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.

# ネットワークの変動に対してロバストとなるアクティブキュー管理機構のパケット棄却方式に関する検討

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
†† 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: †kisimoto@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††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 (Transmission Control Protocol) の輻輳制御機構を補助する、アクティブキュー管理機構が注目されている。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) ルータに着目する。RED ルータは、平均キュー長 (バッファ内パケット数) に対して、線型な確率で到着するパケットをランダムに廃棄する。しかしこれまで、パケットを棄却する確率が、平均キュー長に対して線型で良いかどうかについて、検討が行われていない。そこで本稿では、数学的解析手法を用いることにより、RED ルータの定常特性や過渡特性を向上させるために、パケット棄却率を決定する関数としてどのようなものが適切かを明らかにする。さらに、いくつかの数値例により、パケット棄却率を決定する関数が、凹型、線型、凸型の 3 種類の場合に、RED ルータの性能がどのように変化するかを明らかにする。その結果、パケット棄却率を決定する関数を凹型にすれば、関数が線型の場合に比べて、RED の平均キュー長が大きくなる一方、RED の過渡特性およびネットワークの変動に対するロバスト性が向上することを示す。
キーワード　アクティブキュー管理機構、RED (Random Early Detection)、定常特性、過渡特性、パケット棄却方式

# On Packet Dropping Schemes of Active Queue Management Mechanism for Realizing Robustness against Network Status Changes

Motohisa KISIMOTO†, Hiroyuki OHSAKI††, and Masayuki MURATA†††

† Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Japan
†† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Japan
††† Cybermedia Center, Osaka University, Japan
E-mail: †kisimoto@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††oosaki@ist.osaka-u.ac.jp, †††murata@cmc.osaka-u.ac.jp

**Abstract**　Recently, several router-based congestion control mechanisms have been proposed to support an end-to-end congestion control mechanism of TCP (Transmission Control Protocol). In this paper, we focus on a RED (Random Early Detection) router, which is one of promising router-based congestion control mechanisms. The RED router randomly drops the arriving packet by alignment probability to an average queue length (the number of packets at the buffer). However, no examination has been performed whether the line type function of the packet dropping probability is good or not. In this paper, we make it clear what function, which determines the packet dropping probability, is suitable from the viewpoint of the steady state performance and the transient behavior of the RED router using the mathematical analysis. Throughout some numerical examples, it is shown clearly how the performance of the RED router changes when the function, which determines the packet dropping probability, is a line type, a concave type and a convex type. Consequently, if the function, which determines the packet dropping probability, is made into a concave type, compared with the case where the function is a line type, it is shown that the transient behavior of the RED router and the robustness against the network status changes can be improved although the average queue length of the RED router in the steady state becomes large.
**Key words**　Active Queue Management, RED (Random Early Detection), Steady State Performance, Transient Behavior, Packet Dropping Scheme

## 1. はじめに

近年、エンド-エンド間で動作する TCP (Transmission Control Protcol) の輻輳制御機構を補助する、アクティブキュー管理機構が注目を浴びている [1]。代表的なアクティブキュー管理機構の一つとして、ルータに到着するパケットを確率的に棄却する、RED (Random Early Detection) が挙げられる [2]。RED ルータは、従来の Drop Tail ルータに比べて、平均キュー長 (平均パケット待ち行列長) を小さく抑える効果があり、より良いスループットを実現できると報告されている [2], [3]。また、RED は TCP のフローを区別しない単純なアルゴリズムであるため、理論的な検討だけでなく、ルータへの実装も行なわれつつある。

しかし、RED の有効性は、4 種類の制御パラメータ ($min_{th}$、$max_{th}$、$max_p$、$q_w$) の設定に大きく依存するという問題がある [2], [4]。また、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も指摘されている [4]。つまり、最適な RED の制御パラメータは、TCP コネクション数に応じて変化する。このような RED の問題点を解消するため、これまでさまざまな研究が行なわれてきた [5] ~ [9]。例えば文献 [8] では、ルータにおいて TCP コネクション数を推測して、TCP コネクション数によらず平均キューを一定にするという、SRED (Stabilized RED) が提案されている。SRED では、ルータにおけるパケット棄却率として、推測した TCP コネクション数に反比例した値を用いる。また文献 [9] では、RED の制御パラメータの一つである最大パケット棄却率 $max_p$ を、平均キュー長に応じて適応的に変化させる方式 (Adaptive RED) が提案されている。Adaptive RED は、平均キュー長が $min_{th}$ より小さい場合には、$max_p$ を $(\frac{1}{\alpha}-1)max_p$ だけ増加させ、また逆に平均キュー長が $max_{th}$ より大きい場合には、$max_p$ を $(1-\beta)max_p$ だけ減少させるという方式である。このような RED の問題点は、そもそも RED のアルゴリズムが、アドホックな手法によって設計されたことに起因する。例えば、RED ルータは、平均キュー長に対して線型な確率で、到着するパケットをランダムに廃棄する。しかしこれまで、パケットを棄却する確率が、平均キュー長に対して線型で良いかどうかについては検討が行われていない。そこで本稿では、数学的解析手法を用いることにより、RED ルータの定常特性や過渡特性といった観点から、パケット棄却率を決定する関数をどのように選べばよいかを明らかにする。

