

端末過密状態下の無線 LAN における TCP 通信に関する性能評価

山口一郎^{†1} 馬場輝幸^{†1} 安田真人^{†1} S. Rajendran^{†2} 田中淳裕^{†1}

現在、家庭や、オフィス、また、学校、空港、駅などの公共施設など、あらゆる場所において、無線 LAN の整備が進んでいる。また、スマートフォンやタブレット PC など携帯可能な無線 LAN 端末が急速に普及している。今後、無線 LAN 利用者増加に伴い、端末が密集した状態での無線 LAN 利用が増加すると予想される。端末が密集した状態での通信性能、特に、多くのアプリケーションが利用する TCP 通信の性能を明らかにすることは重要であると考えられる。無線 LAN における TCP 通信の性能に関しては、無線での衝突と TCP の輻輳制御が相互に影響して、端末間のスループット公平性が保たれないことが過去の研究で、明らかにされている。しかしながら、過去の研究では、シミュレーションや、端末 10 台規模の評価にとどまっている。そこで、本稿では、端末が密集した状態での TCP 通信の性能評価し、無線の衝突により、TCP 再送タイムアウトが誘発されることで、端末間の不公平が発生することが明らかになった。また、その解決策として、データ分割方式を提案し、端末間のスループット公平性が向上すること実機評価で確認した。

Evaluation of TCP Performance in a Wireless LAN network with Dense Terminals

ICHIRO YAMAGUCHI^{†1} TERUYUKI BABA^{†1} MASATO YASUDA^{†1}
S. RAJENDRAN^{†2} ATSUHIRO TANAKA^{†1}

Currently, Wireless LAN networks have been deployed anywhere such as homes, offices, and public space. And use of smartphones and tablet PCs become rapidly popular. So we expect that users access to the Internet via Wireless LAN network with dense terminals. It is important to understand TCP performance in such networks, since the majority of applications in the Internet use TCP. In the past work, some papers revealed TCP fairness issues among users by simulation and experiments in Wireless LAN network with around only 10 terminals. In this paper, we evaluate TCP fairness in the Wireless network with 40 terminals. We identify that some terminals suspend data transmission for a long time by interaction between CSMA/CA for avoiding collisions and TCP congestion control. We also propose recursive sending small data as a simple solution and evaluate it. We confirmed the proposal improve TCP fairness among 40 terminals.

1. はじめに

無線 LAN を用いたインターネットアクセスサービスが登場して約 10 年が経過している。有線ネットワークと比べて、ユーザ利便性が高いため、オフィス、飲食店、また、学校、駅、空港などの公共施設等、あらゆる場所において、無線 LAN の整備が進んでいる。さらに、近年、スマートフォンやタブレット PC など携帯型無線 LAN 端末が、急速に普及している。今後、さらに無線 LAN の利用が増加することが予想される。それに伴い、端末が密集した状態での無線 LAN 利用が発生すると考えられ、このような端末過密状態での通信性能、特に、多くのアプリケーションが利用する TCP 通信に関する性能を明らかにすることは重要であると考えられる。

無線 LAN における TCP 通信性能評価に関して、過去、様々な研究が行われている。特に、無線 LAN アクセスポイントに複数の端末が接続し、各端末から無線 LAN アクセスポイントに対して通信（以下、upstream 通信と呼ぶ。

また、逆方向の通信を downstream 通信と呼ぶ。)する場合、端末間のスループット公平性が保たれないという問題をシミュレーションおよび、実験によって明らかにしている [1-5]。公平性が保たれないということは、各端末が、均等に帯域を利用できないということである。これは、802.11 で採用されている衝突回避のため CSMA/CA と TCP の輻輳制御が相互に影響して発生すると考えられている。[3-5]は、さらに、無線 LAN アクセスポイントでの TCP ACK ロスが公平性に大きく影響を与えると指摘している。[3]は、バッファオーバーフローを抑制するため、TCP でのデータ送信レートを調整する広告ウィンドウサイズをバッファサイズに応じて設定すべきだと指摘している。[4,5]は、別の解決策として、QoS 制御可能な 802.11e を用いて、MAC 層で、TCP ACK パケットを優先して送信する方式を提案している。いずれの研究も、シミュレーションや、10 台程度の実機端末を利用した評価にとどまっている。

