制御理論を用いた RED ゲートウェイの過渡特性解析に関する検討

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 の輻輳制御機構をゲートウェイにおいて補助する、アクティブキュー管理機構に関する研究が活発に行われている。RED ゲートウェイに関する研究は非常に多いが、RED ゲートウェイの定常特性に着目した研究がほとんどであり、過渡特性を評価した研究はほとんどない。我々はこれまで、TCP コネクション数の変動を考慮した、RED ゲートウェイの過渡特性解析を行なった。しかし、そこでは一時的な TCP コネクションの変動のみを対象としており、一般的な TCP コネクション数の変動に対する過渡特性は明らかにされていない。そこで本稿では、そこでの解析手法を応用することにより、さまざまな TCP コネクション数の変動に対する、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。具体的には、制御理論で広く利用されている伝達関数を用いて、時間領域ではなく、周波数領域において解析を行う。さらに、シミュレーション実験により、本稿で提案する過渡特性解析の妥当性を検証する。
和文キーワード TCP (Transmission Control Protocol)、RED ゲートウェイ、過渡特性解析、制御理論、伝達関数

On Transient Behavior Analysis of Random Early Detection Gateway using a Control Theoretic Approach

Motohisa Kisimoto† Hiroyuki Ohsaki‡ Masayuki Murata‡

†Graduate School of Engineering Science, Osaka University
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
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 AQM (Active Queue Management) mechanisms support the end-to-end congestion control mechanism of TCP (Transmission Control Protocol). Several AQM mechanisms have been recently proposed and studied by many researchers. One of promising AQM mechanisms is the RED (Random Early Detection) gateway, which randomly discards arriving packets. Although its steady state performance has been fully investigated, its transient behavior has not been well understood. In our previous work, we have analyzed the transient behavior of the RED gateway for a limited cases of TCP connection variations. In this paper, by extending our previous work, we analyze the transient behavior of the RED gateway for various types of TCP connection variations (e.g., intermittent arrival or continuous arrival of multiple TCP connections). We use a control theoretic approach, which is based on the transfer function describing the relation between input and output in frequency domain. By presenting several numerical and simulation results, we discuss how control parameters of the RED gateway affect its transfer behavior.
key words TCP (Transmission Control Protocol), RED Gateway, Transient Behavior Analysis, Control Theory, Transfer Function

1 はじめに

近年、エンド–エンド間で動作する TCP の輻輳制御機構をゲートウェイにおいて補助する、アクティブキュー管理機構に関する研究が活発に行われている [1]。例えば、RED (Random Early Detection) ゲートウェイでは、到着するパケットを確率的に棄却することにより、TCP トラヒックに対する性能向上を図っている [2]。その結果、現在広く普及している Drop Tail ゲートウェイと比較すると、RED ゲートウェイは (1) 平均パケット待ち行列長を小さく抑える、(2) 複数の TCP コネクションの同期による性能劣化を防ぐ、(3) TCP コネクション間の公平性が向上する、という結果が報告されている [2]。しかし、RED ゲートウェイの有効性は、4 種類の制御パラメータの設定に大きく依存するにもかかわらず、その設定が簡単ではないという問題がある。

これまで、RED ゲートウェイに関して、数多くの研究が行われてきた。その大部分は、シミュレーションにより、さまざまなネットワーク環境における RED ゲートウェイの特性や、RED ゲートウェイの制御パラメータがその性能に与える影響を明らかにしている [2, 3]。また、RED ゲートウェイを数学的に解析した研究もいくつか存在する。例えば、文献 [4-8] などでは、定常状態に着目することにより、RED ゲートウェイの性能評価が行われている。これらの研究結果にもとづき、RED ゲートウェイのパラメータ設定方法に関しては、シミュレーションなどから経験的に得られたガイドライン [9] や、解析結果にもとづくガイドライン [5, 8] などが存在する。

