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.

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

氏家　純也　　大崎　博之　　今瀬　　真

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
E-mail: {j-ujiie,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　本稿では、文献 [1] で提案されている解析モデルを拡張することにより、複数のフィードバックループが存在する、閉ループ型のネットワークの解析手法を提案する。具体的には、ネットワークの構成要素 (TCP の輻輳制御機構、ルータのバッファ、リンクの伝搬遅延) を、それぞれ独立の連続時間システムによって表現し、これらを多段接続することにより閉ループ型のネットワークをモデル化する。さらに、制御系の CAD ツールを用いることにより、ネットワークの構成要素をそれぞれブロック図で表現し、これらのブロックを相互に連結することによって性能評価を行う。また、提案する解析手法による定常状態解析の結果と、シミュレーション結果を比較することにより、提案する解析手法の有効性を検証する。
キーワード　TCP (Transmission Control Protocol)、閉ループ型ネットワーク、定常状態解析、制御系 CAD ツール

On Modeling Network with Multiple Feedback Loops using Fluid-Flow Approximation

Jun'ya UJIIE, Hiroyuki OHSAKI, and Makoto IMASE

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1–3 Machikaneyama–cho, Toyonaka–shi, Osaka, 560–8531 Japan
E-mail: {j-ujiie,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract　In this paper, we propose a novel analytic approach for a closed-loop network with multiple feedback loops by extending the analytic model proposed in [1]. Specifically, we model building blocks of a network (i.e., the congestion control mechanism of TCP, propagation delay of a transmission link, and the buffer of a router) by independent continuous-time systems. By interconnecting these systems, we obtain the model for the entire closed-loop network. We also obtain a block diagram for each continuous-time system using the CAD tool for control engineering. We then perform several preliminary performance evaluations of a closed-loop network using numerical simulations. Moreover, we validate the effectiveness of our analytic approach by comparing our analytic results with simulation results.
Key words　TCP (Transmission Control Protocol), Closed-loop Network, Steady State Analysis, CAD Tool for Control Engineering

1　はじめに

近年、インターネットに接続されるノード数やインターネットを利用するユーザ数が、指数関数的な勢いで増加している。例えば、インターネットに接続されている計算機の台数は、2000 年 10 月の時点で約 1 億台であったのに対して、2 年後の 2002 年の時点で約 1 億 8000 万台と、わずか 2 年間でほぼ 2 倍になっている [2]。また、日本国内においてインターネットを利用するユーザ数の推移を見ると、1997 年末の時点では約 1000 万人であったのに対して、2002 年末の時点では約 7000 万人と、急激に増加している [3]。これにともない、大規模なネットワークの設計手法や性能解析手法に対する要求が高まっている。しかし、大規模なネットワークの性能解析手法は十分に整備されていないのが現状である [4]。

これまで、数学的解析手法を用いたネットワークの性能評価手法について、さまざまな研究が行われてきた。しかし、対象としているネットワークは小規模なものがほとんどである。例えば、数学的解析手法で用いられている待ち行列理論は、基本的に回線交換網のような開ループ型のネットワークを対象としている。現在インターネットで広く用いられている TCP は、ACK (ACKnowledgement) パケットの到着をもとにして、ネットワークの混雑の度合を推測するといった、フィードバック型のウィンドウフロー制御を行っている [5]。このため、待ち行列理論を、TCP のフィードバック制御が存在するような、閉ループ型のネットワークの性能評価へ適用することは容易ではない。

また、待ち行列理論を、大規模なネットワークの解析に適用することも容易ではない。待ち行列理論においても、例えば Jackson ネットワークのように、ノードが多段接続されたネットワークを解析する手法は存在する [6]。しかし、すべてのノードへのパケット到着がポアソン分布に従うことを仮定しているなど、現実のインターネットへの適用は困難である。ノード数が少なければ、待ち行列理論を用いて多段接続されたネットワークの厳密解析も可能だが、ノード数の増加にともない、解析の状態数および計算量が爆発的に増加してしまう。このため、ある程度以上の規模のネットワークへの適用は現実的ではない。

一方、大規模なネットワークの性能評価手法として、シミュレーション手法に関してもさまざまな研究が行われてきた。しかし、シミュレーション手法においても、小規模なネットワークを対象としているものがほとんどである。

シミュレーション手法を用いてネットワークの性能評価を行う場合、ネットワークの規模に応じて、シミュレーションに要する計算機のメモリ量および CPU 資源が増加する [7]。このため、大規模なネットワークのシミュレーションを、実用的な時間で行うことも容易ではない。

