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.

流体近似法を用いたアクティブキュー管理機構 DRED のモデル化および性能評価

山本　英之　　大崎　博之　　今瀬　真

大阪大学 大学院情報科学研究科
〒 565–0871 大阪府吹田市山田丘 1–5
E-mail: {hideymmt,oosaki,imase}@ist.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) の輻輳制御を補助する、アクティブキュー管理機構が広く研究されている。アクティブキュー管理機構とは、ルータに到着するパケットを積極的に棄却することにより、ルータのキュー長を管理するルータの輻輳制御機構である。これまでに RED (Random Early Detection) を始めとする、多くのアクティブキュー管理機構のアルゴリズムが提案されている。しかし、RED を除く多くのアクティブキュー管理機構では、その特性は十分に解明されていない。そこで本稿では、流体近似法を用いて、アクティブキュー管理機構の一つである DRED (Dynamic RED) のモデル化を行い、その定常特性を解析する。具体的には、流体近似法を用いて DRED を連続時間システムとしてモデル化し、DRED の定常特性 (平均キュー長およびパケット棄却率) を導出する。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、近似解析の妥当性を検証する。その結果、パケット棄却率が小さな領域では、DRED はキュー長を安定化できないことを示す。
キーワード　流体近似法、アクティブキュー管理機構、DRED (Dynamic RED)、モデル化、性能評価、TCP (Transmission Control Protocol)

Modeling and Performance Evaluation of DRED (Dynamic Random Early Detection) using Fluid-Flow Approximation

Hideyuki YAMAMOTO, Hiroyuki OHSAKI, and Makoto IMASE

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1–5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565–0871 Japan
E-mail: {hideymmt,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract　In recent years, AQM (Active Queue Management) mechanisms, which support the end-to-end congestion control mechanism of TCP (Transmission Control Protocol), have been widely studied. The AQM mechanism is a congestion control mechanism at a router to control its queue length by actively discarding arriving packets. Many AQM mechanisms such as RED (Random Early Detection) have been proposed. However, behavior of AQM mechanisms other than RED has not been fully investigated. In this paper, using fluid-flow approximation we model DRED (Dynamic RED) and analyze its steady state behavior. In particular, we model DRED as a continuous-time system and investigate its steady state behavior (i.e. average queue length and packet drop probability). We validate effectiveness of our analytic model by comparing analytic results with simulation ones. We show that DRED cannot stabilize its queue length when packet drop probability is small.
Key words　Fluid-Flow Approximation, Active Queue Management, DRED (Dynamic RED), Performance Evaluation, TCP (Transmission Control Protocol)

1　は じ め に

近年、エンド–エンド間で動作する TCP (Transmission Control Protocol) の輻輳制御を補助する、アクティブキュー管理機構が広く研究されている [1]。アクティブキュー管理機構とは、ルータのバッファが一杯になる前の早い段階からパケットを棄却することで、ルータのキュー長 (バッファ内パケット数) を管理する、ルータの輻輳制御機構である。アクティブキュー管理機構を用いることで、ルータにおいて、棄却されるパケットの数を減少させることができ、ルータの平均キュー長を低く抑えることができる。その結果、エンド–エンド間のパケットの伝送遅延を減少することができるなどの利点がある。RFC2309 [1] 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) の使用が推奨されている。RED の目標は、ルータの平均キュー長を低く抑えることである。RED はルータに到着するパケットを、ルータの平均キュー長によって定まる確率に基づいて、確率的に棄却する。しかし、さまざまなネットワークの状況下で RED が良い性能を示すためには、RED のパラメータ設定を注意深く行う必要があることが知られている。[2]