このように、RED ゲートウェイに関する研究は非常に多いが、RED ゲートウェイの定常特性に着目した研究がほとんどであり、RED ゲートウェイの過渡特性を評価した研究はほとんどない。我々はこれまで、文献 [10] において、TCP コネクション数の変動を考慮した、RED ゲートウェイの過渡特性解析を行なった。ここでは、文献 [8] で提案されている解析手法を拡張することにより、RED ゲートウェイの定常特性および過渡特性を明らかにした。ただし文献 [10] では、一時的な TCP コネクションの変動のみを対象としており、複数の TCP コネクションが連続的に到着するなど、より一般的な TCP コネクション数の変動に対する、RED ゲートウェイの過渡特性は明らかになっていない。

そこで本稿では、文献 [10] における解析手法を応用することにより、さまざまな TCP コネクション数の変動に対する、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。具体的には、制御理論で広く用いられている伝達関数を用いて、時間領域ではなく、周波数領域において解析を行う。さらに、いくつかのシミュレーション実験により、本稿で提案する過渡特性解析の妥当性を検証する。

本稿の構成は以下のとおりである。まず 2 章では、過渡特性解析の基礎となる、解析モデルおよび状態遷移方程式を簡単に説明する。3 章では、文献 [10] における解析手法を応用することにより、一般的な TCP コネクション数の変動に対する、RED ゲートウェイの過渡特性解析を行う。4 章では、いくつかの数値例を示し、RED ゲートウェイの制御パラメータと過渡特性との関係について議論する。また、解析結果とシミュレーション結果を比較することにより、解析の妥当性を検証する。最後に 5 章では、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

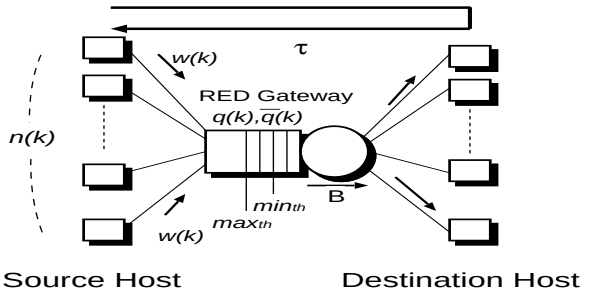

図 1: 解析モデル

表 1: 解析で用いる記号の定義

min_{th}	RED の最小しきい値
max_{th}	RED の最大しきい値
max_p	RED の最大パケット棄却確率
q_w	RED の指数平均の重み
τ	TCP コネクションの往復伝搬遅延時間
B	RED ゲートウェイの処理能力
$w(k)$	スロット k におけるウィンドウサイズ
$q(k)$	スロット k における現在パケット待ち行列長
$\overline{q}(k)$	スロット k における平均パケット待ち行列長
$n(k)$	スロット k における TCP のコネクション数

2 解析モデルおよび状態遷移方程式

本稿では、文献 [10] の解析手法を応用することにより、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。まず、文献 [10] の解析モデル (図 1) および導出されている状態遷移方程式を簡単に説明する。本解析で用いる記号の定義を、表 1 に示す。文献 [10] では、解析において以下のような仮定がなされている。(1) すべての TCP コネクションは輻輳回避フェーズで動作している、(2) すべてのパケット棄却は重複 ACK によって検出できる (タイムアウトは発生しない)、(3) すべてのリンク容量は十分大きく、RED ゲートウェイの処理速度がボトルネックである、(4) すべての TCP コネクションの伝搬遅延時間は等しく、すべて同期して動作している、(5) RED ゲートウェイの制御パラメータは適切に設定されており、平均パケット待ち行列長は min_{th}–max_{th} 間にある。

このような仮定のもとで、ネットワーク全体を、ラウンドトリップ時間ごとに状態が変化する、離散時間モデルとしてモデル化している。具体的には、スロット k における、TCP のウィンドウサイズ $w(k)$、RED ゲートウェイのパケット待ち行列長 $q(k)$、RED ゲートウェイの平均パケット待ち行列長 $\overline{q}(k)$ が、以下のように導出されている。

