社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

流体近似法を用いた DCCP および RED のモデル化および性能評価

久松　潤之† 　大崎　博之† 　村田　正幸†

† 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: †{hisamatu,oosaki,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　本稿では、流体近似法を用いることにより、DCCP および RED を、それぞれ独立した離散系のシステムとしてモデル化する。その後、ネットワーク全体を、DCCP コネクションおよび RED ルータが相互に接続された、フィードバックシステム (以降、DCCP/RED と呼ぶ) としてモデル化する。そして、DCCP/RED の定常特性および過渡特性を解析する。具体的には、定常状態における、DCCP のパケット送出レート、RED のパケット棄却率および平均キュー長を導出する。また、DCCP/RED を平衡点の近傍で線形化することにより、DCCP/RED が安定に動作するパラメータ領域を明らかにする。さらに、立ち上り時間、行き過ぎ量、整定時間といった、DCCP/RED の過渡特性を評価する。その結果、RED の制御パラメータの一つである、移動指数平均の重みが小さいほど、DCCP/RED の安定性および過渡特性が劣化することを示す。

キーワード　DCCP (Datagram Congestion Control Protocol)、 RED (Random Early Detection)、制御理論、流体近似法、定常特性、 過渡特性

Fluid-based Analysis of Network with DCCP Connections and RED Routers

Hiroyuki HISAMATU†, Hiroyuki OHSAKI†, and Masayuki MURATA†

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan
E-mail: †{hisamatu,oosaki,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract　In this paper, we model DCCP congestion control mechanism and RED as independent discrete-time systems using fluid-flow approximation. By interconnecting DCCP connections and RED routers, we model the entire network as a feedback system called *DCCP/RED*. We then analyze the steady state performance and the transient state performance of DCCP/RED. Specifically, we derive the packet transmission rate of DCCP connections, the packet loss probability and the average queue length of the RED router in steady state. Moreover, we investigate the parameter region where DCCP/RED operates stably by linearizing DCCP/RED around its equilibrium point. We also evaluate the transient state performance of DCCP/RED in terms of ramp-up time, overshoot, and settling time. Consequently, we show that the stability and the transient state performance of DCCP/RED degrade when the weight of the exponential weighted moving average, which is one of RED control parameters, is small.

Key words　DCCP (Datagram Congestion Control Protocol), RED (Random Early Detection), Control Theory, Fluid-flow Approximation, Steady State Performance, Transient State Performance

1　はじめに

近年、ネットワークの広帯域化やマルチメディアアプリケーションへの要求の高まりにより、ビデオストリーミング、IP 電話、テレビ会議、オンラインゲーム等の、リアルタイム系アプリケーションのデータ転送を行う、新しいトランスポート層通信プロトコルとして、DCCP (Datagram Congestion Control Protocol) が提案されている [1]。DCCP は送信側ホスト– 受信側ホスト間で輻輳制御を行うが、どのような輻輳制御を行うかは DCCP を利用するアプリケーションが選択することができる。現在は、TCP と同様の輻輳制御を行う、「TCP 型輻輳制御プロファイル」[2] と、TFRC と同様の輻輳制御を行う、「TFRC 型輻輳制御プロファイル」[3] が提案されている。

DCCP は、エンド–エンド (送信側ホスト–受信側ホスト) 間で輻輳制御を行うが、ネットワーク内のルータにおいて輻輳制御を行う、アクティブキュー管理機構が近年注目を浴びてい

る [4]。代表的なアクティブキュー管理機構の一つとして、ルータに到着するパケットを確率的に廃棄する、RED (Random Early Detection) [5] が 挙げられる。

これまで、DCCP の輻輳制御プロファイルとして採用されている、TCP の輻輳制御機構に関する研究は数多く行われている。これらの中でも、TCP コネクションと RED ルータの混在環境の特性は十分に解析されている [6–9] 。例えば、文献 [6] では、TCP の輻輳制御機構および RED を、それぞれ独立した離散系のシステムとしてモデル化している。そして、ネットワーク全体を、TCP コネクション と RED ルータが相互に接続された、フィードバック系のシステムとしてモデル化している。制御理論を適用することにより、TCP の輻輳制御機構や RED の定常特性および過渡特性を解析している。また文献 [7–9] では、TCP の輻輳制御機構と RED を、それぞれ独立した連続系のシステムとしてモデル化し、RED の定常特性を解析している。

このように、TCP の輻輳制御機構と RED の混在環境の特性は十分に明らかにされているが、TFRC と RED の混在環境の特性は十分に研究されていない [10–13] 。例えば、文献 [10] では、シミュレーションおよびインターネットのトラヒック計測により、定常状態における TCP-friendly なレート制御方式と TCP との公平性を評価している。また文献 [11] では、シミュレーションにより、定常状態における TFRC と TCP の公平性を評価している。また、TCP-friendly なレート制御方 式と TCP が混在する環境における、TCP-friendly なレート制御方式の過渡特性の評価も行われている [12, 13]。ただしこれらの研究では、ルータが DropTail であることを前提としており、TFRC と RED の相互作用の影響はほとんど明らかにされていない。

