

無線 LAN を用いたデータ転送時の帯域公平性に対する アクセスポイントのバッファ量の影響の評価

安藤 玲未[†] 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: [†]remi@ogl.is.ocha.ac.jp, ^{††}t-murase@ap.jp.nec.com, ^{†††}oguchi@computer.org

あらまし 複数の端末が無線 LAN を用いて TCP/IP によりデータ転送を行う際に、端末間の帯域に不公平が生じる場合がある。これはアクセスポイントにおける TCP 確認応答のバッファ溢れによって起こっている可能性が考えられる。すなわち MAC 層における CSMA/CA に基づく送信権割当と TCP の輻輳ウィンドウ制御のミスマッチにより、不公平が引き起こされている可能性が高い。しかしアクセスポイントの実機環境を詳細に調べた研究は、これまで報告されていない。そこで本研究では、アクセスポイントの実機を多種用意し解析を行った。まず各アクセスポイントのバッファ量を実験により明らかにした。そしてこのバッファ量が無線 LAN を用いたデータ転送時の帯域公平性に影響を与えているか評価を行った。その結果、バッファ量と帯域公平性の相関関係が一部明らかになった。

キーワード TCP, 無線 LAN, 公平性, QoS

An evaluation of fairness of bandwidth affected by the buffer size of access point in the wireless LAN environment

Remi ANDO[†], Tsutomu 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: [†]remi@ogl.is.ocha.ac.jp, ^{††}t-murase@ap.jp.nec.com, ^{†††}oguchi@computer.org

Abstract When multiple terminals are communicating, unfairness of the throughput among terminals might be observed. This is considered to be caused by an overflow of TCP ACK in a buffer of AP. The reason of unfairness seems to be a mismatch between assignment of transmission right by CSMA/CA in MAC layer and window control in transport layer. However, until now, the details of AP environment have not been reported using real machines. Thus in this research work, we have analyzed many sorts of real APs. First, we have clarified buffer size of each AP by an experiment. Next, we have evaluated if fairness of throughput is affected by the buffer size of AP in the wireless LAN environment. As a result, the relation between the buffer size and fairness of throughput is partly confirmed.

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り、また信頼性の観点から TCP が使用されることが多いと想定される。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 である [1]。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、既存の 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，無線環境においても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．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し，複数台の端末で通信を行った場合，端末ごとのスループットに不公平が生じる場合があることが既存研究によって分かっている．そこで本研究では，端末ごとのスループットに不公平が生じる原因の 1 つとして挙げられる，アクセスポイントのバッファあふれに焦点をあて，アクセスポイントのバッファ量の評価を行い，その違いによる不公平性の評価を行う．

2. 既存研究

文献 [2] では，複数台で無線通信を行った場合の不公平性の問題について，実機を用いた議論が行われている．

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．これはすなわち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．

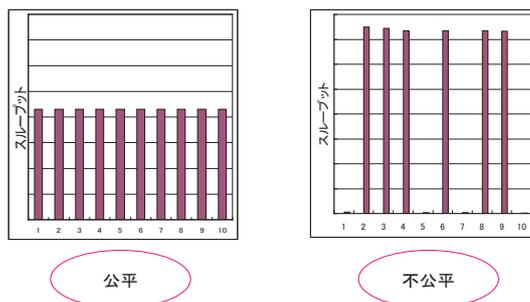


図 1 公平および不公平なスループット

2.2 不公平の原因

既存研究ではアクセスポイント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ことにより不公平が起ると考えられている．これは端末の台数が増えた時に特に問題となる．例えば，10 台の無線端末からアクセスポイントを経由して 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，データの送信は高々 54Mbps であるのに対し，ACK は 100Mbps の速さでアクセスポイントのバッファにたまる．アクセスポイントは無線の端末に ACK を返したいが，アクセ

