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性能評価に関する検討

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@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††{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、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。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) は、ルータのキュー長に応じて、ルータに到着するパケットを確率的に棄却する。RED ルータには 4 種類の制御パラメータが存在するが、RED ルータの有効性はこれらの制御パラメータの設定に大きく依存する。そのため、制御パラメータの設定方法に関して、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 RED ルータの性能にどのような影響を与えるか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処理し、RED ルータ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。
キーワード　アクティブキュー管理機構, RED (Random Early Detection), 制御パラメータ設定, 多変量解析

# A Study on Performance Evaluation of Active Queue Management Mechanisms using Multivariate Analysis

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

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
Toyonaka, Osaka 560–8531, Japan
†† Cybermedia Center, Osaka University
Toyonaka, Osaka 567–0043, Japan
E-mail: †t-eguti@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††{oosaki,murata}@cmc.osaka-u.ac.jp

**Abstract**　AQM (Active Queue Management) mechanisms, which perform a congestion control in a router to assist the end-to-end congestion control mechanism of TCP, have been actively studied by many researchers. For instance, RED (Random Early Detection) is a representative AQM mechanism, which drops an arriving packet with a probability being proportional to its average queue length. RED has four control parameters, and the effectiveness of RED depends on a choice of these control parameters. This is why many researches on the parameter tuning of RED control parameters have been performed. However, most of those studies have investigated the effect of RED control parameters on its performance from a small number of simulation results. In this paper, we therefore statistically analyze a great number of simulation results using the multivariate analysis. We quantitatively show the relation between RED control parameters and its performance.
**Key words**　Active Queue Management, RED (Random Early Detection), Parameters Tuning, Multivariate Analysis

## 1. はじめに

近年、エンド–エンド間で動作する TCP の輻輳制御機構の補助を行う、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は、ルータへ到着するパケットを積極的に棄却することにより、キュー長の管理を行う。アクティブキュー管理機構を用いることにより、Drop-Tail ルータが持つ問題点を解決することができる [?]。代表的なアクティブキュー管理機構として、RED (Random Early Detection) が挙げられる [?]。RED は、ルータに到着するパケットを、平均キュー長と 4 種類の制御パラメータの値に応じて確率的に棄却する。RED は TCP のコネクションに応じてパケット処理の方法を変えないため、実装が容易である。一方で、RED の有効性は、4 種類の制御パラメータに大きく依存することが知られている [?], [?]。しかし、TCP とアクティブキュー管理機構の両方を考慮した解析は複雑であるため、大半の研究はシミュレーションにより性能を評価している。例えば文献 [?] では、RED の 4 種類の制御パラメータを変化させながらシミュレーションを行い、制御パラメータが応答時間にどのような影響を与えているのかを明らかにしている。また、文献 [?] では、RED の 4 種類の制御パラメータの変動がスループットに与える影響を、シミュレーション結果を示すことにより明らかにしている。しかしながら、これらの研究は少数のシミュレーション結果にもとづいて得られたものであり、アクティブキュー管理機構の複数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ということが系統的に明らかにされていない。

そこで本稿では、多変量解析を用いてアクティブキュー管理機構の性能を解析する。具体的には、代表的なアクティブキュー管理機構である RED の制御パラメータの組み合わせを変化させ、数千回のシミュレーション結果を統計的に解析する。本稿では、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として用いて、性能指標 (平均キュー長、スループット、パケット棄却率) を応答変数として、制御パラメータが性能に与える影響を明らかにする。多変量解析の中でも重回帰分析を用いて、RED の制御パラメータがその性能に与える影響を明らかにする。

本稿の構成は以下のとおりである。まず 2. では、RED の概

要について簡単に説明する。3. では、多変量解析の概要を説明する。4. では、本稿で用いるシミュレーションモデルについて説明する。5. では、数千回のシミュレーション結果に対して多変量解析を行い、制御パラメータが RED の性能に与える影響を明らかにする。最後に 6. では、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. RED (Random Early Detection) の概要

