

## 無線 LAN 上のデータ転送時の TCP パラメータの一解析

松井 愛子<sup>†</sup> 神坂 紀久子<sup>†</sup> 山口 実靖<sup>‡</sup> 小口 正人<sup>†</sup>

お茶の水女子大学 工学院大学

本研究では無線 LAN 上でデータを転送する際の TCP パラメータの解析を行う。OS のカーネルソースコードにモニタ関数を挿入することで TCP パラメータの振舞を可視化し、更にスループットの時間変化およびパケット転送タイミングを可視化することで解析を進める。まず二台のホスト間を直接有線 LAN と無線 LAN それぞれで接続した単純な環境で通信を行い、有線 LAN 通信時、無線 LAN 通信時における TCP パラメータの振舞の比較を行う。これにより、無線 LAN 通信時における基本的な TCP パラメータの振舞の特徴を確認した後に、二台のホスト間に無線 LAN と有線 LAN をつなぐルータを挟み、無線 LAN アクセスポイント経由でインターネットにアクセスする典型的なネットワーク構成における TCP パラメータの振舞を解析する。

### Analysis of TCP Parameters on Data Transfer through a Wireless Network

Aiko MATSUI<sup>†</sup> Kikuko KAMISAKA<sup>†</sup> Saneyasu YAMAGUCHI<sup>‡</sup>  
Masato OGUCHI<sup>†</sup>

Ochanozmi Univ. Kogakuin Univ.

In this paper, we analyze TCP parameters on data transfer through a wireless network. By adding monitor function in a Kernel source code, we can see actions of TCP parameters. In addition, we visualize time change of throughput and packets transportation timing. We analyze the behavior of TCP based on them. First, we communicate on a simple network environment, so that we can see actions of basic TCP parameters. Next, we communicate on a more complex network environment, in which wired and wireless LANs are connected.

#### 1 はじめに

近年、無線通信に対する需要がますます高まり、データ転送時のスループットの増大が切望されている。しかし無線通信は有線通信と比べ、帯域が狭いだけでなく、通信効率が著しく低い。その原因として、例えば無線 LAN においてはノイズ等によるエラー発生頻度が高いことに加えて、有線環境用に開発された TCP プロトコルが無線環境で効率よく機能していない可能性が考えられる。これまで有線環境においては、通信時の TCP プロトコルの振舞を解析し、TCP パラメータを制御することによって通信効率を上げる研究が行われてきた [1]。そこで

本研究では、無線通信における TCP パラメータの振舞を解析し、通信効率の向上について検討する。現在までに、無線通信における TCP プロトコルに関する研究は盛んに行われてきた [3]。しかしその多くは、スループットやレスポンスタイムの測定など、システム外部からの観察に留まっている。また無線環境に特化した TCP を構築する試みも見られる。それに対し本研究では、既存 OS のカーネル内部の TCP 実装で管理されている TCP パラメータの値を可視化し、そのデータを用いたより深い議論と解析の実現を目指す。

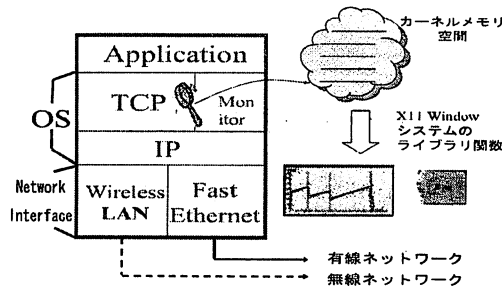


図 1: TCP パラメータの可視化手法の概念図

## 2 TCP パラメータの可視化

本研究では無線通信時の TCP パラメータを可視化する。

まず、カーネル内部の TCP ソースファイルにモニタ関数を挿入し、再コンパイルしてカーネルを再構築する。その結果、TCP による通信時にパラメータの値がカーネルのメモリ空間に記録され、カーネル外部からそれらの値が確認可能となる。また、モニタしたパラメータを X11 Window システムのライブラリ関数を利用し、リアルタイムにグラフ表示する。TCP パラメータの可視化手法の概念図を図 1 に示す。

