

[特別講演] 無線ネットワーク環境に適したトランスポート層プロトコル

長谷川 剛[†] 村田 正幸^{††}

[†] 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

^{††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: [†]hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし インターネットにおいて標準的に用いられているトランスポート層プロトコルである Transmission Control Protocol (TCP) は、多様なネットワーク環境において安定的に通信を行なうことができるプロトコルであるが、各種ネットワーク環境における性能最適化の面では未解決の問題が多く残されている。本稿では、特に無線ネットワーク技術によるアクセスネットワーク環境に着目し、無線ネットワークの様々な特性に対応するためのトランスポート層プロトコルの改善手法について、近年の研究動向や著者を含む研究グループでの研究内容について述べる。特に、受信側 TCP の改良によって達成される、TCP スループットの向上、および公平性の改善手法に関して議論する。

キーワード Transmission Control Protocol (TCP)、無線ネットワーク、輻輳制御機構、スループット、公平性

[Special Talk] Transport-layer optimization methods for wireless network environment

Go HASEGAWA[†] and Masayuki MURATA^{††}

[†] Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: [†]hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Transmission Control Protocol (TCP) is the most popular transport-layer protocol in the current Internet, and it is very robust protocol, meaning that it can provide a stable communication path under various and heterogeneous network environment. However, it sometimes fails to optimize its performance for each network environment. In this report, we especially focus on wireless access network environment and discuss recent research issues, including our previous research works, on transport-layer optimization methods against throughput and fairness problems in wireless networks.

Key words Transmission Control Protocol (TCP), wireless networks, congestion control mechanisms, throughput, fairness

1. はじめに

Transmission Control Protocol (TCP) [1] は現在のインターネットにおけるトランスポート層プロトコルとして最も多くのネットワークアプリケーションが利用しており、TCP トラヒックは現在のインターネットトラヒックの大部分を占めている [2]。また、インターネットは様々な種類のネットワークを取り込むことによって大規模化し、指数関数的な拡大を続けている [3]。その結果、TCP が誕生した 1970 年代当初には想定することができなかったネットワーク環境が発生している。TCP において最も重要な機能はネットワーク輻輳を回避・検知・解

消する輻輳制御機構であり、多様化するネットワーク環境において安定的に TCP による通信を行なうことができる大きな要因である。

TCP がどのようなネットワーク環境においても安定的な通信を行なうことができる、というロバスト性は、逆に言うと、個々のネットワーク環境における性能の最適化の観点では劣る場合があるということの意味する。これは、インターネットがさまざまなネットワークを IP というルーティングプロトコルで接続しているという性質を鑑みると、止むを得ない性質であると考えられる。しかし、特に近年の光ファイバ技術や無線ネットワーク技術によるアクセスネットワーク環境の劇的な進

歩にともない、そのような環境における TCP の性能が着目されることが多くなり、様々な問題が指摘されつつある。例えばネットワークパスの帯域遅延積が非常に大きくなる高速・高遅延ネットワーク環境における TCP の性能低下などが挙げられる [4]。

本稿では、無線アクセスネットワーク環境におけるトランスポート層プロトコル [5, 6] を対象とする。WiFi に代表される無線ネットワーク環境は有線ネットワークとその特性が大きく異なることが知られている。例えば通信路の帯域が上りと下りで共有されることがあることや、通信路のビットエラー率の高さ [7-10]、および通信路環境の時間・空間的変動、それともなうリンク帯域や伝播遅延時間の大幅な変動などが挙げられる。このような環境において TCP を用いたデータ転送を行なうと、様々な問題が発生する。本稿では、このような無線アクセスネットワーク環境における TCP の問題、および性能最適化に関する近年の研究動向をまとめるとともに、著者を含む研究グループにおける研究成果を紹介する。特に、TCP が持つ輻輳制御機構や無線基地局の改良によって達成される、TCP スループットの向上、および公平性の改善手法に関して議論する。

以下、2. 章では無線ネットワーク環境における TCP の性能最適化に関する近年の研究動向をまとめる。3. 章では、著者を含む研究グループの研究成果として、受信側 TCP のみの変更による TCP スループットの改善手法、および受信側 TCP による輻輳制御を用いることによる接続間の公平性の改善手法について述べる。最後に 4. 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