本稿では、TCP の定常特性解析 [10] および RED の定常特性解析 [4] の結果を利用することにより、RED のパケット棄却率をどのように決定すればよいかを議論する。さらに、いくつかの数値例により、パケット棄却率を決定する関数が線型、凹型、凸型の 3 種類の場合に、RED ルータの性能がどのように変化するかを明らかにする。その結果、パケット棄却率を決定する関数を凹型にすれば、関数が線型や凸型の場合に比べて、RED の過渡特性およびネットワークの変動に対するロバスト性が向上することを示す。

本稿の構成は以下のとおりである。まず、2. 章では、本稿で解析の対象とする RED のアルゴリズムを簡単に説明する。3. 章では、文献 [4], [10] の解析結果を利用することにより、RED のパケット棄却率を決定する関数として、どのような関数が適しているかを検討する。さらに、4. 章では、いくつかの数値例により、パケット棄却率を決定する関数を凹型にすれば、RED の過渡特性およびネットワークの変動に対するロバスト性が向上することを示す。最後に 5. 章において、本稿のまとめと今後の課題について延べる。

## 2. RED (Random Early Detection)

RED ルータは、$min_{th}$、$max_{th}$、$max_p$、$q_w$ と呼ばれる 4 種類の制御パラメータを持つ。まず、$min_{th}$ 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 ルータに到着するパケットをどのような確率で棄却するかを決定するために用いられる。また、RED ルータは平均キュー長を保持している。これは、ローパスフィルターの一種である、指数平均を用いて現在のキュー長から計算される。現在キュー長と平均キュー長をそれぞれ $q$ および $\overline{q}$ とすれば、RED ルータはパケットが到着するたびに、平均キュー長 $\overline{q}$ を以下の式で更新する。

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

ここで、$q_w$ は平均キュー長に対する、現在キュー長の重みを決定する制御パラメータである。

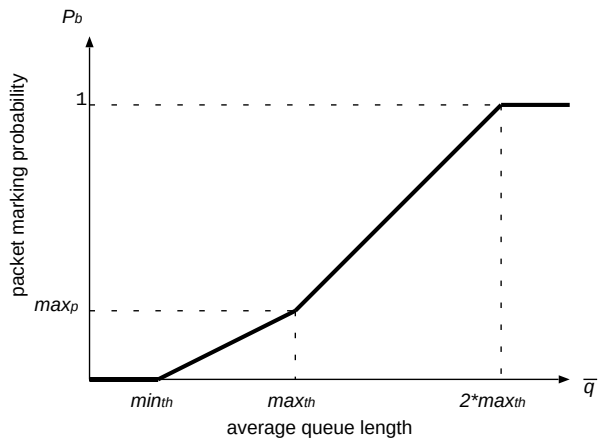


図 1　パケット棄却率 $p_b$ と平均キュー長 $\overline{q}$ の関係

このようにして得られた平均キュー長を用いて、RED ルータはパケット棄却率 $p_b$ を計算する。具体的には、RED ルータはパケット棄却率 $p_b$ を以下のように決定する。

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

ここで、$max_p$ はパケット棄却率の大きさを決定する制御パラメータ (図 1) である。なお、RED ルータは TCP のフローを区別しない。つまり、同じパケット棄却率 $p_b$ が、すべてのパケットに対して用いられる。

実際には、RED は到着するパケットを以下の式で与えられる確率で棄却する。

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

ここで、$count$ は、最後にパケットが棄却されたのちに、現在までに通過したパケット数である。この式は TCP コネクション間の不公平性を解消する目的で作られたものであるため、TCP から見たパケット棄却率は $p_b$ となる。