実験では tcpdump コマンド [5] を用いてパケットをキャプチャしパケットの送受信の様子をグラフ化して可視化した。また一定量のデータを送信し続けその所要時間を測定して計算し数値をグラフ化することでスループットの時間変化を可視化出来る様にした。これらを用いて有線通信時・無線通信時の TCP パラメータの振舞を比較・解析して無線独自の問題点を発見し、無線環境で効率よく通信できるよう TCP パラメータを制御する手法を検討する。

## 3 輻輳ウィンドウ

TCP では、輻輳制御において輻輳ウィンドウという概念を用いている。Linux OS の TCP は状態機械として実装されている。パケット送受信における処理は、その状態によって変化する。

輻輳ウィンドウとはネットワークの輻輳制御を目的としてデータ送信側が自主的に制限するための TCP パラメータで、受信側からの確認応答パケット (Acknowledgement:Ack) 無しに連続送信できる最大のパケット数を表す。正常な通信時には確認応答を 1 つ受信するごとに増加し、エラーが起こると急激に減少する。エラーには

- ・送信側デバイスドライバのバッファが溢れる

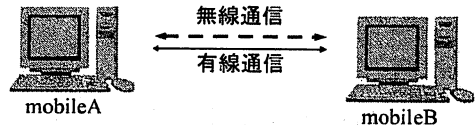


図 2: 初期実験環境

こと

による Local Congestion エラー (CWR)

- ・重複 ACK, SACK を受信 (Recovery)
- ・タイムアウトを検出 (Loss)

の 3 つがある。これらのエラーにより輻輳ウィンドウが急激に減少した後、回復と判断されると再度正常な状態に遷移し増加を始める。単位時間あたりに受信する確認応答の個数によって差はあるものの、輻輳ウィンドウの減少時に比べると緩やかに増加していくため、TCP 輻輳ウィンドウ制御において、輻輳ウィンドウの時間変化は鋸型となる。また、Linux の TCP 実装では、通信中にひとたび設定された輻輳ウィンドウは、その値を使い切らない限りは変化せず、その間のスループットはほぼ一定の値で安定する、ということが分かっている。

## 4 基礎実験と考察

本研究における実験システムとして、2 台の PC を Fast Ethernet 有線 LAN と IEEE802.11b 無線 LAN で接続したものをを用いた (図 2)。各マシンのスペックは、CPU が Pentium III 800MHz、メインメモリが 640MB、OS が Linux 2.4.18-3 である。データ送信、スループットの測定には netperf を用いた [4]。スループットは有線 LAN 通信時には平均 93~94Mbps/sec、無線 LAN 通信時には平均 3~4Mbps/sec 程度の値が得られた。有線 LAN 通信時および無線 LAN 通信時のデータ送信側の輻輳ウィンドウの時間変化をそれぞれ図 3 と図 4 に示す。

図に示されている縦の点線は、この時点で Local Congestion エラーを検出したことを表している。また有線 LAN および無線 LAN 通信時の TCP パケットと ACK 送受信の様子を可視化したものをそれぞれ図 5、図 6 に示す [2]。実験結果より、有線 LAN では短い周期の鋸状の波形となり、無線 LAN では長い周期の鋸状の波形となることが分かった。これは無線 LAN の時間単位あたりの送信パケット数が有線 LAN と比較して少なく、従って受信 ACK 数も少ないためであると考えられる (図 5、図 6)。