スポイント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．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アクセスポイント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 の破棄はウィンドウサイズがたまたま大きかった端末は影響をほとんど受けずにウィンドウを増加でき，スループットがさらに増加するが，ウィンドウサイズが小さかった端末はこの ACK の破棄の影響を受けやすく，さらにスループットが低下するため，その結果不公平が起ってしまう．

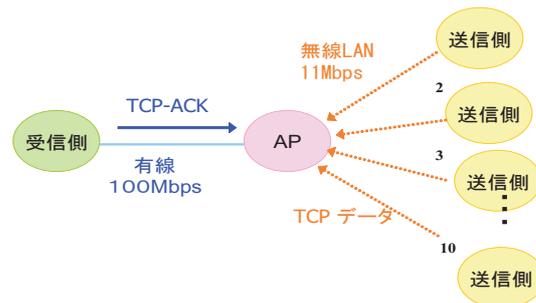


図 2 アクセスポイントのバッファあふれ

2.3 帯域不公平性の評価

ここで既存研究における帯域不公平性の評価実験を紹介する．本研究ではこの実験の追実験を行い，ほぼ同様の結果を得ることができたのでその結果も併せて示す．実験に使用する無線子機としては，カードバスタイプでの不公平性は既に示されていたため，イーサネットコンバータを用いた．実験環境は図 3 の通りで，Linux2.4 と WindowsXP 端末の組み合わせを様々に変えて実験を行った．イーサネットコンバータとアクセスポイントはそれぞれ既存研究同様，BUFFALO WLITX4-G54HP，BUFFALO WZR-AMPG300NH を用いた．また，スループット測定には Iperf を用い，実行条件としてはバッファサイズを 64K バイト，測定時間を 120 秒とし，1 つの端末の組み合わせにつき 10 回測定を行った．また，ダミーネットの片道遅延は 2.5 ミリ秒とした．基礎実験として使用する端末，イーサネットコンバータの性能に差異がないことを確認し，2~7 台の端末で実験を行った結果，4 台以下は公平，5 台以上は不公平が起ることを確認した．3 台，5 台の結果を図 4，図 5 に示す．縦軸はスループットを示しており，横軸は 1~10 回の結果を並べて表示している．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．それぞれの回には，端末ごとのその回のスループットを示している．各機器類の性能に問題がないこと，後述するアクセスポイントのバッファ量の検証などからアクセスポイントの TCP-ACK の破棄が不公平の原因の 1 つとして考えられる，という既存研究と同様の結果を追実験で得ることができた．

3. アクセスポイントのバッファ量の測定

スループットが不公平になる原因の 1 つとして考えられるアクセスポイントのバッファサイズを測定した．実験環境を図 6 に示

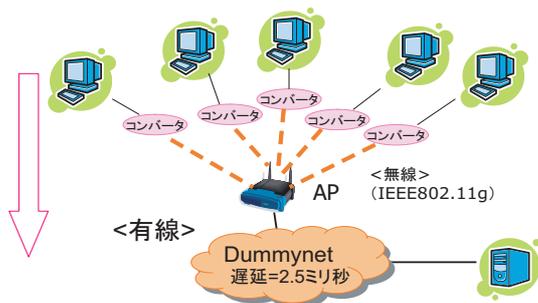


図 3 実験環境 (5 台)

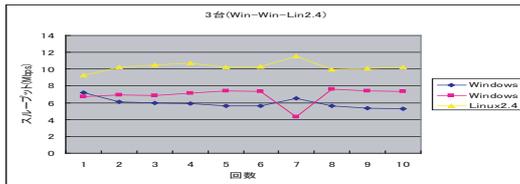


図 4 Iperf 実行結果 (3 台)

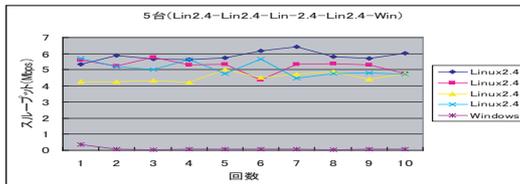


図 5 Iperf 実行結果 (5 台)

