

## 無線環境における移動端末の TCP 動作の解析と QoS-TCP の性能評価

安藤 玲未<sup>†</sup> 村瀬 勉<sup>††</sup> 小口 正人<sup>†</sup>

<sup>†</sup>お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

<sup>††</sup>NEC 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: <sup>†</sup>remi@ogl.is.ocha.ac.jp, <sup>††</sup>t-murase@ap.jp.nec.com, <sup>†††</sup>oguchi@computer.org

あらまし 近年、無線 LAN 環境における QoS(Quality of Service) 保証が大変重要となっている。QoS 制御として各プロトコルレイヤにて既に様々な手法が提案されているが、実現が難しい物が多い。そこで比較的实现が可能と考えられるトランスポートレイヤでの制御が検討されており、通常使用する TCP プロトコルを基に構築され、より積極的に帯域確保を試みる TCP(QoS-TCP) が提案されている。この QoS-TCP について、有線環境および固定の無線環境においては既に有効性が検証済みである。しかし、無線環境における移動端末を対象とした従来研究がないため、本研究において屋内および屋外の実機環境とシミュレーション環境にて有効性を検証した。その結果、屋内の実機環境において、通常の TCP に比べ約 20 倍有利に帯域確保できたことを示す。また、シミュレーション結果と実機結果を比較し、合計スループットに約 12 倍もの差が出た理由について詳細に検証した結果、MAC フレームにおけるリトライアウトが原因であることを明らかにした。

キーワード TCP, 無線 LAN, 公平性, QoS, ハンドオーバー

## Analysis of TCP Operation and Evaluation of Performance of QoS-TCP on Mobile Terminal in Wireless LAN

Remi ANDO<sup>†</sup>, Tutomu MURASE<sup>††</sup>, and Masato OGUCHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Ochanomizu University Otsuka 2-1-1, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610 Japan

<sup>††</sup>NEC Corporation

1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kanagawa, 211-8666, Japan

E-mail: <sup>†</sup>remi@ogl.is.ocha.ac.jp, <sup>††</sup>t-murase@ap.jp.nec.com, <sup>†††</sup>oguchi@computer.org

### 1. はじめに

近年、無線 LAN の普及、動画ストリームや VoIP などマルチメディア通信の需要の増加といった背景から、無線 LAN 環境において安定した帯域を確保することが必要となっている。これについて既に各プロトコルレイヤで検討が行われているが、実現が困難である物が多い。例えばアプリケーションレイヤにおける対応では多くの、あるいは新規のアプリケーションに対応が難しい。IP レイヤにおける制御ではネットワーク全体に、また、MAC レイヤの場合は無線 LAN 機器自身の変更が必要となる。そこでネットワーク端での制御が可能であり、比較的容易に実現可能と考えられるトランスポートレイヤにおける制御が検討されており、通常使用する TCP プロトコルを基に構築され、より積極的に帯域確保を試みる TCP(QoS-TCP) が提案されている [1]。この QoS-TCP について、有線環境および固

定の無線環境においては既に有効性が検証済みであるが、無線環境における移動端末を対象とした検証は行われていない。無線 LAN 環境において移動する端末における TCP の性能評価は、既にいくつか報告されているが [2]、帯域確保の検証を目的とした研究はまだ行われていない。移動端末においては、電波状況の変動やハンドオーバーによる通信切断が起こりえるため、固定環境よりも帯域確保が困難であると考えられる。

そこで、本研究では、無線 LAN 環境での移動端末の QoS 性能を、実機環境およびシミュレーション環境で定量的に評価し、効果の検証を行う。

#### 1.1 QoS-TCP

QoS-TCP は、アプリケーションが要求する帯域の確保を目指す TCP である。QoS-TCP は、目標帯域を用いてスロースタート閾値を設定し、目標帯域を確保するように輻輳ウィンドウを誘導する。また、パケットロス検出時にも輻輳ウィンドウ

をできるだけ高く保つことで帯域確保を目指す。しかし、競合する TCP の本数が多くなると fair-share(通信可能帯域を送信端末台数で割った値)も併せて低くなるため、帯域確保が困難になる。

