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.

異種のフローが混在するネットワークに対応したフローレベルシミュレータの設計と実装

西岡　孟朗† 　作元　雄輔† 　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: †{t-nisiok,y-sakumt,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　本稿では、現在広く用いられている TCP や、ルータ支援型の輻輳制御である XCP、輻輳制御を行わない UDP のような、異種のフローが混在するネットワークに対応したフローレベルシミュレータ FSIM+ (Fluid-based network SIMulator plus) の設計と実装について述べる。近年、パケットレベルシミュレータよりも圧倒的に高速なシミュレーションが可能な、フローレベルシミュレータが注目を浴びている。ただし、既存のフローレベルシミュレータは、データ転送を連続的に行うような TCP フロー (持続的 TCP フロー) のシミュレーションにしか対応していない。そこで本稿では、非持続的な TCP フローの流体近似モデル、XCP フローの流体近似モデル、UDP フローの流体近似モデルを利用することにより、異種のフローが混在するネットワークに対応したフローレベルシミュレータ FSIM+ を構築する。さらに、実装したフローレベルシミュレータ FSIM+ を用いた実験により、その有効性を定量的に評価する。その結果、フローレベルシミュレータ FSIM+ は、パケットレベルシミュレータ ns2 と比較して、(1) シミュレーション結果の誤差は 10% 以下であること、(2) シミュレーション速度は 10 倍以上高速であること、(3) 消費メモリ量は 10% 以下であること、などを示す。
キーワード　大規模ネットワーク、ネットワークシミュレータ、フローレベルシミュレーション、流体近似モデル

Design and Implementation of Flow-Level Simulator for a Network with Heterogeneous Flows

Takeaki NISHIOKA†, Yusuke SAKUMOTO†, Hiroyuki OHSAKI†, and Makoto IMASE†

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

Abstract　In this paper, we present design and implementation of a flow-level simulator *FSIM+ (Fluid-based network SIMulator plus)* for a network with heterogeneous flows transferred with different transport protocols: TCP, XCP, and UDP. In recent years, flow-level simulators, which can perform significantly faster simulation than packet-level simulators, have been receiving attention. However, existing flow-level simulators can only simulate persistent TCP flows. In this paper, by utilizing fluid models of a short-lived TCP flow, an XCP flow, and a UDP flow, a flow-level simulator FSIM+ for a network with heterogeneous flows is designed. Through several experiments using our FSIM+ implementation, we evaluate its effectiveness quantitatively. Our findings include that, as compared with the packet-level simulator ns2, our FSIM+ implementation achieves (1) less than 10% simulation errors, (2) more than 10 times faster simulation, and (3) less than 10% memory consumption.
Key words　Large Scale Network, Network Simulator, Flow-Level Simulation, Fluid Model

1 はじめに

近年のインターネット技術の爆発的な普及により、ネットワークに接続されるノード数や利用者数が指数関数的に増加し、インターネットの大規模化が急速に進んでいる。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、2004 年 1 月の時点で約 2 億 3000 万台であったのに対して、4 年後の 2008 年の時点で約 5 億 5000 万台と、わずか 4 年間で約 2.5 倍に増加している [1]。このようなネットワークの大規模化により、ネットワーク全体の挙動を理解することがさらに困難になってきている。このため、大規模ネットワークの性能評価手法に対する要求が高まっている [2]。

従来、大規模ネットワークの性能評価は技術的に困難であったが、近年、パケットレベルシミュレータよりも圧倒的に高速なシミュレーションが可能な、フローレベルシミュレータ [3,4] が注目を浴びている。

パケットレベルシミュレータは、ネットワークの挙動をパケット単位で模擬する。このため、ネットワークの速度・規模が大きくなるにつれ、パケットレベルシミュレータが模擬するパケット数が増加し、シミュレーションに必要な計算量・メモリ量が共に増加してしまう。このため、パケットレベルシミュレータを用いて、大規模ネットワークのシミュレーションを行うこと

は容易ではない [5]。

一方、フローレベルシミュレータは、ネットワークの挙動をパケットの流れ (フロー) 単位で模擬する [6]。このため、フローレベルシミュレータは、転送されるパケット数が膨大となるような、大規模なネットワークのシミュレーションも、実用的な速度・メモリ量で実行できることが期待されている [3]。

