TCP コネクション数の変動が RED ゲートウェイの過渡特性に与える影響

岸本 統久† 大崎 博之‡ 村田 正幸‡

† 大阪大学 大学院基礎工学研究科
〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
Phone: 06-6850-6616, Fax: 06-6850-6589
E-mail: kisimoto@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡ 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
Phone: 06-6879-8793, Fax: 06-6879-8794
E-mail: {oosaki,murata}@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年、エンド–エンド間で動作する TCP の輻輳制御機構を補助するために、ゲートウェイにおける輻輳制御機構がいくつか提案されている。この中で、現在もっとも有望と考えられ、実際に実装されつつあるのは、ゲートウェイにおいて意図的にパケット棄却を発生させる RED (Random Early Detection) ゲートウェイである。これまで、RED ゲートウェイの定常特性に着目した研究はいくつか行われているが、RED ゲートウェイの過渡特性に関する検討はほとんど行われていない。本報告では、TCP のコネクション数が変動が、RED ゲートウェイの過渡特性にどのような影響を与えるかを解析する。ネットワーク全体をフィードバック系のシステムとしてモデル化し、TCP のコネクション数が変化した時の、RED ゲートウェイのバッファ内パケット数を導出する。その結果、RED ゲートウェイの過渡特性は、定常状態における TCP のコネクション数、RED ゲートウェイの処理能力、TCP の往復伝搬遅延時間によって大きく変化することが分かった。また、RED ゲートウェイの制御パラメータは、RED ゲートウェイの過渡特性にあまり影響を与えないことが分かった。
和文キーワード TCP (Transmission Control Protocol)、RED (Random Early Detection) ゲートウェイ、過渡特性

Analyzing the Impact of TCP Connections Variation on Transient Behavior of RED Gateway

Motohisa Kisimoto† Hiroyuki Ohsaki‡ Masayuki Murata‡

†Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
Phone: +81-6-6850-6616, Fax: +81-6-6850-6589
E-mail: kisimoto@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡Cybermedia Center, Osaka University
1-30 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 567-0043, Japan
Phone: +81-6-6879-8793, Fax: +81-6-6879-8794
E-mail: {oosaki, murata}@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract Several gateway-based congestion control mechanism have been proposed to support an end-to-end congestion control mechanism of TCP (Transmission Control Protocol). One of promising gateway-based congestion control mechanisms is a RED (Random Early Detection) gateway. Although a number of researches on the steady state performance of the RED gateway have been performed, the transient behavior of the RED gateway has not been fully investigated. In this paper, we analyze the transient behavior of the RED gateway when the number of TCP connections changes. We model both TCP connections and the RED gateway as a single feedback system, and derive the number of packets in the RED gateway's buffer when the number of TCP connections changes. Through numerical examples, we quantitatively show that the transient performance of the RED gateway is quite sensitive to the total number of TCP connections, the transmission capacity of the RED gateway, and propagation delay of TCP connections. We also show that control parameters of the RED gateway have little impact on the transient behavior of RED gateway.
key words TCP (Transmission Control Protocol), RED (Random Early Detection) Gateway, Transient Behavior

1 はじめに

近年、エンド–エンド間で動作する TCP の輻輳制御機構を補助するために、ゲートウェイにおける輻輳制御機構がいくつか提案されている [1, 2]。この中で、現在もっとも有望と考えられているのは、ゲートウェイにおいて意図的にパケット棄却を発生させる RED (Random Early Detection) ゲートウェイである [1]。これまで、RED ゲートウェイの特性をシミュレーション実験により評価した研究は数多く行われている [1, 3, 4]。例えば、文献 [1] の著者らは、RED ゲートウェイの制御パラメータの推奨設定値を提案しているが、これはシミュレーション実験によって経験的に得られたガイドラインである。しかし、RED ゲートウェイの特性を数学的に解析した研究は非常に少ない。文献 [5-7] では、定常状態における RED ゲートウェイの安定性や過渡特性が解析されている。しかし、TCP のコネクション数が一定であると仮定されているため、TCP コネクション数の変動が、RED ゲートウェイの過渡特性にどのような影響を与えるかは明らかにされていない。実際のネットワークでは、TCP のコネクション数は時間に応じて変化するため、これを考慮して RED ゲートウェイの評価を行う必要がある。例えば、TCP のコネクション数が変動すると、RED ゲートウェイにおいてバッファのオーバーフローやアンダーフローが発生する可能性があり、これにより RED ゲートウェイの性能が大きく低下してしまう。