## 3. 解　　析

以下では、RED のアクティブキュー管理機構が期待通り動作している時、つまり、$min_{th} < \overline{q} < max_{th}$ の時を考える。この時、RED のパケット棄却率 $p_b$ は、次式のように、RED の平均キュー長 $\overline{q}$ をもとに決定される。

$$p_b \;=\; max_p \left( \frac{\overline{q} - min_{th}}{max_{th} - min_{th}} \right) \tag{4}$$

RED の平均キュー長 $\overline{q}$ が大きい時には、$p_b$ は $max_p$ に近い値を取り、RED の平均キュー長 $\overline{q}$ が小さい時には、$p_b$ は 0 に近い値をとる。式 (3) のように、RED のパケット棄却率 $p_b$ は、$\overline{q} - min_{th}$ に関する線型関数となっている。しかし、これは RED の定常特性や過渡特性を十分に考えて決定されたものではない。例えば、TCP のウィンドウ型フロー制御は、実際にはネットワーク内でのパケット棄却に対して、非線型にウィンドウサイズを変化させる。このため、TCP のウィンドウ型フロー制御の特性を考慮して RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定すれば、RED の定常特性や過渡特性を向上できると考えられる。そこで以下では、TCP の定常特性解析 [10] および RED の定常特性解析 [4] の結果を利用することにより、パケット棄却率 $p_b$ をどのように決定すればよいかを議論する。

まず、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数 (式 (3)) を、次式で置き換える。

$$p_b \;=\; max_p \, f(\frac{\overline{q} - min_{th}}{max_{th} - min_{th}}) \tag{5}$$

ここで、$f$ は単調増加関数であり、$f(0) = 0$ および $f(1) = 1$ とする。以下の目的は、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する $f$ が、RED の定常特性や過渡特性にどのような影響を与えるかを明らかにすることである。

次に、ネットワークにおけるパケット棄却率が与えられた時の、TCP のウィンドウサイズの期待値を考える。文献 [10] では、定常状態における TCP のスループットが導出されている。この導出の過程で、TCP がパケット棄却を検出する直前の、TCP のウィンドウサイズの期待値 $E[W]$ が導出されている (文献 [10] の式 (5))。

$$E[W] \;=\; \frac{2+b}{3b} + \sqrt{\frac{8(1-p)}{3bp} + \left(\frac{2+b}{3b}\right)^2} \tag{6}$$

ここで、$b$ は受信側ホストが ACK パケットの返送に要するパケットの数 (通常は $b = 1$ もしくは $b = 2$)、$p$ はネットワーク中でのパケット棄却率である。この解析では、(1) TCP は輻輳回避フェーズで動作していること、(2) すべてのパケット棄却は重複 ACK によって検出できること、(3) ネットワーク中でのパケット棄却率は一定であること、(4) 最大ウィンドウサイズは十分大きいこと、が仮定されている。ただし、式 (5) は TCP がパケット棄却が検出する直前のウィンドウサイズの期待値である。パケット棄却を検出した直後に、ウィンドウサイズは 1/2 に減少する。その後、再度パケット棄却が発生するまで、ウィンドウサイズは線型に増加する。そこで本稿では、ネットワークにおけるパケット棄却率 $p$ が与えられた時の、ウィンドウサイズの期待値 $w(p)$ として以下の式を用いる。

$$w(p) \;=\; \frac{1}{2}\left(\frac{E[W]}{2} + E[W]\right) = \frac{3}{4}E[W] \tag{7}$$

さらに、TCP のウィンドウサイズ $w$ が与えられた時の、定常状態における RED の平均キュー長 $\overline{q}$ を考える。文献 [4] では、$N$ 本の TCP コネクションのウィンドウサイズが等しく $w$ である時の、RED のキュー長 $q$ が以下のように導出されている。

$$q \;=\; N\,w - B\,\tau \tag{8}$$

ここで、$B$ は RED ルータの容量 (RED ルータの処理能力または出力リンク帯域の小さいほう) であり、$\tau$ は TCP コネクションの往復伝搬遅延時間 (RED ルータにおけるキューイング遅延は除く) である。この解析では、前述の文献 [10] とほぼ同じ仮定がなされている。式 (4)、(6)、(7) より、RED のキュー長 $q$ は次式のように書くことができる。

$$q(x) \;=\; \frac{N}{4}\left\{1 + \frac{2}{b} + \frac{1}{b}\sqrt{4 + (b-20)\,b + \frac{24\,b}{max_p\, f(x)}}\right\} - B\,\tau \tag{9}$$

