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.

リアルタイム系および非リアルタイム系輻輳制御の混在環境の解析

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　〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
†† 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 1-30
E-mail: †hisamatu@anarg.jp, ††oosaki@ist.osaka-u.ac.jp, †††murata@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし　近年のネットワークの高速化に伴い、リアルタイム系のアプリケーションが増加している。また、リアルタイム系のアプリケーションが用いる輻輳制御として、TFRC (TCP-Friendly Rate Control) が注目されている。本稿では、TCP と TFRC が混在するネットワークにおいて、TCP および TFRC の定常特性および過渡特性を解析する。まず、両者が混在するネットワークを離散時間システムとしてモデル化する。その後、得られたモデルに対して制御理論を適用することにより、TCP と TFRC の定常特性 (スループット、パケット棄却率) および過渡特性 (安定性、収束速度) を明らかにする。
キーワード　TCP (Transmission Control Protocol)、TFRC (TCP-Friendly Rate Control)、定常状態解析、過渡状態解析

Steady State and Transient State Analysis of TCP and TCP-Friendly Rate Control Mechanism

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

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Osaka 560-8531, Japan
†† Cybermedia Center, Osaka University, Osaka 567-0043, Japan
E-mail: †hisamatu@anarg.jp, ††oosaki@ist.osaka-u.ac.jp, †††murata@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract　In recent years, various realtime applications in the Internet have been emerging with rapid increase of the network bandwidth. As a congestion control mechanism for realtime applications, TFRC (TCP-Friendly Rate Control) has been attracting attention. In this paper, we analyze the steady state and the transient state behavior of TCP and TFRC when both TCP and TFRC flows co-exist in the network. First, we model the network with both TCP and TFRC connections as a discrete time system. We then derive the steady state performance (i.e., throughput of TCP and TFRC and packet loss probability in the network) and the transient state performance (i.e., stability and convergence speed of TCP and TFRC) by applying control theory to our analytic model.
Key words　TCP (Transmission Control Protocol), TFRC (TCP-Friendly Rate Control), Steady State Analysis, Transient State Analysis

1　はじめに

近年、インターネットの高速化に伴い、動画像のストリーミング転送に代表されるような、リアルタイム系のアプリケーションが急速に普及しつつある。リアルタイム系のアプリケーションは、トランスポート層プロトコルとして、UDP (User Datagram Protocol) または TCP (Transmission Control Protocol) のどちらかを用いる。インターネットは、複数の利用者がネットワーク帯域を共有する、ベストエフォート型のネットワークである。このため、すべてのネットワークアプリケーションは、ネットワークの輻輳状況に適応する機構が必要となる。しかし、UDP は単なるデータグラム転送のためのプロトコルであり、ネットワークの輻輳を制御する機構を持たない。このため、リアルタイム系のアプリケーションが、トランスポート層プロトコルとして UDP を用いた場合、ネットワークの輻輳崩壊を防ぐために、アプリケーション層で何らかの輻輳制御機構を実装する必要がある。

一方、TCP は送信側ホスト–受信側ホスト間で輻輳制御を行い、ネットワークの利用可能帯域にあわせてパケットの送出量を調整する機構を有している。しかし、TCP はもともとある程度の遅延を許容できる、データ系の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。TCP の輻輳制御機構は、AIMD (Additive Incerase Multiplicativ Decrease) 型のウィンドウフロー制御であるため、ラウンドトリップ時間程度のタイムスケールで、送信側ホストからのパケット送出レートが変動してしまう。これは、TCP をデータ転送など非リアルタイム系のアプリケーションで用いる場合には問題とならないが、動画像のストリーミング転送のような、リアルタイム系のアプリケーションでは大きな問題となる。

そこで、TFRC (TCP-Friendly Rate Control) [1]、RAP (Rate Adaptation Protocol) [2]、TEAR (TCP Emulate At Rreceivers) [3] など、リアルタイム系のアプリケーションのための、トランスポート層通信プロトコルがこれまで提案されている。これらの

トランスポート層通信プロトコルは、(1) ネットワークの輻輳状況により、送信側ホストからのパケット送出レートを動的に調整する輻輳制御機構を持つ、(2) TCP スループットの解析結果を利用して、TCP コネクションとの公平性 (TCP-friendly) を実現する、(3) リアルタイム系のアプリケーションでの利用を想定して、送信側ホストからのパケット送出レートを、ラウンドトリップ時間よりも大きなタイムスケールで緩やかに変動させる、という点で共通の特徴を持つ。本稿では、これらのリアルタイム系のアプリケーションのためのトランスポート層通信プロトコルの中でも、RFC3448 として標準化が行われている、TFRC に着目する。

