

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

安藤 玲未^{†1} 村瀬 勉^{†2} 小口 正人^{†1}

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、実装され、有線環境における評価や無線環境におけるシミュレーションが既に行われてきた。しかし、無線の実機環境においてはこれらとは異なる問題が存在する。例えば複数台の端末で通信を行った時の送信権の制御メカニズムが原因となって、端末ごとのスループットに不公平が生じる場合があり、その結果 TCP-AV を用いても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、アクセスポイント(AP)のパッファサイズと TCP のスループットの関係や、長時間通信時における帯域公平性について調査し、このような環境での TCP-AV の振舞いを検証した。

Experimental Study on Wireless LAN QoS for Bandwidth Guaranteed TCP with Real Terminals and Access Points

REMI ANDO,^{†1} TUTOMU MURASE^{†2}
and MASATO OGUCHI^{†1}

In late years, demands for multimedia communication has been raised extensively. To guarantee the QoS is extremely important. Here, QoS is defined to guarantee a designated bandwidth. In order to realize it, TCP-AV has been proposed and implemented, and QoS is achieved in a wired environment and simulation in a wireless environment. However, wireless environment has problems different from those environments. When multiple terminals are communicating, it is said that unfairness of the throughput among terminals is observed caused by control mechanism of the data transmission right. As a result, there is a possibility that an effective bandwidth control cannot be performed even if TCP-AV is used. Therefore we have investigated about the relation between the buffer size of access point and throughput of TCP, and fairness of bandwidth affected during a long time communication. Furthermore,

we have investigated behavior of TCP-AV in such an environment.

1. はじめに

近年、動画ストリームや音声などのマルチメディア通信の需要が増加したことにより、マルチメディア通信において QoS 保証が大変重要なものとなっている。しかし、一言に QoS と言ってもそこで要求される品質はアプリケーションによって異なるため、マルチメディア通信のための QoS を定義する必要がある。ここで本研究において QoS 保証とは「指定された帯域を確保すること」と定義し、研究を進める。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、マルチメディア通信のためには QoS の保証が必要となる。マルチメディア通信においては、UDP も使われるが、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おり、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⁴⁾、実装されている。

TCP-AV に関しては、既に有線環境における評価や実験がなされており、有効性が示されている。一方、IEEE802.11(無線 LAN)などの無線環境においては、無線特有の通信特性のために、有線の場合よりも有効性が小さく、何らかの改善が必要であることが、シミュレーションにより示されている³⁾。

しかし、実機の無線環境においてはこれらとは異なる問題が存在する。例えば理論上では、複数台の端末で通信を行った時の無線 LAN の帯域はどの端末も平等に確保されると考えられているが、実際には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。さらに、シミュレーションでは不公平になる端末は、統計的な何らかのきっかけで決まるため、長期間の観測を行うと、通信途中で入れ替わると言われているが、実機環境においては一度不公平になってしまった端末はなかなかスループットを上昇できないことが既に分かっており⁵⁾、端末固有の仕様の違い(個性と呼ぶ)が理論上とは大きく異なる QoS 特性を作り出している。また、端末のみならずアクセスポイント(AP)にも様々な仕様の違いが存在し、QoS 特性に寄与している。特に、パッファサイズやパッファ

†1 お茶の水女子大学
Ochanomizu University

†2 NEC
NEC Corporation

キューイングの振る舞いが TCP には影響を与える。

上述のように、TCP 及び TCP-AV を無線の環境で用いる場合には、端末の公平性やその振舞いのばらつき、および AP の振舞いにより、その有効性が変わると思われる。そこで、本稿では、端末のばらつき特性の調査および AP の調査を行い、シミュレーションで用いられている仮定の妥当性を検証すると共に、それらの特性が TCP-AV に与える影響について調査する。以下 2 章で、従来の研究と本研究との比較について述べ、3 章では AP のバッファ仕様計測結果を示す。また、どのような環境で帯域保証型 TCP を用いても効果があるのかを調査するため、4 章では AP のバッファサイズの結果をもとに AP のバッファサイズと TCP スループットの関係について調査し、5 章では端末のばらつきと TCP の不公平性の検証を行った。そして最後に 6 章では AP のバッファサイズの違いにおける帯域保証型 TCP の性能評価を行ったのでこれについて説明する。

