

## 無線 LAN におけるプローブパケットの到着間隔測定に基づく DCCP CCID3 フローの送信レート推測

星川 雄大<sup>†1</sup> 大塚 裕太<sup>†2</sup> 石原 進<sup>†3</sup>

無線 LAN による通信を行う端末は, AP に接続する端末の台数, 通信レート等によって 1 台あたりの利用可能帯域幅が大きく変動する. そのため, フィードバックに依存したレート制御を用いる場合はハンドオーバーによる急激な利用可能帯域幅の変動にレート制御が追いつかないという問題がある. このような問題を解決する一手法として, 移動先 AP の環境に応じた送信レートに変更してからハンドオーバーを行う手法がある. これまでに田村らにより, Datagram Congestion Control Protocol CCID3 のフローの送信レートとプローブパケットの到着間隔(ジッタ)の関係性を基に, ハンドオーバー後の DCCP 送信レートを予測可能であるとシミュレーションによって示されている. しかし, 実環境実験の結果から, 田村らの使用したパラメータをそのまま用いた場合, ジッタと送信レートの間の相関が低く, 送信レートの予測が困難であることが示されている. 本稿では, 実環境実験と同様のネットワーク構成で, バックグラウンドトラフィックの影響を含めたシミュレーションを行い, 隠れ端末がプローブパケットに与える影響が大きいことを確かめた. さらにシミュレーションに基づいて, 隠れ端末が存在する環境においても正確な送信レート予測が可能なプローブパケットのパラメータを検討し, RTS/CTS を使用する環境では, 最短 MAC フレームを用いて 0.01sec 間隔でプローブパケットを送信し, ジッタ測定をすることで,  $\pm 100\text{kbps}$  程度の精度で DCCP CCID3 の送信レートを推定できることを確認した.

### Predicting sending rate of DCCP CCID3 flows by jitter of probe packets on wireless LANs

TAKEHIRO HOSHIKAWA,<sup>†1</sup> YUTA OTSUKA<sup>†2</sup>  
and SUSUMU ISHIHARA<sup>†3</sup>

On wireless LANs, the available bandwidth for each flow varies according to the number of nodes connected to the access point, offered load, data rate, etc. Therefore, when a node hands over from an idle wireless access point to a congested one, due to the delay of the adaptation of data sending rate by feedback based rate control mechanism, packets of real-time data may suffer excessive

transmission delay. To solve this program, we have proposed a scheme in which a control server notifies a mobile node of a suitable new sending rate according to the estimated available bandwidth at the new access point. Tamura confirmed that sending rate of DCCP CCID3 flows can be estimated by jitter of probe packets. However, the results of experimentations in real environment revealed the difficulty of such estimation using Tamura's scheme and parameters. We conducted comprehensive simulations using similar setting of the experiment in real environment to identify the reason of the difference of Tamura's simulation and the experiment, and confirmed that the main cause was hidden background traffic sources. We also found that we can estimate DCCP CCID3 sending rate in wireless LANs including hidden background traffic sources with about  $\pm 100\text{kbps}$  errors by measuring jitter of minimum size probe packets sent at 0.01 sec interval.

#### 1. はじめに

近年, ノートパソコンや携帯電話といった移動端末の小型化, 通信速度の高速化に伴い, 移動中にテレビ会議や音声配信といったリアルタイム性を有するマルチメディア通信を行う需要が高まっている. このような移動端末は, 遅延や利用可能帯域幅, QoS 制御機構が異なる AP 間を相互にハンドオーバーすることになる. そのため, 急激に変動する通信環境に素早く適応する必要がある.

このようなマルチメディア通信向けのトランスポートプロトコルである DCCP (Datagram Congestion Control Protocol) の CCID3 で採用されている輻輳制御機構 TFRC (TCP-Friendly rate control)<sup>1)</sup> では, 1RTT ごとに受信側から送られてくるフィードバック情報(受信レートやロスイベント率)を基に TCP レート方程式を用いてレートを算出している. そのため, TCP と公平性を保障し, 緩やかなレート変更が可能であるという利点がある反面, フィードバック情報を用いているため, ハンドオーバー前のフィードバック情報がハンドオーバー後にも反映されることに起因する状況急変に対するレート更新の遅れによって, レート設定がハンドオーバー後の環境に対応するのが遅れ, 画像フレームロスが発生するなどの問題がある.

<sup>†1</sup> 静岡大学大学院 工学研究科 システム工学専攻  
Graduate School of Engineering, Shizuoka University

<sup>†2</sup> KDDI 株式会社  
KDDI Corporation

<sup>†3</sup> 静岡大学創造科学技術大学院  
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

筆者らは端末がハンドオーバー後の送信レートを適切に決定するための方法として、予測情報を用いたレート制御手法（予測レート制御手法<sup>2)3)</sup>を提案してきた。この予測レート制御手法では、ハンドオーバーが発生する前にネットワーク側がハンドオーバー先での利用可能帯域幅を予測し、ハンドオーバー端末に通知する。ハンドオーバー端末はハンドオーバー前に予測された送信レートに変更してからハンドオーバーを行う。そのため、高精度な移動先 AP での利用可能帯域幅推定手法が必要となる。