本章では、RED の概要を説明する。RED の詳細については、文献 [?] を参照されたい。

RED は、ルータに到着するパケットを平均キュー長 (平均バッファ内パケット数) に応じて確率的に棄却する。現在のキュー長を $q$ とすると、ルータにパケットが到着するごとに、平均キュー長 $\bar{q}$ は以下の式で計算される。

$$\bar{q} \leftarrow (1 - w_q)\bar{q} + w_q q \tag{1}$$

ここで、$w_q$ はローパスフィルタの重みであり、RED の制御パラメータの一つである。このように計算される平均キュー長 $\bar{q}$ を用いて、RED はパケット棄却率 $p_b$ を以下のように決定する。

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

ここで、$min_{th}$ および $max_{th}$ はそれぞれ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、これらはすべて RED の制御パラメータである。最終的に、RED はルータに到着するパケットを次式で計算される確率 $p_a$ で棄却する。

$$p_a = \frac{p_b}{1 - count \times p_b} \tag{3}$$

ここで $count$ は、最後にパケットを棄却してから ルータに到着したパケット数である。RED は TCP コネクションを区別せず、すべてのパケットを同じパケット棄却率 $p_a$ で棄却する。

このように、RED のパケット棄却率は、$w_q$、$min_{th}$、$max_{th}$、$max_p$ の 4 種類の制御パラメータと、平均キュー長から決定される。このため、制御パラメータを変更すると、平均キュー長など RED の特性は変化する。

## 3. 重回帰分析

本稿では、数千回以上のシミュレーション結果に対して多変量解析を適用することより、RED の性能を解析する。さまざまな多変量解析手法の中でも、重回帰分析と呼ばれる解析手法を用いる。以下に、重回帰分析を用いた解析手法を簡単に説明する。

重回帰分析は、複数の「予測子変数 (連続的な値を取る変数)」が、「応答変数 (着目する変数)」にどのような影響を与えているかを解析する手法である。予測子変数は応答変数に影響を与えるパラメータであり、応答変数は予測子変数の変動に応じて変化するパラメータである。重回帰分析では、これらの予測子変数や応答変数を適切に選択しなければならない。これは、予測子変数が実際には応答変数にあまり影響を与えていない場合にも、変数の選択が不適切であれば、両者の間に相関があるような結果が得られてしまうためである。そのため、あらかじめ変数間の相関関係を把握し、予測子変数や応答変数を選択することが望ましい。そこで、予測子変数が応答変数に与える影響を視覚的に把握できる、多変量相関図を見て予測子変数と応答変数の相関関係を推測する。ここで多変量相関図とは、複数の変数間の関係を散布図で表現したものである。

応答変数の平均的な傾向を表した式を、回帰式という。ここで、予測子変数と応答変数の間には線型性が成り立つと仮定する。この仮定のもとで、次式のように応答変数を予測子変数の線形和であらわす。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \ldots + \beta_n x_n + \epsilon \tag{4}$$

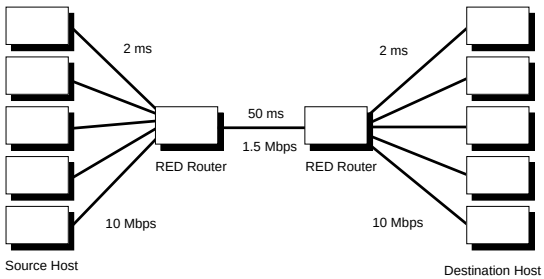


図 1　シミュレーションモデル
Fig. 1　Simulation model

ここで、予測子変数の係数 $\beta_i$ を回帰係数と呼び、予測子変数が応答変数に与える影響の度合をあらわす。また、実際に観測される応答変数の値を $\hat{Y}$ とすると、回帰式によって推測される値 $Y$ と、実際の応答変数の値 $\hat{Y}$ との差 $\epsilon$ を残差と呼ぶ。重回帰分析では、残差の期待値が 0 であり、なおかつその分布が正規分布に従うことを仮定する。回帰式が適切に決定できれば、回帰式の回帰係数より、予測子変数が応答変数にどの程度影響を与えているかを調べることができる。