そこで本稿では、文献 [6] のモデル化アプロー チを用いることにより、DCCP および RED を、それぞれ独立した離散系のシステムとしてモデル化する。その後、ネットワーク全体を、DCCP コネクションおよび RED ルータが相互に接続された、フィードバックシステム (以降、DCCP/RED と呼ぶ) としてモデル化する。そして、DCCP/RED の定常特性および過渡特性を解析する。具体的には、定常状態における、DCCP のパケット送出レート、RED のパケット棄却率および平均キュー 長を導出する。また、DCCP/RED を平衡点の近傍で線形化することにより、 DCCP/RED が安定に動作するパラメータ領域を明らかにする。さらに、立ち上り時間、行き過ぎ量、整定時間といった、DCCP/RED の過渡特性を評価する。その結果、RED の制御パラメータの一つである、移動指数平均の重みが小さいほど、DCCP/RED の安定性および過渡特性が劣化することを示す。

以下、2 章において、DCCP の概要と、DCCP で採用されている TCP 型輻輳制御プロファイルおよび TFRC 型輻輳制御プロファイルを簡単に説明する。 3 章において、DCCP および RED を、それぞれ独立した離散時間システムとしてモデル化する。これらのモデルを相互接続することにより、ネットワーク全体のモデル (DCCP/RED) を得る。4 章において、定常状態における、DCCP コネクションのパケット送出レート、RED のパケット棄却率および平均キュー長を導出する。さらに 5 章では、DCCP/RED を平衡点の近傍で線形化することにより、DCCP/RED の過渡特性を解析する。また 6 章において、いくつかの数値例を示し、DCCP/RED の定常特性および過渡特性が、ネットワークの帯域や伝搬遅延によって、どのように変化するかを定量的に示す。 最後に 7 章において、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 DCCP (Datagram Congestion Control Protocol)

DCCP は、リアルタイム系アプリケーション向けに設計された、トランスポート層通信プロトコルである [1]。DCCP では、転送されるデータの信頼性は保証されない。つまり、DCCP の送信側ホストは、ネットワーク中でパケットが棄却されても、パケットの再送を行わない。

DCCP では、DCCP を利用するアプリケーションが、輻輳制御プロファイルを選択することによって、使用する輻輳制御のアルゴリズムを選択できる。DCCP によってサポートされている輻輳制御プロファイルには、CCID (Congestion Control IDentifier) と呼ばれる識別子が割り当てられている。DCCP の送信側ホストおよび受信側ホストは、コネクション確立時に、それぞれが利用可能な輻輳制御プロファイルの CCID を交換し、転送中に使用する輻輳制御プロファイルを決定する。現在、DCCP の輻輳制御プロファイルとして、CCID2 (TCP 型輻輳制御プロファ イル) および CCID3 (TFRC 型輻輳制御プロファイル) が提案されている [2, 3]。

DCCP の TCP 型輻輳制御プロファイルでは、TCP と同様に AIMD 型のウィンドウ制御を行う [2]。AIMD 型のウィンドウ制御では、送信側ホストがネットワークの輻輳を検出するまで、ウィンドウサイズ (ラウンドトリップ時間内に転送できるパケット数) を加算的に増加させる。ネットワークの輻輳を検出すると、送信側ホストは、ウィンドウサイズを乗算的に減少させる。そのため、TCP 型輻輳制御プロファイルを用いた DCCP (以下、DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) と表記する) のパケット送出レートは、ラウンドトリップ時間程度のタイムスケールで変動することになる。このため、DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) は、例えば、受信側ホストである程度のデータをバッファリングする、ストリーミングアプリケーションに適している [2]。DCCP の TCP 型輻輳制御プロファイルは、以下の 4 点において TCP の輻輳制御と異なっている。

1 番目に、DCCP では、ACK 比率 (ACK Ratio) という機構を用いて、受信側ホストから送信側ホストへの ACK パケットに対しても、輻輳制御が行われる [2]。受信側ホストが、送信側ホストに対してどの程度の ACK パケットを返送するかは、ACK 比率によって決定される。具体的には、ACK 比率が R の時、DCCP の受信側ホストは、R 個のデータパケットを送信側ホストからが到着する毎に、ACK パケットを 1 つ送信側ホストに返送する。

2 番目に、DCCP は信頼性のないトランスポート層通信プロトコルであるため、DCCP の送信側ホストはパケットの再送を行わない [2] 。TCP の輻輳制御機構では、パケット廃棄が発生した場合、そのパケットが再送パケットかどうかを識別するが、DCCP ではそのような処理は行われない。

3 番目に、DCCP では、パケット棄却が発生した原因を、受信側ホストから送信側ホストに通知することができる [2]。これは、受信側ホストから送信側ホストへの ACK パケット中に含まれる、データ廃棄オプションによって実現されている。例えば、パケット棄却が、伝送路のビット誤りによって発生したものか、もしくは受信側ホストのバッファあふれにより、発生したものなのかを、受信側ホストから送信側ホストへ通知することができる。

4 番目に、DCCP は、フロー制御を行わない。 つまり、AIMD 型のウィンドウ制御だけを行い、TCP の輻輳制御で行われているような、広告ウィンドウを用いた受信側ホストのバッファ管理は行わない。

