析

図 1 に WLAN のネットワークトポロジを示す。WLAN はシングルホップネットワークであり、複数の端末がひとつのアクセ

ポイント (AP) と結合されるスター型トポロジで表現される。IEEE802.11DCF に従う Medium Access Control (MAC) プロトコルでは、端末の状態はフレームを送信している状態、他端末の送信をキャリアセンスしている状態、バックオフタイム (BT) をカウントダウンしている状態、呼の発生を待つ状態に大別される。本稿ではこれらを送信状態、キャリアセンス状態、アイドル状態と呼ぶ。アイドル状態はバックオフタイムをカウントダウンしている状態および呼の発生を待つ状態を共に含むものとする。

### 2.1 Bianchi によるマルコフ遷移モデル

WLAN スループット解析の先駆的研究は Bianchi によるマルコフ遷移モデル [1] であろう。今、すべての端末がすべてキャリアセンス状態であるとすると、ある端末が送信しているときには他端末はすべてキャリアセンスするという相互作用が生じる。さらに、飽和スループット問題を解くことに集中するならば、呼の発生を待つ状態は存在しないため、アイドル状態は全ての端末で共有することとなり、特定の端末のみアイドル状態にいる状況は発生し得ない。Bianchi によるマルコフ遷移モデルはこのことを巧みに利用している。

図 2 に Bianchi によって提案された BT カウント状態のマルコフ遷移図を示す。図 2 において、右から左への遷移は BT を削減による状態変化、縦方向への遷移は衝突による再送動作を表現しており、この図でアイドル状態を表現することができる。つまり、遷移図の左端の状態は  $BT = 0$  を示しており、ここに状態が遷移した時に送信状態であるとみなせる。つまり左端の状態確率を導出することにより、端末の送信確率  $\gamma$  を導出することができる。このとき、ある端末がフレームを送信したとき、そのフレームが衝突する確率は

$$\rho = 1 - (1 - \tau)^{N-1} \quad (1)$$

と表現でき、スループットの導出が可能となる。

Bianchi のマルコフ遷移モデルは端末動作をもっとも単純化したモデルであり、その後多くの発展バージョンが提案されている。例えば、マルコフ遷移のスタート地点に、呼が発生するまで自己回帰する状態を作成すれば非飽和状態を表現することができる [3]。呼の待ち状態もアイドル状態であるので、非飽和モデルにおいても、全ての端末でアイドル状態を共有するという前提は有効であり、比較的スムーズに飽和モデルから非飽和モデルに拡張することができる。

### 2.2 キャリアセンスによる相互作用

考慮するネットワーク内の端末にお互いにキャリアセンスできない組が存在すると、アイドル状態と送信/キャリアセンス状態が混在することとなる。この状態では隠れ端末によるフレーム衝突が発生し、また、キャリアセンス時間も単純にネットワーク内の端末の送信時間の和とならない。つまり、送信時間の一部重複が起こりうる。

AP を密に配置すれば隠れ端末がないようなネットワーク構築が可能となり、この問題は緩和される。しかしながらその場合、図 3 に示すような複数の WLAN が相互影響を及ぼす状況を考えなければならない。図 3 のトポロジを考えると、キャリ

