

特別研究報告

題目

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

指導教官

村田 正幸 教授

報告者

岸本 統久

平成 13 年 2 月 22 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

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

内容梗概

近年、エンド-エンド間で動作する TCP (Transmission Control Protocol) 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パケットスケジューリング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、製品にも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 ゲートウェイに関する研究は数多く行なわれてきたが、その大部分はシミュレーションによる性能評価であり、数学的手法による特性解析は十分に行われていない。RED ゲートウェイの定常特性に着目した評価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行われていない。そこで本報告では、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数学的手法を用いて明らかにする。具体的には、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システムとしてモデル化し、RED ゲートウェイの過渡特性を制御理論を用いて解析する。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与える影響を明らかにする。その結果、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大きな影響を与えないことを定量的に示している。

主な用語

インターネット、TCP (Transmission Control Protocol)、RED (Random Early Detection) ゲートウェイ、過渡特性解析、制御理論

目次

1	はじめに	4
2	RED ゲートウェイの動作アルゴリズム	6
3	解析モデルおよび記号の定義	8
4	RED ゲートウェイの状態遷移方程式の導出	11
4.1	状態遷移方程式の導出	11
4.2	平均状態遷移方程式の導出	12
4.3	平衡点の期待値の導出	13
5	RED ゲートウェイの過渡特性解析	14
5.1	平衡点における平均状態遷移方程式の線形化	14
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	15
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	16
6	数値例による考察	18
6.1	平衡点におけるウィンドウサイズおよび平均パケット待ち行列長	18
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	19
7	まとめと今後の課題	25
	謝辞	26
	参考文献	27

目 次

1	パケット棄却確率 p_b と平均パケット待ち行列長 \bar{q} の関係	6
2	TCP コネクション数が一定の解析モデル	8
3	TCP コネクション数が変動する解析モデル	10
4	本解析におけるスロットとシーケンスの関係	12
5	平衡点における最小ウィンドウサイズの期待値と TCP コネクション数の関係	18
6	平衡点における平均パケット待ち行列長の期待値と TCP コネクション数の 関係	19
7	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)	20
8	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 $N = 1-7$)	21
9	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])	22
10	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 $\tau=1-5$ [ms])	23
11	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 $max_p = 0.025-0.15$)	24
12	TCP のコネクションが一本加わった場合 (最大しきい値 $max_{th} = 8-26$) . . .	24

1 はじめに

パケット交換ネットワークにおいて、データ転送系サービスを効率的に収容するために、フィードバック型の輻輳制御機構が用いられている。現在のインターネットでは、フィードバック型の輻輳制御機構として、ウィンドウ型フロー制御方式である TCP (Transmission Control Protocol) が用いられている。TCP の輻輳制御機構は、もともとゲートウェイのアルゴリズムを考慮せずに動作するように設計されている。これは、実際のネットワークにおいては、ゲートウェイにおけるパケット処理順序やパケット棄却アルゴリズムは、送信側ホストでは分からないことを前提にしているためである。現在のインターネットのように、ネットワーク内に複数の輻輳制御機構や、異なる動作アルゴリズムを持つゲートウェイが存在する場合は、TCP の輻輳制御機構がゲートウェイのアルゴリズムから独立していることが望ましい。しかし、TCP の輻輳制御機構にこのような一般性を持たせているために、ネットワーク全体の性能が制限されてしまうという問題がある。

そこで、ゲートウェイにおいてエンド-エンド間で動作する TCP の輻輳制御機構を補助する、パケット処理機構がいくつか提案されている [2-4]。それらの中で、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 [3]。文献 [3] の著者らは、バッファが一杯になって始めてパケットを棄却する Drop-Tail ゲートウェイと比較して、RED は以下のような利点を持つと主張している。(1) RED ゲートウェイは平均パケット待ち行列長を低く抑えられるため、結果として、エンド-エンド間の転送遅延も小さく抑えられる。(2) RED ゲートウェイでは、Drop-Tail ゲートウェイのように、バースト・トラヒックに対して偏りのあるパケット棄却 (バースト的に到着するパケットをより多く廃棄してしまう) が発生しない。(3) RED ゲートウェイでは、Drop-Tail ゲートウェイで発生するような、複数の TCP コネクションが同期してしまうという問題を防ぐことができる。

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 [3, 5-7]。例えば、文献 [3] 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にすぎない。実際、RED ゲートウェイの特性を理論的に解析した研究は非常に少ない。

文献 [1, 8, 9] 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 のコネクション数は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とともに変動するため、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。コネクション数が増減するとバッファオーバーフローや、バッファアンダーフローが起こる可能性があり、それらは RED ゲートウェイの性能を大きく低下させる要因になる。

