

フロー到着とクロストラフィックを考慮した SDN の待ち行列モデルとその解析

牛垣 龍一, フンドック トウアン, 河西 憲一, Yuan-Cheng Lai, Ying-Dar Lin

Software Defined Network (SDN) は、簡単かつ柔軟にネットワーク環境を構築することができる技術として、近年実用化が進められている。本稿では、SDN スイッチと SDN コントローラを 1 組とした系に対して、TCP 通信を想定したパケットのフローと、ほかの SDN スイッチから到着するクロストラフィックを考慮した待ち行列モデルを構築し、解析した。提案モデルは 5 次元のマルコフ連鎖でモデル化されるため、状態空間が大きくなる。そこで提案モデルを近似する状態空間の小さなモデルも提案する。性能評価指標として、パケットレベルのみならずフローレベルの呼損率や平均滞在時間などを導出した。さらに、導出した評価指標とフローの到着率や SDN コントローラにかかる負荷との関係を考察した。

キーワード：SDN, フロー到着, TCP 通信, 待ち行列モデル

1. はじめに

近年、ネットワークの仮想化技術として、Software Defined Network (SDN) が注目されている。SDN とは、ネットワークをソフトウェア制御するための技術や、それにより構成されたネットワークを指す。ネットワークをすべてソフトウェア制御することで、1) 設定の変更やネットワークの再構成が容易になる、2) ネットワーク全体を見渡したルーティングが可能になる、などの利点がある。

SDN を実現する技術の一つとして OpenFlow があ
る。OpenFlow の特徴は、これまで一つのルータが担
っていたデータ転送機能と経路制御機能を分離したこ
とである。データの転送は SDN スイッチが担当する。
転送すべき経路を判断するために SDN スイッチはフ
ローテーブルを参照する。このフローテーブルを制御
するのが、SDN コントローラである。一つの SDN コ

ントローラは複数の SDN スイッチのフローテー
ブルを制御可能である。以下、SDN におけるパケッ
トの流れを簡単に述べる。SDN スイッチにパケッ
トが到着したとする。到着したパケットに対応するフ
ローエントリがフローテーブルに存在しない場合、当
該パケットは SDN スイッチでの処理が完了した後に
SDN コントローラに向かう。SDN コントローラは
当該パケットのフローエントリを新たにフローテー
ブルに追加する。SDN コントローラで転送先が
決定された後、当該パケットはもう一度 SDN ス
イッチにて処理を受けて転送先に向かう。以降、
フローテーブルにフローエントリが存在するパケッ
トは SDN スイッチで処理を受け転送される。

SDN はすでに実用化が始まっている。SDN ネット
ワークの設計や性能保証に役立てるため、多方面から
の研究成果も報告されている。中でも待ち行列モデル
などを用いて SDN を適切にモデル化し、有効な性能
評価指標を求めることを目的とした研究として、以
下のような先行研究が存在する。[1] は、SDN ス
イッチと SDN コントローラをそれぞれ $M/M/1$ 待ち
行列と $M/M/1/c$ 待ち行列を用いてモデル化し、解
析を行った。[2] では、SDN が一つのコントロー
ラに対して複数のスイッチを担当することを、ジャク
ソン・ネットワークを用いてモデル化することで表
している。[3] は、送信パケットが独立でなくデ
ータ送信時にまとまって到着することを表すため、
集団到着を扱った $M^X/M/1$ 待ち行列を用いて SDN
スイッチを表した。[4] では、SDN スイッチと
SDN コントローラの相互関係を調べるため、3
次元のマルコフ連鎖で記述した待ち行列モデルを用
いて、1 組の SDN スイッチと SDN コントローラ
を表して

うしがき りゅういち
東京工業大学工学院 修士課程修了
〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1
ふんどっく とうあん
筑波大学システム情報系 社会学域
〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1
かわにし けんいち
群馬大学大学院理工学部
〒 371-0024 群馬県桐生市天神町 1-5-1
Yuan-Cheng Lai
Department of Information Management, National
Taiwan University of Science and Technology
No. 43, Sec. 4, Keelung Road, Taipei, 106, Taiwan
Ying-Dar Lin
Department of Computer Science, National Chiao Tung
University
No. 1001, Ta Hsueh Road, Hsinchu, 300, Taiwan

