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.

多変量解析を用いたアクティブキュー管理機構の制御パラメータ設定方法に関する考察

江口　智也† 　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: †{t-eguti,oosaki}@ist.osaka-u.ac.jp, ††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し、ルータにおいて積極的に輻輳制御を行う、アクティブキュー管理機構が注目を浴びている。アクティブキュー管理機構には制御パラメータが存在するが、その有効性はこれらの制御パラメータの設定に依存する。そのため、アクティブキュー管理機構の制御パラメータ設定方法に関しては、これまでさまざまな研究が行われてきた。しかし、そのほとんどは、少数のシミュレーション結果から、制御パラメータがアクティブキュー管理機構の性能に与える影響を調べているにすぎない。そこで本稿では、多変量解析手法を用いることにより、膨大な数のシミュレーション結果を統計的に解析し、アクティブキュー管理機構の制御パラメータが、その性能にどのような影響を与えるかを定量的に明らかにする。本稿では、代表的なアクティブキュー管理機構である RED (Random Early Detection) を改良した方式である、GRED (Gentle RED)、DRED (Dynamic RED)、SRED (Stabilized RED) と呼ばれる 3 種類のアクティブキュー管理機構を解析する。アクティブキュー管理機構の制御パラメータが、その定常特性 (平均キュー長およびパケット棄却率) に与える影響を明らかにし、適切な制御パラメータの設定方法について考察する。
キーワード　アクティブキュー管理機構、RED (Random Early Detection)、GRED (Gentle RED)、DRED (Dynamic RED)、SRED (Stabilized RED)、制御パラメータ設定方法、多変量解析

On Control Parameter Tuning for Active Queue Management Mechanisms using Multivariate Analysis

Tomoya EGUCHI†, Hiroyuki OHSAKI†, and Masayuki MURATA††

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Japan
†† Cybermedia Center, Osaka University, Japan
E-mail: †{t-eguti,oosaki}@ist.osaka-u.ac.jp, ††murata@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract　In recent years, AQM (Active Queue Management) mechanisms, which support the end-to-end congestion control mechanism of TCP by performing congestion control at a router, have been actively studied by many researchers. AQM mechanisms usually have several control parameters, and their effectiveness depends on a setting of those control parameters. Therefore, issues on parameter tuning of several AQM mechanisms have been extensively studied using simulation experiments. However, in most of those studies, only a small number of simulation experiments are performed for investigating the effect of control parameters on the performance of AQM mechanisms. In this paper, we therefore statistically analyze a large number of simulation experiments using multivariate analysis, and quantitatively show how the performance of AQM mechanisms is affected by a setting of control parameters. In particular, we analyze the performance of three AQM mechanisms: GRED (Gentle RED), DRED (Dynamic RED), and SRED (Stabilized RED), all of which are variants of RED (Random Early Detection). Through several numerical examples, we clarify how control parameters of GRED, DRED, and SRED have impact on their steady state performance measures such as the average queue length and the packet loss probability. We present a few guidelines for configuring control parameters of those AQM mechanisms.
Key words　Active Queue Management Mechanism, RED (Random Early Detection), GRED (Gentle RED), DRED (Dynamic RED), SRED (Stabilized RED), Parameters Tuning, Multivariate Analysis

1. はじめに

現在広く普及している Drop Tail ルータの問題点を解決するために、近年、アクティブキュー管理機構の研究が活発に行われている [1]。アクティブキュー管理機構は、ルータのバッファが一杯になる前に積極的にパケットを廃棄し、ルータのキュー長 (バッファ内パケット数) を制御する。例えば、代表的なアクティブキュー管理機構である RED (Random Early Detection) [2] は、平均キュー長に応じてルータに到着するパケットを確率的に棄却する。しかし、RED の有効性は制御パラメータに大きく依存し、RED の平均キュー長はコネクション数に応じて変化するといった問題が指摘されている [2], [3]。そこで、RED の問題点を改良したアクティブキュー管理機構として、GRED (Gentle RED) [4]、DRED (Dynamic-RED) [5]、SRED (Stabilized

RED) [6] などが提案されている。

GRED は、RED をアドホックな手法により、一部改良した方式である [4]。RED には、平均キュー長が大きくなると、パケット棄却率が急激に変動して、キュー長の変動が不安定になるという問題があった。そこで GRED は、平均キュー長が大きい時にも、パケット棄却率を緩やかに変化させることにより、この問題を解消している。これまで、RED に関して数多くの研究が行なわれているが、GRED の性能評価は十分に行なわれていない。