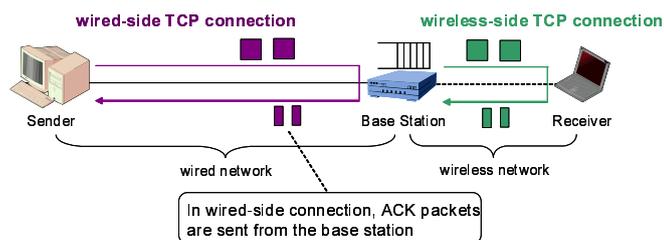
2. 関連研究

2.1 無線ネットワーク環境における TCP の問題点

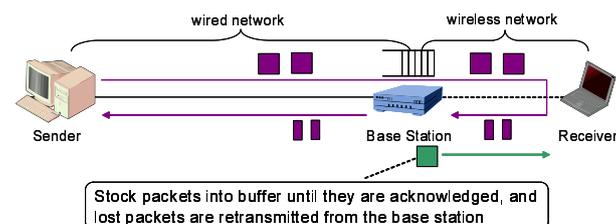
無線ネットワーク環境における TCP の性能評価に関しては、数多くの研究がこれまでにに行われており [5, 6, 11, 12]、それらを通じていくつかの問題が明らかになっている。本節では、それらのうち、輻輳に無関係なパケット廃棄、および接続間の不公平性に関して説明する。

無線ネットワークは有線ネットワークに比べて通信路のビットエラー率が非常に高く、無線リンクロス、すなわち、ビットエラーが原因となるパケット廃棄が頻繁に発生する。一方、TCP はパケット廃棄を検出すると、それはネットワーク輻輳の徴候であると判断し、ウィンドウサイズを減少させることによって、自身のデータ転送速度を低下させる [13]。したがって、無線ネットワーク環境における TCP データ転送において、無線リンクロスによってパケット廃棄が発生すると、不必要なウィンドウサイズの減少が発生し、スループットが低下する。

また、特に無線 LAN 環境において、TCP 接続間のスループットに不公平が生じることが指摘されている [14]。これは、通信路が上りと下りで帯域を共有することによって、無線基地局からクライアント端末へのパケット送信が輻輳を起し、パケット廃棄が発生することに起因している。この時、上りと下りの TCP 接続が混在していると、データパケットが廃棄される接続と ACK パケットが廃棄される接続が存在する。TCP はデータパケットの廃棄と



(a) TCP 接続の分割



(b) TCP 接続のスヌーピング

図 1 無線既知局の改変をとまなう手法

ACK パケットの廃棄に対する輻輳制御機構が大きく異なるため、大きな不公平が発生する。

2.2 既存手法

無線ネットワークにおける TCP 性能の改善に関する研究はこれまで多数行われており、クロスレイヤ制御 [15]、無線基地局との連携手法 [16-22]、送信側 TCP の改変手法 [23-34] などが挙げられる。本章では、それらの中でも特に、無線基地局の改変を必要とするものと、送信側 TCP のみの改変を行なうものに分類し、それぞれの利点と欠点を述べる。また、著者を含む研究グループで提案している、受信側 TCP の改変を行なう手法についても述べる。

2.2.1 無線基地局の改変をとまなう手法

文献 [16-22] などにおいては、有線ネットワークと無線ネットワークの境界に存在する無線基地局を改変し、性能向上が図られている。これは、有線ネットワークと無線ネットワークの特性の違いが与える影響をそれぞれ局所化することによって TCP 性能を向上させるものである。これらの手法は主に、基地局において接続分割を行なうもの、および接続監視 (スヌーピング) を行なうものに分類される。図 1 に、無線ネットワークに存在する端末が受信側 TCP となる場合の、両方式の挙動を示す。

[17] などにおいて用いられている接続分割を行なう手法においては、通常エンド端末間に 1 本設定される TCP 接続を、無線基地局において分割する (図 1(a))。有線ネットワーク側においては、有線側のエンド端末とのデータパケットおよび ACK パケットのやり取りを無線側端末に代わって行なう。こうすることによって、有線ネットワークにおけるデータ転送速度が、無線ネットワーク環境に影響を受けないようにすることができる。また、無線ネットワーク側においては、発生するパケット廃棄を全て無線リンクロスに基づくものと見