この式は、関数 $f$ に従って RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定した時に、RED のキュー長が $q(x)$ となることを意味している。式 (6) が期待値であるため、$q(x)$ もキュー長の期待値であることに注意されたい。以下、$min_{th} < \overline{q} < max_{th}$ の時に、バッファ内にどの程度パケットが存在するかを意味する $x \equiv (\overline{q} - min_{th})/(max_{th} - min_{th})$ を「キュー占有率」と呼ぶ。$\overline{q}(0) = min_{th}$ であり、$\overline{q}(1) = max_{th}$ である。

続いて、RED ルータを、ラウンドトリップ時間ごとに状態が変化する、離散時間モデルと考える。$i$ 番目のスロット ($i$ 番目のラウンドトリップ時間) におけるキュー占有率を $x_i$ とすれば、$i+1$ 番目のスロットにおけるキュー占有率 $x_{i+1}$ は、式 (8) を用いて次式で与えられる。

$$x_{i+1} \;=\; \frac{q(x_i) - min_{th}}{max_{th} - min_{th}} \tag{10}$$

$\overline{q} \simeq q$ を仮定すれば、上式を繰り返し用いることにより、ラウンドトリップ時間ごとにキュー占有率がどのように推移するかを知ることができる。例えば、式 (9) を $x_i$–$x_{i+1}$ 平面上でプロットすることにより、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する $f$ が、RED の定常特性や過渡特性にどのような影響を与えるかを解析することができる。

図 2 に、関数 $f$ が線型 ($f(x) = x$) である時の、式 (9) の例を示す。図中には、直線 $x_{i+1} = x_i$ もあわせて示している。この図より、以下のようなことを読み取ることができる。

( 1 ) 定常状態 ($i \to \infty$) における RED のキュー占有率は、式 (9) の曲線と直線 $x_{i+1} = x_i$ の交点となる。

( 2 ) 式 (9) の傾き ($dx_{i+1}/dx_i$) が大きいほど、$i$ 番目のスロットにおけるキュー占有率 $x_i$ によって、$i+1$ 番目のスロットにおけるキュー占有率 $x_{i+1}$ が大きく変化する。

( 3 ) 逆に、式 (9) の傾き ($dx_{i+1}/dx_i$) が小さいほど、$i+1$ 番目のスロットにおけるキュー占有率 $x_{i+1}$ の変化は小さい。

( 4 ) 定常状態において RED の平均キュー長が $min_{th} < \overline{q} < max_{th}$ において安定となるためには、式 (9) の傾き ($dx_{i+1}/dx_i$) は負でなければならない。

このことから、REDの定常特性および過渡特性について、以下のようなことが分かる。

（ 1 ） 式 (9) が凸型 (つまり、$d^2x_{i+1}/dx_i^2 < 0$) の時、定常状態における REDの平均キュー長が小さくなり、キュー占有率が小さい時の過渡特性は良いが、キュー占有率が大きい時の過渡特性は悪くなる。

（ 2 ） 式 (9) が線型 (つまり、$d^2x_{i+1}/dx_i^2 = 0$) の時、定常状態における REDの平均キュー長は凸型に比べて大きくなるが、キュー占有率によらず過渡特性は一定となる。

（ 3 ） 式 (9) が凹型 (つまり、$d^2x_{i+1}/dx_i^2 > 0$) の時、定常状態における REDの平均キュー長が大きくなり、キュー占有率が小さい時の過渡特性は悪いが、キュー占有率が大きい時の過渡特性が良くなる。

以上の考察から、式 (9) が $x$ に関してできるだけ線型となるように、REDのパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数 $f$ を選択すれば良いと考えられる。つまり、次式で与えられる式 (8) の傾き $dq(x)/dx$ が定数となることが望ましい。

$$\frac{dq(x)}{dx} = \frac{-3\,N\,f'(x)}{b\,max_p\,\sqrt{\frac{4+(-20+b)\,b+\frac{24\,b}{max_p\,f(x)}}{b^2}}\,f(x)^2} \tag{11}$$

この式から、式 (8) の傾きは、受信側ホストで動作する TCPのパラメータ $b$、TCPのコネクション数 $N$、最大パケット棄却率 $max_p$ によって決まることが分かる。逆に言えば、式 (8) の傾きは、TCP コネクションの伝搬遅延時間 $\tau$ や、RED ルータの容量 $B$ には依存しないことが分かる。このことは、REDの平均キュー長 $\overline{q}$ が TCPのコネクション数に依存するという、従来の研究結果 [3], [4], [8] とも一致している。従って、関数 $f$ をどのように決定すれば良いかを考える時には、システムパラメータとしては、主に TCPのコネクション数 $N$ に着目すればよいと考えられる。