重回帰分析では、残差が小さければ小さいほど、回帰式によって求められる応答変数の予測精度が良いといえる。重回帰分析の予測精度を測る指標として、決定係数 $R^2$ がある。決定係数とは、残差の分散を応答変数の分散で正規化したものを 1 から引いたものであり、次式で定義される。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} \epsilon_i^2}{\sum_{j=1}^{n} (\hat{y}_j - \bar{y})^2} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{j=1}^{n} (\hat{y}_j - \bar{y})^2} \tag{5}$$

決定係数 $R^2$ は、予測子変数の変動によって応答変数がどの程度変化するかを示す。なお、$\bar{y}$ は応答変数の平均値である。決定係数が 1 に近いほど、応答変数が予測子変数によってうまく説明できていることを意味する。逆に決定係数が 0 に近い場合は、選択した予測子変数以外の要素が応答変数に影響を与えている可能性がある。

## 4. シミュレーション

本稿のシミュレーションで用いるネットワークモデルを図 1 に示す。5 本の TCP コネクションと 2 つの RED ルータが存在し、ルータ間のリンクがボトルネックとなっている。 このようなネットワークモデルに対して、ns-2 シミュレータ [?] を用いたシミュレーションを行った。なお、シミュレーションで用いたパラメータを表 1 に示す。

本稿では、各シミュレーションのシミュレーション時間を 30 秒間とした。また、30 秒間の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から、RED ルータの平均キュー長、スループット、パケット棄却率を計算した。このような条件のもとで、RED の制御パラメータを変化させてシミュレーションを行った。

## 5. 解 析 結 果

### 5.1 RED のパケット棄却率に関する考察

RED のパケット棄却率を応答変数とした時の多変量相関図を図 2 に示す。この図から、例えば $w_q$ とパケット棄却率の間にはほぼ線形な関係があるが、$max_{th}$ に関しては非線型な関係であ

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] |

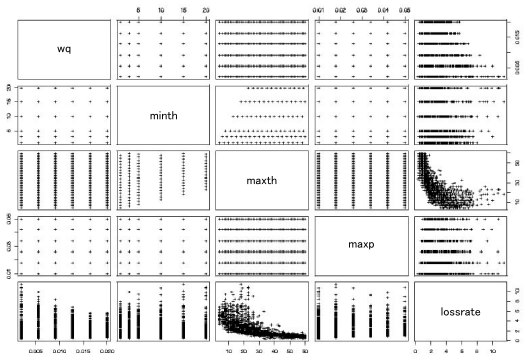


図 2　RED の制御パラメータとパケット棄却率に関する多変量相関図
Fig. 2　Pair scatter plot of control parameters and packet loss probability

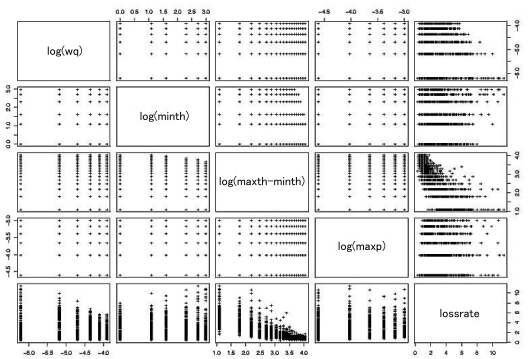


図 3　RED のパケット棄却率に関する多変量相関図 (変数変換後)
Fig. 3　Pair scatter plot of control parameters and packet loss probability (with variable transformation)

表 2　重回帰分析の結果 (RED のパケット棄却率)
Table 2　Result of multiple linear regression analysis on 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 | 4.63 | | 70.94 | 0 |
| $w_q$ | -19.54 | -0.08 | -7.11 | 0 |
| $min_{th}$ | 0.01 | 0.05 | 4.73 | 0 |
| $max_{th}$ | 0.07 | 0.74 | -58.32 | 0 |
| $max_p$ | -10.77 | -0.10 | -8.71 | 0 |
| 決定係数 | 0.50 | | | |