これらの結果より、無線 LAN においては、ひとたび輻輳ウィンドウの値が減少してしまうと元の値に戻るまでに長い時間がかかり、その間通信効率が

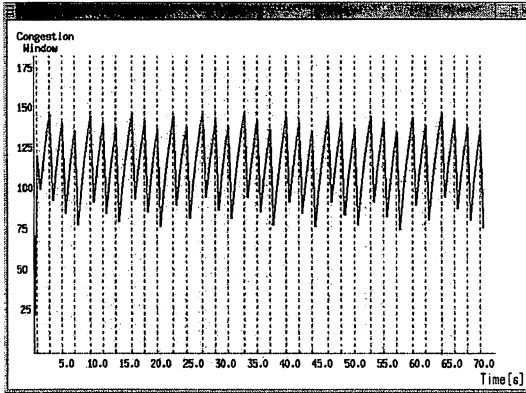


図 3: 有線 LAN 通信時の輻輳ウィンドウ個数の遷移

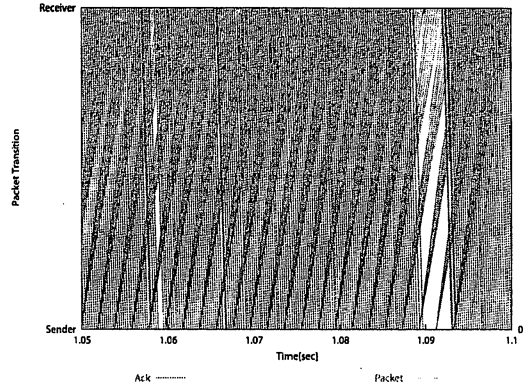


図 5: 有線 LAN 通信時の TCP パケット可視化図

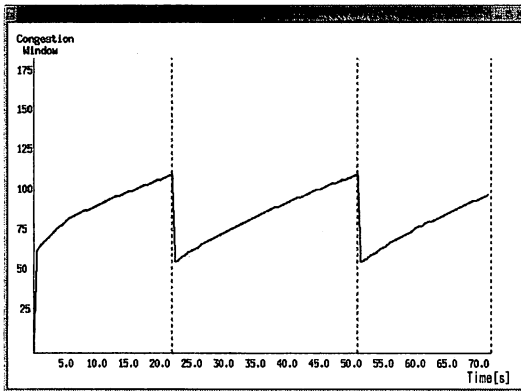


図 4: 無線 LAN 通信時の輻輳ウィンドウ個数の遷移

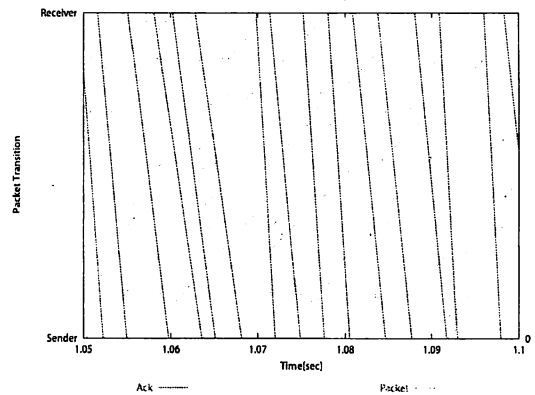


図 6: 無線 LAN 通信時の TCP パケット可視化図

大幅に低くなる事が分かる。従って Local Congestion エラーが起きない程度の高い値に輻輳ウィンドウを保つことが、無線環境で効率よく通信を行うためには重要であると考えられる。

## 5 輻輳ウィンドウ制御

### 5.1 輻輳ウィンドウ制御

無線 LAN 通信において広告ウィンドウサイズを変更し、輻輳ウィンドウを制御する手法を検討した。広告ウィンドウとは受信側が送信側に指定するウィンドウサイズであり、輻輳ウィンドウと広告ウィンドウの小さい方が ACK の受信無しに連続送信できる最大パケット数となる。従って、広告ウィンドウが十分に大きい場合には、輻輳ウィンドウは広告ウィンドウに影響されることなく、そのネットワークにおける輻輳ウィンドウの最大値を取った後、Local