DRED は、RED の平均キュー長がアクティブな TCP コネクション数に依存するという問題を解消した方式である [5]。DRED は平均キュー長に応じてパケット棄却率を制御するため、DRED の平均キュー長は TCP コネクション数に依存しない。しかし、DRED の性能は、α、β、T、L といった 4 つの制御パラメータの設定に依存している [5]。シミュレーション実験により、例えば、制御パラメータである α と L が、DRED のキュー長とパケット棄却率に影響を与えることがわかっている。しかし、それぞれの制御パラメータが、DRED のキュー長とパケット棄却率にどの程度大きな影響を与えるか、また、制御パラメータが DRED の平均キュー長にどのような影響を与えるかは、定量的に明らかにされていない。

SRED は、DRED と同様に、RED の平均キュー長がアクティブな TCP コネクション数に依存するという問題を解消した方式である [6]。SRED は、少量のキャッシュを用いて、アクティブな TCP コネクション数を推測するという点に特徴がある。SRED は、推測した TCP コネクション数に応じてパケット棄却率を決定する。このため、SRED の平均キュー長は、制御パラメータの設定にほとんど依存しない [6]。しかし、SRED の性能評価は十分に行なわれておらず、SRED の制御パラメータがその性能にどのような影響を与えるかは十分明らかにされていない。

我々は文献 [7] において、制御パラメータの値をさまざまに変化させた大量のシミュレーション結果を、多変量解析によって統計的に解析する手法を提案した。その結果、RED の制御パラメータが、その性能にどのような影響を与えているのかを、定量的に明らかにした。本稿では、ここで提案した解析手法を用いて、GRED、DRED、SRED の性能評価を行なう。特に、これらの 3 種類のアクティブキュー管理機構の制御パラメータが、その性能指標 (平均キュー長、パケット棄却率) に与える影響を定量的に解析する。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2. 章では、本稿で解析する 3 種類のアクティブキュー管理機構 (GRED、DRED、SRED) を簡単に説明する。3. 章では、代表的な多変量解析手法の一つである重回帰分析の概要を説明する。また、重回帰分析を、アクティブキュー管理機構の性能評価にどのように適用するかを簡単に説明する。4. 章では、本稿で用いるシミュレーションモデルおよびシミュレーションで使用したパラメータを説明する。5. 章では、シミュレーション結果に対して多変量解析を適用した結果を示す。最後に 6. 章において、本稿のまとめを述べる。

2. アクティブキュー管理機構

2.1 GRED (Gentle RED)

GRED [4] の元になっているのは、RED (Random Early Detection) [2] である。RED では、平均キュー長の大きさによって、パケット棄却率が急激に 1 になることがある。パケット棄却率が急激に変動すると、それに伴いキュー長の変動が不安定となる。そこで GRED では、パケット棄却率の急激な変動を緩和し、キュー長の変動が不安定になるのを防ぐ。以下では、GRED のアルゴリズムを簡単に説明する。GRED のパケット棄却アルゴリズムは、基本的に RED のパケット棄却アルゴリズムと同一である。RED のアルゴリズムの詳細については、文献 [2] を参照されたい。

まず、GRED は RED と同様に、平均キュー長を保持している。平均キュー長 $\overline{q}$ は、パケット到着毎に以下の式で計算される。

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

ここで、w_q は指数平均の重みであり、GRED の制御パラメータの一つである。このような計算で求めた平均キュー長 $\overline{q}$ を用いて、GRED はパケット棄却率 p_b を次式で計算する。

$$p_b = \begin{cases} 0 & \text{if } \overline{q} < min_{th} \\ max_p(\frac{\overline{q} - min_{th}}{max_{th} - min_{th}}) & \text{if } min_{th} \leqq \overline{q} < max_{th} \\ (1 - max_p)(\frac{\overline{q} - max_{th}}{max_{th}}) + max_p & \text{if } max_{th} \leqq \overline{q} < 2\,max_{th} \\ 1 & \text{if } \overline{q} > 2\,max_{th} \end{cases}$$

ここで、min_{th} と max_{th} はそれぞれキュー長の最小および最大のしきい値、max_p は最大パケット棄却率であり、これらは GRED の制御パラメータである。最終的に、GRED は以下で与えられる確率 p_a で、ルータに到着するパケットを棄却する。

$$p_a = \frac{p_b}{1 - count \times p_b}$$

ここで、$count$ は最後にパケットを棄却してから GRED ルータに到着したパケットの数である。

2.2 DRED (Dynamic RED)

RED の平均キュー長は、アクティブな TCP コネクション数に応じて変動するという問題がある。そこで DRED では、ルータのバッファの混雑具合によって、パケット棄却率を決定するというフィードバック制御を行なう [5]。これにより、コネクション数に依存せず、キュー長を目標値で安定させることが可能となる。