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

$$q(k+\overline{s}(k)) \simeq \frac{n(k)\,(w(k)+\overline{s}(k)-1)}{2} - B\,\tau \quad (2)$$

$$\overline{q}(k+\overline{s}(k)) \simeq (1-q_w)^{\overline{X}(k)}\,\overline{q}(k) + \{1-(1-q_w)^{\overline{X}(k)}\}\,q(k) \quad (3)$$

ここで、$\overline{X}(k)$ および $\overline{s}(k)$ は次式で与えられる。

$$\overline{X}(k) = \frac{1}{2}\left(\frac{max_{th} - min_{th}}{max_p(\overline{q}(k) - min_{th})} + 1\right)$$

$$\overline{s}(k) = \frac{1}{2} - w(k) + \frac{\sqrt{n(k)^2(1-2w(k))^2 + 8n(k)\overline{X}(k)}}{2n(k)}$$

導出方法の詳細については、文献 [8, 10] を参照されたい。

3 過渡特性解析

以下では、2 章で説明した状態遷移方程式を用いて、TCP コネクション数が変動した時の、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。TCP の輻輳制御機構には、輻輳回避フェーズおよびスロースタートフェーズという、2 種類の動作フェーズがある。本解析では、文献 [10] と同様に、TCP コネクションが輻輳回避フェーズもしくはスロースタートフェーズのどちらで動作しているかによって、異なる解析手法を用いる。

まず、TCP コネクション数の変動を分類する。ある時刻において、N 本のアクティブな TCP コネクションが存在していた場合、TCP コネクションの増減は以下の 4 種類に分類できる。

C1: 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 (もしくは中断) した場合。

C2: 一時的に転送を中断していた ΔN 本の TCP コネクションが転送を再開し、なおかつ中断時間が短い場合。

C3: 一時的に転送を中断していた ΔN 本の TCP コネクションが転送を再開し、なおかつ中断時間が長い場合。

C4: ΔN 本の TCP コネクションが、新たに転送を開始した場合。

このうち、C1 (C2) では、減少 (増加) した ΔN 本の TCP コネクションは、輻輳回避フェーズで動作する。一方、C3 および C4 では、増加した ΔN 本の TCP コネクションは、スロースタートフェーズで動作する。

RED ゲートウェイの過渡特性解析を行うために、2 章の状態遷移方程式 (式 (1)–(3)) を、平衡点の近傍で線形化し、状態遷移行列 $\mathbf{A}$ によって記述する [10]。

$$\overline{\mathbf{x}}(k + \overline{s}(k)) = \mathbf{A}\overline{\mathbf{x}}(k) \quad (4)$$

ここで、$\overline{\mathbf{x}}(k)$ は、スロット k における、システムの状態と平衡点 (以下、$x(k)$ の平衡点を x^* と定義する) の期待値との差であり、次式で定義される。

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

式 (4) のように、システムの状態は $\overline{s}(k)$ スロット (RED ゲートウェイが、連続してパケット棄却が発生する間隔 [8]) ごとに変化する。以下では、この間隔を「シーケンス」と呼び、i 番目のシーケンスの開始スロットを S_i と定義する。

