

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656249

研究課題名(和文) 個の動作と全体の挙動の関連性に着目した無線ネットワークの解析

研究課題名(英文) Wireless Network Analyses Focusing on Relationships Between Individual Node Operations and Entire Network Dynamics

研究代表者

阪田 史郎 (Sakata, Shiro)

千葉大学・融合科学研究科(研究院)・教授

研究者番号：80375609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では無線ネットワークにおいて「個」の動作がネットワーク全体の振る舞いに及ぼす影響をモデル化するという独自の解析アプローチを提唱し、ネットワーク構成、負荷特性、フレームの種類などに依存しない解析式の導出に挑戦した。研究成果として、直線状のネットワークのトポロジにおいて、フレーム長、双方向フローの比、送信負荷に依存せずスループット、遅延を解析的に導出できるようになった。さらに自律分散動作する端末がネットワークを構成することにより生じる特別なネットワークダイナミクスをいくつか指摘し、その発生メカニズムを明らかにした上で、解析的にそれらの現象をモデル化することに成功した。

研究成果の概要(英文)：This research advocates a new concept for wireless-communication networks analysis, which is a bottom-up expressions from individual node behavior. Concretely, analytical expressions of the throughputs and transmission delays of string-topology multi-hop networks can be obtained, which are independent of frame length, flow ratio, and offered load. Additionally, some special network dynamics are pointed out. The dynamics occurrence mechanisms are clarified, which are verified through analyses, simulations, and experiments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：情報通信工学 先端通信 ネットワーク

### 1. 研究開始当初の背景

無線マルチホップネットワークは、既存のネットワークインフラを必要としないため、非常時の一時的なネットワーク、無線ホームネットワーク、ITS (Intelligent Transport Systems) などへ利用が期待されている。しかし、複数の端末が自律分散的に動作するため、ネットワーク全体の挙動や特性を解析的に把握することは極めて複雑で困難な問題となる。スループット、平均遅延などのネットワークの諸特性はシミュレータを用いたシミュレーションで評価することが多い。しかし、統計データを得るまで膨大な時間を要するという本質的な欠点がある。一方、「解析」は一旦解が求めれば短時間に結果を把握できる。さらに数式から多くの情報を入手でき、評価に数学的な保証が加わるなど多くの利点を得られる。

無線ネットワークの特性解析として、Bianchi によって提案されたマルコフ過程に基づく確率論的解析手法が知られており、この手法に端を発し様々な条件下で深い議論が展開されている。しかし、これら一連の議論はシングルホップを想定したものであり、スループットや遅延特性は複数の端末が同時に送信を開始することに起因するフレーム衝突率に支配される。一方、無線マルチホップネットワークでは、隠れ端末問題に起因するフレームの衝突が支配的であり、その影響を組み込んだ新しい理論の構築が必要である。無線マルチホップネットワークの解析の草分けの論文として知られているいくつかの論文では、局所的な動作を解析しているにすぎず、ネットワークを構成する各端末の動作がネットワーク全体の挙動に波及していく様子をモデル化することはできていない。そのため、解析の対象が極めて限定的であり、汎用性に欠ける解析にとどまっている。

### 2. 研究の目的

本研究では無線ネットワークにおいて「個」の動作がネットワーク全体の振る舞いに及ぼす影響をモデル化するという独自の解析アプローチを提唱し、ネットワーク構成、負荷特性、パケットの種類などに依存しない解析式の導出に挑戦する。さらに、その解析を用いて無線ネットワークにおいて、スループット、平均遅延、衝突率などの統計データを短時間に導出する。本研究の成果はネットワークを構成する端末(個)の特性、ネットワークトポロジ、パラメータなどがネットワーク全体の挙動に与える影響を高速に、明な形で把握することができ、今後の無線マルチホップネットワークの発展に大きく寄与する。本研究の成果はネットワークの本質を解析的に明な形で理解することにつながり、今後の無線ネットワークの発展においてブレークスルー技術になりうる。また、本研究の

アイディアは脳の振る舞いをモデル化する研究からアイディアを得ており、工学的、人為的なネットワークである無線通信ネットワークと、生物学的、自然に構築されたネットワークである脳ネットワークとの間にあらたな分野横断的学問領域の創出が期待される。