いる。[5] はパケットの到着がバースト的であることを表すために、二つの背後状態をもつ MMPP (Markov Modulated Poisson Process) でパケットの到着過程を表している。

以上紹介した先行研究は、系に到着するパケットの所属するフローの視点が明確ではない。一方で [6] はデータ送信時にまとめて到着するパケットとフローの到着を別々に表現してモデル化した。すなわち、パケットの到着過程を、ある期間続くフローの間に複数個のパケットが到着することで表した。この結果、パケットの到着過程をより現実的に表すことができる。

本稿では、[6] で提案されたフロー到着を導入した 1 組の SDN スイッチと SDN コントローラでの TCP 通信を待ち行列を用いてモデル化し、解析を行った。さらに本モデル化では、着目する SDN スイッチ以外から SDN コントローラに到着するパケットの到着 (クロストラフィック) も考慮した。これにより、SDN コントローラが複数の SDN スイッチを担当する場合の解析が可能になった。そして、性能評価のための指標として呼損率や平均滞在時間などを計算し、シミュレーションと比較した。また、このモデルは状態数が多く、性能評価指標の計算時間が長くなりやすいため、高速に計算できる近似モデルを提案し、元のモデルと比較した。

2. SDN における TCP 通信とモデル化

本節では、本稿でモデル化する SDN における TCP 通信でのパケットの動きについて説明する。TCP とは、インターネットで標準的に利用されているプロトコルの一つである。TCP を用いてデータを送る際、まず送信者は受信者に、送信者から受信者へのコネクションを確立するためのパケット (SYN パケット) を送信する。SYN パケットを受け取った受信者は、受信者から送信者へのコネクションを確立するため、受信可能であることを送信者に伝えるためのパケット (SYN/ACK パケット) を送り返す。そして、送信者は受信者からの SYN/ACK パケットを受け取ると、受信者からのパケットを受信可能であることを伝えるためのパケット (ACK パケット) を返信する。このようにして、送信者から受信者、さらには受信者から送信者へのコネクションが確立され、双方向にデータを送ることが可能となる。

SDN において TCP 通信をする際は、まず送信者からの SYN パケットが SDN スイッチキューに入り、スイッチ処理を受ける。次に、もし到着した SYN パケッ

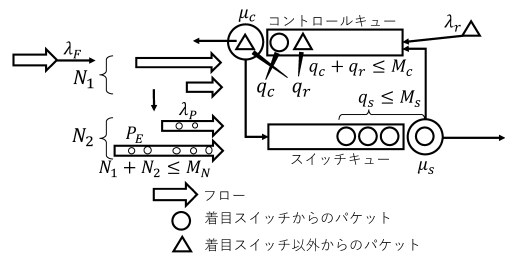


図 1 5次元モデル (主な記号は表 1 を参照)

トに対応するフローエントリがフローテーブルに存在しなければ、SYN パケットはコントロールキューに転送され、コントロール処理を受ける。そして SYN パケットはもう一度 SDN スイッチに転送され、SDN スイッチでサービスを受けて転送先へ向かう。受信者から送信者への SYN/ACK パケットについても同様の処理がなされる。SYN/ACK パケットが送信者に到着すると、送信者は ACK パケットを返信し、その後パケットに分割されたデータを送信する。この ACK パケットと続いて到着するデータのパケットの転送先は SYN パケットのコントロール処理時に決定されているので、コントロールキューを経由せずに、スイッチ処理を受けた後、転送先へ向かう。

モデル化の簡単のため、本稿では SYN パケットがコントロール処理を終えてから ACK パケットが届くまでの時間が短いと仮定し、SYN パケットのコントロール処理が終わり次第データの転送が始まるとする。また、本稿では、コネクションを確立する場合、SYN パケットはコントロール処理が必要であるとする。以降本稿では SYN パケットを先頭パケット、分割されたデータのパケットを非先頭パケットと呼ぶ。

3. 5次元待ち行列モデル

本節では 1 組の SDN スイッチと SDN コントローラにおける、TCP 通信時のパケットの動きを、待ち行列モデルにより表す。まず、3.1 節でモデル化について説明する。次に、3.2 節で性能評価指標の計算方法を述べる。モデル化に際しては、[6] で提案されたフロー到着を取り入れ、さらに SDN コントローラの着目するスイッチ以外からの先頭パケットの処理も考慮する。

