

IEEE802.11 無線 LAN における帯域公平性の問題の検討

安藤 玲 未^{†1} 村瀬 勉^{†2} 小口 正 人^{†1}

マルチメディア通信のため、帯域確保などの QoS(Quality of Service) 制御が重要になっており、無線 LAN においても各種制御方式が提案され、シミュレーション等で評価が行われている。しかしながら、実機においては、機器固有の特性などにより、一般にシミュレーションでは考慮されない要因により、制御は一層困難になる。本稿では、無線 LAN では良く知られている複数 TCP でのスループット不公平性の問題が、実機では、より深刻な問題になることを示し、その原因と解決方法について議論する。

A study on throughput fairness of TCP flows in wireless LAN

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

QoS (Quality of Service) control is significantly important for multimedia communications in a wireless network as well as in a wired network.

Lot of control methods have already been proposed. Almost all of them are evaluated by using computer simulations, although models in the simulation are different from those in real networks. A previous research shows that a real system has more complicated and serious problems than simulation model in a well-known unfairness problem between multiple TCPs over wireless LAN. This paper shows some experimental results from a real communication system for the unfairness problem. Based on the results, reasons and solutions of the serious unfairness are discussed in order to achieve appropriate QoS control results in a real system.

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、これを実現する帯域確保 TCP がこれまでに提案⁴⁾、実装されている。有線網においては、このような帯域確保 TCP を用いることで、帯域確保がある程度可能であるとされている。

一方、無線網においては、無線網特有の課題があり、これまでにシミュレーション²⁾ や実機¹⁾ を用いて、いろいろな検討が行われてきた。更に無線網においては、個々の機器の特性が帯域制御に大きく影響する。すなわち、機器固有の特性 (癖のようなもの) を考慮せず均質と考えるシミュレーションとは異なり、実機の無線環境においては機器固有の特性を考慮する必要がある。特に、均質ではない環境においても帯域保証を行うためには、不利な状況にある端末の振舞を把握し、その解決方法を探る必要がある。

既に、一度低いスループットに抑えられてしまった端末は、網の環境が変わってもこの状態が継続することが示されている¹⁾⁴⁾。このような端末 (不幸の端末と呼ぶ) には、上述の帯域確保 TCP を載せても、帯域が確保できないことが分かっており、この現象の解析および対策が望まれている。

本稿では、この不幸な端末の原因を探ると共に、どのようなメカニズムでスループットが上らないのかを調査する。まず、2 章で、無線 LAN における公平性の問題と実機特有の不幸な端末現象について述べ、それらに関連する研究状況を 3 章で述べる。4 章では、不幸な端末のメカニズムについて解析し、5 章でその対策について述べる。最後に 6 章でまとめ

^{†1} お茶の水女子大学
Ohcanomizu University

^{†2} NEC
NEC Corporation

を述べる．

2. 帯域公平性における課題

ここで、不公平の定義と不公平が起こる原因について述べる．更に実機における新たな問題点について述べる．

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．複数の無線端末から同時に有線端末に TCP を用いて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³⁾．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．一般に、端末数が少ない場合には公平になり、端末数がある値を超えると不公平が起こる．

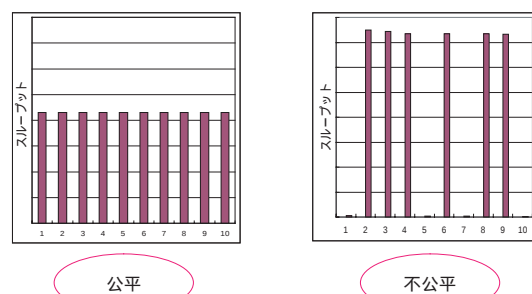


図 1 公平および不公平なスループット

2.2 不公平が起こるメカニズム

不公平が起こるメカニズムについて説明する．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合わさったことにより不公平が引き起こされると考えられている．これは端末の台数が増えた時に顕著になり、問題となる．この不公平が起こるメカニズムは以下の通りである．

無線 LAN では、端末もアクセスポイント (AP) も等しく送信権を持つ．従って、N-1 台

の端末が通信する場合、AP が送信できる確率は $1/N$ である．また、一般的には無線よりも有線の方が高速であるので、有線側からのデータを無線側に流すところにパケットバッファがある．TCP は、送信データに対して、ACK を受け取るので、必ず双方向通信となる．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)．データの送信は IEEE802.11g の 54Mbps であるのに対し、ACK は有線の FastEthernet の 100Mbps の速さとする．アクセスポイントは無線の端末に対して、有線端末からの ACK を返したいが、全てを返すことはできない．10 台分の送信データは、10/11 の確率で送信され、ACK は 1/11 の確率で送信されることになるからである．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、スループットとウィンドウ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とウィンドウが低下する¹⁾．このような正のフィードバックが起こるため、通信を始めると直ちに不公平が起こってしまう．