表 3　重回帰分析の結果 (RED のパケット棄却率、変数変換後)
Table 3　Result of multiple linear regression analysis on packet loss probability (with variable transformation)

| 予測子変数 | 回帰係数 | 標準化回帰係数 | $t$ 値 | $P$ 値 |
|---|---|---|---|---|
| 定数部 | 5.04 | | 35.55 | 0 |
| $\log w_q$ | -0.13 | -0.03 | -7.45 | 0 |
| $\log min_{th}$ | -0.28 | -0.09 | -20.14 | 0 |
| $\log(max_{th} - min_{th})$ | -1.47 | -0.35 | -81.67 | 0 |
| $\log max_p$ | 0.32 | 0.05 | -12.46 | 0 |
| 決定係数 | 0.66 | | | |

ることがわかる。重回帰分析では、予測子変数と応答変数の関係が線形であることを仮定しているため、非線型であれば重回帰分析をそのまま適用することができない。そのような場合には変数変換を行なう必要があるが、ここではまず、予測子変数に対して変数変換を行わない場合の結果を示す。

RED の制御パラメータを予測子変数、パケット棄却率を応答変数とした時の、重回帰分析の結果を表 2 に示す。表中で、「回帰係数」は予測子変数の係数、「標準化回帰係数」は予測子変数と応答変数の標準偏差を用いて、回帰係数を標準化した値を示す。標準化回帰係数を用いれば、分布の異なる複数の予測子変数が与える影響を比較することが可能となる。また、「$t$ 値」は、ある予測子変数を回帰式から除いた場合に、残差の分布に差があるかどうかを $t$ 検定によって調べた結果である。「$P$ 値」は、ある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。最後に、「決定係数」は、予測子変数の変動が応答変数にどの程度の影響を与えているかを示す指標である。

表 2 より、各予測子変数の $P$ 値はすべて 0 となっていることがわかる。つまり、回帰分析の結果では、すべての予測子変数が応答変数に影響を与えていることを示している。しかし、決定係数は 0.50 とそれほど大きな値ではないため、応答変数を回帰式によって十分正確に予測できているとは言えない。そこで次に、予測子変数に変数変換を施すことにより、回帰式の精度向上を図る。一般には、さまざまな変数変換を行い、この時に多変量相関図がどのように変化するかを観察することにより、適切な変数変換の方法を選択する。図 2 を見たところ、直感的に対数変換を行えば適切に変数変換が行えると予想できる。実際に文献 [?] で導出されている RED の平均キュー長の式という結果があるので、これをもとに予測子変数の変数変換を行う。

文献 [?] では、定常状態における TCP のウィンドウサイズ $w^*$ および RED の平均キュー長 $q^*$ が、次式のように導出されている。

$$w^* = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{3N}\left(\frac{max_{th} - min_{th}}{max_p(\overline{q}^* - min_{th})} + 1\right)} - \frac{1}{2} \qquad (6)$$

$$q^* = N\,w^* - B\,\tau \qquad (7)$$

ここで $N$ は TCP のコネクション数、$B$ は RED ルータの処理能力、$\tau$ は往復伝搬遅延時間である。また、解析を行った対象モデルは、本稿で用いたシミュレーションモデルと同様である。式 (2) のように、RED のパケット棄却率 $p_b$ は平均キュー長によって決まる。また、式 (6) の右辺第 1 項に着目すると、RED の平均キュー長は、$max_{th} - min_{th}$、$min_{th}$、$max_p$ の積によって決まることが分かる。つまり、これらをすべて対数変換することにより、RED の平均キュー長が $\log min_{th}$、$\log(max_{th} - min_{th})$、$\log max_p$ の線形和で表現できると考えられる。そこで以下では、予測子変数として、$\log min_{th}$、$\log(max_{th} - min_{th})$、$\log max_p$、$\log w_q$ を用いた時の解析結果を示す。