3.1 待ち行列モデルの定義

図 1 は SDN の待ち行列モデルを表している。系には一つの SDN スイッチと一つの SDN コントローラがあり、それぞれが有限の大きさの待合室をもつ。系にはフローがパラメータ λ_F でポアソン到着する。モ

表 1 記号の定義

記号	定義
λ_F	フロー到着率
λ_P	フロー当たりのパケット到着率
P_E	パケット到着時フロー終了確率
λ_r	非着目スイッチからの先頭パケット到着率
μ_s	スイッチサービス率
μ_c	コントロールサービス率
M_N	接続フローの最大数
M_s	スイッチキュー容量
M_c	コントロールキュー容量

デル化の簡単のため、同時に接続できるフロー数の最大値を M_N とする。実際には同時に接続するフロー数に制限はないため、 M_N はできるだけ大きな値を設定することが望ましい。

フローが到着すると、先頭パケットのみがスイッチキューに入る。スイッチでのサービス時間は、それぞれ独立に、パラメータ μ_s の指数分布に従うとする。スイッチでのサービスが完了した先頭パケットはコントロールキューに入る。コントロールキューには着目しているスイッチ以外からの先頭パケットも到着する。この到着過程は、パラメータ λ_r のポアソン到着とする。コントローラでのサービス時間は、それぞれ独立に、パラメータ μ_c の指数分布に従うとする。

先頭パケットがコントローラでのサービスを終わると、対応するフローの非先頭パケットが到着し始める。非先頭パケットはフローごとにパラメータ λ_P でポアソン到着し、到着するごとに確率 P_E でフローが終了する。到着した非先頭パケットはスイッチキューに入り、先頭パケットと同じサービス率 μ_s でサービスを受ける。サービス完了後は系を離脱する。スイッチキューとコントロールキューの最大容量をそれぞれ M_s , M_c とする。

接続フロー数が上限値のときに到着したフローは呼損する。スイッチキュー、コントロールキューが満杯のときにそれぞれのキューに到着したパケットも呼損する。先頭パケットがコントロール処理を終える前に呼損した場合、該当フローも失う。

本来、スイッチとコントローラはパケットのサービスを先着順に行うが、これをモデル化するためには、スイッチキューならば先頭パケットと非先頭パケット、コントロールキューならば着目するスイッチからの先頭パケットと着目していないスイッチからの先頭パケットの並び順を記憶しておく必要があり、モデルが非常に複雑になってしまう。そこで本稿では、サービスが

完了したときにキュー内にいるパケット数の比に応じて確率的にサービス完了パケットを決定するように近似する。この近似の妥当性は、数値実験の際に先着順サービスの場合のシミュレーションと比較を行うことで確かめる。

このモデル化で、時刻 t において、先頭パケットのコントロールサービスが完了前のフロー数を $N_1(t)$ 、先頭パケットのコントロールサービスが完了後のフロー数を $N_2(t)$ 、スイッチキュー内のパケット数を $q_s(t)$ 、コントロールキュー内の着目スイッチから転送された先頭パケット数を $q_c(t)$ 、コントロールキュー内の着目スイッチ以外のスイッチから転送された先頭パケット数を $q_r(t)$ とする。 $X(t) = (N_1(t), N_2(t), q_s(t), q_c(t), q_r(t))$ とおくと、確率過程 $\{X(t); t \geq 0\}$ は状態空間 \mathcal{S} 上の5次元連続時間マルコフ連鎖となる。状態空間 \mathcal{S} の要素を (i, j, k, l, m) とすると、 i, j, k, l, m は非負の整数であることに加えて、次の条件を満たす。すなわち、1) 接続フロー数には最大値があること、2) スwitchキューとコントロールキューの容量には最大値があること、3) 先頭パケットのコントロールサービスが完了前のフロー数は、コントロールキュー内の着目スイッチからのパケット数以上であり、かつコントロールキュー内の着目スイッチからのパケット数とスイッチキュー内のパケット数との和以下であることである。よって、状態空間 \mathcal{S} は次のように定められる。

$$\mathcal{S} = \{(i, j, k, l, m) \mid i + j \leq M_N, k \leq M_s, \\ l + m \leq M_c, l \leq i \leq k + l, \\ i, j, l, k, l \geq 0\}.$$