本稿では、文献 [5] における解析結果を利用することにより、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。具体的には、RED ゲートウェイが定常状態にある時に、TCP コネクションが新たに転送を開始した場合、または TCP コネクションが転送を終了した場合の、RED ゲートウェイのバッファ内パケット数の変動を解析する。いくつかの数値例を用いて、RED ゲートウェイの制御パラメータが、RED ゲートウェイの過渡特性にどのような影響を与えるかを明らかにする。

本稿の構成は以下のとおりである。2 章では、RED ゲートウェイの概要を簡単に説明する。3 章では、本解析で用いる解析モデルを説明する。4 章では、文献 [5] において導出されている、RED ゲートウェイの平均状態遷移方程式の導出方法を簡単に説明する。5 章では、この結果を利用することにより、TCP のコネクション数が変化した時の、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。6 章では、いくつかの数値例を用いて、RED ゲートウェイの制御パラメータやシステムパラメータが、RED ゲートウェイの過渡特性にどのような影響を与えるかを明らかにする。最後に 7 章では、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2 RED ゲートウェイの概要

RED ゲートウェイには 4 つの制御パラメータ (min_{th}、max_{th}、max_p、q_w) がある。min_{th} と max_{th} はそれぞれ最小および最大のしきい値である。これらのしきい値は、RED ゲートウェイに到着するパケットに対する棄却確率を決定するために用いられる。また、RED ゲートウェイは平均パケット待ち行列長を保持している。これは、ローパスフィルターの一種である、指数平均 (EWMA; Exponential Weighted Moving Average) を用いて現在のパケット待ち行列長から計算される。

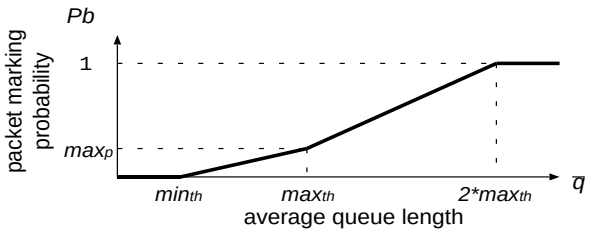

図 1: RED ゲートウェイのパケット棄却確率 p_b

RED ゲートウェイは平均パケット待ち行列長を用いて、到着するパケットに対する棄却確率 p_b を計算する。具体的には、RED ゲートウェイは、パケットに対する棄却確率 p_b を図 1 のように決定する。ここで、max_p はパケット棄却確率を決定する制御パラメータである。なお、RED ゲートウェイは TCP のコネクションを区別しないため、すべてのパケットに対して同じパケット棄却確率 p_b が用いられる。

3 解析モデル

本稿では、文献 [5] における RED ゲートウェイの定常状態解析の結果を利用することにより、RED ゲートウェイの過渡特性解析を行う。まず、文献 [5] で用いられている解析モデルを図 2 に示す。この解析モデルは、単一の RED ゲートウェイと複数の TCP コネクションによって構成されている。ここでは、TCP コネクションの往復伝搬遅延時間はすべて等しいとし、τ [ms] と表記する。また、ゲートウェイの処理能力を B [パケット/ms] と表記する。さらに RED ゲートウェイがネットワークのボトルネックであると仮定する。つまり、すべてのリンク間の伝送速度はボトルネックとなるゲートウェイの処理速度よりも十分速いものとする。