2. 関連研究

従来の研究と本研究との比較について述べる。従来の研究において、TCP-AV が有線環境で帯域保証できることがシミュレーション評価および実機での実験にて示されている⁴⁾。TCP-AV は、TCP が他の TCP と協調し合ってレートを調整する輻輳制御メカニズムを利用して他の TCP よりも有利に振舞うように設計されている。無線では、TCP の振舞いは、無線の MAC アクセス制御を通じて他の TCP に伝わることから、無線アクセス制御を考慮した TCP が必要であるとされている。TCP-AV においても、既にその効果は無線アクセス制御に影響されることがシミュレーションによって確認されている³⁾。実機での無線通信実験でも、TCP-AV が有線とは異なる特性を示すことが示されている⁵⁾。この実機実験では、無線 MAC 制御における端末無線デバイスのばらつきに起因すると思われる振舞いが指摘されている。しかしながら、ばらつきが、どの要因によって引き起こされているかについては十分調査されていない。そこで本稿では、このばらつきの原因を調査する。実機実験¹⁾では、AP のバッファ量の違いを計測しており、AP のバッファ量が TCP 特性に与える影響を調査している。しかし、バッファ量の計測にやや正確性を欠き、さらに、バッファのキューイング動作自体については調べていない。そこで本稿では、正確にバッファを計測し、バッファの振舞い自体の調査を行う。さらに、これらの実機仕様の違いが、TCP-AV に与える影響についての調査は行われておらず、本稿では、異なるバッファ量の AP を用いたときの TCP-AV の性能特性について調査する。

3. AP のバッファ仕様計測

本研究ではまず、AP のバッファサイズとバッファの振る舞いを測定する。既に TCP 通信における不公平性は、AP のバッファあふれにより引き起こされることが分かっており、実際の AP においてどの程度のバッファサイズが装備されているのか、バッファのキューイング動作がどうなっているのかを知ることは TCP 及び TCP-AV の動作を把握するにあたって重要である。しかしながら、一般には市販の AP のバッファサイズは公表されておらず、また、バッファ制御についても公表されていない。さらには公衆アクセススポットなどでは AP の機種自体の情報を得ることも困難である。そのため、計算機シミュレーションで典型的に用いられているバッファサイズ値や FIFO 動作が実機でも実現されているとは限らない。また、バッファの特性は機器毎に異なり単一の機械では不十分であることから、複数の機器を調査する必要がある。

本実験では、細かい仕様を厳密に調査するのが目的ではなく、シミュレーションなどで想定している条件が妥当であるかを調査することが目的のため、入力に対する出力を計測し、計測結果にて、内部状況をおおよそ推定することとした。

3.1 バッファサイズ

バッファサイズを直接計測することは不可能であるため、バッファが溢れるまで過大なトラフィックを与え、バッファが溢れたところがバッファサイズであると推定した。実験環境を図 1 に示す。イーサネットコンバータは BUFFALO WLI-TX4-G54HP を使用した。無線 LAN には IEEE802.11g を使用している。測定方法は、1 台の有線端末からシーケンス番号を付加した 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。本実験においては、無線 LAN 上でのパケットロスは観測されなかったため、パケットロスの原因は AP の有線側のバッファあふれであるといえる。従って、番号が飛ぶ直前の数を AP のバッファサイズとする¹⁾。計測は、10 回行い、その平均を取っている。そのため、実際には、あり得ない小数点以下の数値が出ている。バッファサイズ計測の原理は上述の通り¹⁾であるが、バッファに入力中にもバッファからの出力があり得るため、このままでは、正確さを欠く。今回は、この出力を抑えるために、図 2 のようにバッファサイズを計測している間に逆方向から UDP パケットを送ることで、AP の送信機会を減らし、バッファサイズをより正確に