なお、式 (9) が $x$ に関して線型となる $f$ は、式 (10) で与えられる $dq(x)/dx$ を $dq(x)/dx = \alpha(\alpha$ は定数) などとおき、これを関数 $f(x)$ に関する常微分方程式として解けば容易に求めることができる。

$$f(x) = 24/\{max_p\left(20 - \frac{4}{b} + b\left(-1 + \frac{16\,\alpha^2\,x^2}{N^2}\right)\right) - \frac{96\,b\,\alpha\,\sqrt{max_p}\,x\,C(1)}{N} + 144\,b\,C(1)^2\}$$

ここで、$C(1)$ は定数である。この式からも、式 (8) が線型となるように $f$ を決定するためには、TCPのコネクション数 $N$ に応じて $f$ を変化させる必要があることが分かる。しかし、REDは TCPのフローを区別しないため、そのままでは TCPのフロー数を知ることができない。このため、現実には、できるだけ TCPのコネクション数 $N$ に依存せず、なおかつ式 (9) が $x$ に関して線型に近いような $f$ を使用することが望ましい。

そこで次章では、線型、凹型、凸型である 3 種類の関数 $f$ を考え、このうちどれが REDのパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数として適しているかを検討する。

## 4. 数値例および考察

以下の数値例では、REDのパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数 $f$ として、以下のような 3 種類の関数クラス $\mathcal{F}_\phi$、$\mathcal{G}_\phi$、$\mathcal{H}_\phi$ を考える。

- 線型の場合

$$\mathcal{F}_\phi(x) = x^\phi \tag{12}$$

実際には、$\phi = 1$ の時のみ $\mathcal{F}_\phi$ は線型となり、$\phi > 1$ の時は凹型、$\phi < 1$ の時は凸型となる。

- 凹型の場合

$$\mathcal{G}_\phi(x) = \left(1 - \sqrt{1-x^2}\right)^\phi \tag{13}$$

ここで、$\phi(>0)$ は凹型の程度をあらわすパラメータである。つまり、$\phi$ が大きいほど、$\mathcal{G}_\phi(x)$ は小さな値をとる。$\mathcal{G}_\phi$ が凹型であるためには、

$$\frac{d^2\mathcal{G}_\phi(x)}{dx^2} = \phi\left(1 - \sqrt{1-x^2}\right)^{-2+\phi}/\left(1-x^2\right)^{\frac{3}{2}} \left(1 + \sqrt{1-x^2}\left(-1 + (-1+\phi)\,x^2\right)\right) \geqq 0 \tag{14}$$

である必要がある。上式を $\phi$ について解くことにより、

$$\phi \geqq \lim_{x\to 0}\frac{-1+\sqrt{1-x^2}+x^2\sqrt{1-x^2}}{x^2\sqrt{1-x^2}} = \frac{1}{2} \tag{15}$$

が得られる。

- 凸型の場合

$$\mathcal{H}_\phi(x) = \left(\sqrt{1-(1-x)^2}\right)^\phi \tag{16}$$

ここで、$\phi(>0)$ は凸型の程度をあらわすパラメータである。つまり、$\phi$ が大きいほど、$\mathcal{H}_\phi(x)$ は小さな値をとる。$\mathcal{H}_\phi$ が凸型であるためには、

$$\frac{d^2\mathcal{H}_\phi(x)}{dx^2} = \phi\,(-((-2+x)\,x))^{\frac{-4+\phi}{2}} \left(-2 + \phi\,(-1+x)^2 - (-2+x)\,x\right) \leqq 0 \tag{17}$$

である必要がある。上式を $\phi$ について解くことにより、

$$\phi \leqq \lim_{x\to 0}\frac{2-2\,x+x^2}{1-2\,x+x^2} = 2 \tag{18}$$

が得られる。

次に、いくつかの数値例を用いて、REDのパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数 $f$ が、$\mathcal{F}_\phi$(線型)、$\mathcal{G}_\phi$(凹型)、$\mathcal{H}_\phi$(凸型) のどれが望ましいかを検討する。まず、REDの制御パラメータおよびネットワークのシステムパラメータを、表 1 のように設定した時の、$x_i$–$x_{i+1}$ 平面におけるキュー占有率の関係を示す。図 2、図 3、図 4 が、REDのパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数を、それぞれ $\mathcal{F}_\phi$(線型)、$\mathcal{G}_\phi$(凹型)、$\mathcal{H}_\phi$(凸型) とした時の結果であり、$\phi$ の値を 0.5、1.0、1.5 と変化させている。図中には、直線 $x_i = x_{i+1}$ もあわせて示している。