ただし、フローレベルシミュレータはいまだ発展途上の段階にある。例えば、既存のフローレベルシミュレータ [3, 7] は、データ転送を連続的に行うような TCP フロー (持続的 TCP フロー) のシミュレーションにしか対応していない。しかし、より現実的なネットワークの性能評価を行うためには、多様なトラヒックが混在するネットワークのシミュレーションが不可欠である。

そこで本稿では、非持続的な TCP フローの流体近似モデル [8] や、XCP フローの流体近似モデル [9]、UDP フローの流体近似モデル [10] を利用することにより、異種のフローが混在するネットワークに対応したフローレベルシミュレータ FSIM+ (Fluid-based network SIMulator plus) を構築する。本稿では、TCP とは本質的に異なるタイプのトランスポート層プロトコルである、ルータ支援型の輻輳制御を行う XCP および輻輳制御を行わない UDP のフローレベルシミュレーションを実現する。これにより、異種のフローが混在するネットワークのシミュレーションを、実用的な速度・メモリ量で実行することを可能とする。

さらに、実装したフローレベルシミュレータ FSIM+ を用いた実験により、その有効性を定量的に評価する。その結果、フローレベルシミュレータ FSIM+ は、パケットレベルシミュレータ ns2 [11] と比較して、(1) シミュレーション結果の誤差は 10% 以下であること、(2) シミュレーション速度は 10 倍以上高速であること、(3) 消費メモリ量は 10% 以下であること、などを示す。

本稿の構成は以下の通りである。2 章では、関連研究を紹介する。3 章では、フローレベルシミュレータ FSIM+ の概要およびフローレベルシミュレータ FSIM+ が利用する流体近似モデルを説明する。さらに、実装したフローレベルシミュレータ FSIM+ について述べる。4 章において、実装したフローレベルシミュレータ FSIM+ を用いた実験により、そ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

大規模ネットワークのシミュレーションを目指すアプローチは、(1) シミュレーションエンジンの高速化 (イベントリストの改良 [12] ・並列化シミュレーション [13, 14])、(2) シミュレーションモデルの簡単化 (フローレベルシミュレーション [3, 4] ・ハイブリッドシミュレーション [5]) の二つに大きく分類される。

シミュレーションエンジン自体の高速化は重要な技術であるが、近年のネットワークの急速な大規模化に対応するためには、パケットレベルシミュレータには限界がある。このため、フローレベルシミュレータのような、シミュレーションモデルの簡単化が不可欠である。

文献 [12] では、イベントリストを改良し、イベントの取得・格納に必要な計算量を削減することにより、シミュレーションエンジンの高速化を実現している。また、文献 [13, 14] では、分散計算機環境上で並列にシミュレーションを実行することにより、シミュレーションエンジンの高速化を実現している。しかし、これらの高速化手法を用いても、パケットレベルシミュレータである限り、パケット単位の挙動を模擬していることに変わりはない。このため、ネットワークの大規模化による計算量の増加を防ぐことはできない。

フローレベルシミュレータは、流体近似法によるネットワークのモデル化手法の成果である。TCP/RED の流体近似モデルを用いたシミュレーションを行う FFM (Fluid Flow Model) [7] や、数値計算アルゴリズムの高速化により FFM よりも高速なシミュレーションが可能な FSIM (Fluid-based network SIMulator) [3] が存在する。しかし、これらのフローレベルシミュレータは、持続的な TCP フローおよび RED ルータのみが存在するネットワークのシミュレーションにしか対応していない。

フローレベルシミュレータが基礎としている、流体近似法によるネットワークのモデル化手法に関しては、近年研究が活発に行われている。例えば、非持続的な TCP フローのモデル化 [8] や、輻輳制御を行わない UDP のモデル化 [10]、ルータ支援型の輻輳制御である XCP のモデル化 [9] が行われている。

本稿では、これらの研究成果である流体近似モデルをフローレベルシミュレータに統合することにより、異種のフローが混在するネットワークに対応したフローレベルシミュレータを実現する。

3 FSIM+ (Fluid-based network SIMulator plus)

3.1 概　　要

フローレベルシミュレータ FSIM+ (Fluid-based network SIMulator plus) は、既存のフローレベルシミュレータ FSIM [3] を拡張したものである。TCP バージョン Reno、XCP、UDP の 3 種類のトランスポート層プロトコルをサポートする。また、持続的なフローだけでなく、非持続的なフローのシミュレーションをもサポートする。