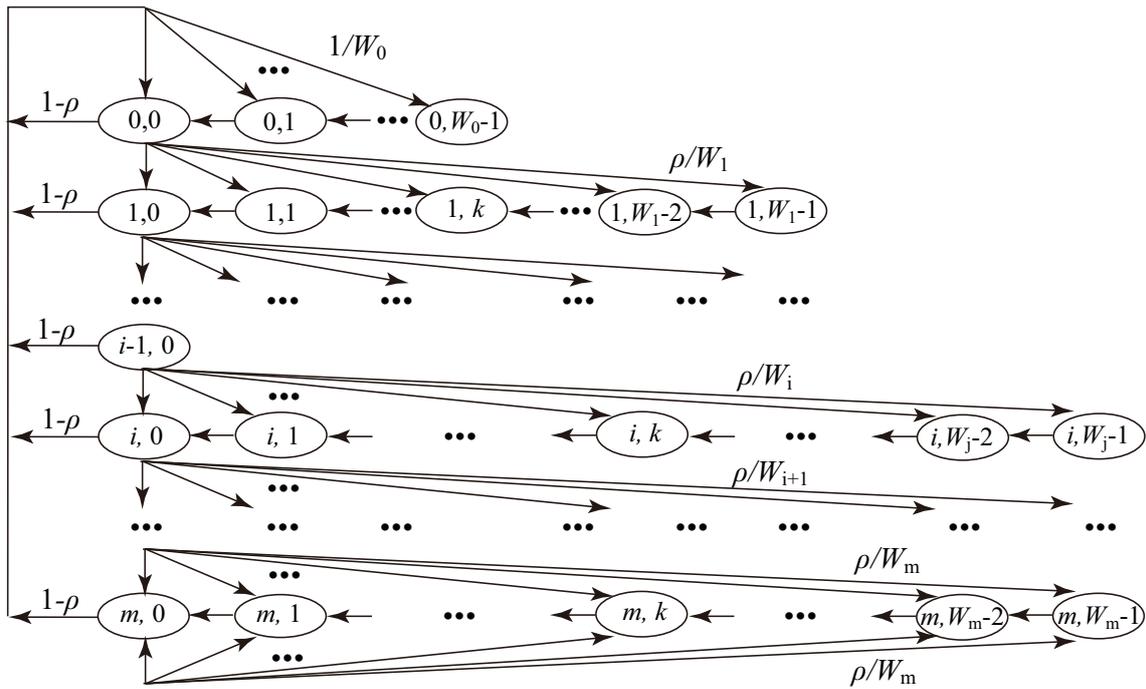


図 2 Bianchi による BT カウントのマルコフ遷移モデル

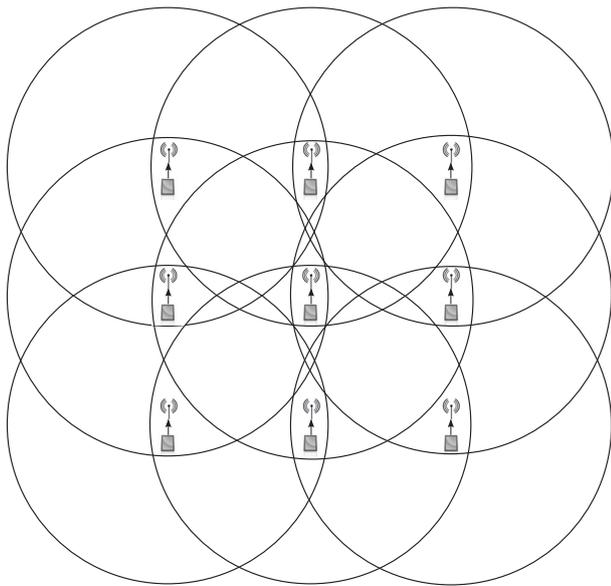


図 3 WLAN の稠密化

アクセスによる相互作用はさらに複雑化し、特定の WLAN 内の端末には送信機会が与えられない場合も発生する [5]。つまり、複数のネットワークで広範をカバーすることを考えた場合、ネットワーク特性を評価するときに衝突率と共にキャリアセンス状態を正しく把握することが重要となる。

この問題に対し、Bianchi モデルに基づく解析手法は必ずしも得意とは言えない。また、各端末の送信フレーム長が異なる場合を考慮した場合も類似の問題が発生し、送信フレーム長ごとにキャリアセンス時間が異なってくるため、この非対称性の把握が重要な課題となる。