そこで本報告では、文献 [1] 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、ある TCP コネクションが新たに転送を開始した場合、もしくはある TCP コネクションが転送を終了した場合、これによって RED ゲートウェイの過渡特性がどのように変化するかを解析する。なお、本解析では、RED ゲートウェイの性能を向上させるため、文献 [3] の著者により提案されている “gentle_” パラメータの影響をも考慮した解析を行う。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。

本報告の構成は以下のとおりである。まず 2 章では、RED ゲートウェイの特徴および動作アルゴリズムを簡単に説明する。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 [1] 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過程を簡単に説明する。5 章では、平均的状態遷移方程式を用いて、TCP コネクション数が増減した場合の、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。6 章では、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。最後に 7 章では、本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2 RED ゲートウェイの動作アルゴリズム

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。つまり、現在の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 および \bar{q} とすれば、RED ゲートウェイはパケットが到着するたびに、平均パケット待ち行列長 \bar{q} を以下の式で更新する。

$$\bar{q} \leftarrow (1 - q_w) \bar{q} + q_w q \quad (1)$$

ここで、 q_w は平均パケット待ち行列長に対する、現在パケット待ち行列長の重みを決定するパラメータである。

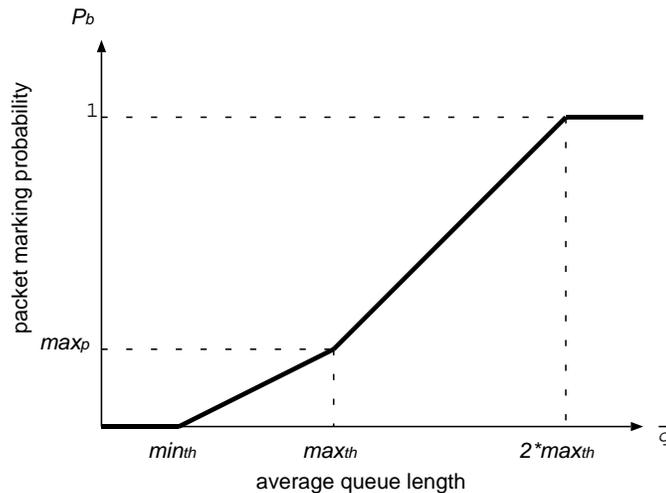


図 1: パケット棄却確率 p_b と平均パケット待ち行列長 \bar{q} の関係

このようにして得られた平均パケット待ち行列長を用いて、RED ゲートウェイは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 を以下のように決定する (図 1)。

$$p_b = \begin{cases} 0, & \text{if } \bar{q} < min_{th} \\ 1, & \text{if } \bar{q} \geq 2max_{th} \\ max_p \left(\frac{\bar{q} - min_{th}}{max_{th} - min_{th}} \right), & \text{if } min_{th} \leq \bar{q} \leq max_{th} \\ (1 - max_p) \left(\frac{\bar{q} - max_{th}}{max_{th}} \right) + max_p, & \text{if } max_{th} < \bar{q} < 2max_{th} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 max_p は最大の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、同じパケット棄却確率 p_b がすべてのパケットに対して用いられる。参考のため、表 1 に文献 [3] の著者らが推奨している RED ゲートウェイの制御パラメータの値を示す。

表 1: 推奨されている RED の制御パラメータの値

min_{th}	(最小しきい値)	5	[パケット]
max_{th}	(最大しきい値)	15	[パケット]
max_p	(最大パケット棄却確率)	0.1	
q_w	(指数平均の重み)	0.002	

3 解析モデルおよび記号の定義

本報告では、文献 [1] 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 [1] 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。さらに図に示すゲートウェイがネットワーク全体のボトルネックであると仮定する。つまり、すべてのホスト-ゲートウェイ間、ゲートウェイ-ゲートウェイ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。

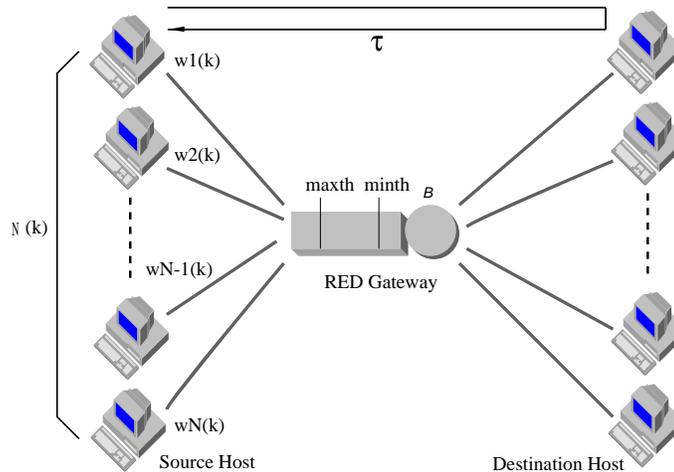


図 2: TCP コネクション数が一定の解析モデル

すべての送信側ホストでは、TCP Reno [10, 11] の輻輳制御機構を用いる。各送信側ホストにはウィンドウサイズが定められており、その値は TCP の輻輳制御機構によって制御される。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許される。つまり、送信側ホストは 1 ラウンド・トリップ時間中に、 W 個のパケットをバースト的に送することが可能である。そこで本解析では、ネットワーク全体を、単