筆者らはこの利用可能帯域幅推定手法として、無線 LAN 基地局下の帯域測定用パケット（プローブパケット）の受信間隔の揺らぎ（ジッタ）を測定することで送信レートを推定する手法を提案している<sup>6)</sup>。理想的な環境でのシミュレーション評価では、ジッタが増えたと送信レートが減少するという強い関係性が確認された。この関係性を用いることで、誤差±200kbps程度で送信レート推定が可能であることを示した。しかし、実環境でのジッタ測定実験では、同一の送信レートが得られる条件下でもジッタの値は広範囲に分布しており、送信レートとジッタの関係性はシミュレーションで得られた関係性に比べて弱く、文献<sup>6)</sup>の手法をそのまま適用した場合には、高精度な送信レートの推定は困難であると示された<sup>7)</sup>。

本稿では、先行研究の実環境実験<sup>7)</sup>で用いられたネットワーク構成をできる限り正確にシミュレーションにより再現し、シミュレーションと実環境実験での結果の差異の要因を考察し、その差異の主要因が隠れ端末であることを示す。次に、バックグラウンドトラフィックの影響を無視できない実環境において高精度で送信レートを推定可能であるジッタ測定が行えるような、プローブパケット送信方法を検討する。

以下 2 章で田村らが提案したプローブパケットの受信間隔揺らぎを用いた予測レート制御手法について述べ、3 章では実環境とシミュレーションで得られる DCCP 送信レートとジッタの関係性の相違点の要因を考察する。4 章では 3 章で得られた相違点の要因となる隠れ端末が存在する場合にもジッタから DCCP 送信レートを高精度で推定できるようなプローブパケットパラメータについて検討する。5 章で無線 LAN における帯域測定に関する研究に触れ、6 章で本稿をまとめる。

## 2. プローブパケットの受信間隔揺らぎを用いた予測レート制御手法

筆者らは、移動端末がハンドオーバーを行う前に、ネットワーク側のサポートによってハンドオーバー先のネットワーク環境にあった送信レートを事前に推測し、これに応じてハンドオーバー前にマルチメディアデータの送信レートの変更を行う予測レート制御手法<sup>2)3)</sup>を提案している。この予測レート制御手法では、移動端末のハンドオーバー発生をネットワーク側の

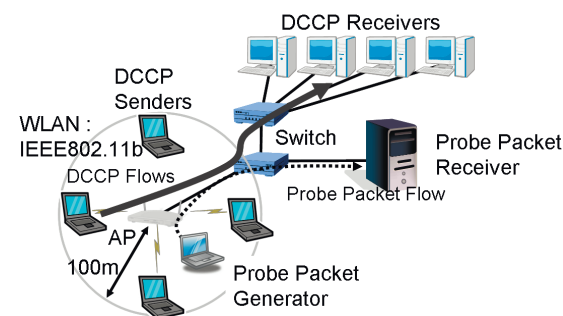


図 1 田村らのシミュレーションに用いられたネットワーク構成

管理サーバが検知する。端末のハンドオーバーが検知されると、管理サーバはその端末がハンドオーバーする先のネットワーク環境を調べ、移動端末のハンドオーバー後の利用可能帯域幅を推定する。その後、管理サーバは、ハンドオーバー発生時刻とハンドオーバー後の送信レートを移動端末に通知する。移動端末は、ハンドオーバー発生前に管理サーバから通知された送信レートに変更し、ハンドオーバーを実行する。これにより、移動端末のハンドオーバー直後の品質劣化を抑制し、かつ、移動先 AP に接続済みの端末に及ぼす悪影響を軽減することができる。

この予測レート制御手法で最も重要になるのはハンドオーバー先での高精度な利用可能帯域幅の推定手法である。近藤らは、IEEE802.11 を利用した無線メッシュネットワークにおいて周期的に送信される UDP データパケットの到着間隔がチャンネルのトラフィック量の増加に伴って揺らぐことを示している<sup>5)</sup>。この特徴に着目し、田村らは無線リンクの受信間隔揺らぎ（ジッタ）を利用した無線 LAN 環境下における DCCP フローの利用可能帯域幅を推定する手法を提案している<sup>6)</sup>。

田村らの方法ではジッタ測定を以下のようにして行う。無線側にいるプローブパケットジェネレータが、UDP を用いて帯域測定用のプローブパケットを定期的に有線側のプローブパケットレシーバに向けて送信する。プローブパケットレシーバはこのプローブパケットの到着間隔の揺らぎを以下の式に従って計算する。 $t_i$  は  $i$  番目のパケット受信時刻である。