また、一般にネットワークの性能評価では、さまざまなパラメータ条件下における特性を解析する必要がある。しかし、シミュレーション手法では、1 回のシミュレーションでは、ある特定のシナリオにおける結果しか分からない [8]。このため、例えば、ネットワークの性能を左右すると考えられるパラメータの影響を調べるためには、そのパラメータ設定を変えながら、何度も繰り返しシミュレーションを実行しなければいけない。従って、シミュレーション手法を用いたネットワークの性能評価には、膨大な量の計算時間が必要となる。

そこで本稿では、複数のフィードバックループが存在する、多段接続された閉ループ型のネットワークの解析手法を提案する。ここでフィードバックループとは、TCP のようなトランスポート層通信プロトコルが行うフィードバック制御を意味している。例えば、複数の TCP コネクションが存在するネットワークにおいては、複数のフィードバックループが存在することになる。本稿で提案する解析手法では、文献 [1] で提案されている解析モデルを拡張し、ネットワークの各構成要素を流体近似法により、それぞれ独立の連続時間システムとしてモデル化する。ネットワークの構成要素として、TCP の輻輳制御機構、リンクの伝搬遅延、ルータのバッファをそれぞれモデル化する。次に、各構成要素の連続時間システムを多段接続することにより、閉ループ型のネットワーク全体をモデル化する。ネットワークの各構成要素をモデル化した連続時間システムを多段接続することにより、大規模なネットワークのモデル化が可能である。

さらに、制御系 CAD ツールを用いて、得られたネットワーク全体のモデルに対して性能評価を行う。具体的には、まず、ネットワークの各構成要素を表わす連続時間システムを、制御系 CAD ツールを用いることで、ブロック図で表現する。次に、それぞれのブロック図を接続することにより、複数のフィードバックループを持つネットワークを表現し、数値シミュレーションなどにより性能解析を行う。さらに、提案する解析手法を用いた定常状態解析の結果と、シミュレーション結果の比較を行い、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 章では、流体近似法を用いたネットワークのモデル化、および大規模ネットワークの性能評価に関する関連研究を紹介する。3 章では、ネットワークの各構成要素を連続時間システムによりモデル化するという、提案する解析手法を説明する。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、提案する解析手法の有効性を検証する。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述べる。

2 関 連 研 究

これまで、流体近似法を用いたネットワークのモデル化に関して、さまざまな研究が行われてきた [9-15] 。例えば文献 [9] では、TCP の輻輳制御機構およびアクティブキュー管理ルータを、それぞれ流体近似モデルとしてモデル化している。アクティブキュー管理ルータとして、RED (Random Early Detection) ルータをモデル化している。さらに、ns シミュレータを用いたシミュレーション結果と、流体近似モデルを用いた、RED ルータの現在キュー長 (バッファ内パケット数) と平均キュー長の解析結果とを比較して、モデルの妥当性を示している。

さらに、文献 [10] では、流体近似モデルを用いることにより、アクティブキュー管理機構のアルゴリズムを提案している。提案されているアルゴリズムは、古典制御理論で広く用いられている P 制御と PI 制御を利用したものである。PI 制御を利用したアルゴリズムが、従来の RED ルータと比較して、ルータへのパケット到着レートが大きい状況でも、ルータのキュー長を低く抑えられることを示している。

また、文献 [11] では、文献 [9] 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ている。アクティブキュー管理機構を、TCP の輻輳制御機構に対するフィードバック制御とみなし、アクティブキュー管理機構が安定するための条件を導出している。文献 [12] では、文献 [11] 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するための条件を導出している。

これらの研究では、TCP の輻輳制御機構のモデルの入出力と、RED ルータのモデルの入出力が異なっている。このため、大規模なネットワークをモデル化するためには、モデルの構造が複雑になってしまうという問題がある。これに対して、本稿で提案する解析手法は、ネットワークの構成要素の入出力をすべてパケット転送レートに統一しているため、大規模なネットワークのモデル化を容易に行える。

流体近似法を用いてネットワークのモデル化を行った研究として、他には文献 [1] がある。この論文では、TCP の輻輳制御機構 (TCP Reno および TCP Vegas) とネットワークの双対性モデル (duality model) を提案し、TCP の輻輳制御機構がある効用関数を最大化する最適化アルゴリズムとなっていることを示している。さらに、双対性モデルから導出した平衡点 (効用関数を最大化する点) の値とシミュレーション結果を比較し、双対性モデルの妥当性を示している。本稿では、この論文で提案されている解析モデルを拡張して用いる。

さらに、双対性モデルの妥当性をシミュレーション実験により検証した研究として、文献 [13] がある。この論文では、シミュレーションにより求めた RED ルータのパケット棄却率と、双対性モデルによって得られる、平衡点における RED ルータのパケット棄却率を比較している。その結果、両者の値はほぼ一致していることが示されている。ただし、RED ルータの平均キュー長や TCP のウィンドウサイズについては比較されていない。また、この論文では、平衡点の値のみに着目しており、平衡点に至るまでのダイナミクスは示されていない。一方、本稿で提案する解析手法では、平衡点に至るまでのダイナミクスも解析することが可能である。