一方、DCCP の TFRC 型輻輳制御プロファイル DCCP (以下、DCCP (TFRC 型輻輳制御プロファイル) と表記する) では、TCP 型輻輳制御プロファイルで生じる、パケット送出レートの変動を抑えながら、TCP の輻輳制御と公 平に帯域を共有する (TCP-friendly となる) ように、輻輳制御を行う [3]。DCCP (TFRC 型輻輳制御プロファイル) では、受信側ホストが中心となって輻輳制御を行う。つまり、DCCP (TFRC 型輻輳制御プロファイル) では、受信側ホストがネットワークの輻輳を検出し、これを

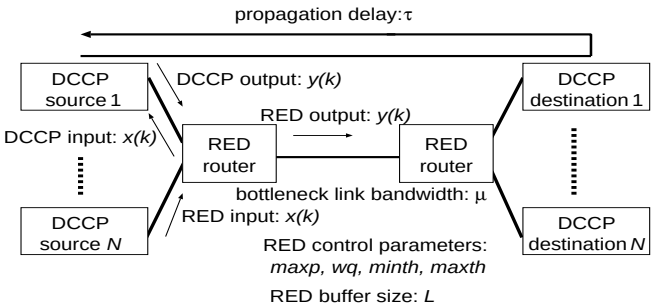


図 1　解析モデル
Fig. 1　Analytic model

送信側ホストに通知する。送信側ホストは、受信側ホストから通知された輻輳情報 (パケット棄却イベント率) に基づき、送信側ホストからのパケット送出レートを調整する。DCCP (TFRC 型輻輳制御プロファイル) は、送信側ホストからのパケット送出レートを大きく変動させないため、例えば、受信側ホストであまりバッファリングを行わないような、ストリーミングアプリケーションに適している [3]。DCCP の TFRC 型輻輳制御プロファイルは、以下の点において TFRC の輻輳制御と異なっている。

TFRC 型輻輳制御プロファイルでは、パケット棄却が発生した原因を、受信側ホストから送信側ホストに通知することができる [3]。これは、TCP 型輻輳制御プロファイルと同様に、受信側ホストから送信側ホストへの ACK パケット中に含まれる、データ廃棄オプションによって実現されている。

3　DCCP および RED のモデル化

本稿では、DCCP の輻輳制御機構および RED を、単位時間が Δ である、それぞれ独立の離散時間システムとしてモデル化する。ネットワーク全体を、DCCP コネクションと RED ルータが相互に接続された、単一のフィードバックシステムとしてモデル化する。まず、DCCP の輻輳制御機構を、入力が受信側ホストへのパケット到着レート、出力がパケット送出レートとなる、離散時間モデルとしてモデル化する。次に、RED を、入力がパケット到着レート、出力がパケット送出レートとなる、離散時間システムとしてモデル化する。

本稿で用いる解析モデルを図 1 に示す。N 本の DCCP コネクションが、単一のボトルネックリンクを共有している。全ての DCCP コネクションの往復伝搬遅延は等しいとする。DCCP コネクションの往復伝搬遅延を τ と表記し、ボトルネックリンクのリンク帯域を μ とする。RED の 4 種類の制御パラメータを、max_p (最大パケット棄却確率)、max_{th} (最大しきい値)、min_{th} (最小しきい値)、w_q (平均キュー長の重み) と表記する [5]。さらに、RED のバッファサイズを L とする。

本解析では、モデルへの入出力をパケット到着/送出レートに統一するために、ACK によって送信側ホストに通知される、受信側ホストへのパケット到着レートという概念を導入する。DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) の ACK には、受信側ホストへのパケットの到着状況 (どのパケットが受信されたか) の情報が含まれている。これより、送信側ホストは、受信側ホストへのパケット到着レートを得ることができる。

本解析では、以下を仮定する。DCCP は主にリアルタイム系アプリケーションに用いられるため、送信側ホストは常に転送すべきデータを持つものとする。ネットワークのパケット棄却率が小さく、DCCP の輻輳制御が機能していれば、DCCP は輻輳回避フェーズで動作ため、DCCP は輻輳回避フェーズで動作するものとする。

まず、DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) のウィンドウサイズの変化をモデル化する。ネットワーク中のパケット棄却率を p、DCCP のウィンドウサイズを w とすれば、DCCP のウィンドウサイズの変化は次式で与えられる [14]。

$$\begin{aligned} w \quad \leftarrow \quad & w + (1-p)\tfrac{1}{w} - p\,(1 - p_{TO}(w,p))\,\tfrac{1}{2}\tfrac{4\,w}{3} \\ & -p\,p_{TO}(w,p)\,\left(\tfrac{4\,w(k)}{3} - 1\right) \end{aligned}$$