以下では、DRED のアルゴリズムを簡単に説明する。DRED ではサンプリング周期を設定し、サンプリング周期ごとにパケット棄却率を計算する。以下では、n 番目のサンプリング周期に到着したパケットに着目する。まず DRED は、あらかじめ設定されたキュー長の目標値 T と、実際のキュー長 $q(n)$ との差 $e(n)$ を次式で求める。

$$e(n) = q(n) - T$$

次に指数平均を用いて、$e(n)$ の平均値 $\hat{e}(n)$ を次式で計算する。

$$\hat{e}(n) = (1 - \beta)\,\hat{e}(n-1) + \beta\,e(n) \qquad (1)$$

ここで、β は平均キュー長のずれを計算する指数平均の重みである。また、β は DRED の制御パラメータである。このようにして求めた $\hat{e}(n)$ を用いて、DRED はパケット棄却率 $p_d(n)$ を以下のように決定する。

$$p_d(n) = min\left[max\left\{p_d(n-1) + \alpha\frac{\hat{e}(n)}{B},\, 0\right\},\, \theta\right] \qquad (2)$$

ここで、B はルータのバッファサイズ、α はパケット棄却率の変化量を決定するパラメータ、θ はパケット棄却率の上限値である。そして、α は DRED の制御パラメータである。パケット棄却率 p_d はサンプリング周期毎に必ず更新するが、キュー長 $q(n)$ がしきい値 L 以下であった場合、DRED はパケットを棄却しない。

2.3 SRED (Stabilized RED)

RED は、TCP コネクション数に応じて、平均キュー長が変化する。さらに RED は、パケット棄却が発生しても送信レートを減らさない TCP コネクションへの対策が不十分である。そこで SRED では、アクティブな TCP コネクション数を統計的に推定して、推定した TCP コネクション数に応じてパケット棄

却率を決定する [6]。また SRED は、TCP コネクションの実際の送信レートに応じて、異なるパケット棄却率を用いる。

SRED では、アクティブなコネクション数を推定するために、「ゾンビリスト」を用いる。ゾンビリストとは、各 TCP コネクションの情報を保持する、大きさ $list$ のリストである。具体的には、ゾンビリストの各エントリは、フロー識別子、カウンタ、タイムスタンプから成る。ルータにパケットが到着すると、SRED はゾンビリストからランダムに取り出したエントリの情報と、到着したパケットの情報を比較する。もし情報が一致すれば、そのエントリのカウンタを 1 だけ増加する。情報が一致しない場合は、そのエントリの情報を、確率 p で到着したパケットの情報で上書きする。このようにして得られるゾンビリストを利用して、アクティブなコネクション数を推定する。ゾンビリストは、パケット棄却に反応せずに送信レートを落とさないようなコネクションを発見するためにも用いられる。

以下では、SRED のパケット棄却アルゴリズムを簡単に説明する。まず、SRED はゾンビリストからランダムに取り出したエントリの情報と、到着したパケットの情報を比較する。以下では、n 番目に到着したパケットに着目する。到着したパケットの情報と、取り出したエントリの情報が一致した場合は $H(n) = 1$、一致しない場合は $H(n) = 0$ とする。この $H(n)$ から、到着したパケットのフロー情報がゾンビリスト内にある確率 $P(n)$ を次式で計算する。

$$P(n) \;=\; (1-\alpha)\,P(n-1) + \alpha\,H(n) \tag{3}$$

ここで、α は指数平均の重みであり、SRED の制御パラメータである。次に、パケット到着ごとに現在のキュー長 q に応じてパケット棄却率 $p_{sred}(q)$ を次式で計算する。

$$p_{sred}(q) \;=\; \begin{cases} p_{max} & \text{if } \frac{1}{3}B \leqq q < B \\ \frac{1}{4} \times p_{max} & \text{if } \frac{1}{6}B \leqq q < \frac{1}{3}B \\ 0 & \text{if } 0 \leqq q < \frac{1}{6}B \end{cases} \tag{4}$$

ここで、B はルータのバッファサイズ、p_{max} は最大パケット棄却率であり、SRED の制御パラメータである。以上で求めた $P(n)$、$p_{sred}(q)$ を用いて、最終的に次式で計算される確率 p_{zap} でルータに到着したパケットを棄却する。

$$p_{zap} \;=\; p_{sred}(q) \times min\left(1,\, \frac{1}{(256 \times P(n))^2}\right) \times \left(1 + \frac{H(n)}{P(n)}\right) \tag{5}$$

3. 重回帰分析

多変量解析は、複数の因子間の関係を統計的に解析する手法であり、多量のデータを系統的に解析することができる。本稿では、多変量解析の中でも重回帰分析と呼ばれる手法を用いる。重回帰分析とは、複数の予測子変数 (影響を与える因子) が、それぞれ応答変数 (影響を受ける因子) にどの程度の影響を与えているかを解析する手法である。以下では、本稿において、どのように重回帰分析を用いるのかを簡単に説明する。重回帰分析の詳細については文献 [8] を、多変量解析を用いたアクティブキュー管理機構の解析手法の詳細については文献 [7] をそれぞれ参照されたい。

