

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

新井 絵美[†] 平野 由美^{††} 村瀬 勉^{††} 小口 正人[†]

[†] お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

^{††} NEC システムプラットフォーム研究所 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: [†]emi@ogl.is.ocha.ac.jp, oguchi@computer.org, ^{††}y-hirano@hy.jp.nec.com, t-murase@ap.jp.nec.com

あらまし 近年, マルチメディア通信の需要の高まりにより, QoS (Quality of Service) の保証が重要となっている. ここで定義する QoS とは指定された帯域を確保することである. これを実現する TCP-AV という帯域確保 TCP がこれまでに提案および実装され, 有線環境における評価がすでに行われてきた. しかし, 無線環境においては有線環境における場合とは異なる問題が存在する. たとえば複数台の端末で通信を行ったときの送信権の制御メカニズムなどが原因となって, 端末ごとのスループットに不公平が生じる場合があるといわれており, その結果有効な帯域制御が行えない可能性がある. そこで本研究では, これらの問題について実機を用いた実験および考察を行い, 無線環境において TCP-AV を用いてマルチメディア通信を実行する際の性能を評価し, 問題点を改善することによって, より良い QoS 制御を行うことを目指す.

キーワード TCP, 無線 LAN, 公平性, QoS

A study about fairness of bandwidth on real machines in the wireless LAN environment and Performance evaluation of QoS-guarantee TCP

Emi ARAI[†], Yumi HIRANO^{††}, Tutomu MURASE^{††}, and Masato OGUCHI[†]

[†] Ochanomizu University Otsuka 2-1-1, Bunkyo-Ku, Tokyo, 112-8610, Japan

^{††} System Platforms Research Laboratories NEC Corporation 1753 Shimonumabe, Nakahara-Ku, Kawasaki, Kanagawa, 211-8666, Japan

E-mail: [†]emi@ogl.is.ocha.ac.jp, oguchi@computer.org, ^{††}y-hirano@hy.jp.nec.com, t-murase@ap.jp.nec.com

Abstract In late years, the demand for multimedia communication has been raised extensively. To guarantee the QoS is extremely important. QoS defined here is to guarantee target bandwidth. In order to realize it, TCP-AV has been proposed and implemented, and it is achieved in a wired environment. However, wireless environment has problems different from the wired environment. When multiple terminals are communicating, unfairness of the throughput among terminals is said to be observed caused by coordinate mechanism of the data transmission right among terminals. As a result, the bandwidth might not be controlled effectively. Therefore we investigated and considered these problems in this paper. We have used TCP-AV on wireless environment and evaluated performance of multimedia communication, for aiming at better QoS controls by resolving problems.

Key words TCP, wireless LAN, fairness, QoS

1. はじめに

近年, 動画ストリームや音声 (VoIP) などのマルチメディア通信の需要が高まっている. そのような通信において QoS (Quality of Service) は大変重要である. しかし一口に QoS と言ってもそこで要求される品質はメディアやアプリケーションにより異なる. そのため, マルチメディア通信のための「QoS」を定義し, こ

れが保証される仕組みを作る必要がある. また, インターネット (TCP/IP に基づくネットワーク) の本質は「ベストエフォート」であるが, QoS が必要とされる場面が増えてきた. このような場面において, UDP を使うことも考えられるが, UDP はファイアウォールを通過できない可能性がある. そこで, TCP に QoS 保証の仕組みを組込む方法が検討されてきている. この 1 つの例が TCP-AV [1] である. これは, ルータや端末のプロトコルに QoS

制御を実装するのではなく、それらで用いられている TCP をこれに載せかえて通信を行うというものである。TCP-AV では、輻輳状態に従い輻輳ウィンドウ制御パラメータを変更する。これにより目標帯域を確保させるようなことが可能となり、ストリーミング通信などを効果的に行う QoS を実現できる。TCP-AV により有線環境における帯域確保などの QoS 保証が達成されるようになった。