ただし $p_{TO}(w,p)$ は、ウィンドウサイズが w であり、パケット棄却率が p の時に、DCCP がタイムアウトによってパケット棄却を検出する確率であり、次式で与えられる [15]。

$$p_{TO}(w,p) = \frac{(1-(1-p)^3)\,(1+(1-p)^3\,(1-(1-p)^{w-3}))}{(1-(1-p)^w)}$$

k 番目のスロットにおける、ネットワーク中でのパケット棄却率を $p(k)$、DCCP のラウンドトリップ時間を $R(k)$、DCCP のウィンドウサイズを $w(k)$ とする。この時、k 番目のスロットにおいて、送信側ホストが検出するネットワーク中でのパケット棄却率は $p(k - \frac{R(k)}{\Delta})$ となる。受信側ホストから送信側ホストの経路で、輻輳が発生せず、ACK パケットが棄却されないと仮定すれば、ACK 比率の値は 1 となる [2]。これより、$k+1$ 番目のスロットにおける DCCP のウィンドウサイズ $w(k+1)$ は、近似的に次式で与えられる。

$$\begin{aligned} w(k+1) \simeq w(k) + \frac{w(\delta)}{R(k)}\,\Delta\Big\{ & (1-p(\delta))\frac{1}{w(k)} \\ & -p(\delta)(1-p_{TO}(w(\delta),p(\delta)))\tfrac{2\,w(k)}{3} \\ & -p(\delta)\,p_{TO}(w(\delta),p(\delta))(\tfrac{4\,w(k)}{3} - 1)\Big\} \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、$\delta \equiv k - R(k)/\Delta$ である。送信側ホストへ通知される、受信側ホストへのパケット到着レート $x(k)$ は、1 ラウンドトリップ時間だけ前の、送信側ホストのパケット到着レート $y(\delta)$ と、ネットワーク中でのパケット棄却率 $p(\delta)$ によって決まる。

$$x(k) \;=\; (1-p(\delta))y(\delta)$$

この時、式 (1) で与えられる DCCP のウィンドウサイズの変化より、DCCP のパケット転送レートは、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} y(k+1) &\simeq f(x(k),y(k),R(k)) \\ &= \quad y(k) + \Delta\tfrac{x(k)}{y(k)R(k)^2} - \tfrac{2}{3}\Delta y(k)\,\{y(\delta) - x(k)\} \\ &\quad \Big\{1 - p_{TO}(x(\delta)\,R(\delta), 1 - \tfrac{x(k)}{y(\delta)})\Big\} \\ &\quad -\Delta\left\{\tfrac{4}{3}y(k) - \tfrac{1}{R(k)}\right\}\{y(\delta) - x(x)\} \\ &\quad p_{TO}(x(\delta)\,R(\delta), 1 - \tfrac{x(k)}{y(\delta)}) \end{aligned} \tag{2}$$

次に、DCCP (TFRC 型輻輳制御プロファイル) の輻輳制御機構を、離散時間システムとしてモデル化する。DCCP (TFRC 型制御プロファイル) の輻輳制御機構の入力 $x(k)$ を k 番目のスロットにおいて、送信側ホストに通知された受信側ホストへのパケット到着レートとする。また、出力 $y(k)$ を k 番目のスロットにおいて、送信側ホストからのパケット送出レートとする。

k 番目のスロットにおける、パケット棄却イベント率を $p_e(k)$、DCCP コネクションのラウンドトリップ時間を $R(k)$ とする。k 番目のスロットにおいて、DCCP の送信側ホストが ACK を受信したとする。この時、DCCP の送信側ホストは、$k+1$ 番目のスロットにおける送信レート $y(k+1)$ を、以下のように変更する [16]。

$$y(k+1) \;=\; \min\left(X(p_e(k),R(k)), 2\,x(k)\right) \tag{3}$$

ただし、$X(p_e(k),R(k))$ は次式で与えられる。

$$X(p_e(k), R(k)) = \frac{1}{R(k)\sqrt{\frac{2p_e(k)}{3}} + t_{RTO}\left(3\sqrt{\frac{3p_e(k)}{8}}p_e(k)(1+32p_e(k)^2)\right)}$$

t_{RTO} は TCP の再送タイマーの値であり、本解析では、$tRTO = 4R(k)$ とする [16]。

RED ルータは、確率 p でランダムにパケットを廃棄するため、DCCP が計測するパケット棄却イベント率 p_e および、RED ルータにおけるパケット棄却率 p は次式の関係を満たす。

$$\begin{aligned}\frac{1}{p(k)} &= 1 \times \sum_{i=1}^{M}\left((1-p_e(k))^{i-1}p_e(k)\right) \\ &\quad + \sum_{i=M+1}^{\infty}\left(i\,(1-p_e(k))^{i-1}p_e(k)\right)\end{aligned}$$

ここで、M は、1 ラウンドトリップ時間中に RED ルータに到着する、 DCCP コネクションから送出されたパケット数 ($M \triangleq R(k)\,y(k)$) である。

最後に、RED ルータを離散時間システムとしてモデル化する。入力 $x(k)$ を、k 番目のスロットにおける、RED ルータへのパケット到着レートとする。また、出力 $y(k)$ を、 k 番目のスロットにおける、RED ルータからのパケット送出レートとする。