無線マルチホップネットワークにおいて解析的表現を目指す研究は、まだその試みが始まったところである。いままで報告されてきた解析手段は未整備などところが多く、解析対象のネットワークトポロジを一般化すると、その前提が根本から崩れるためこれまでの解析結果を用いることができない。本研究は、そのような問題に対し、ネットワークを構成する「個」の動作がネットワーク「全体」の振る舞いに及ぼす影響をモデル化するという独自の解析アプローチを提唱し、そのアイディアに基づいてネットワークをモデル化することにより、無線マルチホップネットワークの新たな解析手法の確立に挑戦するものである。提唱する手法が確立されれば、ネットワークのトポロジ、負荷状態、パケットの種類などを限定する必要がなく、一般性と汎用性を持った解析式を得ることが出来る。申請者の知る限り、無線マルチホップネットワークにおいて、一般性を確保したまま解析を進めようとする試みはこれまでまったくなされておらず、本研究成果はネットワークの解析分野において新たな道を切り拓くことになる。

### 3. 研究の方法

本研究では IEEE802.11 DCF(Distributed Coordinate Function)を MAC(Medium Access Control)プロトコルとしてもつマルチホップネットワークにおけるスループット解析を行う。マルチホップネットワークの中でもっとも単純なトポロジである直線状マルチホップネットワークについてそのスループットおよび遅延特性を解析的に表現する。

ここで、ネットワークの負荷が高くなく非飽和状態であれば、挑戦状ネットワークのスループットは送信負荷と等しいことは自明である。つまりスループット解析で重要な点は飽和状態でのスループットを適切に求めることにある。一方、飽和状態においてはフレームが中継ノードにより破棄されることになる。その時点で遅延は無限大となり遅延を評価する意義は薄れていく。以上のことから、スループット解析は飽和ネットワークの解析と、遅延解析は非飽和ネットワークの解析と等価である。

スループット解析においてはフレームの衝突率、キャリアセンス時間の解析がその中心課題となる。同じ時間に複数の端末が同時にフレームを送信したときフレーム衝突が発生する。フレーム衝突は隠れ端末による衝突と、キャリアセンス内の端末による同時送

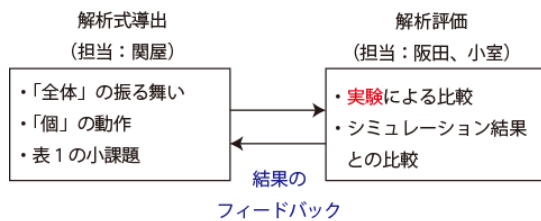


図 1: 研究体制

信の衝突に分類される. これらをどのように表現するかが解析の主課題となる.

遅延解析では, 端末の送信にかかる時間とバッファで送信を待つ時間の和を求める必要がある. 従来良く取られているアプローチでは待ち行列理論に基づきバッファの状態を表現し, その上でフレームの送信時間を求めている. 通信構造からすると上位レイヤから下位レイヤを表現するといったトップダウンのモデル化であった. それに対し本研究ではフレーム衝突をまずモデル化し, その上でバッファの待ち時間を表現するボトムアップ的解析手法をとる. これにより, マルチホップネットワークを構成する個々の端末動作を詳細に表現することができ, これまで解析が困難であったさまざまな問題に対して解析解を与えることができると考える.

以上の理解のもと, 本研究では次の手順で解析を進めていった.

### 3-1: 片方向フローネットワークの最大(飽和)スループット解析

直線上ネットワークの片方向フローにおける最大スループットを解析的に導出する. ホップ数, フレーム長の影響を表現することを目的とする.

### 3-2: マルチホップネットワークに生じる連成効果とその解析

無線ネットワークにおいてが特定の条件を満足するとき, 各端末が自律的分散的に動作しながらもネットワークの結合性により規則的な動作を呈する連成効果が発生することが知られている. 本フェーズではマルチホップネットワークに生じる連成効果を見出し, その発生要因および解析表現を与える.

### 3-3: IEEE802.11e における片方向フローネットワークのスループット解析

IEEE802.11 EDCF (Enhanced DCF)は無線ネットワークの QoS (Quality of Service)を達成するための MAC プロトコルである. 本フェーズでは EDCF を適用したときのスループット解析を行う.

### 3-4: 双方向・非対称フローに対応したスループットおよび遅延解析

本研究の最終目標として, 双方向・非対称フローの対応した解析表現の導出を目指す.