測定した。その結果、小さいもので 6.3 パケット、大きいもので 112.5 パケットの誤差を修正することができた。実験結果は以下の通りとなった。

1. Planex GW-AP54SAG : 約 284.3 パケット
2. BUFFALO WZR-AMPG300NH : 約 256 パケット
3. BUFFALO WHR-HP-AMPG : 約 135.1 パケット
4. NEC PA-WR8500N : 約 90.5 パケット
5. BUFFALO WHR-AM54G54 : 約 37.2 パケット

今回の実験では、容易に入手可能な市販 AP のみでも、約 30 ~ 300 パケットの幅があった。従って、QoS 制御など特定の製品を前提とせず、シミュレーションなどで性能評価をする場合は少なくとも、数十 ~ 数百のパッファサイズを前提に行う必要がある。一方、特定の製品を前提としてシミュレーションをする場合は上記のようなパッファサイズで行う必要がある。

一般に、パッファサイズに依存してスループット特性も変化することが予想されるので、その変化割合について 4 章で検証する。

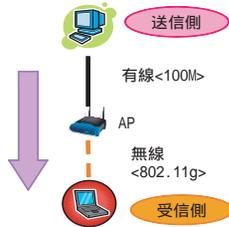


図 1 実験環境 1

3.2 パッファキューイング制御

AP のパッファキューイング制御について調査する。一般に、シミュレーションなどでは、FIFO キューイングのパッファを仮定している。すなわち、パケットが 1 つ出力されたら、パケットパッファに空きが 1 つ出来、そこに到着したパケットはパッファに収容される、という動作が仮定されている。しかしながら、実際の機器では、実装上の都合や、性能的な限界などから、前述の仮定のように動作しないと思われる。そこで、パッファの振る舞いを見るために、前章と同様にパッファにトラフィックを入力し、パッファ溢れ状況をパケット単位で調査した。図 3 に、ある 1 回のパッファサイズ計測時の受信回数 (横軸) と受信番号

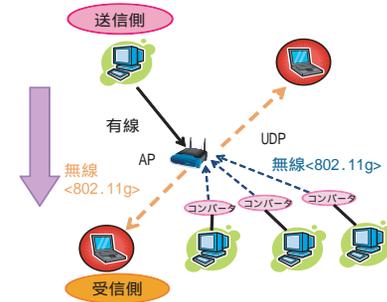


図 2 実験環境 2

(縦軸) とを比較した。AP としては、上記の 2. BUFFALO WZR-AMPG300NH (パケットパッファサイズ = 256 パケット) を用いた。図 3 において、パッファが FIFO 動作であれば、グラフが上になだらかに上昇するはずであるが、実際には、ところどころで、上にステップしている。つまり、パッファは、パッファがパケットで満たされた状態 (256 パケット) からパッファに 1 つ空きが出ると 1 つパケットが入る、という仕様ではないことが分かる。例えば図 3 の印をつけたところでは、バースト的に 16 パケットがパッファに入り、次に 17 パケット、12 パケットがパッファに入っていることが分かる。一般に、シミュレーションではパッファ制御は FIFO 動作と考えられているが、この実験により、実際には以下のグラフに示したように、AP の OS やハードウェアといった何らかの都合によりパッファ入出力動作が想定通りではない可能性があることが分かった。

4. AP のパッファサイズと TCP スループットの関係

本章では、3 章の結果をもとに AP のパッファサイズと TCP のスループットの関係を調査する。通常パッファサイズが増加するとスループットも上昇すると考えられる。しかし前述のようにパッファ動作は必ずしも FIFO ではないといった実機特有の仕様も考慮する必要がある。ただし今回はパッファ制御の影響を受けるのは TCP-ACK であるため、そのスループットへの影響は軽微であり、実機でもパッファサイズの大きい AP においてよりスループットが大きくなると予想して、調査を行った。実験環境は図 4 の通りで、AP を変えてスループットを測定する。送信端末にイーサネットコンバータをつなぎ、802.11g で AP と通信を行う。また、AP とダミーネット、受信端末を有線につなぐ。無線側から有線側に送信するパケットは TCP とする。1 つの AP について 10 回測定を行い、平均を取る。ス