す。イーサネットコンバータは BUFFALO WLI-TX4-G54HP を、無線 LAN カードは BUFFALO WLI-PCM-L11GP を使用した。測定方法は、1 台の有線端末から番号を付加した UDP パケット 10000 個をアクセスポイント経由で無線端末に送り出し、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アクセスポイントの有線側のバッファあふれであるといえるため、番号が飛ぶ直前の数をアクセスポイントのバッファサイズとし、この測定を 10 回行い平均をとった。

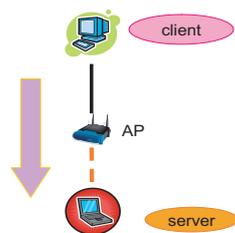


図 6 アクセスポイントのバッファあふれ

本研究では 6 種類のアクセスポイントの計測を行い、結果は以下の通りとなった。

1. BUFFALO WZR-AMPG300NH : 約 255 パケット

2. BUFFALO WLA-11G: 約 149 パケット
3. Planex GW-AP54SAG: 約 171.8 パケット
4. BUFFALO WHR-HP-AMPG: 約 134.9 パケット
5. NEC PA-WR8500N: 約 48.8 パケット
6. BUFFALO WHR-AM54-G54: 約 30.9 パケット

シミュレーションでは一般に AP のバッファサイズは 100 パケット程度と想定することが多いが、実機で計測するとシミュレーションで用いられている値より大きいものが多いことが分かった。

4. アクセスポイントのバッファ量の影響の評価

追実験およびアクセスポイントのバッファ量の測定の結果を受け、追実験で使用したアクセスポイントよりバッファサイズが小さいアクセスポイントを使用して同様の実験を行った。この実験により 3 台目、4 台目から不公平になる組み合わせが出てくれば、アクセスポイントのバッファあふれが不公平性の原因の 1 つと示されたことになる。今回使用したアクセスポイントはバッファサイズが一番小さいと計測された、上記の 6. BUFFALO WHR-AM54-G54 (バッファサイズ: 約 30.9 パケット) である。実験環境は図 6 と同じとし、アクセスポイント以外の実験機器も追実験と同様のものを使用した。また、スループット測定には Iperf を用い、実行条件も同様として測定を行った。まず基礎実験として各端末とイーサネットコンバータのスループットを測定し、性能の差がないことを確認した。次に 2~7 台の Linux2.4 と WindowsXP の混在環境において不公平が起こるかどうかの実験を行った。結果は 2 台では公平、3 台および 4 台での結果は公平になるものが多かったが、不公平になる組み合わせもあった。5 台~7 台での結果は公平になる組み合わせと不公平になる組み合わせがあり、必ずしも全てが不公平にはならなかった。また、6 台での結果は不公平ほどではないがスループットが高いものと、低いものの 2 極化する傾向があった。図 7~図 12 に結果のグラフを一部示した。図 8 では 3 台目の Linux2.4 の端末が、図 9 では 4 台目の Linux2.4 の端末が不公平になっていることがわかる。また、図 5、図 11、図 12 では 5~6 台で公平になった組み合わせを示した。これらの結果から、この実験においてはアクセスポイントのバッファサイズがあまりに小さいため、全端末の ACK が大幅にあふれ、結果的に不公平が起きにくくなってしまった可能性があると考えられる。また、アクセスポイントのバッファあふれが不公平の原因の 1 つと考えられるが、これだけでは 2 極化する傾向などの説明はつかないため、他の原因も関与している可能性がある。

4.1 不公平時のパケットの様子

次に、不公平が起こる 5 台の環境においてスループットが高い端末と低い端末でのデータの様子を詳しく見るために、tcpdump コマンドとネットワークプロトコルアナライザの 1 つである Wireshark を用い、パケットの様子を検証した。実験環境を図 13 に示す。前述した実験と同様、5 台の端末それぞれにおいて Iperf を実行し、そのうちスループットが高い端末と低い端末で tcpdump コマンドを実行する。スループットが高い端末での実験結果を図 14、低い端末での実験結果を図 15 に示す。