μ をボトルネックリンク帯域、$p(k)$ を RED ルータがパケットを廃棄する確率とする。RED ルータへのパケット到着レートが $x(k)$ であるため、RED ルータを通過する (つまり、RED から出力される) パケット送出レートは $(1-p(k))\,x(k)$ となる。さらに、RED のパケット送出レートの上限は、出力リンクの帯域によって決まるため、$y(k)$ の最大値はボトルネックリンク帯域 μ となる。このため、RED の出力 $y(k)$ は次式で与えられる [14]。

$$y(k) = \min((1-p(k))\,x(k), \mu) \tag{4}$$

k 番目のスロットにおける RED の現在キュー長を $q(k)$、平均キュー長を $\overline{q}(k)$ とする。RED のバッファサイズを L とすれば、$k+1$ 番目のスロットにおける RED の現在キュー長 $q(k+1)$ は次式で与えられる [14]。

$$\begin{aligned}&q(k+1) \\ &\quad = \min\left[\max\left\{q(k) + (x(k)-\mu)\,\Delta, 0\right\}, L\right]\end{aligned} \tag{5}$$

RED の現在キュー長を q、RED の平均キュー長を $\overline{q}$ とすれば、RED はパケット到着ごとに、平均キュー長 $\overline{q}$ を以下のように更新する [5]。

$$\overline{q} \leftarrow (1-w_q)\,\overline{q} + w_q\,q \tag{6}$$

k 番目のスロットにおいて、RED に到着するパケットの到着レートは $x(k)$ であるため、$k+1$ 番目のスロットにおける平均キュー長 $\overline{q}(k)$ は、近似的に次式で与えられる [14]。

$$\overline{q}(k+1) \simeq \overline{q}(k) + x(k)\,\Delta\,w_q(q(k) - \overline{q}(k)) \tag{7}$$

RED は、平均キュー長 $\overline{q}(k)$ から、パケット棄却率 $p_b(k)$ を以下のように決定する [5]。

$$p_b(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } \overline{q}(k) < min_{th} \\ \dfrac{max_p}{max_{th} - min_{th}}(\overline{q}(k) - min_{th}) & \\ & \text{if } min_{th} \leqq \overline{q}(k) < max_{th} \\ 1 & \text{if } \overline{q}(k) \geqq max_{th} \end{cases} \tag{8}$$

最終的に、RED ルータは、到着するパケットを次式で決定される確率 $p_a(k)$ で廃棄する。

$$p_a(k) = \frac{p_b(k)}{1 - count \times p_b(k)} \tag{9}$$

ここで $count$ は、RED が最後にパケットを廃棄してから、ルータに到着したパケット数である。RED ルータにおけるパケット棄却率 $p(k)$ は、$p_a(k)$ の平均であるため次式で与えられる [5]。

$$p(k) = \frac{2p_b(k)}{1 + p_b(k)} \tag{10}$$

一方、 k 番目のスロットにおける、DCCP コネクションのラウンドトリップ時間 $R(k)$ は、RED の現在キュー長 $q(k)$ を用いて次式で与えられる。

$$R(k) = \frac{q(k)}{\mu} + \tau$$

4 定常状態解析

以下では、3 章で構築したモデルを用いて、DCCP/RED の定常特性を解析する。具体的には、定常状態における、DCCP コネクションのパケット送出レート、RED のパケット棄却率および平均キュー長を導出する。なお、近似解析の妥当性は、 6 章において、本解析の数値例とシミュレーション結果を比較することにより検証する。

DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) の輻輳制御機構は、AIMD (Additive Increase Multiplicative Decrease) 型のフィードバック制御であるため、伝搬遅延時間が 0 でなければ、ウィンドウサイズは振動的に変化する。そのため、送信側ホストからのパケット送出レートも一定値に収束しない。本解析における DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) のパケット送出レートは、振動的に変化するパケット送出レートそのものではなく、十分に時間が経過したときの、パケット送出レートの期待値を意味していることに注意されたい。

定常状態 ($k \to \infty$) における、DCCP のパケット送出レート、RED のパケット送出レートを、それぞれ y_D^*、y_R^* と表記する。N は DCCP コネクション数とする。まず、式 (2) の両辺において、$y(k+1) = y(k) = y_R^*$、$x(k) = \frac{y_R^*}{N}$ とおき、さらに、式 (4) の両辺において、$y(k+1) = y(k) = y_R^*$、$x(k) = N\,y_D^*$ などとおく。ここで N は DCCP コネクション数である。これを y_D^*、y_R^* について数値的に解くことにより、y_D^*、y_R^* を求めることができる。この時、定常状態における RED のパケット棄却率を p^* とすれば、RED の入力 x_R^* および出力 y_R^* に注目すると、以下の関係が成立する。

$$y_R^* = (1-p^*)\,x_R^* \tag{11}$$

ここで、p^* は、定常状態における RED のパケット棄却率である。式 (11) を p^* について解くことにより、パケット棄却率 p^* を求めることができる。さらに、定常状態における RED の平均キュー長 $\overline{q}^*$ は式 (8) および式 (10) から容易に求めることができる。

5 過渡特性解析

次に、3 章で構築した離散時間モデルを、平衡点の近傍で線形化することにより、DCCP/RED の過渡特性を解析する。紙面の都合上、DCCP (TFRC 型輻輳制御プロファイル) コネクションと RED ルータが相互接続されたフィードバックシステムについてのみ考える。DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) コネクションと RED ルータが相互接続されたフィードバックシステムの場合も、同様の手法で過渡特性を解析できる。