これまで、TFRC もしくは TCP-friendly を実現するレート制御方式に関して、さまざまな研究が行なわれている。例えば、文献 [4] では、シミュレーション実験およびインターネットのトラヒック測定をもとに、定常状態における TFRCP (TCP-Friendly Rate Control Protocol) と TCP の公平性を評価している。その結果、TCP の解析結果を利用して、レート制御機構の有効性が示されている。また、文献 [5] では、シミュレーション実験により、定常状態における TFRC と TCP の公平性を評価している。その結果、TFRC と TCP が公平に帯域を共有できることが示されている。一方、文献 [6, 7] では、シミュレーション実験により、TCP-friendly を実現するレート制御方式と TCP が混在する環境における、TCP-friendly を実現するレート制御方式の過渡特性を評価している。その結果、スループットの変化の滑らかさ、ネットワークの輻輳状況の変化への対応の速さが定量的に示されている。

しかし、これらの研究の大部分はシミュレーション実験をもとにしており、TFRC (もしくは TCP-friendly を実現するレート制御方式) と TCP が混在する環境における、定常特性や過渡特性の解析は行なわれていない。そこで本稿は、TFRC コネクションおよび TCP コネクションが単一のボトルネックリンクを共有するというネットワークにおける、TFRC および TCP の定常特性および過渡特性を解析する。まず、TFRC コネクションおよび TCP コネクションのラウンドトリップ時間が一定のもとで、TFRC コネクション、TCP コネクション、RED ルータを、それぞれ離散時間システムとしてモデル化する。その後、ここで得られた離散時間モデルを利用して、定常状態における TCP コネクションのスループット、TFRC コネクションのスループット、RED ルータの平均キュー長、RED ルータにおけるパケット棄却率を導出する。さらに、離散時間モデルを平衡点の近傍で線形化し、平衡点の近傍における TCP コネクションおよび TFRC コネクションの過渡特性を解析する。

以下、2 章において、TCP コネクション、TFRC コネクション、RED ルータを、それぞれ離散時間システムとしてモデル化する。3 章において、定常状態における TCP コネクションのスループット、TFRC コネクションのスループット、RED ルータの平均キュー長、RED ルータにおけるパケット棄却率を導出する。さらに、4 章において、離散時間モデルを平衡点の近傍で線形化し、平衡点の近傍における TCP コネクションおよび TFRC コネクションの過渡特性を解析する。また、5 章において、本解析の数値例をシミュレーション結果と比較することにより、近似解析の妥当性を示す。最後に 6 章において、本稿のまとめを述べる。

2 解析モデル

本稿で用いる解析モデルを図 1 に示す。N_F 本の TFRC コネクションと N_C 本の TCP 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。簡単のため、すべての TFRC コネクションおよび TCP コネクションは、それぞれすべて同期して動作していると仮定する。TFRC コネクションおよび TCP コネクションの往復伝搬遅延は、それぞれすべて等しく τ_F および τ_C と表記する。本解析では、送信側ホスト–ルータ間、およびルータ–受信側ホスト間のリンクは、ルータ–ルータ間のリンクよりも十分速いと仮定し、ルータ–ルータ間のリンク (ボトルネックリンク) に着目する。このため、本解析では、ボトルネックリンクの直前のルータにおいてのみ、キューイング遅延が発生すると仮定する。前段のルータにおけるキューイング遅延を τ_Q と表記する。ルータにおけるキューイング遅延は、ルータのバッファ内パケット数によって変動するが、本解析では定常状態を考え、τ_Q を定数としてモデル化する。さらに、TFRC コネクションおよび TCP コネクションのラウンドトリップ時間を、それぞれ $R_F(\equiv \tau_F + \tau_Q)$ および $R_C(\equiv \tau_C + \tau_Q)$ とする。

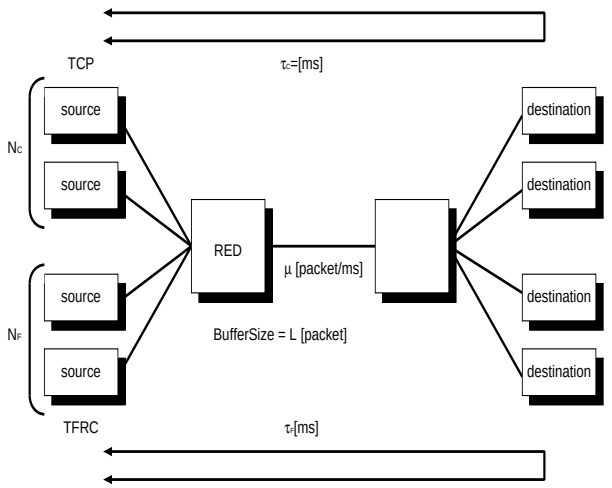

図 1: 解析モデル

ボトルネックリンクのリンク容量を μ とし、ルータはすべて RED ルータであると仮定する。RED ルータの 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 [8]。さらに、RED ルータのバッファサイズを L とする。本解析では、TFRC コネクション、TCP コネクション、RED ルータを、すべて単位時間が Δ であるような離散時間システムとしてモデル化する。本解析で用いる記号の定義を表 1 に示す。