### 1.2 不公平の問題

次に、この QoS-TCP の帯域確保具合に大きく影響を与える不公平 (performance anomaly) の問題について述べる。不公平であるとは、同じ環境で通信しているにも関わらず、端末間でスループットが極端に異なる状態のことをさす(図1参照)。本研究では、不公平な状態の時、極端にスループットが低くなってしまいう端末のことを不幸な端末と呼ぶことにする。

この不公平が起こる原因は、MAC 層の送信権制御、トランスポート層における輻輳ウィンドウ制御などが組み合わせられ、アクセスポイント (AP) のバッファにおける TCP-ACK あふれによるものと考えられる。

不公平が起こるメカニズムは以下の通りである(図2参照)。無線 LAN では、CSMA/CA 方式により端末も AP も等しく送信権を持つ。従って、 $n$  台の端末がアップリンク方向に通信する際、アップリンクフローの送信機会は  $n/(n+1)$  であるのに対し、ダウンリンクフローの送信機会は  $1/(n+1)$  である。従って、 $n/(n+1)$  の送信機会を受け取る TCP データに対して、返却される TCP-ACK は、 $1/(n+1)$  しか送信機会を得られない。一般に、無線より有線の方が高速であるため、アップリンク方向にボトルネックは無く、ダウンリンク方向がボトルネックとなり、AP のダウンリンク側バッファで輻輳が発生する。

このようなことが原因で発生した輻輳により、AP のバッファオーバーフローでアップリンクフローの TCP-ACK が破棄される。TCP はデータパケットが1つでも破棄されると再送が行われ、輻輳ウィンドウサイズが減少してしまうが、TCP-ACK パケットが破棄された場合は、後続の ACK を速やかに受け取ることが出来れば、このようなウィンドウサイズの減少は起こらない。輻輳ウィンドウが大きな状態の端末は、TCP-ACK が多少破棄されても、後続の TCP-ACK により、輻輳ウィンドウは増加する。従って、輻輳ウィンドウが大きい TCP フローは、ますますデータを送出し、AP は、そのデータに対する「TCP-ACK で常にあふれている」状況になる。一方、輻輳ウィンドウが小さな状態の端末は、TCP-ACK が破棄されると、後続の TCP-ACK が届かないため、タイムアウトが起こってしまう。タイムアウト後のスロースタートにおいて再送した TCP データの TCP-ACK が破棄されると、再びタイムアウトになり、バイナリバックオフタイマが起動され、スループットは著しく低下する。これが不幸な端末が生まれるメカニズムである。この不幸な端末の状況は、何らかの偶然で、常にあふれている可能性が高い TCP-ACK が AP バッファに溜まっているときのみ、改善される。

上述のように TCP-ACK があふれる度合いは、端末数に依存するので、端末数が少ないときには不幸な端末は発生せず、端末数が増えると発生する。また、その度合いは、AP のバッファ量にも依存する。

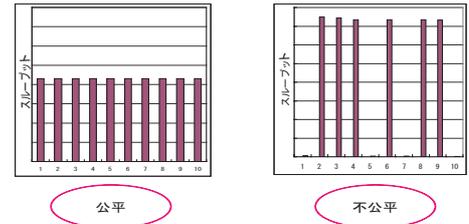


図1 公平および不公平な状態

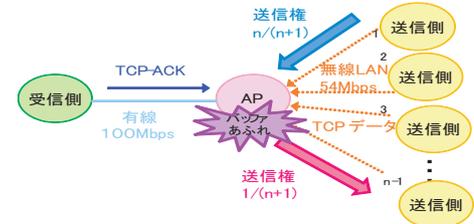


図2 不公平が起こるメカニズム

## 2. 従来研究

TCP の輻輳制御を利用して帯域保証を行う QoS-TCP として、TCP-AV [1], TCP-mg [4] などが提案されている。TCP-AV が指定した帯域の確保を試みる振舞については、次節で説明する。