フローレベルシミュレータ FSIM+ は、非持続的な TCP フローの流体近似モデル [8]、XCP フローの流体近似モデル [9]、UDP フローの流体近似モデル [15] を利用する。これらの流体近似モデルは、それぞれ独立に構築されたものであるため、モデルの入出力がそれぞれ異なる。このため、これらの流体近似モデルの入出力を、パケット転送レートに統一することにより、流体近似モデルの相互接続を実現する。

以下、フローレベルシミュレータ FSIM+ が利用する流体近似モデルを説明する。本稿で用いる記号の定義を表 1 に示す。

3.2 TCP の流体近似モデル

TCP の流体近似モデルとして文献 [8] のモデルを用いる。このモデルでは、モデルへの入力がネットワーク中でのパケット棄却率、モデルからの出力が TCP のウィンドウサイズであるため、入出力をともにパケット転送レートに統一する。

表 1　記号 (変数および定数) の定義

	全モデル共通
$x(t)$	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)
	全フロー共通
$D(t)$	転送済みデータ量
R	ラウンドトリップ時間
$p_{TO}(t)$	タイムアウト発生率
	TCP フロー
$T(t)$	スロースタートフェーズのしきい値
	UDP フロー
$u(t)$	パケット転送レート
	ルータ共通
C	処理速度
$A(t)$	パケット到着レート
$p(t)$	パケット廃棄率
$q(t)$	バッファ内パケット数
L	バッファサイズ
	XCP ルータ
α, β, γ	制御パラメータ
$f(t)$	フィードバック値
$r(t)$	XCP フローのパケット転送レート
$\phi(t)$	集約フィードバック値
$h(t)$	シャッフルトラヒック
N	通過する XCP フロー数
$\overline{R}$	XCP フローの平均ラウンドトリップ時間

$$\dot{y}(t) = \begin{cases} \dfrac{x(t)}{R} - \dfrac{2}{3}y(t)\left(y(t-R)-x(t)\right)\left(1-p_{TO}(t)\right) \\ -\left(\dfrac{4}{3}y(t)-\dfrac{1}{R}\right)\left(y(t-R)-x(t)\right)p_{TO}(t) \\ \qquad\qquad \text{if } y(t) < T(t) \\ \dfrac{x(t)}{y(t)R^2} - \dfrac{2}{3}y(t)\left(y(t-R)-x(t)\right)\left(1-p_{TO}(t)\right) \\ -\left(\dfrac{4}{3}y(t)-\dfrac{1}{R}\right)\left(y(t-R)-x(t)\right)p_{TO}(t) \\ \qquad\qquad \text{otherwise} \end{cases} \tag{1}$$

ここで、$p_{TO}(t)$ は TCP がタイムアウトによってパケット棄却を検出する確率であり、$p_{TO}(t) \simeq min(1, 3/w(t))$ で与えられる [16]。$T(t)$ は、スロースタートフェーズのしきい値であり、次式で定義される。

$$\dot{T}(t) = \left(\frac{y(t)}{2} - T(t)\right)\left(y(t-R)-x(t)\right) \tag{2}$$

なお、非持続的な TCP フローは、一定量のデータを転送した時点で、TCP フローの転送レートを 0 とすることにより実現する。時刻 t_0 に転送を開始した非持続的 TCP フローの転送済みデータ量 $D(t)$ は次式で与えられる。

$$D(t) = \int_{t_0}^{t} x(u)du \tag{3}$$

3.3　XCP の流体近似モデル

XCP の流体近似モデルとして文献 [9] のモデルを用いる。このモデルでは、モデルへの入力がパケット転送レートおよびフィードバック値、モデルからの出力がパケット転送レートである。

$$\dot{y}(t) = f(t) - \frac{2}{3}y(t)\left(y(t-R)-x(t)\right)\left(1-p_{TO}(t)\right) - \left(\frac{4}{3}y(t)-\frac{1}{R}\right)\left(y(t-R)-x(t)\right)p_{TO}(t) \tag{4}$$