さらに文献 [14] では、流体近似モデルと待ち行列理論を組み合せた、ネットワークのモデル化手法を提案している。流体近似モデルによって TCP の輻輳制御機構をモデル化し、待ち行列理論によって Drop-Tail ルータのバッファをモデル化している。さらに、提案したモデルを用いて過渡特性解析を行い、TCP 以外のバックグラウンドトラヒックの量や、TCP のコネクション数などによって、TCP の過渡特性がどのように変化するかを定量的に示している。さらに、文献 [15] では、文献 [14] のモデル化手法を応用することにより、TCP の定常特性および過渡特性を解析している。

一方、流体近似モデルを用いることで、大規模ネットワークのシミュレーションを高速化する研究もいくつか行われている [16-18]。文献 [16] では、流体近似モデルを用いたシミュレーション手法を提案している。この論文で提案されているシミュレーション手法は、Java で記述されたネットワークシミュレータ SSFnet [19] に実装されている。ns-2 [20] のようなパケット単位のシミュレーションではなく、流体近似法を用いたパケット流量をもとにしたシミュレーションを行い、シミュレーションの実行時間の短縮を目指している。実際に、ルータが単一のトポロジを対象としたシミュレーションでは、実行時間がパケット単位のシミュレーションの約 1/2000 となることが示されている [16]。しかし、ルータの個数が多くなるにつれて実行時間が長くなってしまうという問題も指摘されている。例えば、ルータが 256 個の場合は、シミュレーションの実行時間が、パケット単位のシミュレーションの約 2 倍になってしまう [16]。

また、文献 [17] では、流体近似モデルを用いた大規模ネットワークの性能評価手法が提案されている。文献 [9] で提案されている流体近似モデルを拡張し、TCP の輻輳制御機構とアクティブキュー管理機構がモデル化されている。また、各 TCP コネクションがルータをどの順番で通過するかを明示的にモデル化することにより、パケットの最大転送レートがルータの処理

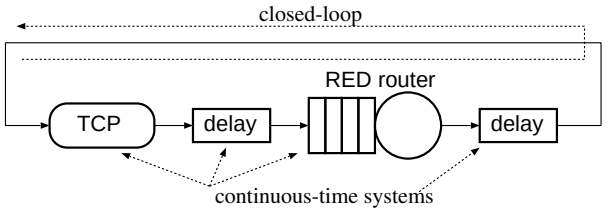

図 1　連続時間システムの多段接続によりネットワーク全体をモデル化
Fig. 1　Modeling entire network by interconnecting continuous-time systems

能力によって抑えられる効果もモデル化されている。

さらに、微分方程式を反復計算によって数値的に解くことにより、平衡点における TCP Reno のウィンドウサイズとルータのキュー長を導出している。この微分方程式の反復計算が、近似的にシミュレーションとみなせると述べている。そして、パケット単位のシミュレーションと比較して、シミュレーションに要する時間は、1/10–1/2000 と非常に短いことが示されている [17]。この論文では、まったく同じ経路を通過する複数の TCP コネクションを 1 つのクラスとして集約することにより、数値計算の高速化を狙っている。また、数値計算に要する時間は、あるトポロジに着目したとき、TCP のクラスの個数に比例することが示されている。ただし、比較的規模の大きなネットワークをシミュレーションした場合の提案手法の精度については議論されていない。この論文で提案されている手法は、ns-2 に流体近似モデルを組み込んだ実装として公開されている [18]。ただし、TCP の輻輳制御機構がモデル化されていない、RED ルータの制御パラメータが独立に設定できないなど、制約が多いものである。

3　流体近似法を用いた各ネットワーク構成要素のモデル化

本章では、我々が提案する解析手法を説明する。本稿で提案する解析手法では、文献 [1] で提案されている解析モデルを拡張して用いる。具体的には、ネットワークの構成要素 (TCP の輻輳制御機構、ルータのバッファ、リンクの伝搬遅延) を、流体近似法により、それぞれ独立の連続時間システムとしてモデル化する。

本稿では、簡単のため、TCP の輻輳制御機構として TCP Reno のみを対象とし、TCP Reno のウィンドウサイズの変化を流体近似法によりモデル化する。ただし、文献 [1] と同様の手法により、TCP Vegas への拡張も可能である。以降では、特に断りのない限り、TCP Reno のことを単に TCP と表記する。