なすことができる。また、無線ネットワークで発生したパケット廃棄に対するパケット再送を、基地局から行なうことができるため、再送効率が向上する。コネクション分割手法はオーバーレイネットワークにおける経路制御であるオーバーレイルーティング [35, 36] との親和性も高いと考えられる [37]。

一方、[16, 18] などにおいて提案されているコネクション監視 (スヌーピング) 手法は、廃棄されたパケットの基地局からの再送を、コネクション分割を行わずに実現する手法である (図 1(b))。具体的には、基地局に監視のためのエージェントを導入し、通過する TCP コネクションのデータパケットを、対応する ACK パケットが逆向きに通過するまでキャッシュとして保存し、ACK パケットのシーケンス番号を監視することによって、再送すべきデータパケットを決定する。また、重複 ACK パケットが通過する際には、それを適宜削除することによって、エンド端末からのパケット再送を抑制する。

無線 LAN 環境における TCP コネクション間の不公平性の改善に関しても、様々な手法が提案されている [14, 38-41]。[14, 40] では、受信側 TCP から返信される ACK パケット内の広告ウィンドウサイズの書き換え、あるいは送信される ACK パケット数を制御することにより、コネクション間の不公平を改善している。[38] では、基地局の MAC プロトコルのパラメータを変更することによって、また [39] では、データパケットと ACK パケットを格納するバッファを別々に容易することによって、また [41] では、上下コネクションに対してレート制御を行なうことによって、それぞれ公平性を改善している。

これらの基地局における手法は、無線ネットワーク環境において従来問題となっている、輻輳によるパケット廃棄と無線リンクロスによるパケット廃棄の区別などの、ネットワーク環境の違いを認識する必要がないため、TCP の輻輳制御機構にとって有利となる。しかし、基地局においてコネクション情報の管理やパケットのキャッシュ処理のために必要となるメモリや CPU 資源量の増加が問題となる。また、IPSec や VPN 技術などによりエンド端末間でパケット暗号化が行われる場合には、基地局において TCP ヘッダを参照することができないため、これらの手法を適用することができない。

またこれらの手法は、インターネットにおけるプロトコル設計の際の指針として従来考えられてきたエンドツーエンド原理 [42] に反するものであるが、近年はオーバーレイネットワークやファイアウォールシステムなど、ネットワーク内においてセッションの切断・中継を前提とするシステムが普及しており、導入障壁は以前ほど高くはないと考えられる。

2.2.2 送信側 TCP の改変をとまなう手法

文献 [23-34] などにおいては、送信側 TCP を改造することによって、無線アクセスネットワーク環境における TCP 性能の改善を目指している。これらの手法において主眼となるのは、パケット廃棄や遅延変動などの事象が、無線ネットワーク部分で発生しているのか、有線ネットワーク部分で発生しているのかの区別を、基地局によるコネクション分割や監視を行なうことなく実現することである。これにより、無線ネットワーク部分で発生する無線リンクロスが引き起こす、輻輳ウィンドウサイズの不当な減少を回避し、スループットを維持することが可

能となる。

[28] において提案されているレートベース手法は、送信側 TCP において ACK パケットの到着間隔から受信側端末における平均受信レートを推定し、推定値に基いて輻輳制御機構のパラメータである、スロースタートフェーズと輻輳回避フェーズの切り替えのための閾値を設定する。これにより、無線リンクロスによるパケット廃棄を検出した際に輻輳ウィンドウサイズが小さくなることを防止する、あるいはすばやく回復させることが可能となる。

一方、Jitter-based TCP (JTCP) [32] に代表される手法は、送信側 TCP において検出したパケット廃棄が、無線リンクロスに起因するものか、ネットワーク輻輳によるものかを判別し、適切な制御を行なうものである。それらの手法の多くは、有線ネットワークにおけるネットワーク輻輳によってパケット廃棄が発生する直前に観測される、ラウンドトリップ時間 (Round Trip Time: RTT) の増大を利用し、パケット廃棄を検知した際の RTT 値を参照することによって、そのパケット廃棄が有線ネットワークの輻輳によって発生したものが、無線ネットワークの無線リンクロスによって発生したものを判別する。無線リンクロスによるものと判断した場合には、ウィンドウサイズを減少させないことで、スループット低下を防止する。