まず、TCP のウィンドウサイズの変化をモデル化する。本解析では、以下のような仮定を置く。(1) 定常状態を考え、すべての TCP コネクションが輻輳回避フェーズで動作している。(2) TCP の最大ウィンドウサイズはネットワークの帯域遅延積に比べて十分大きい。(3) RED ルータが期待通りに動作しており、すべてのパケット棄却は重複 ACK により検出できる (TCP の再送タイムアウトは発生しない)。この時、ネットワーク中でのパケット棄却率を p、TCP のウィンドウサイズを w とすれば、TCP のウィンドウサイズの変化は次式で与えられる [9]。

$$w \leftarrow w + (1-p)\frac{1}{w} - p\frac{1}{2}\frac{4}{3}w$$

k 番目のスロットにおける、前段の RED ルータのパケット棄却率を $p(k)$、TCP のウィンドウサイズを $w(k)$ とする。k 番目のスロットにおける、送信側ホストへの ACK の平均到着レートは $w(k - \frac{R_C}{\Delta})/R_C$ であり、送信側ホストが重複 ACK により検出

表 1　記号の定義

N_F	TFRC のコネクション数
τ_F	TFRC の往復伝搬遅延
R_F	TFRC のラウンドトリップ時間
t_{RTO}	TFRC のタイムアウト時間
$p_e(k)$	TFRC のパケット棄却イベント率
$T(k)$	TFRC の転送レート
N_C	TCP のコネクション数
τ_C	TCP の往復伝搬遅延
R_C	TCP のラウンドトリップ時間
$w(k)$	TCP のウィンドウサイズ
μ	ボトルネックリンクの容量
L	RED ルータのバッファサイズ
τ_Q	RED ルータのキューイング遅延
max_p	RED ルータの最大パケット棄却確率
min_{th}	RED ルータの最小しきい値
max_{th}	RED ルータの最大しきい値
w_q	RED ルータの平均キュー長の重み
$q(k)$	RED ルータの現在キュー長
$\overline{q}(k)$	RED ルータの現在キュー長
$p(k)$	RED ルータのパケット棄却率
Δ	単位スロット時間

するパケット棄却率は $p(k-\frac{R_C}{\Delta})$ となる。これより、$k+1$ 番目のスロットにおける TCP 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。

$$w(k+1) \simeq w(k) + \frac{w(k-\frac{R_C}{\Delta})}{R_C}\Delta(1-p(k-\frac{R_C}{\Delta}))\frac{1}{w(k)} - \frac{w(k-\frac{R_C}{\Delta})}{R_C}\Delta p(k-\frac{R_C}{\Delta})\frac{2\,w(k)}{3} \quad (1)$$

次に、TFRC の転送レートの変化をモデル化する。TFRC の受信側ホストは、パケット棄却イベント率を計測し、これをフィードバック情報として送信側ホストに通知する [1]。k 番目のスロットにおいて、TFRC の送信側ホストが通知されたパケット棄却イベント率を $p_e(k)$ とする。k 番目のスロットにおいて、TFRC の送信側ホストがパケット棄却イベント率をフィードバック情報として受信したとする。この時、TFRC 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 $T(k+1)$ を以下のように変更する。

$$T(k+1) = \min(X(k), 2\,T(k-\frac{R_F}{\Delta})) \quad (2)$$

ただし、$X(k)$ は次式で与えられる。

$$X(k) = \frac{s}{R_F\sqrt{\frac{2p_e(k)}{3}} + t_{RTO}(3\sqrt{\frac{3p_e(k)}{8}})p_e(k)(1+32p_e(k)^2)}$$

ここで、s は TFRC のパケット長、t_{RTO} は TFRC の送信側ホストが計算するタイムアウト時間である。本解析では、簡単のため $t_{RTO} = 4R_F$ とする [1]。本解析では、TFRC の受信側ホストが通知するパケット棄却イベント率 $p_e(k)$ を、RED ルータのパケット棄却率 $p(k)$ を用いて、以下のように与える [10]。

$$p_e(k) \simeq \beta\, p(k) \quad (3)$$

さらに、RED ルータの現在キュー長および平均キュー長の変化をモデル化する。まず、k 番目のスロットにおける、RED ルータの現在キュー長を $q(k)$、平均キュー長を $\overline{q}(k)$ とする。k 番目のスロットにおいて、RED ルータに到着するパケットの到着レートは、各 TFRC コネクションから $T(k-\frac{R_F}{\Delta})$、各 TCP コネクションから $w(k-\frac{R_C}{\Delta})/R_C$ となる。このため、RED ルータ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現在キュー長は次式で与えられる。

$$q(k+1) \simeq \min\left[\max\left\{q(k) + N_C\frac{w(k)}{R_C}\Delta + N_F\,T(k)\,\Delta - \mu\,\Delta, 0\right\}, L\right] \quad (4)$$