そのため、これまでに RED を改良した方式や、新しいアクティブキュー管理機構が数多く提案されている。アドホックな手法により設計されたアクティブキュー管理機構のアルゴリズムとして文献 [3-8] などがある。一方、TCP がフィードバック型の輻輳制御であることに着目し、制御理論に基づいて設計されたアクティブキュー管理機構として文献 [9-11] などがある。例えば、REM (Random Exponential Marking) [9] は、古典制御理論の PI (Proportional-Integral) 制御に基づいている。REM は、ルータをコントローラとして見たときに、その入力がルータの平均キュー長、出力がパケット棄却率である。REM では、プライス ((キュー長 - 目標キュー長) + (パケット棄却率 - 回線速度)) をもとにパケット棄却率を決定している。DRED (Dynamic RED) [11] は古典制御理論の I (Integral) 制御に基づいている。DRED は、ルータをコントロータとして見たときに、その入力がルータの平均キュー長、出力がパケット棄却率である。DRED を用いることで、ルータの平均キュー長を、あらかじめ設定した目標値に調整できる。文献 [11] では、シミュレーションにより、DRED の制御パラメータである α や L が、ルータの平均キュー長やパケット棄却率などの定常特性に影響を与えることを示している。しかし、DRED の定常特性については十分な検討がなされていない。

一方、流体近似法を用いた、アクティブキュー管理機構のモデル化に関する研究がいくつか行われている [12-15]。文献 [12] では、TCP の輻輳制御機構およびアクティブキュー管理機構 RED を、それぞれ流体近似モデルとしてモデル化している。さらに、ns2 のシミュレーション結果と、流体近似モデルを用いた解析結果とを比較して、解析モデルの妥当性を示している。文献 [13] では、文献 [12] の流体近似モデルを平衡点の近傍で線形化することにより、RED の局所安定性を解析し、RED が安定に動作するための条件を導出している。文献 [14] では、文献 [13] における安定性解析を拡張し、TCP コネクションの伝搬遅延が異なる場合に、ネットワークが安定に動作するための条件を導出している。文献 [15] では、流体近似法を用いた大規模なネットワークの解析手法を提案している。ネットワークの各構成要素を、入出力をパケット転送レートに統一した連続時間システムとしてモデル化することで、多段接続された閉ループ型のネットワーク全体をモデル化できることを示している。しかし、これらの研究はアクティブキュー管理機構として RED のみを対象としており、RED 以外のアクティブキュー管理機構のモデル化および性能評価は十分に行われていない。

そこで本稿では、数学的解析手法の一つである流体近似法を用いて、アクティブキュー管理機構 DRED の定常特性を解析する。具体的には、まず、文献 [15] で提案されているモデル化手法を用いて、DRED を連続時間システムとしてモデル化する。次に、文献 [15] で提案されている TCP の輻輳制御機構のモデル、リンクの伝搬遅延のモデルと、DRED のモデルを相互に接続することでネットワーク全体をモデル化する。ネットワーク全体のモデルを、制御系 CAD ツールである MATLAB/Simulink [16] を用いてブロック図として表現し、DRED の定常特性を解析する。特に TCP コネクション数やボトルネックリンクの帯域が、ルータの平均キュー長やパケット棄却率などの定常特性に、どのような影響を与えるかを定量的に明らかにする。さらに、解析モデルを用いた数値シミュレーションの結果と、ns-2 [17] を用いた離散時間シミュレーションの結果を比較することで、近似解析の妥当性を検証する。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2 章でアクティブキュー管理機構 DRED の概要およびその動作アルゴリズムを説明する。3 章では、流体近似法を用いて、DRED をどのように連続時間システムとしてモデル化するかを述べる。また、文献 [15] で提案されている TCP の輻輳制御機構、リンクの伝搬遅延の解析モデルおよびネットワーク全体のモデル化手法についても簡潔に説明する。4 章では、MATLAB/Simulink を用いて DRED の定常特性の解析を行う。また、シミュレーション実験により、提案する DRED の解析モデルの妥当性の検証を行う。最後に 5 章で、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2 DRED (Dynamic Random Early Detection)

2.1 DRED の概要

DRED [11] は、定常状態における RED の平均キュー長が、TCP コネクション数に強く依存する問題を解決することを目的として設計された。ここで定常状態とは、ルータへのパケット到着レートと、ルータのパケット処理速度が釣り合い、ルータの平均キュー長が変化しない状態である。

DRED は、古典制御理論の I (Integral) 制御 [18] に基づく制御方式を用いて確率的にパケットを廃棄することにより、ルータのバッファ内パケット数を制御する。ここで I 制御とは、制御目標と制御対象の計測値の差 (制御偏差) の積分値に基づく制御量を、制御対象に与える。したがって、現時点での制御偏差が 0 であっても、過去からの累積偏差が非零ならば、それを 0 にするように制御量が制御対象に与えられる。DRED では、制御対象がルータのキュー長 (バッファ内パケット数)、制御量がパケット棄却率に相当する。