表 1　数値例で使用したパラメータ

| | | | |
|---|---|---|---|
| $min_{th}$ | RED の最小しきい値 | 50 | [packet] |
| $max_{th}$ | RED の最大しきい値 | 100 | [packet] |
| $max_p$ | RED の最大パケット棄却率 | 0.1 | |
| $B$ | RED の処理容量 | 1.25 | [packet/ms] |
| $\tau$ | TCP の往復伝搬遅延時間 | 10 | [ms] |
| $N$ | TCP コネクション数 | 10 | [ms] |
| $b$ | TCP (受信側ホスト) のパラメータ | 1 | |

図 2 より、REDのパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数として

$\mathcal{F}_\phi$(線型) を用いた場合、$\phi$ の値が大きくなるにつれ、RED の平均キュー長 (直線 $x_i = x_{i+1}$ との交点) が大きくなっていることが分かる。また、キュー占有率 $x_i$ が小さい時に、式 (9) の傾き $(dx_{i+1}/dx_i)$ が急になっていることが分かる。一方、キュー占有率 $x_i$ が大きい時には、式 (9) の値がほぼ 0 となっている。これはつまり、キュー占有率が小さい状態では、RED がパケットを棄却することにより、キュー長が急激に増加することを意味している。一方、キュー占有率が大きい状態では、RED のパケット棄却率によらず、キュー長が急激に $min_{th}$(キュー占有率が 0) に減少することを意味している。

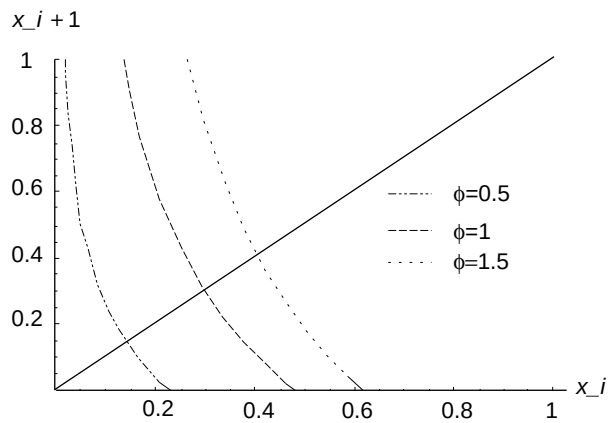


図 2　$x_i$–$x_{i+1}$ 平面におけるキュー占有率の関係 ($\mathcal{F}_\phi$ (線型), $\phi = 0.5, 1.0, 1.5$)

RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数として $\mathcal{G}_\phi$(凹型) を用いた場合、式 (9) の傾き $(dx_{i+1}/dx_i)$ が緩やかになる (図 3)。この図より、$\phi$ の値が大きくなる (凹型の程度が大きくなる) につれて、RED の平均キュー長が大きくなることが分かる。また、図 2 と比較すると、式 (9) がより直線に近くなっていることが分かる。これより、RED のパケット棄却が RED のキュー長に与える影響は、キュー占有率の大小にあまり依存しないことが分かる。

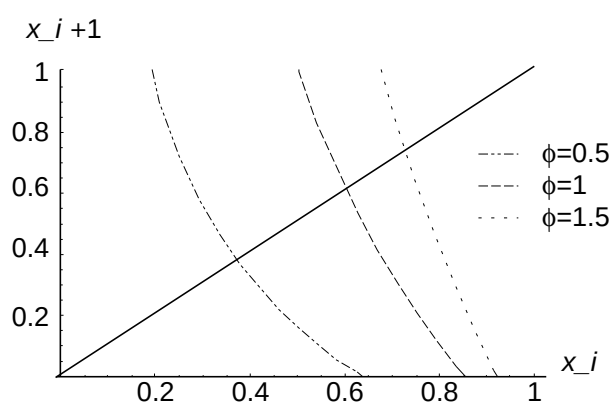


図 3　$x_i$–$x_{i+1}$ 平面におけるキュー占有率の関係 ($\mathcal{G}_\phi$ (凹型), $\phi = 0.5, 1.0, 1.5$)