無線基地局の改変が必要な方式に比べて、送信側 TCP のみの変更のみで実現することができるこれらの手法は、より導入が容易であると考えられる。特に、クライアントマシンに対してはオペレーティングシステムの自動更新によって、TCP/IP スタックを一斉に置き替えることが可能であるが、P2P アプリケーションを除き、クライアントマシンは一般的に受信側 TCP となることが多いため、その効果は限定的であると考えられる。一方、送信側 TCP となることが多いアプリケーションサーバは、通常オペレータによってソフトウェア等の更新が行われる。この場合、オペレータはサーバの安定的な動作を最優先事項とすることが多いため、TCP/IP スタックを入れ替えることに対しては抵抗が強い。これらのことから、送信側 TCP の改変手法は実際のネットワーク環境には普及しにくい面を持つといえる。

2.2.3 受信側 TCP の改変をとまなう手法

上述した 2 つの手法は、特に無線ネットワークに存在する端末が受信側 TCP となる場合には、効果が小さい、あるいは導入が困難である、という問題点を持つ。それに対して、我々が提案している、受信側 TCP のみを改変することによって実現される手法 [43, 44] は、データ受信を行なうことが多い無線ネットワークに接続される端末に導入することでその効果を発揮することができる。次章でその詳細を述べる。

3. 受信側 TCP の改変による TCP 性能改善

3.1 分割 ACK の送信によるスループット改善

無線リンクロスによるパケット廃棄に対してウィンドウサイズを減少させることによって TCP スループットが低下する問題に対して、受信側 TCP の改変による手法を提案している [43]。具体的には、パケット廃棄が無線リンクエラーによるものと推測される場合において、TCP の ACK パケットを分割送

信する技術 (ACK 分割 [45]) を利用し、低下する送信側 TCP の輻輳ウィンドウをすばやく増加させる。ACK 分割は、TCP のシーケンス番号がバイト単位で管理されるのに対し、輻輳制御が受信した ACK パケットの個数に基づいて行われるという食い違いを利用した手法であり、受信側 TCP において 1 つのデータパケットの受信に対して複数の ACK パケットを返送することにより、送信側 TCP の輻輳ウィンドウを通常よりもすばやく増加させることを可能としている。

提案方式では ACK 分割を行う際、送信側 TCP の輻輳ウィンドウサイズがパケット廃棄発生前の値に回復するために必要な ACK パケットの総数を推測する機構、および ACK パケットの送信レートを制御する機構を導入することにより、有線ネットワークの輻輳や無線アクセスネットワークの上り帯域の圧迫が発生することを回避している。

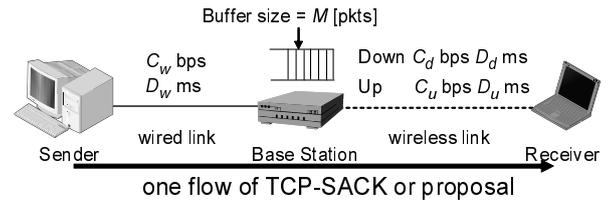
ACK を分割する際の分割数は下記のように決定する。無線リンクロスが発生した際に、輻輳ウィンドウをパケット廃棄発生直前の値まで増加させるために必要な ACK パケットの総数を求めるためには、受信端末において送信端末の輻輳ウィンドウサイズを推測する必要がある。一般的に、輻輳ウィンドウサイズは次式によって推測することができる。

$$cwnd_r = s_rtt \times \bar{p} \quad (1)$$

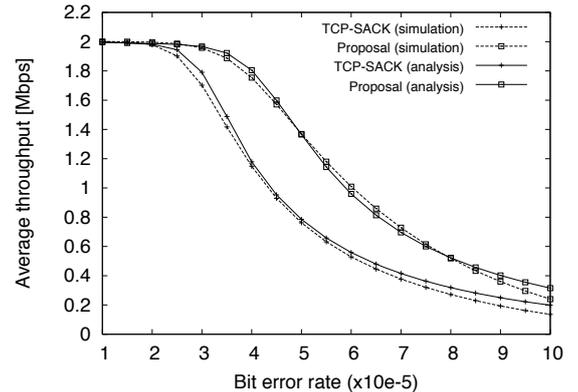
ここで $cwnd_r$ は受信端末での輻輳ウィンドウ推測値、 s_rtt は各データパケットの RTT を平滑化した値、 \bar{p} は平均スループットである。各データパケットの RTT は TCP のタイムスタンプオプションを指定することで、また平均スループットは 1 RTT 内に受信したデータサイズから求めることができる。