$$Interval_i = t_i - t_{i-1} \quad (1)$$

$$Jitter_i = |Interval_i - Interval_{i-1}| \quad (2)$$

田村らはシミュレーションによって DCCP 送信レートとジッタの関係性を評価してい

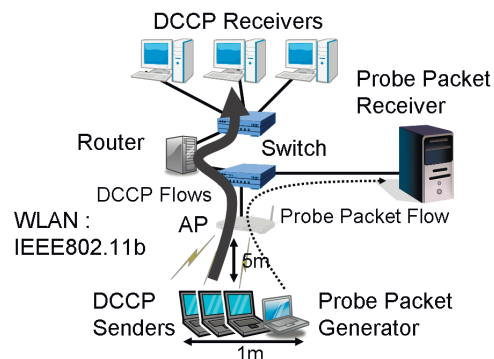
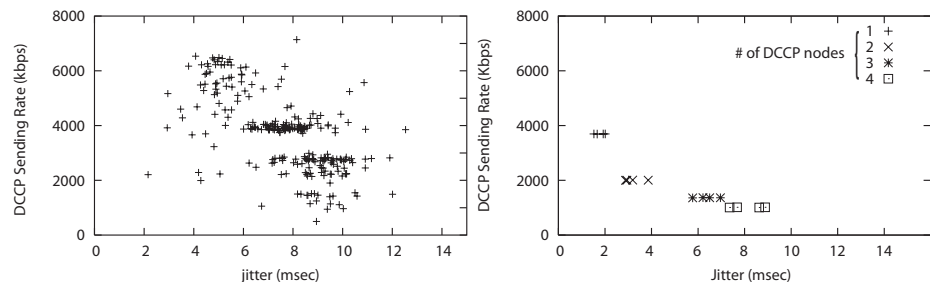


図 2 大塚らの実験に用いられた大学研究室でのネットワーク構成

る．田村らのシミュレーションに用いられたネットワーク構成を図 1 に示す．無線側の端末 1～10 台が有線側の端末に向けて DCCP を用いて通信を行う．これら無線側から有線側に DCCP CCID3 を用いてデータ送信を行う端末を，以下，DCCP 端末と呼ぶ．DCCP 通信の packetsize は 629bytes．プローブパケットの packetsize (UDP ペイロード部のみ，以下同様) は 56bytes，送信間隔は 0.2sec としていた．このシミュレーションの結果，DCCP 端末の数によらず，ジッタと DCCP 送信レートに強い関係性が認められ，ジッタから誤差 200kbps 程度で DCCP 送信レートが推定可能であることが示された<sup>6)</sup>．

大塚らは田村らのシミュレーション条件に近い実環境で DCCP 端末 1～3 台を用いて実験を行い，DCCP 送信レートとジッタの関係性を評価している<sup>7)</sup>．図 2 に実験に用いられたネットワーク構成を示す．DCCP 端末とプローブパケットジェネレータは一箇所に密集しており全ての端末が互いに互いの通信半径内に位置していた．DCCP 端末は iperf を用いて 120 秒間トラフィックを発生させた．無線 LAN でのデータレートは 11Mbps で固定である．ジッタ測定方法は田村らが用いた方法と同様である．ただ，プローブパケットのパラメータは田村らは packetsize 56bytes で送信間隔 0.2sec としていたのに対し，大塚らは packetsize 24bytes，送信間隔 0.1sec としていた．また，田村らのシミュレーションでは RTS/CTS は使用されていないため，実環境実験においても使用されていない．実験は静岡大学研究室で行われた．他の通信の影響を極力避けるため，研究室内で使用されているチャンネルから十分離れたチャンネルを使用し，他の通信があまり行われていないと予想される深夜に測定を行った．この実験の結果は，田村らのシミュレーション結果とは異なり，



(a) 大塚らの実環境実験結果

(b) 再現シミュレーション結果

図 3 大塚らの実験結果と，実験環境をでき限り正確に再現したシミュレーションにおける DCCP 送信レートとジッタの関係

実環境での実験では同一の DCCP 送信レートが得られる条件においてもジッタが広範囲に分布しており，DCCP 送信レートとジッタの関係性は弱かった．このため，田村らの方式そのままではジッタ測定のみによる高精度な送信レートの推定は困難であると結論付けられた．

### 3. 実環境下でのジッタ測定の再現シミュレーション

本章では，大塚らの実環境実験に用いられたネットワーク構成をシミュレーションにより再現し，田村らのシミュレーションと異なる結果となった要因を考察する．

#### 3.1 再現シミュレーション

図 2 のネットワーク構成をできるだけ正確に再現したシミュレーションを行った．シミュレータには OPNET を使用した．DCCP 端末は 1 台～4 台用意した．シミュレーション時間は 150 秒として，通信が安定したシミュレーション開始後 10 秒～150 秒までの観測値を利用して DCCP 送信レートとジッタの平均を計算した．このときの DCCP 送信レートの平均は，特定の 1 台に着目した値であり，全体の平均ではない．プローブパケットのパラメータならびにジッタ測定方法は大塚らの実験と同じである．DCCP 端末，プローブパケットジェネレータ以外の通信は行っていない．また，無線区間でのエラーは衝突によるものとし，その他の要因によるエラーの発生は無いものとしている．

図 3 に 2 章で述べた大塚らの実環境での実験結果と，再現シミュレーションでの DCCP 送信レートとジッタの関係を示す．図 3 (b) のシミュレーション結果では，DCCP 送信レートとジッタの間には強い関係性が見られ，図 3 (a) のような測定ごとに広範囲に値が分布す