このような制御を行うことで、TCP コネクション数に依存することなく、DRED はルータの平均キュー長を、あらかじめ設定された目標値付近に安定させることができる。平均キュー長が安定することにより、リンクの利用率を高め、TCP コネクション数に依存せずルータにおける遅延を一定に保つことができる。

2.2 DRED の制御アルゴリズム

DRED は、ルータのキュー長の時間平均をフィードバック情報としてパケット棄却率を調整し、平均キュー長をあらかじめ設定された目標値に安定させる。パケット棄却率は、DRED の制御パラメータであるサンプリング間隔 Δt ごとに再計算される。具体的には、DRED は Δt 個のパケットが到着するごとにパケット棄却率を再計算する。

以下では、制御開始時から n 回目のパケット棄却率の再計算に着目する。まず、パケットがルータのバッファに到着すると、

表 1　DRED の制御パラメータの推奨値
Table 1　Recommended setting of DRED control parameters

Δt	サンプリング間隔	10	[パケット]
α	コントロールゲイン	0.00005	
β	フィルタゲイン	0.002	
T	制御目標	バッファサイズの半分	
B	バッファサイズ	帯域遅延積の 2 倍	
L	パケット非棄却しきい値	$0.8T$ か $0.9T$	

DRED はその時刻におけるルータのキュー長を、現在キュー長 $q(n)$ としてサンプリングする。そして、現在キュー長 $q(n)$ と DRED の制御パラメータであるキュー長の目標値 T との偏差 $e(n)$ を計算する。

$$e(n) = q(n) - T \tag{1}$$

次に、キュー長の平均偏差 $\hat{e}(n)$ を $e(n)$ をもとに計算する。

$$\hat{e}(n) = (1-\beta)\hat{e}(n-1) + \beta e(n) \tag{2}$$

ここでは、ローパスフィルタの一種である移動指数平均 (Exponential Weighted Moving Average) を用いて、現在キュー長 $q(n)$ とキュー長の目標値 T の平均偏差を推定している。β は DRED の制御パラメータであり、平均偏差を推定するための移動指数平均の重みである。最後に、パケット棄却率 $p_d(n)$ を、$\hat{e}(n)$ より次式を用いて計算する。

$$p_d(n) \;=\; \min\left[\max\left\{p_d(n-1) + \alpha\frac{\hat{e}(n)}{B}, 0\right\}, \theta\right] \tag{3}$$

ここで α は DRED の制御パラメータであり、パケット棄却率の変化量を決定する重みである。B はルータのバッファサイズ、θ は最大パケット棄却率である。実際に適用されるパケット棄却率 $p(n)$ は、現在キュー長 $q(n)$ とパケット非棄却しきい値を示す DRED の制御パラメータ L をもとに、次式によって決定される。

$$p(n) \;=\; \begin{cases} p_d(n) & \text{if } \; q(n) \geqq L \\ 0 & \text{if } \; q(n) < L \end{cases} \tag{4}$$

表 1 に文献 [11] に示されている DRED の制御パラメータの推奨値を示す。

3　流体近似法によるモデル化

3.1　概　　要

本章では、ネットワークの各構成要素を、流体近似法を用いて連続時間システムとしてモデル化する。まず、DRED ルータのモデル化手法を説明する。次に、文献 [15] で提案されている、TCP の輻輳制御機構のモデル、リンクの伝搬遅延のモデル、ネットワーク全体のモデルの概要を説明する。表 2 に以降の説明で用いる記号の定義を示す。

3.2　DRED ルータのモデル化

本稿では、DRED ルータを入力 $x(t)$ がパケット転送レート、出力 $y(t)$ がパケット転送レートである、連続時間システムとしてモデル化する。流体近似法を用いて、DRED の現在キュー長の $q(t)$ の変化、現在キュー長と制御目標との偏差 $e(t)$、現在キュー長と制御目標との平均偏差 $\hat{e}(t)$ の変化、パケット棄却率 $p(t)$ の変化は、それぞれ次式のようにモデル化される。