DCCP (TFRC 型制御プロファイル) の輻輳制御機構と RED の状態は、k 番目のスロットに、(送信側ホストへ ACK により通知される) 受信側ホストのパケット到着レート $x_D(k)$、k 番目のスロットから、ラウンドトリップ時間前までそれ以前の送信側ホストのパケット送出レート $y_D(k) \cdots y_D(k - \frac{R(k)}{\Delta})$、$k$ 番

目のスロットにおける、RED のパケット到着レート $x_R(k)$ およびパケット送出レート $y_R(k)$ によって決定される。ここで、k 番目のスロットにおける、それぞれの状態変数の、平衡点からの差を要素とする、状態ベクトル $\mathbf{x}(k)$ を導入する。

$$\mathbf{x}(k) \equiv \begin{bmatrix} x_D(k) & - & x_D^* \\ y_D(k) & - & y_D^* \\ & \vdots & \\ y_D(k - \frac{R(k)}{\Delta}) & - & y_D^* \\ x_R(k) & - & x_R^* \\ y_R(k) & - & y_R^* \end{bmatrix}$$

ここで、DCCP の受信側ホストが、送信側ホストに対して n スロットごとに ACK を返送するとする。この時、k 番目のスロットから、$k+n$ 番目のスロットまでの状態ベクトルの遷移を考える。本解析における離散時間モデル (式 (3) –(10)) はすべて非線型モデルであるが、これらをすべて平衡点 x_D^*、y_D^*、x_R^*、y_R^*、の近傍で線形化することにより、以下のような行列の形で書くことができる。

$$\mathbf{x}(k+n) = \mathbf{A}\,\mathbf{B}^{n-1}\mathbf{x}(k), \tag{12}$$

ここで、行列 $\mathbf{A}$ は DCCP の送信側ホストが ACK を受信した時 (式 (3)) の、$\mathbf{x}(k)$ から $\mathbf{x}(k+1)$ への状態遷移をあらわす。また、行列 $\mathbf{B}$ は DCCP の送信側ホストが ACK を受けとらなかった時の、$\mathbf{x}(k)$ から $\mathbf{x}(k+1)$ への状態遷移 (つまり、$x(k+1) = x(k)$)) をあらわす。ここで、k 番目のスロットから $k+n$ 番目のスロットまでの状態変数の遷移をあらわす、状態遷移行列 $\mathbf{A}\,\mathbf{B}^{n-1}$ の固有値により、式 (3)–(10) で与えられる離散時間システムの、過渡特性 (平衡点の近傍から平衡点への収束する際の振舞い) が、決定される。

6 数 値 例

本章では、いくつかの数値例を示し、DCCP/RED の定常特性および過渡特性が、ネットワークの帯域および伝搬遅延によって、どのように変化するかを定量的に示す。さらに、ns-2 によって得られたシミュレーション結果、と解析結果を比較することにより、近似解析の妥当性を検証する。

シミュレーションでは、図 1 のネットワークトポロジに対して、ns-2 [17] を用いてシミュレーションを実行した。250 [s] 間のシミュレーションを行い、最初の 50 [s] 間を除いた、後半の 100 [s] 間シミュレーション結果を用いた。これより、DCCP コネクションのパケット送出レートおよび、 RED ルータにおけるパケット棄却率を計測した。シミュレーションを 10 回繰り返して実行し、DCCP コネクションのパケット送出レートおよび、 RED ルータにおけるパケット棄却率を計測した。

特に断りのない限り、数値例では以下のパラメータを用いた。DCCP コネクション数 N を 10 本とした。DCCP コネクションの往復伝搬遅延 τ を 50 または 100 [ms] とした。RED ルータのバッファサイズ L を 250 [packet]、RED ルータの制御パラメータ max_p、min_{th}、max_{th}、w_q を、それぞれ 0.1、20 [packet]、100 [packet]、 0.002 とした。

まず、DCCP/RED の定常特性に着目する。図 2 に、ボトルネックリンク帯域を変化させた時の、DCCP のパケット送出レートを示す。ここでは、DCCP コネクションの往復伝搬遅延 τ を、$\tau = 50$ および $\tau = 100$ [ms] と設定している。図 2(a) は、TCP 型輻輳制御プロファイルを用いた時の結果であり、図 2(b) は、TFRC 型輻輳制御プロファイルを用いた時の結果である。これらの図より、ボトルネックリンク帯域が増加するにつれて、DCCP のパケット送出レートも増加していることが分かる。また、解析結果とシミュレーション結果を比較すると、DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) では、ボトルネックリンク帯域が大きい領域で、多少のずれが生じているが、その他の領域ではほぼ一致していることが分かる。DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) における、解析結果とシミュレーション結果の不一致は、 RED の制御パラメータ設定が、ネットワークのパラメータ (ボトルネックリンク帯域、伝搬遅延等) に影響を受けることが原因であると考えられる。つまり、ボトルネックリンク帯域が大きくなるにつれ、 RED の制御パラメータ設定が不適切となり、その結果、シミュレーションにおいて、RED の利用率が低下していると考えられる。