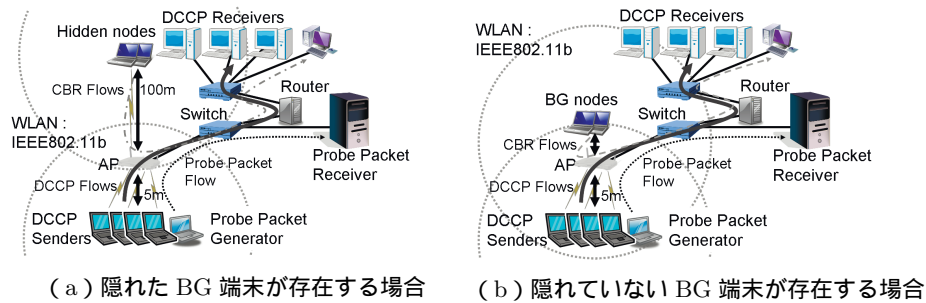


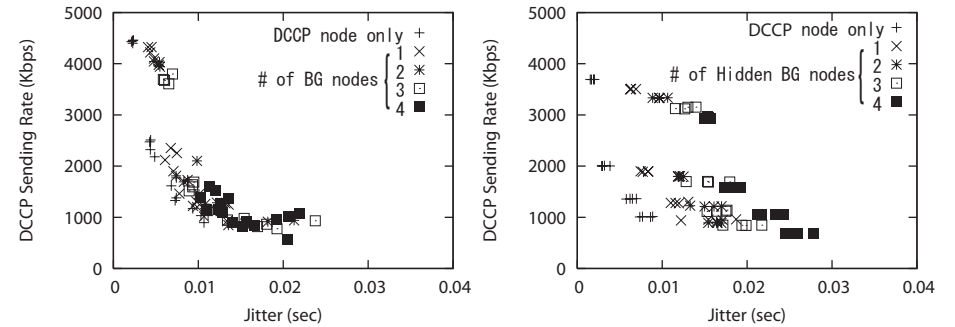
図 4 大塚らの実験環境に BG 端末を追加したネットワークモデル

ということではなかった．大塚らの実験結果で DCCP 送信レートとジッタの関係性が弱まった原因は，実環境では避けられないバックグラウンドトラフィックの影響，あるいはフェージング等によるフレームエラーの影響が大きいと考えられる．

### 3.2 シミュレーションと実環境における結果の違いの要因の検証

大塚らは，実験を深夜に行うなどしてバックグラウンドトラフィックの影響を極力排除していたが，測定場所の近隣には多くの研究室が存在し，他のトラフィックを完全に防ぐことはできない状況であった．田村らは，UDP や TCP を用いて通信を行うバックグラウンドの端末（以下 BG 端末）が存在したとしても DCCP 送信レートとジッタの関係性は維持されることをシミュレーションによって示している．しかし，田村らのシミュレーションで用いられたネットワーク構成は DCCP 端末とプローブパケットジェネレータならびに BG 端末が AP を中心として半径 100m の円上に配置されていた．そのため，BG 端末は，近くの DCCP 端末やプローブパケットジェネレータからは隠れ端末とはならないが，円の反対側に位置する端末からは隠れ端末となる．従って，全体から隠れ端末となる場合に比べ BG 端末と DCCP 端末の通信の衝突確率は低い．一方，大塚らのネットワーク構成は DCCP 端末とプローブパケットジェネレータが一箇所に密集している．そのため，BG 端末が隠れ端末となる場合，DCCP 端末ならびにプローブパケットジェネレータ全てに大きな影響を及ぼすことが予想される．

そこで，図 2 に対して DCCP 端末と同一の AP を用る BG 端末 1~4 台を追加し，これら BG 端末が DCCP 端末から隠れている場合（図 4 (a)）と，隠れていない場合（図 4 (b)）の両方でシミュレーションを行った．各 BG 端末は，UDP を用いて 400kbps の Constant Bit Rate (CBR) で有線側のレシーバと通信を行うものとした．このときの UDP パケッ



(a) 隠れ端末とならない BG 端末が 1~4 台存在

(b) 隠れ端末となる BG 端末が 1~4 台存在

図 5 バックグラウンドトラフィックを追加した場合の DCCP 送信レートとジッタの関係

トサイズは 1024bytes である．その他の条件は 3.1 節で述べた大塚らのネットワーク構成を再現したシミュレーションと同様である．

隠れ端末あるいはそうでない BG 端末が存在した場合の DCCP 送信レートとジッタの関係を図 5 に示す．ここでは，DCCP 端末 1~4 台の場合の測定結果を全てプロットしている．図 5 (a) に示すように，隠れ端末とならない BG 端末を増加させた場合は，BG 端末台数の増加に伴い DCCP 送信レートが減少しジッタが増加している．一方，図 5 (b) に示すように，隠れ端末となる BG 端末を増加させた場合は，BG 端末の台数増加に伴い DCCP 送信レートは大きく変化しないにも関わらず，ジッタのみが増加している．この場合，ジッタが 0.01sec と観測された場合でも BG 端末がない場合には，得られる DCCP 送信レートは 1Mbps 程度であるのに対し，BG 端末が 2 台の場合は，DCCP 送信レートは 3.5Mbps 程度になってしまう．つまり，隠れ端末の有無によって，DCCP 送信レートとジッタの 1 対 1 の関係性が保たれていない．

## 4. プローブパケットに関するパラメータの選定

前章で述べたとおり，バックグラウンドトラフィックの影響を無視できない実環境，特に隠れ端末が存在する環境では，ジッタから DCCP 送信レートを高精度で推定することは困難である．本章では，プローブパケットのパケット長や生成間隔を変更することにより，隠れ端末となる BG 端末が存在する環境においても，DCCP 送信レートとジッタの関係性が