本稿では、アクティブキュー管理機構の制御パラメータが、その性能にどのような影響を与えているかを重回帰分析を用いて解析する。アクティブキュー管理機構の制御パラメータを予測子変数、性能指標 (平均キュー長、パケット棄却率) を応答変数として重回帰分析を行う。具体的には、まず、アクティブキュー管理機構の制御パラメータの値をさまざまに変化させ、大量のシミュレーション結果を得る。次に、シミュレーション結果から多変量相関図を作成する。多変量相関図とは、多数の変数間の関係を、それぞれ散布図によって表わしたものである。その後、シミュレーション結果に対して、重回帰分析を適用する。もし重回帰分析によって得られる決定係数の値が 0 に近ければ、予測子変数として選択した制御パラメータ以外の要素が、アクティブキュー管理機構の性能に影響を与えている可能性がある。一方、決定係数の値が 1 に近ければ、各予測子変数の標準化回帰係数の値を比較することにより、それぞれの制御パラメータが、どの程度アクティブキュー管理機構の性能指標に影響を与えているかを評価することができる。

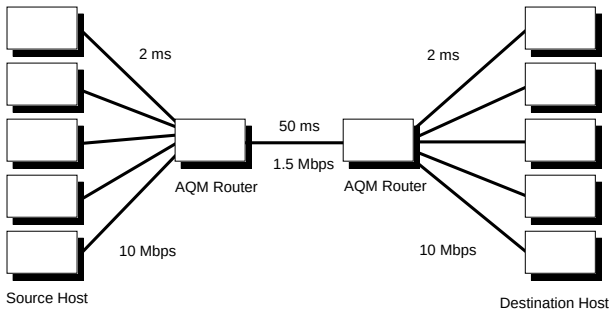

図 1　シミュレーションモデル
Fig. 1　Simulation model

表 1　シミュレーションで用いたパラメータの値
Table 1　Parameter values used in simulation

ボトルネックリンク帯域	1. 5	[Mbit/s]
ボトルネックリンクの伝播遅延	50	[ms]
パケット長	1,000	[byte]
ルータのバッファサイズ	100	[パケット]

4. シミュレーション

本稿で用いるシミュレーションモデルを図 1 に示す。5 本の TCP コネクションと 2 つのアクティブキュー管理機構を実装したルータが存在する。2 つのルータ間がボトルネックリンクとなっている。なお、シミュレーションで用いたネットワークパラメータを表 1 に示す。

本稿では、GRED、DRED、SRED それぞれに対して、それぞれの制御パラメータの値を変化させてシミュレーションを行なった。各シミュレーションのシミュレーション時間は 30 秒間とした。また、得られたシミュレーション結果のうち、最後の 5 秒間のシミュレーション結果の平均を取り、平均キュー長およびパケット棄却率を求めた。

5. 解 析 結 果

以下では、前章で得られたシミュレーション結果に対して、重回帰分析を適用した結果を示す。

5.1 GRED

図 2 に、GRED の制御パラメータと平均キュー長との関係をあらわす多変量相関図を示す。また、表 2 に重回帰分析の結果を示す。この表において、「回帰係数」は回帰式における各予測子変数の係数を、「標準化回帰係数」は回帰係数を正規化した値、「t 値」は予測子変数が回帰式の残差の分布に影響を与えるかどうかを t 検定により調べた値、「P 値」は予測子変数を回帰式から除いた場合に残差の分布が同じである確率を示している。

まず、標準化回帰係数の絶対値に着目すると、min_{th} (最小しきい値) が一番大きな値であり、続いて max_p (最大パケット棄却率)、max_{th} (最大しきい値)、w_q (平均キュー長計算時の重み) の順に大きな値であることがわかる。これはつまり、制御パラメータが平均キュー長に与える影響は、min_{th}、max_p、max_{th} の順に大きいことを意味している。これは、GRED は平