ここで $f(t)$ は、 XCP ルータによって計算されるフィードバック値であり、次式で定義される [9]。

$$f(t) = \frac{h(t) + (\phi(t))^+}{\overline{R}^2 N} - \frac{r(t)\left(h(t) + (-\phi(t))^+\right)}{\overline{R}^2 A(t)} \tag{5}$$

$$h(t) = \left(\gamma\,\overline{R}\,A(t) - |\phi(t)|\right)^+ \tag{6}$$

$$\phi(t) = \alpha\,\overline{R}\,(C - A(t)) - \beta\,q(t) \tag{7}$$

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} A(t) - C & \text{if } q(t) > 0 \\ (A(t)-C)^+ & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

ここで、$(x)^+ \equiv \max(x, 0)$ である。N は XCP ルータを通過する XCP フロー数、$\overline{R}$ はこれらの XCP フローの平均ラウンドトリップ時間である。

XCP ルータは DropTail ルータと同じ FIFO キューを用いているため、XCP ルータのパケット棄却率 $p(t)$ は、DropTail ルータの流体近似モデル [17] によって与えられる。

$$p(t) = \frac{\max(0, A(t) - C)}{A(t)} I_{q(t)=L} \tag{9}$$

ここで $I_{x=x_0}$ は $x = x_0$ の時に 1、それ以外の時は 0 の値を取る。

なお、非持続的な XCP フローは、非持続的な TCP フローと同じ方法によって実現する。

3.4　UDP の流体近似モデル

UDP の流体近似モデルとして文献 [10] のモデルを用いる。UDP は輻輳制御を行なわないため、UDP フローのパケット転送レートは単純に次式で決定される。

$$y(t) = u(t) \tag{10}$$

3.5　実　　装

既存のフローレベルシミュレータ FSIM を拡張することにより、異種のフローに対応したフローレベルシミュレータ FSIM+ を実装した。

フローレベルシミュレータ FSIM+ には、シミュレーションエンジンや、フロー、ルータ、リンクのオブジェクトが存在する。シミュレーションエンジンは、フローレベルシミュレーションの核となるオブジェクトであり、シミュレーションの初期化や、シミュレーション状態の更新、シミュレーション結果の出力を行う。フロー・ルータ・リンクは、ネットワークを構成するオブジェクトであり、シミュレーションエンジンからの指示により、自身の状態更新を行う。

これらのオブジェクトに対応した形で、3 種類の基本クラス (シミュレータクラス・ノードクラス・リンククラス) を設計した。TCP フロー、XCP フロー、UDP フロー、DropTail ルータ、

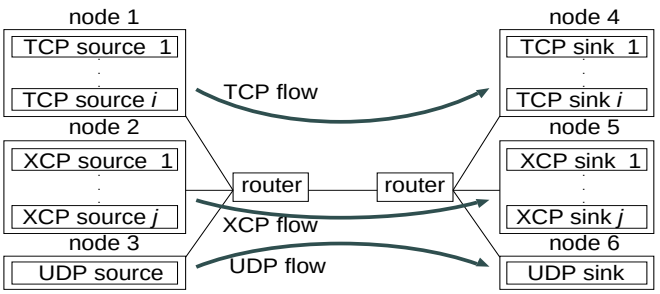

図 1: フローレベルシミュレータ FSIM+ と パケットレベルシミュレータ ns2 の性能比較に用いたネットワークトポロジ: シミュレーション精度・シミュレーション速度・消費メモリ量を計測する。

RED ルータ、XCP ルータは、ノードクラスの派生クラスとして実装した。また、リンクはリンククラスの派生クラスとして、シミュレーションエンジンはシミュレータクラスの派生クラスとして実装した。

以上のようなクラス構造を持たせたことにより、TCP、XCP、UDP 以外のトランスポート層プロトコルを、今後容易に組み込むことも可能である。

4 実　　験

4.1 実 験 環 境

本稿で構築したフローレベルシミュレータ FSIM+ の有効性を、シミュレーション精度・シミュレーション速度・消費メモリ量という 3 つの観点から調査する。

まずは、同一のネットワークのシミュレーションを行った時の FSIM+ と ns2 のシミュレーション結果を比較することにより、FSIM+ のシミュレーション精度を評価する。