位スロット時間が TCP コネクションのラウンド・トリップ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。送信側ホストの、 k 番目のスロットにおけるウィンドウサイズを $w(k)$ と定義する。また、すべての送信側ホストは常に伝送するデータをもっていると仮定する。つまり、すべての送信側ホストは、各スロットにおいて必ず $w(k)$ 個のパケットを送出するものとする。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 $\bar{q}(k)$ と定義する。なお以下の解析では、 q および \bar{q} は 1 スロット内では一定であると仮定する。文献 [8] に示されているように、 q_w の値が小さい場合にはこの仮定は妥当なものである。また、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。

文献 [1] では、このような解析モデルに対して、RED ゲートウェイの平均状態遷移方程式が導出されている。本報告では、ここで導出されている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。本報告で用いる解析モデルを図 3 に示す。定常状態において N 本の TCP コネクションが存在し、ここで ΔN 本の TCP コネクションが転送を開始した場合、もしくは ΔN 本の TCP コネクションが転送を終了した時の、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。

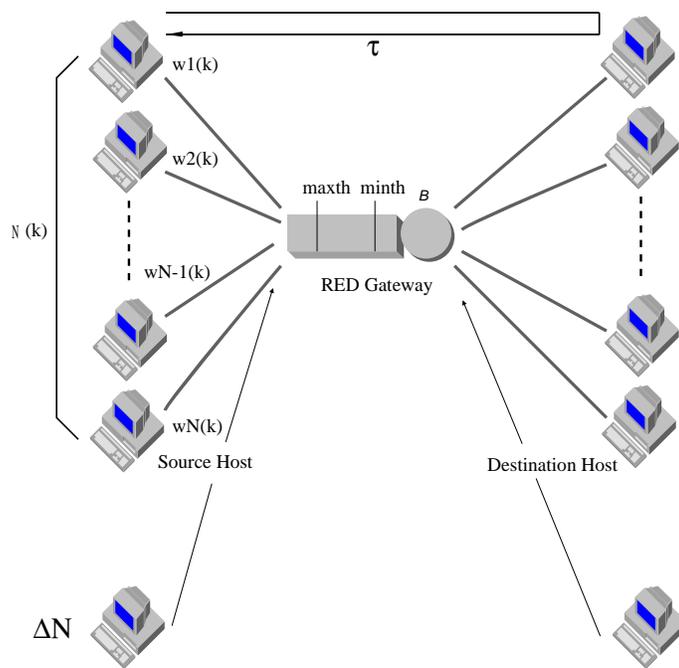


図 3: TCP コネクション数変動する解析モデル

4 RED ゲートウェイの状態遷移方程式の導出

本章では、文献 [1] 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過程を簡単に説明する。導出方法の詳細については、文献 [1] を参照されたい。

4.1 状態遷移方程式の導出

まず、各スロットにおけるパケット棄却確率を導出する。 k 番目のスロットの先頭で、各送信側ホストはネットワークに $w(k)$ 個のパケットを送出する。RED ゲートウェイは送信側ホストから到着するパケットを確率的に棄却する。本解析では 1 スロット内の平均パケット待ち行列長 \bar{q} は一定と仮定している。このため、パケット棄却確率 p_b も一定となり、 k 番目のスロットにおけるパケット棄却確率を $p_b(k)$ とする。本解析では平均パケット待ち行列長 \bar{q} が min_{th} と max_{th} の間にある場合を考える。式 (2) より、 $p_b(k)$ は以下の式で与えられる。

$$p_b(k) = max_p \left(\frac{\bar{q}(k) - min_{th}}{max_{th} - min_{th}} \right) \quad (3)$$

k 番目のスロットにおける、棄却されずに連続して通過するパケット数の期待値を $\bar{X}(k)$ とすると、 $\bar{X}(k)$ は以下の式で与えられる。

$$\bar{X}(k) = \frac{1/p_b(k) + 1}{2} \quad (4)$$

これより、 $k + 1$ 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決定される。

$$w(k + 1) = \begin{cases} \frac{w(k)}{2} & \text{with probability } w(k) p_b(k) \\ w(k) + 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

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。

$$q(k + 1) = q(k) + n(k) w(k) - B \left(\tau + \frac{q(k)}{B} \right) \quad (6)$$

ここで、1 スロットの長さは、往復の伝搬遅延時間 τ とバッファにおける遅延時間 $q(k)/B$ の和で与えられている。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 $\bar{q}(k + 1)$