パケット廃棄が発生した時、それが無線リンクロスであると判断された場合、 $cwnd_r$ の値をもとに、ACK 分割の総数を決定する。パケット廃棄が発生した直後の送信側 TCP の輻輳ウィンドウは、 $cwnd_r/2$ であると推測できる。また、送信側 TCP の輻輳ウィンドウの更新処理では、ACK パケットを 1 つ受信するごとに $1/cwnd_r$ ずつ増加していくため、同様の更新処理を $cwnd_r/2$ という初期値に対して繰り返し行い、もとの $cwnd_r$ の値に回復した時点での更新処理の回数が、輻輳ウィンドウの回復に必要な ACK パケットの数となる。ACK 分割による輻輳ウィンドウの早期回復中にさらに無線リンクロスが発生した場合、新たに輻輳ウィンドウが減少する分を回復させるために必要な ACK パケットの数を同様に求め、分割総数に加算することによって、一度目の無線リンクロスが発生する直前の輻輳ウィンドウサイズを目標としたウィンドウサイズの早期回復を継続する。ただし、輻輳ロスが発生したと判断した場合は、さらなる輻輳を回避するため ACK 分割を中止する。

図 2 に、提案手法である ACK 分割手法を用いた場合の TCP 性能評価結果を示す。評価に際しては、図 2(a) に示すネットワークプロロジにおいて、パラメータを $(C_w, D_w, C_d, D_d, C_u, D_u, M) = (10 \text{ Mbps}, 45 \text{ ms}, 2 \text{ Mbps}, 1 \text{ ms}, 384 \text{ Kbps}, 1 \text{ ms}, 50 \text{ pkts})$ と設定し、無線ネットワーク区間のビットエラー率を変化させた。図 2(b) には、ns-2 [47] によるシミュレーション結果と共に、[46] において行った提案手法のスループット解析の結果を示している。図から、スループット解析結果がシミュレーション結果とほぼ一致していることがわかる。また、提案手法



(a) ネットワークプロロジ



(b) シミュレーションおよび解析結果

図 2 分割 ACK 手法による TCP スループット評価 [46]

を用いることによって、無線ネットワーク環境における TCP スループットを最大で約 100% 改善することができることがわかる。

3.2 受信側 TCP の輻輳制御による公平性改善

[44] において我々の研究グループでは、無線 LAN 環境において発生する TCP コネクション間の不公平性を改善するために、受信側 TCP において送信側 TCP と同様の輻輳制御を行なうことを提案している。

無線 LAN 環境においては、通常アクセスポイントとクライアント端末は等しい送信機会を持つため、クライアント端末数が多い環境においては、アクセスポイントからのパケット送信が輻輳を起こす。クライアント端末が送信側 TCP になるデータ転送 (上りコネクション) が行われている場合、アクセスポイントにおいて ACK パケットの廃棄が発生する。しかし、TCP は ACK パケットの廃棄に対しては輻輳制御を行わないため、ウィンドウ内の ACK パケットが全て廃棄されてタイムアウトが発生するまでウィンドウサイズを増やし続ける。このことが、上りコネクション間のスループットの不公平や、上下コネクション間のスループットの不公平を発生させる。

これらの不公平性は、ACK パケットが大量に廃棄される環境においても、TCP が輻輳ウィンドウを大きくし続けることが主な原因である。そこで、提案手法では、ACK パケットの損失に対して輻輳制御を行う。通常のデータパケットの損失に対する輻輳制御は、3 つの重複 ACK の受信あるいはタイムアウトの発生によって行われる。これに対して、ACK パケット

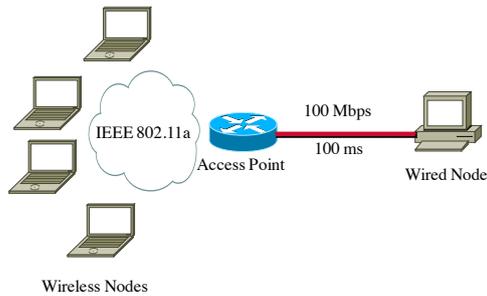


図 3 受信側 TCP の輻輳制御による公平性改善手法の評価のためのネットワークトポロジ[44]