次に、同一の計算機上で FSIM+ と ns2 を実行した時のシミュレーション実行時間および最大消費メモリ量を計測し、その結果を比較することで、FSIM+ のシミュレーション速度および消費メモリ量を評価する。

実装したフローレベルシミュレータ FSIM+ およびパケットレベルシミュレータである ns2 [11] (バージョン 2.28) を、それぞれ Debian GNU/Linux (sarge) (Linux カーネル 2.4.32) が稼働する計算機 (Xeon 3.06 [GHz] プロセッサ、3 [Gbyte] メモリ) 上で動作させ、その時のシミュレーション実行時間および最大消費メモリ量を計測した。

また、FSIM+ および ns2 では、ダンベル型のトポロジ (図 1) のシミュレーションを実行した。この時の、各フローの転送レートの時間的変動およびルータのバッファ内パケット数の変動を計測した。特に断りのない限り、表 2 に示すパラメータ設定を用いている。

4.2 シミュレーション精度

まず、フローレベルシミュレータ FSIM+ の精度を調査するために、異種のフローが混在するネットワークのシミュレーションを実行し、 FSIM+ および ns2 のシミュレーション結果を比較した。ここでは、 2 つのシミュレーションシナリオを用いた。1 つ目のシミュレーションシナリオでは、持続的な TCP フローおよび非持続的な TCP フローを混在させた。 2 つ目のシミュレーションシナリオでは、持続的な TCP フロー、非持続的な XCP フローおよび UDP フローを混在させた。

表 2　シミュレーションにおけるパラメータ設定

RED ルータの最小しきい値 min_{th}	50	[packet]
RED ルータの最大しきい値 max_{th}	200	[packet]
RED ルータの最大パケット棄却率 max_p	0.1	
RED ルータの指数平均の重み w_q	0.04	
XCP の制御パラメータ α	0.4	
XCP の制御パラメータ β	0.226	
XCP の制御パラメータ γ	0.1	
ボトルネックリンクの帯域	8	[Mbit/s]
リンクの伝搬遅延	10	[ms]

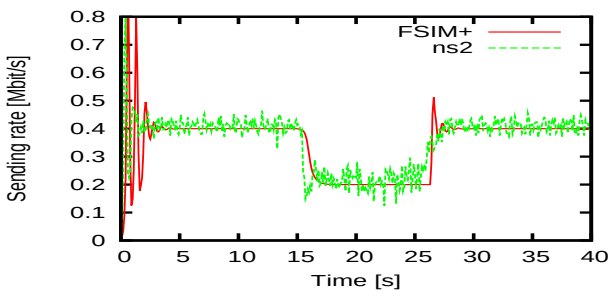

図 2: 非持続的な TCP フローおよび 持続的な TCP フローが混在する時の、持続的な TCP フローのパケット転送レート

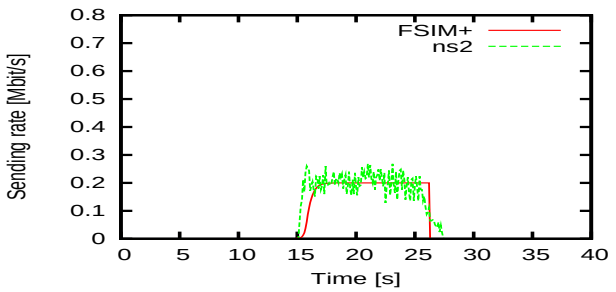

図 3: 非持続的な TCP フローおよび 持続的な TCP フローが混在する時の、非持続的な TCP フローのパケット転送レート

図 2 および図 3 に、 20 本の持続的な TCP フローと 20 本の非持続的な TCP フロー (転送データ量 250 [packet]) が混在するネットワークのシミュレーションにおける、持続的な TCP フローの転送レートの時間的変動を示す。また、図 4 に、 RED ルータのバッファ内パケット数の時間的変動を示す。ここでは、シミュレーション開始直後に持続的な TCP フローの転送を開始させ、シミュレーション開始 15 秒後に、非持続的な TCP フローの転送を開始させた。