そこで、我々は、端末過密環境下での無線 LAN における TCP 通信の性能を明らかにするため、1 つの無線 LAN アクセスポイントに 40 台の実機端末を接続して、TCP 通信の性能評価を行う。また、公平性を改善する方式として、アプリケーションでのデータ分割配信方式を提案し、評価

^{†1} NEC クラウドシステム研究所
Cloud System Research Laboratories, NEC Corporation
^{†2} SRM University

を行う。

本稿の構成は、以下のようになっている。2 節では、無線 LAN での衝突回避の動作、TCP の輻輳制御について述べ、3 節では、端末過密環境での TCP 通信の性能評価の結果を示し、結果の分析を行う。4 節では、3 節で得られた結果から端末間のスループット公平性を改善するデータ分割配信方式を提案し、評価を行う。5 節で、まとめと今後の課題について述べる。

2. 無線 LAN 通信での問題

無線 LAN 通信において、802.11 で採用されている CSMA/CA による衝突回避の制御と、TCP の輻輳制御が相互に影響し、極端にスループットを低下させてしまう端末が発生するため、公平性が保たれない。

まず、衝突回避の動作について説明する。無線 LAN 通信では、半二重通信が行われる。したがって、ある瞬間に無線 LAN アクセスポイントと通信できる端末は、1 台に限られる。複数の端末が、同じ周波数を使い同じタイミングでフレームを送信すると、フレーム同士が衝突し双方ともフレームの転送に失敗する。このようなフレーム同士の衝突を避けるために、802.11 では、通信端末は絶えず使用する周波数の信号を検出している。そして、端末は、他の端末がフレーム送信中の間は待機しておく。図 1 は 1 台の無線 LAN アクセスポイントに対して、3 台の端末が接続しているときのフレーム転送の順序を表している。端末 1 が通信中の場合、端末 2 と端末 3 は、フレームを送信せずに待機している。さらに 802.11 では、フレーム転送完了を検出した後に乱数に応じた待ち時間経過後にデータ送信を開始する。この乱数は端末ごとに自由に決まるため、フレームの送信タイミングをずらし、フレームの衝突を防いでいる。しかし、まれに端末同士で乱数が近い値になると、図 1 の端末 2 と端末 3 のように送信タイミングが重なりフレーム同士の衝突が発生してしまう。このような衝突が生じた場合は、双方の端末は、衝突を検出した後に再度乱数を生成し、それぞれの乱数に応じた時間の経過を待ってフレームを再送する。1 つの無線 LAN アクセスポイントに多数の端末が接続する場合、衝突が発生する確率が高なることで、端末は、長時間待機状態に陥る可能性がある。

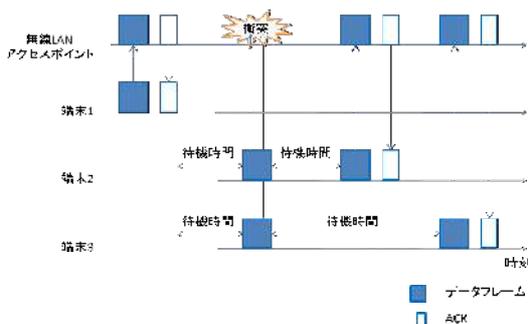


図 1. 無線 LAN における衝突

次に、TCP の輻輳制御について説明する。TCP は、TCP ACK 受信毎に輻輳ウィンドウを計算して、送信レートを調整している。図 2 は、データ転送開始からの輻輳ウィンドウの変化の様子を表している。最初は、スロースタートフェーズと呼ばれる状態で、送信側は、TCP ACK 受信毎にウィンドウサイズを 1 セグメントずつ増加させる。この時、輻輳ウィンドウは、指数関数的に増加する。その後、ある閾値を越えると、輻輳回避フェーズと呼ばれる状態になり、送信側は、TCP ACK 受信毎に 1/2 (更新直前の輻輳ウィンドウサイズ) ずつ増加させる。この時、輻輳ウィンドウは、線形で増加する。また、送信側は、セグメントのロスを検出すると、輻輳ウィンドウサイズを減少させる。ロス検出方法は、2 つのパターンがある。同じセグメントを要求する複数の TCP ACK (重複 TCP ACK) を受信する場合と、送信したセグメントに対する TCP ACK を一定時間経過しても受信しない (再送タイムアウト) 場合である。前者の場合、送信側は、輻輳ウィンドウを半減させる。後者の場合、送信側は、1 セグメント分まで輻輳ウィンドウサイズを減少させる。また、再送タイムアウトが発生すると、再送タイムアウト時間は、2 倍になる。したがって、再送セグメントがロスすると、さらに再送に時間を要する。このように、TCP 再送タイムアウトが発生した場合には、著しく送信レートが減少する可能性がある。