まず、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 (C1 もしくは C2) を考える。この時、

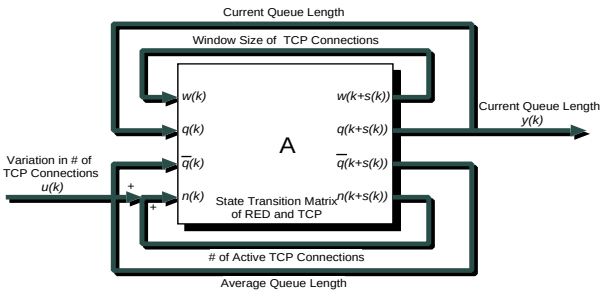

図 2: すべての TCP コネクションが輻輳回避フェーズで動作する場合 (C1 もしくは C2) の解析方法

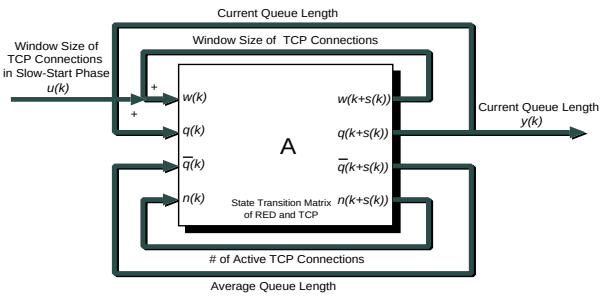

図 3: 一部の TCP コネクションがスロースタートフェーズで動作する場合 (C3 もしくは C4) の解析方法

スロット k における TCP コネクション数の変動を入力 $u(k)$、スロット k における RED ゲートウェイのパケット待ち行列長を出力 $y(k)$ と考える (図 2)。これにより、TCP コネクション数の変動を考慮し、平衡点の近傍で線形化した状態遷移方程式は以下の式で与えられる [10]。

$$\begin{aligned} \overline{\mathbf{x}}(k + \overline{s}(k)) &= \mathbf{A}\overline{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}u(k) \quad (5) \\ y(k) &= \mathbf{C}\overline{\mathbf{x}}(k) \\ \mathbf{B} &= [\,0\,0\,0\,1\,]^T \\ \mathbf{C} &= [\,0\,1\,0\,0\,] \end{aligned}$$

次に、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 もしくは C4) を考える。この時、スロット k において、スロースタートフェーズで動作する TCP コネクションが送出したウィンドウサイズの和を入力 $u(k)$、スロット k における RED ゲートウェイのパケット待ち行列長を出力 $y(k)$ と考える (図 3)。これにより、TCP コネクション数の変動を考慮し、平衡点の近傍で線形化した状態遷移方程式は以下の式で与えられる [10]。

$$\begin{aligned} \overline{\mathbf{x}}(k + \overline{s}(k)) &= \mathbf{A}\overline{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}u(k) \quad (6) \\ y(k) &= \mathbf{C}\overline{\mathbf{x}}(k) \\ \mathbf{B} &= [\,1\,0\,0\,0\,]^T \\ \mathbf{C} &= [\,0\,1\,0\,0\,] \end{aligned}$$

本稿では、制御理論で広く用いられている伝達関数を用いることにより、さまざまな TCP コネクション数の変動に対する、RED ゲートウェイの過渡特性を解析する。伝達関数とは、ある線型システムにおいて、周波数領域における入力と出力の比を示したものである [11]。

入力 $u(k)$ と出力 $y(k)$ の z 変換を、それぞれ $U(z)$ および $Y(z)$ とすれば、あるシステムの伝達関数 $G(z)$ は以下の関係を満たす。

$$Y(z) \quad = \quad G(z)\,U(z) \tag{7}$$

式 (5) または 式 (6) で与えられるシステムの伝達関数は、次式のように求めることができる [11]。

$$G(z) \quad = \quad \mathbf{C}(z\,\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\,\mathbf{B}$$

一般に、伝達関数の極 (分母多項式の解) によって、開ループシステムの安定性や過渡特性が決定される。具体的には、ある線型システムの極 λ_i $(1 \leq i)$ の絶対値 $|\lambda_i|$ を調べることにより、システムの安定性および過渡特性を判別することができる。本解析では、TCP コネクション数の変動 (C1 および C2 の場合) の z 変換、もしくはスロースタートフェーズで動作する TCP コネクションのウィンドウサイズの和 (C3 および C4 の場合) の z 変換が入力となる。このため、RED ゲートウェイの過渡特性を解析するためには、$G(z) \times U(z)$ の極を調べればよい。ただし、TCP のコネクション数 $n(k)$ は、入力 $U(z)$ によってのみ変化するため、式 (7) の極には、必ず絶対値が 1.0 のものが含まれる。しかし、この極は RED ゲートウェイのパケット待ち行列長の変動には影響を与えないので、この絶対値が 1.0 の極を除いて解析する必要がある。また、式 (4) を導出する際に、平衡点の近傍で線型近似を行っている。このため、TCP のウィンドウサイズや RED ゲートウェイのパケット待ち行列長が平衡点から外れた場合、近似誤差が大きくなると予想される。そこで 4 章では、解析結果とシミュレーション結果を比較することにより、本稿における過渡特性解析の妥当性を検証する。