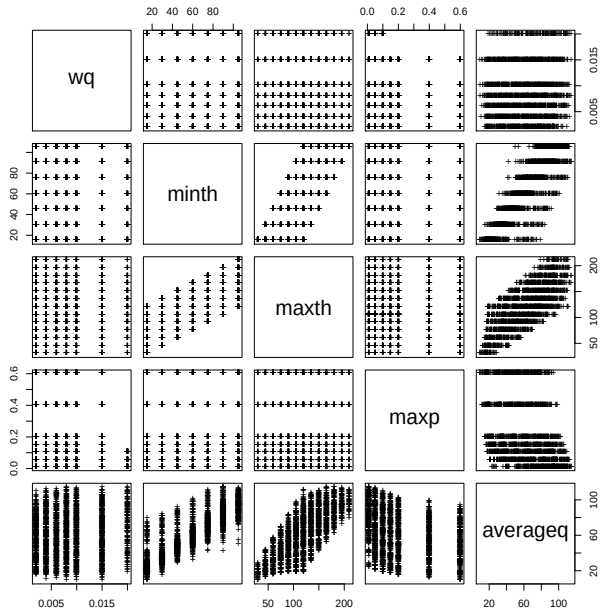

図 2　GRED の平均キュー長に関する多変量相関図

Fig. 2　Pair scatter plot of GRED control parameters and average queue length

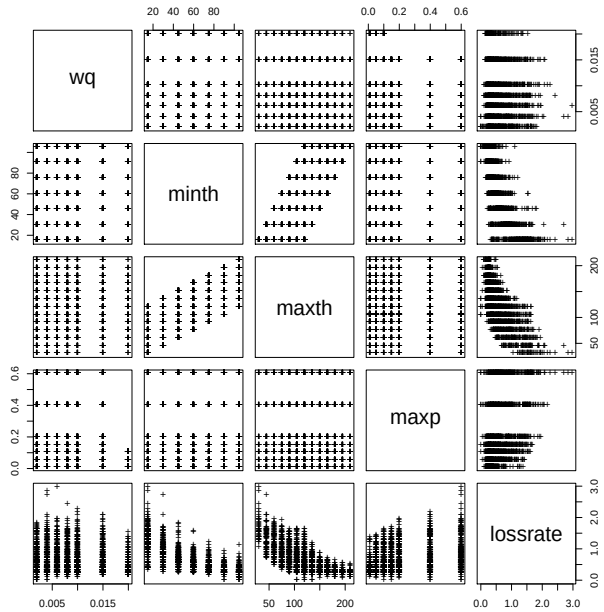

図 3　GRED のパケット棄却率に関する多変量相関図

Fig. 3　Pair scatter plot of GRED control parameters and packet loss probability

表 2　GRED の平均キュー長に対する重回帰分析の結果

Table 2　Multiple linear regression analysis result for average queue length

予測子変数	回帰係数	標準化回帰係数	t 値	P 値
定数部	15.23		24.41	0.00
w_q	101.32	0.02	3.01	0.00
min_{th}	0.57	0.67	70.82	0.00
max_{th}	0.17	0.28	29.49	0.00
max_p	-44.17	-0.34	-49.69	0.00
決定係数	0.90			

表 3　GRED のパケット棄却率に対する重回帰分析の結果

Table 3　Multiple linear regression analysis result for packet loss probability

予測子変数	回帰係数	標準化回帰係数	t 値	P 値
定数部	1.28		80.35	0.00
w_q	-1.96	-0.024	-2.29	0.02
min_{th}	-0.007	-0.53	-35.41	0.00
max_{th}	-0.003	-0.31	-20.90	0.00
max_p	0.77	0.36	33.86	0.00
決定係数	0.75			

均キュー長が min_{th} 以下の時はパケットを棄却しないため、平均キュー長の下限値が min_{th} で決定されるためと考えられる。一方、max_p と max_{th} が平均キュー長に与える影響は、標準化回帰係数の絶対値より、min_{th} の半分程度であることが分かる。なお、w_q の標準化回帰係数は-0.02 と非常に小さく、w_q は平均キュー長にほとんど影響を与えないことがわかる。

一般に、バッファのオーバーフローやアンダーフローを避けるために、GRED の平均キュー長は適切な値になることが望ましい。このためには、GRED の制御パラメータである min_{th} を、まずバッファアンダーフローが起きにくくなるように設定すれば良い。その後、バッファオーバーフローが発生しないように、max_p と max_{th} を設定すれば良いと考えられる。さらに、RED に多変量解析を適用した結果 [7] と比較すると、RED の場合は max_{th} が平均キュー長に一番大きな影響を与えていたが、GRED では min_{th} が一番影響を与えている。これは、GRED が RED の問題点 (平均キュー長が max_{th} を超えるとパケット棄却率が 1 になる) を改良した結果と考えられる。このことはつまり、GRED の制御パラメータを設定する場合には、RED のシミュレーション結果や解析結果をそのまま適用できないことを意味する。

図 3 に、GRED の制御パラメータとパケット棄却率との関係をあらわす多変量相関図を示す。また、表 3 に GRED のパケット棄却率に対する重回帰分析の結果を示す。標準化回帰係数に着目すると、min_{th}、max_p、max_{th}、w_q の順に大きな絶対値であることがわかる。min_{th} がパケット棄却率に与える影響と比較すると、max_p および max_{th} が与える影響は、それぞれ min_{th} の 2/3 および 1/2 程度であることがわかる。シミュレーションにおける GRED のパケット棄却率の計算には、GRED が確率 p_b で意図的に棄却するパケットと、バッファのオーバーフローによって棄却されるパケットの両方が含まれている。表 2 および表 3 を比較すると、min_{th}、max_p、max_{th}、w_q の標準化回帰係数の絶対値が、ほぼ同じ大きさとなっていることがわかる。これは、(1) ネットワーク中でのパケット棄却率と、TCP のウィンドウサイズに非常に強い相関があり [9]、(2) TCP はウィンドウ型のフロー制御であるため、ボトルネックとなるルータの平均キュー長は TCP のウィンドウサイズによって決まる、ためと考えられる。