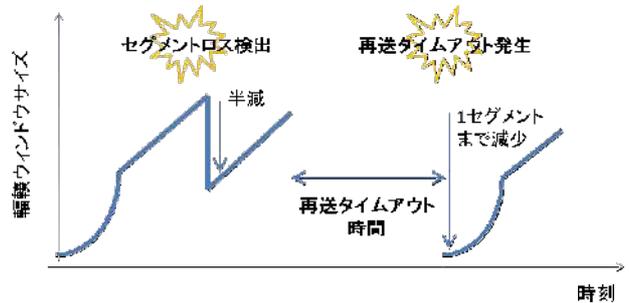


図 2. TCP の輻輳制御

したがって、多数の端末が 1 つの無線 LAN アクセスポイントに接続した場合、衝突回避のために長時間待機させられる端末が多くなる可能性が高く、さらに、長時間待機させられた場合、TCP で再送タイムアウトが発生して送信レートを著しく低下させる。一方、衝突回避においてもデータ送信の権利を得られた端末は、通信経路で輻輳が発生していなければ、送信レートを増加させる。よって、端末間でスループットの公平性が保たれない問題が生じると考えられる。

3. 性能評価と分析

端末が密集した無線 LAN ネットワークにおいて、downstream 通信および、upstream 通信について、各端末の通信性能および、端末間の公平性について評価する。

3.1 実験システム

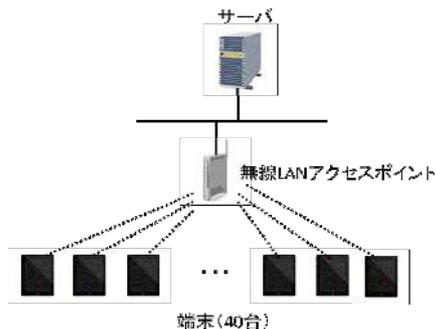


図3. 実験システム

図1に示すような無線LANネットワークを構築した。サーバと無線LANアクセスポイント間は、1Gbpsの有線ネットワークで接続し、端末と無線LANアクセスポイント間は、802.11gを用いて無線接続する。1台のサーバと40台の端末間でトラフィックジェネレータツール Iperf を用いて通信を行い、評価を行う。実験で用いたTCPの輻輳制御アルゴリズムは、Linux OSで採用されているCubic TCPである。端末および、サーバのスペックは、表1に示す通りである。

表1. 実験機器スペック

サーバ	CPU	Xeon E3-1220 (3.1GHz, Quad Core)
	Memory	8GB
	OS	Linux kernel 3.2.0-23-generic
端末	CPU	AMD C-60 Processor (1.0GHz)
	Memory	2GB
	OS	Linux kernel 3.2.0-23-generic

実験前に、無線LANアクセスポイントの性能を調査するために、サーバと1台の端末間で、TCPコネクションを1本開設し、バルク型トラフィックを30秒間発生させた。downstream通信、upstream通信で、それぞれ10回試行し、その平均値を表2に示す。双方とも801.11gでの理論値に近いTCPスループット値が得られている。

表2. 無線LANアクセスポイントの性能

downstream 通信	upstream 通信
21.6 [Mbps]	20.7 [Mbps]

3.2 評価

今後、ユーザは、スマートフォンやタブレットPCを用いて、動画配信等、大容量のコンテンツを送受信するケースが増えることが予想される。そこで、サーバー端末間において、10MBのデータ転送を行い、各端末のTCP通信性能および、端末間での公平性について評価する。本評価で

は、無線LANアクセスポイントに接続する端末台数を、10, 20, 30, 40台に変化させる。以下、downstream通信および、upstream通信の評価結果を示す。

downstream 通信

図4は、サーバから端末に対して、同時にデータを転送開始した時の端末数とデータ転送時間の関係を表している。横軸を端末数、縦軸をデータ転送時間として、すべての端末のデータ転送時間をプロットしている。破線は、衝突が発生しない条件において、表2に示すdownstream通信での帯域を各端末が均等にシェアした場合のデータ転送時間を表している。表3は、各端末数におけるデータ転送時間の最小値、最大値、平均値、また、衝突が発生しない条件において、無線帯域を均等にシェアした場合のデータ転送時間を理想値として示している。また、図5は、区間の幅を10秒として、各端末数におけるデータ転送時間の分布を示している。