一方で、無線 LAN が広く普及したことから、無線環境において有線環境と同様に通信の品質が保証されることが望まれている。その例は、前述の VoIP などである。ユーザは常に同じ品質でアプリケーションが利用可能であることを要求するが、システムにとっては無線環境において、有線環境の場合と同様に品質保証を行うことは、より困難が大きい。そこで本研究では TCP-AV のような帯域確保型 TCP が無線環境においても想定している通りに振舞うかどうかを検証する。特に実機を用いて評価を行うことにより、シミュレーションではモデル化が困難な端末ごとの機器の差異やバッファの大きさなどによる影響を明らかにし、実環境で有効な QoS 手法について検討する。

無線環境における QoS 保証を実現するために、本論文では無線環境における QoS についての 2 つの重要な問題に焦点を当てる。1 つは無線 LAN の公平性の問題であり、その中で実機における実装の差異に起因する問題を検討する。また、TCP-AV の無線 LAN 環境における振舞いが未確認であるため、これを明らかにしたい。

無線 LAN の公平性の問題は端末の台数が増えたときに顕著になり [2]、すでにシミュレーションにおいて、複数の TCP フロー間におけるスループットの不公平の発生が示されている。これは、ネットワークの非対称性と送信権の平等性により起こるといわれている。上記特性の下では、無線 LAN AP (Access Point) のバッファにおける TCP-ACK の破棄が不公平につながると考えられる [3]。しかし、無線上のノイズや電波干渉、デバイスドライバの構築法や OS の構成など、シミュレーションでは考慮されない点を実機には存在するため、このような不公平が実機においてどの程度起こるのかは明らかではない。例えば実機の AP のバッファサイズはメモリや装置の低価格化などの要因で変動していると考えられ、現状の実システムでバッファが問題になりうるかどうかを把握することは非常に重要である。また、本論文では無線 LAN インタフェースの構成方法に起因する実機特有の不公平に関しても考察する。これらの実験により実機の無線環境における課題を議論した上で、有線環境においては品質保証を実現することができる TCP-AV が実機の無線環境で期待通りの働きができるかについて検証を行った。

2. 無線環境における公平性

2.1 不公平の定義

無線 LAN 環境における TCP フローのスループットの公平性の問題とは、同じ条件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ことである。これはつまり複数の無線端末から同時に有線端末にデータを送信するときに、ある端末はほとんどスループットが上がらず (0Mbps に近い)、ある端

末は全帯域をすべての端末で均等に分けた値よりも高いスループットが出るという状態である。このときの一般的なスループットの特徴を表すグラフの例を図 1 に示す。横軸に端末番号、縦軸にスループットをとった。左のグラフがここで定義する公平な場合のグラフであり、右のグラフが不公平な場合を示している。

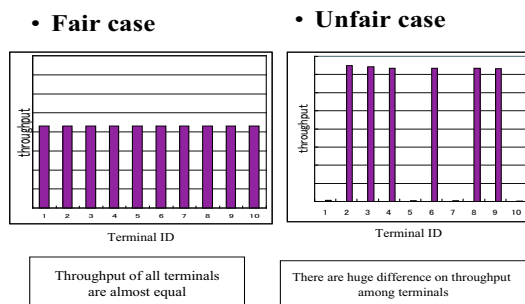


図 1 公平および不公平なスループット

2.2 不公平の原因

シミュレーションで示されている不公平の原因についての議論を紹介する。シミュレーション環境において、この原因の 1 つは AP のバッファにおける ACK のあふれであると述べられている [3]。これは端末の台数が増えたときに特に問題となる。例えば、10 台の無線端末から AP を経由して 1 台の有線端末にデータを送信する場合を考える (図 2 参照)。このとき、データの送信速度は高々 11Mbps (11b モードの場合) であるのに対し、ACK は 100Mbps の速さで AP のバッファにたまる。AP は無線の端末に ACK を返したいが、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 制御において AP も無線端末のひとつとして送信権を得なければならない。(図 3 参照) しかし、10 台分の ACK を 1/11 の確率でしか送信できないため、有線リンクの速さとの相乗効果によって AP のバッファにどんどん ACK がたまっていく。その結果バッファに入りきらない ACK は破棄される。この ACK の破棄がウィンドウサイズの違う端末に影響を与え、スループットの不公平を招く。