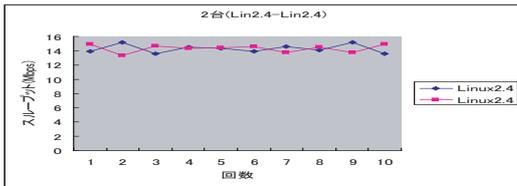


図 7 Iperf 実行結果 (2 台)

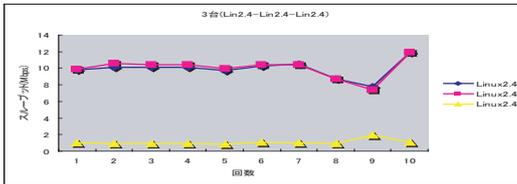


図 8 Iperf 実行結果 (3 台)

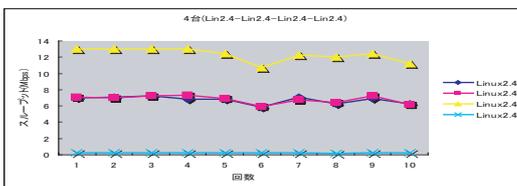


図 9 Iperf 実行結果 (4 台)

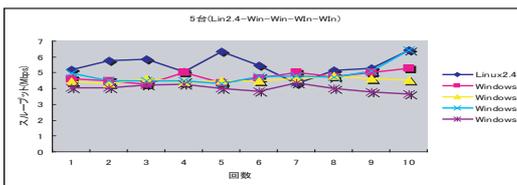


図 10 Iperf 実行結果 (5 台)

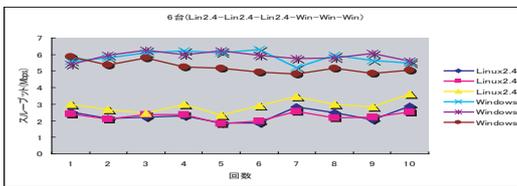


図 11 Iperf 実行結果 (6 台)

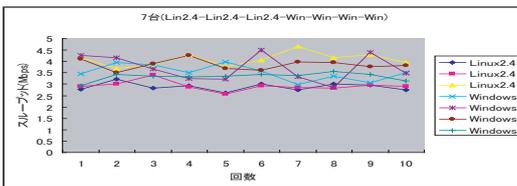


図 12 Iperf 実行結果 (7 台)

これらのグラフから、スループットが高い端末では頻りにデータの送信と ACK の受信が行われていることが分かり、一方スループットが低い端末では ACK の受信もデータの送信間隔も広く、かつデータが送信されながら ACK が返っていないケースが多く観測され、このパケットロスが不公平を引き起こしていることが分かる。次に tcpdump コマンドと同様、Wireshark をスループットが高い端末と低い端末で実行した結果をそれぞれ図 17 に示す。Wireshark のグラフは縦軸がパケット数、横軸が時間を表している。これらのグラフからも、スループット

が高い端末はパケットロスをすることなく積極的にデータを送受信し、低い端末ではパケットロスが頻発し、ウィンドウサイズがなかなか増加できていないことが分かる。

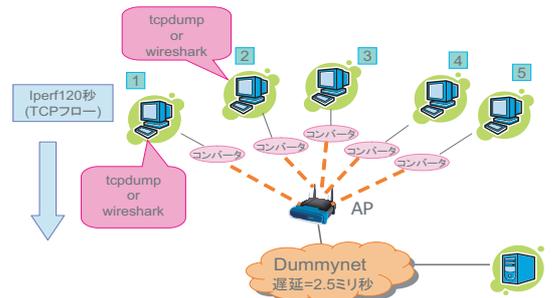


図 13 実験環境 (tcpdump, Wireshark)