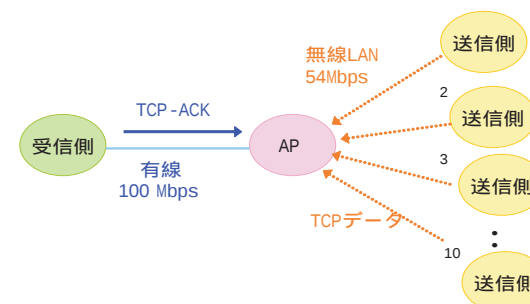


図 2 アクセスポイントのバッファあふれ

2.3 不幸な端末

本稿では不公平な状態において、スループットが極端に低い端末で、なおかつ実験を繰り返しても必ずスループットが極端に低い端末のことを不幸な端末と呼ぶ．実機においては、不幸な端末の実際のスループットはゼロではないが、フェアシェアの $1/10$ 程度以下であり、他の端末のスループットと比べて著しくスループットが低い．実機実験の環境は図 5 に示す．5 台の送信端末と、1 台の受信端末においてそれぞれパケットアナライザ⁶⁾でデータの送受信状況を見る．各無線端末は、イーサネット経由でイーサネットコンバータに接続さ

れ、イーサネットコンバータから AP に IEEE802.11g で接続している。無線端末から有線端末に対して Iperf⁷⁾ にて TCP データを送信する。シミュレーションにおいては、スループットの低い端末はシミュレーション実行毎に入れ替わると言われているが、実機においては無線 LAN インタフェース (イーサネットコンバータ) を含めて端末を再起動しない限り、常に同じ端末 (= 不幸な端末) がスループットが低くなることが分かっている⁵⁾。

3. 関連研究

従来の研究と本研究の比較について述べる。従来の研究では、実機環境において複数台で通信を行った場合、シミュレーションと同様に前述のような不公平が起こることは既に確認されている⁵⁾。さらに実機環境においては、この不公平が起こった時のスループットが低い端末 (不幸な端末) は、引き続き実験を行った場合に再度必ずスループットが低い状態になることが分かっている。もし不幸な端末が起こる理由が、2.2 節で述べた理論上で考えられているように AP における TCP-ACK の破棄が原因であるなら、このようなことは起こらないはずなので、これだけでなく他にも原因があると考えられる。

従来の研究¹⁾ では、不公平が起きない台数 (4 台) で通信を開始し、通信途中に端末を 1 台増やし 5 台とすると、この時 5 台のうち 1 台の端末のスループットが落ち、不公平な状態となる。一度、この不公平な状態になると、スループットが高い端末 4 台の通信をやめ、スループットが低くなった端末 1 台だけで通信を行っても、スループットは上がらないことが分かっている。しかしながら、何が原因でこのような不幸な端末が生じるのかは明確にされていなかった。

4. 不幸な端末の仕組み

本章では不幸な端末が発生するメカニズムを解明する。まずはどこのコンポーネントが問題を引き起こしているかを切り分ける。まず、これまでの実験結果から、端末が何らかの状態を保持し続けており、その結果、不幸な端末が発生すると推測した。この状態を保持する可能性のあるのは、PC とイーサネットコンバータ (EC) のどちらかである可能性が高いので、EC と PC 端末をそれぞれ調査した。

4.1 イーサネットコンバータでのパケットの抱え込み

EC が原因であれば、EC を交換する実験により確認できるはずである。一度複数台で実験を行い、不公平な状態になったタイミングで、不幸となった端末に繋いでいた EC と、幸運な端末に繋いでいた EC を交換した。この結果、不幸となっていた端末は幸運な端末に、

幸運だった端末は不幸な端末となった。このことから、EC が不幸な端末の原因の 1 つであることが分かった。

ただし、EC の繋ぎ替えや再実験を開始するときに直前の実験とある程度の時間を置いた場合には、不幸な端末にはならない (つまり、別の端末が低スループットになる) ことや、実験系を全て初期化した場合には、不幸な端末だった端末が低スループットに必ずなるわけではないことから、EC が何かの状態を保持するような状況になっていると思われる。このことは 5 章にて、対策として再度議論する。

4.2 端末における送受信パケット解析

前節にて、EC の挙動が原因の一つであることが分かったが、PC 端末が、原因である可能性も否定できないため、TCP データのやりとりを詳細に解析し、PC 端末は正常動作であることを確認した。