### 3. エアタイムを用いた解析

前章の問題に対応するために、本稿ではエアタイムを用いた解析を WLAN に適用することを提案する。エアタイムはマルチホップネットワークのスループット解析から出てきた考え方で、WLAN と異なり隠れ端末による衝突が支配的になり、かつキャリアセンス時間がスループットを制限する場合を表現するために提案、発展してきたものである。これらの問題は WLAN の解析ではこれまで興味の対象外であったため、エアタイムを用いた解析手法はこれまで WLAN の解析には全く用いられてこなかった経緯がある。

#### 3.1 エアタイム

エアタイムは文献 [6] で提案された概念である。マルチホップネットワークの隠れ端末を簡易に表現するために考案された。具体的には、各端末の状態を「送信」「キャリアセンス」「チャンネルアイドル」の 3 つの状態に分け、その時間的割合をエアタイムとして定義する。図 4 に送信エアタイムの概念図を示す。ここで、送信エアタイムを用いれば他のエアタイムを表現できるため、結果としてスループットの導出は各端末の送信エアタイムを定義し、それを導出する問題に帰着する。特に、キャリアセンスは近傍端末の送信エアタイムの和で表現できる点が本手法の最大の利点である。すなわち、エアタイムを導入することによりキャリアセンスを介した端末間の相互作用を平易な形で表すことができる。また、チャンネルアイドルエアタイムでは、BT 削減の状態と呼ぶの発生を待つ状態に分離する必要がある。この状態を区別するために、後述するフレーム保持確率が必要となる。一方、隠れ端末による衝突は隠れ端末間の送信エアタイムの重なりで表現できる。エアタイムを導入するもう一つの利点は、隠れ端末の衝突を簡素に表現できることにある。一方、

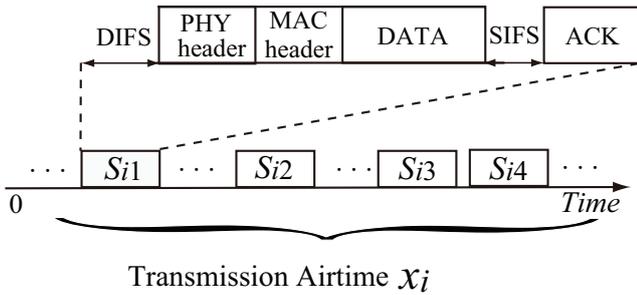


図 4 送信エアタイムの考え方：フレーム送受信に関連する DIFS, フレーム送信, SIFS, ACK フレーム送信を一単位とし、十分長い時間 (図中の Time を大きくする) にそれらの占める時間の割合を導出する。

時間を平均化しているため、キャリアセンス内の端末の同時送信による衝突率を導出するためには、送信確率を導出する必要があり、Bianchi モデルとの関連付けが必要となる。

### 3.2 フレーム衝突率と送信確率

前述の通り、隠れ端末による衝突率は送信エアタイムを使って簡素に表現できる。一方、同時送信による衝突率を導出するためには送信確率を導出する必要がある。ある端末が BT をカウントしているとき、その送信確率は Bianchi によるマルコフモデルや Kumar らによる簡易モデル [2] がよく知られており、これらを用いて表現することになる。

稠密なネットワークではネットワークを構成する各端末が同じ状態にあるわけではなく、送信、キャリアセンス、アイドル状態の端末が一つのネットワークに混在している点が LAN の解析と大きく異なる。ここに、時間的平均を取るエアタイムと局所時間を扱う Bianchi モデルを融合させる必然性が生じる。Bianchi モデルはアイドル状態を詳細に記述したモデルとあると理解し、各端末が Bianchi モデルにしたがって動作する確率をエアタイムで表現することで、エアタイムと Bianchi モデルの関連付けが可能となる [7]。

### 3.3 フレーム保持確率と遅延特性

端末のバッファに少なくとも一つのフレームを保持している確率をフレーム保持確率と呼ぶ。フレーム保持確率が 1 の端末はフレームを処理しきれず定常状態においてオーバーフローを起こす。非対称動作の場合には、ネットワークが飽和状態にあっても全ての端末のバッファが飽和しているとは限らない。そこを平易に表現できる点もエアタイムの特徴の一つである。