この TCP-AV について、まず、有線網でのシミュレーションおよび TCP-AV を Linux に組み込んで実機実験をした結果が報告されている [1]。輻輳崩壊を防ぐという TCP の本来の機能を維持しつつ、帯域確保を行うため、競合する通常の TCP(背景 TCP と呼ぶ)の本数が多い場合には指定した帯域の確保が困難になる。

次に、固定端末の無線 LAN 環境において、シミュレーションおよび実機で帯域確保度合いの定量的な評価が行われている [5][6]。802.11g 無線 LAN においては、CSMA/CA の機会均等性に起因して、TCP のレート制御(輻輳制御)自体に影響を受ける。そのため、指定した帯域を確保するには、有線網以上に、背景 TCP の本数の許容度が小さくなるのが分かっている [5]。

無線 LAN 環境において移動端末がマルチメディア通信をするための QoS 制御を行う際には、AP の個性、個々の端末の性能差、移動の際の様々な影響を考慮する必要がある。そのため [7] において、バッファサイズは AP によって異なり、製品によって 30~300 パケットという幅があること、また、シミュレーションにおいて AP の振る舞いは FIFO と考えられているが、実際には単純な FIFO ではないことを明らかにした。また [8] において、個々の端末には同一種類であっても性能差が存在し、その差が QoS-TCP の帯域確保に影響していることを示した。無線 LAN 環境において移動する端末の TCP の性能評価は、既にいくつか報告されているが [2]、帯域確保の検証を目的とした研究はまだ行われていないため、明らかになった特性を考慮し、検証を行う。

### 3. 検討課題

無線環境における帯域保証について、移動網では従来の固定網とは違い様々な検討課題がある。以下に検討課題を2つ挙げる。

(1) 移動通信時に「移動」することが QoS-TCP に及ぼす影響の調査

(2) ハンドオーバーに伴う通信の品質劣化を QoS-TCP が最小限にしていることの確認

ここで、ハンドオーバーとは、端末と通信を行う基地局を移動中に切り替えることであり、今回の実験では2つの AP の IP アドレスは同じとなっている。

(1) について述べる。移動端末は接続先の AP の通信可能範囲のうち、最も電波の弱い所から通信を開始することになる。従ってこの時、接続先 AP と既に通信を行っている端末より電波的に不利な状況から通信をすることになる。また、接続先 AP が既に公平となる端末の最大台数で通信を行っている場合、移動端末が接続を開始すると不公平な状態が起こる。この時、移動端末が通常の TCP なら、この端末が不幸な端末となり帯域を確保できないことは容易に想像できるが、移動端末が QoS-TCP の場合、接続先に既に通信を行っている端末の帯域を奪うことができるのか、その振る舞いを調べる必要がある。

(2) について述べる。ハンドオーバーの際には数秒の通信切断が生じる。この通信切断が TCP 輻輳制御へ与える影響を、通常 TCP 端末を移動させた結果と比較することで調べる。

以上について屋内と屋外の実機環境とシミュレーション環境において実験を行った。

### 4. 評価実験

実験環境を図3に示す。2つの AP(Planex CQW-MR500 を使用)を20m離れた位置にそれぞれ配置し、そのそれぞれに背景トラフィックを用意する。移動端末はこの2つの AP 間を移動する。この時、背景トラフィックも移動端末もアップリンク方向にデータを流す。今回使用した AP は、パフファサイズの測定結果が265.5パケットであり、6台までが公平、7台以上が不公平となることが分かっているため、一方の AP では公平、もう一方では不公平になるように、具体的には、QoS-TCP が加わったときにそれぞれ3台と7台となるように背景 TCP の台数を2台と6台とした。また、無線子機にはイーサネットコンバータ(EC:Planex GW-EC300NAG5P)を用いた。AP の伝送レートは54Mbps(固定)、電波出力は屋内でも十分に減衰するよう10%とした。

#### 4.1 実機実験

##### 4.1.1 予備実験

検証を行うにあたり、実験を行う各所における電波状況と単独のスループットを測定した。キャプチャ画面は各所の電波状況を Wifi Analyzer [11] で測定したものである。グラフは横軸が AP からの距離、縦軸がスループットとなっている単独のスループットを測定した結果である。屋外、屋内での結果をそれぞれ図4、図5に示す。この結果から、実験に使用する AP 以