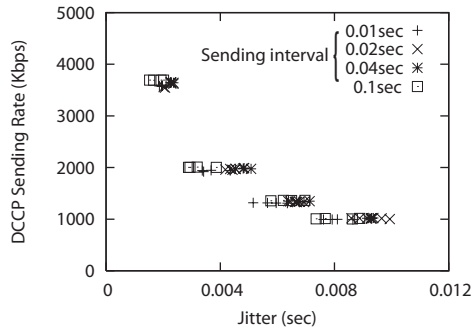


図 6 プローブパケット送信間隔が異なる場合の DCCP 送信レートとジッタの関係

維持されるかどうかを検討する。まず、DCCP 送信レートを推定するためのプローブパケットに求められる要件について述べる。次に、プローブパケットのパラメータを変化させたシミュレーションを行い、DCCP 送信レートとジッタの関係性を維持できるかどうかを評価した。また、RTS/CTS の使用の有無による影響も調べた。

#### 4.1 プローブパケットのパラメータの要件

プローブパケットは帯域測定用に余分に流されるトラフィックである。そのため、他の通信を邪魔してはならない。パケット長が長すぎれば、プローブパケットの伝送時間が増大し、その間、他の端末は通信を行うことができない。また生成間隔が短すぎる場合、ネットワークに送出されるプローブパケットが膨大なものになり、ネットワークに負荷をかける。逆に生成間隔が長すぎる場合、測定時間が短ければ測定されるサンプル数が減り、測定精度が犠牲になる。一方、ジッタ測定時間を長くするとハンドオーバー前の短時間での帯域予測が困難となる。

#### 4.2 プローブパケット生成間隔による影響

隠れ端末が存在する場合でプローブパケットのパラメータを変化させたシミュレーションを行う前に、DCCP 端末のみが存在する場合に、プローブパケット生成間隔の変化に伴って DCCP 送信レートとジッタの関係性が大きく異なるかどうかを確かめる必要がある。そこで、図 2 のネットワーク構成において、プローブパケットのパケット長を 24bytes に固定し、プローブパケット生成間隔を 0.01sec、0.02sec、0.04sec、0.1sec と変化させてシミュレーションを行った。DCCP 端末は 1 台～4 台用意した。シミュレーション時間は 150 秒とし、通信が安定したシミュレーション開始後 10 秒～150 秒の観測値を用いて DCCP 送

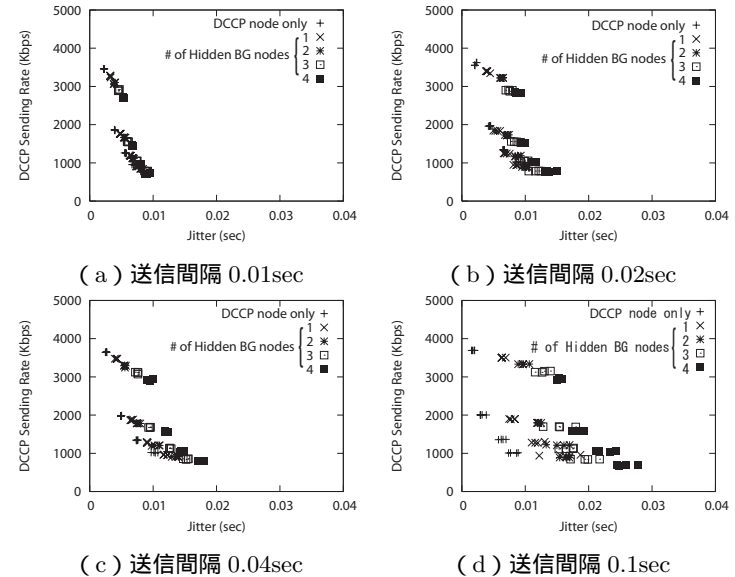


図 7 DCCP 送信レートとジッタの関係 (プローブパケット長 24bytes)

信レートとジッタの平均値を計算した。DCCP 送信レートの平均は特定の 1 台に着目したもので、全体の平均ではない。

DCCP 端末のみが存在する場合の DCCP 端末増加に伴う DCCP 送信レートとジッタの関係を図 6 に示す。プローブパケットの生成間隔を変化させた場合、送信間隔によってジッタの取り得る値は異なる。DCCP 端末が 1 台の場合はプローブパケット送信間隔を変化させてもジッタの取り得る範囲は 0.01sec の範囲に収まっている。一方、DCCP 端末が 4 台の場合はジッタの取り得る範囲は送信間隔の変化に伴い広がっている。しかし、DCCP 送信レートはプローブパケットの送信間隔を変化させても、一定の値を取っている。また、送信間隔ごとの、ジッタの取り得る範囲は狭い範囲に集中しており、最大でも 0.002sec の範囲に収まっている。従って、DCCP 端末のみが存在する場合、今回検討した範囲内では、プローブパケット生成間隔を変化させてもジッタから DCCP 送信レートが一意に定まるといえる。