各端末のフレーム保持確率の導出には待ち行列理論を用いる [8]。待ち行列理論を適用する条件の一つとして、フレームの到着、すなわち呼の発生がポアソン分布に従うことが挙げられる。このとき、フレーム保持確率と共に端末が保持しているフレーム数の期待値を導出することができ、図 5 の関係を用いると各端末間のバッファ滞在時間と MAC アクセス遅延を送信エアタイムの関数として解析的に数値モデル化することができる。これらの結果から、各端末間の送信遅延、リンクごとの衝突率、各端末のキャリアセンス時間などが送信エアタイムの関数として導出される。

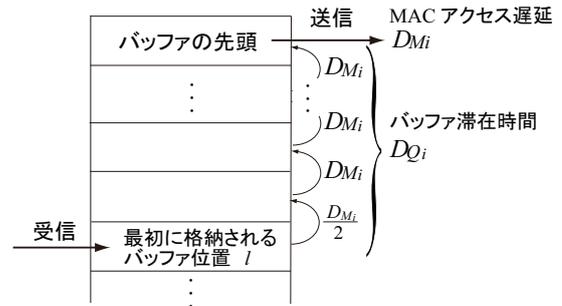


図 5 バッファと送信遅延

## 3.4 ネットワーク層のモデリング

送信確率、フレーム衝突率、フレーム保持確率が送信エアタイムの関数として数値モデル化されるため、ネットワークの特性を求める問題は送信エアタイムを導出する問題に帰着する。すなわち、端末数分の送信エアタイムが未知変数として残っており、それらを関連付けることによってネットワークダイナミクスを特定できる。その関連づけに各端末の呼の発生確率、すなわち入力とスループット、すなわち出力の関係を利用する [9]。つまり、各端末において、端末が単位時間に受信したフレーム数は常にその端末のバッファオーバーフローによるブロック数と送信成功したフレーム数の和となる。これはネットワークのリンク数だけ存在し、これに送信負荷をパラメータとして与えることにより、送信負荷に対するネットワークの特性が一意に決まる。

## 4. エアタイムによる解析が得意とする問題

### 4.1 端末ごとに動作条件が異なる WLAN の特性

呼の発生確率や 1 フレーム辺りの送信時間が端末に依存するシステムに対する解析として [4] の解析モデルがよく知られている。しかしながら [4] の解析でも負荷が高くなると誤差が大きくなり、飽和状態には対応していないなどその精度、汎用性に不十分なところがある。

ここで、端末  $n$  ( $n = 0, 1, \dots, 8$ ) がそれぞれ  $(200 + 100n)$  バイトのフレームを送信するシナリオを考える。図 6 はこのシナリオにおける各端末のスループット、フレーム保持確率、衝突率を示している。実線は解析結果、プロットはシミュレーション結果であり、図 6 から非対称ネットワークにおいて、飽和/非飽和どちらにも対応した精度の高いモデリングが実現できていることが分かる。

### 4.2 WLAN 間の相互干渉

図 3 のような WLAN 間での相互干渉が生じる状況では、WLAN 間のキャリアセンスによりネットワークのスループットが制限され、場合によってはネットワーク間で不公平性が生じることが知られている [5]。このような問題に対してもエアタイムを基本としたスループット解析は威力を発揮すると思われる。本問題についての詳細は、同じ冊子に掲載されている [10] に譲りたい。