図 5 から図 7 に、 20 本の非持続的な TCP フロー (転送データ量 800 [packet]) 、 20 本の非持続的な XCP フロー (転送データ量 600 [packet]) 、非持続的な UDP フロー (平均パケット転送レート 2 [Mbit/s]) が混在するネットワークのシミュレーションにおける、各フローの転送レートの時間的変動をそれぞれ示す。また、図 8 に、 XCP ルータの現在キュー長の時間的変動を示す。ここではシミュレーション開始直後に、非持続的な TCP フローの転送を開始させ、シミュレーション開始 15 秒後に、非

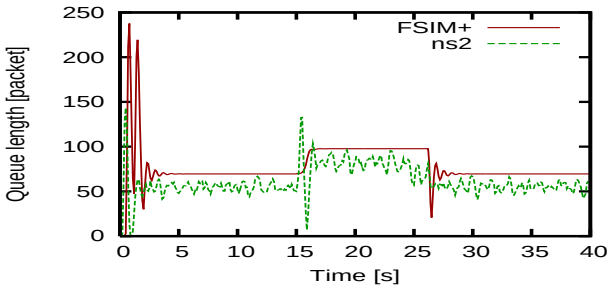

図 4: 非持続的な TCP フローおよび 持続的な TCP フローが混在する時の、RED ルータの現在キュー長

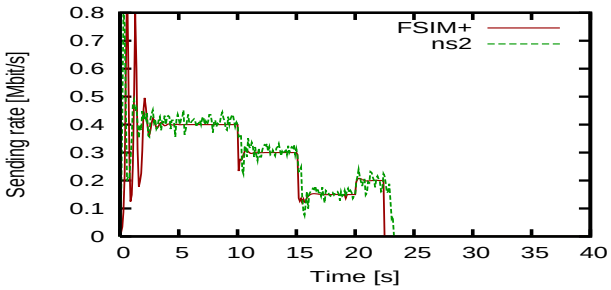

図 5: 非持続的な TCP フロー、非持続的な XCP フローおよび UDP フローが混在する時の、非持続的な TCP フローのパケット転送レート

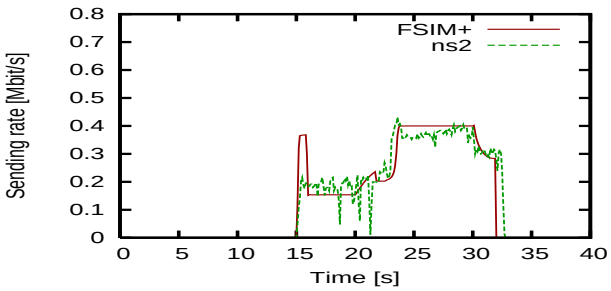

図 6: 非持続的な TCP フロー、非持続的な XCP フローおよび UDP フローが混在する時の、非持続的な XCP フローのパケット転送レート

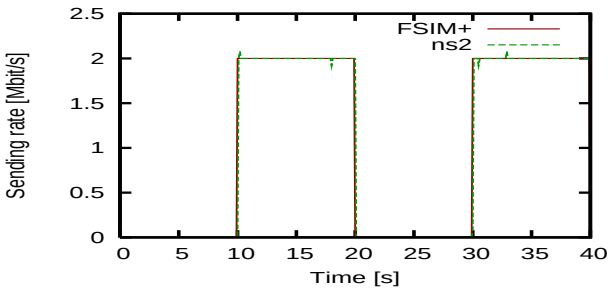

図 7: 非持続的な TCP フロー、非持続的な XCP フローおよび UDP フローが混在する時の、UDP フローのパケット転送レート

持続的な XCP フローの転送を開始させた。また、シミュレーション開始 10 秒後から 20 秒後および 30 秒後から 40 秒後にかけて UDP フローを発生させた。

これらの結果より、フローレベルシミュレータ FSIM+ における パケット転送レートの変動は、パケットレベルシミュレータ ns2 における パケット転送レートの変動とおおよそ一致しており、 FSIM+ により実用的な精度のシミュレーションが可能であることがわかる。 1 つ目のシミュレーションシナリオを用いた結果から、 FSIM+ および ns2 のシミュレーション結果のずれは 10% 以下であった。また、 2 つ目のシミュレーションシナリオを用いた結果から、 TCP 、 XCP および UDP のフローが混在する区間における、 FSIM+ と ns2 のそれぞれのフローのスループットを比較すると、シミュレーション結果のずれは 4% 以下であった。