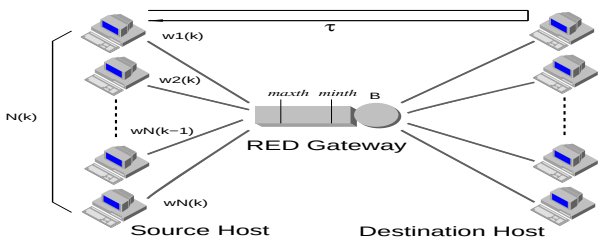

図 2: TCP コネクション数が一定の解析モデル

すべての送信側ホストでは、TCP Reno [8] の輻輳制御機構を用いる。すべての送信側ホストは同期してウィンドウサイズを変更すると仮定し、送信側ホストのウィンドウサイズを w とする。送信側ホストは、パケットを送出してから対応する ACK (ACKnowledgement) パケットを受信するまでの間に w 個のパケットを送出することができる。つまり、送信側ホストは 1 RTT (ラウンドトリップ時間) の間に、w 個のパケットを送出することができる。本解析では、ネットワーク全体を、単位スロット時間が TCP コネクションの RTT 時間であるような離散時間システムとしてモデル化する。k 番目のスロット

における、送信側ホストのウィンドウサイズを $w(k)$ とする。また、すべての送信側ホストは常に伝送するデータを持ち、各スロットにおいて必ず $w(k)$ 個のパケットを送出すると仮定する。また、k 番目のスロットにおける現在パケット待ち行列長と平均パケット待ち行列長を、それぞれ $q(k)$ および $\overline{q}(k)$ と定義する。なお以下の解析では、q および $\overline{q}$ は 1 スロット内では一定であると仮定する [5]。TCP コネクション数の変動を考慮し、k 番目のスロットにおけるコネクション数を $n(k)$ とする。

4 平均状態遷移方程式の導出

本章では、文献 [5] で導出されている、RED ゲートウェイの平均状態遷移方程式の導出方法を簡単に説明する。解析の詳細については、文献 [5] を参照されたい。

4.1 状態遷移方程式の導出

以下では、平均パケット待ち行列長 $\overline{q}$ が min_{th} と max_{th} の間にある場合を考える。また、TCP のコネクション数 $n(k)$ が一定の場合を考える。この時、$p_b(k)$ は以下の式で与えられる。

$$p_b(k) \quad = \quad max_p \left(\frac{\overline{q}(k) - min_{th}}{max_{th} - min_{th}} \right)$$

ここで、k 番目のスロットにおいて、棄却されずに連続して通過するパケット数の期待値を $\overline{X}(k)$ とする。$k+1$ 番目のスロットにおけるウィンドウサイズは以下の式で与えられる。

$$w(k+1) = \begin{cases} \frac{w(k)}{2} & \text{with probability } w(k)\, p_b(k) \\ w(k)+1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

また、$k+1$ 番目のスロットにおける現在パケット待ち行列長は以下の式で与えられる。

$$q(k+1) \quad = \quad q(k) + n(k)\, w(k) - B \left(\tau + \frac{q(k)}{B} \right) \quad (2)$$

また、$k+1$ 番目のスロットにおける平均パケット待ち行列長は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \overline{q}(k+1) \quad = \quad & (1-q_w)^{n(k)\, w(k)} \overline{q}(k) \\ & + \frac{q_w \{1 - (1-q_w)^{n(k)\, w(k)}\}}{1-(1-q_w)}\, q(k) \end{aligned}$$

4.2 平均状態遷移方程式の導出

TCP コネクションと RED ゲートウェイの平均的な動作を記述する “平均状態遷移方程式” を導出する [5]。まず、RED ゲートウェイがパケットを棄却するスロットの列によって区切られる、“シーケンス” という概念を導入する (図 3)。さらに、複数のスロットで構成されるシーケンスを一つの大きなスロットとみなして、ネットワーク全体を離散時間システムとして考える。k 番目のスロットにおいて、シーケンスを構成するスロット数の期待値を $\overline{s}(k)$ とする。

この時、2 つの連続したシーケンス間の、ウィンドウサイズ $w(k)$ の平均状態遷移方程式は、式 (1) から以下のように与えられる。

$$w(k + \overline{s}(k)) \quad = \quad \frac{w(k) + \overline{s}(k) - 1}{2} \quad (3)$$