は以下の式で与えられる。

$$\bar{q}(k+1) = (1 - q_w)^{n(k) w(k)} \bar{q}(k) + \frac{q_w \{1 - (1 - q_w)^{n(k) w(k)}\}}{1 - (1 - q_w)} q(k) \quad (7)$$

図 2 に示した解析モデルは、ここまでで得られた状態遷移方程式 (式 (5)–(7)) によって記述される。また、システムの状態ベクトル $\mathbf{x}(k)$ は以下のように与えられる。

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} w(k) \\ q(k) \\ \bar{q}(k) \\ n(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

4.2 平均状態遷移方程式の導出

RED ゲートウェイは到着するパケットを確率的に棄却するため、式 (5) には確率を含んでいる。そこで、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。まず、RED ゲートウェイが一つもパケットを棄却しないスロットの列によって構成される、「シーケンス」という概念を導入する (図 4)

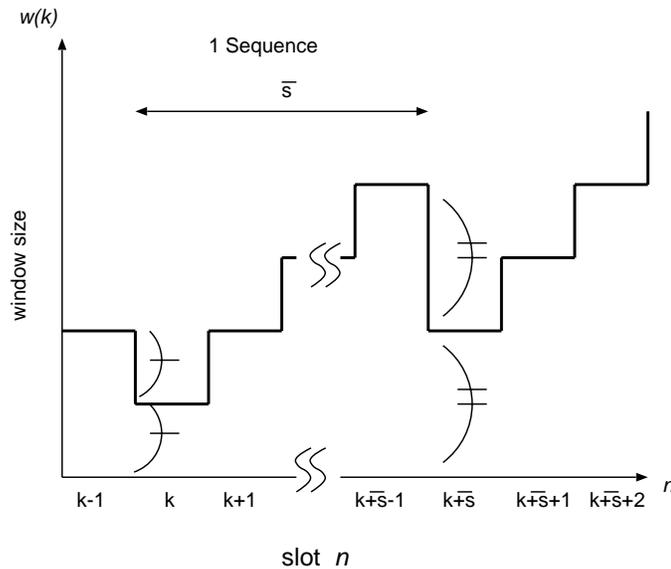


図 4: 本解析におけるスロットとシーケンスの関係

ここで、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。 $\bar{s}(k)$ を 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とすれば、 $\bar{s}(k)$ は次式で与えられる。

$$\bar{s}(k) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - 2w(k) + \frac{\sqrt{n(k)^2(1-2w(k))^2 + 8n(k)\bar{X}(k)}}{n(k)} \right\} \quad (9)$$

さらに、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 (5) から以下のように与えられる。

$$w(k + \bar{s}(k)) = \frac{w(k) + \bar{s}(k) - 1}{2} \quad (10)$$

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。

$$q(k + \bar{s}(k)) \simeq n(k)(w(k) + \bar{s}(k) - 1) - B\tau \quad (11)$$

さらに、シーケンス間の $\bar{q}(k)$ の平均状態遷移方程式は、以下のように与えられる。

$$\bar{q}(k + \bar{s}(k)) \simeq (1 - q_w)^{\bar{X}(k)} \bar{q}(k) + \{1 - (1 - q_w)^{\bar{X}(k)}\} q(k) \quad (12)$$

これらの平均状態遷移方程式 (式 (10)、(11)、(12)) 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。

4.3 平衡点の期待値の導出

w^* 、 q^* 、 \bar{q}^* 、 n^* をそれぞれウィンドウサイズ $w(k)$ 、現在パケット待ち行列長 $q(k)$ 、平均パケット待ち行列長 $\bar{q}(k)$ 、TCP のコネクション数 $n(k)$ の平衡点の期待値とする。これらの値は、次式で与えられる。

$$w^* = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{3n^*} \left(\frac{max_{th} - min_{th}}{max_p(\bar{q}^* - min_{th})} + 1 \right)} - \frac{1}{2} \quad (13)$$

$$q^* = 2n^* w^* - B\tau \quad (14)$$

$$\bar{q}^* = q^* \quad (15)$$

なお、 w^* は定常状態におけるウィンドウサイズの平均値ではなく、最小ウィンドウサイズの平均値であることに注意されたい。

5 RED ゲートウェイの過渡特性解析

本章では、4章で得られた平均状態遷移方程式を用いて、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。

5.1 平衡点における平均状態遷移方程式の線形化

実際のネットワークでは、TCP のコネクション数は時間とともに変動する。TCP のコネクション数が変化した直後の過渡状態において、TCP のウィンドウサイズや RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長は、時間とともに変化する。そこで本解析では、この中でも特に、現在パケット待ち行列長の変動に着目した解析をおこなう。過渡状態において現在パケット待ち行列長が大きくなり過ぎると、バッファオーバーフローによって多くのパケット棄却が発生する。一方、過渡状態において現在パケット待ち行列長が小さくなり過ぎると、RED ゲートウェイの利用率が低下する。このため、現在パケット待ち行列長は、RED ゲートウェイの過渡特性の重要な指標となる。