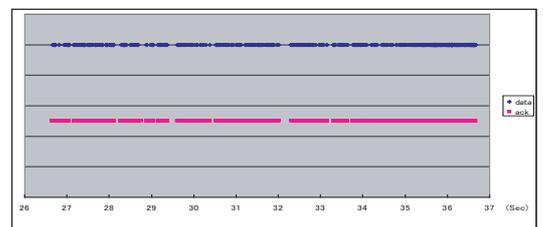


図 14 tcpdump 実行結果 (約 8.8Mbps)

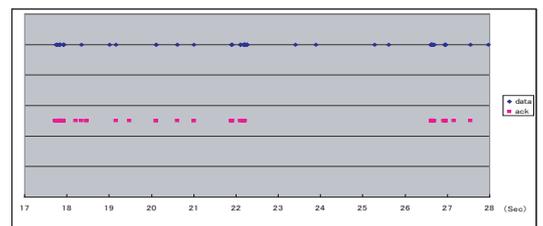


図 15 tcpdump 実行結果 (約 0.143Mbps)

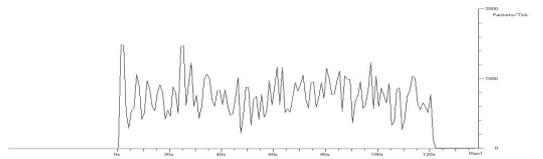


図 16 wireshark 実行結果 (約 6.17Mbps)

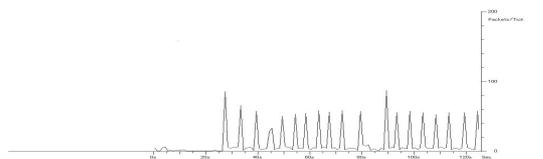


図 17 wireshark 実行結果 (約 0.184Mbps)

5. イーサネットコンバータの挙動

不公平の原因がアクセスポイントにおけるバッファあふれであることを示すため、端末をアクセスポイントに接続しているイーサネットコンバータの挙動を調べた。イーサネットコンバータの挙動を確認するための実験環境を図 18 に示す。1 対 1 の通信において、Iperf を実行し、それぞれの端末において tcpdump コマンドを用い、ネットワーク上を流れるデータの様子を確認する。ここで、送信側と受信側でデータの送迎のタイミングと ACK の受信タイミングをそれぞれ確認し、相違がなければイーサネットコンバータは特別な制御を行わずに、端末からのパケットをきちんと送受信しているといえる。本実験では、TCP フロー、UDP フローでの測定を行った。実験結果を図 20 図 22 に示す。UDP フローの結果は最初の 0.5 秒を拡大したグラフである。

これらのグラフから、TCP フローにおいてはサーバとクライアントのデータ送迎のタイミングと ACK の受信タイミングに差は見られず、UDP フローにおいては差が見られることが分かった。Wireshark においても UDP フローを確認したが、(図 23 ~ 図 24) パケット数が約半分となっていることが分かった。

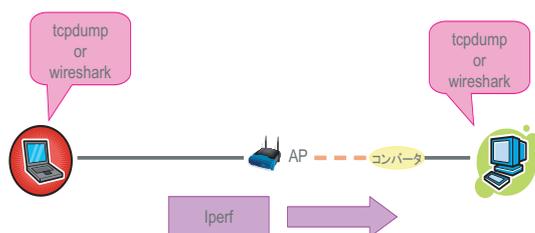


図 18 実験環境 (イーサネットコンバータの挙動)

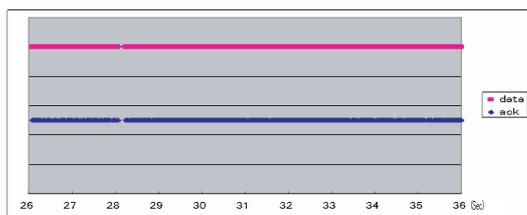


図 19 TCP フロー実験結果 (server)