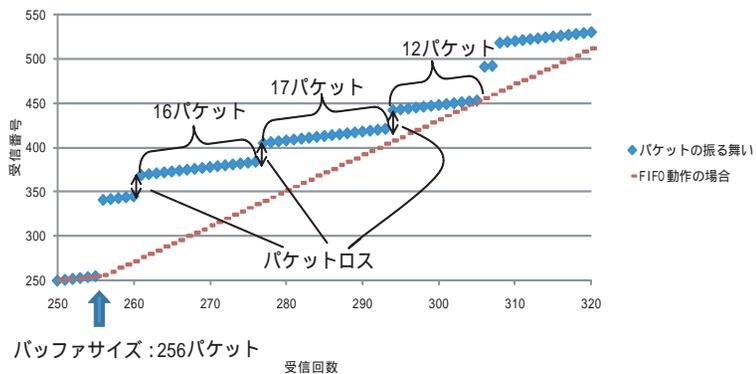


図3 バッファ制御

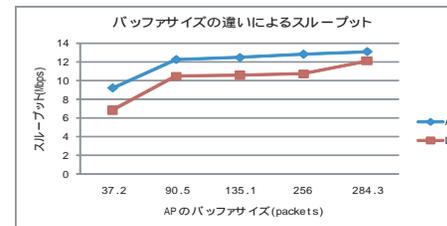


図5 APのバッファサイズの違いによるスループット

スループット測定には Iperf⁶⁾ を用い、実行条件はウィンドウサイズを 64kbyte、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 2.5msec とした。結果を図 5 に示す。AP のバッファサイズが大きくなるにつれ、スループットも上がっており、予想通りスループットは AP のバッファサイズに依存し、バッファが大きいほどスループットが上がる事が分かる。これはバッファサイズが大きい方がバッファあふれを起こしにくいと考えられる。

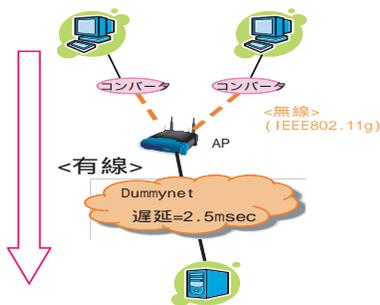


図4 実験環境 (AP バッファサイズとスループットの関係)

5. 端末のばらつきと TCP の不公平性

次に本章では端末のばらつきと TCP の不公平性の問題について検討する。

まず、TCP で不公平が起こる理由について説明する。不公平は 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合わさったことにより起こ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 6 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 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、AP も無線端末の 1 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 を約 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れない 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。その結果不公平が起こってしまう。

しかしながら、実機においては、前述の理論通りの特性にはならず、端末固有の仕様の違いに起因する特性が表れる。既存研究では複数台の端末のスループットを同時に計測し始めた結果、4 台までの同時動作では公平、5 台以上では不公平となり、5 台の内 1 台のみが極めて低いスループットとなってしまふことが分かっている。また、全端末を再起動しない限り、この低いスループットの端末 (不幸な端末とよぶ) は、何度実験を繰り返しても常に低スループットになり続けることも分かっている⁵⁾。この原因については、機器の仕様によるものと考えられ、詳細は不明であるが、このような不幸な端末が確実に存在することから、

この端末の特性を把握することは、TCP-AV を用いた帯域保証制御において、必須である。

そのため、今回はこの不幸な端末が、どのような状況で選ばれるのかを、より詳細に調査した。実験では、高いスループットを維持している端末（幸運な端末と呼ぶ）のデータ送出手を停止することで、公平なスループットになる状況（4 台の同時動作）を作り出し、不幸な端末のスループットが向上して他の端末と同等になるかどうかを調べた。さらにその状況から、幸運な端末のデータ送信を再開したときに、幸運な端末は、スループットを得難いはずであるかどうか、どうか、を調査した。実験環境を図 7 に示す。具体的には、初めは 4 台で通信を行い公平な状態からスタートし、通信途中で 5 台に増やし不公平な状態とし、その後また 4 台にした場合についての実験を行った。実行時間は 30 分とする。TCP のスループットが充分落ち着く時間を考慮して 4 台で 3 分間通信し、その後 15 分経過した時点でスループットが一番高い端末の通信を 6 分間やめる。そして更に 6 分後、再びこの端末の通信を開始する。実験結果は図 8 の通りとなった。