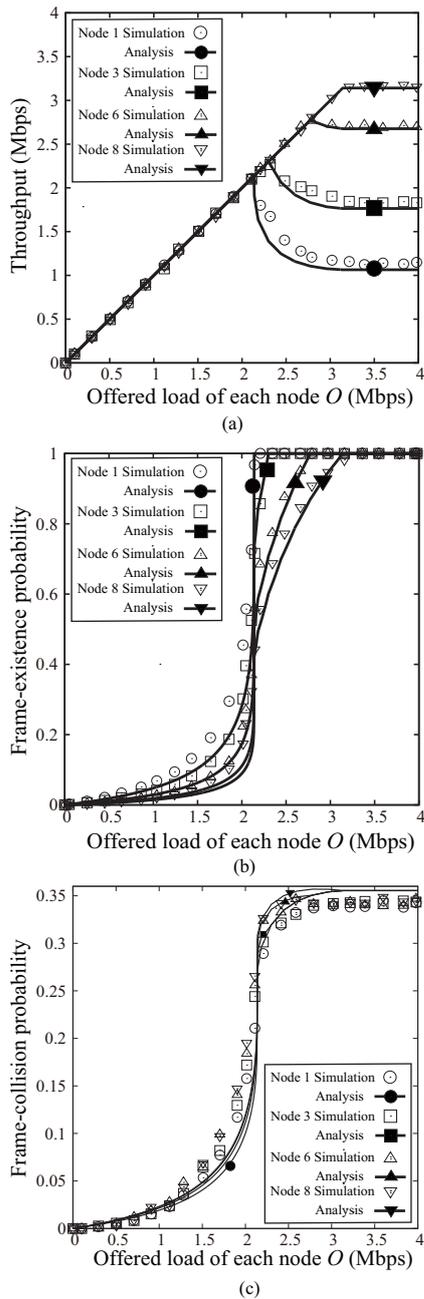


図 6 非対称条件を持つシナリオに対するネットワーク特性 (a) スループット特性 (b) フレーム存在確率 (c) フレーム衝突確率

## 5. むすび

本稿ではIEEE802.11 Wireless Local Area Network(WLAN)のスループット解析についてその解析手法を考察し、マルチホップネットワークの解析手法として提案された「エアタイム」の考え方をWLANの解析に適用することを提案した。提案する解析手法は、端末間のキャリアセンスの関係性を平易に表現できるため、特に非対称性を持つネットワーク解析にその威力を発揮する。

今後の課題として、ネットワークトポロジがさらに複雑化したときの対応、TCPフローにおける数理モデルの構築、さらに、数理モデルを用いたシステムの最適化手法についても検討する

必要がある。

## 文 献

- [1] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, Mar. 2000.
- [2] A. Kumar, E. Altman, D. Miorandi, and M. Goyal, "New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE802.11 WLANs," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, pp.588 - 601, Mar. 2005.
- [3] K. Duffy, D. Malone, and D. Leith, "Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Nonsaturated Conditions", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 8, pp. 715-717, 2005.
- [4] 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.
- [5] 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」, 2016.
- [6] P. C. Ng and S. C. Liew, "Throughput analysis of IEEE 802.11 multi-hop ad hoc networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol 15, no. 2, pp.309-322, Apr. 2007.
- [7] K. Sanada, N. Komuro, and H. Sekiya "End-to-end throughput and delay analysis for IEEE 802.11 string topology multi-hop network using markov-chain model," in *Proc. IEEE PIMRC2015*, pp.1887-1891, 2015.
- [8] K. Sanada, J. Shi, N. Komuro, and H. Sekiya "End-to-end delay analysis for IEEE 802.11 string-topology multi-hop networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol.E98-B, no.7, pp.1284-1293, July 2015.
- [9] Y. Gao, D. Chiu, and J. C. S. Lui, "Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: methodology and applications," *Proc. of the SIGMETRICS 2006*, pp. 39 - 50, June 2006.
- [10] 青木拓実, 眞田耕輔, 小室信喜, 本吉彦, 山垣則夫, 塩田茂雄, 阪田史郎, 村瀬勉, 関屋大雄, "無線LAN同士の干渉を考慮したスループット特性の解析," 信学技報, ASN(本誌に掲載)