表 2　記号 (定数と変数) の定義
Table 2　Definition of symbols (constants and variables)

R	TCP のラウンドトリップ時間
c	DRED ルータの処理能力
Δt	DRED ルータのサンプリング間隔
α	DRED ルータの制御ゲイン
β	DRED ルータのフィルタゲイン
B	DRED ルータのバッファサイズ
T	DRED ルータの制御目標
$x(t)$	モデルへの入力 (パケット転送レート)
$y(t)$	モデルからの出力 (パケット転送レート)
$w(t)$	TCP のウィンドウサイズ
$q(t)$	DRED ルータの現在キュー長
$e(t)$	DRED ルータの偏差
$\hat{e}(t)$	DRED ルータの平均偏差
$p(t)$	DRED ルータのパケット棄却率

$$\dot{q} \;=\; \begin{cases} x(t) - c & \text{if } \; q(t) > 0 \\ (x(t) - c)^+ & \text{if } \; q(t) = 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$e(t) \;=\; q(t) - T \tag{6}$$

$$\dot{\hat{e}} \;=\; -\beta c(\hat{e}(t) - e(t)) \tag{7}$$

$$\dot{p} \;=\; \frac{1}{\Delta t}\alpha\frac{\hat{e}(t)}{B} \tag{8}$$

ここで、$(x)^+ \equiv \max(x, 0)$ と定義される。

式 (5) は DRED ルータの現在キュー長の変化を表している。$x(t)$ は DRED ルータへのパケット転送レート、c は DRED ルータの処理能力である。DRED ルータの現在キュー長の変化量 $\dot{q}$ は、DRED ルータの処理能力を超えたパケット転送レートで与えられる。

式 (6) は DRED ルータの現在キュー長と制御目標との偏差を表している (式 (1))。T は制御パラメータの一つである、キュー長の制御目標である。

式 (7) は DRED ルータの現在キュー長と制御目標との平均偏差の変化を表している (式 (2))。β は移動指数平均の重みである。DRED ルータの現在キュー長と制御目標との平均偏差は、サンプリング間隔ごとに、移動指数平均を用いて計算されている。よって、DRED ルータの現在キュー長と制御目標との平均偏差の変化量 $\dot{\hat{e}}$ は、平均偏差 $\hat{e}(t)$ と偏差 $e(t)$ との差に、移動指数平均の重み β および DRED ルータの処理能力 c (パケット到着レート $x(t)$ を近似している) を乗じた値で与えられる。

式 (8) は DRED ルータのパケット棄却率の変化を表している。α はパケット棄却率の変化量を決定する重みである。DRED ルータにおいて、パケット棄却率はサンプリング間隔 Δt ごとに再計算される。したがって、パケット棄却率の瞬間的な変化量 $\dot{p}$ は、パケット棄却率の実際の変化量を、サンプリング間隔 Δt で割った値で与えられる。なお、ここでは $q(t) \geqq L$ と仮定している。

図 1 に DRED の解析モデルのブロック図を示す。

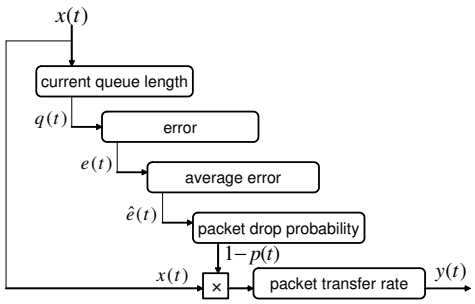

図 1　DRED の解析モデルのブロック図
Fig. 1　A block diagram for analytic model of DRED

3.3　TCP の輻輳制御機構のモデル化

文献 [15] では、TCP の輻輳制御機構が次式のようにモデル化されている。

$$\dot{y} \;=\; \frac{x(t)}{y(t)R^2} - \frac{2}{3}y(t)\left\{y(t-R) - x(t)\right\} \tag{9}$$