確率過程 $\{X(t); t \geq 0\}$ の個々の状態遷移率については、その詳細は省略する。最終的に構築された $\{X(t); t \geq 0\}$ は既約なマルコフ連鎖となるため、 $\{X(t); t \geq 0\}$ には定常分布が存在し、平衡方程式と正規化条件から $\{X(t)\}$ の定常分布を数値的に計算することができる。

以下、本モデルと [6] のモデルの主な違いを述べる。まず、本モデルでは着目するスイッチ以外からコントローラに到着する先頭パケットを考慮している点に注目すべきである。SDN のアーキテクチャーでは、一つのコントローラが複数のスイッチの経路判断を担う。よって、クロストラフィックはコントローラの性能のみならず、着目する SDN スwitch にも影響を与える要因となりうる。本稿のモデルにより、SDN コントローラへの負荷が与える影響について、より現実的な解析が可能になった。さらに注目すべき差異は、本モデルと [6] のモデルでの、一つのデータを送信する際

のデータの流れ（フロー）を表現するパケットの到着過程の捉え方である。[6]では指数分布に従うフローの継続時間中にパケットがポアソン到着することで表現した。本稿では、ポアソン過程に従うパケットの到着があり、パケット到着が発生するたびに確率的にそれ以降のパケットの到着が終了するというモデルを採用する。次の定理は、本稿のモデルと [6] のモデルとの関係を示す。

定理 1. フローの長さをパラメータ μ_{F1} の指数分布に従う確率変数とし、その間パラメータ λ_{P1} でポアソン到着するパケットの到着過程を到着過程 1 とする。パラメータ λ_{P2} でポアソン到着し、到着するたびに確率 P_{E2} でそれ以降の到着がなくなるパケットの到着過程を到着過程 2 とする。各パラメータが以下の条件を満たすとき、パケットが一つ以上到着する条件の下でのフロー内のパケットの個数の分布は一致する。また、フロー内のパケットの到着間隔の分布も一致する。

$$P_{E2} = \frac{\mu_{F1}}{\lambda_{P1} + \mu_{F1}}, \quad \lambda_{P2} = \lambda_{P1} + \mu_{F1}.$$

本稿の目的の一つにフローの平均滞在時間の導出がある。ただし、本稿でのフローの平均滞在時間とは、最後のパケットが系を離脱する、すなわちフローの最後のパケットがスイッチから送み出されるまでの時間の平均値とする。そのためには、フロー内での最後に到着するパケットを表現する必要がある。定理 1 から、フロー継続中にパケットが 1 個以上到着する条件の下では、到着パケット数は平均 $1/P_{E2}$ の幾何分布に従うこともわかる。また、パケットが 1 個以上到着するという条件は、非先頭パケットが送信データを表すことを考えれば妥当であると考えられる。

3.2 性能評価指標の計算

本節では連続時間マルコフ連鎖 $\{X(t); t \geq 0\}$ の定常分布から、性能評価指標として、フロー呼損率、パケット呼損率、フロー平均滞在時間の三つについての説明と計算方法の概略を示す。以下、 $\{X(t); t \geq 0\}$ が定常状態において状態 $(i, j, k, l, m) \in S$ である確率を $\pi(i, j, k, l, m)$ と記す。

本稿では、フロー呼損率 B_F を次のように定める。

$$B_F = 1 - P(S) \times P(C).$$

ここで、 $P(S)$ は「フロー到着時に先頭パケットがスイッチキューに入る」確率であり、 $P(C)$ は「スイッチサービスを終えた先頭パケットがコントロールキューに入る」確率である。まず、 $P(S)$ については、フロー

到着時に先頭パケットのコントロールサービスが完了前と完了後のフロー数の合計が M_N 未満であり、かつスイッチキュー内のパケット数が M_S 未満である確率として計算されるので、次のように与えられる。

$$P(S) = \sum_{\substack{(i,j,k,l,m) \in S \\ i+j < M_N, k < M_S}} \pi(i,j,k,l,m).$$

一方、 $P(C)$ はスイッチサービス完了時にコントロールキュー内のパケット数が M_C 未満である確率として計算されるので、次のように与えられる。

$$P(C) = \sum_{\substack{(i,j,k,l,m) \in S \\ l+m < M_C}} \pi(i,j,k,l,m).$$

ただし、 π_c は定常状態において先頭パケットが一度目のスイッチ処理を終えた時点のパルム分布であり、以下のように与えられる。

$$\pi_c(i,j,k,l,m) = \frac{\pi(i,j,k,l,m) \times \mu_s \frac{i-l}{k}}{\sum_{(i,j,k,l,m) \in S} \pi(i,j,k,l,m) \times \mu_s \frac{i-l}{k}}.$$