5.2 DRED の解析結果

DRED の制御パラメータ α (パケット棄却率の変化量を決定するパラメータ)、β (平均キュー長のずれを計算する指数平均の重み)、T (キュー長の目標値)、L (最小しきい値) と平均キュー長の関係をあらわす多変量相関図を図 4 に示す。また、重回帰分析の結果を表 4 に示す。表 4 の標準化回帰係数の絶対値に着目すると、制御パラメータ T が最も大きく、続いて α、β、L の順に大きいことが分かる。ただし、制御パラメータ α、β、L の標準化回帰係数は、T の標準化回帰係数の 1/9 以下程度と非常に小さい。これは、2.2 節で説明したように、制御パラメータ T は DRED の制御目標となるキュー長であり、これが平均キュー長に直接的な影響を与えているためと考えられる。しかし、図 4 の T と平均キュー長の相関を見ると、DRED の平均キュー長が必ずしも T に一致していない (T を中心にしたばら

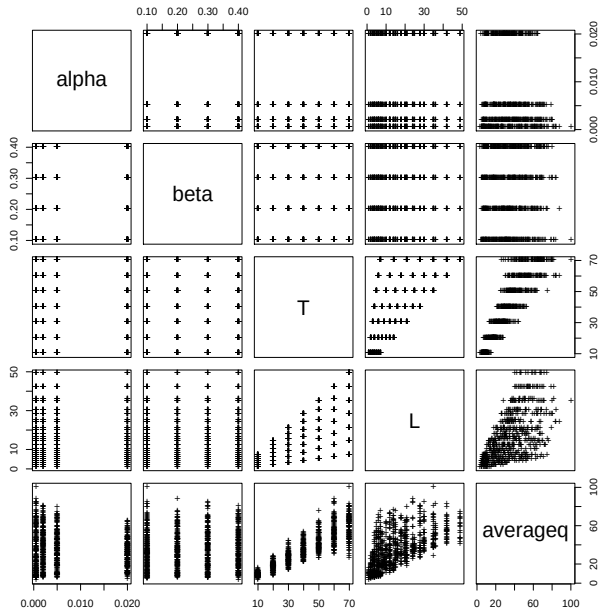

図 4　DRED の平均キュー長に関する多変量相関図
Fig. 4　Pair scatter plot of DRED control parameters and average queue length

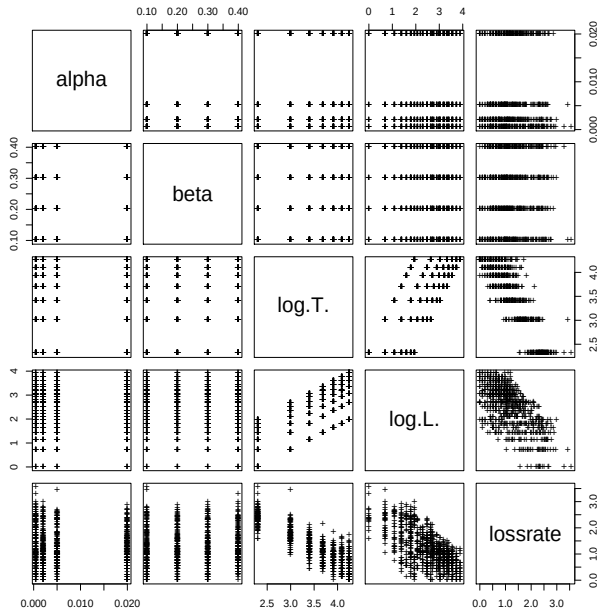

図 5　DRED のパケット棄却率に関する多変量相関図
Fig. 5　Pair scatter plot of DRED control parameters and packet loss probability

表 4　DRED の平均キュー長に対する重回帰分析の結果
Table 4　Multiple linear regression analysis result for average queue length

予測子変数	回帰係数	標準化回帰係数	t 値	P 値
定数部	1.08		1.04	0.30
α	-233.42	-0.09	-5.70	0.00
β	3.51	0.02	1.24	0.22
T	0.83	0.86	38.92	0.00
L	0.05	0.03	1.49	0.14
決定係数	0.79			

表 5　DRED のパケット棄却率に対する重回帰分析の結果
Table 5　Multiple linear regression analysis result for packet loss probability