この、ウィンドウ制御によるトランスポート層が招く不公平について以下で説明する。まずはじめに、ウィンドウサイズについて説明する。TCP において 1 セグメントごとに確認応答を行った場合、RTT (Round Trip Time) が大きくなったときにスループットが低下してしまう。そこで、確認応答を待たずに複数のセグメントを送信できるようにすることで性能を低下させないようにしている。このとき確認応答を待たずに送信できるデータの大きさをウィンドウサイズという。ウィンドウ制御をするときに確認応答 (ACK) が失われてしまった場合、データは届いているので再送する必要はない。そのため、ウィンドウサイズがある程度以上の大きさがある場合には少しぐらい確認応答が失われても再送処理は行わず、次の ACK パケットでデータの到着が確認される。例えば、ウィンドウサイズが 10 で通信している端末は 10 のうち 1 以上の ACK が返ってくれば、ウィンドウサイズを少し大きくして、さらに、そのまま通信を続けることができる。しかし、ウィンドウサイズが 1 で通信している端末は、その 1 つの ACK が返ってこなければデータは再送となり、

ウィンドウサイズを増加させることができず、なかなかウィンドウサイズが大きくなる値にならない。単純に述べると、前者は、後者に比べて 10 倍有利に通信をすることができる。このように同じ ACK のロスでもウィンドウサイズによって影響が異なる。すなわちウィンドウサイズが大きい端末は、ACK ロスの影響をほとんど受けることなしに、ウィンドウを増加させ、スループットを高くすることができるが、ウィンドウサイズが小さい端末はいつまでもデータの送信ができず、スループットをあげるができない（図 4 参照）。

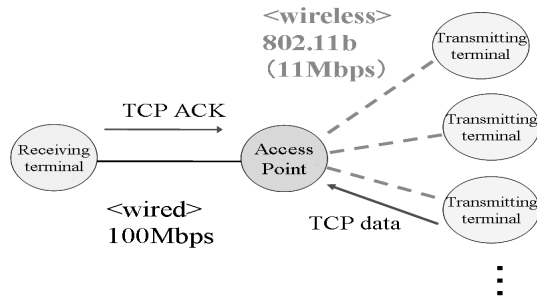


図2 既存研究における TCP フローの不公平

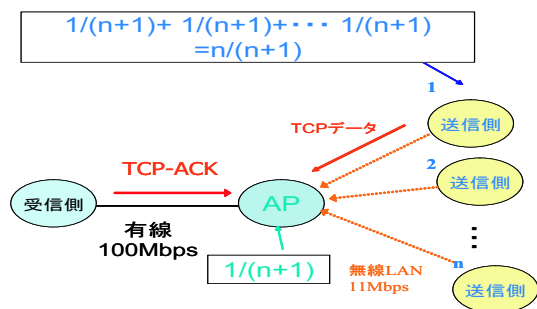


図3 MAC 層の制御による不公平

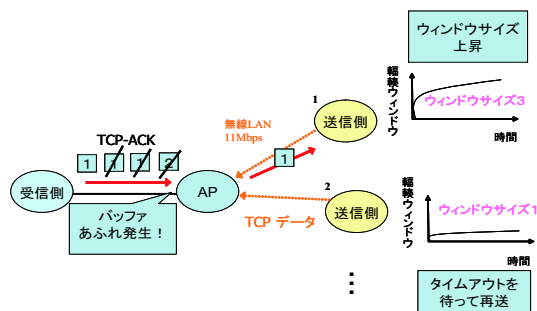


図4 トランスポート層の制御による不公平

ここで、既存研究について紹介する。図??のように、複数の無線端末から有線の端末にデータを送信する環境において実験を行う。図 5 にシミュレーション環境における結果のスループットを示した。このとき、不公平が起こっていることがわかる。また、実機環境において、CardBus タイプの無線 LAN を用いて同様の実験環境において実験を行った結果は図 6 のようになり、実機の環境においても不公平が示されている [4]。