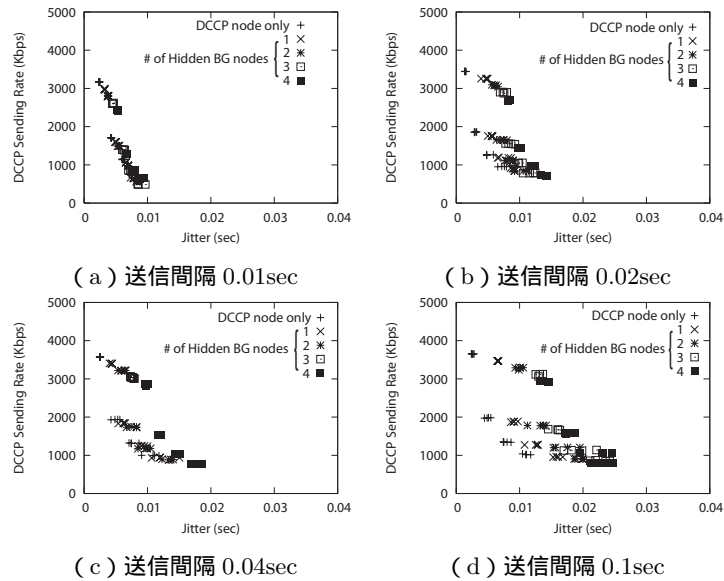


図 8 DCCP 送信レートとジッタの関係 (プローブパケット 1072kbytes)

### 4.3 隠れ端末の影響

DCCP 端末に対し、隠れた BG 端末が存在する場合で、プローブパケットのサイズと生成間隔を変化させて DCCP 送信レートとジッタの関係を調査した。このシミュレーションには図 4 に示すネットワーク構成を用いた。シミュレーション条件は大塚らのネットワーク構成に隠れ端末を追加したシミュレーションと同様である。DCCP 端末と隠れ端末はそれぞれ 1 台～4 台用意した。

まず、図 7 に隠れ端末が 0 台～4 台存在する場合のプローブパケット長が 24bytes のときの DCCP 送信レートとジッタの関係を示す。プローブパケット送信間隔が 0.01sec の場合、隠れ端末の台数に関わらず、DCCP 端末のみの DCCP 送信レートとジッタの関係性に近い関係性を示している。送信間隔が長くなると、同一の DCCP 送信レートを得られる条件下でのジッタの取り得る範囲が広がっている。また、送信間隔 0.01sec の場合と、送信間隔 0.1sec の場合の DCCP 送信レートを比較すると、送信間隔が短いほうが若干低下している。

次に、プローブパケット長が 1072bytes のときの DCCP 送信レートとジッタの関係を

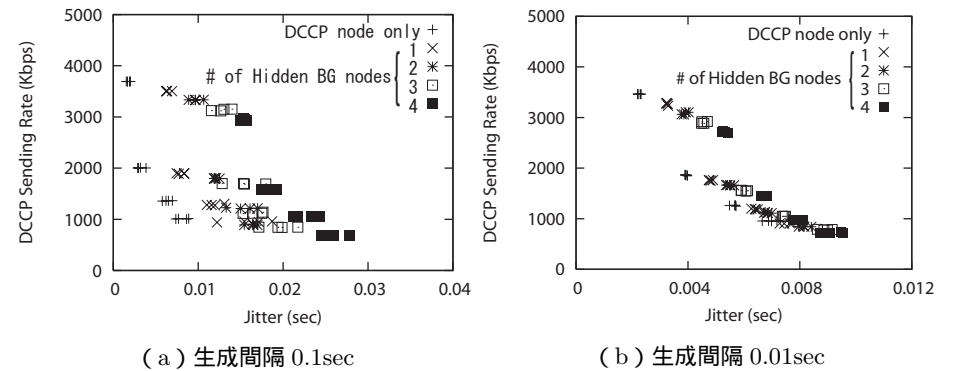


図 9 傾向比較のためのスケール調整を行った場合の DCCP 送信レートとジッタの関係性

図 8 に示す。図 7 のプローブパケット長を 24bytes に固定した場合と同様の傾向が見られる。しかし、プローブパケット生成間隔が 0.01sec、0.02sec と小さい場合には、DCCP 送信レートの低下が顕著に現れる。この理由としては、プローブパケット長を大きくしたことによって、DCCP が使用できる帯域を圧迫していることが考えられる。また、プローブパケット長 24bytes (図 7)、1072bytes (図 8) の場合のどちらでも、生成間隔が 0.1sec 以上の場合には、生成間隔を長くしてもジッタの取り得る範囲が広がることは無く、生成間隔 0.1sec のときと同様の結果を示した。

プローブパケット送信間隔の違いによる影響を明らかにするために図 9 (a)(b) に、プローブパケット生成間隔が 0.01sec、0.1sec、プローブパケット長が 24bytes の場合の DCCP 送信レートとジッタの関係を示す。プローブパケット生成間隔にあわせて、これら 2 つのグラフでは横軸のスケールを調節している。DCCP 端末台数が 1 台の場合は双方、同一の DCCP 送信レートに対してジッタの取り得る範囲が広い。しかし、DCCP 端末の台数が 2 台、3 台と増えると生成間隔を短くした方が同一の DCCP 送信レートに対してジッタの取り得る範囲は狭くなる。同一の DCCP 送信レートに対してジッタの取り得る範囲が狭くなるということは、ジッタより DCCP 送信レートが一意に決まるということである。以上の結果より、小さなプローブパケットを短い間隔で送信することで隠れ端末の台数によらず、同一 DCCP 送信レートが得られる状況でのジッタの取り得る範囲が狭くなるのがわかる。しかし、送信間隔を短くしすぎると、DCCP 送信レートの低下を招く。これは、特にプローブパケット長が大きいときに顕著に現れる。プローブパケットのパラメータとして