予測子変数	回帰係数	標準化回帰係数	t 値	P 値
定数部	4.51		56.79	0.00
α	1.85	0.02	1.15	0.25
β	0.10	0.02	0.93	0.35
$\log T$	-0.92	-0.82	-33.00	0.00
$\log L$	-0.05	-0.06	-2.52	0.01
決定係数	0.75			

つきがある) ことが分かる。一方、α や β の標準化回帰係数が小さいのは、式 (1) および (2) からも分かるように、α および β は過渡特性を決定する決定するパラメータであり、平均キュー長のような定常特性にはほとんど影響を与えないためと考えられる。

さらに、DRED の制御パラメータとパケット棄却率の関係をあらわす多変量相関図を図 5 に、パケット棄却率に対して重回帰分析を適用した結果を表 5 に示す。標準化回帰係数の絶対値に着目すると、T の値が一番大きく、続いて α、L、β の順に大きいことがわかる。DRED の平均キュー長の場合と同様に、制御パラメータ α、β、L の標準化回帰係数は、T の標準化回帰係数の 1/9 以下程度と非常に小さい。

以上の考察から、DRED の定常特性 (平均キュー長およびパケット棄却率) に大きな影響を与えるのは制御パラメータ T であり、それ以外の制御パラメータはあまり影響を与えないといえる。このため、バッファのオーバーフローやアンダーフローが発生しないように、制御パラメータ T を適切に設定すれば良いと考えられる。

5.3　SRED の解析結果

SRED の制御パラメータと平均キュー長の関係をあらわす多変量相関図、および SRED のパケット棄却率に対して重回帰分析を適用した結果を、それぞれ図 6 および表 6 に示す。標準化回帰係数の絶対値に着目すると、α (フロー情報がゾンビリスト内にある確率 $P(n)$ を計算する時の重み)、p_{max} (最大パケット棄却率) の順に大きな値となっており、$list$ (ゾンビリストの大きさ)、p (ゾンビリストを更新する確率) は非常に小さな値となっている。これはつまり、制御パラメータ α は SRED の平均キュー長に影響を与えるが、それ以外の制御パラメータ (p_{max}、$list$、p) はあまり影響を与えていないことを意味する。多変量相関図 (図 6) の α と平均キュー長の相関から、α が大きくなるにつれ、平均キュー長のばらつきが大きくなっていることが分かる。これはつまり、α の値が大きくなると、TCP コネクション数の推定に失敗し、その結果 SRED のキュー長が安定しにくくなるためだと考えられる。

最後に、図 7 に SRED の制御パラメータとパケット棄却率との関係をあらわす多変量相関図を示す。また、表 7 に SRED のパケット棄却率に対する重回帰分析の結果を示す。標準化回帰係数に着目すると、SRED のパケット棄却率に対する重回帰分析の結果と、ほぼ同じ傾向があらわれている。つまり、標準化回帰係数の絶対値は、α が p_{max} の 2 倍程度となっており、$list$ および p の標準化回帰係数は非常に小さな値となっている。

以上の考察から、SRED の制御パラメータを設定する時には、SRED の平均キュー長およびパケット棄却率が大きくなり過ぎないように、α および p_{max} を比較的小さな値に設定すれば良いと考えられる。一方、$list$ および p は、SRED の定常特性にほとんど影響を与えないため、それほど慎重に設定する必要はないと考えられる。

6.　ま　と　め

本稿では、文献 [7] で提案した解析手法を用いて、GRED、

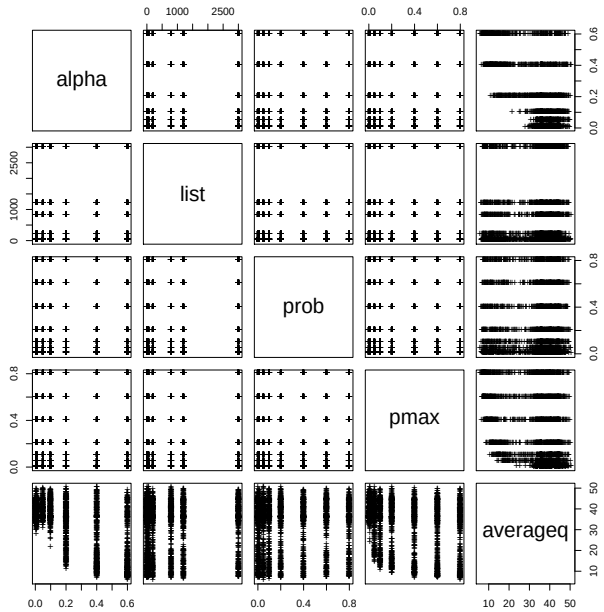

図 6　SRED の平均キュー長に関する多変量相関図
Fig. 6　Pair scatter plot of SRED control parameters and average queue length