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。

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

k 番目のスロットにおいて、RED ルータに到着するパケットの到着レートは、各 TFRC コネクションから $T(k-\frac{R_F}{\Delta})$、各 TCP コネクションから $w(k-\frac{R_C}{\Delta})/R_C$ となる。このことから、$k+1$ 番目のスロットにおける平均キュー長は、近似的に次式で与えられる。

$$\overline{q}(k+1) \simeq \overline{q}(k) + \left(N_F\,T(k) + N_C\frac{w(k)}{R_C}\right)\Delta\,w_q(q(k)-\overline{q}(k)) \quad (5)$$

RED ルータは、平均キュー長をもとに到着するパケットを確率的に棄却する。従って、k 番目のスロットにおける RED ルータのパケット棄却率は、次式で与えられる [8]。

$$p(k) = \left(\frac{max_{th}-min_{th}}{2\,max_p\,(\overline{q}(k)-min_{th})} + \frac{1}{2}\right)^{-1} \quad (6)$$

なお、ここでは RED ルータの制御パラメータが適切に設定されており、RED ルータの平均キュー長 $\overline{q}(k)$ が、$min_{th} < \overline{q}(k) < max_{th}$ であることを仮定している。

3　定常状態解析

以下では、2 章で説明した解析モデルを用いて、TCP コネクションおよび TFRC コネクションの定常状態解析を行う。具体的には、式 (1)–(6) を用いて、定常状態における TCP コネクションのスループット、TFRC コネクションのスループット、RED ルータの平均キュー長、RED ルータにおけるパケット棄却率を導出する。

なお、TCP 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し、一定値に収束することはない。本解析における TCP のウィンドウサイズ $w(k)$ は、振動的に変化するウィンドウサイズの値そのものではなく、十分に時間が経過したときのウィンドウサイズ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、TCP コネクションのウィンドウサイズ、TFRC コネクションの送信レート、RED ルータの平均キュー長、RED ルータのパケット棄却率を、それぞれ w^*、T^*、$\overline{q}^*$、p^* のように表記する。これらの値は、式 (1)–(6) の両辺において、$w(k+1) = w(k) = w^*$、$T(k+1) = T(k) = T^*$ などとおき、これらを w^*、T^*、$\overline{q}^*$、p^* について数値的に解くことにより求めることができる。なお、定常状態における TCP のスループットは、w^*/R_C で与えられる。

4　過渡特性解析

以下では、2 で説明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、平衡点の近傍における TCP コネクションおよび TFRC コネクションの過渡特性を解析する。TFRC コネクション、TCP コネクション、RED ルータのすべてを含んだネットワークの状態は、k 番目のスロットおよびそれ以前の TFRC の転送レート $T(k)\cdots T(k-\frac{R_F}{\Delta})$、$k$ 番目のスロットおよびそれ以前の TCP のウィンドウサイズ $w(k)\cdots w(k-\frac{R_C}{\Delta})$、$k$ 番目のスロットにおける RED ルータの現在キュー長 $q(k)$ および平均キュー長 $\overline{q}(k)$、k 番目のスロットおよびそれ以前の RED ルータにおけるパケット棄却率 $p(k)\cdots p(k-\max(\frac{R_C}{\Delta},\frac{R_F}{\Delta}))$ の変数によって決定される。そこで、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、以下のような状態ベクトル $\mathbf{x}(k)$ を導入する。

$$\mathbf{x}(k) \equiv \begin{bmatrix} w(k) - w^* \\ \vdots \\ w(k-\frac{R_C}{\Delta}) - w^* \\ T(k) - T^* \\ \vdots \\ T(k-\frac{R_F}{\Delta}) - T^* \\ q(k) - q^* \\ \overline{q}(k) - \overline{q}^* \\ p(k) - p^* \\ \vdots \\ p(k-\max(\frac{R_C}{\Delta},\frac{R_F}{\Delta})) - p^* \end{bmatrix}$$