Congestion などのエラーにより急激に値を下げる。広告ウィンドウが小さい場合には、最大値になる前に広告ウィンドウに成長を止められ、その値を保つ。

### 5.2 制御結果

実験システムを用いて制御を行った結果を図 7 に示す。広告ウィンドウが 8M バイトのときは、広告ウィンドウサイズが十分に大きく、輻輳ウィンドウの値は広告ウィンドウに影響を受けず、鋸型の波形を示す。広告ウィンドウをその値から徐々に下げていき、200K バイトにすると、輻輳ウィンドウの値が急激に落ちる直前に広告ウィンドウによって成長が止められ、輻輳ウィンドウが使い切られないため、そのときの値が保たれた。広告ウィンドウを更に下げていくと、輻輳ウィンドウは一定の値を保つが、広告ウィンドウの値の低下に伴い限界値が下がる(図 7 の広告ウィンドウ: 90 K バイト)。

このことから本実験環境においては、広告ウィ

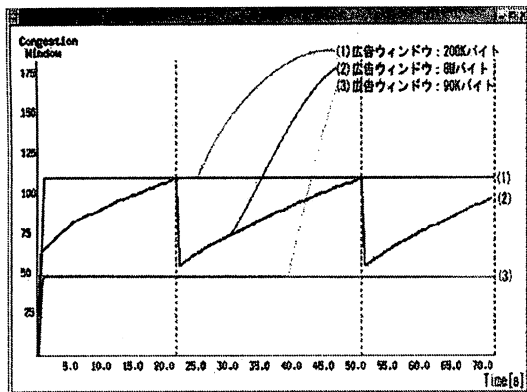


図 7: 輻輳ウィンドウ制御結果

ドウのサイズを 200K バイトにした際、最も通信効率率が向上すると言える。ただしスループットを測定したところ、広告ウィンドウサイズが 8 M バイトの時は 3.88Mbps/sec、200K バイトにした時は 3.94Mbps/sec と、スループットにはあまり大きな変化が現れなかった。その原因としては

- ・隣接した二台の端末間という往復遅延時間が短い環境で無線 LAN 通信を行っており、すぐに ACK が戻って来るためウィンドウサイズの大小に関係なく輻輳ウィンドウの制限によるパケット転送の待ち状態がほとんど生じず、制御を行ってもスループットに差が出ない (図 8, 図 9)

- ・本実験で用いている無線 LAN IEEE11b の帯域幅が狭いため、パケット転送のペースが遅く、ウィンドウサイズ消費が有線環境に比べてゆっくりである等が考えられる。

## 6 無線 LAN ツーホップ通信環境における輻輳ウィンドウの振舞

### 6.1 無線 LAN アクセスポイントにおけるツーホップ通信環境

次に実験環境をより現実用いられている無線 LAN 環境に近いものに変更し、輻輳ウィンドウの解析を進める。基礎実験で用いた 2 台の端末の間にルータを挟み、2 台の端末のうち 1 台はルータと有線 LAN 通信を、もう 1 台は無線 LAN 通信を行うように設定した (図 10)。このような環境は無線 LAN アクセスポイントからインターネットにアクセスする際の典型的なネットワーク構成である。また、このような環境のもとではエンドツーエンドの TCP 制御を行う必要があることが分かっている