この時の多変量相関図を図 3 に示す。変数変換を行うことにより、例えば、予測子変数 $\log(max_{th} - min_{th})$ とパケット棄却率との間で、線形な関係がみられる。また、重回帰分析の結果を表 3 に示す。変数変換を行わない場合 (表 2) と比較すると、決定係数の値が 0.50 から 0.66 と若干大きくなっていることがわかる。ここで標準化回帰係数の絶対値に着目すると、$\log(max_{th} - min_{th})$ の標準化回帰係数が -0.35 と (絶対値が) もっとも大きな値となっている。続いて $\log min_{th}$ の標準化回帰係数である -0.09 が 2 番目に大きいが、- 0.35 と比較するとかなり小さな値である。これはつまり、RED のパケット棄却率は、大部分が $max_{th} - min_{th}$ によって決まることを意味している。一方、RED の最大パケット棄却率 $max_p$ や指数平均の重み $w_q$ は、RED のパケット棄却率にそれほど影響を与えないことがわかる。RED の最大パケット棄却率 $max_p$ が、RED のパケット棄却率にそれほど影響を与えないというのは意外に思える。これは、$max_{th} - min_{th}$ の値が小さい場合には RED ルータの動作が不安定となり [?]、最大パケット棄却率 $max_p$ に関係なく、大量の RED のパケット棄却が発生しているためと考えられる。

### 5.2　RED の平均キュー長に関する考察

次に、RED の平均キュー長を応答変数とした時の解析結果を示す。以下では、紙面の制約のため、変数変換が必要なものについては、変数変換後の結果のみを示す。まず、平均キュー長を応答変数とした時の多変量相関図を図 4 に示す。この図から

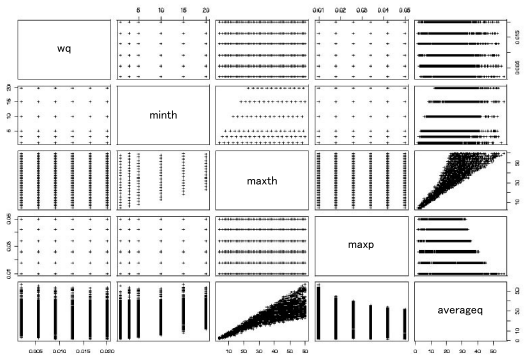


図 4　RED の平均キュー長に関する多変量相関図
Fig. 4　Pair scatter plot of control parameters and average queue length

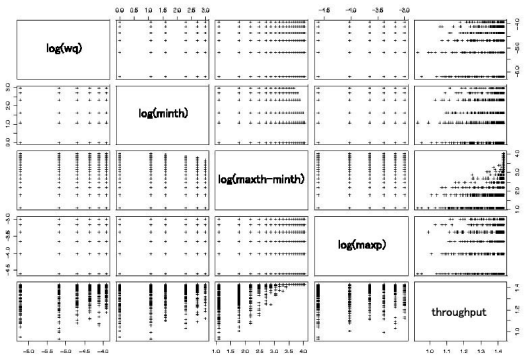


図 5　RED のスループットに関する多変量相関図 (変数変換後)
Fig. 5　Pair scatter plot of control parameters and throughput (with variable transformation)

表 4　重回帰分析の結果 (RED の平均キュー長)
Table 4　Result of multiple linear regression analysis on 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 | 9.75 | | 41.87 | 0 |
| $w_q$ | -39.01 | -0.02 | -3.98 | 0 |
| $min_{th}$ | 0.22 | 0.14 | 9.37 | 0 |
| $max_{th}$ | 0.57 | 0.84 | 138.74 | 0 |
| $max_p$ | -249.44 | -0.33 | -56.56 | 0 |
| 決定係数 | 0.88 | | | |