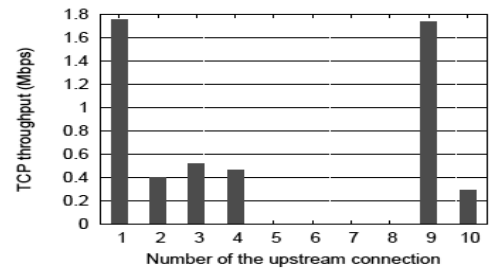


図5 シミュレーション環境におけるスループット

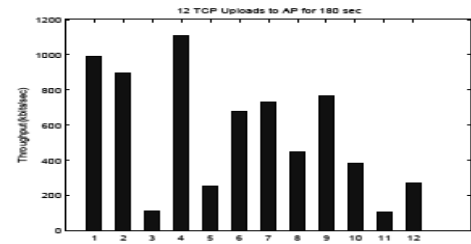


図6 実機環境におけるスループット

2.3 AP のバッファにおける TCP-ACK のあふれの測定

ここで、本実験環境における無線 LAN AP のバッファサイズを求めた。本実験環境で使用する機器と同様に、無線 LAN AP として、BUFFALO WZR-AMPG300NH [5] を、無線 LAN クライアントとして、BUFFALO WLI3-TX1-G54 [6] を IEEE802.11g [7] で使用した。1 台の有線端末から番号を付加した UDP (User Datagram Protocol) パケットを AP を経由して、無線端末に送り出す [8]。これを受信した無線端末において、受信回数と送信端末で付加された番号を比較する。受信回数と番号が一致していれば、パケットがロスすることなく通信が行われているといえる。しかし、番号が飛んでいる場合、その間のパケットはロスしていると考えられる。このようなネットワーク構成の場合、パケットロスの原因は有線側の AP のバッファあふれであるといえる。AP のバッファサイズの測定を 10 回行った。その結果を基に AP のバッファサイズを推察したところ、約 300 パケットとなり、シミュレーションで用いられる値とほぼ同じ程度の結果となった。このことから本実験環境においてもシミュレーション同様 AP のバッファにおける TCP-ACK のあふれによる不公平が起こりうると推測される。

3. 無線環境における TCP フローの公平性の評価

TCP-AV の無線 LAN 環境における振舞いを確実なものにするために、TCP の公平性について調べる。シミュレーション環境および CardBus タイプの無線子機においては TCP フロー間でスループットの不公平が起こることが示されている [2][4]。そこで、本実験環境においても不公平が起こるかどうか検証した。

3.1 無線 LAN 環境における TCP フローの公平性

3.1.1 実験概要

本実験環境においては、無線 LAN クライアントとしてイーサ

ネットコンバータタイプを用いる。これを用いることにより、端末に特別なドライバなどをインストールすることなく無線 LAN 環境を構築できる。従って、TCP-AV を無線 LAN 環境において使用する際、端末の実装を変更する必要がないため便利である。しかし、イーサネットコンバータタイプ無線 LAN を用いた環境において、不公平が起こるかどうか明らかではない。

スループットの測定に Iperf [9] を用いて、120 秒間測定を行った。これを 10 回行い、平均を取った。パラメータは片道遅延 2.5 ミリ秒とした。このとき送信端末の台数を 2～7 台とした。実験環境を図 7 に示す。ただし、この図は送信端末が 5 台の場合を示している。端末の OS の組み合わせを様々に変えて実験を行った。

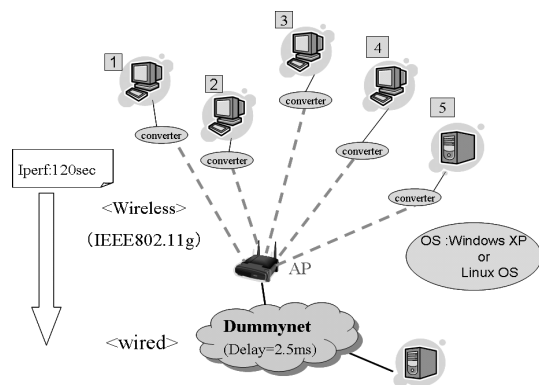


図 7 公平性の検証のための実験環境

3.1.2 実験結果

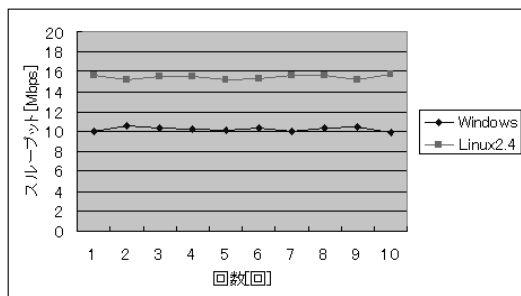


図 8 10 回の測定の結果 (2 台)