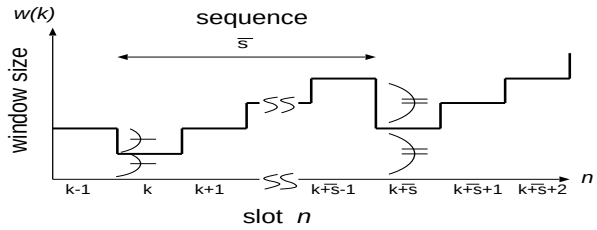

図 3: 本解析におけるスロットとシーケンスの関係

なお、$w(k)$ は各シーケンスにおけるウィンドウサイズの最小値である。同様に、シーケンス間の $q(k)$ の平均状態遷移方程式は、以下の式で近似できる。

$$q(k + \overline{s}(k)) \quad \simeq \quad n(k)\,(w(k) + \overline{s}(k) - 1) - B\,\tau \quad (4)$$

さらに、シーケンス間の $\overline{q}(k)$ の平均状態遷移方程式は、近似的に次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \overline{q}(k + \overline{s}(k)) \quad \simeq \quad & (1-q_w)^{\overline{X}(k)} \overline{q}(k) \\ & + \{1 - (1-q_w)^{\overline{X}(k)}\} q(k) \end{aligned} \quad (5)$$

これらの平均状態遷移方程式 (式 (3) 、(4) 、(5)) は、それぞれウィンドウサイズ、現在パケット待ち行列長、平均パケット待ち行列長の平均的な変化をあらわしている。

k 番目のスロットにおけるシステムの状態と、平衡点の期待値との差である $\overline{\mathbf{x}}(k)$ を、以下のように定義する。

$$\overline{\mathbf{x}}(k) \quad \equiv \quad \begin{bmatrix} w(k) - w^* \\ q(k) - q^* \\ \overline{q}(k) - \overline{q}^* \\ n(k) - n^* \end{bmatrix}$$

$w(k)$ 、$q(k)$ 、$\overline{q}(k)$ 、$n(k)$ を平衡点の近傍で一次近似することにより、状態遷移行列 $\mathbf{A}$ と $\overline{\mathbf{x}}(k)$ を用いて、$\overline{\mathbf{x}}(k + \overline{s}(k))$ は以下の式のように記述できる。

$$\overline{\mathbf{x}}(k + \overline{s}(k)) \quad \simeq \quad \mathbf{A}\overline{\mathbf{x}}(k) \quad (6)$$

5 RED ゲートウェイの過渡特性解析

本章では、4 章で導出した平均状態遷移方程式を利用して、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。

5.1 TCP コネクション数の変動

定常状態において、ネットワーク中に N 本の TCP コネクションが存在する場合を考える。これらの N 本の TCP コネクションは、すべて輻輳回避フェーズで動作していると仮定する。この時、TCP のコネクション数が変動する状況として、以下の C1 ~ C4 の 4 種類が考えられる。

まず、N 本の TCP コネクションのうち、ΔN 本の TCP コネクションが転送を終了する場合 (C1) がある。この場合、残りの $N - \Delta N$ 本の TCP コネクションが、ネットワークが再び安定するまで、輻輳回避フェーズで動作する。さらに、一時的に転送を中断していた ΔN 本の TCP コネクションが、再び転送を再開する場合が考えられる。この時、転送を中断していた時間に応じて、転送再開後の ΔN 本の TCP の動作が異なる。転送を中断していた時間が短い場合 (C2) には、ΔN 本の TCP は転送

中断前のウィンドウサイズを用いて、輻輳回避フェーズで動作する。このため、あわせて $N+\Delta N$ 本の TCP コネクションが輻輳回避フェーズで動作することになる。

一方、転送を中断していた時間が長い (一般に、TCP のタイムアウト時間以上) 場合 (C3) 、ΔN 本の TCP は初期ウィンドウサイズを用いて、スロースタートフェーズで動作する。このため、輻輳回避フェーズで動作する N 本の TCP コネクションと、スロースタートフェーズで動作する ΔN 本の TCP コネクションが同時に存在することになる。さらに、ΔN 本の TCP のコネクションが新たに転送を開始する場合 (C4) が考えられる。この時、C3 と同じように、輻輳回避フェーズで動作する N 本の TCP コネクションと、スロースタートフェーズで動作する ΔN 本の TCP コネクションが同時に存在する。本解析では、すべての TCP のコネクションが輻輳回避フェーズで動作する場合 (C1 および C2) と、一部の TCP コネクションがスロースタートフェーズで動作する場合 (C3 および C4) を、それぞれ異なる手法を用いて解析する。