まず、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 (C1 もしくは C2) 場合の、入力 $U(z)$ の例をいくつか説明する。

1. 一時的な TCP コネクション数の変動
   一時的な TCP コネクション数の変動は、インパルス入力によって表すことができる。例えば、i 番目のシーケンスにおいて、輻輳回避フェーズで動作する、TCP のコネクション数が ΔN だけ増加 (ΔN が負なら減少) した場合、入力 $u(k)$ およびその z 変換 $U(z)$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned} u(k) \quad &= \quad \begin{cases} \Delta N & \text{if } k = S_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ U(z) \quad &= \quad \Delta N\,z^{-i} \end{aligned} \tag{8}$$

2. 一般的な TCP コネクション数の変動
   一般的な TCP コネクション数の変動は、複数のインパルス入力の重ね合わせで表すことができる。例えば、t_i 番目のシーケンスで、輻輳回避フェーズで動作する TCP コネクションの数が ΔN_i だけ増加 (または減少) した場合、入力 $U(z)$ は以下のようになる。

$$U(z) \quad = \quad \sum_i \Delta N_i z^{-t_i} \tag{9}$$

3. 連続的な TCP コネクション数の変動
   連続的な TCP コネクション数の変動は、ステップ入力によって表すことができる。例えば、1 シーケンスごとに、TCP のコネクション数が ΔN だけ増加 (減少) する場合、入力 $U(z)$ は次式のようになる。

$$U(z) \quad = \quad \frac{\Delta N\,z}{z-1}$$

次に、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 (C3 もしくは C4) 場合の、入力 $U(z)$ の例をいくつか説明する。

1. 一時的な TCP コネクション数の増加
   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、ラウンドトリップ時間ごとにウィンドウサイズが 2 倍に増加する。このため、i 番目のシーケンスにおいて、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 本増加した場合、入力 $u(k)$ および $U(z)$ は、次式で近似できる。

$$\begin{aligned} u(k) \quad &\simeq \quad \begin{cases} \frac{\Delta N}{n(k)} \times 2^{\overline{s}(k)(k-S_i-1)} & \text{if } k > S_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ U(z) \quad &\simeq \quad \frac{2^{\overline{s}^*(-S_i-1)}\,\Delta N\,z}{n^*\,(z-2)} \end{aligned} \tag{10}$$

   ここでは、輻輳回避フェーズで動作する、TCP のコネクション数 $n(k)$ は変化しないことから、$n^* \equiv n(k)$ としている。また同様に、$\overline{s}^* \equiv \overline{s}(k)$ としている。
2. 一般的な TCP コネクション数の増加
   一般的な TCP コネクション数の増加は、式 (10) の重ね合わせによって表すことができる。例えば、t_i 番目のシーケンスで、スロースタートフェーズで動作する、TCP コネクションの数が ΔN_i だけ増加した場合、入力 $U(z)$ は以下のようになる。

$$U(z) \quad = \quad \sum_i \frac{\Delta N_i\,2^{\overline{s}^*(-i-1)}\,z^{-t_i+1}}{n^*\,(z-2)}$$

4 数値例による考察

本章では、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と過渡特性との関係について議論する。また、解析結果とシミュレーション結果を比較することにより、解析の妥当性を検証する。数値例およびシミュレーションでは、特に断りの無い限り、次のようなパラメータを使用している。定常状態における TCP のコネクション数 $n^* = 5$、RED ゲートウェイの処理能力 $B = 0.2$ [パケット/ms]、伝搬遅延時間 $\tau = 1$ [ms]。RED ゲートウェイの 4 種類の制御パラメータには、文献 [2] において推奨されている値 ($min_{th} = 5$、$max_{th} = 15$、$max_p = 0.1$、$q_w = 0.002$) を用いた。