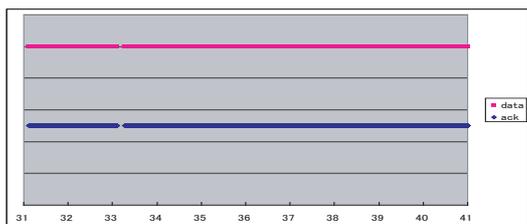


図 20 TCP フロー実験結果 (client)

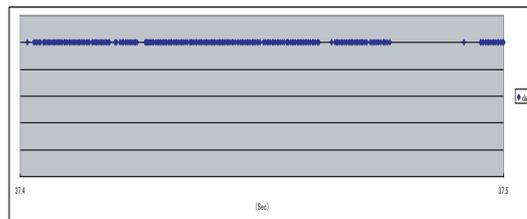


図 21 UDP フロー実験結果 (server)

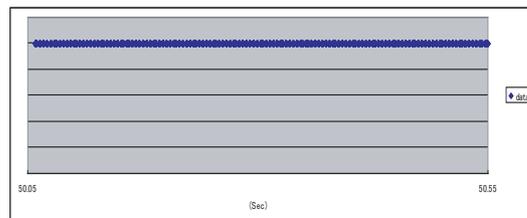


図 22 UDP フロー実験結果 (client)

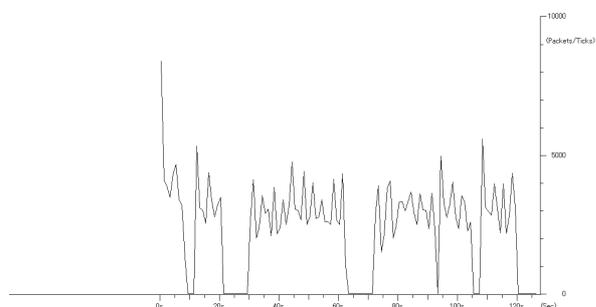


図 23 UDP フロー実験結果 (client)

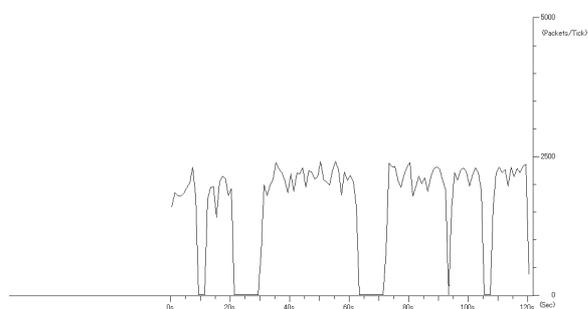


図 24 UDP フロー実験結果 (server)

6. TCP-AV の評価

既存研究で行われていた TCP-AV の評価の追実験を行い、ほぼ同じ結果を得たため以下に示す。

6.1 実験概要

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 25 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。期待される振舞としては、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

できると考えられる。さらに、評価基準として、EB (Effective Bandwidth), NRT (Normalized Required Throughput), AVR (Achievement Ratio) を定義する。EB は最大の帯域幅のことであり、本研究では IEEE802.11g 無線 LAN を使用するため帯域幅は 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 とした。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。また、fair-share とは EB を送信端末の台数で割った値であり、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。

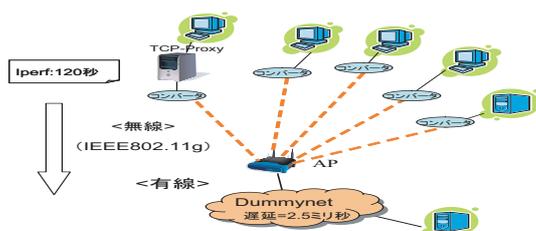


図 25 無線 LAN 環境における TCP-AV の評価

6.2 実験結果に関する考察

結果を図 26 に示す。設定帯域が fair-share を少し超えた帯域でも AVR は 100%であった。これはつまり全実行時間において、設定した帯域で通信可能であったということになる。これにより、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状態に陥らずに、要求帯域の品質保証が可能であることがわかった。また、本研究では片道遅延時間を既存研究の 2 倍の 5 ミリ秒にして行った場合も、既存研究とほぼ同様の結果を得ることができた。これを図 27 に示す。