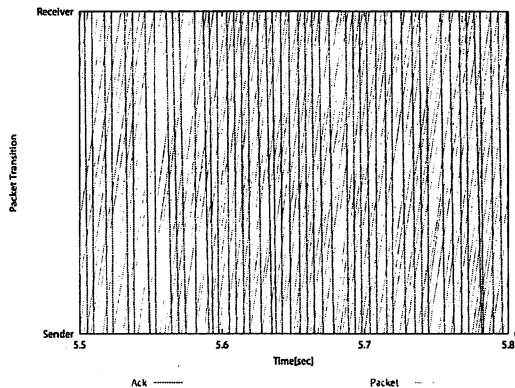


図 8: 輻輳ウィンドウ非制御時の TCP パケット可視化図

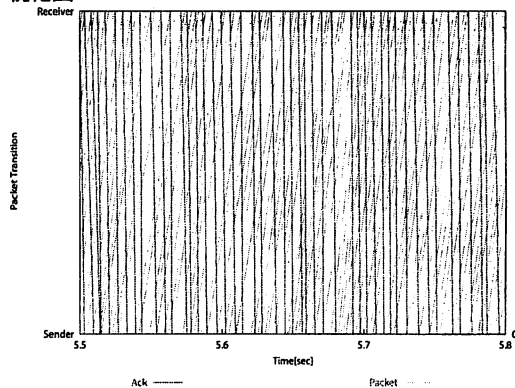


図 9: 輻輳ウィンドウ制御時の TCP パケット可視化図

る [3]。また、データのやり取りとしては、受信側ノードが送信側ノードに送信要求を出し、それに対し送信ノードが一定のバッファサイズのデータを繰り返し送信し続けるという形のソケット通信プログラムを用いた。本実験ではバッファサイズを 1M バイトに統一した。無線 LAN 通信を行う端末から有線 LAN 通信を行う端末へデータを送信する場合と、その逆の有線 LAN 通信を行う端末から有線 LAN 通信を行う端末へデータを送信する場合の 2 通りが考えられ、両方の測定を行った。

### 6.2 無線 LAN から有線 LAN にデータを送信した場合

データを無線 LAN 側から有線 LAN 側に送る場合、図 11・12 (輻輳ウィンドウ非制御時)、図 13・14 (輻輳ウィンドウ制御時) のような振舞を見せる。

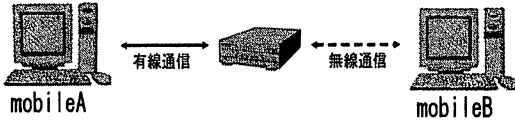


図 10: 無線 LAN ツーホップ通信環境

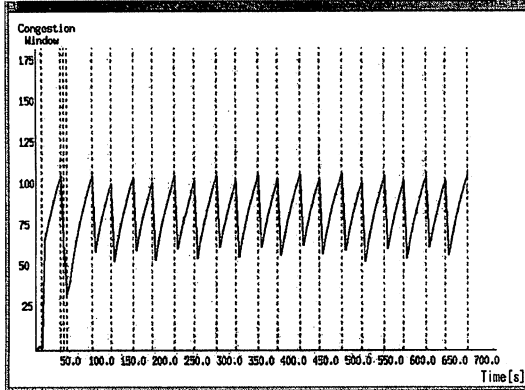


図 11: 無線→有線通信時の輻輳ウィンドウ個数遷移 (広告ウィンドウサイズ 8M)

図 11 は広告ウィンドウサイズ 8M バイトにおける輻輳ウィンドウ個数遷移、図 12 は広告ウィンドウサイズ 200K バイトにおける輻輳ウィンドウ個数遷移、図 13 は広告ウィンドウサイズ 8M バイトにおけるスループット時間変化、図 14 は広告ウィンドウサイズ 200K バイトにおけるスループット時間変化である。このときの輻輳ウィンドウの振舞は、無線 LAN のみを用いた通信時とほぼ同じである。すなわち広告ウィンドウが 8M バイトの時には輻輳ウィンドウは上昇を続け、Local Congestion エラーにより急激に下降するという鋸型の波形となる。有線 LAN は無線 LAN より高速なため、ルータ以降の有線区間ではパケット転送に余裕があり、エラーは起きず TCP パラメータの振舞に影響を与えない。

### 6.3 有線 LAN から無線 LAN にデータを送信した場合

一方、有線 LAN 経路から無線 LAN 経路でデータを送る際には図 15・16 (輻輳ウィンドウ制御時)、図 17・18 (輻輳ウィンドウ制御時) のような振舞を見せる。図 15 は広告ウィンドウサイズ 8M バイトにおける輻輳ウィンドウ個数遷移、図 16 は広告ウィンドウサイズ 300K バイトにおける輻輳ウィンドウ