5.2 すべての TCP コネクションが輻輳回避フェーズで動作する場合

まず、すべての TCP のコネクションが輻輳回避フェーズにある場合 (C1 および C2) を考える。この時、$k-1$ 番目のスロットから k 番目のスロットの間に、増加もしくは減少した TCP のコネクション数を $u(k)$ とする。例えば、i 番目のスロットの直前に、TCP のコネクション数が ΔN だけ増加した場合、$u(k)$ は以下のようになる。

$$u(k) \quad = \quad \begin{cases} \Delta N & \text{if } k=i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

TCP のコネクション数が変動した時の、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長の変動を解析するため、TCP のコネクション数の変動 $u(k)$ を、式 (6) で与えられるシステムへの入力と考え、スロット k における現在パケット待ち行列長 $q(k)$ をシステムからの出力と考える。つまり、式 (6) に入力 $u(k)$ および出力 $q(k)$ を加えると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \overline{\mathbf{x}}(k+\overline{s}(k)) &= \mathbf{A}\overline{\mathbf{x}}(k)+\mathbf{B}u(k) \\ q(k) &= \mathbf{C}\overline{\mathbf{x}}(k) \end{aligned}$$

ここで $\mathbf{A}$ は式 (6) で与えられ、$\mathbf{B}$ および $\mathbf{C}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{B}=[\,0\,0\,0\,1\,]^T \quad \mathbf{C}=[\,0\,1\,0\,0\,]$$

つまり、TCP コネクション数の変動 $u(k)$ が $\mathbf{B}$ によって $n(k)$ に加えられ、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長 $q(k)$ が $\mathbf{C}$ によって取り出されている。

このような 1 入力 1 出力システムの過渡特性を解析することにより、TCP のコネクション数が変動した時の、RED ゲートウェイの現在待ち行列長の動的な変化を解析することができる。例えば、i 番目のスロットの直前に、TCP のコネクション数の変動 $u(k)$ が与えられた時の、RED ゲートウェイの現在待ち行列長 $q(k)$ は、以下の式で与えられる。

$$q(k) \quad = \quad \sum_{i=0}^{k} u(i)\,\overline{\mathbf{x}}(k-i) \qquad (7)$$

TCP のコネクション数が、一時的に ΔN だけ増加した場合、$u(k)$ はインパルス入力となる。このため、RED ゲートウェイの現在待ち行列の変化は、システムに対するインパルス応答によって調べることができる。同様に、TCP のコネクション数が一時的に変動した場合だけでなく、TCP のコネクション数が連続的もしくは周期的に変化した場合の、RED ゲートウェイの過渡特性を調べることもできる。

5.3 一部の TCP コネクションがスロースタートフェーズで動作する場合

次に、TCP コネクションが新たに転送を開始した場合 (C3) 、または転送を中断していた TCP コネクションが転送を再開した場合 (C4) を考える。この時、$k-1$ 番目のスロットから k 番目のスロットの間に、スロースタートフェーズで動作する TCP コネクションが送出したパケット数を $u'(k)$ とする。スロースタートフェーズでは、初期ウィンドウサイズから始まり、RTT ごとにウィンドウサイズが 2 倍となる。よって、例えば、i 番目のスロットにおいて、スロースタートフェーズで動作する TCP コネクションが ΔN 本加わった場合、$u'(k)$ は近似的に次式で与えられる。

$$u'(k) \quad \simeq \quad \begin{cases} \frac{\Delta N}{n(k)} \times 2^{(k-i-1)} & \text{if } k>i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

前節と同様にして、スロースタートフェーズで動作する TCP のコネクション数が増加した時の、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長の変動を解析することができる。つまり、ウィンドウサイズ (1 スロット中に送出されたパケット数) の変動 $u'(k)$ を、式 (6) で与えられるシステムへの入力と考え、スロット k における現在パケット待ち行列長 $q(k)$ をシステムからの出力と考えればよい。

$$\begin{aligned} \overline{\mathbf{x}}(k+\overline{s}(k)) &= \mathbf{A}\overline{\mathbf{x}}(k)+\mathbf{B}'u'(k) \\ q(k) &= \mathbf{C}\overline{\mathbf{x}}(k) \end{aligned}$$