まず、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 (図 3)。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。

まず、 k 番目のスロットにおけるシステムの状態 (式 (8)) と、平衡点の期待値との差である $\bar{x}(k)$ を、以下のように定義する。

$$\bar{x}(k) \equiv \begin{bmatrix} w(k) - w^* \\ q(k) - q^* \\ \bar{q}(k) - \bar{q}^* \\ n(k) - n^* \end{bmatrix} \quad (16)$$

$w(k)$ 、 $q(k)$ 、 $\bar{q}(k)$ 、 $n(k)$ 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 A と $\bar{x}(k)$ を用いて、 $\bar{x}(k + \bar{s})$ は以下の式で与えられる。

$$\bar{x}(k + \bar{s}) = A \bar{x}(k) \quad (17)$$

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、変化した 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、 $u(k)$ は以下ようになる。

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

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 (17) 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。

$$\bar{x}(k+1) = \mathbf{A}\bar{x}(k) + \mathbf{B}u(k) \quad (18)$$

$$q(k) = \mathbf{C}\bar{x}(k) \quad (19)$$

ここで \mathbf{A} は式 (17) で与えられ、 \mathbf{B} および \mathbf{C} は次式で与えられる。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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。

$$q(k) = \sum_{i=0}^k u(i) \bar{x}(k-i) \quad (20)$$

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。同様にして、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可能である。

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。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、 $u'(k)$ は以下の式で与えられる。

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

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。

$$\bar{x}(k+1) = \mathbf{A}\bar{x}(k) + \mathbf{B}'u'(k) \quad (21)$$

$$q(k) = \mathbf{C}\bar{x}(k) \quad (22)$$

ここで \mathbf{B}' は次式で与えられる。

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

6 数値例による考察

6.1 平衡点におけるウィンドウサイズおよび平均パケット待ち行列長

式 (13) および (15) で与えられる、平衡点における最小ウィンドウサイズの期待値 w^* および平均パケット待ち行列長 \bar{q}^* を、それぞれ図 5 および 6 に示す。ここでは、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] としている。なお、TCP のコネクション数 $N(= n(k))$ は 1 から 20 まで、最大パケット棄却確率 max_p は 0.01 から 0.4 まで変化させている。RED ゲートウェイのその他の制御パラメータの値については、表 1 に推奨されている値を使用している。図 5 より、RED ゲートウェイの最大パケット棄却確率 max_p を小さくなる、もしくは TCP のコネクション数が小さくなるにつれ、最小ウィンドウサイズの期待値 w^* が小さくなることがわかる。また図 6 より、最大パケット棄却確率 max_p が大きくなる、もしくは TCP のコネクション数が少なくなるにつれ、RED ゲートウェイの平均パケット待ち行列長の期待値が小さくなることがわかる。

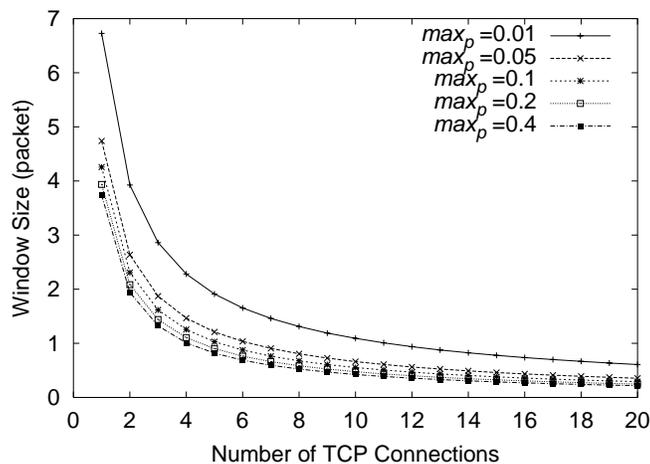


図 5: 平衡点における最小ウィンドウサイズの期待値と TCP コネクション数の関係

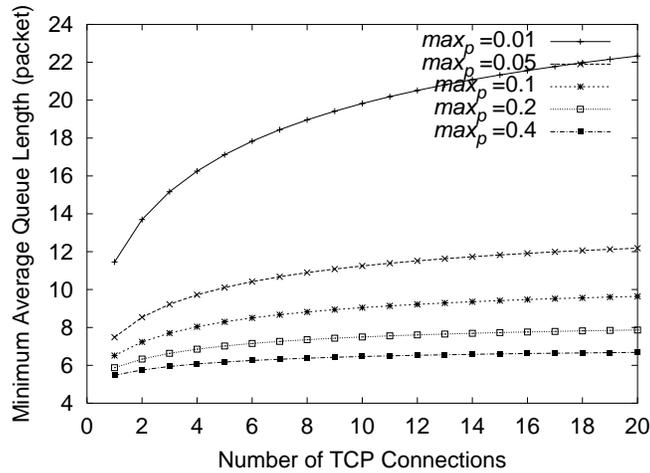


図 6: 平衡点における平均パケット待ち行列長の期待値と TCP コネクション数の関係

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

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。具体的には、RED ゲートウェイの制御パラメータや、RED ゲートウェイの処理能力や伝搬遅延時間などのシステムパラメータが、現在待ち行列長の過渡的な変動にどのような影響を与えるかを明らかにする。