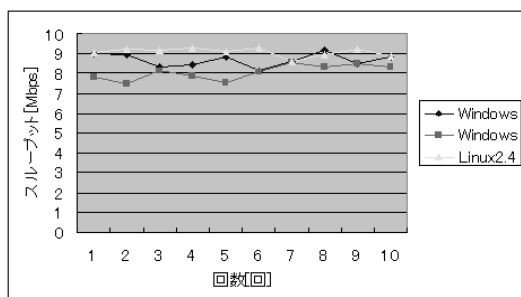


図 9 10 回の測定の結果 (3 台)

図 8～図 13 に結果のグラフの 1 つをそれぞれ示した。縦軸はスループットを示している。横軸に 1～10 回の結果を折れ線グラフを用いて示した。それぞれの回には、端末ごとのその回のス

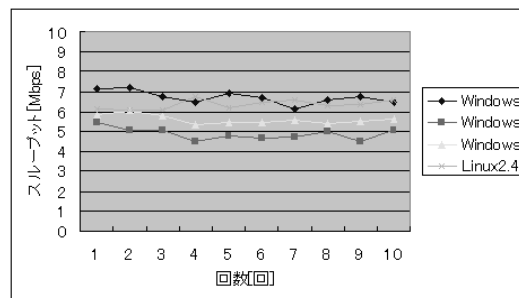


図 10 10 回の測定の結果 (4 台)

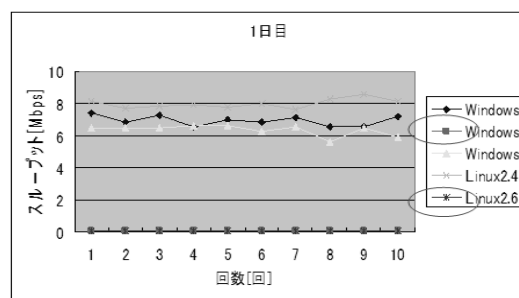


図 11 10 回の測定の結果 (5 台)

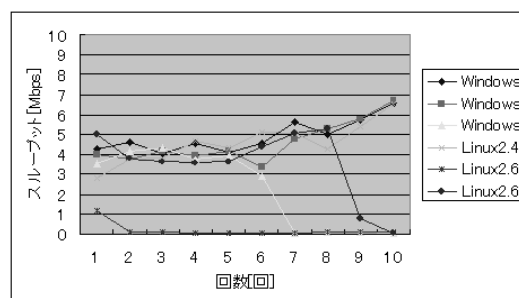


図 12 10 回の測定の結果 (6 台)

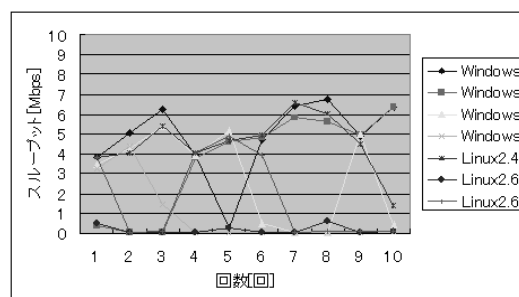


図 13 10 回の測定の結果 (7 台)

ループットを点で示している。

これを見ると、2 台～4 台の場合はほぼ公平であり、5 台～7 台の場合は不公平が観測された。他の組み合わせにおける実験もほぼ同様の傾向であった。不公平になった際の様子を具体的に述べると、5 台の時、2 台目の Windows の端末と 5 台目の Linux2.6 の端末のスループットが低い不公平が見られた。6 台の時、5 台目の Linux2.6 の端末が 10 回を通してスループットが低く、3 台目の Windows の端末及び 6 台目の Linux2.6 の端末は実験の途中からスループットが低くなった。7 台の時、上記のような

傾向はなく、どの端末も一度はスループットが低くなり、その後その端末が続けて不公平になるような傾向が見られたのみであった。

無線 LAN 環境において、通常は MAC 層の制御などにより、公平になると考えられる。しかし、AP のバッファあふれと MAC 層における送信権制御、および、トランスポート層における輻輳ウィンドウ制御が組合わさった原因から不公平が観測されたと考えられる。