ここで、TFRC の受信側ホストが、送信側ホストに対して N スロットごとにフィードバック情報を通知するとする。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変数の遷移を考える。本解析における離散時間モデル (式 (1) –(6)) はすべて非線型モデルであるが、これらをすべて平衡点 w^*、T^*、q^*、$\overline{q}^*$、p^* 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。

$$\mathbf{x}(k+N) = \mathbf{A}\,\mathbf{B}^{N-1}\mathbf{x}(k) \tag{7}$$

ここで、行列 $\mathbf{A}$ は TFRC の受信側ホストがフィードバック情報を通知した時 (式 2) 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 TFRC の受信側ホストがフィードバック情報を通知しなかった時 (つまり、$T(k+1)=T(k)$ の時) の、$\mathbf{x}(k)$ から $\mathbf{x}(k+1)$ への状態遷移をあらわす。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 (1)–(6) で与えられる離散時間システムの、平衡点の近傍における過渡特性を知ることができる。状態遷移行列 (式 (7)) の固有値を $\lambda_i (1 \leqq i \leqq \frac{R_C}{\Delta}+\frac{R_F}{\Delta}+\max(\frac{R_C}{\Delta},\frac{R_F}{\Delta})+2)$ とする。具体的には、固有値 λ_i の最大絶対値 $\max_i(|\lambda_i|)$ が 0 に近ければ過渡特性が悪く、逆に 1 に近ければ過渡特性が良くなる。ただし、固有値の最大絶対値が 1 以上になれば、システムは不安定となる。

5 数 値 例

本章では、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、近似解析の妥当性を検証する。

5.1 定常状態解析

まず、定常状態解析に関する数値例およびシミュレーション結果を示す。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 [11] を用いてシミュレーションを行った。300 秒間のシミュレーションを行い、最初の 100 秒間を除いた、

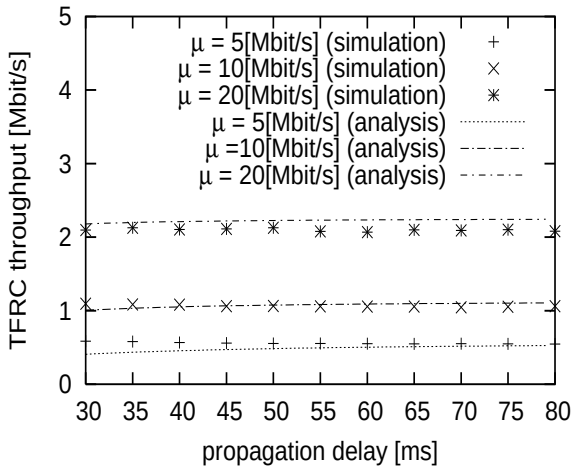

図 2: 定常状態における TFRC コネクションのスループット
($N_F=5$, $N_C=5$, $\tau_Q=0.75\tau_C$ [ms], $\tau_F=\tau_C=30-80$ [ms])

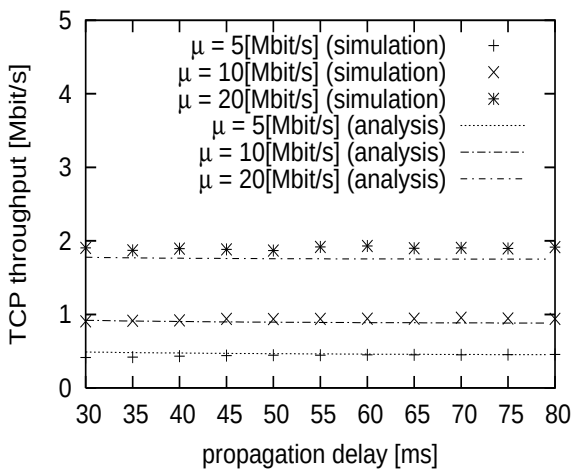

図 3: 定常状態における TCP コネクションのスループット
($N_F=5$, $N_C=5$, $\tau_Q=0.75\tau_C$ [ms], $\tau_F=\tau_C=30-80$ [ms])

最後の 200 秒間の TCP コネクションおよび TFRC コネクションのスループット、RED ルータの平均キュー長を計測した。20 回のシミュレーションを繰り返し実行し、20 回の計測結果の平均を得た。

数値例およびシミュレーションでは、特に断りのない限り、以下のようなパラメータを用いた。TCP コネクションおよび TFRC コネクションのパケットサイズは、すべて等しく 1000 [byte] とした。TCP コネクション数 $N_C=5$、TFRC コネクション数 $N_F=5$、ボトルネックリンクの容量 $\mu=5,10,20$ [Mbit/s]。TCP コネクションと TFRC コネクションの伝搬遅延は同じ値 $\tau=\tau_C=\tau_F$ とした。RED ルータの制御パラメータ (min_{th}、max_{th}) およびバッファサイズは、ボトルネックリンクの容量および TCP/TFRC コネクションの往復伝搬遅延をもとに、以下のように決定した。$min_{th}=0.25\mu\tau$、$max_{th}=1.25\mu\tau$、$L=2.5\mu\tau$ [packet]。さらに、RED ルータのその他の制御パラメータは、$max_p=0.1$ および $w_q=0.002$ とした。なお、本解析の数値例では、RED ルータにおけるキューイング遅延を $\tau_Q=(min_{th}+max_{th})/(2\mu)$ とし、TFRC のパケット棄却イベント率 (式 3) の計算において $\beta=0.6$ とした。