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) などが用いられる (図 7) [12]。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。本報告では、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ずれが 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。

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

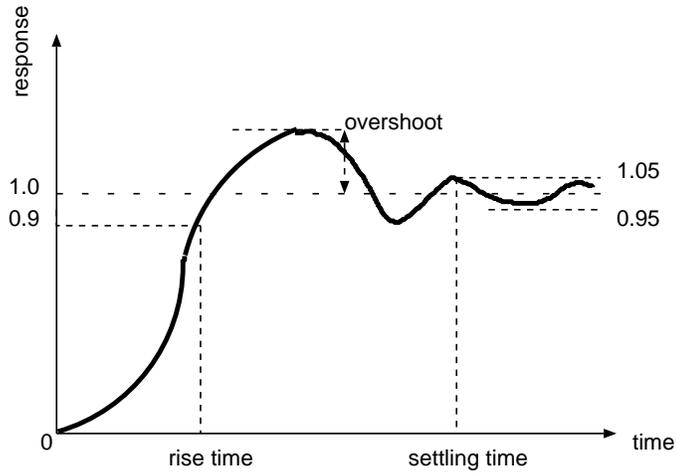


図 7: 過渡特性の性能指標 (行き過ぎ量、立ち上がり時間、整定時間)

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 packets 待ち行列長がどれだけ速く変化するかを意味する。式 (6) より、packets 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。

以下では、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) を考える。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^* 、 \bar{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 packets 待ち行列長 $q(k)$ の変動を式 (20) によって計算する。

まず、図 8 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、RED ゲートウェイの現在 packets 待ち行列長の時間的な変動、および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表 1 の値を使用し、システムパラメータとして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 $\Delta N = 1$ 。

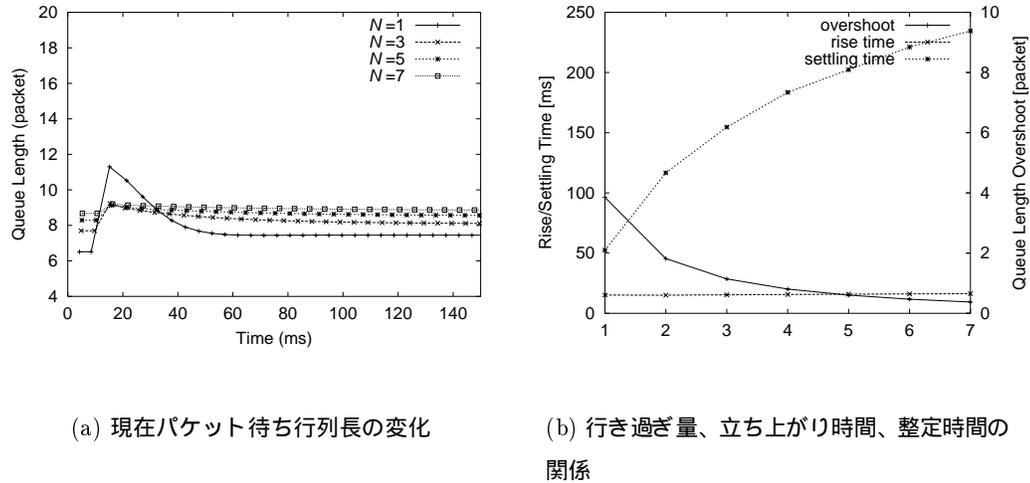
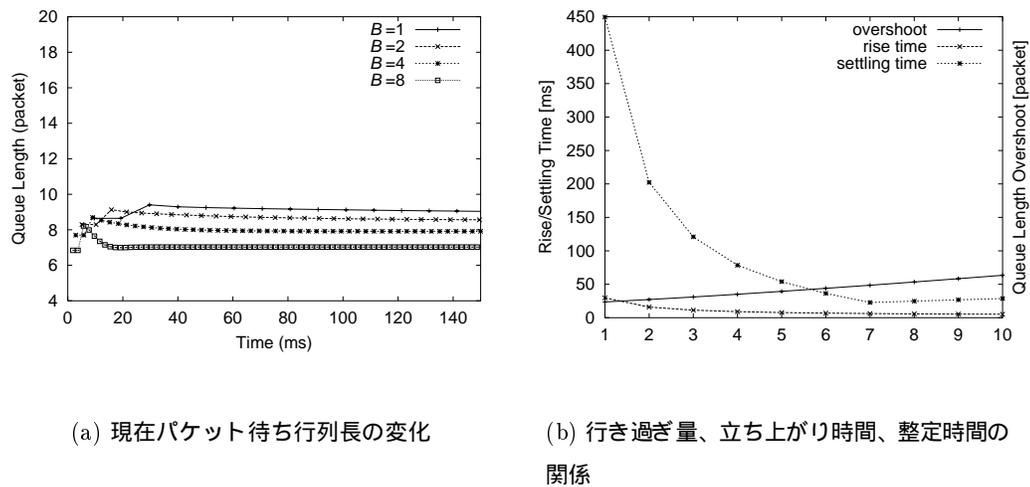