表 5　重回帰分析の結果 (RED のスループット、変数変換後)
Table 5　Result of multiple linear regression analysis on throughput (with variable transformation)

| 予測子変数 | 回帰係数 | 標準化回帰係数 | $t$ 値 | $P$ 値 |
|---|---|---|---|---|
| 定数部 | 1.35 | | 194.28 | 0 |
| $\log w_q$ | 0.006 | 0.04 | 6.85 | 0 |
| $\log min_{th}$ | 0.01 | 0.09 | 13.84 | 0 |
| $\log(max_{th} - min_{th})$ | 0.04 | 0.26 | 43.09 | 0 |
| $\log max_p$ | 0.01 | 0.05 | 9.00 | 0 |
| 決定係数 | 0.36 | | | |

分かるように、RED の制御パラメータと平均キュー長との間にはほぼ線形の関係が見られる。重回帰分析の結果を表 4 に示す。決定係数は 0.88 と 1 に近いため、回帰式の予測精度は良いと考えられる。また、標準化回帰係数の絶対値に着目すると、$max_{th}$ が 0.84 と大きな値となっている。これに続いて、$max_p$ (標準化回帰係数が -0.33)、$min_{th}$ (標準化回帰係数が 0.14)、$w_q$ (標準化回帰係数が -0.02) の順番に大きな値となっている。これはつまり、(シミュレーションで用いた制御パラメータの場合) RED の平均キュー長を決定する要因の約 60 % は、最大しきい値 $max_{th}$ であることを意味している。これは、式 (2) から分かるように、RED ルータは平均キュー長が $max_{th}$ を超えた場合、到着するすべてのパケットを廃棄するからと考えられる。つまり、RED ルータの平均キュー長は、ほぼ $max_{th}$ で抑えられるためと考えられる。

### 5.3　RED のスループットに関する考察

スループットを応答変数とした時の多変量相関図を図 5 に示す。また、重回帰分析の結果を表 5 に示す。ここでは、予測子変数として、変数変換後の $\log min_{th}$、$\log(max_{th} - min_{th})$、$\log max_p$、$\log w_q$ を用いている。この表より、決定係数は 0.36 と比較的小さな値であり、回帰式の予測精度がそれほど高くないことがわかる。また、標準化回帰係数の絶対値を比較すると、$\log(max_{th} - min_{th})$ が 0.26 ともっとも大きい。このことから、$max_{th} - min_{th}$ が RED のスループットに大きな影響を与えていることがわかる。このことは、RED のパケット棄却率に関する解析 (表 3) の結果とも一致している。

## 6.　まとめと今後の課題

本稿では、多変量解析を用いて数千回のシミュレーション結果を解析し、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るかを定量的に評価した。その結果、(1) RED のパケット棄却率およびスループットには、制御パラメータである $max_{th} - min_{th}$、$min_{th}$、$max_p$、$w_q$ がこの順番に大きな影響を与えること、(2) RED の平均キュー長には、制御パラメータである $max_{th}$、$max_p$、$min_{th}$、$w_q$ がこの順番に大きな影響を与えること、(3) 制御パラメータ $w_q$ は、RED の定常特性にほとんど影響を与えないこと、などが明らかになった。これらの結果は、従来行われてきた RED に関する研究結果とも一致しており、多変量解析を用いた性能評価の有効性を示している。

そこで今後は、多変量解析手法を用いて、RED の制御パラメータだけでなく、ネットワークのパラメータ (TCP のコネクション数、伝搬遅延時間、ルータの処理能力、ルータのバッファサイズ) が、RED ルータの性能に与える影響を明らかにする予定である。具体的には、さまざまなネットワークのパラメータを予測子変数、RED の性能指標を応答変数とし、同様にして重回帰分析を行う。さらに、多変量解析を用いた性能評価手法は、RED に限定したものではない。そこで、RED 以外のアクティブキュー管理機構を含む、その他のトラヒック制御機構に対しても多変量解析手法を適用してゆく予定である。

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

[4] 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.

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

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

[7] H. Ohsaki, M. Murata, and H. Miyahara, "Steady state analysis of the RED gateway: stability, transient behavior, and parameter setting," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E85-B, pp. 107–115, Jan. 2002.