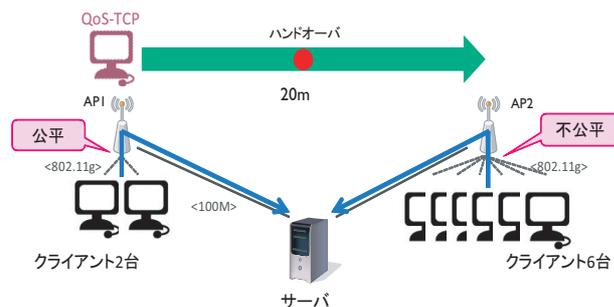


図3 実験環境：移動端末の帯域保証

外も多数の AP が存在しており、屋外ではそれらの電波干渉の影響が非常に大きい。屋外では単独のスループット結果と併せて考えると電波干渉の影響は最小であると言える。

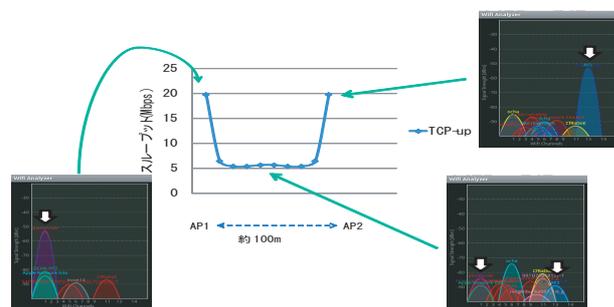


図4 各所のスループットと電波状況(屋外)

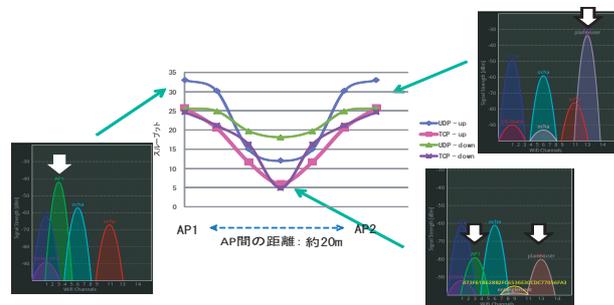


図5 各所のスループットと電波状況(屋内)

##### 4.1.2 屋外実験

屋外において上記のように単独のスループットを測定した所(図4参照)、電波干渉により AP から約5m離れた所ですぐにスループットが落ちた。そのため、図6に示す通り、QoS-TCP を用いても AP1 から5m離れるとスループットが急激に落ち、接続先の AP2 に近づくともスループットを上げるという結果になり、TCP との差もほとんどない。このような電波干渉の大きい環境では、スループットは AP と移動端末との距離に著しく依存するため、帯域確保すること自体が難しい。

##### 4.1.3 屋内実験

屋内において、TCP 端末を移動させたグラフと QoS-TCP 端末を移動させた時のグラフを図7に示す。通常の TCP では既存通信に割り込まず、ハンドオーバー後に不幸な端末になってしまっている。しかし QoS-TCP では、ハンドオーバー前後は

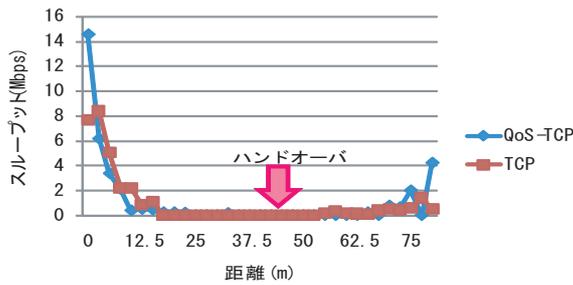


図 6 屋外実験結果

電波が弱くなるためスループットは下がるが、それ以外では fair-share 程度帯域を確保できている。通常の TCP と比較すると、約 20 倍有利に帯域確保できていることになる。