さらに図 4 に、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数として $\mathcal{H}_\phi$(凸型) を用いた場合の、$x_i$–$x_{i+1}$ 平面におけるキュー占有率の関係を示す。この図より、キュー占有率が小さい時、式 (9) の傾き $(dx_{i+1}/dx_i)$ が非常に急になっていることが分かる。また、$\phi$ の値が小さくなる (凸型の程度が大きくなる) につれて、式 (9) の傾きがより急になっていることが分かる。つまり、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数として $\mathcal{H}_\phi$(凸型) を用いた場合、キュー占有率が小さい状態では、RED のキュー長が急激に変動することを意味している。

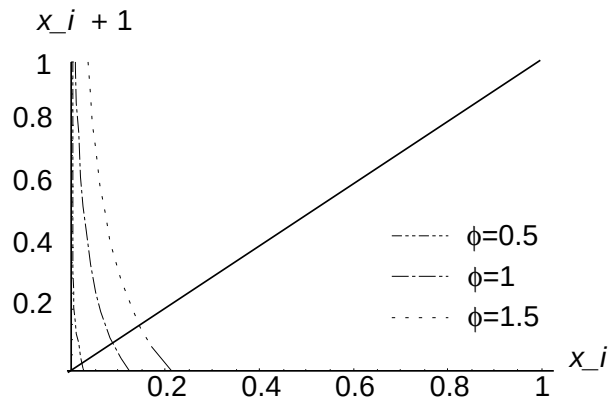


図 4　$x_i$–$x_{i+1}$ 平面におけるキュー占有率の関係 ($\mathcal{H}_\phi$ (凸型), $\phi = 0.5, 1, 1.5$)

次に、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数 $f$ として、$\mathcal{F}_\phi$(線型)、$\mathcal{G}_\phi$(凹型)、$\mathcal{H}_\phi$(凸型) を用いた場合に、TCP コネクション数の変動によって、RED の定常特性や過渡特性がどのような影響を受けるかを示す。まず、$\mathcal{F}_\phi$(線型) を用いた時の、TCP コネクション数 $N$ とキュー占有率の関係を図 5 に示す。ここでは、TCP コネクション数 $N$ を 1–20 まで変化させ、それ以外のパラメータについては表 1 の値を用いている。3. 章で述べたように、図中の曲線と、$x_i$–$x_{i+1}$ 平面が交差する曲線が、定常状態における RED の平均キュー長を意味している。このことから、TCP コネクション数 $N$ が大きくなるにつれ、定常状態における RED の平均キュー長が大きくなることがわかる。特に、$N$ が大きい時よりも、$N$ が小さい時のほうが、TCP コネクション数の変動が平均キュー長に与える影響が大きいことがわかる。さらに、TCP コネクション数 $N$ が大きくなるにつれ、式 (9) の傾き $(dx_{i+1}/dx_i)$ が緩やかになっていることがわかる。これは、TCP コネクション数が変動すれば、それに応じて RED の過渡特性が変化することを意味している。

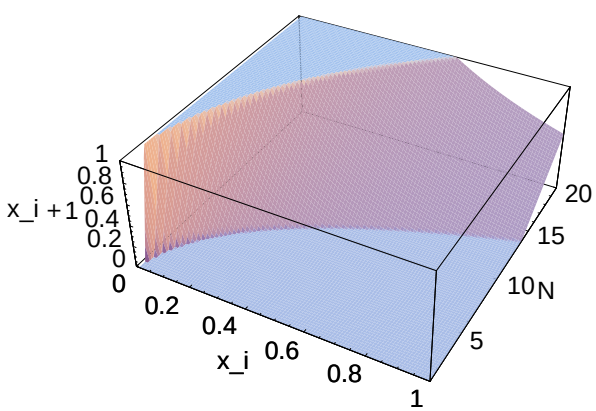


図 5　TCP コネクション数 $N$ とキュー占有率の関係 ($\mathcal{F}_\phi$ (線型), $\phi = 1$)

図 6 は、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数 $f$ として、

$\mathcal{G}_\phi$(凹型) を用いた時の結果である。RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数 $f$ を $\mathcal{G}_\phi$(凹型) とした以外は、図 5 と同じパラメータを用いている。この図から、関数 $f$ として $\mathcal{G}_\phi$(凹型) を用いた場合、式 (9) の傾き $(dx_{i+1}/dx_i)$ が、TCP コネクションにほとんど依存していないことが分かる。さらに、図 5 と同様に、TCP コネクション数 $N$ が大きくなるにつれ、定常状態における RED の平均キュー長が大きくなっている。しかし、RED の平均キュー長は、TCP コネクション数 $N$ に対して、ほぼ線型に増加している。一般に、TCP コネクション数は時間に応じて変動する。このため、平均キュー長が TCP コネクション数によって極端に変化しないという点で、図 5 よりも図 6 のほうが望ましいと考えられる。