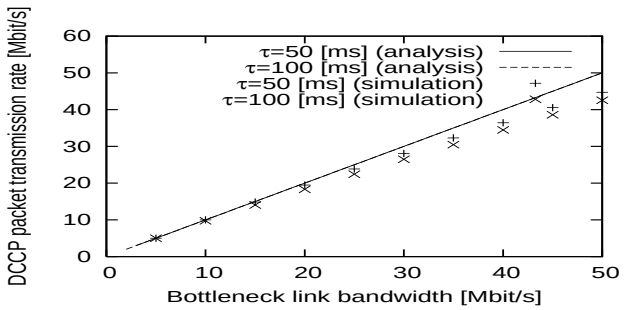
図 3 に、ボトルネックリンク帯域を変化させた時の、RED のパケット棄却率を示す。図 2 と同様に、DCCP コネクションの往復伝搬遅延 τ を、$\tau = 50$ および $\tau = 100$ [ms] と設定している。図 3(a) は、TCP 型輻輳制御プロファイルを用いた時の結果であり、図 3(b) は、TFRC 型輻輳制御プロファイルを用いた時の結果である。これらの図より、ボトルネックリンクの帯域が増加するにつれて、RED のパケット棄却率が急速に減少していることが分かる。また、解析結果とシミュレーション結果が、十分な精度で一致していることが分かる。

次に、DCCP/RED の過渡特性に着目する。表 1 に、DCCP/RED の状態遷移行列の最大絶対値、シミュレーションによって得られた平均キュー長 $\bar{q}^*$、立ち上り時間、行き過ぎ量および整定時間を示す。本稿では、立ち上がり時間として、RED の平均キュー長が、平衡点の 95 % まで到達するまでの時間を用いた。また、行き過ぎ量として、RED の平均キュー長の平衡点からの差の最大値を用いた。整定時間として、RED の平均キュー長が、平衡点の上下 5% 以内に収まるまでの時間を用いた。ここでは、RED の移動指数平均の重み w_q を 0.0002、0.002 および 0.02 と設定している。また、DCCP コネクション数を $N = 1$、ボトルネックリンク帯域を $\mu = 4$ [Mbit/s]、DCCP の往復伝搬遅延を $\tau = 10$ [ms] としている。これらの図より、RED の移動指数平均の重み w_q が小さくなるにつれて、最大絶対値が増加していることも分かる。これは、次のように説明できる。移動指数平均の重み w_q が小さくなるにつれ、RED の平均キュー長が、ネットワークの状態の変化に追従するのに要する時間が増加する。このため、RED のパケット棄却率が、ネットワークの状態の変化に追従するのが遅くなり、結果として、DCCP/RED システム全体としてのフィードバック遅延が増加しているためと考えられる。

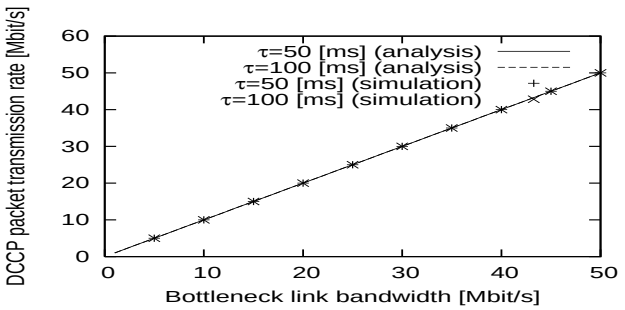
これらの結果より、RED の移動指数平均の重み w_q が大きくなるにつれて、立ち上がり時間、行き過ぎ量および整定時間が小さくなっていることが分る。つまり、RED の移動指数平均の重み w_q が大きくなるにつれて、DCCP/RED の過渡特性が向上していることが分かる。

7 まとめと今後の課題

本稿では、DCCP および RED の特性解析を行った。まず、DCCP (TCP 型輻輳制御プロファイル) の輻輳制御機構、 DCCP (TFRC 型輻輳制御プロファイル) の輻輳制御機構および、RED をそれぞれモデル化した。得られたモデルを用いて、DCCP/RED の定常特性を解析した。定常状態における、DCCP のパケット送出レート、 RED のパケット送出レート、RED のパケット棄却率および、平均キュー長を導出した。さらに、ns-2 を用いたシミュレーションにより、解析の妥当性を検証した。さらに、得られたモデルを平衡点近傍で線形近似して、DCCP/RED の過渡特性を解析した。その結果、移動指数平均の重みが大きいほど、DCCP/RED を安定して動作する領域が広いことを明らかにした。今後の課題として、本稿でモデル化した DCCP および RED のモデルに、文献の解析手法を適用することにより、大規模ネットワークの解析を行うことが興味深い。



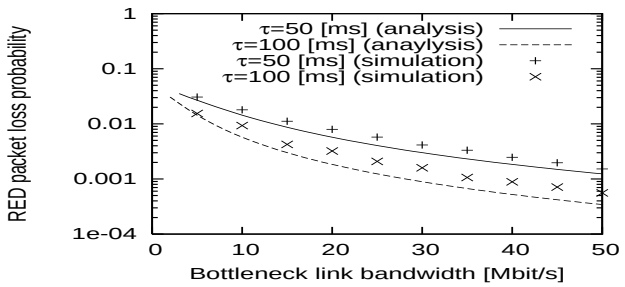
(a) DCCP with TCP-like congestion control profile