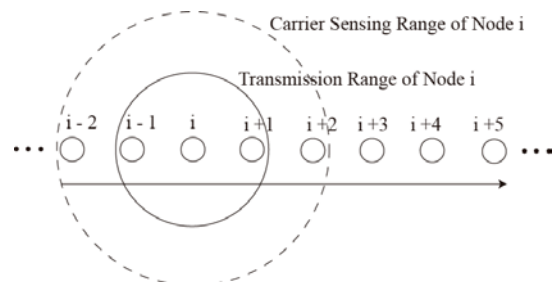


図 2: 片方向フローネットワークトポロジ

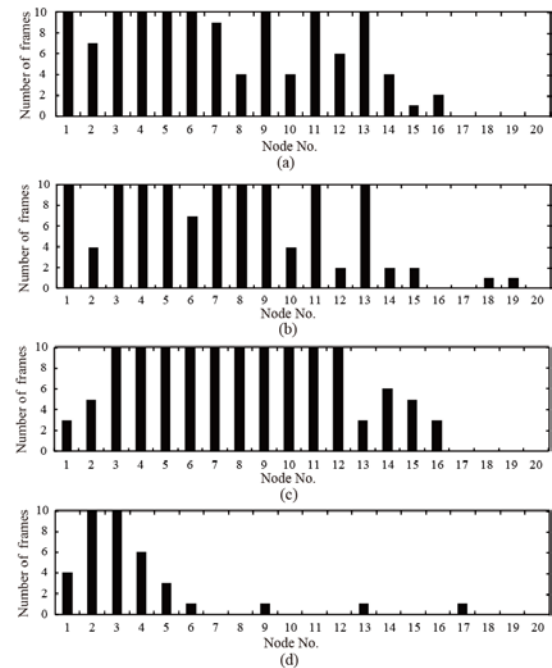


図 3: ノードとフレームの関係 (a)(b)ショートフレーム (c)(d)ロングフレーム (a)(c)シグナルキャプチャ(SC)効果なし (b)(d) SC 効果あり

非対称性を含むため, すなわち本解析表現は片方向フローの結果を内包する. また, 飽和・非飽和を問わない解析表現の確立を目指す.

以上の計画にしたがい, 図 1 の研究体制で研究を進めた. 解析の結果は実験・シミュレーションとの比較によりその妥当性を確認する.

## 4. 研究成果

### 4-1: 片方向フローネットワークの最大(飽和)スループット解析(論文[5])

図 2 のネットワークトポロジに生じる端末の振舞いについて解析を進めた. これまでの研究成果にしたがって, 場を平均化した上での解析を進めるとフレーム長が長い場合解析結果とシミュレーション結果が一致しないことが明らかとなった. この原因について詳細に調査したところ, 図 3 に示す現象を確認した. 図 3 では(d)の状態だけ, フレームを保持する端末が一定間隔で表れる状況を見ることができる. つまりフレーム長によりネットワークのダイナミクスが変化する現

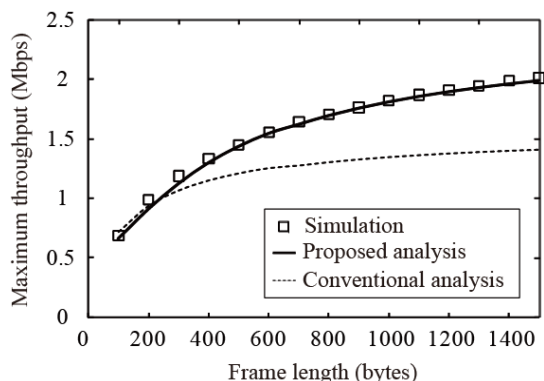


図 4：解析結果 提案手法はフレーム長に依存せずよい一致が得られる。

象を確認することができた。さらにこの要因について詳細な検討を行ったところ、フレーム長と Contention Window(CW)値の関係がその要因で、CW 値よりも送信時間が十分に長いときこの現象が生じることを明らかにした。そのことを考慮に入れた解析式を提案した結果図 4 のように、従来手法ではまったく一致しなかった最大スループットの良好な一致を得ることができ、解析の妥当性を示すとともに図 3 のネットワークダイナミクス発生要因を解析的に証明することができた。

4-2：マルチホップネットワークに生じる連成効果とその解析(論文[4], 学会発表[8])