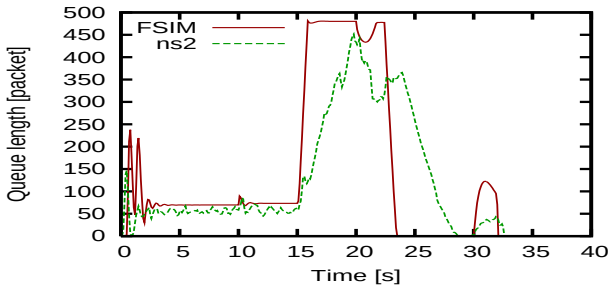

図 8: 非持続的な TCP フロー、非持続的な XCP フローおよび UDP フローが混在する時の、XCP ルータの現在キュー長

以上より、 TCP フロー、 XCP フローおよび UDP フローの混在するネットワークにおいて、フローレベルシミュレータ FSIM+ は、パケットレネルシミュレータ ns2 と比較して、 10% 以下の誤差でシミュレーションが可能であることがわかった。

4.3 シミュレーション速度

次に、 FSIM+ および ns2 のシミュレーション速度を比較するため、図 1 のトポロジにおける TCP フローを変化させながらシミュレーションを実行し、その時のシミュレーション実行時間を計測した。

図 9 に、非持続的な TCP フロー数を 200 – 1,000 と変化させた時の、 FSIM+ および ns2 のシミュレーション実行時間を示す。ここでは、ボトルネックリンク帯域を 200 [Mbit/s] とした。

図 9 より、 FSIM+ および ns2 のシミュレーション実行時間は、共に非持続的な TCP フロー数が増加するにつれほぼ線形に増加していることがわかる。また、 FSIM+ のシミュレーション実行時間は、 ns2 のシミュレーション実行時間に比べて大幅に小さいことがわかる。

この結果より、フローレベルシミュレータ FSIM+ は、TCP フロー数にかかわらず、 ns2 と比べてきわめて高速にシミュレーションが可能 (シミュレーション速度が 10 倍以上) であることがわかる。

4.4 消費メモリ量

次に、 FSIM+ および ns2 の消費メモリ量を比較するため、図 1 のトポロジにおける TCP フロー数を変化させながらシミュレーションを実行し、その時の最大消費メモリ量を計測した。ここでも、4. 3 節と同様に、持続的な TCP フローと、ランダムに発生する多量の非持続的な TCP フローが混在するネットワークのシミュレーションを実行した。

図 10 に、非持続的な TCP フロー数を 200 – 1,000 と変化さ

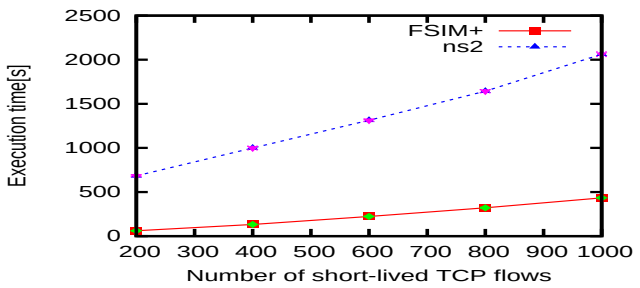

図 9: 非持続的な TCP フロー数 を 200 から 1,000 まで変化させた時の、FSIM+ と ns2 のシミュレーション実行時間

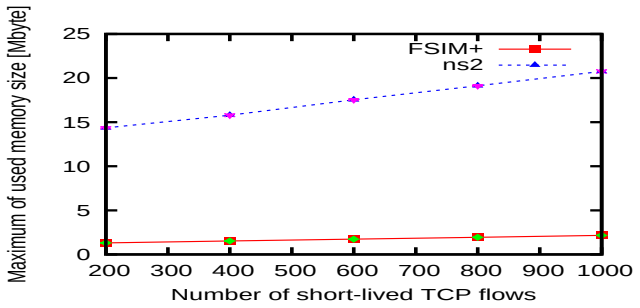

図 10: 非持続的な TCP フロー数 を 200 から 1,000 まで変化させた時の、FSIM+ と ns2 の最大消費メモリ量

せた時の、 FSIM+ および ns2 の最大消費メモリ量を示す。ここでも、ボトルネックリンク帯域を 200 [Mbit/s] とした。

図 10 より、 FSIM+ および ns2 の最大消費メモリ量は、共に非持続的な TCP フロー数が増加するにつれほぼ線形に増加していることが分かる。また、 FSIM+ の最大消費メモリ量は、 ns2 の最大消費メモリ量に比べて大幅に小さいことがわかる。