パケット呼損率 B_P は、呼損しなかったフローの非先頭パケットのうち、スイッチキュー到着時にキューが満杯で呼損するパケットの割合であり、次のように計算される。

$$B_P = \sum_{\substack{(i,j,k,l,m) \in S \\ k=M_S}} \pi_p(i,j,k,l,m).$$

ただし、 π_p は定常状態において非先頭パケットが到着した時点のパルム分布で、次式で与えられる。

$$\pi_p(i,j,k,l,m) = \frac{j\lambda_P \pi(i,j,k,l,m)}{\sum_{(i,j,k,l,m) \in S} j\lambda_P \pi(i,j,k,l,m)}.$$

フロー平均滞在時間 $E[D_F]$ は、フローが到着してから、最後のパケットが系を離脱するまでの平均時間である。これは、フローが到着してから先頭パケットがスイッチ処理を終えるまでの時間 T_{D1} 、スイッチ処理を終えてからコントロール処理を終えるまでの時間 T_{D2} 、コントロール処理を終えてから最終パケットが到着するまでの時間 T_{D3} 、最終パケットの系内滞在時間 T_{D4} の和の期待値として表される。これらのうち、 T_{D3} の期待値 $E[T_{D3}]$ は、フロー内の非先頭パケット数が平均 $1/P_E$ の幾何分布で与えられ、非先頭パケットの平均到着間隔が $1/\lambda_P$ であるので、 $E[T_{D3}] = 1/(P_E \lambda_P)$ である。一方、 T_{D1} 、 T_{D2} 、 T_{D4} の期待値 $E[T_{D1}]$ 、 $E[T_{D2}]$ 、 $E[T_{D4}]$ は、それぞれ先頭パケットがスイッチキュー内

に入った時点でのバルム分布 $\tilde{\pi}_f$, 先頭パケットがコントロールキューに入った時点でのバルム分布 $\tilde{\pi}_c$, 非先頭パケットがスイッチキューに入った時点でのバルム分布 $\tilde{\pi}_p$ を用いて計算される. それらは本稿の π_p と同様に定義される.

4. 高速計算可能な近似モデル

3節ではSDNを5次元の連続時間マルコフ連鎖を用いてモデル化した. このモデルは精密ではあるが状態数が多くなりやすく, 特に M_N の値を大きくすると数値計算に時間を要するという欠点がある. そこで高速計算可能なSDNの近似モデルを考える. 具体的には, SDNスイッチとSDNコントローラをそれぞれ独立にモデル化する. そして, SDNスイッチについては, フローのコントロールサービスが完了前か完了後かの情報を省いたモデル化を採用する. 一方, SDNコントローラについては, 着目するスイッチからのパケットか, あるいはそれ以外からのパケットであることを区別せずに扱う. このようなモデル化により, 近似モデルは全体で三つの情報により記述される. 本節では, この近似モデルとその性能評価指標について述べる.

4.1 SDNスイッチの近似モデル

まず, SDNスイッチの近似モデルについて説明する. 系にはフローがパラメータ λ_F でポアソン到着する. 同時に接続できるフロー数は最大 M_N 本とする. フローが系に到着した際, 一つのパケットが先頭パケットとしてキューに到着する. キューの最大容量は M_s とする. フローが到着したときにキューが満杯で先頭パケットが呼損した場合, フローも呼損する. フローごとに非先頭パケットがパラメータ λ_P でポアソン到着し, 到着するごとに確率 P_E でフローが終了する. また, フローとは関係なく, コントロールキューでの処理を終えた先頭パケットがパラメータ λ_c でポアソン到着する. サービスは先着順とし, サービス時間はどのパケットも独立にパラメータ μ_s の指数分布に従うとする. キューに入ったパケットはキュー内で区別せず, サービスを終えたパケットはすべて系外へと離脱する.