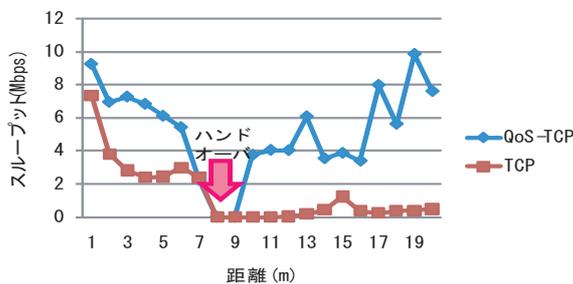


図 7 屋内実験結果

#### 4.2 シミュレーション評価

シミュレーション環境で、QoS-TCP が移動する際の帯域確保特性について ns-2 [12] を用いて評価した結果を図 8 に示す。

シミュレーション環境では、QoS-TCP を用いたとしてもハンドオーバー後、既存通信に割り込めずに QoS-TCP 自身が不幸な端末となり、帯域確保できないことが示された。

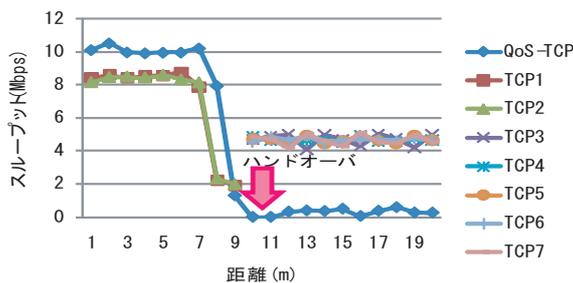


図 8 シミュレーション結果

### 5. シミュレーションと実機の比較

QoS-TCP のシミュレーション結果と屋内における実機実験結果の結果を図 9 にまとめる。シミュレーション評価では、実機と同様のパラメータで評価を行ったにも関わらず、実機実験結果と比較し、合計スループットに約 12 倍の差が出た。これは、シミュレーションでは実機特有の性能差、特に不幸な端末

現象について考慮できていないためと考えられる。この不幸な端末現象は、実機環境でのみ起こる現象で、通信開始時から機器固有の特性により多少のスループットの差が生じることが原因となっている。このうちスループットがやや低めの端末は、QoS-TCP のような強い TCP が割り込んでくると更にスループットを下げ、不幸な端末状態に陥り、代わりにこの端末が使用していた帯域を QoS-TCP が取る。割り込んでくる端末が通常 TCP のように背景トラフィックと条件が変わらない場合はこのようなことは起こらず、後から入ってきた端末が不幸な端末となる。このように、実機環境では起こるがシミュレーション環境では起こらない不幸な端末現象の原因について、次章で詳細に検証を行う。



図 9 比較結果

### 6. 不幸な端末現象の解析

シミュレーションにおいて QoS-TCP が割り込めないのに対し、実機では不幸な端末の存在により QoS-TCP が帯域を確保できる。そこで不幸な端末現象が起こる原因について検証を行った。実験環境を図 11 に示す。通常 TCP のみの公平な状態で通信を行い、途中で QoS-TCP(強い TCP) を割り込ませると不公平な状態となり、既に通信を行っている通常 TCP のうち、どれか 1 台が不幸な端末となる。この不幸な端末について、不幸な端末から出たパケットを Wireshark [13] で、無線区間のパケットを AirPcap [14] で、不幸な端末の輻輳ウィンドウをカーネルモニタを用いて調べることで不幸な端末現象の解析を行う。カーネルモニタはカーネル内部の TCP ソースにモニタ関数を挿入し、カーネルを再コンパイルすることで、輻輳ウィンドウやソケットバッファのキュー長等、通常ユーザ空間からは見ることができない TCP パラメータを可視化できる独自のツールである [10]。

このデータ解析の結果、シミュレーションでは極めて低い確率でしか起こらない無線 LAN における TCP データパケットロスが、実機では頻発していることが原因であることが判明した。具体的な解析結果について以下に示す。

アップリンクの TCP 多重においては、シミュレーションでは、ほとんど起こらない TCP データロスが無線 LAN 上で発生していた。無線 LAN では、通常 MAC フレームにエラーが発生しても再送が行われるため(図 10 参照)、無線上でのエラーは遅延にはなるがロスにはなりにくい。ただし、再送回数の上限値を超えたフレームは破棄される。これにより TCP データ