図 8: TCP コネクションが 1 本加わった場合 (定常状態における TCP のコネクション数 $N = 1-7$)

図 8 より、定常状態における TCP のコネクション数 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 5 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 9 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、行き過ぎ量がわずかに小さくなり、立ち上がり時間および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 5 [パケット/ms] より小さい場合、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。

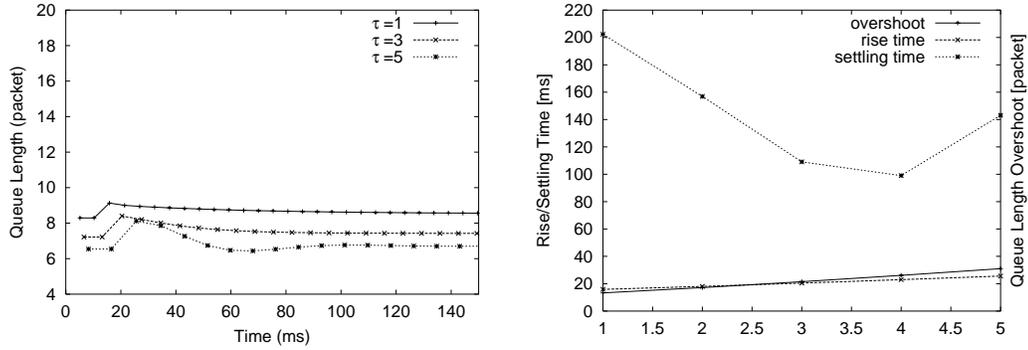


(a) 現在パケット待ち行列長の変化 (b) 行き過ぎ量、立ち上がり時間、整定時間の関係

図 9: 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 10 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、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長の時間的な変動を示す。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。図 10 からわかるように、往復伝搬遅延時間が小さい場合には、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長の変化が遅くなっている。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している。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



(a) 現在パケット待ち行列長の変化

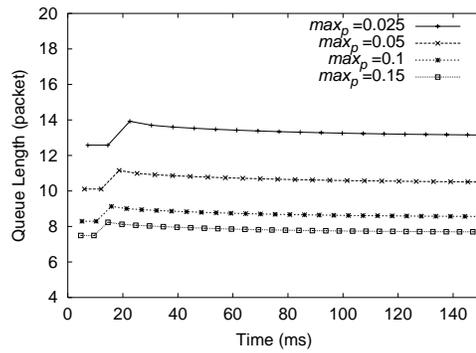
(b) 行き過ぎ量、立ち上がり時間、整定時間の関係

図 10: 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 $\tau=1-5$ [ms])

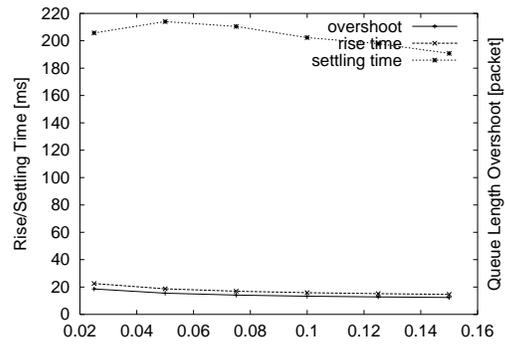
ドバック制御では、制御遅延が小さくなれば、システムの安定性および過渡特性の両方が向上する。しかし、TCP の輻輳回避フェーズでは、送信側ホストはラウンドトリップ時間ごとにウィンドウサイズを増加させる。このため、TCP の往復伝搬遅延時間が小さくなれば、それにともないウィンドウサイズの変化量が小さくなると考えられる。

以下では、RED ゲートウェイの制御パラメータである max_p および min_{th} の値が、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検討する。まず、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 11 に示す。これより、 max_p の値が小さくなるにつれて、RED ゲートウェイの現在パケット待ち行列長が大きくなるが、RED ゲートウェイの過渡特性にはほとんど影響を与えないことがわかる。 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。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) のみを考慮すればよい。