まず図 4 に、輻輳回避フェーズで動作する、TCP コネクションの数が 1 本増加した時の解析結果を示す。これは、入力 $U(z)$ を式 (8) ($i = 0$) とした時の、$U(z) \times G(z)$ (式 (7)) の極の最大絶対値を、RED の制御パラメータである min_{th}–max_{th} 平面上に示している。この図は、最大絶対値が 1 以上の時、RED ゲートウェイの動作が不安定になる (この場合、RED ゲートウェイのパケット待

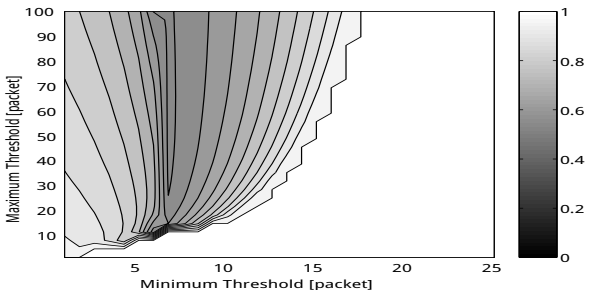

図 4: min_{th}–max_{th} 平面における固有値の最大絶対値

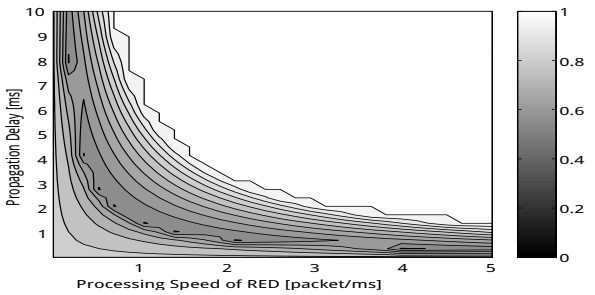

図 5: B–τ 平面における固有値の最大絶対値

ち行列長が安定しない) ことを意味している。また、極の最大絶対値が小さいほど、RED ゲートウェイの過渡特性が良いことを意味している。この図から、制御パラメータ min_{th} が、RED ゲートウェイの安定性および過渡特性に大きな影響を与えることを示している。例えばここで使用したパラメータ条件では、min_{th} が 8 前後の時に、RED ゲートウェイの過渡特性が最適となることが分かる。一方、制御パラメータ max_{th} は、RED ゲートウェイの安定性にほとんど影響を与えないことも分かる。なお、RED ゲートウェイの定常特性解析を行った文献 [8] においても、これと同様の結果が得られている。このことから、RED ゲートウェイの定常状態に着目して制御パラメータを適切に設定すれば、一時的な TCP コネクション数の変動に対しても良い過渡特性が得られると考えられる。

次に、図 5 に、制御パラメータ $min_{th} = 5$ および $max_{th} = 15$ と固定した時の解析結果を示す。この図では、$U(z) \times G(z)$ の極の最大絶対値を、$B - \tau$ 平面上に示している。この図より、RED ゲートウェイの処理能力 B および伝搬遅延時間 τ の両方が、RED ゲートウェイの過渡特性に大きく関係することが分かる。さらに、極の最大絶対値が、ほぼ帯域遅延積 ($B \times \tau$) によって決まることもわかる。

図 6–図 8 に、伝達関数を用いた過渡特性解析の例を示す。これらの図では、輻輳回避フェーズで動作する、TCP コネクションの数が増加した時の結果を示している。入力 $U(z)$ として、すべて式 (9) を用いているが、t_i および ΔN_i が以下のように異なっている。図 6 では、TCP のコネクション数が 1 本増加する場合として、$t_1 = 5$ および $\Delta N_1 = 1$ とした。図 7 では、TCP のコネクション数が 3 本増加する場合として、$(t_1, t_2, t_3) = (5, 10, 15)$ 、$(\Delta N_1, \Delta N_2, \Delta N_3) = (1, 1, 1)$ とした。図 8 では、TCP の