2.3 節の実験と同じ構成で、無線端末から有線端末に対して Iperf⁷⁾ にて TCP データを 2 分間送信し、不幸な端末について送信端末と受信端末でのパケットの様子を照らし合わせたところ、図 3 のように最初にデータを送信してから重複 ACK を繰り返した後、最終的に ACK が返るまで、つまり RTT が非常に大きな値となっている所が 4 箇所あったのでこのうちの 1 つについて詳細に見る。

まず、16.065 秒にシーケンス番号 2223561 のパケットが送信される。しかし、このパケットは受信側には表れていなかったため、パケットロスしたと考えられる。その後、2 秒の空白の後にシーケンス番号 2223561 が届いていないことを示す重複 ACK が返ってくる。その後約 4 秒にわたり重複 ACK が返り、20.23 秒にシーケンス番号 2223561 のパケットが高速再転送される。この高速再転送されたパケットが受信側に現れるのは 22.027 秒となっており、到着までに 2 秒程度かかっていることが分かる。これは、高速再転送されたパケットがさらにパケットロスしている可能性もあるが、そのようなパケットは見られなかったため、送信したパケットが AP など で送信処理に時間がかかったと考えられる。高速再転送されたパケットが受信側に到着すると、すぐに ACK 番号 22242385 の ACK を返している。これはシーケンス番号 2223561 以降のパケットを既に受け取ったことを表すと考えられる。つまり、送信パケットが混んでパケットロスが起こり、4 秒後に高速再転送され、この高速再転送されたパケットが更に 2 秒かかって受信側に届くということが分かる。

パケットロスが起こった後も後続のパケットを送り続けており、これが再転送されるまでパイプを埋める形になれば性能は落ちない。しかし今回は、16 秒台では後続のパケットを送っているが、18 秒台から 20 秒台はほとんどパケットを出していない。広告ウィンドウ

は十分大きかったが、輻輳ウィンドウが十分大きくなっておらず、パケットロスの際に輻輳ウィンドウを使い切って止まってしまっている可能性が高いことも分かった。

以上をまとめると、不幸な端末のスループットが上がらない理由は、RTT が非常に大きいため、タイムアウトとなり、ウィンドウサイズが十分大きくならないため、データを送出できず、スループットが低いままであることが分かる。

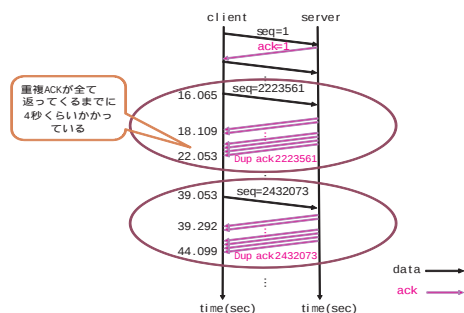


図 3 不幸な端末

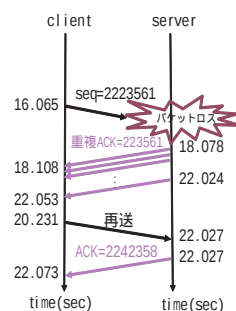


図 4 不幸な端末のデータ送信状況

更に、不幸な端末 1 台のみの通信において送受信端末のパケットを確認した。複数台での通信ではないため、パケットロスは起こっていないが、RTT は図 6 に示した通り、1.5 秒程度と非常に大きい値となっており、同様の理由によりスループットが上がっていないことが分かった。

以上のことから、端末、無線 LAN ~ 受信サーバ間には問題がなく、EC が不幸な端末の原因であることが確認できた。

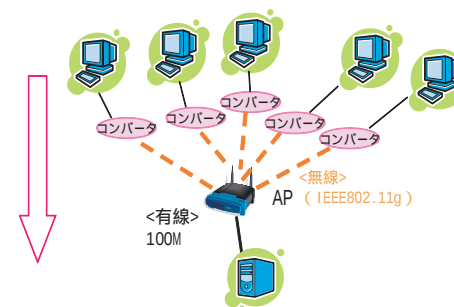


図 5 実験環境

5. 不幸な状態を解消するための解決策

不幸な端末に対する解決策について述べる。前章で述べた通り、EC が、不幸な端末を作り出す原因となっている。従って、対策として、(1)EC ではなく、他の無線 LAN インタフェースを用いる。(2)EC が初期状態に戻るような操作を行う、の 2 点がある。

(1) に関しては、EC でない USB タイプやカードタイプの無線 LAN カードインタフェースなどが市販のもので入手できるため、代替にこれらのインタフェースを用いれば良い。EC 以外の全ての無線 LAN インタフェースで不幸な端末はできないとは現時点では言いきれないが、試してみた USB タイプにおいては、不幸な端末が発生しなかった。これについては、また別途報告する予定である。ただし市販の無線 LAN インタフェースは、WindowsOS や MacOS での使用を想定しているため、Linux などそれ以外の OS では、USB やカードタイプのドライバがすぐには入手できない。そのため、イーサネットポート経由で無線 LAN の通信ができる EC の使用が必須な環境もあるためである。そのため以下、(2)EC を用いて不幸な端末が生じたときの対策を検討する。