以上のようなモデルで, 時刻 t でのキュー内のパケット数を $q(t)$, 接続フロー数を $N(t)$ とする. $Y(t) = (q(t), N(t))$ とおくと, 確率過程 $\{Y(t); t \geq 0\}$ は有限な離散状態空間 $\hat{S} = \{(i, j) \mid i \leq M_s, j \leq M_N, i, j \geq 0\}$ 上の2次元連続時間マルコフ連鎖である. このマルコフ連鎖の無限小生成作用素は, ブロック3重対角行列として表現できる. つまり, マルコフ連鎖 $\{Y(t); t \geq 0\}$ は有限な準出生死滅過程になることがわかる. $\{Y(t); t \geq 0\}$

が既約ならば, 状態 $(i, j) \in \hat{S}$ での定常状態確率 $p_{(i,j)}$ を求めることは難しくない.

SDNスイッチの近似モデルのための主なアイデアは, SDNコントローラとは独立にSDNスイッチを記述し, さらにフローがコントロールサービス完了前であるか, 完了後であるかの区別をなくすことである. フローの区別をなくした結果, 状態の数はフロー数の最大値 M_N に対して線形増加に抑えることができる.

4.2 SDNコントローラの近似モデル

次に, SDNコントローラの近似モデルについて説明する. キューにはパラメータ λ_s で着目するスイッチからの先頭パケットがポアソン到着し, それ以外のスイッチからのパケットがパラメータ λ_r でポアソン到着する. キューの最大容量を M_c とする. サービスは先着順とし, サービス時間はどのパケットも独立にパラメータ μ_c の指数分布に従うとする. キューに入ったパケットはキュー内で区別せず, サービスを終えたパケットはすべて系外へと離脱する.

このモデルで, 時刻 t でのキュー内のパケット数を $Z(t)$ とおくと, 確率過程 $\{Z(t); t \geq 0\}$ は有限な離散状態空間 $\mathcal{S}_c = \{i \mid 0 \leq i \leq M_c\}$ 上の1次元連続時間マルコフ連鎖であり, $\{Z(t); t \geq 0\}$ はM/M/1/ M_c 待ち行列モデルの客数過程である. つまり, M/M/1/ M_c 待ち行列モデルに基づいて, コントロールキューでの呼損率 \hat{B}_c や平均滞在時間 $E[\hat{T}_c]$ などが評価される.

4.3 近似モデルの性能評価指標の計算

近似モデルを用いたフロー呼損率 \hat{B}_F とパケット呼損率 \hat{B}_P は, それぞれ次のように計算できる.

$$\hat{B}_F = 1 - \left(\sum_{\substack{(i,j) \in \hat{S} \\ i < M_s, j < M_N}} p_{(i,j)} \right) (1 - \hat{B}_c),$$

$$\hat{B}_P = \sum_{\substack{(i,j) \in \hat{S} \\ i = M_s}} p_{(i,j)}.$$

ただし, p_p は定常状態において非先頭パケットが到着した時点のバルム分布であり, 以下のように表される.

$$p_p(i,j) = \frac{j \lambda_{PP}(i,j)}{\sum_{(i,j) \in \hat{S}} j \lambda_{PP}(i,j)}.$$

同様に, 近似モデルでのフロー平均滞在時間 $E[\hat{D}_F]$ は, $E[\hat{T}_{D1}], E[\hat{T}_{D2}], E[\hat{T}_{D3}], E[\hat{T}_{D4}]$ の和として計算される. ただし, $\hat{T}_{D1}, \hat{T}_{D2}, \hat{T}_{D3}, \hat{T}_{D4}$ は, それぞれ近似モデルでのフローが到着してから先頭パケットがスイッチ処理を終えるまでの時間, スイッチ処理を終えてから

コントロール処理を終えるまでの時間, コントロール処理を終えてから最終パケットが到着するまでの時間, 最終パケットの系内滞在時間である. $E[\widehat{T}_{D2}] = E[\widehat{T}_c]$ であり, $E[\widehat{T}_{D3}] = 1/(P_E \lambda_P)$ である. $E[\widehat{T}_{D1}]$ と $E[\widehat{T}_{D4}]$ は, それぞれ先頭パケット, 非先頭パケットがスイッチキューに入った時点でのパルム分布から求められる. それらは, それぞれ5次元モデルの場合の π_f と π_p に相当し, π_p と同様に定義される.