図 2 から図 4 は、それぞれ、TFRC コネクションおよび TCP

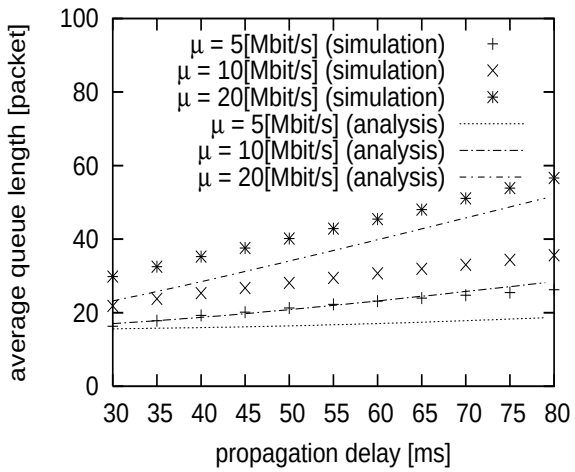

図 4: 定常状態における RED ルータの平均キュー長
($N_F = 5$, $N_C = 5$, $\tau_Q = 0.75\,\tau_C$ [ms], $\tau_F = \tau_C = 30 - 80$ [ms])

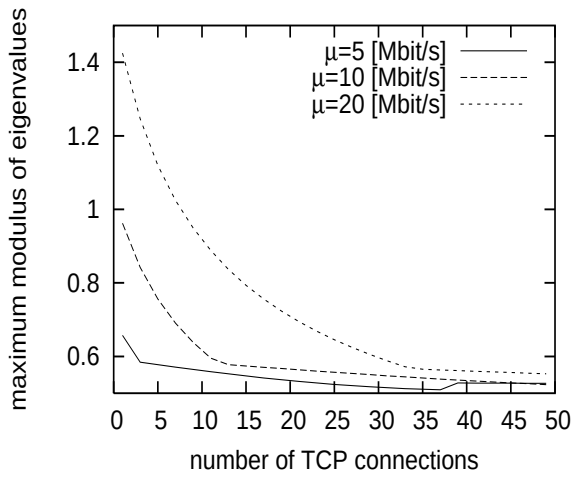

図 5: 状態遷移行列の固有値の最大絶対値
($N_F = 5$, $NC = 1 - 50$, $\tau_Q = 37.5$ [ms], $\tau_F = \tau_C = 50$ [ms])

コネクションの往復伝搬遅延を変化させた時の、TFRC コネクションのスループット、TCP コネクションのスループット、RED ルータの平均キュー長を示している。それぞれの図中には、ボトルネックリンクの容量 μ を、5、10、20 [Mbit/s] と変化させた時の結果を示している。

まず、図 2 および図 3 に着目すると、解析結果とシミュレーション結果がほぼ一致していることがわかる。つまり、定常状態解析に関して、近似解析が妥当であることを意味している。なお、TFRC は TCP コネクションとの公平性 (TCP-friendly) を実現するように設計されているが、TFRC コネクションと TCP コネクションのスループットを比較すると、TFRC のスループットのほうが少し大きな値となっている。これは、文献 [5] で示されているシミュレーション結果とも一致している。なお、図 4 に注目すると、RED ルータの平均キュー長に関して、解析結果とシミュレーション結果はそれほど一致していない。これは、解析結果において、RED ルータにおけるキューイング遅延を $\tau_Q = (min_{th} + max_{th})/(2\,\mu)$ によって与えていることが原因と考えられる。

5.2 過渡特性解析

次に、過渡特性解析に関する数値例およびシミュレーション結果を示す。ボトルネックリンクの容量 μ を 5、10、20 [Mbit/s] とし、TCP のコネクション数 N_C もしくは TFRC のコネクション数 N_F を変化させた時の、状態遷移行列の固有値の最大絶対値を、それぞれ図 5 および図 6 に示す。これらの数値例では、TFRC コネクションおよび TCP コネクションの往復伝搬遅延を $\tau = 50$ [ms] としている。なお、μ =5、10、20 [Mbit/s] のとき、RED ルータの制御パラメータ (min_{th}, max_{th}) は、それぞれ (7.8, 39.1)、(15.6, 78.1)、(31.3, 156.3) となっている。この図より、TCP のコネクション数 N_C もしくは TFRC のコネクション数 N_F が増加する、もしくはボトルネックリンクの容量 μ が増加するにつれ、過渡特性が劣化している (もしくは安定性が向上している) ことがわかる。