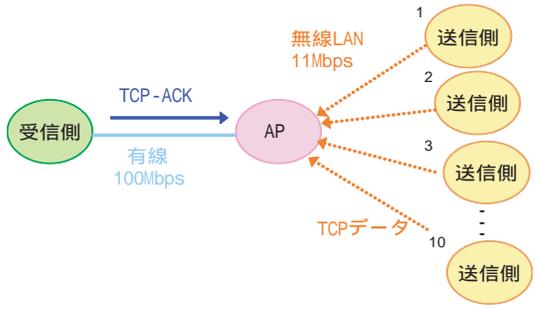


図 6 アクセスポイントのバッファあふれ

このグラフから端末 A が取っていた帯域をスループットが高い端末 C, D, E で分け合っており、一度スループットが落ち込んだ端末 B のスループットは上がってこないことが分かる。これは端末 C, D, E の ACK が端末 B のスループットを占領しており、端末 B のウィンドウサイズが上昇しないためと考えられる。しかしこの考えだと 1620 秒～1800 秒の端末 A も端末 B と同様 0Mbps のままであるはずだが今回は期待した結果は得られなかった。また全ての端末を再起動して実験をすると他の端末が不幸な端末になることから、本実験からは、一度何らかの理由により不幸な端末になるとその後は本来スループットが上がるはずの環境でも性能を上げないこと、上がらない理由としてはスループットが高い端末の

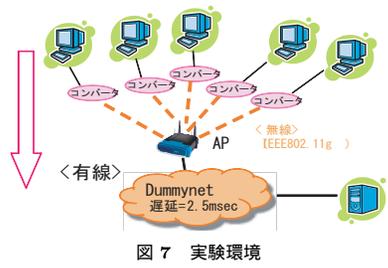


図 7 実験環境

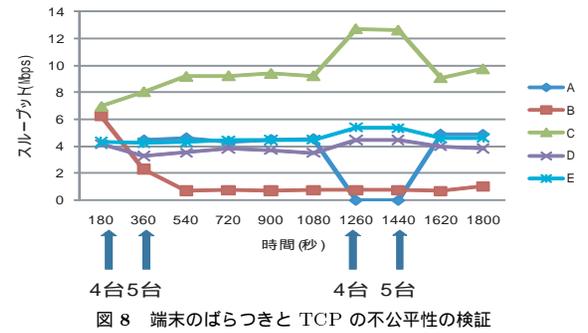


図 8 端末のばらつきと TCP の不公平性の検証

ACK が帯域を占領しているためと考えられるが、落とした端末（本実験においては A）を戻した時にその端末は落とす前とほぼ同じスループットを出すことから更に検証する必要があることが分かった。

6. AP のバッファサイズの違いにおける帯域保証型 TCP の性能評価

AP のバッファサイズが帯域保証型 TCP の保証性能に与える影響を調べる。帯域保証 TCP の一つである TCP-AV は、輻輳崩壊を起こさない範囲で通常の TCP が輻輳に過剰に反応する場合でも適度に反応することで、通信レートを一定に保とうというメカニズムで動作する。従って、輻輳が起こりやすいほど、TCP-AV にとっては有利になる。バッファサイズが大きくなると輻輳の度合いが低下し、通常の TCP のスループットが上昇するはずであるため、TCP-AV と TCP の差があまり顕著でなくなり、際立った効果が見られなくなる可能性がある。

そこで本研究ではまず市販の複数の AP を用いてバッファサイズ、バッファの振舞いの 2

点から検証を行った。実験環境を図9に示す。今回は端末AにTCP-AVを載せ、ダミーネットワークの片道遅延は2.5msecとした。

実験結果図10に示す。AはTCP-AV、B、CはTCPのスループットである。

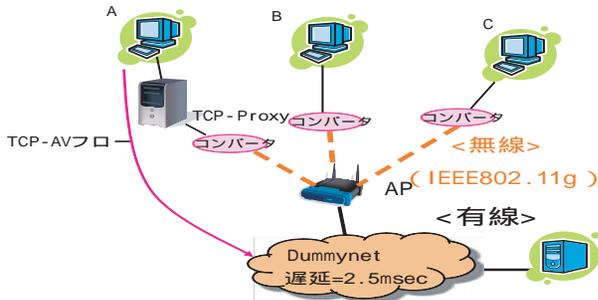


図9 実験環境 (TCP-AV)