$x(t)$ は ACK パケットの到着レート、$y(t)$ はパケット転送レート、R は TCP のラウンドトリップ時間である。文献 [15] では、モデル化の際に以下のような仮定が置かれている。まず、すべての TCP コネクションは常に転送するデータを持つ。また、TCP のラウンドトリップ時間 R を定数としてモデル化している。最後に、TCP の輻輳回避フェーズのみがモデル化されており、TCP のスロースタートフェーズ、タイムアウト機構などはモデル化されていない。

3.4　リンクの伝搬遅延のモデル化

文献 [15] では、リンクの伝搬遅延が次式のようにモデル化されている。

$$y(t) \;=\; x(t-\tau) \tag{10}$$

$x(t)$ はリンクに入力されるパケットの転送レート、$y(t)$ はリンクから出力されるパケットの転送レート、τ はリンクの伝搬遅延を表す。

3.5　ネットワーク全体のモデル化

最後に文献 [15] で提案されている、ネットワーク全体のモデル化の概要を説明する。文献 [15] では TCP の輻輳制御機構のモデル、RED ルータのモデル、リンクの伝搬遅延のモデルを交互に接続することにより、ネットワーク全体がモデル化されている。本稿では、RED ルータのモデルの代わりに DRED ルータのモデルを用いて、ネットワーク全体をモデル化する。

まず、DRED が複数の入力リンクを持つ場合は、各入力リンクからのフローの和としてモデル化する。フローの合流は各リンクのパケット転送レートの和として記述できる。それぞれのフローのパケット転送レートを $x_i(t)$ $(1 \leqq i \leqq N)$、パケット転送レートの和を $y(t)$ とすると次式が成立する。

$$y(t) \;=\; \sum_{i=1}^{N} x_i(t) \tag{11}$$

次に、DRED が複数の出力リンクを持つ場合は、DRED からの出力を、複数のフローに分配することによりモデル化する。フローの分配は、1 個のパケット転送を N 個に分割することで記述できる。ここで、N は出力リンクの本数である。分配前のフローを $x(t)$、分配後のそれぞれのフローを $y_i(t)$ $(1 \leqq i \leqq N)$、それぞれのフローの分配比率を $f_i(t)$ $(1 \leqq i \leqq N)$ とすると、次式のように表される。

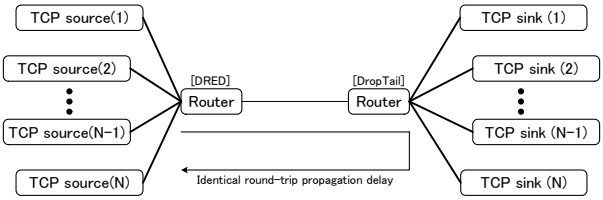

図 2　数値例およびシミュレーションで用いるネットワークトポロジー
Fig. 2　Network topology used in numerical examples and simulation

$$y_i(t) \;=\; f_i(t)x(t) \tag{12}$$

式 (12) に現れる、フローの分配比率 $f_i(t)$ $(1 \leqq i \leqq N)$ は次式で与えられる。

$$f_i(t) \;=\; \frac{\sum_{s' \in S_{L(i)}} z_{s'}(t)}{\sum_{s \in S_R} z_s(t)} \tag{13}$$

ここで、$S_{L(i)}$ はリンク i を通過する TCP フローの集合、S_R は RED ルータ R を通過する TCP フローの集合を意味しており、$z_s(t)$ は時刻 t における TCP フロー s のパケット出力レートである。

4　数値例およびシミュレーション

本章では、DRED の定常状態解析の数値例を示すことにより、TCP コネクション数や、サンプリング間隔などの DRED の制御パラメータの変化が、DRED の性能に与える影響を明らかにする。また、ns-2 によるシミュレーション結果と、提案する DRED の解析モデルを用いた解析結果を比較することにより、提案する解析モデルの妥当性を検証する。シミュレーション結果との比較では、DRED の現在キュー長、DRED のパケット棄却率の 2 つを比較対象とする。

数値例およびシミュレーションに用いるネットワークは伝搬遅延の等しい複数の TCP コネクションが単一の DRED ルータを共有しているモデルである (図 2)。図 2 において、TCP source(i) は TCP 送信側ホストを、TCP sink(i) は TCP 受信側ホストを表す。つまり、TCP source(i) から TCP sink(i) へパケットが転送される。ここで $1 \leqq i \leqq N$ である。なお、図 2 において、TCP 送受信ホスト–ルータ間のリンクの帯域は、ルータ–ルータ間のリンクの帯域と比較して十分に大きいものとする。つまり、ルータ–ルータ間のリンクがボトルネックとなる。