最後に、過渡特性解析の妥当性を検証するために、状態遷移行列の固有値の最大絶対値の違いによって、RED ルータの現在キュー長の変動がどのように変化するかを、シミュレーションによって示す。図 7 は、ボトルネックリンク容量を $\mu = 5$ もしくは $\mu = 20$ [Mbit/s] とした時の、RED ルータの現在キュー長の変動を示している。ここでは、TFRC のコネクション数 $N_F = 5$、

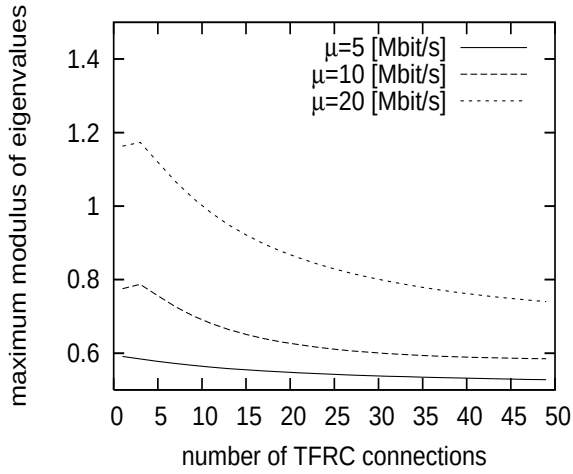

図 6: 状態遷移行列の固有値の最大絶対値
($N_F = 1 - 50$, $NC = 5$, $\tau_Q = 37.5$ [ms], $\tau_F = \tau_C = 50$ [ms])

TCP のコネクション数 $N_C = 5$ と固定している。ボトルネックリンクの容量が $\mu = 5$ もしくは $\mu = 20$ [Mbit/s] の時、固有値の最大絶対値は、それぞれ 0.58 および 1.12 であった。RED ルータの制御パラメータ (min_{th}, max_{th}) は、それぞれ (7.8, 39.1)、(31.3, 156.3) となっている。

また、図 8 は、TFRC のコネクション数を $N_F = 5$ もしくは $N_F = 25$ とした時の結果を示している。ここでは、TCP のコネクション数 $N_C = 5$、ボトルネックリンクの容量 $\mu = 20$ [Mbit/s] としている。TFRC のコネクション数が $N_F = 5$ もしくは $N_F = 25$ の時、固有値の最大絶対値は、それぞれ 0.83 および 1.12 であった。RED ルータの制御パラメータ (min_{th}, max_{th}) は、それぞれ (31.3, 156.3)、(31.3, 156.3) となっている。

さらに、図 9 は、TCP のコネクション数を $N_C = 5$ もしくは $N_C = 25$ とした時の結果を示している。ここでは、TFRC のコネクション数 $N_F = 5$、ボトルネックリンクの容量 $\mu = 20$ [Mbit/s] としている。TCP のコネクション数が $N_C = 5$ もしくは $N_C = 25$ の時、固有値の最大絶対値は、それぞれ 0.65 および 1.12 であった。RED ルータの制御パラメータ (min_{th}, max_{th}) は、それぞれ (31.3, 156.3)、(31.3, 156.3) となっている。

これらの結果から、状態遷移行列の固有値の最大絶対値が 1.0

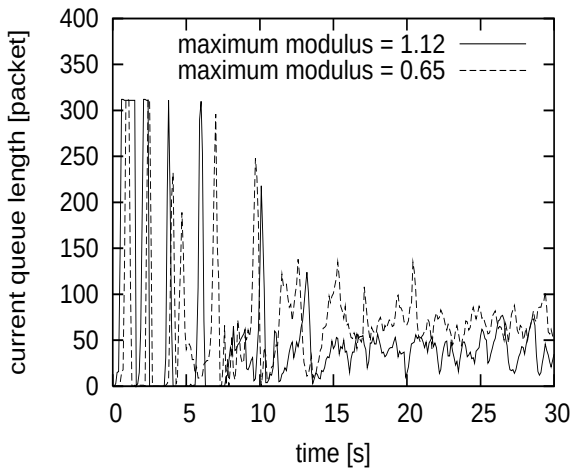

図 7: RED ルータの現在キュー長の変化
(maximum modulus=1.12: $N_F = 5$, $N_C = 5$, $\tau_F = \tau_C = 50$ [ms], $\mu = 20$ [Mbit/s]),
(maximum modulus=0.65: $N_F = 5$, $N_C = 25$, $\tau_F = \tau_C = 50$ [ms], $\mu = 20$ [Mbit/s])