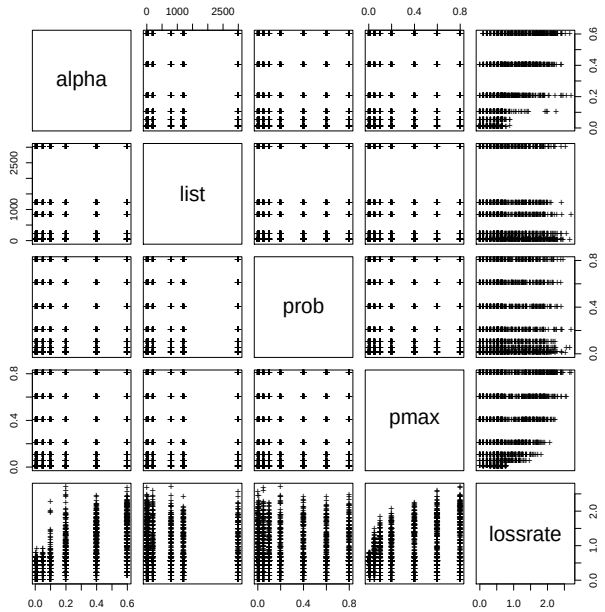

図 7　SRED のパケット棄却率に関する多変量相関図
Fig. 7　Pair scatter plot of SRED control parameters and packet loss pability

表 6　SRED の平均キュー長に対する重回帰分析の結果
Table 6　Multiple linear regression analysis result for average queue length

予測子変数	回帰係数	標準化回帰係数	t 値	P 値
定数部	51.55		119.85	0.00
α	-41.19	-0.69	-60.01	0.00
$list$	0.00	0.006	0.55	0.58
p	0.21	0.003	0.30	0.76
p_{max}	-12.68	-0.21	-18.50	0.00
決定係数	0.54			

表 7　SRED のパケット棄却率に対する重回帰分析の結果
Table 7　Multiple linear regression analysis result for packet loss pability

予測子変数	回帰係数	標準化回帰係数	t 値	P 値
定数部	0.25		17.85	0.00
α	1.11	0.62	50.55	0.00
$list$	0.00	0.004	0.30	0.76
p	0.01	0.007	0.55	0.58
p_{max}	0.53	0.30	24.37	0.00
決定係数	0.47			

DRED、SRED の性能評価を行なった。特に、これらの 3 種類のアクティブキュー管理機構の制御パラメータが、その性能指標 (平均キュー長、パケット棄却率) に与える影響を定量的に解析した。その結果、(1) GRED の平均キュー長およびパケット棄却率に対しては、min_{th}、max_p、max_{th} の順に大きな影響を与えているが、w_q はほとんど影響を与えていないこと、(2) DRED の平均キュー長およびパケット棄却率に対しては、T が大きな影響を与えているが、その他の制御パラメータ α、β、L はほとんど影響を与えていないこと、(3) SRED の平均キュー長およびパケット棄却率に対しては、α、p_{max} の順に大きな影響を与えており、その他の制御パラメータ p、$list$ はほとんど影響を与えていないこと、などが明らかになった。また、これらの解析結果から、アクティブキュー管理機構の制御パラメータ設定方法について議論した。

本稿では、多変量解析手法を用いることにより、アクティブキュー管理機構の制御パラメータが、その定常特性にどのような影響を与えるかを解析した。しかし、ここでの解析手法は、帯域や伝搬遅延時間などのシステムパラメータがアクティブキュー管理機構に与える影響や、制御パラメータがアクティブキュー管理機構の過渡特性に与える影響の評価にも適用することが可能である。よって、今後はシステムパラメータが、アクティブキュー管理機構にどのような影響を与えるかを解析していく予定である。

文　献

[1] B. Braden 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] W.-C. Feng, D. D. Kandlur, D. Saha, and K. S. Shin, "Techniques for eliminating packet loss in congested TCP/IP networks," Tech. Rep. CSE-TR-349-97, U. Michigan, Apr. 1997.

[4] S. Floyd, "Recommendations on using the gentle variant of RED," May 2000. available at `http://www.aciri.org/floyd/red/gentle.html`.

[5] J. Aweya, M. Ouellette, and D. Y. Montuno, "A control theoretic approach to active queue management," *Computer Networks*, vol. 36, pp. 203–235, Dec. 2001.

[6] T. J. Ott, T. V. Lakshman, and L. Wong, "SRED: Stabilized RED," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '99*, pp. 1346–1355, Mar. 1999.

[7] T. Eguchi, H. Ohsaki, and M. Murata, "Multivariate analysis for performance evaluation of active queue management mechanisms in the Internet," to be presented at *SPIE's International Symposium on the Convergence of Information Technologies and Communications (ITCom 2002)*, July 2002.

[8] L. C. Hamilton, *Regression with Graphics*. Belmont, California: Duxbury Press, 1992.

[9] 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.