前章の実験において、EC にていつまでも前の状態の記憶が維持されてしまっているのが原因ではないかと推定される。内部状態を調べる方法がないため、推定に従って、対処策を講じた。次の 2 つの手法が解決策である。

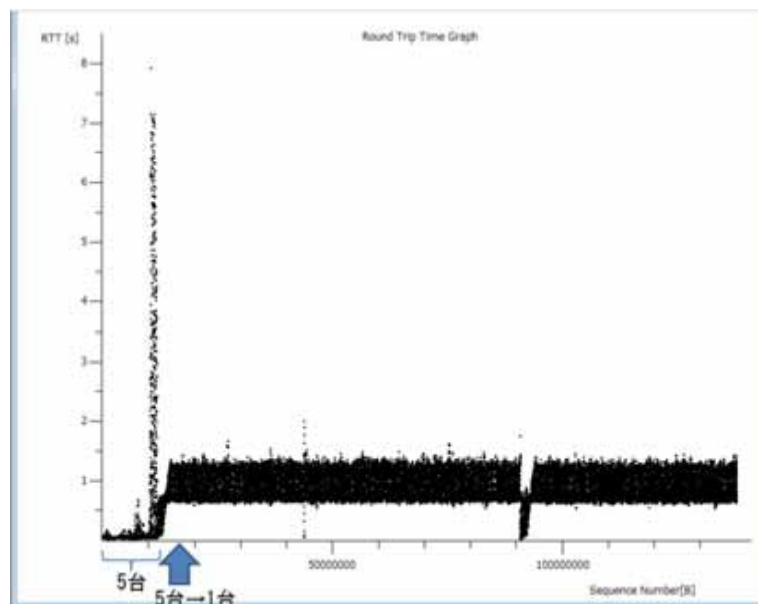


図 6 RTT

(A) 放置：通信を行わず一定時間経過させる。

(B) リセット：電源オフなどで、強制的に初期化を行う。

上記は、以下のような実験に基づく。まず、複数の端末でトラフィックを流して、不幸な端末を生み出す。この不幸な端末以外の端末はトラフィック送出をやめ、不幸な端末 1 台のみ継続して通信を行った。このとき、他のトラフィックが全くない状況であるにも関わらず、不幸な端末は、スループットを上げることができず、また TCP 動作は正常であった。このことから、EC はパケットを受けている限り、記憶が維持されてしまっており、不幸は解消されない。

次に、不幸な端末の EC にトラフィックが全くかからないようにした。具体的には、AP の電源を抜き、AP からのビーコンなどの通信も受けないようにした。さらに、EC のイーサネット側のケーブルも抜いた状態とした。この状態では、約 5 分待てばスループットが回復する。なお、AP と接続したままでもなお EC のケーブルも抜かない場合には、ビーコンや制御パケットなどのデータのやりとりがあるため、スループットの回復には約 30 分の時

間がかかった。

最後に、EC の電源を入れ直した。その結果、スループットを回復することが分かった。

6. おわりに

無線 LAN において、帯域を確保してマルチメディア通信を行うために、実機特有の問題について調査を行った。シミュレーションでは見逃されている機器固有の動作が、実機では帯域確保の大きな障害になることを示し、その要因を解析した。具体的には、競合する他のトラフィックに抑制されて、一度スループットが出なくなってしまった端末は、他のトラフィックのオンオフに関わらず、スループットが上がらない端末（不幸な端末）になってしまうことを確認した。また、この現象の原因は、無線 LAN とイーサネットをブリッジするイーサネットコンバータという機器であることを突き止めた。このイーサネットコンバータが記憶している「状態」を機器のリセットなどで初期化することで、不幸な端末は、不幸ではない（元の）状態に戻せることを確認した。

不幸な端末のメカニズムが明らかになったことから、端末や AP が移動する環境において後から入ってくる移動端末の帯域を確保できる可能性があるため、今後はこのような状況における無線 LAN の QoS 制御について検討していきたい。

参考文献

- 1) 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, DICO2010, 2010 年 7 月
- 2) 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.
- 3) Yumi Hirano, Tutomu Murase: Evaluation of Packet Loss Effect on Throughput Unfairness between TCP Upflows over IEEE802.11 Wireless LAN, "APSITT 2008, 22-24 April 2008
- 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) Wireshark: <http://www.wireshark.org/>
- 7) Iperf: <http://sourceforge.net/projects/iperf/files/iperf/2.0.4source/iperf-2.0.4.tar.gz/download>