図3より、downstream通信では、端末台数に関係なく、無線での衝突の影響がなく、かつ、端末間で無線帯域をシェアした場合のデータ転送時間と同等の結果が得られている。端末台数が20台を越えると、データ転送時間が少し大きくなっている。端末数が増加するにつれて、輻輳が発生しやすくなり、重複TCP ACKによるロスが増える、または、TCPタイムアウトが発生していると考えられる。

また、表3、図5を見ると、いずれの端末台数においても、データ転送時間の最小値と最大値の差は、10秒程度で、かつ、平均値に近い値となっている。また、理想値とも近い値と言える。

したがって、downstream通信においては、無線での衝突の影響がなく、かつ、端末間で公平に無線帯域をシェアしてTCP通信が行われている。

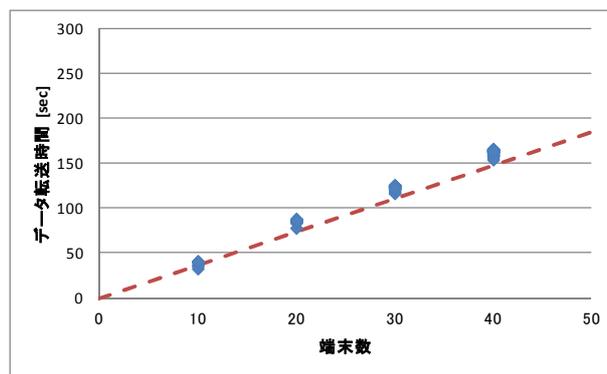


図4. downstream通信での端末数とデータ転送時間の関係

表3. データ転送時間（最小値・最大値・平均値）

端末数	最小値 [sec]	最大値 [sec]	平均値 [sec]	理想値 [sec]
10	33	42	39	37
20	78	89	85	74
30	117	126	124	111
40	154	167	163	148

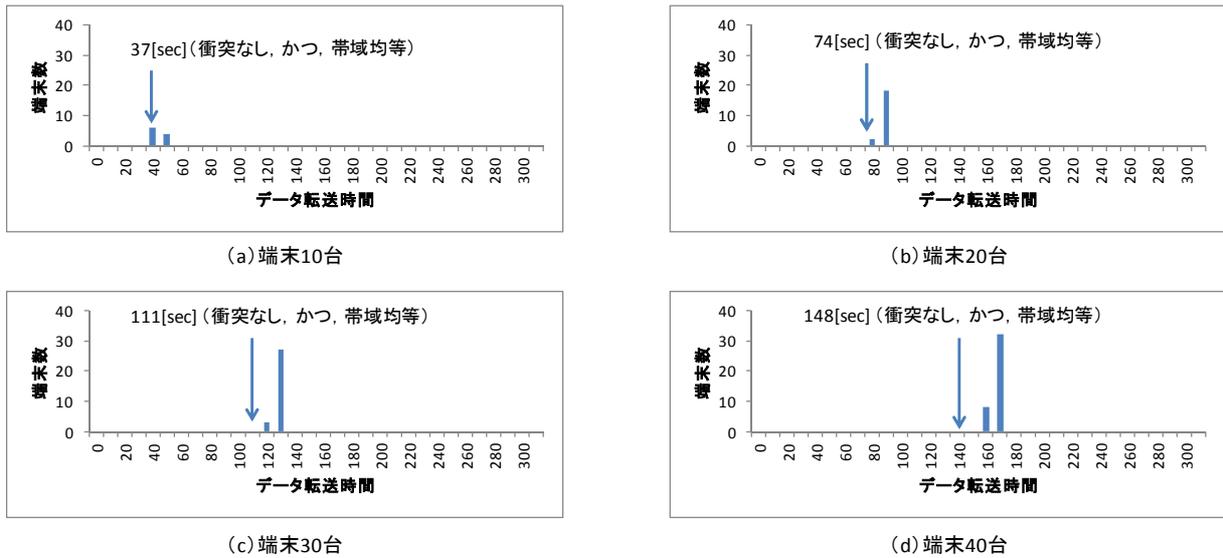


図5. データ転送時間の分布 (downstream通信)

upstream 通信

図 6, downstream 通信の場合と同様に, 端末からサーバに同時にデータ転送を開始した時の端末数とデータ転送時間の関係を示している. 破線は, downstream 通信の場合と同様に, 衝突が発生しない条件で, 表 2 に示す upstream 通信での帯域を各端末が均等にシェアした場合のデータ転送時間を表している. 表 4 も同様に, 各端末数におけるデータ転送時間の最小値, 最大値, また, 衝突が発生しない条件で, 無線帯域を均等にシェアした場合のデータ転送時間を理想値として示している. 図 7 は, 区間の幅を 10 秒として, 各端末数におけるデータ転送時間の分布を示している.