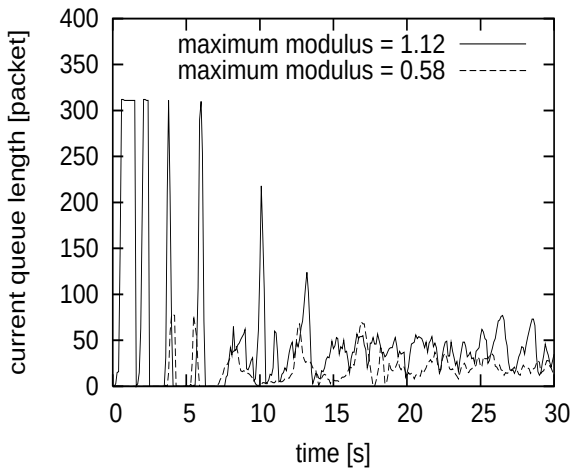

図 8: RED ルータの現在キュー長の変化
(maximum modulus=1.12: $N_F = 5$, $N_C = 5$, $\tau_F = \tau_C = 50$ [ms], $\mu = 20$ [Mbit/s]),
(maximum modulus=0.58: $N_F = 5$, $N_C = 5$, $\tau_F = \tau_C = 50$ [ms], $\mu = 5$ [Mbit/s])

を超えている場合、RED ルータの現在キュー長が大きく振動していることが分かる。

6 ま と め

本稿では、TFRC コネクションおよび TCP コネクションが単一のボトルネックリンクを共有するというネットワークにおける、TFRC および TCP の定常特性および過渡特性を解析した。TFRC コネクション、TCP コネクション、RED ルータを、それぞれ離散時間システムとしてモデル化し、定常状態における TCP コネクションのスループット、TFRC コネクションのスループット、RED ルータの平均キュー長、RED ルータにおけるパケット棄却率を導出した。さらに、平衡点の近傍において離散時間システムを線形化することにより、TCP コネクションおよび TFRC コネクションの過渡特性を解析した。

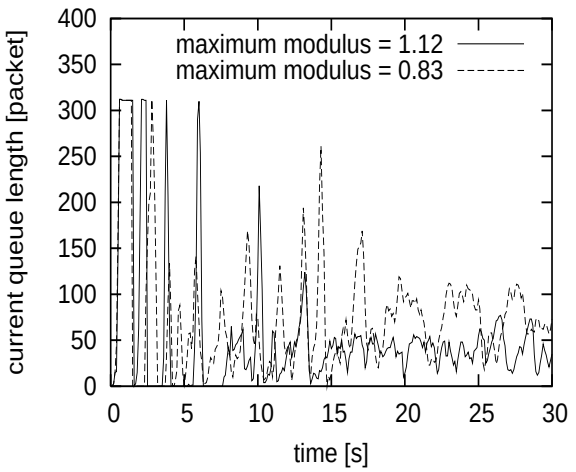

図 9: RED ルータの現在キュー長の変化
(maximum modulus=1.12: $N_F = 5$, $N_C = 5$, $\tau_F = \tau_C = 50$ [ms], $\mu = 20$ [Mbit/s]),
(maximum modulus=0.83: $N_F = 25$, $N_C = 5$, $\tau_F = \tau_C = 50$ [ms], $\mu = 20$ [Mbit/s])

文 献

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

[2] R. Rejaie, M. Handley, and D. Estrin, "RAP: An end-to-end rate-based congestion control mechanism for realtime streams in the internet," in *Proceedings of INFOCOM 1999*, pp. 1337–1345, Mar. 1999.

[3] I. Rhee, V. Ozdemir, and Y. Yi, "TEAR: TCP emulation at receivers – flow control for multimedia streaming," *NCSU Technical Report*, Apr. 2000.

[4] J. Padhye, J. Kurose, D. Towsley, and R. Koodli, "A model based TCP-friendly rate control protocol," *UMass-CMPSCI Technical Report TR 98-04*, 1998.

[5] S. Floyd, M. Handley, J. Padhye, and J. Widmer, "Equation-based congestion control for unicast applications," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, (Stockholm, Sweden), pp. 43–56, Aug. 2000.

[6] Y. R. Yang, M. S. Kim, and S. S. Lam, "Transient behaviors of TCP-friendly congestion control protocols," in *Proceedings of INFOCOM*, pp. 1716–1725, Apr. 2001.

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

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

[9] S. H. Low, F. Paganini, and J. C. Doyle, "Internet congestion control," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 22, pp. 28–43, Feb. 2002.

[10] M. Garetto, R. L. Cigno, M. Meo, and M. A. Marsan, "A detailed and accurate closed queueing network model of many interacting TCP flows," in *Proceedings of INFOCOM 2001*, pp. 1706–1715, Apr. 2001.

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