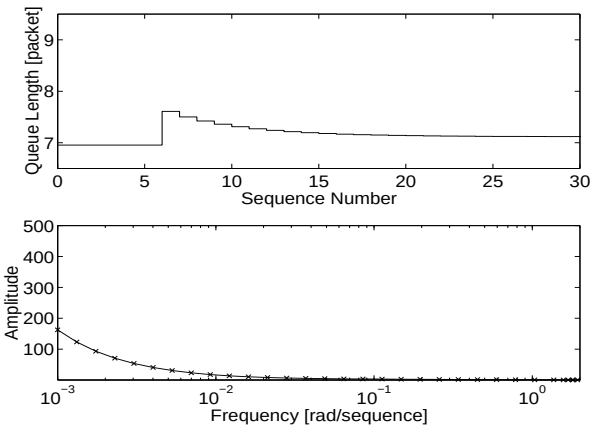

図 6: TCP コネクションが一時的に増加した場合のパケット待ち行列長の変動 ($t_1 = 5, \Delta N_1 = 1$)

コネクション数が 4 本増加する場合として、$(t_1, t_2, t_3) = (5, 10, 15)$ 、$(\Delta N_1, \Delta N_2, \Delta N_3) = (1, 2, 1)$ とした。

これらの図では、それぞれの伝達関数 $U(z) \times G(z)$ のインパルス応答 (上図) と、伝達関数 $U(z) \times G(z)$ のゲイン特性 (下図) を示している。インパルス応答は、RED ゲートウェイのパケット待ち行列長の変動を示しており、ゲイン特性は各周波数における伝達関数 $U(z) \times G(z)$ の増幅度を示している。なお、ここで示したインパルス応答は、式 (4) の繰り返し計算によって得たものではなく、MATLAB 言語を用いて伝達関数から直接計算した。インパルス応答を解析することにより、さまざまな TCP コネクション数の変動に対して、RED ゲートウェイのパケット待ち行列長が、過渡状態でどのように変化するかが分かる。また、ゲイン特性からは、RED ゲートウェイのパケット待ち行列長が、過渡状態においてどの程度大きくなるかを知ることができる。例えば、図 7 と図 8 のゲイン特性を比較すると、図 8 のほうがゲインが大きいことがわかる。これは、図 8 のほうが、RED ゲートウェイのパケット待ち行列長の振動がより大きいことを示している。このように、伝達関数を用いることにより、時間領域ではなく、周波数領域で RED ゲートウェイの過渡特性が解析できる。

最後に、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 (C2) のシミュレーション結果を示す (図 9)。1 本の TCP コネクションが安定している時 ($t = 10$ [s]) に、輻輳回避フェーズで動作する TCP コネクションが 1 本加わった時の、パケット待ち行列長の変動を示している。シミュレーションには ns-2 [12] を用い、図 1 と同じネットワークトポロジに対してシミュレーションを行なった。また、TCP のパケットサイズを 1,000 [バイト] とした。図中には、比較のため解析結果もあわせて示している。この図から、解析結果とシミュレーション結果が、ある程度一致していることがわかる。特に、TCP のコネクション数が変動した直後に、パケット待ち行列長が安定するまでの時間はほぼ一致している。しかし、解析におけるパケット待ち行列長の振動の大きさは、シミュレーション結果に比べて小さくなっている。線形化による近似誤差の影響、もしくは $w(k)$ や $q(k)$ を小さく見積っていることによる影響と考えられるが、これに