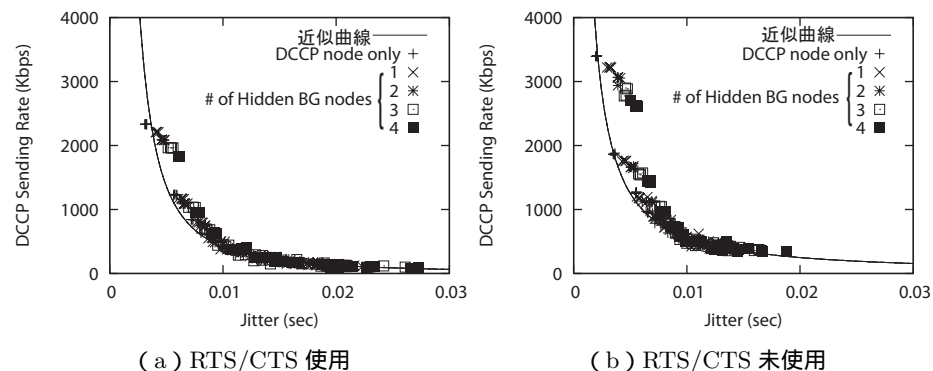


図 10 プローブパケット長 24bytes, 生成間隔 0.01sec の場合の DCCP 送信レートとジッタの関係

は、検証した中では最小の 24bytes, 送信間隔は 0.01sec を用いることで他のパラメータを用いるのに比べ隠れ端末の影響を少なくできる。以降のシミュレーションでは、このパラメータの組を用いる。

#### 4.4 RTS/CTS の有無による影響

田村, 大塚のシミュレーション, 実測では, RTS/CTS は一般的に使用されることが少ないとして, シミュレーションおよび実験では使用されていなかった。RTS/CTS の使用は, フレーム送信前の手続きが増えることになるので通信オーバーヘッドが増加するが, 隠れ端末問題を解消する。これまでの議論では, RTS/CTS を使用しない場合, 隠れ端末が増えるごとにジッタによる DCCP 送信レート推定の精度が悪化することを示したが, RTS/CTS を用いる場合には, このような悪化が減少される可能性があると考えられる。そこで, 本節では, 前節で定めたプローブパケットパラメータの組を用いて RTS/CTS を使用する場合と使用しない場合の DCCP 送信レートとジッタの関係性をシミュレーションにより評価する。

このシミュレーションでは, DCCP 端末を 1 台 ~ 10 台用意した。RTS/CTS を用いるデータサイズの閾値は 256bytes とした。従って, DCCP 端末と BG 端末のみが RTS/CTS を利用し, プローブパケットジェネレータは RTS/CTS のやり取りを行わない。その他のシミュレーションの条件は前節のシミュレーション同様である。

図 10 (a)(b) に, RTS/CTS を用いた場合と, RTS/CTS を用いない場合の結果を示す。DCCP 端末のみが存在する場合と隠れ端末が存在する場合での DCCP 送信レートとジッタの関係性の差異を明確にするために, 本シミュレーションでの DCCP 端末のみが存在

し 1 台 ~ 10 台まで増加した場合の DCCP 送信レートとジッタのプロットに着目し, 累乗近似によって近似曲線を求めた。RTS/CTS を用いない場合の近似曲線は  $y = 2.161x^{-1.165}$ , RTS/CTS を用いた場合は  $y = 0.159x^{-1.709}$  で表される。

RTS/CTS を用いた場合, 通信開始前に RTS と CTS のやり取りが行われ, これに伴うオーバーヘッドの増加によりトラフィックが増えるため, RTS/CTS を使用しない場合に比べ DCCP 送信レートは低下している。特に DCCP 端末が 1 台のみの場合は 1Mbps 程度の DCCP 送信レートの低下が確認できる。ジッタから得られる DCCP 送信レートと近似曲線の差は DCCP 端末が 1 台の場合最大で 800kbps 程度となるが, DCCP 端末が 2 台以上の場合はほぼ近似曲線上にプロットされており, その結果ジッタより誤差 100kbps 程度の精度で DCCP 送信レートが求まる。

一方, RTS/CTS を使用しない場合は, DCCP 送信レートは RTS/CTS を使用する場合に比べ高い値を示している。ジッタから得られる DCCP 送信レートと近似曲線の差は RTS/CTS を使用した差分よりも大きく, DCCP 端末が 1 台の場合最大で 1.5Mbps 程度, DCCP 端末が 2 台以上では 500kbps 程度の差が生じる。

以上の通り, RTS/CTS を用いることで DCCP 送信レートは減少するものの, 隠れ端末の影響を軽減できる。DCCP 端末が 2 以上存在する場合, RTS/CTS を用いることでジッタから得られる DCCP 送信レートの誤差は 100kbps 程度となり, RTS/CTS を用いない場合に比べ高精度で DCCP 送信レートを推定可能である。そのため, DCCP 端末が複数存在する環境でジッタ測定を行う場合は RTS/CTS を用いることが望ましい。