4-1 に続けて双方向フローの解析に着手したが、図 5 のような 3 ホップの双方向フローのときだけどうしても解析結果とシミュレーションが一致しない。その理由を調査していたところ、図 6 のような振る舞いが生じることを見出した。これは図 5 のトポロジにおいてノード 1 が送信している間ノード 4 は送信権を得ることができず、一方、ノード 4 が送信している間はノード 1 は送信権を得られないという現象である。長期的にみれば通信のバランスはとれているが、短期的には非対称性が起きている。これは本来隠れ端末の関係にある端末 1 と 4 がネットワークで結合された連成現象とみるができる。

この現象の発生要因を調べた結果、マルチホップの両端の端末が隠れ端末の関係にあること、さらにフレーム長が CW に対して十分に長い時この現象が起きることを明らかにした。それらの影響を考慮して解析した結果、図 7 の結果を得た。解析結果はシミュレ

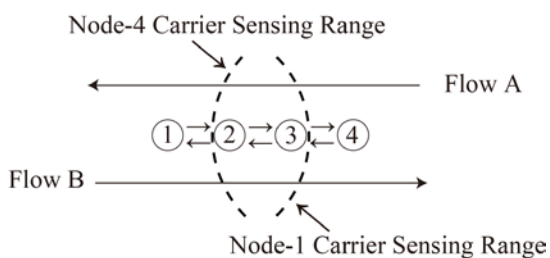


図 5：3 ホップ双方向ネットワーク

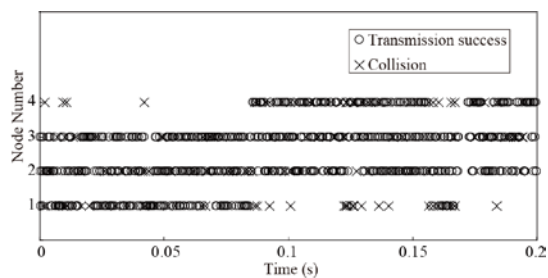


図 6：連成効果の発生

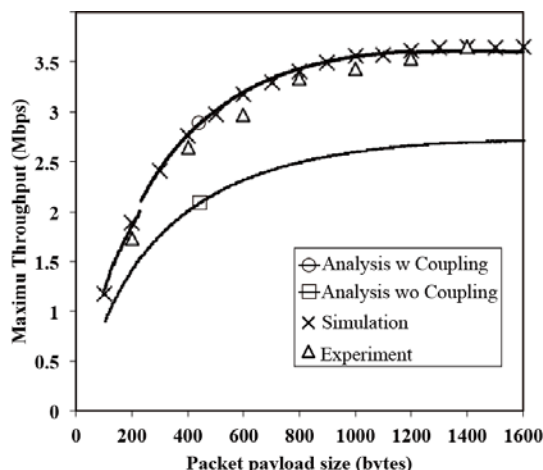


図 7：解析結果 解析結果はシミュレーション・実験ともにより一致を得た。

ーションおよび実験結果とよく一致しており、本研究で見出した連成効果が発生すること、およびその発生条件についての妥当性をシミュレーションのみならず実験からも確認することができた。

4-3：IEEE802.11e における片方向フローネットワークのスループット解析(学会発表[2], [6])

図 2 の片方向トポロジについて、IEEE 802.11e で規定される MAC プロトコルについて解析を行った。IEEE802.11 EDCF では端末内に図 8 で示すアクセスカテゴリ (AC) ごとのバッファを仮想的に準備し端末中で送信権の取得を争う。4-1 の解析の概念に、こ