ただし、

$$\mathbf{B}' \quad = \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

つまり、スロースタートフェーズで動作する TCP のウィンドウサイズ $u'(k)$ が、$\mathbf{B}'$ によって $w(k)$ に加えられている。

6 数値例による考察

本節では、5 章における過渡特性解析の数値例により、TCP コネクション数の変動が、RED ゲートウェイの過渡特性にどのような影響を与えるかを明らかにする。

6.1 過渡特性の性能指標

過渡特性の性能指標として、行き過ぎ量 (overshoot) 、立ち上がり時間 (rise time) 、整定時間 (settling time) などが広く用いられている (図 4) [9]。これらの性能指標は、それぞれシステムの減衰性、システムの即応性、システ

ムの即応性および減衰性の両方を調べる目安となる。本稿では、行き過ぎ量として平衡点からの差の最大値、立ち上がり時間として平衡点の 90 % まで到達するまでの時間、整定時間として平衡点からの差が 5% 以内に収まるまでの時間を用いる。一般には、行き過ぎ量、立ち上がり時間、整定時間は、すべて小さいほうが望ましい。しかし、行き過ぎ量と、立ち上がり時間および整定時間にはトレードオフの関係がある。

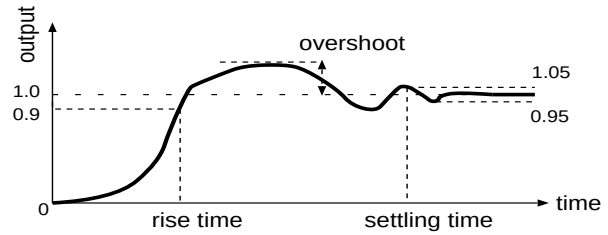

図 4: 過渡特性の性能指標 (行き過ぎ量、立ち上がり時間、整定時間)

これらの性能指標を RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長にあてはめると、以下のように考えられる。行き過ぎ量は、RED ゲートウェイのパケット待ち行列長が、過渡状態において一時的にどれだけ大きくなるかを意味する。行き過ぎ量が大きすぎると、RED ゲートウェイにおいてバッファあふれが発生する可能性があるため、行き過ぎ量をできるだけ小さな値に抑える必要がある。また、立ち上がり時間は、TCP のコネクション数が変動した時に、RED ゲートウェイのパケット待ち行列長がどれだけ速く変化するかを意味する。式 (2) より、パケット待ち行列長は、TCP のウィンドウサイズの変動をそのまま反映することがわかる。このため、立ち上がり時間によって、TCP がどれだけ速くネットワークの変化に追従できるかを調べることができる。整定時間は、RED ゲートウェイがどれだけ速く過渡状態から定常状態に移るかを意味する。

6.2 すべての TCP コネクションが輻輳回避フェーズで動作する場合

紙面の制約のため、定常状態において N 本の TCP コネクションが存在する時に、ΔN 本の TCP コネクションが輻輳回避フェーズで転送を開始した場合 (C2) の結果のみを示す。まず、N 本の TCP コネクションが存在する時の、平衡点の値 w^*、q^*、$\overline{q}^*$ を初期値とする。そして、0 番目のスロットで ΔN 本の TCP コネクションが加わった時の、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長 $q(k)$ の変動を式 (7) によって計算する。

まず、図 5 に、定常状態における TCP のコネクション数 N を 1 から 7 へと変化させた時の、過渡特性の性能指標 (行き過ぎ量、立ち上がり時間、整定時間) を示す。ここでは、RED ゲートウェイの制御パラメータとして、文献 [1] で推奨されている値を使用し、システムパラメータには以下の値を用いている。RED ゲートウェイの処理能力 $B = 2$ [パケット /ms]、TCP コネクションの往復伝搬遅延時間 $\tau = 1$ [ms]、TCP コネクション数の変動 $\Delta N = 1$。