図 6 より, 端末数 10 台の場合では, downstream 通信の場合と同様, 衝突の影響がなく, 10 台の端末が無線帯域を均等にシェアした場合のデータ転送時間とほぼ同等の結果が得られている. それに対して, 端末数 20 台以上の場合は, 表 4 の理想値に対して短い時間でデータ送信を終える端末と, 長い時間を要する端末が存在している. データ転送時間の分布にばらつきがあることが分かる.

また, 表 4, 図 7 を見ると端末数 10 台の場合では, downstream 通信の 10 台のときとほぼ同じ結果が得られていることが分かる. それに対して, 端末数 20 台以上の場合は, 表 4 より, 端末 20 台で, 最大値と最小値の差が約 1 分, 端末 30 台では約 2 分, 端末 40 台では約 3 分と, 端末台数が多くなるにつれて, データ転送時間の分布の幅が広がっている. さらに, 図 7 を見ると, 衝突の影響がなく, 無線帯域を均等にシェアした場合のデータ転送時間よりも, 短い時間に分布のピークが存在していることが確認できる.

したがって, upstream 通信の場合, 端末数 10 台では, 衝突の影響がなく, 帯域を均等にシェアできており, 端末間

の公平性が保たれる. 端末数が 20 台を以上になると, 無線での CSMA/CA の衝突回避制御により, データ送信の権利を得られた端末は, 一定以上のスループットを維持してデータ送信を行えるが, 待機させられる端末は, TCP タイムアウトが発生して, スループットが著しく低下し, 端末間での公平性が保たれなくなると考えられる.

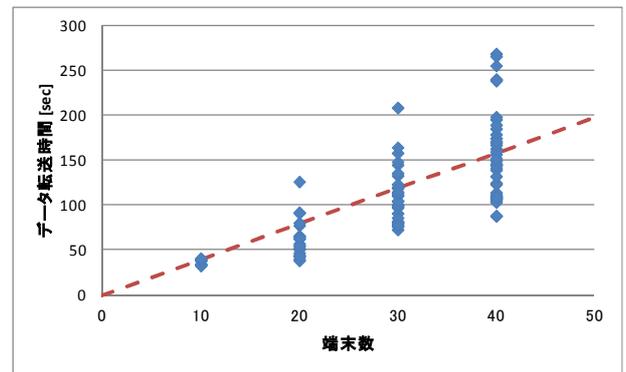


図 6. upstream 通信での端末数とデータ転送時間の関係

表 4. データ転送時間 (最小値/最大値/平均値/理想値)

端末数	最小値 [sec]	最大値 [sec]	平均値 [sec]	理想値 [sec]
10	33	41	36	40
20	39	127	63	79
30	73	209	110	119
40	88	269	157	158

3.3 分析

3.2 節では, downstream 通信と, upstream 通信での性能を示した. 評価の際には, 無線パケットキャプチャデバイスを用いて, パケットキャプチャを行った. パケットキャプチャを開始するタイミングは, データ転送開始の 10 秒前である. 端末 40 台の場合のキャプチャデータを用いて, downstream 通信および, upstream 通信の挙動分析を行う.