次にルータのバッファのモデル化であるが、本稿では、簡単のため、アクティブキュー管理ルータである RED のみを対象とする。RED ルータの現在キュー長 (バッファ内パケット数)、平均キュー長、パケット棄却率の変化を流体近似法によりモデル化する。

最後に、リンクの伝搬遅延は、単なる信号の遅延要素としてモデル化する。以上に述べた、それぞれの連続時間システムを多段接続することで、閉ループ型のネットワーク全体をモデル化する (図 1)。

文献 [1] で提案されているモデルは、TCP のモデルと RED のモデルの入出力がそれぞれ異なる。具体的には、TCP のモデルは、RED ルータにおけるパケット棄却率を入力とし、TCP からのパケット転送レートを出力としている。一方、RED のモデルは、TCP からのパケット転送レートを入力とし、ルータにおけるパケット棄却率を出力としている。これに対し、本稿で提案する解析手法では、各モデルの入出力を、すべてパケット転送レートに統一する。

以降では、TCP の輻輳制御機構、RED ルータのバッファ、リンクの伝搬遅延のモデルについて説明する。以降の説明で用いる記号 (定数および変数) の定義を表 1 に示す。

表 1　記号 (定数と変数) の定義
Table 1　Definition of symbols (constants and variables)

R	TCP のラウンドトリップ時間
c	RED ルータの処理能力
min_{th}	RED ルータの最小しきい値
max_{th}	RED ルータの最大しきい値
max_p	RED ルータの最大パケット棄却率
α	RED ルータの指数平均の重み
$x(t)$	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
$b(t)$	RED ルータの現在キュー長
$r(t)$	RED ルータの平均キュー長
$p(t)$	RED ルータのパケット棄却率

3.1　TCP の輻輳制御機構のモデル化

本節では、TCP の輻輳制御機構を、入力 $x(t)$ が ACK パケットの到着レート、出力 $y(t)$ がデータパケットの転送レートである、連続時間システムとしてモデル化する。

文献 [1, 13, 17] では、流体近似法により、TCP のウィンドウサイズの変化が次式のようにモデル化されている。

$$\dot{w} = (1 - q(t))\frac{w(t-R)}{w(t)R} - q(t)\frac{2w(t)w(t-R)}{3R} \qquad (1)$$

ここで、$q(t)$ はネットワーク中でのパケット棄却率、R は TCP コネクションのラウンドトリップ時間である。

式 (1) の右辺第 1 項は、ネットワーク中でパケット棄却が発生しなければ、TCP は 1 ラウンドトリップ時間ごとにウィンドウサイズを 1 パケット分増加させることをモデル化している。右辺第 2 項は、ネットワーク中でパケット棄却が発生すれば、TCP はウィンドウサイズを半減させることをモデル化している。

TCP は、ネットワーク中でパケット棄却が発生しなければ、ACK パケットの到着レートは 1 ラウンドトリップ時間だけ前のパケット転送レートに等しくなる。従って、ネットワーク中でのパケット棄却率を $q(t)$ とすると、TCP が受信する ACK パケットの到着レート $x(t)$ との間に、$x(t) = (1 - q(t))y(t - R)$ が成立する。このため、式 (1) で与えられる TCP の輻輳制御機構のモデルは、入出力をパケット転送レートに統一すると、次式のように書ける。

$$\dot{y} = \frac{x(t)}{y(t)R^2} - (y(t-R) - x(t))\frac{2y(t)}{3} \qquad (2)$$

本稿で提案する TCP のモデルでは、以下のような仮定を置いている。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。なお、バースト的な TCP トラヒックは、文献 [21] のような手法を用いてモデル化が可能である。また、同様の手法により、固定レートで転送される UDP トラヒックのモデル化も可能である。次に、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。TCP のラウンドトリップ時間は、往復伝播遅延とルータにおけるキューイング遅延の和で与えられる。このため実際には、ルータの現在キュー長が変動すれば、それに応じてルータにおけるキューイング遅延も変動することになる。最後に、本稿の解析モデルでは、簡単のため TCP の輻輳回避フェーズのみをモデル化している。つまり、TCP のスロースタートフェーズ、タイムアウト機構、SACK オプションなどをモデル化していない。ただし、これらについては、文献 [17] で提案されているモデル化手法が利用できると考えられる。

以上で説明した、TCP の輻輳制御機構のモデルをブロック図で表記すると図 2 のようになる。

3.2　RED ルータのモデル化

本節では、RED ルータを、入力 $x(t)$ がパケット到着レート、

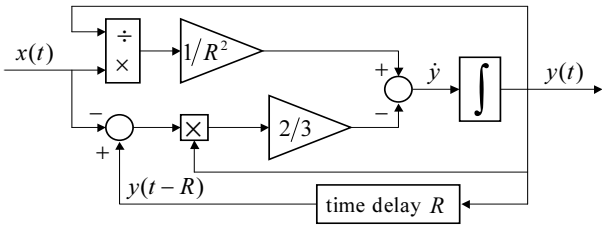

図 2　ブロック図によって表記した TCP の輻輳制御機構のモデル
Fig. 2　A block diagram for congestion control mechanism of TCP