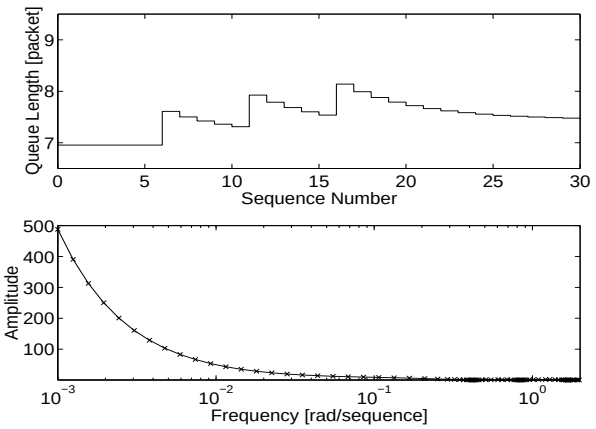

図 7: TCP コネクションが連続して増加した場合のパケット待ち行列長の変動 ($(t_1, t_2, t_3) = (5, 10, 15)$, $(\Delta N_1, \Delta N_2, \Delta N_3) = (1, 1, 1)$)

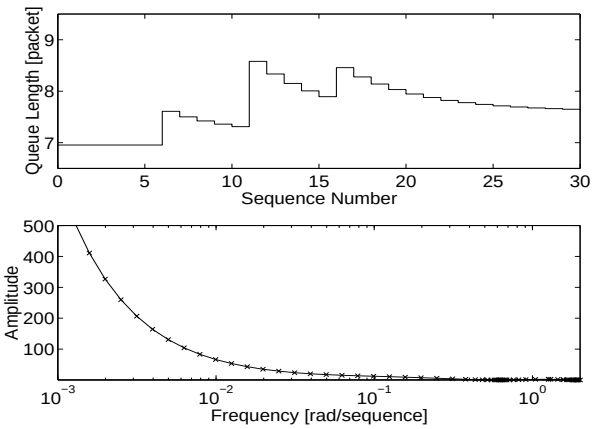

図 8: TCP コネクションが連続して増加した場合のパケット待ち行列長の変動 ($(t_1, t_2, t_3) = (5, 10, 15)$, $(\Delta N_1, \Delta N_2, \Delta N_3) = (1, 2, 1)$)

ついては今後さらなる検討が必要である。

5 まとめと今後の課題

本稿では、制御理論で広く用いられている伝達関数を用いて、時間領域ではなく、周波数領域において過渡特性解析を行った。これにより、さまざまな TCP コネクション数の変動に対する、RED ゲートウェイの過渡特性を解析した。伝達関数を用いれば、フィードバックシステムのさまざまな特性を知ることが可能である。伝達関数による解析方法には、他にもさまざまな応用が考えられるため、現在さらに検討を進めている。

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。

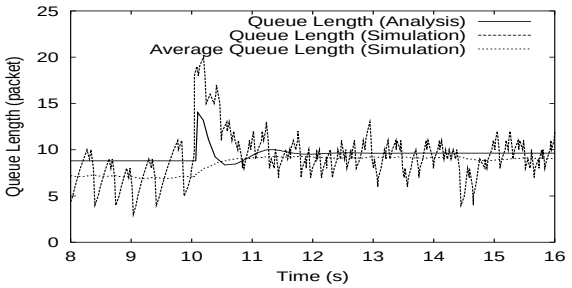

図 9: 解析結果とシミュレーション結果の比較

参考文献

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

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

[3] M. Christiansen, K. Jeffay, D. Ott, and F. D. Smith, "Tuning RED for Web traffic," in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2000*, pp. 139–150, aug 2000.

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

[5] 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.

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

[7] H. M. Alazemi, A. Mokhtar, and M. Azizoglu, "Stochastic approach for modeling random early detection gateways in TCP/IP networks," in *Proceedings IEEE International Conference on Communications 2001*, June 2001.

[8] H. Ohsaki, M. Murata, and H. Miyahara, "Steady state analysis of the RED gateway: stability, transient behavior, and parameter setting," to appear in *IEICE Transactions on Communications*, Jan. 2002.

[9] S. Floyd, "Discussions on setting RED parameters," Nov. 1997. available at `http://www.aciri.org/floyd/REDparameters.txt`.

[10] 岸本 統久, 大崎 博之, 村田 正幸, "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," 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2001-04), pp. 7–12, Apr. 2001.

[11] R. Isermann, *Digital control systems, Volume 1: fundamentails, deterministic control*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989.

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