3.2 不公平の傾向

シミュレーション環境における結果では、毎回異なる端末が不公平になるといわれているが、本実験では一度の測定中はほぼ同じ端末が連続して不公平になった。ただし、本実験では実験の前に端末及び無線 LAN クライアントなどの機器に故障がないことを確かめている。また、無線 LAN クライアントの配置はほぼ等間隔としているため、電波の強度はほぼ一定と考えられる。さらに、端末のスペックによるスループットの差は、図 8 のように多少あると考えられるが、本実験で定義する不公平のように極端なものではない。これらのことからスループットが極端に低い端末は性能的に劣っているわけではないといえる。従って、イーサネットコンバータタイプ独特の制御の問題など、実機特有の不公平が本実験環境では起こっている可能性が考えられる。

そこで、このような実験を繰り返し行った場合、不公平にある一定の傾向が見られるのか、または、シミュレーション環境同様、異なる端末が不公平になるようなランダムな不公平が見られるのか検証を行う。実験環境は図 7 と同様である。端末の台数ははじめに不公平が見られた 5 台とした。この実験をさらに 10 回ずつ日を変えて行った。結果は、図 14 に 2 日目の 10 回分を、図 15 に 3 日目の 10 回分を示した。また、一日目の結果は先ほどの結果（図 11）とする。

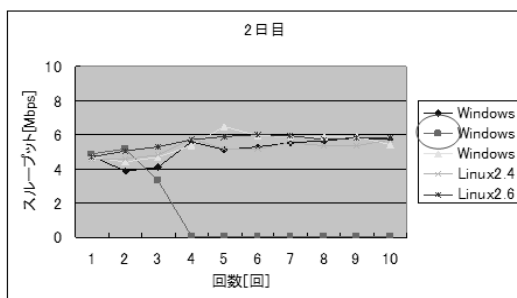


図 14 10 回の測定の結果 2(5 台)

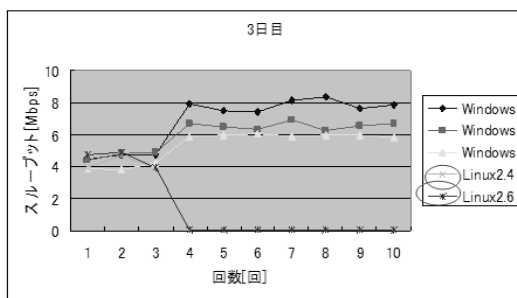


図 15 10 回の測定の結果 3 (5 台)

これらと図 11 を見てみると、図 11 では、2 台目の Windows の端末と 5 台目の Linux2.6 の端末が、図 14 では、2 台目の Windows の端末が、図 15 では、4 台目の Linux2.4 の端末と 5 台目の Linux2.6 の端末が、不公平になっていることがわかる。さらに様々な組み合わせで実験を行った結果、一度不公平になった端末が連続して不公平になることがわかったが、それ以外には多少偏りがあっても特に傾向がないようである。このことから、OS や無線 LAN クライアントの位置、組み合わせなどによる差が多少みられても実験を重ねていくと不公平になる端末が変わっており、これはシミュレーションの傾向に近づいていると考えられる。つまり、実機を用いた環境においてもシミュレーション同様理論的に不公平になっていると考えられる。また、イーサネットコンバータタイプの無線 LAN を使うと、端末がどのような OS を使用するかによる影響が小さいということもわかった。

3.3 不公平の原因の検証

実機における不公平がシミュレーションに近いという傾向がみられたため、ACK ロスがイーサネットコンバータタイプ無線 LAN を用いる環境において不公平を招くことを示す実験を行った。

まずは、図 7 と同様の環境において UDP を使用する実験を行う。UDP は ACK を使用しないため、このような環境において公平であった場合、不公平に ACK が関係していると考えられる。端末の台数を 2~5 台と変えてスループットの測定を行なった。結果はほぼ公平となった。このことから不公平の原因に ACK が関係していると思われる。