まず、3 章で説明した DRED ルータ、TCP の輻輳制御機構、リンクの伝搬遅延の連続時間モデルを、制御系 CAD ツールである MATLAB/Simulink [16] を用いて記述した。それぞれの連続時間システムを連結し、ネットワーク全体の連続時間システムを記述した。ネットワーク全体の連続時間システムに対して、数値シミュレーションを実行することにより、DRED ルータの現在キュー長、パケット棄却率の変動およびそれらの平均値を求めた。

さらに、上述のネットワークモデルに対して ns-2 (version 2.27) を用いてシミュレーションを実行した。シミュレーション

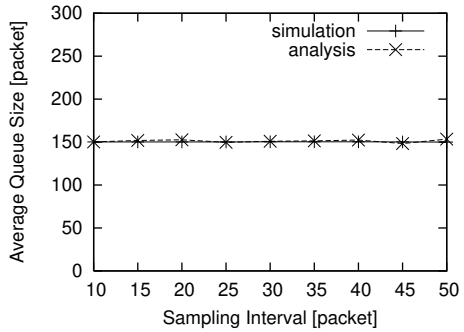

図 3　定常状態における DRED ルータの平均キュー長
(サンプリング間隔 $\Delta t = 10 - 50$ [packet])
Fig. 3　Average queue length of DRED in steady state
(sampling interval $\Delta t = 10 - 50$ [packet])

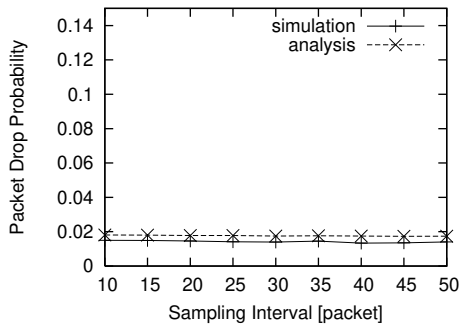

図 4　定常状態における DRED ルータのパケット棄却率
(サンプリング間隔 $\Delta t = 10 - 50$ [packet])
Fig. 4　Packet drop drobability of DRED in steady state
(sampling interval $\Delta t = 10 - 50$ [packet])

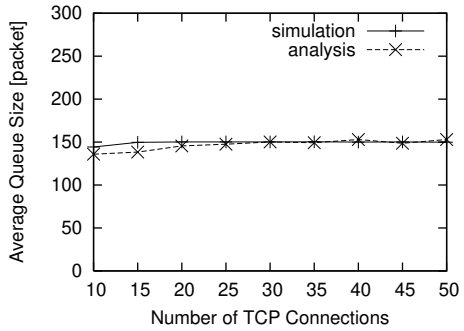

図 5　定常状態における DRED ルータの平均キュー長
(TCP コネクション数 $N = 10 - 50$)
Fig. 5　Average queue lengths of DRED in steady state
(number of TCP connections $N = 10 - 50$)

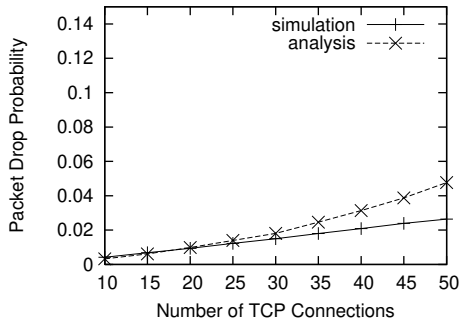

図 6　定常状態における DRED ルータのパケット棄却率
(TCP コネクション数 $N = 10 - 50$)
Fig. 6　Packet drop probability of DRED in steady state
(number of TCP connections $N = 10 - 50$)

において、ネットワークに存在するすべての TCP 送信ホストは、常に送信するデータを持つとした。200 [s] のシミュレーションを行い、最初の 100 [s] を除いた、残りの 100 [s] における DRED ルータの現在キュー長およびパケット棄却率の平均値を計算した。なお、シミュレーションにおいて、TCP が転送するパケットサイズはすべて同じ大きさ (576 [byte]) とした