さらに、RED ゲートウェイの最大しきい値 max_{th} を 8 から 29 まで変化させた時の結果を図 12 に示す。この図より、最大棄却率 max_p を変化させた時と同様に、最大しきい値 max_{th} 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わかる。

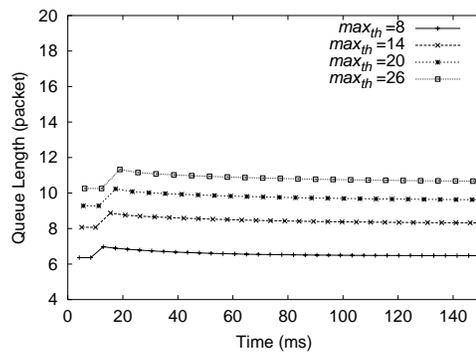


(a) 現在パケット待ち行列長の変化

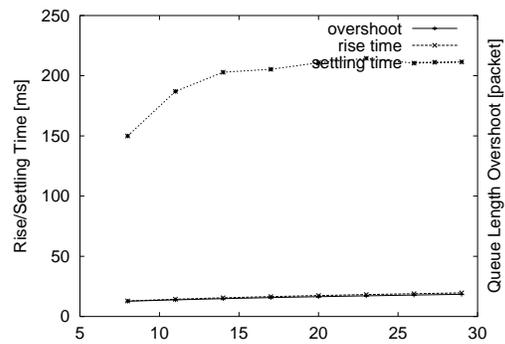


(b) 行き過ぎ量、立ち上がり時間、整定時間の関係

図 11: 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 $max_p = 0.025-0.15$)



(a) 現在パケット待ち行列長の変化



(b) 行き過ぎ量、立ち上がり時間、整定時間の関係

図 12: TCP のコネクションが一本加わった場合 (最大しきい値 $max_{th} = 8-26$)

7 まとめと今後の課題

本報告では、文献 [1] 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システムとしてモデル化し、RED ゲートウェイの過渡特性を制御理論を用いて解析した。特に、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。TCP が輻輳回避フェーズで動作する場合、および TCP がスロースタートフェーズで動作する場合の両方を解析した。

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がわかった。このことから、RED ゲートウェイの制御パラメータは、RED ゲートウェイの定常特性 (平均パケット待ち行列長など) にあわせて設定すればよいことがわかった。

今後の課題としては、単なる TCP コネクション数の増減だけでなく、より一般的な TCP コネクション数の変動をモデル化し、この時の RED ゲートウェイの過渡特性を解析する必要があると考えられる。

謝辞

本報告を終えるにあたり、御指導、御教授を頂いた村田正幸教授に深く感謝致します。また、本報告において終始直接御指導頂いたサイバーメディアセンターの大崎博之助手に心より感謝致します。並びに適切な助言を頂いた宮原秀夫教授、大阪府立看護大学医療技術短期大学の菅野正嗣助教授、サイバーメディアセンターの馬場健一助教授、宮原研究室の若宮直紀講師、村田研究室の長谷川剛助手、大阪市立大学の阿多信吾助手、経済学部の荒川伸一助手に心から感謝致します。また、先輩である高垣景一氏には一年間を通して熱心な御指導を頂き、心からお礼を申し上げます。最後に、御協力を頂いた村田研究室および宮原研究室の皆様心からお礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. Ohsaki, Y. Mera, M. Murata, and H. Miyahara, “Steady state analysis of the RED gateway — stability and transient behavior —,” *Technical Report of IEICE* (SSE2000-137), pp. 131–136, Sept. 2000.
- [2] E. Hashem, “Analysis of random drop for gateway congestion control,” *Technical Report MIT-LCS-TR-465*, 1989.
- [3] S. Floyd and V. Jacobson, “Random early detection gateways for congestion avoidance,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, pp. 397–413, August 1993.
- [4] B. Barden et al., “Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet,” *Request for Comments (RFC) 2309*, April 1998.
- [5] D. Lin and R. Morris, “Dynamics of random early detection,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM '97*, September 1997.
- [6] M. May, J. Bolot, C. Diot, and B. Lyles, “Reasons not to deploy RED,” in *Proceedings of IWQoS '99*, pp. 260–262, March 1999.
- [7] T. J. Ott, T. V. Lakshman, and L. Wong, “SRED: Stabilized RED,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM '99*, March 1999.
- [8] M. May, T. Bonald, and J.-C. Bolot, “Analytic evaluation of RED performance,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, March 2000.
- [9] 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.
- [10] W. R. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols*. New York: Addison-Wesley, 1994.

- [11] W. R. Stevens, “TCP slow start, congestion avoidance, fast retransmit, and fast recovery algorithms,” *Request for Comments (RFC) 2001*, January 1997.
- [12] 伊藤 正美, 自動制御理論「上」. 昭晃堂, 1983.