## 5. 関連研究

プローブパケットを送受信することで帯域推定を行う方式 (アクティブ計測) の代表的なものには Pathload<sup>8)</sup>, pathChirp<sup>9)</sup>, IGI<sup>10)</sup> の 3 つがある。Pathload<sup>8)</sup> では, 一定の転送レートでプローブパケットストリームを送出する。この時, 受信側においてストリーム中の片方向遅延を観測し, 後続パケットの遅延が増加傾向にあるか, また遅延の変化がないかを調べ, 利用可能帯域幅を推定する。pathChirp<sup>9)</sup> では, ストリーム中のプローブパケット送信間隔を指数関数的に減少させて送受する。送信されるプローブパケットは転送レートが徐々に上昇し, 遅延が増加する点が生じる。この点におけるプローブパケットの送信間隔から利用可能帯域幅を算出する。IGI<sup>10)</sup> では, Pathload と同様, 一定の転送レートでプローブパケットストリームを送出する。受信側において到着した二つのプローブパケットに着目し, 到着間隔を測定する。この到着間隔と送信間隔を比較し, 利用可能帯域幅を算出する。こ

れら手法は End-to-End でプローブパケットのやり取りを行うことで、プローブパケットが被る遅延や損失率を利用して帯域推定を行っている。また、これら手法は TCP 上での性能評価が行われており DCCP CCID3 に適用可能であるかは定かではない。

Chen らは、TFRC-Probe を提案している<sup>11)</sup>。TFRC-probe では、異種無線システム間ハンドオーバ (IEEE802.11b から 1xRTT へのハンドオーバなど) を想定しており、移動端末自身がハンドオーバ前に通信に使用していないインタフェースから DCCP CCID3 の利用可能帯域の推定を行っている。TFRC-Probe での帯域推定方法は、TFRC を用いてパケットストリームを送出して行く。このとき、データパケット  $n$  個送信ごとに連続するデータパケットの組を 1 つ送信し、このデータパケットの組の受信間隔の広がりから利用可能帯域を推定する。従って、移動端末は複数のインタフェースを有していることを前提としている。一方、筆者らは異種無線システム間移動を伴わないハンドオーバ (水平ハンドオーバ) を想定している。そのため、移動端末は現在接続している AP との接続性を解消しない限り、ハンドオーバ先の AP を経由する経路の利用可能帯域幅を推定することは一般的に困難である。

本稿で想定しているのは、移動端末自身による移動先の帯域推定ではなく、予測レート制御手法に用いられる管理サーバが移動先の帯域測定を行うものである。従って、垂直、水平ハンドオーバに関わらず利用可能である。

## 6. まとめと今後の課題

IEEE802.11b 無線 LAN 上で、定期的には送信するプローブパケットのジッタを測定することで DCCP CCID3 フローの送信レートを推測する手法に関して、その適切なパラメータ選択についてシミュレーションに基づく検討を行った。この結果、RTS・CTS を用いる環境では、MAC の最小フレームサイズのプローブパケットを 0.01 秒間隔で送信し、ジッタを測定することで、DCCP CCID3 フローの送信レートを誤差 100kbps 程度で推測可能であることを示した。本方式は、ハンドオーバ前に移動端末に対してハンドオーバ後の適切な送信レートを通知する予測レート制御等への応用が可能である。

本稿のジッタ測定は、パケットロスが発生した場合、ロスしたプローブパケットの前後のジッタを無視し、正確に到着したプローブパケットのみを用いて行っていた、今後はパケットロス数とジッタの 2 つの要素からより正確な DCCP 送信レート推定が可能かどうかの検討が必要である。

## 参考文献

- 1) Floyd, S., Kohler, E., and Padhye, J.: Profile for Datagram Congestion Control ID3: TCP-Friendly Rate Control (TFRC), Protocol Specification, RFC5348 (2008).
- 2) Ishihara, S., Koyama, K., Miyamoto, G., and Kuroda, M.: Predictive rate control for real-time video streaming with network triggered handover, Proc. WCNC2005, NET-06-03 (2005).
- 3) Tamura, D., Miyamoto, G., Kuroda, M., and Ishihara, S.: Predictive rate control for video stream on handover on wireless LAN, Proc. of the 9th International Symposium on WPMC2006, pp.615–619 (2006).
- 4) Otsuka, Y., Tamura, D., and Ishihara, S.: Effects of Handover on Wireless LANs on TFRC Rate Control, Proc. of the 10th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2007), pp.140–144 (2007-12).
- 5) 近藤良久, 板谷聡子, 山口真司, デイビスピーター: パケット到着周期測定による帯域混雑具合測定方式の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC, モバイルマルチメディア通信 IEICE technical report, Vol.107, No.39, pp.33-36 (2007).
- 6) 田村大輔, 大塚祐太, 石原進: 無線 LAN ハンドオーバ時の DCCP 予測レート制御手法のためのジッタ観測値利用の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.446, pp.25–30 (2008).
- 7) 大塚祐太, 田村大輔, 石原進: 無線 LAN ジッタ測定における DCCP 送信レートの推測, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.108, No.218, pp.45–50 (2008).
- 8) Jain, M., and Dovrolis, M.: End-to-End Available Bandwidth: Measurement Methodology, Dynamics, and Relation with TCP Throughput, SIGCOMM'02 August 19–23 (2002).
- 9) Ribeiro, M., Riedi, R., and Bauraniuk, R., Navratil, J., and Cottrell, L.: pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Networks Paths, (2003).
- 10) Hu, N., and Steenkiste, P.: Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques, IEEE Journal, Vol.21, pp.879–894 (2003).
- 11) Chen, L., and Sun, T.: Monitoring access link capacity using TFRC probe, Computer Communications, Vol.29, No.10, pp.1605–1613 (2004).