近似モデルでは, SDN スイッチと SDN コントローラを別々にモデル化した. しかしながら, 本来両者は互いに影響し合う. このような影響を考慮するため, SDN スイッチのコントロールキューでの処理を終えた先頭パケットの到着率 λ_c と, SDN コントローラの着目するスイッチからの先頭パケットの到着率 λ_s を, それぞれ次の方程式の解 $\widehat{\lambda}_c$ と $\widehat{\lambda}_s$ に等しいとする.

$$\begin{aligned}\widehat{\lambda}_c &= \widehat{\lambda}_s(1 - \widehat{B}_c(\widehat{\lambda}_s, \widehat{\lambda}_c)), \\ \widehat{\lambda}_s &= \lambda_F(1 - \widehat{B}_P(\widehat{\lambda}_s, \widehat{\lambda}_c)).\end{aligned}$$

ただし, \widehat{B}_c と \widehat{B}_P は, 先に定めたコントロールキューでの呼損率と, スイッチキューでのパケット呼損率である. この種の方法は不動点近似として知られる.

5. 数値実験

本節では, 提案モデルから求めた性能評価指標とシミュレーションでの値を比較する. 3節のモデル化では簡単のため, サービス完了パケットを確率的に決定していたが, シミュレーションは先着順サービスで性能評価指標を求めた. また, 実際の SDN スイッチと SDN コントローラの処理時間は定数に近いことを考慮し, サービス時間が指数分布に従う場合と平均が同一の定数の場合の2通りでシミュレーションを行った. シミュレーションは系にフローとパケットが存在しない状態からスタートし, フロー呼損率とフロー平均滞在時間はそれぞれ10,000個目のフローまで, パケット呼損率は1,000,000個目のパケットまで発生させて評価値を導出した.

特に指定のない限り, フロー到着率 $\lambda_F = 100$, フロー当たりのパケット到着率 $\lambda_P = 4,000$, フロー終了確率 $P_E = 1/80$, 着目するスイッチ以外からの先頭パケット到着率 $\lambda_r = 10,000$, スイッチサービス率 $\mu_s = 30,000$, コントロールサービス率 $\mu_c = 20,000$, 最大接続フロー数 $M_N = 15$, スイッチキュー容量 $M_s = 8$, コントロールキュー容量 $M_c = 6$ として評価する. また, 今回はコントロールキューでの呼損率は十分小さいとして, 近似モデルにおけるコントロー

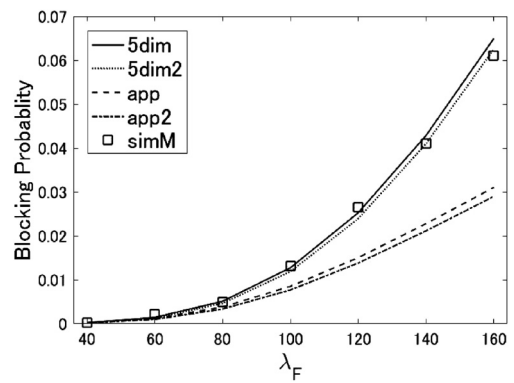


図2 フロー到着時の呼損率 $M_N = 6$

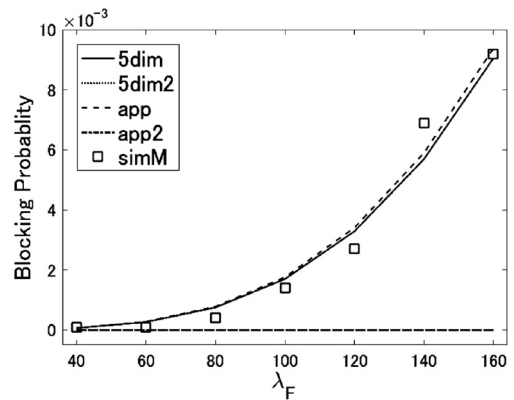


図3 フロー到着時の呼損率 $M_N = 15$

表2 モデルごとの状態数の比較

	$M_N = 6$	$M_N = 15$
5次元モデル $ S $	3402	14280
近似モデル $ \widehat{S} $	63	144

ルキューからスイッチキューへの到着率 λ_c は, λ_F と同じ値で計算した. なお紙面の都合上, フロー呼損率の数値例を中心に示す.