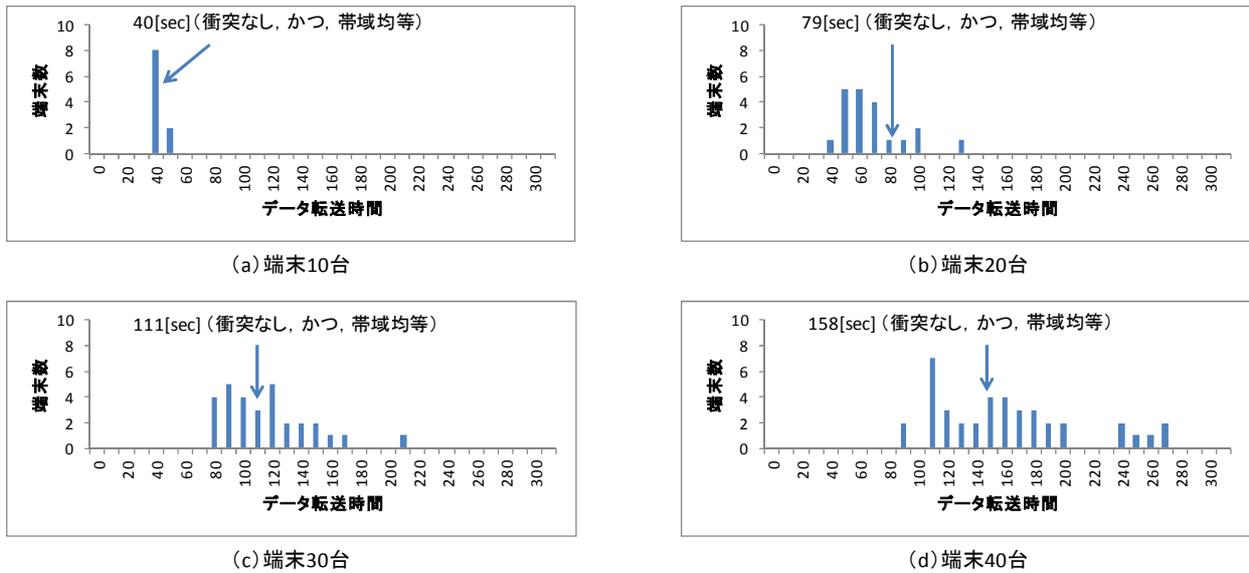


図7. データ転送時間の分布 (upstream通信)

downstream 通信

図8は、横軸を時間、縦軸をスループットにして、40端末のスループットの変化を示したものである。平均スループットが、約500Kbpsであることから、40端末で、表2に示している21.6Mbpsの帯域を均等にシェアしていることが分かる。スループットが0Kbps付近まで減少している端末も存在することから、図4に示した通り、衝突が発生しない場合において、各端末が均等に無線帯域をシェアする場合のデータ転送時間に比べて、若干大きな値が得られていることが分かる。

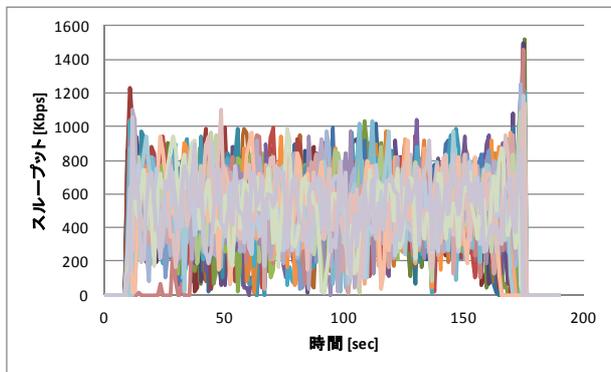


図8. スループットの変化 (downstream 通信, 端末40台)

upstream 通信

図9は、downstream 通信の場合と同様、横軸を時間、縦軸をスループットにして、スループットの変化を示したものである。約130秒以降において、約23Mbpsのスループットでデータ転送を行っている端末が確認できる。キャプチャデータを確認したところ、本端末は、無線での衝突とTCP再送タイムアウトの頻発により、長時間待機状態にあった端末である。図7(d)と、キャプチャ開始時刻が、データ転送の10秒前であることから、130秒までに12台の端

末がデータ転送を終了している。無線帯域をシェアする端末数が減少することで、待機状態にあった端末が、データ送信機会を得ることでき、23Mbpsという高いスループットが得られたと考えられる。

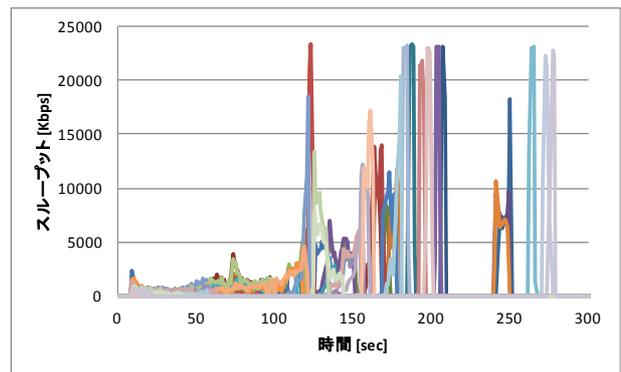


図9. スループットの変化 (Upstream 通信, 端末40台)