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。

実際のネットワークでは、RED ルータは複数の入出力リンクと接続されている場合が多い。RED ルータが複数の入力リンクを持つ場合は、各入力リンクからのパケット転送レートの和を $x(t)$ とする。一方、RED ルータが複数の出力リンクを持つ場合は、出力 $y(t)$ を複数の出力リンクに分配する。このような、フローの合流および分配については、3.4 節で詳しく述べる。

RED ルータのモデルの出力 $y(t)$ は次式で与えられる。

$$y(t) \;=\; \min(c, (1-p(t))\,x(t)) \tag{3}$$

ここで、$p(t)$ は RED ルータにおけるパケット棄却率である。RED ルータへのパケット到着レートが $x(t)$ であるため、RED ルータを通過する (RED ルータから出力される) パケット転送レートは $(1-p(t))\,x(t)$ となる。さらに、RED ルータからのパケット転送レートの上限は、RED ルータの処理能力によって決まるため、$y(t)$ の最大値は RED ルータの処理能力 c となる。

RED の現在キュー長 $b(t)$、平均キュー長 $r(t)$、パケット棄却率 $p_b(t)$ の変化は次式で与えられる [1, 17]。

$$\dot{b} \;=\; \begin{cases} x(t)-c & \text{if } \; b(t) > 0 \\ (x(t)-c)^+ & \text{if } \; b(t) = 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$\dot{r} \;=\; -\alpha\, c(r(t) - b(t)) \tag{5}$$

$$p(t) \;=\; \frac{2p_b(t)}{1+p_b(t)} \tag{6}$$

$$p_b(t) \;=\; \begin{cases} 0 & \text{if } \; r(t) < min_{th} \\ \dfrac{max_p}{max_{th}-min_{th}}(r(t)-min_{th}) & \text{if } \; min_{th} \leqq r(t) < max_{th} \\ \dfrac{1-max_p}{max_{th}} r(t) - (1-2max_p) & \text{if } \; max_{th} \leqq r(t) < 2max_{th} \\ 1 & \text{if } \; r(t) \geqq 2max_{th} \end{cases} \tag{7}$$

ここで、$(x)^+ \equiv \max(x, 0)$ である。

式 (4) は、RED ルータの現在キュー長の変化を表している。ここで、$x(t)$ は RED ルータへのパケット到着レート、c は RED ルータの処理能力である。RED ルータの現在キュー長の変化量 $\dot{b}$ は、RED ルータの処理能力を超えたパケット量で与えられる。

式 (5) は、RED ルータの平均キュー長の変化を表している。RED ルータの平均キュー長は、パケット到着ごとに移動指数平均を用いて計算されている [22]。ここで、α は移動指数平均の重みである。このため、平均キュー長の変化量 $\dot{r}$ は、現在キュー長 $b(t)$ と平均キュー長 $r(t)$ の差に、移動指数平均の重み α および RED ルータの処理能力 c (パケットの到着レート $x(t)$ を近似している) を乗じた値で与えられる。

式 (6) は平均キュー長 $r(t)$ から求まるパケットマーキング確率が $p_b(t)$ の場合、RED ルータは $2p_b(t)/(1+p_b(t))$ の確率でパケットを棄却することを意味している [22]。

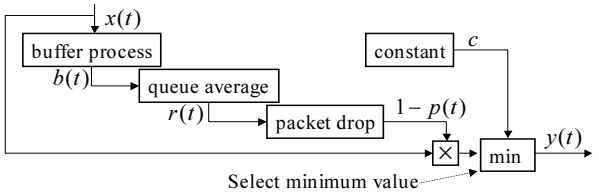

図 3　ブロック図によって表記した RED ルータのモデル
Fig. 3　A block diagram for RED router

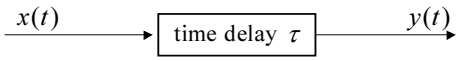

図 4　ブロック図によって表記した リンクの伝搬遅延のモデル
Fig. 4　A block diagram for link propagation delay

式 (7) は、RED ルータが、平均キュー長 $r(t)$ から計算する、パケットマーキング確率 $p_b(t)$ を表している。RED ルータのパケットマーキング確率 $p_b(t)$ は、平均キュー長 $r(t)$ および 3 種類の制御パラメータ (min_{th}、max_{th}、max_p) によって決定される。また、ここでは、GRED (Gentle RED) [23] をモデル化している。