数値例およびシミュレーションでは、特に断りのない限り、以下のようなパラメータを用いた。システムパラメータとして、TCP コネクション数 $N = 30$、ボトルネックリンクの帯域 $\mu = 2.50$ [packet/ms]、TCP コネクションの往復伝搬遅延 $\tau = 50$ [ms]。DRED の制御パラメータとして、サンプリング間隔 $\Delta t = 10$ [packet]、制御ゲイン $\alpha = 0.0005$、フィルタゲイン $\beta = 0.02$、ルータのバッファサイズ $B = 300$ [packet]、制御目標 $T = 150$ [packet]、パケット非棄却しきい値 $L = 130$ [packet] とした。

解析結果およびシミュレーション結果を図 3 から図 8 に示す。図 3 および図 4 は、サンプリング間隔 Δt を変化させた時の、定常状態における DRED ルータの平均キュー長およびパケット棄却率を示している。図 5 および図 6 は、TCP コネクション数 N を変化させた時の、定常状態における DRED ルータの平均キュー長およびパケット棄却率を示している。また、図 7 および図 8 は、ボトルネックリンクの帯域 μ を変化させた時の、定常状態における DRED ルータの平均キュー長およびパケット棄却率を示している。

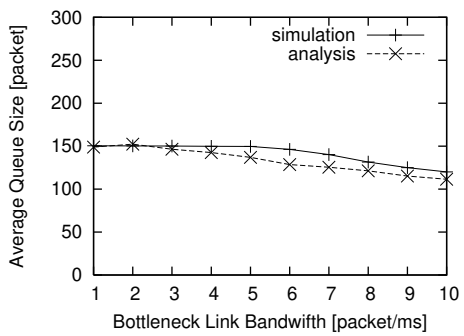

図 7　定常状態における DRED ルータの平均キュー長
(ボトルネックリンクの帯域 $\mu = 1 - 10$)
Fig. 7　Average queue length of DRED in steady state
(bottleneck link bandwidth $\mu = 1 - 10$)

まず、図 3 および 図 4 に着目すると、解析結果とシミュレーション結果がほぼ完全に一致していることが分かる。サンプリング間隔 Δt が変化しても、定常状態における現在キュー長およびパケット棄却率の値に変化はない。これは、サンプリング間隔 Δt が DRED の過渡特性を決定する制御パラメータであり、平均キュー長やパケット棄却率などの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。

次に、図 5 および図 6 に着目すると、TCP コネクション数が大きいときに、パケット棄却率に関して解析結果とシミュレーション結果がずれていることが分かる (図 6)。これは以下のよ

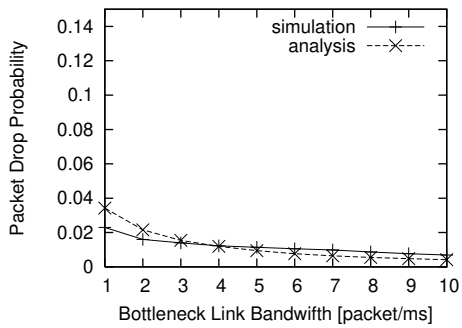

図 8　定常状態における DRED ルータのパケット棄却率
(ボトルネックリンクの帯域 $\mu = 1 - 10$)
Fig. 8　Packet drop probability of DRED in steady state
(bottleneck link bandwidth $\mu = 1 - 10$)

うな原因によると考えられる。TCP コネクション数が大きくなると、TCP コネクションあたりのウィンドウサイズが小さくなる。この時、TCP のタイムアウトによる転送レートの減少が起こりやすくなる。しかし、本稿で用いている TCP の輻輳制御機構のモデルでは、タイムアウトによる転送レートの減少をモデル化していないため、解析結果とシミュレーション結果にずれが生じると考えられる。