無線での衝突と、TCPの再送タイムアウトの影響を確認するために、表4の端末数40台の時の最小データ転送時間と、最大データ転送時間の端末のスループットの変化を図10、図11に示す。最小データ転送時間の場合、データ転送終了まで500Kbps以上のスループットで通信できていることが分かる。本端末では、衝突が発生しなかったため、TCPの再送タイムアウトが発生せず、高いスループットを維持できたと考えられる。それに対して、最大データ転送時間の場合は、データ転送開始後、約20秒後にTCPタイムアウトが発生している。その後、4回連続でTCPタイムアウトが発生し、データ転送開始後、約260秒後まで、ほぼデータが送信できない状態が継続した。また、端末40台のうち、31台の端末において、複数回TCP再送タイムアウトが発生していることを確認した。

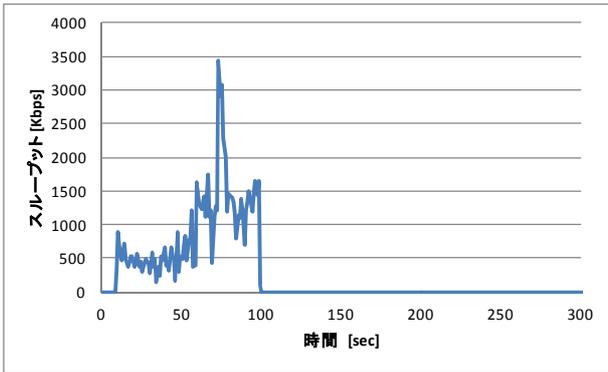


図 10. スループット変化 (最小データ転送時間の場合)

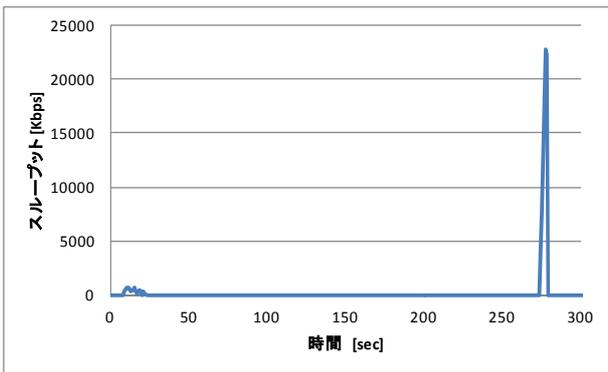


図 11. スループット変化 (最大データ転送時間の場合)

したがって、downstream 通信では、無線での衝突の影響がなく、端末間で均等に帯域をシェアして通信できていることが確認できた。一方、upstream 通信においては、無線の衝突の影響でデータ転送を待機させられ、TCP 再送タイムアウトを引き起こす端末と、衝突が発生しない端末が存在するため、端末間でのスループット公平性が保たれない。また、1 台の無線 LAN アクセスポイントに接続する端末台数が増える、つまり、端末密度が高まるにつれて公平性が悪化することが分かる。

4. データ分割配信

3 節で、upstream 通信において、端末間でのスループット公平性が保たれないことを確認した。その原因の 1 つとしてデータサイズが考えられる。データサイズが大きい場合、衝突を起こさない端末が、輻輳ウィンドウを過度に増加させ、無線帯域を占有する可能性が高い。そこで、衝突を起こさない端末による輻輳ウィンドウの過度の増加を抑制するために、大容量のデータを小さなデータに分割して送信する。輻輳ウィンドウサイズが過度に大きくならないことで、すべての端末が、データ送信する可能性が高くなり、公平性を改善できると考えられる。

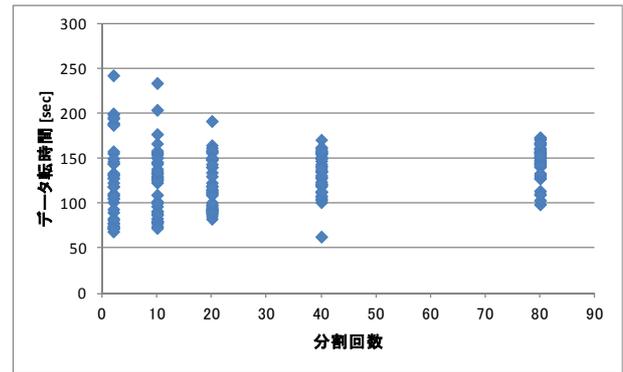


図 12. データ転送時間の分布 (分割配信)