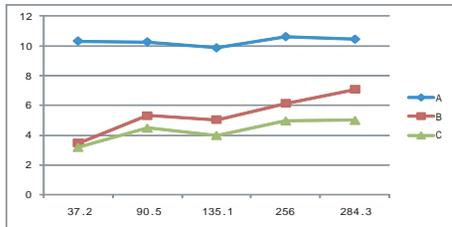


図10 APのバッファサイズの違いによるTCP-AVの性能評価

このグラフからTCP-AVは他のTCPに影響されずに一定の帯域を確保しており、通常のTCPはバッファサイズが大きくなるにつれスループットを上昇させていることが分かる。今回は入手できたAPの範囲内では実験で確認できなかったが更にバッファサイズが大きいAPを使用するとTCP-AVとTCPの差は縮まると思われるため、TCP-AVはスループットが右下がり、TCPは右上がりが増えたと予想される。

7. まとめと今後の課題

無線LANを通して、マルチメディア通信を行うために、TCPを用いた帯域確保方法の

実現可能性について、検証している。帯域保証制御を行うTCPとしてTCP-AVを取り上げ、端末、アクセスポイント(AP)は、市販で容易に入手できる複数の機器を対象とした。APにおいては、バッファサイズやバッファキューイング制御が、一般のシミュレーションで仮定されているような、固定のものではなく、機器により大きければつきがあり、特にキューイング制御は、FIFOとは違う動きをすることが分かった。また、端末の通信動作は均質であると仮定されることが多いが、実際の機器では特定の端末が、何らかの原因でほとんどスループットを得られない「不幸な」端末になってしまうことが判明した。これらにより、帯域確保型TCPが対応すべき状況範囲がさらに広がることが分かった。また、実際にTCP-AVが通常のTCPに対して有利に帯域を確保できるのは、APのバッファサイズが小さい範囲であることも実験で確認できた。シミュレーションなどにおいては、これらの実際の機器の仕様を考慮して、モデル・パラメータを設定すべきである。

今後は、AP動作のより詳細な把握、TCP-AVを不幸な端末に搭載した場合の特性把握などを行う予定である。

参考文献

- 1) 安藤玲未, 村瀬勉, 小口正人: 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, DEIM2010, D8-1, 2010年3月
- 2) 安藤玲未, 村瀬勉, 小口正人: 無線LAN環境におけるアクセスポイントのバッファ量と帯域不公平性の評価, 情報処理学会全国大会, 1ZP-4, 2010年3月
- 3) 内藤成文, 小畑博靖, 村瀬勉, 石田賢治: 無線LAN環境におけるTCP制御とMAC制御を共に用いたフローQoS保証について, 信学技報, IN2009-118, January 2010.
- 4) H.Shimonishi, et al., "Congestion Control Enhancements for Streaming Media," IEICE Trans.on Comm., Vol.E89B, No.9, pp.2280-2291 Sep. 2006.
- 5) 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.
- 6) <http://sourceforge.net/projects/ipperf/files/ipperf/2.0.4source/ipperf-2.0.4.tar.gz/download>
- 7) BUFFALO WZR-AMPG300NH: <http://buffalo.jp/products/catalog/network/wzr-ampg300nh/>
- 8) Planex GW-AP54SAG: <http://www.planex.co.jp/product/bwave/gwap54sag.shtml>
- 9) BUFFALO WLA-11G: <http://buffalo.jp/products/catalog/item/w/wla-g54/>
- 10) BUFFALO WHR-HP-AMPG: <http://buffalo.jp/products/catalog/item/w/whr-hp-ampg/>
- 11) NEC PA-WR8500N: <http://121ware.com/product/atermstation/product/warpstar/wr8500n/index.html>

12) BUFFALO WHR-AM54-G54:<http://buffalo.jp/products/catalog/item/w/whr-am54g54/>