図 5 より、定常状態における TCP のコネクション数

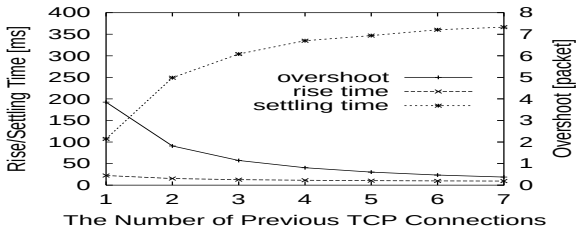

図 5: TCP コネクションが 1 本加わった場合 (定常状態における TCP のコネクション数 N = 1–7)

N が小さいほど、過渡状態において、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長が一時的に大きく変動する (つまり、行き過ぎ量が大きい) ことがわかる。これは、定常状態における TCP のコネクション数が小さいほど、転送を開始した TCP コネクションがネットワークに与える影響が、相対的に大きくなるためである。また、N の値が 4 以上の場合、行き過ぎ量は 1 パケット以下と非常に小さいことがわかる。このため、TCP のコネクション数がある程度多い場合、RED ゲートウェイのバッファあふれは発生しにくいと考えられる。

次に、RED ゲートウェイの処理能力 B を、1 [パケット/ms] から 10 [パケット/ms] まで変化させた時の結果を図 6 に示す。この図より、RED ゲートウェイの処理能力 B が小さくなるにつれ、行き過ぎ量が小さくなり、整定時間が大きくなっていることがわかる。特に、RED ゲートウェイの処理能力 B が約 7 [パケット/ms] より小さくなると、整定時間が急激に大きくなっている。これは、RED ゲートウェイの処理能力が小さい場合、TCP のコネクション数の変動による影響が長い間持続するということを意味している。

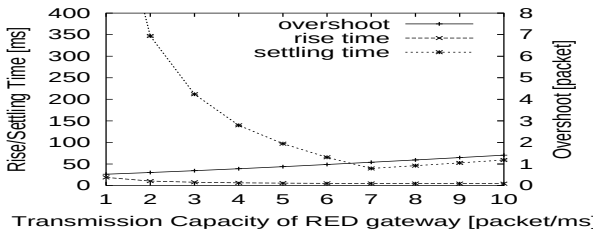

図 6: TCP のコネクションが一本加わった場合 (RED ゲートウェイの処理速度 B =1–10 [パケット/ms])

次に、図 7 に、TCP の往復伝搬遅延時間 τ を 1 から 5 [ms] まで変化させた時の結果を示す。この図より、往復伝搬遅延時間が大きくなるにつれ、RED ゲートウェイの過渡特性が低下していることがわかる。例えば、往復伝搬遅延時間が大きくなるにつれ、行き過ぎ量および立ち上がり時間の両方が大きくなっている。これは、TCP の往復伝搬遅延時間は、TCP の輻輳制御機構にとって制御遅延に相当するためである。一般に、フィードバック制御において、制御遅延が大きくなれば、システムの安定性および過渡特性の両方が劣化する。

また、整定時間に着目すると、TCP の往復伝搬遅延時間 τ が 4 [ms] の時に、整定時間が最小となっていることがわかる。これは、往復伝搬遅延時間が小さい場合に

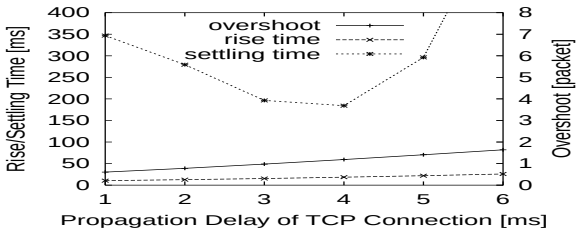

図 7: TCP のコネクションが一本加わった場合 (TCP の往復伝搬遅延時間 τ=1–5 [ms])

は、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長の変化が遅くなり、一方、伝搬遅延時間が大きい場合には、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長の変化が一時的に振動するためと考えられる。このことから、伝搬遅延時間をさらに大きくすると、RED ゲートウェイの動作が不安定になる (現在パケット待ち行列長が振動する) と予想される。一般のフィードバック制御では、制御遅延が小さくなれば、システムの安定性および過渡特性の両方が向上する。しかし、TCP の輻輳回避フェーズでは、送信側ホストはラウンドトリップ時間ごとにウィンドウサイズを増加させる。このため、TCP の往復伝搬遅延時間が小さくなれば、それにともないウィンドウサイズの変化量が小さくなると考えられる。