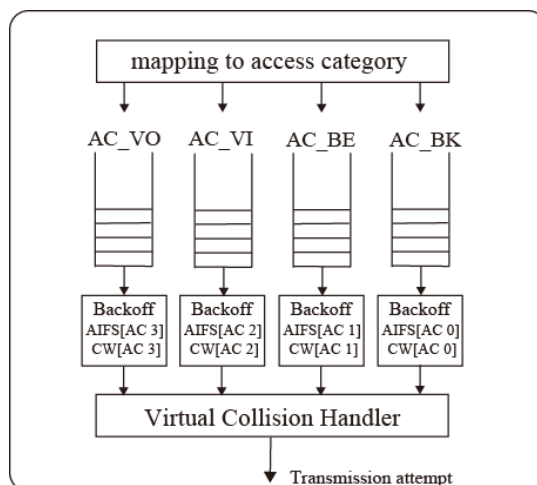


図 8：IEEE802.11EDCF の端末動作

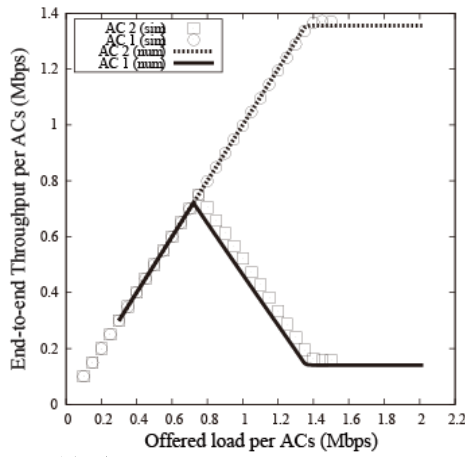


図 9: 送信負荷に対するスループット. AC の差別化が表現されている.

の端末動作をこの端末のモデリングで反映させた上でネットワーク解析を行った.

図 9 に解析結果を示す. 解析の結果はシミュレーション結果とよい一致を見せており, AC 間の競合の振舞いを正確にモデル化していることが分かる.

#### 4-4: 双方向・非対称フローに対応したスループットおよび遅延解析

直線状トポロジにおける IEEE802.11 の解析表現として, 1. ホップ数, 2. フレームサイズ, 3. 送信負荷に依存しない解析表現の開発を行った. ポイントは, フレームサイズに対し非依存とするため, 隠れ端末の衝突率をマルコフ仮定を用いて表現すること, 2. 1 フレームあたりの送信時間を考慮に入れた解析表現とすること, 3. 飽和, 非飽和に対応するため, 端末ごとに待ち行列理論を導入し, 受信フレーム数と送信フレーム数でネットワークの表現すること, をそれぞれ提案し, 解析式を導出した.

図 10 は一方向, 双方向フローにおける遅延特性を示している. フローに関わらずシミュレーションと解析の結果がよく一致して

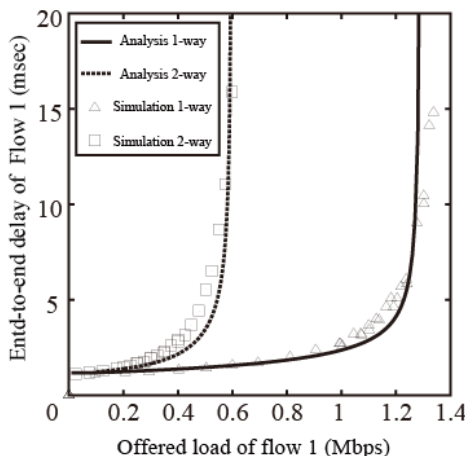


図 10: 送信負荷に対する送信遅延. 片方向, 双方向とも理論とシミュレーションが一致している.

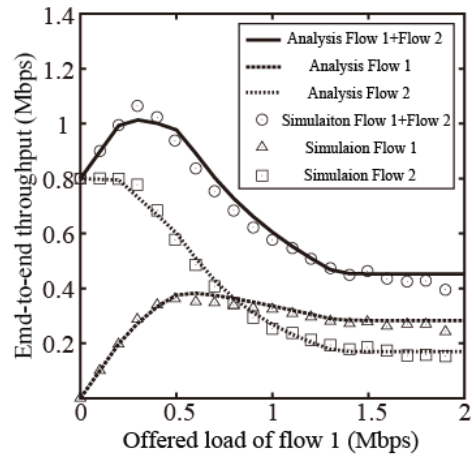


図 11: 送信負荷に対するネットワークスループット. 非対称フローにおいても正確にスループットを見積もることに成功した.

いることから解析の妥当性が確認できる. 図 11 は送信負荷に対するフローごとのスループットを示している. この結果でシミュレーションと解析の一致をしめしていることは負荷の非対称性がスループットに与える影響を解析的に表現できていることを示している.