の損失に対する輻輳制御は、送信側 TCP が受信する ACK パケットのシーケンス番号を監視することで行う。受信した ACK パケットのシーケンス番号が 1 パケット分ずつ増加する場合は ACK パケットは廃棄されていないと判断し、また、シーケンス番号の増加が 2 以上である場合は ACK パケットが損失したと判断する。このとき、シーケンス番号の増加幅を廃棄された ACK パケット数として計上する。さらに、1 RTT 中に観測された ACK パケットの損失数が閾値以上である場合に、輻輳が発生していると判断する。このとき、1 RTT の間、輻輳を検出していないか待機する。具体的には、現在受信している最大シーケンス番号より小さいシーケンス番号の ACK パケットを受信した場合には、パケット順序の入れ替えなどによる誤検出があったと認識し、ACK パケットの損失数から 1 パケット分差し引く。また、データパケットの損失を検出した場合には、その後の 1 RTT の間は、ACK パケットの損失数の計上を行わない。輻輳を検出すると、現在の輻輳ウィンドウサイズを半減する。

図 4 は、図 3 に示すネットワークトポロジにおいて、上り TCP コネクションを 8 本、下り TCP コネクションを 8 本用いた場合における、各 TCP コネクションの平均スループットに関するシミュレーション結果を示している。図には、通常の TCP を用いた場合 (図 4(a))、[38] の手法を用いた場合 (図 4(b))、[39] の手法を用いた場合 (図 4(c)) のシミュレーション結果を合わせて示している。図より、通常の TCP を用いた場合、および既存手法を用いた場合には、上りコネクション間、あるいは上りと下りのコネクション間に不公平性が発生しているが、提案手法においては高い公平性が実現されていることがわかる。

4. まとめと今後の課題

本稿では、無線ネットワーク環境における TCP データ転送の性能に着目し、性能劣化が発生する原因、および問題点の改善手法に関して、近年の研究動向と著者を含む研究グループの研究成果をまとめた。本稿では紙面の都合上含めることはできなかったが、他にも、無線アドホックネットワークのような通信路が極めて不安定なマルチホップ環境や、IEEE 802.16 (WiMAX) に代表されるような、時分割制御によって無線資源を共有するような環境における TCP 性能などについても研究が行われている。

また、現在盛んに研究が行われている、ソフトウェア無線技

術やコグニティブ無線技術などによって実現される無線ネットワーク環境は、これまでの無線ネットワークとは異なる性質を持つことが考えられる。このような環境において TCP を用いてデータ通信を行った場合の性能評価などが今後の課題として挙げられる。

文 献

- [1] J. B. Postel, "Transmission control protocol," *Request for Comments 793*, Sept. 1981.
- [2] M. Fomenkov, K. Keys, D. Moore, and K. Claffy, "Longitudinal study of Internet traffic in 1998-2003," in *Proceedings of Winter International Symposium on Information and Communication Technologies (WISICT 2004)*, Jan. 2004.
- [3] Hobbes' Internet timeline v8.2. available at <http://www.caida.org/home/>.
- [4] 長谷川剛, 村田正幸, "高速・高遅延ネットワークのためのトランスポート層プロトコル," 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2006-169), vol. 106, pp. 41-46, Feb. 2007.
- [5] F. Lefevre and G. Vivier, "Understanding TCP's behavior over wireless links," in *Proceedings of Communications and Vehicular Technology*, pp. 123-130, Oct. 2000.
- [6] V. Tsaoussidis and I. Matta, "Open issues on TCP for mobile computing," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, pp. 3-20, Feb. 2002.
- [7] E. S. Chang and R. Taborek, "Recommendation of 10e-13 bit error rate for 10 gigabit ethernet," in *Proceedings of IEEE802.3 high speed study group July 1999 plenary week meeting*, Jul. 1999.
- [8] IEEE, "IEEE standard for local and metropolitan area networks: overview and architecture." IEEE Std 802-2001, Dec. 2001.
- [9] C. H. Nam, S. C. Liew, and C. P. Fu, "An experimental study of ARQ protocol in 802.11b wireless LAN," in *Proceedings of Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2002)*, Oct. 2002.
- [10] 3GPP, "Services and service capabilities." Technical Specification TS 22.105 v6.2.0 (2003-6), Jun. 2003.
- [11] Y. Tian, K. Xu, and N. Ansari, "TCP in wireless environments: Problems and solutions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, pp. 27-32, Mar. 2005.
- [12] A. Eshete, A. Arcia, D. Ros, and Y. Jiang, "Impact of WiMAX network asymmetry on TCP," in *Proceedings of IEEE WCNC 2009*, Apr. 2009.
- [13] V. Jacobson, "Congestion avoidance and control," in *Proceedings of SIGCOMM '88*, pp. 314-329, August 1988.
- [14] S. Pilosof, R. Ramjee, D. Raz, Y. Shavitt, and P. Sinha, "Understanding TCP fairness over wireless LAN," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003*, vol. 2, pp. 863-872, Mar. 2003.
- [15] A. Shadmand and M. Shikh-Bahaei, "TCP dynamics and adaptive MAC retry-limit aware link-layer adaptation over IEEE 802.11 WLAN," in *Proceedings of CNSR 2009*, May 2009.
- [16] F. Sun and L. S. C. Li Victor O. K., "Design of SNACK mechanism for wireless TCP with new snoop," in *Proceedings of IEEE WCNC 2004*, Mar. 2004.
- [17] A. Bakre and B. R. Badrinath, "I-TCP: indirect TCP for mobile hosts," in *Proceedings of 15th International Conference on Distributed Computing Systems*, pp. 136-143, May 1995.
- [18] H. Balakrishnan, S. Seshan, and R. H. Katz, "Improving reliable transport and handoff performance in cellular wireless networks," *ACM/Baltzer Wireless Networks*, vol. 1, pp. 469-481, Dec. 1995.
- [19] K. Wang and S. K. Tripathi, "Mobile-end transport protocol: an alternative to TCP/IP over wireless links," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 1998*, vol. 3, pp. 1046-1053,