3 節での評価と同様、図 3 の実験システムを用いて、upstream 通信での分割配信の評価を行う。本評価では、端末数を 40 台とし、10MB のデータを 2, 10, 20, 40, 80 に分割して配信を行う。配信では、個々のデータを送信する際、TCP コネクションを開閉して、データ転送を行う。

図 12 は、横軸に分割回数、縦軸にデータ転送時間と取り、分割回数とデータ転送時間の関係を表している。また、図 13 は、データ転送時間の分布を示している。分割回数を大きくするにつれて、データ転送時間の分布の幅が狭まり、

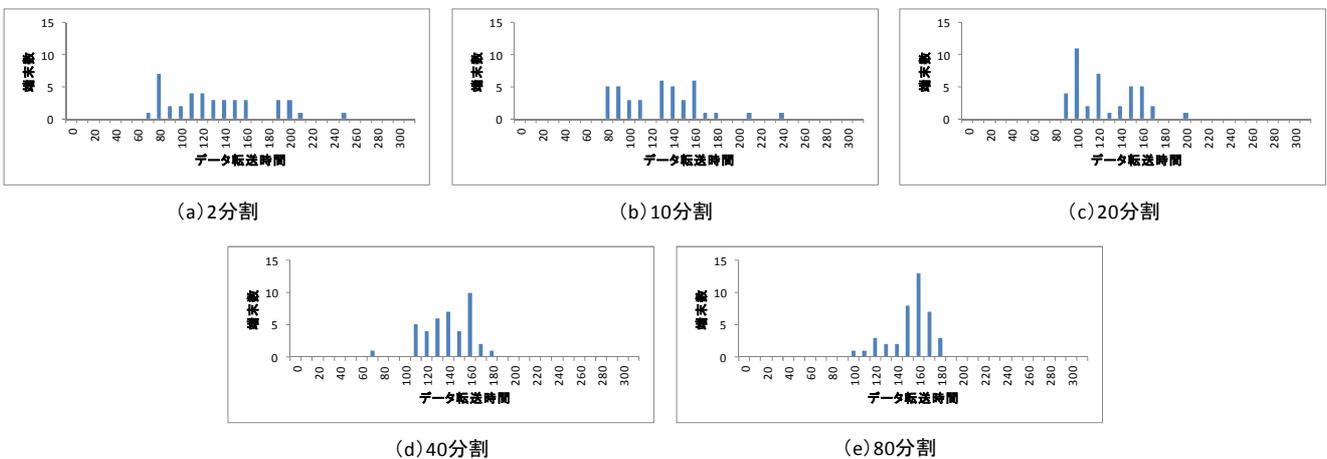


図 13. データ転送時間の分布 (分割配信)

データ転送時間の分布のピーク値が 160 秒付近に近づいていることが分かる。この 160 秒は、表 4 の upstream 通信において、衝突が発生しない条件で、端末が無線帯域を均等にシェアした場合のデータ転送時間 158 秒に近い値である。

したがって、端末が密集した環境での upstream 通信において、データを分割して送信することにより、端末間の公平性を改善できる。

5. まとめ

本稿では、1 台の無線 LAN に 40 台の端末を接続し、端末過密環境下で、TCP 通信性能の評価を行った。downstream 通信に関しては、衝突の影響がなく、端末間で無線帯域を均等にシェアすることを確認した。upstream 通信に関しては、端末密度が高まるにつれて、端末間での公平性が悪化することを確認し、その原因が、無線の衝突により TCP 再送タイムアウトが頻発し、データ送信ができない状態が長時間継続することであることを確認した。また、端末間での公平性を改善する一方式として、データ分割配信の評価を行い、公平性を改善できることを確認した。今後、データ分割配信の定量的な分析を進めていく予定である。

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評価, DEIM Forum, D8-1, 2010 年
- 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, DEIM Forum, D3-5, 2009 年.
- 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, et al.: Experimental Evaluation of TCP Performance and Fairness in an 802.11e Test-bed, SIGCOMM2005, Aug. 2005.
- 5) D.J. Leith, P. Clifford: Using the 802.11e EDCF to Achieve TCP Upload Fairness over WLAN Links, WIOPT2005, pp109-118, Apr. 2005.