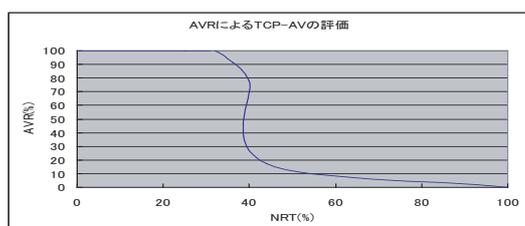


図 26 無線 LAN 環境における TCP-AV の評価結果 (片道遅延時間 2.5 ミリ秒)

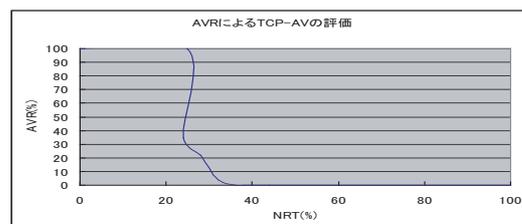


図 27 無線 LAN 環境における TCP-AV の評価結果 (片道遅延時間 5.0 ミリ秒)

7. まとめと今後の課題

7.1 まとめ

既存研究の帯域不公平性の問題に焦点を当て、追実験を行うと共にアクセスポイントのバッファサイズを測定し、その差異による帯域不公平性の原因を検証した。この検証により、アクセスポイントのバッファサイズがあまりに小さいため、全端末の ACK が大幅にあふれ、結果的に不公平が起きにくくなってしまった可能性があること、アクセスポイントのバッファあふれ以外にも原因がある可能性があることが分かった。そこでアクセスポイントのバッファあふれ以外の原因として考えられる、イーサネットコンバータの挙動について検討した。TCP フロー、UDP フローを流し、端末に実際に流れるデータを見ることで検証を行った結果、TCP では送信端末と受信端末に差は見られず、UDP では多少の差が見られた。このことから、イーサネットコンバータは不公平には関与していないと考えられる。また、TCP-AV の評価実験を遅延時間を変えて行った。その結果、無線環境においても fair-share を超えた帯域を確保できることが分かった。

7.2 今後の課題

本実験で得られた結果をもとに、6 台の環境において二極化した原因を調べる、カーネルモニタを入れてカーネルの中の振舞まで調べるなどを行うことで、不公平の原因を更に検証していきたい。また、TCP-AV を他の無線子機を使用したときの振舞や高遅延・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。

文 献

- [1] H.Shimonishi, et al., "Congestion Control Enhancements for Streaming Media," IEICE Trans. on Comm., Vol. E89B, No. 9, pp. 2280-2291 Sep. 2006.
- [2] 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.
- [3] BUFFALO WZR-AMPG300NH: <http://buffalo.jp/products/catalog/network/wzr-ampg300nh/>
- [4] Planex GW-AP54SAG: <http://www.planex.co.jp/product/bwawe/gwap54sag.shtml>
- [5] BUFFALO WLA-11G: <http://buffalo.jp/products/catalog/item/w/wla-g54/>
- [6] BUFFALO WHR-HP-AMPG: <http://buffalo.jp/products/catalog/item/w/whr-hp-ampg/>
- [7] NEC PA-WR8500N: <http://121ware.com/product/>

- atermstation/product/warpstar/wr8500n/index.html
- [8] BUFFALO WHR-AM54-G54:<http://buffalo.jp/products/catalog/item/w/whr-am54g54/>
 - [9] <http://sourceforge.net/projects/iperf/files/iperf/2.0.4/source/iperf-2.0.4.tar.gz/download>
 - [10] <http://www.wireshark.org/>