パケットのロスが発生しうる。一般に典型的なシミュレーションパラメータ設定では、この再送回数の上限値は、IEEE802.11標準に従ってデフォルトの7に設定されており、再送が7回に達した場合、そのフレームは破棄される。従って、TCPデータの破棄が起こる。無線上でのエラー原因は、ノイズ等によるビットエラーとパケットがぶつかるコリジョンの2つがあるが、典型的なシミュレーションでは、ビットエラーフリーの設定がなされている。つまりコリジョンのみで、エラーが起こるものがほとんどである。従って数台の端末では、偶発的に発生するコリジョンによるフレームエラーは散発的であり、遅延への影響は多少あるが、TCPのスループット性能に全く影響を与えない。

それに対し今回の実機実験では、TCPデータロスを多く観測した。使用した機器の再送回数の上限値(通常は、ユーザが外部からは設定不可能)が5というデフォルトよりも小さい値だったことに加えて、パースト的なMACフレームエラーを観測した。このパーストエラーにより、各TCPフローは一時的にウィンドウが小さい状況になっていることも確認した。この時、全TCPフローは、不公平だが安定していた状況から、不安定な状況に移転していることになる。なお、パーストエラーによるウィンドウ低下は一時的なものであるため、長期のスループット値への影響は全く見られない。

この状況では、QoS-TCPは前述のようにスロースタート閾値が通常のTCPより高く設定されているため、ウィンドウが小さくなった通常TCPより早く輻輳ウィンドウを上げることができ、スループットを確保できる。従って、たとえ後から参加しても、通常TCPに打ち勝ち、スループットを確保し、安定な状況では幸せな端末となる。逆に、輻輳ウィンドウが一瞬小さくなってしまったTCPは、割り込んだQoS-TCPのデータトラフィック増加によるACKが増加するため、自身のACK廃棄率が高くなり、それによりタイムアウトの確率が高くなるという不幸な端末状態に陥る。一方、通常のTCPを後から参加させた場合では、スロースタート閾値などの観点から優位性がない。既に通信をしていてウィンドウが2以上のフローに対して、ウィンドウが初期値の1であるため、ウィンドウ拡大競争に負ける可能性が極めて高く、不幸な端末に陥る。

一般には、ビットエラーは電波環境によっても大きく異なるためにモデル化するのが困難である。しかしながら、今回の実験で明らかになったように、再送上限値まで達するほどのパースト的なビットエラーも実際の環境では発生している。これは、TCPのスループット値を増減させるほどの影響力ではなかったが、不公平が発生するようなマイクロな振る舞いで起因する結果には大きく影響する。ビットエラーの影響を考慮しないシミュレーションモデルで得た結果に対しては、別途実機実験などにより現実的な環境での検証を行うべきである。

## 7. おわりに

既に有線環境および固定の無線環境で有効性が検証されている、トランスポート層で帯域確保を行うQoS-TCPについて、無線環境における移動通信での効果を屋外および屋内におけ