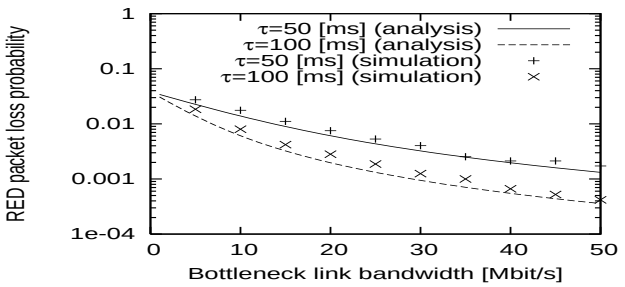
(b) DCCP with TFRC congestion control profile

図 2　定常状態における DCCP のパケット送出レート

Fig. 2　DCCP/RED steady state performance (DCCP packet transmission rate)



(a) DCCP with TCP-like congestion control profile



(b) DCCP with TFRC congestion control profile

図 3　定常状態における DCCP のパケット棄却率

Fig. 3　DCCP/RED steady state performance (RED packet loss probability)

表 1　DCCP/RED の過渡特性

Table 1　DCCP/RED transient state performance indices

w_q	profile	$\overline{q}^*$	λ	ramp-up time [ms]	overshoot [packet]	settling time [ms]
0.0002	CCID2	51.443	0.9996	920	27.5	27340
0.002	CCID2	51.443	0.9967	350	23.2	7530
0.02	CCID2	51.443	0.9678	170	14.3	840
0.0002	CCID3	71.724	0.9995	1520	35.1	31970
0.002	CCID3	71.724	0.9954	530	21.6	4990
0.02	CCID3	71.724	0.9533	250	2.8	250

文　献

[1] E. Kohler, M. Handley, and S. Floyd, "Datagram congestion control protocol (DCCP)," *Internet Draft* <draft-ietf-dccp-spec-11.txt>, Mar. 2005.

[2] E. Kohler, M. Handley, and S. Floyd, "Profile for DCCP congestion control ID 2: TCP-like congestion control," *Internet Draft* <draft-ietf-dccp-ccid2-10.txt>, Mar. 2005.

[3] E. Kohler, M. Handley, and S. Floyd, "Profile for DCCP congestion control ID 3: TFRC congestion control," *Internet Draft* <draft-ietf-dccp-ccid3-11.txt>, Mar. 2005.

[4] S. Floyd and K. Fall, "Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet," *IEEE Transactions on Networking*, vol. 7, pp. 458–472, May 1999.

[5] S. Floyd and V. Jacobson, "Random early detection gateways for congestion avoidance," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, pp. 397–413, Aug. 1993.

[6] M. Kisimoto, H. Ohsaki, and M. Murata, "On transient behavior analysis of random early detection gateway using a control theoretic approach," in *Proceedings of the IEEE Control Systems Society Conference on Control Applications (CCA/CACSD 2002)*, pp. 1144–1149, Sept. 2002.

[7] C. Hollot, V. Misra, D. Towsley, and W.-B. Gong, "A control theoretic analysis of RED," Tech. Rep. TR 00-41, CMPSCI, July 2000.

[8] C. Hollot, V. Misra, D. Towsley, and W.-B. Gong, "On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2001*, pp. 1726–1734, 2001.

[9] V. Firoiu and M. Borden, "A study of active queue management for congestion control," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, pp. 1435–1444, Mar. 2000.

[10] J. Padhye, J. Kurose, D. Towsley, and R. Koodli, "A model based TCP-friendly rate control protocol," in *Proceedings of NOSSDAV'99*, 1999.

[11] S. Floyd, M. Handley, J. Padhye, and J. Widmer, "Equation-based congestion control for unicast applications: the extended version," tech. rep., International Computer Science Institute, Mar. 2000.

[12] D. Bansal, H. Balakrishnan, S. Floyd, and S. Shenker, "Dynamic behavior of slowly-responsive congestion control algorithms," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 263–274, Aug. 2001.

[13] Y. R. Yang, M. S. Kim, and S. S. Lam, "Transient behaviors of TCP-friendly congestion control protocols," *The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, vol. 41, pp. 193–210, Feb. 2003.

[14] H. Ohsaki, J. Ujiie, and M. Imase, "On scalable modeling of TCP congestion control mechanism for large-scale IP networks," in *Proceedings of IEEE SAINT 2005*, pp. 361–369, Feb. 2005.

[15] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP throughput: a simple model and its empirical validation," in *Proceedings of ACM SIGCOMM '98*, pp. 303–314, Sept. 1998.

[16] M. Handly, S. Floyd, J. Padhye, and J. Widmer, "TCP friendly rate control (TFRC): protocol specification," *Request for Comments (RFC) 3448*, Jan. 2003.

[17] "The network simulator – ns2." available at `http://www.isi.edu/nsnam/ns/`.