この結果より、フローレベルシミュレータ FSIM+ は、 TCP フロー数にかかわらず、 ns2 と比べてきわめて小さい消費メモリ量でシミュレーションが可能 (消費メモリ量が 10% 以下) であることがわかる。

5 まとめと今後の課題

本稿では、非持続的な TCP フローの流体近似モデル や、XCP フローの流体近似モデル、UDP フローの流体近似モデル を利用することにより、異種のフローが混在するネットワークに対応したフローレベルシミュレータ FSIM+ (Fluid-based network SIMulator plus) を構築した。さらに、実装したフローレベルシミュレータ FSIM+ を用いた実験により、その有効性を定量的に評価する。その結果、フローレベルシミュレータ FSIM+ は、パケットレベルシミュレータ ns2 と比較して、(1) シミュレーション結果の誤差は 10% 以下であること、(2) シミュレーション速度は 10 倍以上高速であること、(3) 消費メモリ量は 10%以下であることなどを示した。

今後の課題として、より大規模なネットワークに対する FSIM+ の性能評価や、TCP 、 XCP 、 UDP 以外のプロトコルへの拡張などが挙げられる。

謝　　辞

本研究を実施するにあたり、貴重な御意見を頂いた、大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸氏、伊藤建志氏に深く感謝いたします。

文　　献

[1] “ISC internet domain survey.” http://www.isc.org/ops/ds/.

[2] S. Floyd and V. Paxson, “Why we don’t know how to simulate the Internet,” Oct. 1999. Also available as http://www.aciri.org/floyd/papers/wsc.ps.

[3] Y. Sakumoto, R. Asai, H. Ohsaki, and M. Imase, “Design and implementation of flow-level simulator for performance evaluation of large scale networks,” in *Proceedings of 15 th Annual Meeting of the IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS 2007)*, pp. 166–172, Oct. 2007.

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

[5] Y. GU, Y. Lie, and D. Towsley, “On integrating fluid model with packet simulation,” in *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004)*, vol. 4, pp. 2856–2866, Mar. 2004.

[6] B. Liu, D. R. Figueired, Y. Guo, J. Kurose, and D. Towsley, “A study of networks simulation efficiency: Fluid simulation vs. packet-level simulation,” in *Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2001)*, vol. 3, pp. 22–26, Jan. 2001.

[7] “Simulating large networks using fluid flow models (FFM).” Available at http://www-net.cs.umass.edu/fluid/ffm.html.

[8] M. Barbera, A. Lombardo, and G. Schembra, “A fluid-based model of time-limited TCP flows,” *Computer Networks*, vol. 44, pp. 275–288, Feb. 2004.

[9] Y. Sakumoto, H. Ohsaki, and M. Imase, “On XCP stability in a heterogeneous network,” in *Proceedings of the 12th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2007)*, pp. 531–537, July 2007.

[10] 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.

[11] “The network simulator – ns2.” available at http://www.isi.edu/nsnam/ns/.

[12] D. X. Wei and P. Cao, “NS-2 TCP-Linux: an NS-2 TCP implementation with congestion control algorithms from Linux,” in *WNS2 ’06: Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator*, p. 9, ACM Press, 2006.

[13] S. Bhatt, R. Fujimoto, A. Ogielski, and K. Perumalla, “Paralell simulation techniques for large scale networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, pp. 42–47, Aug. 1998.

[14] PADS (Parallel and Distributed Simulation) Research Group, “PDNS - Parallel/Distributed NS.” http://www.cc.gatech.edu/computing/compass/pdns/.

[15] C.V.Hollot, Y. Liu, V. Misra, and D. Towsley, “Unresponsive flows and AQM performance,” in *Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2003)*, vol. 1, pp. 85–95, Apr. 2003.

[16] 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.

[17] M. A. Marsan, M. Garetto, P. Giaccone, E. Leonardi, E. Schiattarella, and A. Tarello, “Using partial differential equations to model TCP mice and elephants in large IP networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 13, pp. 1289–1301, Dec. 2005.