提案する解析手法では、RED ルータを通過するごとに、パケット転送レートがパケット棄却率に応じて減少する。このモデル化は、文献 [1, 9] で提案されているモデル化手法よりも厳密なものである。例えば、2 つの RED ルータが接続されている場合を考える。この時、後段の RED ルータへの入力 (パケット到着レート) は、前段の RED ルータからの出力 (パケット転送レート) によって抑えられる。本稿で提案する解析手法では、このような現象をモデル化できる。

以上で説明した、RED ルータのモデルをブロック図で表記すると、図 3 のようになる。

3.3　リンクの伝搬遅延のモデル化

次に、リンクへ入力されるパケット転送レートを $x(t)$、リンクから出力されるパケット転送レートを $y(t)$ として、リンクの伝搬遅延をモデル化する。

リンクの伝播遅延を τ とすれば、リンクに入力された $x(t)$ は τ だけ遅れて $y(t)$ として出力される。このため、リンクにおいてパケット棄却が発生しないと仮定すれば、$x(t)$ と $y(t)$ との間に次式が成立する。

$$y(t) \;=\; x(t-\tau) \tag{8}$$

以上で説明した、リンクの伝搬遅延のモデルをブロック図で表記すると、図 4 のようになる。

3.4　ネットワーク全体のモデル化

次に、ネットワーク全体のモデル化について述べる。本稿で提案する解析手法では、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接続することで、ネットワーク全体をモデル化する。各モデルを接続できるのは、モデルの入出力をすべてパケット転送レートで統一しているためである。

このようにしてモデル化を行ったネットワーク全体のモデルは、ネットワーク中のパケットの流れを表現している。さらに、TCP のフィードバックループ (受信側ホストから送信側ホストへの ACK パケットの流れ) も、RED ルータのモデルの出力を (必要ならばリンクのモデルを間に挟んで) TCP のモデルへの入力とすることで表現できる (図 1)。ただし、TCP の ACK パケットについては、以下の仮定を置いている。ACK パケットは、データパケットに比べてサイズが小さいため、ACK パケットが通過する経路では輻輳が発生しない。つまり、ACK パケットが通過するルータにおいて、パケットのキューイング遅延は発生しないことを仮定している。

次に、3.2 節で簡単に説明した、RED に複数のリンクが接続

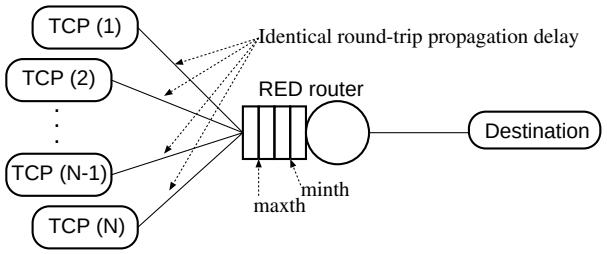

図 5　数値例で用いるネットワークモデル (単一の RED ルータを伝搬遅延の等しい複数の TCP コネクションが共有している場合)
Fig. 5　Network model for numerical examples

表 2　数値例で用いるパラメータ設定
Table 2　Parameter setting

c	1 [packet/ms]
min_{th}	50 [packet]
max_{th}	200 [packet]
max_p	0.1
α	0.02

している場合について詳しく説明する。まず、RED ルータ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合流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。つまり、それぞれのフローの転送レートを $x_i(t)$ $(1 \leqq i \leqq N)$、転送レートの和を $y(t)$ とすると、次式が成立する。

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N} x_i(t) \tag{9}$$

これは、モデルの入出力を、すべてパケット転送レートに統一しているため可能となる。

RED ルータが複数の出力リンクを持つ場合は、RED ルータ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 個のパケット転送レートを N 個に分配することにより記述できる。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、次式が成立する。

$$y_i(t) = f_i(t)\, x(t) \tag{10}$$

これは、フローの合流と同様に、モデルの入出力をすべてパケット転送レートに統一しているため可能となる。フローの分配比率 $f(t)$ は、RED ルータの上流で合流したフローのパケット転送レートの比によって決定される。なお、平衡点 (定常状態においてすべての連続システムが安定した状態) では、フローの分配比率 $f(t)$ は TCP のパケット転送レートの比と等しくなる。

4　数値例およびシミュレーション

本章では、提案する解析手法の簡単な数値例を示す。また、ns-2 シミュレータによるシミュレーション結果と、提案する解析手法を用いた解析結果を比較することにより、提案する解析手法の妥当性を検証する。シミュレーション結果との比較において、TCP のウィンドウサイズの変動、RED ルータの現在キュー長の変動、RED ルータの平均キュー長の変動、RED ルータにおけるパケット棄却率の変動、の 4 つを比較対象とする。