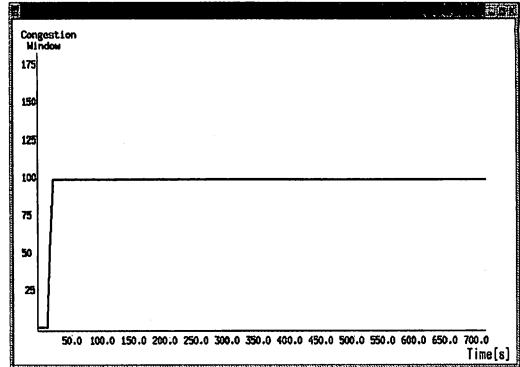


図 12: 無線→有線通信時の輻輳ウィンドウ個数遷移 (広告ウィンドウサイズ 200K)

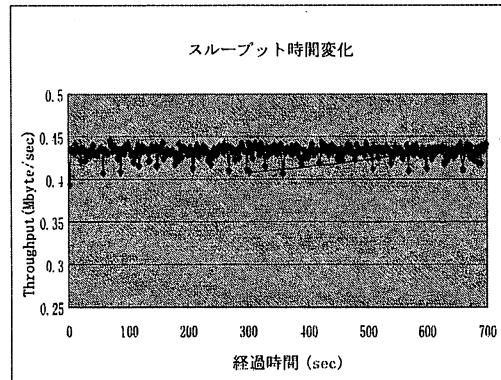


図 13: 無線→有線通信時のスループット時間変化 (広告ウィンドウサイズ 8M)

個数遷移、図 17 は広告ウィンドウサイズ 8M バイトにおけるスループット時間変化、図 18 は広告ウィンドウサイズ 300K バイトにおけるスループット時間変化である。輻輳ウィンドウは 6.2 節のケースと比較して高い値になっている。これは有線 LAN の方が高速であるため、この区間が太いパイプとなってパケットを溜め込む形となるからであろうと考えられる。しかし無線 LAN 区間に進むとパイプは急激に細くなり、この地点でエラーが起こる。またこれらのことから 6.2 節のケースと比較して、スループットの平均値が若干高くなっている。

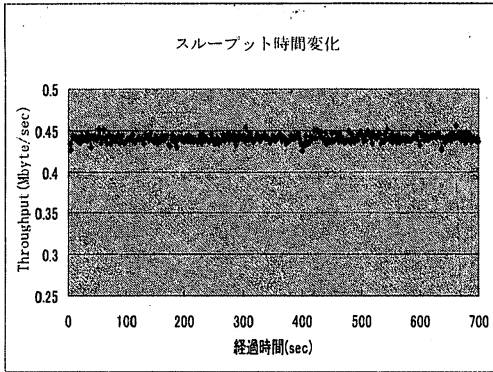


図 14: 無線→有線通信時のスループット時間変化 (広告ウィンドウサイズ 200K)

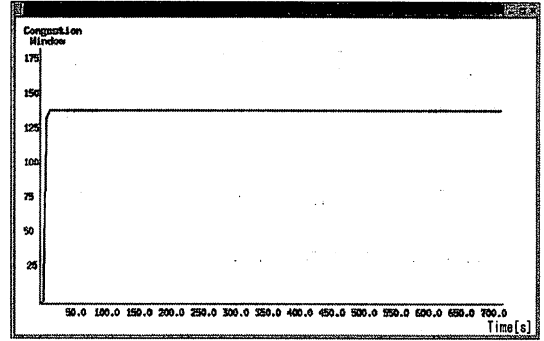


図 16: 有線→無線通信時の輻輳ウィンドウ個数遷移 (広告ウィンドウサイズ 300K)