さらに、AP のバッファあふれによる ACK のロスが本実験環境における不公平の原因の 1 つであることを示すために、本実験環境の逆向き、すなわち、通常のデータ配信などに用いる AP 側から無線 LAN 端末方向へのデータ送信環境において評価を行った。この環境の場合、ACK の向きが遅いリンクから速いリンクとなるため、無線から有線の向きにおける AP のバッファあふれが起こりにくい。スループットの測定を行った結果、ほぼ公平となった。これは、MAC 層の CSMA/CA の送信権の平等性から公平となったと考えられる。AP における ACK のあふれが考えられない環境においては公平となるため、ACK のロスが不公平の原因の 1 つであると考えられる。

4. TCP-AV の評価

4.1 実験概要

TCP-AV はストリーミング通信の品質向上を目指して提案された。目標帯域を確保するための制御を行っている。既存の TCP の輻輳制御方式を拡張し、パケットのバーストロス耐性を向上する再送制御方式を採用している。具体的には、再生クライアントの受信バッファを枯渇させない輻輳ウィンドウ制御、一時的な輻輳発生時の通信速度減少を抑える再送制御などである。

ここで、本実験で用いる言葉を定義する。EB (Effective Bandwidth), fair-share を定義する。EB は最大の帯域幅のことである。本研究では IEEE802.11g 無線 LAN を使用するため最大帯域幅は 54Mbps となる。しかし、これは理論値であるため実際の帯域幅を測定する必要がある。この実際の最大帯域幅を EB とする。

実際に実験環境においてフロー 1 本あたりのスループットを測定すると最大で約 25Mbps となったため、この値を本研究の EB とする。fair-share とは EB を送信端末の台数で割った値であり、実効的に使える最大帯域を全送信端末で均等に分けたときの 1 台あたりの帯域幅であるとする。

さらに、評価基準として、NRT (Normalized Required Throughput), AVR (Achievement Ratio) を定義する。NRT は指定した帯域が EB の何割にあたるかとする。つまり理論値ではなく実際の帯域の正味何割を指定したかを表す。AVR は、指定した帯域を確保できた時間帯が全実行時間のうちのどのくらいあるかという比率を示す。今回の実験では 120 秒の測定を 5 秒ごとに分割した。ただし、投入順序による差が見られる最初の 5 秒間は除き、全部で 23 区間とする。23 区間のうち何区間目標帯域を達成できていたかをカウントして、10 回測定した平均を取った。

無線 LAN 環境における TCP-AV の性能を評価するための実験環境を図 16 に示す。ここで、端末番号 1 のフローは TCP-AV のフローとするが、送信端末の TCP の実装は変更しない。その代わりに TCP 中継器 (TCP-Proxy) を端末とイーサネットコンバータの間に設置し、TCP を TCP-AV に載せかえる。その他のフローは既存の TCP-Reno を用いて通信を行う。その他の条件は図 7 と同様である。TCP-AV の積極的な帯域確保制御により、fair-share (NRT の 20% : 5Mbps) 以上の帯域を確保できることが期待される。

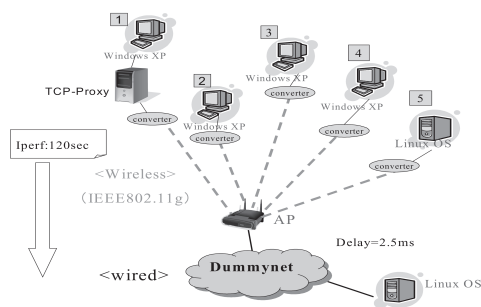


図 16 無線 LAN 環境における TCP-AV の評価

4.2 実験結果に関する考察

結果を図 17 に示す。設定帯域を fair-share 程度とした場合までは AVR は 100% である。これはつまり全実行時間、設定した帯域で通信可能であったということである。fair-share を超えて設定帯域を fair-share の 125% とすると、AVR は 70% となる。このとき、目標帯域以上で通信できていた時間は全実行時間のうち 7 割ということになる。さらに設定帯域を fair-share の 200% 以上とすると AVR は 1 割以下となった。

これらにより、不安定な無線 LAN 環境においても TCP-AV を用いれば不公平な端末に陥らずに、要求帯域の品質保証が可能であることがわかった。また、端末台数がこれより少ない場合および 6 台の場合も同様の傾向であった。