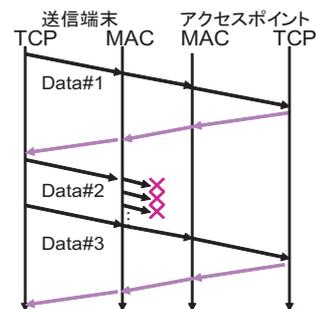


図 10 MAC 層におけるデータロス

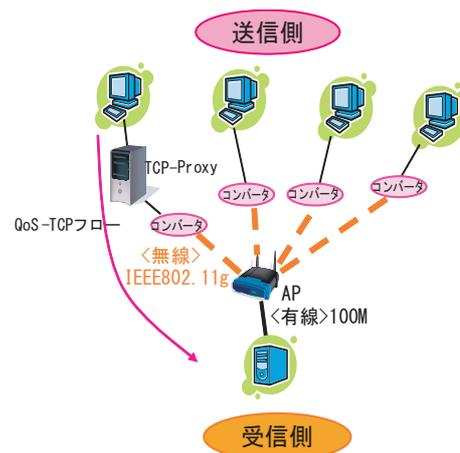


図 11 実験環境：不幸な端末解析

る実機環境とシミュレーション環境にて検証した。その結果、電波状況の変動、通信端末の台数の変動といった「移動」がQoS-TCPに与える影響がシミュレーションでは大きく、移動端末であるQoS-TCP自身が不幸な端末になってしまうことを示した。しかし実機においては帯域確保できる場合があること、また、実機において帯域確保できる場合、シミュレーションとは12倍の性能差があることを確認した。通常のTCP端末を移動させた時と比べてQoS-TCPは約20倍有利に帯域確保できたことから、ハンドオーバーに伴う通信の品質劣化をQoS-TCPが最小限にしているといえる。

また、移動通信におけるQoS-TCPの帯域確保度合いについてシミュレーションと実機環境での評価の食い違いについて解析した。その結果、シミュレーションの典型的なパラメータ設定ではきわめて低い確率でしか起こらない無線LANにおけるTCPデータのペケットロスが、実機では頻発していることが原因で結果に差が出てしまうことを明らかにした。無線LANにおいては、シミュレーションでは、ある程度の特徴の把握は可能であっても、やはり現実を考慮した実機評価も別途行うことが重要である。

謝辞

本研究の一部は独立行政法人情報通信研究機構の委託研究/新世代ネットワーク技術戦略に向けた萌芽的研究の一環としてなされた。

## 文 献

- [1] H. Shimonishi, et al., "Congestion Control Enhancements for Streaming Media," IEICE Transaction on Communica-

- tions, Vol.E89B, No.9, pp.2280-2291, Sep.2006 .
- [2] K. Tsukamoto, T. Yamaguchi, S. Kashihara, Y. Oie, "Experimental Evaluation of Decision Criteria for WLAN handover: Signal Strength and Frame Retransmission," IEICE Transactions on Communications, Vol. E90-B, No. 12, pp. 3579-3590, Dec. 2007.
  - [3] K. Yamanegi, G. Hasegawa, and M. Murata, " Congestion Control Mechanism of TCP for Achieving Predictable Throughput, " Proc. of ATNAC 2006, pp.117-121, 2006.
  - [4] D. J. Leith and P. Clifford, " Using the 802.11e EDCF to Achieve TCP Upload Fairness over WLAN Links ", WiOpt, April 2005.
  - [5] 赤瀬謙太郎, 村瀬勉, 平野由美, 石田賢治, 小畑博靖: 無線 LAN 環境における帯域確保を目指した TCP 輻輳制御方式, 信学技法, Vol.108, No.342, pp.1-6 2008 年 12 月 .
  - [6] 新井絵美, 平野由美, 村瀬勉, 小口正人: 無線 LAN 環境における実機特有の帯域公平性についての検討と QoS 保証 TCP の性能評価, 2009 DEIM Forum, D3-5, 2009 年 3 月 .
  - [7] 安藤玲未, 村瀬勉, 小口正人: 無線 LAN の様々な条件における帯域公平性の検証と QoS 保証 TCP の性能評価, DICOMO2010, 8E-3, 2010 年 7 月
  - [8] 安藤玲未, 村瀬勉, 小口正人: IEEE802.11g 無線 LAN における帯域公平性の問題の検討, SWoPP2010, OS-4, 2010 年 8 月
  - [9] 安藤玲未, 村瀬勉, 小口正人: 移動端末における QoS 保証 TCP の特性評価, 電子情報通信学会 CQ 研究会, CQ2010-51 pp.17-22, 2010 年 11 月 .
  - [10] 山口実靖, 小口正人, 喜連川優: iSCSI 解析システムの構築と高遅延環境におけるシーケンシャルアクセスの性能向上に関する考察, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-D-I, No.2, pp.216-231, 2004 年 2 月 .
  - [11] Wifi Analyzer:<http://jp.androlib.com/android.application.com-farproc-wifi-analyzer-jFCm.aspx>
  - [12] ns2:<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
  - [13] Wireshark:<http://www.wireshark.org/>
  - [14] AirPcap:<http://www.cacetech.com/products/airpcap.html>