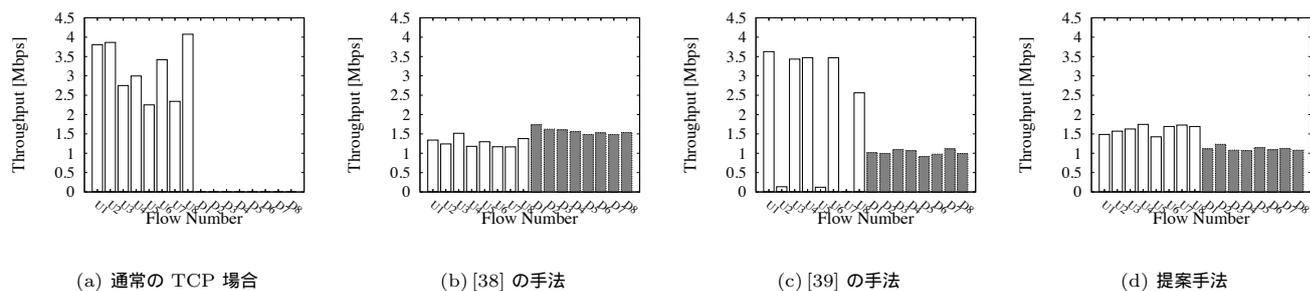


図 4 受信側 TCP の輻輳制御による公平性改善手法の評価結果

- Mar. 1998.
- [20] K. Ratnam and I. Matta, “WTCP: an efficient mechanism for improving TCP performance over wireless links,” in *Proceedings of Third IEEE Symposium on Computers Communications*, pp. 74–78, Jun. 1998.
- [21] H. Balakrishnan and R. H. Katz, “Explicit loss notification and wireless web performance,” in *Proceedings of IEEE GLOBECOM Internet Mini-Conference*, Nov. 1998.
- [22] K. Jin, K. Kim, and J. Lee, “SPACK: rapid recovery of the TCP performance using SPLIT-ACK in mobile communication environments,” in *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference*, vol. 1, pp. 761–764, Sep. 1999.
- [23] K. Xu, Y. Tian, and N. Ansari, “Improving TCP performance in integrated wireless communications networks,” *Computer Networks*, vol. 47, pp. 219–237, Feb. 2005.
- [24] C. Carlo, F. Rosario, and L. Daniele, “The TCP adaptive-selection concept,” *IEEE Systems Journal*, vol. 2, pp. 83–89, Mar. 2008.
- [25] C. C. Cheung, “A new approach to improving end-to-end TCP enhancement schemes over mixed wired/wireless networks,” in *Proceedings of ICT 2008*, June 2008.
- [26] L. Cui, S. J. Koh, X. Cui, and Y. J. Kim, “Adaptive increase and adaptive decrease algorithm for wireless TCP,” in *Proceedings of ICNC 2007*, Aug. 2007.
- [27] F. Ge and L. Tan, “A partial super fast recovery algorithm for fast TCP,” in *Proceedings of AusWireless 2007*, Aug. 2007.
- [28] C. Casetti, M. Gerla, S. Mascolo, M. Y. Sanadidi, and R. Wang, “TCP Westwood: bandwidth estimation for enhanced transport over wireless links,” in *Proceedings of ACM MOBICOM*, pp. 287–297, Jul. 2001.
- [29] C. Liu and R. Jain, “Approaches of wireless TCP enhancement and a new proposal based on congestion coherence,” in *Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan. 2003.
- [30] C. P. Fu and S. C. Liew, “TCP Veno: TCP enhancement for transmission over wireless access networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, pp. 216–228, Feb. 2003.
- [31] K. Xu, Y. Tian, and N. Ansari, “TCP-Jersey for wireless IP communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, pp. 747–756, May 2004.
- [32] E. H. K. Wu and M.-Z. Chen, “JTCP: Jitter-based TCP for heterogeneous wireless networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, pp. 757–766, May 2004.
- [33] A. Capone, L. Fratta, and F. Martignon, “Bandwidth estimation schemes for TCP over wireless networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, pp. 129–143, Jun. 2004.
- [34] N. Parvez and E. Hossain, “Improving TCP performance in wired-wireless networks by using a novel adaptive bandwidth estimation mechanism,” in *Proceedings of GLOBECOM 2004*, vol. 5, pp. 2760–2764, Dec. 2004.