本フェーズにおける解析の成功は, 直線状というもっとも基本的なマルチホップネットワークのトポロジではあるが, これまでできていなかったモデリングに成功したことを示している. これは, 本研究で首尾一貫して主張しているボトムアップ的解析の有効性および妥当性を示している.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

[1] 満足亮, 関屋大雄, 馬ジン, 眞田耕輔, 阪田史郎, "アドホックネットワークにおいて Pulse/Tone 信号を用いた制御チャネル型マルチチャネル MAC プロトコル," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J97-B, no.4, pp.344-353, Apr. 2014. (査読有)

[2] J. Ma, H. Sekiya, A. Nagasaki, N. Komuro, and S. Sakata, "MAC protocol for ad hoc networks using smart antennas for mitigating hidden and deafness problems," IEICE Trans. on Communications, vol.E95-B, no.11, pp. 3545-3555, Nov. 2012. (査読有)  
DOI: 10.1587/transcom.E95.B.3545

[3] J. Ma, H. Sekiya, N. Komuro, and S. Sakata, "MAC protocol for smart-antenna used ad hoc networks with RTS/CTS overhead reduction," Journal of Selected Areas in telecommunications (JSAT), pp.10-19, June 2012. (査読有)

[4] K. Sanada, H. Sekiya, N. Komuro, and S. Sakata, "Backoff-stage synchronization in three-hop string-topology wireless networks with



hidden nodes," Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol.3, no.2, pp.200-214, Apr. 2012. (査読有)  
DOI: 10.1588/nolta.3.200

[5] H. Sekiya, Y. Tsuchiya, N. Komuro, and S. Sakata, "Analytical expression of maximum throughput for long-frame communications in one-way string wireless multihop networks," Wireless Personal Communications, vol.60, no.1, pp.29-41, Sept. 2011. (査読有)  
DOI:10.1007/s11277-011-0253-3

[6] S. Y. Chin, N. Komuro, H. Sekiya, and S. Sakata, "Analytical expressions for RTS/CTS wireless multihop networks," Journal of Signal Processing, vol.15, no.4, pp.267-271, July 2011. (査読有)

[学会発表] (計 38 件)

[1] K. Sanada, H. Sekiya, N. Komuro, and S. Sakata, "Maximum throughput analysis for IEEE 802.11 string topology wireless multi-hop networks taking into account hidden nodes using Markov-chain model," 2014 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'14), Hawaii, USA, Mar. 1, 2014.

[2] 下山田祐太, 眞田耕輔, 関屋大雄, 小室信喜, 阪田史郎, "バックオフによる優先制御を考慮した隠れ端末存在環境における IEEE 802.11e 無線マルチホップネットワークスルーット解析," 電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会, 愛媛県松山市 Jan. 24, 2014.

[3] J. Shi, K. Sanada, H. Sekiya, and S. Sakata, "Delay analysis for IEEE802.11 multi-hop networks taking into account the concurrent-transmission collisions," The 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013), Arizona, USA, Sept. 10, 2013.

[4] 眞田 耕輔, 史 進, 関屋 大雄, 阪田 史郎, "隠れ端末問題を考慮した無線マルチホップネットワークにおけるマルコフ遷移図を用いたスルーット及び遅延解析," 電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンスワークショップ, 北海道石狩郡, Aug. 9, 2013.

[5] 関屋 大雄, 眞田 耕輔, 史 進, 阪田 史郎, "直線状マルチホップネットワークに生じるダイナミクスと解析," 電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会, 静岡県浜松市, May 16, 2013.

[6] Y. Shimoyamada, K. Sanada, and H.

Sekiya, "Non-saturated and Saturated Throughput Analysis for IEEE 802.11e EDCA Multi-hop Networks," The 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMP), New Jersey, USA, June. 26, 2013.

[7] J. Shi, K. Sanada, H. Sekiya, N. Komuro, and S. Sakata, "Delay analysis for IEEE802.11 string-topology multi-hop networks," 2013 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'13), Hawaii, USA, Mar. 6, 2013.

[8] K. Sanada, H. Sekiya, and S. Sakata, "Non-saturated and maximum throughput analysis for string topology wireless multi-hop networks," IEICE Technical Committee on Complex Communication Science, Korea Japan Joint Workshop, Seoul, Korea, Nov. 23, 2012.

[9] 眞田耕輔, 関屋大雄, 小室信喜, 阪田史郎, "あるマルチホップネットワークに生じるバックオフステージ同期とその考察," 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会, vol.CCS-2012-006, pp.29-35, 北海道札幌市, Aug. 9, 2012.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/sakatakomuro1ab/home>

<http://www.s-lab.nd.chiba-u.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

阪田 史郎 (SAKATA, Shiro)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授

研究者番号: 80375609

(2)研究分担者

関屋 大雄 (SEKIYA, Hiroo)

千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授

研究者番号: 20334203

小室 信善 (KOMURO, Nobuyoshi)

千葉大学・大学院融合科学研究科・助教

研究者番号: 70409796