検証に用いるネットワークモデルは、単一の RED ルータを、伝搬遅延の等しい 20 本の TCP コネクションが共有しているという単純な場合 (図 5) である。以下の数値例で用いるパラメータ設定を、表 2 に示す。

まず、3 章で説明した TCP の輻輳制御機構、RED ルータのバッファ、リンクの伝搬遅延の連続時間モデルを、制御系

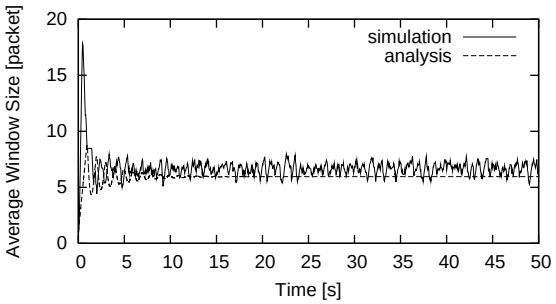

図 6　TCP コネクションのウィンドウサイズの平均値
Fig. 6　Average window size of all TCP connections

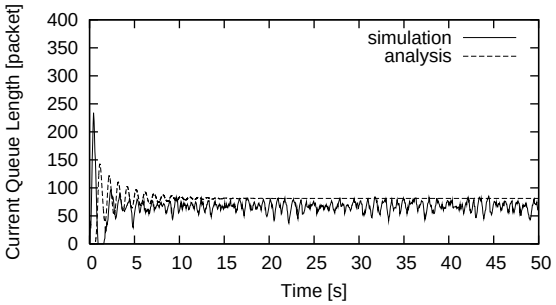

図 7　RED ルータの現在キュー長
Fig. 7　Current queue length of RED router

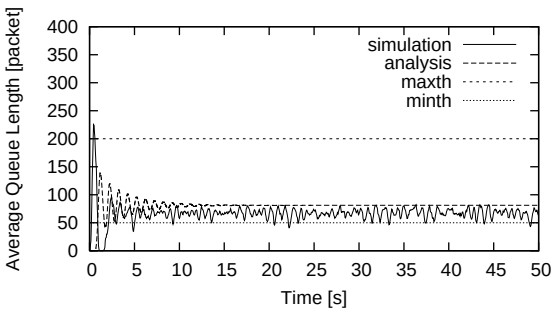

図 8　RED ルータの平均キュー長
Fig. 8　Average queue length of RED router

CAD ツールである MATLAB/Simulink [24] を用いて記述した。MATLAB/Simulink で記述した連続時間モデルに対して、数値シミュレーション行うことにより、TCP のウィンドウサイズの変動などを求めた。

さらに、図 5 と同じネットワークモデルに対して、ns-2 (バージョン 2.26) を用いてシミュレーションを実行した。シミュレーション時間は 50 [s]、RED ルータのバッファサイズは 400 [packet]、また、すべてのデータパケットのサイズは等しく 1000 [byte] とした。その他のパラメータについては、表 2 の値を用いた。また、シミュレーションではラウンドトリップ時間の平均値が 119 [ms] であったため、解析で用いるパラメータ R にはこの値を与えた。

解析結果およびシミュレーション結果を図 6–図 9 に示す。図 6 は、TCP コネクションにおけるウィンドウサイズの平均値の時間的変動を示している。さらに、図 7–図 9 は、それぞれ RED ルータの現在キュー長、平均キュー長、パケット棄却率の時間的変動を示している。

まず、TCP コネクションのウィンドウサイズの平均値 (図 6) に着目すると、解析結果とシミュレーション結果で、平衡点の値がほぼ一致していることが分かる。図 6 において、シミュレーションにおける TCP のウィンドウサイズは振動的に変化しているが、解析結果は一定値に収束している。これは、解析モ

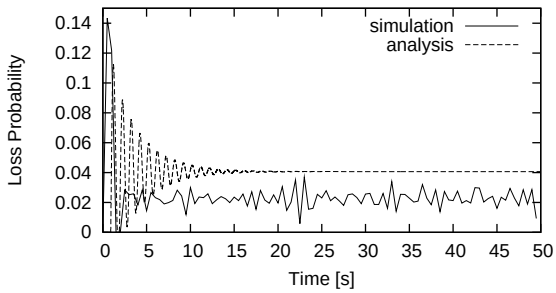

図 9　RED ルータのパケット棄却率
Fig. 9　Packet loss probability of RED router

デルにおけるウィンドウサイズが、ウィンドウサイズの値そのものではなく、ウィンドウサイズの期待値を表しているためである。

また、RED ルータの現在キュー長 (図 7)、RED ルータの平均キュー長 (図 8)、RED ルータのパケット棄却率 (図 9) に着目すると、解析結果がシミュレーション結果よりも、やや大きな値となっている。今後、RED ルータの現在キュー長、平均キュー長、パケット棄却率について、解析モデルの精度を高めるよう修正を行う予定である。