- [35] D. G. Andersen, H. Balakrishnan, M. F. Kaashoek, and R. Morris, “Resilient overlay networks,” in *Proceedings of 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles*, Oct. 2001.
- [36] 長谷川剛, 村田正幸, “オーバレイネットワークにおける経路制御と ISP への影響,” 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2009-15), vol. 109, pp. 17–22, June 2009.
- [37] I. Maki, G. Hasegawa, M. Masayuki, and T. Murase, “Performance analysis and improvement of TCP proxy mechanism in TCP overlay networks,” in *Proceedings of ICC 2005*, May 2005.
- [38] Y. Fukuda and Y. Oie, “Unfair and inefficient share of wireless LAN resource among uplink and downlink data traffic and its solution,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E88-B, pp. 1577–1585, Apr. 2005.
- [39] J. Ha and C.-H. Choi, “TCP fairness for uplink and downlink flows in WLANs,” in *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference 2006*, pp. 1–5, Nov. 2006.
- [40] F. Keceli, I. Inan, and E. Ayanoglu, “TCP ACK congestion control and filtering for fairness provision in the uplink of IEEE 802.11 infrastructure basic service set,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, pp. 4512–4517, June 2007.
- [41] N. Blefari-Melazzi, A. Detti, I. Habib, A. Ordine, and S. Salzano, “TCP fairness issues in IEEE 802.11 networks: Problem analysis and solutions based on rate control,” in *Proceedings of IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, pp. 1346–1355, Apr. 2007.
- [42] J. H. Saltzer, D. P. Reed, and D. D. Clark, “End-to-end arguments in system design,” *ACM Transactions on Computer Systems*, vol. 2, pp. 277–288, Nov. 1984.
- [43] G. Hasegawa, M. Nakata, and H. Nakano, “Receiver-based ACK splitting mechanism for TCP over wired/wireless heterogeneous networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E90-B, pp. 1132–1141, May 2007.
- [44] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, “Performance evaluation and improvement of hybrid TCP congestion control mechanisms in wireless LAN environment,” in *Proceedings of ATNAC 2008*, Dec. 2008.
- [45] S. Savage, N. Cardwell, D. Wetherall, and T. Anderson, “TCP congestion control with a misbehaving receiver,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 29, pp. 71–78, Oct. 1999.
- [46] G. Hasegawa, M. Nakata, and H. Nakano, “Modeling TCP throughput over wired/wireless heterogeneous networks for receiver-based ACK splitting mechanism,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E90-B, pp. 1682–1691, July 2007.
- [47] “Network simulator - ns (version 2).” available from <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.