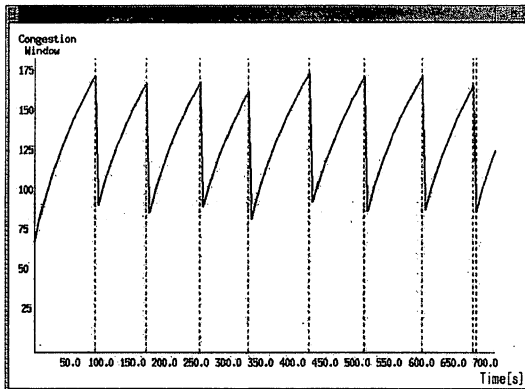


図 15: 有線→無線通信時の輻輳ウィンドウ個数遷移 (広告ウィンドウサイズ 8M)

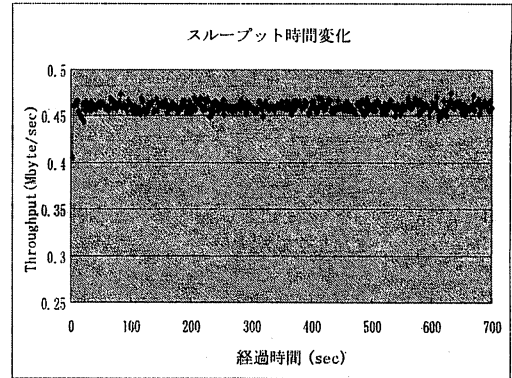


図 17: 有線→無線通信時のスループット時間変化 (広告ウィンドウサイズ 8M)

#### 6.4 無線 LAN 通信における非定常状態の輻輳ウィンドウの振舞の様子

6.1 節に示した環境の下で通信を行い、輻輳ウィンドウの振舞を見てみると、6.2 節、6.3 節に示したような安定した定常状態になる前に、図 19、図 20、図 21 のように輻輳ウィンドウが不規則な振舞を見ることが多々ある。図 19 は広告ウィンドウサイズ 8M バイト、図 20 と図 21 は広告ウィンドウサイズ 200K バイトのときの図である。図に示されている縦の点線は一部の Local Congestion エラーを除いて殆どが重複 ACK、SACK 受信エラーを表している。これは、有線 LAN、無線 LAN という二つの違う種類の回線間でどのようなタイミングでどのくらいのデータを送信すれば良いか、送信側が試行錯

誤して、ルータのところで大量にパケットが喪失してしまいこのような形になっていると考えられる。試行錯誤を続け、しばらくしてパイプが埋まり、セルフクロッキングの定常状態となり丁度いいバランスでデータを送信できるようになると、6.2 節、6.3 節のような形に近づいて行く。

#### 7 まとめと今後の課題

本研究では TCP パケットの振舞を可視化し、有線 LAN および無線 LAN 通信における TCP パケットの振舞を比較した。そこから無線 LAN 通信独自の問題点を発見し、広告ウィンドウサイズを変えることで輻輳ウィンドウを制御し通信効率を上げた。また、端末間にルータを挟むことで無線 LAN アクセスポイントの使用を想定した現実的な無線 LAN

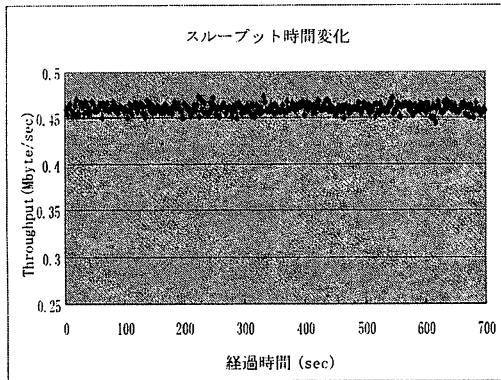


図 18: 有線→無線通信時のスループット時間変化 (広告ウィンドウサイズ 300K)