最後に、図 7 および図 8 に着目すると、解析結果とシミュレーション結果がほぼ一致していることが分かる。つまり、定常状態解析に関して、本近似解析が妥当であると言える。ボトルネックリンクの帯域が、平均キュー長およびパケット棄却率に与える影響に着目すると、ボトルネックリンクの帯域が大きい領域で、現在キュー長がキュー長の目標値より小さな値を示していることが分かる。このような結果となる解析結果およびシミュレーション結果をより詳細に調査したところ、いずれの結果においてもパケット棄却率が 0 になる場合があることが分かった。つまり、ネットワークの帯域遅延積が非常に大きい場合に、DRED のパケット棄却率が小さくなり、その結果 DRED はルータの現在キューをキュー長の目標値付近に安定できない。以上の考察により、DRED は帯域遅延積が非常に大きい領域でルータの現在キュー長をキュー長の目標値付近に安定化できないことが分かった。

5　まとめと今後の課題

本稿では、文献 [15] で提案されている解析手法を用いて、アクティブキュー管理機構 DRED の定常状態解析を行った。流体近似法を用いて、DRED ルータを連続時間システムとしてモデル化し、定常状態における DRED ルータの平均キュー長およびパケット棄却率を導出した。また、提案する解析モデルを用いた定常状態解析の結果とシミュレーション結果を比較し、近似解析の妥当性を検証した。

今後の課題としては、DRED 以外のネットワークの構成要素をモデル化することが考えられる。例えば、制御理論に基づくアクティブキュー管理機構 REM や PD Controller などは、DRED の解析モデルを拡張することで、容易にモデル化できると考えられる。また、連続時間システムの解析モデルに対して制御理論を適用することにより、さまざまな性能評価が可能になると考えられる。例えば、制御系 CAD ツールを用いた数値シミュレーションにより、定常状態解析や過渡特性解析が可能である。定常状態解析の数値例の一部は、本稿の数値例でも結果を示した。過渡特性解析では、DRED ルータのキュー長のダイナミクスを解析することが可能であると考えられる。

謝　　辞

本稿を作成するにあたり，有意義な議論をしていただいた，大阪大学大学院情報科学研究科教授の村田正幸氏に感謝いたします。

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] W.-C. Feng, D. D. Kandlur, D. Saha, and K. G. Shin, “Techniques for eliminating packet loss in congested TCP/IP networks,” Tech. Rep. CSE-TR-349-97, Oct. 1997.

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

[4] S. Floyd, R. Gummadi, and S. Shenker, “Adaptive RED: an algorithm for increasing the robustness of RED,” *available at `http://www.icir.org/floyd/papers/adaptiveRed.pdf`*, Aug. 2001.

[5] D. Lin and R. Morris, “Dynamics of random early detection,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM ’97*, pp. 127–137, Oct. 1997.

[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] R. Pletka, M. Waldvogel, and S. Mannal, “PURPLE: predictive active queue management utilizing congestion information,” in *Proceedings of Local Computer Networks (LCN 2003)*, Oct. 2003.

[8] B. Wydrowski and M. Zukerman, “GREEN: an active queue management algorithm for a self managed internet,” in *Proceedings of ICC 2002*, vol. 4, pp. 2368–2372, Apr. 2002.

[9] S. Sthuraliya, S. H. Low, V. H. Li, and Q. Yin, “REM: Active queue management,” *IEEE Network*, pp. 48–53, May/June 2001.

[10] J. Sun, G. Chen, K.-T. Ko, S. Chan, and M. Zukerman, “PD-Controller: A new active queue management scheme,” in *Proceedings of IEEE GLOBECOM 2003*, vol. 22, Dec. 2003.

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

[12] V. Misra, W.-B. Gong, and D. Towsley, “Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2000*, pp. 151–160, Aug. 2000.

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

[14] S. H. Low, F. Paganini, J. Wang, S. Adlakha, and J. C. Doyle, “Dynamics of TCP/RED and a scalable control,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, June 2002.

[15] 氏家 純也, 大崎 博之, 今瀬 真, “複数のフィードバックループをモデル化した TCP の特性解析,” 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2003-90), pp. 1–6, Oct. 2003.

[16] “MATLAB/Simulink.” `http://www.mathworks.com/`.

[17] “The network simulator – ns-2.” available at `http://www.isi.edu/nsnam/ns/`.

[18] K. Astrom and T. Hagglund, eds., *The Control Handbook*. CRC Press, 1996.