5. まとめと今後の課題

5.1 ま と め

本研究では、無線環境における QoS 実現のために実機を用い

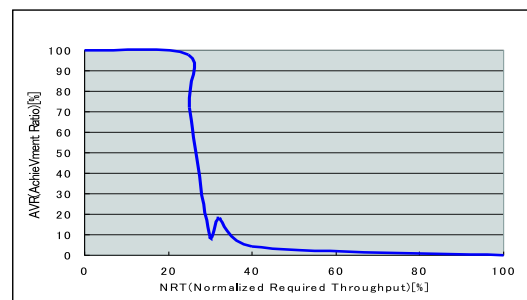


図 17 AVR による TCP-AV の評価

て実験を行った。

1 点目は、無線 LAN 環境におけるスループットの公平性の検証である。はじめに、AP のバッファサイズの検証を行い、本実験環境においても不公平が起こりうることを示した。その上で、イーサネットコンバータタイプ無線 LAN(802.11g)を用いた際の不公平を示した。その際にシミュレーションとは異なり、同じ端末が連続して不公平になるという傾向が見られた。しかし、端末の組み合わせを変えて実験を行い、不公平になりやすい端末があるか検証した結果、特に偏った傾向がみられなかったため、シミュレーション同様確率的に不公平が起こると考えられる。

さらに、UDP フローを流す実験及び本実験環境とは逆向きである AP における ACK 破棄が起こりにくい環境で実験を行うことで、シミュレーション同様 AP のバッファあふれによる TCP-ACK の破棄が不公平の原因のひとつとなりえることを示した。

2 点目として、有線環境において QoS 保証を可能にした TCP-AV を、無線環境において AVR という新たな基準を用いて評価を行った。その結果、TCP-AV は fair-share を超えた帯域（今回の実験では、実効帯域の 30% 以上の帯域）を確保することができた。これより、TCP-AV は、実機環境でも、目標帯域に近い通信を長時間行うことができ、不安定な無線環境においても要求された帯域の QoS を確保することができたといえる。

5.2 今後の課題

不公平性の問題に関しては、イーサネットコンバータタイプ無線 LAN の挙動の詳しい分析を、電波の受信具合や Windows 端末の無線 LAN ドライバによる制御なども考慮にいれて考えたい。また、さらに台数を増やした場合の公平性の変化なども検証したい。

QoS 保証に関しては、実際にストリーミングを流して TCP-AV の有用性を視覚的に確認したい。また、他の QoS プロトコルを使用した際の挙動、TCP-AV を他の無線子機を使用したときの振舞や高遅延や高負荷をはじめとする様々な無線環境における TCP-AV の評価をしていきたい。

これらのことから TCP-AV の改良などを含め、無線環境におけるより良い品質保証の提案を進めていきたい。

謝 辞

本研究に TCP-AV プロトコルの提供と適切なアドバイスを頂いた NEC システムプラットフォーム研究所の藤田範人氏と浜

崇之氏に感謝致します.

文 献

- [1] H.Shimonishi, et al., "Congestion Control Enhancements for Streaming Media, "IEICE Trans. on Comm., Vol.E89 B, No.9,pp.2280-2291 Sep. 2006.
- [2] D.Leith, et al., "Using the 802.11e EDCF to Achieve TCP Upload Fairness over WLAN ling," IEEE,2005
- [3] S.Pilosof,R.Ramjee,Y.Shavitt,P.Sinha, "Understanding TCP fairness over Wireless LAN "INFOCOM 2003, 1-3 April 2003.
- [4] Anthony C.H. NG, David Malone, Douglas J.Leith :“ Experimental Evaluation of TCP Performance and Fairness in an 802.11e Test-bed, "ACM SIGCOMM 2005,pp.17-22 Aug.2005
- [5] BUFFALO wireless LAN BB router AirStation NFINITI GIGA 300Mbps 11n conformity (WZR-AMPG300NH) :
<http://buffalo.jp/products/catalog/network/wzr-ampg30nh/>
- [6] BUFFALO 2.4GH 54Mbps wireless LAN Ethernet conversion media converter (WLI3-TX1-G54) :
<http://buffalo.jp/products/catalog/item/w/wli3-tx1-g54/>
- [7] IEEE802.11 wireless LAN medium access control (MAC)and physical layer(PHY) specification,1999
- [8] Perl program of inspect the size of buffer: <http://x68000.q-e-d.net/68user/net/udp-2.html>
- [9] Iperf: <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>