最後に、RED ゲートウェイの最大パケット棄却率 max_p を変化させた時の結果を図 8 に示す。max_p の値が大きくなるにつれて、行き過ぎ量、立ち上がり時間、整定時間のすべてがわずかに小さくなっているが、その変化の度合は小さい。つまり、最大パケット棄却率 max_p は、RED ゲートウェイの過渡特性にあまり影響を与えないといえる。したがって、最大パケット棄却率 max_p を決定する場合には、RED ゲートウェイの定常特性 (平均ウィンドウサイズや平均パケット待ち行列長) のみを慮すればよい。なお、結果は省略するが、最小しきい値 min_{th} や最大しきい値 max_{th} も RED ゲートウェイの過渡特性にあまり影響を与えないことがわかった。

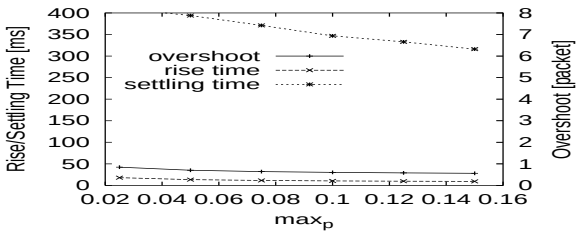

図 8: TCP のコネクションが一本加わった場合 (最大パケット棄却率 max_p = 0.025–0.15)

7 まとめと今後の課題

本稿では、文献 [5] で導出されている平均状態遷移方程式を利用することにより、TCP のコネクション数の変動が、RED ゲートウェイの過渡特性にどのような影響を与えるかを解析した。TCP コネクションと RED ゲートウェイを含んだ、ネットワーク全体をフィードバック系のシステムとしてモデル化した。これにより、定常状態において TCP のコネクション数が変動した時に、RED ゲートウェイの現在パケットパケット待ち行列長がどのように変動するかに着目した評価を行った。

その結果、すべての TCP コネクションが輻輳回避フェーズで動作する場合、RED ゲートウェイの過渡特性は、定常状態における TCP のコネクション数、RED ゲートウェイの処理能力、TCP の往復伝搬遅延時間によって大きく変化することを定量的に示した。また、RED ゲートウェイの制御パラメータは、RED ゲートウェイの過渡特性にあまり影響を与えないことを示した。

今後の課題としては、一時的な TCP コネクション数の変動だけでなく、より現実的な TCP コネクション数の変動をモデル化して、過渡特性を解析する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業における研究プロジェクト「高度マルチメディア応用システム構築のための先進的ネットワークアーキテクチャの研究」(JSPS-RFTF97R16301) によっている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

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

[2] B. Barden et al., "Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet," *Request for Comments (RFC) 2309*, April 1998.

[3] D. Lin and R. Morris, "Dynamics of random early detection," in *Proceedings of ACM SIGCOMM '97*, pp. 127–137, September 1997.

[4] M. May, J. Bolot, C. Diot, and B. Lyles, "Reasons not to deploy RED," in *Proceedings of IWQoS '99*, pp. 260–262, March 1999.

[5] 大崎 博之, 米良 祐一郎, 村田 正幸, 宮原 秀夫, "RED ゲートウェイの定常状態解析 — 安定性および過渡特性 —," 電子情報通信学会技術研究報告 (SSE2000-137), pp. 131–136, Sept. 2000.

[6] M. May, T. Bonald, and J.-C. Bolot, "Analytic evaluation of RED performance," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, pp. 1415–1424, March 2000.

[7] V. Sharma, J. Virtamo, and P. Lassila, "Performance analysis of the random early detection algorithm," available at `http://keskus.tct.hut.fi/tutkimus/com2/publ/redanalysis.ps`, September 1999.

[8] W. R. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols*. New York: Addison-Wesley, 1994.

[9] 伊藤 正美, 自動制御理論 (上). 昭晃堂, 1983.