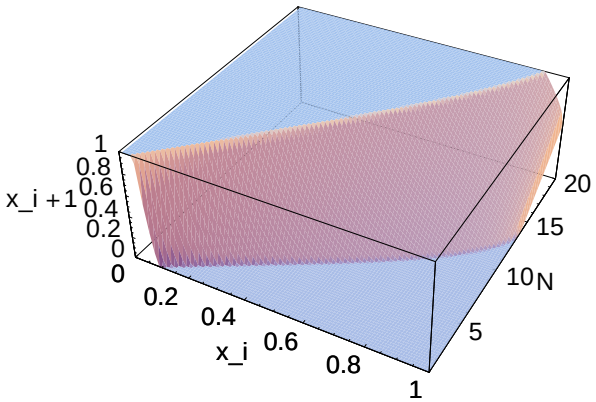


図 6　TCP コネクション数 $N$ とキュー占有率の関係 ($\mathcal{G}_\phi$ (凹型), $\phi = 1$)

最後に、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数 $f$ として、$\mathcal{H}_\phi$(凸型) を用いた時の結果を図 7 に示す。この図より、TCP コネクション数 $N$ が大きくなるにつれ、定常状態における平均キュー長が急激に大きくなっていることが分かる。また、式 (9) の傾き $(dx_{i+1}/dx_i)$ は、TCP コネクション数に大きく左右されていることがわかる。このため、RED の定常特性や過渡特性を考えると、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数として、$\mathcal{H}_\phi$(凸型) は不適切であると言える。

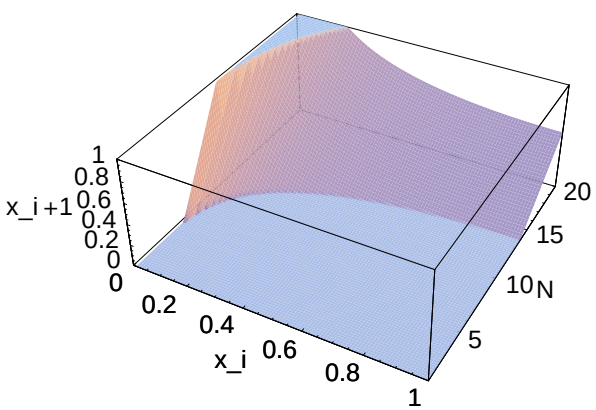


図 7　TCP コネクション数 $N$ とキュー占有率の関係 ($\mathcal{H}_\phi$ (凸型), $\phi = 1$)

以上の考察から、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数として、$\mathcal{G}_\phi$(凹型) がもっとも適していると考えられる。$\mathcal{F}_\phi$(線型) や $\mathcal{H}_\phi$(凸型) を用いた場合、定常状態における平均キュー長は小さく抑えられるが、キュー占有率に応じて過渡特性が大きく変動するという欠点がある。一方、$\mathcal{G}_\phi$(凹型) を用いた場合、RED の過渡特性が、キュー占有率および TCP コネクション数の変動にほとんど依存しない。つまり、RED のパケット棄却率 $p_b$ を決定する関数として $\mathcal{G}_\phi$(凹型) を用いた場合、RED の過渡特性およびネットワークの変動に対するロバスト性が向上する。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、文献 [4], [10] の結果を利用することにより、RED のパケット棄却率 $p_b$ をどのように決定すればよいかを議論した。さらに、線型、凹型、凸型の 3 種類の関数を考え、どれがパケット棄却率を決定する関数として適しているか検討した。その結果、パケット棄却率を決定する関数を凹型にすれば、関数が線型の場合に比べて、定常状態における RED の平均キュー長が大きくなるが、RED の過渡特性およびネットワークの変動に対するロバスト性を向上できることを示した。

今後の課題は、TCP コネクション数に関係なく、平均キュー長が一定となりなおかつ RED のパケット棄却が平均キュー長の変動にほとんど影響を与えない関数を提案することである。

## 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*, Aug. 1993.

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

[4] 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.

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

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

[7] J. Aweya, M. Ouellette, D. Y. Montuno, and A. Chapman, "An adaptive buffer management mechanism for improving TCP behavior under heavy load," *N/A*, pp. 3217–3223, 2001.

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

[9] W.-C. Feng, D. D. Kandlur, D. Saha, and K. G. Shin, "Techniques for eliminating packet loss in congested TCP/IP networks," *N/A*, 1997.

[10] 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*, Sept. 1998.