5　まとめと今後の課題

本稿では、文献 [1] で提案されている解析モデルを拡張することにより、複数のフィードバックループが存在する閉ループ型のネットワークの解析手法を提案した。まず、ネットワークの構成要素 (TCP の輻輳制御機構、RED ルータのバッファ、リンクの伝搬遅延) を、流体近似モデルを用いて、それぞれ独立の連続時間システムとしてモデル化した。次に、それぞれの連続時間システムを多段接続することで、閉ループ型のネットワーク全体をモデル化した。さらに、提案する解析手法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。

本稿で示した定常状態解析の結果を見ると、RED ルータの現在キュー長、平均キュー長、パケット棄却率については、解析結果がシミュレーション結果よりもやや大きな値となっていた。よって、解析モデルの精度を高めるよう修正を行う予定である。

また、本稿で提案した解析手法では、ネットワークの各構成要素を連続時間システムでモデル化し、これらを多段接続することによりネットワーク全体のモデルを得た。このモデルに対して、制御系 CAD ツールや制御理論を用いることにより、さまざまな性能評価が可能であると考えられる。

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、TCP のウィンドウサイズや RED 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。そこで、今後はこのようなさまざまな解析を行う予定である。

謝　　辞

本稿で提案した解析手法に対し、有意義な議論をしていただいた、大阪大学サイバーメディアセンター教授の村田正幸氏に感謝いたします。

文　　献

[1] S. H. Low, "A duality model of TCP flow controls," in *Proceedings of ITC Specialist Seminar on IP Traffic Measurement, Modeling and Management*, Sept. 2000.

[2] 総務省, "インターネット利用人口の推移." available at http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/field/gt7001.xls.

[3] "Hobbes' Internet timeline v6.1." available at http://www.zakon.org/robert/internet/timeline/.

[4] Large Scale Networking (LSN) Coordinating Group Of the Interagency Working Group (IWG) for Information Technology Research and Development (IT R&D), *Workshop on New Visions for Large-Scale Networks: Research and Applications*, Mar. 2001. available at http://www.nitrd.gov/iwg/lsn/lsn-workshop-12mar01/index.html.

[5] V. Jacobson and M. J. Karels, "Congestion avoidance and control," in *Proceedings of SIGCOMM '88*, pp. 314–329, Nov. 1988.

[6] D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1987.

[7] "Tips and statistical data for running large simulation in NS." available at http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-largesim.html.

[8] S. Floyd and V. Paxson, "Difficulties in simulating the Internet," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 9, pp. 392–403, Feb. 2001.

[9] 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.

[10] C. Hollot, V. Misra, D. Towsley, and W.-B. Gong, "On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2001*, pp. 1726–1734, Apr. 2001.

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

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

[13] S. Athuraliya and S. H. Low, "An emprical validation of a duality model of TCP and queue management algorithms," in *Proceedings of Winter Simulation Conference*, pp. 1269–1274, Dec. 2001.

[14] H. Hisamatu, H. Ohsaki, and M. Murata, "On modeling feedback congestion control mechanism of TCP using fluid flow approximation and queueing theory," in *4th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT2001)*, pp. 218–222, Aug. 2001.

[15] H. Hisamatu, H. Ohsaki, and M. Murata, "Steady state and transient behavior analyses of TCP connections considering interactions between TCP connections and network," in *Proceedings of International Symposium on Applications and the Internet (SAINT-2003)*, pp. 309–316, Jan. 2003.

[16] D. Nicol, M. Goldsby, and M. Johnson, "Fluid-based simulation of communication network using SSF," in *Proceedings of the 1999 European Simulation Symposium*, Oct. 1999.

[17] Y. Liu, F. L. Presti, V. Misra, D. Towsley, and Y. Gu, "Fluid models and solutions for large-IP networks," in *Proceedings of ACM/SIGMETRICS 2003*, pp. 91–101, June 2003.

[18] "Simulating large networks using fluid flow models (FFM)." available at http://www-net.cs.umass.edu/fluid/fluid.html.

[19] "SSFnet." available at http://www.ssfnet.org/.

[20] "The network simulator – ns-2." available at http://www.isi.edu/nsnam/ns/.

[21] M. Kisimoto, H. Ohsaki, and M. Murata, "On transient behavior analysis of random early detection gateway using a control theoretic approach," in *Proceedings of the IEEE Control Systems Society Conference on Control Applications (CCA/CACSD 2002)*, pp. 1144–1149, Sept. 2002.

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

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

[24] "MATLAB/Simulink." http://www.mathworks.com/.