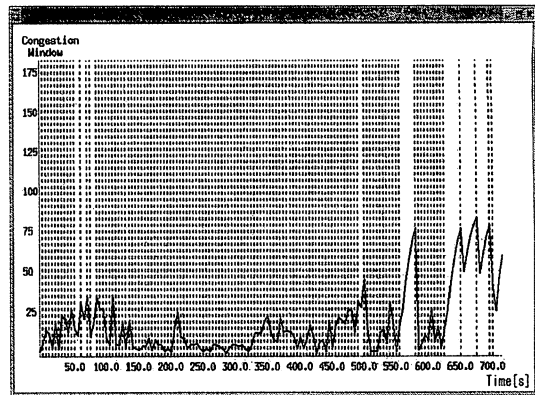


図 20: 非定常状態時の輻輳ウィンドウ個数変化 (広告ウィンドウサイズ 200KByte)1

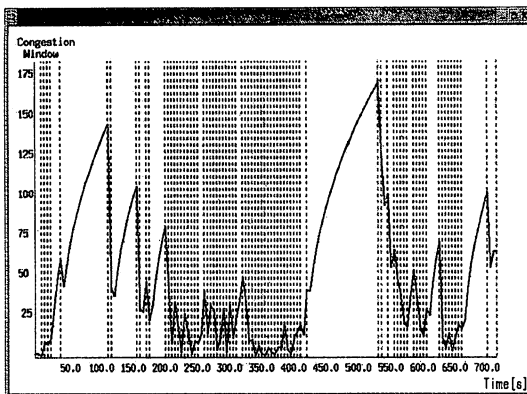


図 19: 非定常状態時の輻輳ウィンドウ個数変化 (広告ウィンドウサイズ 8MByte)

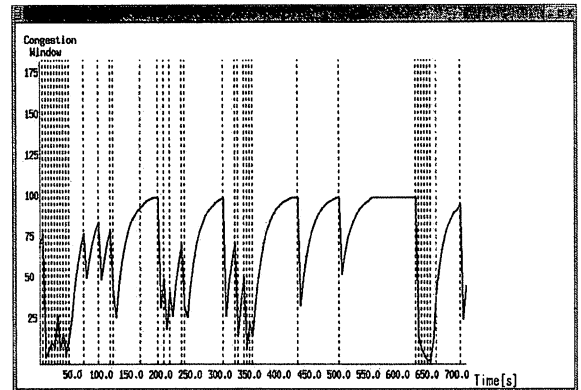


図 21: 非定常状態時の輻輳ウィンドウ個数変化 (広告ウィンドウサイズ 200KByte)2

アクセス環境を構築し、現実の通信で輻輳ウィンドウがどのように振舞うか観察することができた。

今後は、TCP/IP 実装を詳細に解読し TCP パラメータの解析等を更に進め、無線 LAN における通信効率が向上するよう制御を行って行きたい。

## 参考文献

- [1] 豊田 真智子, 山口 実靖, 小口 正人: "高遅延ネットワーク環境における iSCSI リードアクセス時の TCP 輻輳ウィンドウ制御手法の性能評価", 先進的計算基盤システムシンポジウム (SACSIS 2005) 論文集, pp.443-450, つくば, 2005 年 5 月
- [2] K. Kamisaka, S. Yamaguchi, M. Oguchi.: Performance Analysis of iSCSI Middleware Optimized for Encryption Processing in

a Long-Latency Environment, Proc. The IEEE 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2006), Vienna, Austria, pp. 947-952

- [3] Ye Tian, Kai Xu, Nirwan Ansari: "TCP in Wireless Environments: problems and Solutions", IEEE Radio Communications, Vol.2, No.1, pp.s27-s32, March 2005
- [4] netperf: <http://www.netperf.org/>
- [5] tcpdump: <http://www.tcpdump.org/>
- [6] 松井 愛子, 豊田 真智子, 小口 正人: "無線 LAN 通信における TCP パラメータの一解析", 第 68 回情報処理学会全国大会, 1S-9, 2006 年 3 月