5.1 近似モデルの評価

図2と図3は, それぞれ $M_N = 6$ と $M_N = 15$ のときの, フロー到着時の呼損率と, そのうち接続可能フロー数の不足による呼損率を表している. それぞれ, フロー到着率 λ_F を40から160まで変化させて計算している. 5dimが5次元モデルから求めたフロー到着時の呼損率であり, $1 - P(S)$ で与えられる. 同様にappが近似モデルから, simMがサービス時間が指数分布に従う場合のシミュレーションから求めた, フロー到着時の呼損率を表す. また, 5dim2とapp2はそれぞれ5次元モデルと近似モデルから求めた, フロー到着時に接続可能フロー数の不足が原因で呼損する確率を表す.

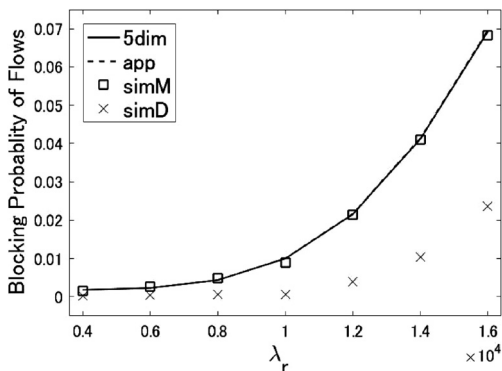


図4 クロストラフィックに対するフロー呼損率

図2より、5次元モデルから求めた値はシミュレーションでの値とほぼ等しいことがわかる。フローの最大接続数が比較的少ない $M_N = 6$ の場合、フロー呼損の原因の多くは接続可能フロー数の不足によるものであることもわかる。さらに、フロー到着率 λ_F が大きくなるほど5次元モデルで求めた値と近似モデルで求めた値の差が大きくなっていることも読み取れる。これは、5次元モデルでのフローが、先頭パケットがコントロール処理を終えるまでの時間の分だけ長く滞在するためだと考えられる。到着時に呼損するフローの割合が異なると、系に到着する非先頭パケットの数も大きく変化するので、各性能評価指標の値も5次元モデルの場合と近似モデルの場合で差異が見られた。

図3はフローの最大接続数が多く、接続可能フロー数の不足がフロー呼損の原因になりにくい $M_N = 15$ の場合の結果を表している。このとき、5次元モデルから求めた呼損率と近似モデルから求めた呼損率はほぼ一致していることがわかる。これは、呼損率が接続可能フロー数の上限の影響を受けにくいいため(5dim2とapp2がほぼゼロであることに注意)、フローが系に留まる時間の差の影響が小さくなるからだと考えられる。

次に5次元モデルと近似モデルの $M_N = 6, 15$ のときのマルコフ連鎖の状態数を表2に示す。近似モデルに関しては、SDNコントローラの性能評価指標は解析的に求められるので、SDNスイッチの近似モデルの状態数を示す。本稿で提案した5次元モデルと近似モデルは、両者とも接続可能フロー数に上限を定めている。実際のSDNでは大量のフローが接続されると想定される。本数値実験の結果を踏まえると、接続可能フロー数が系に影響を与えないほど十分に大きい場合を扱う上で、提案した近似モデルは有用であることがわかる。

最後に、着目スイッチ以外からコントロールキューに到着するパケットの到着率 λ_r に対するフロー呼損

率(5次元モデルならば B_F , 近似モデルならば \hat{B}_F で与えられる)を図4に示す。5次元モデルと近似モデルはほぼ一致することがわかる。なお、simDはサービス時間が定数の場合のシミュレーションでの値であり、フローの到着率 λ_F は100である。このように、本モデルを使うことでコントローラの容量設計に資する性能評価が可能になる。

6. まとめ

本稿では、フロー到着とクロストラフィックを考慮したSDNの待ち行列モデルを提案した。提案したモデルからSDNのいくつかの性能評価指標を計算し、それらを高速に計算可能な近似モデルを作成した。そして二つのモデルから導出された性能評価指標を、シミュレーションから求めた値と比較し、モデルの有用性を示した。今後の課題としては、待ち行列ネットワークを用いて複数のスイッチを表すことなどが考えられる。

謝辞 本研究を進めるにあたり、クロストラフィックのモデル化をはじめ、多くの助言をくださった東京工業大学教授 三好直人先生に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Jarschel, S. Oechsner, D. Schlosser, R. Pries, S. Goll and P. Tran-Gia, "Modeling and performance evaluation of an OpenFlow architecture," In *Proceedings of 23rd International Teletraffic Congress*, pp. 1–7, 2011.
- [2] K. Mahmood, A. Chilwan, O. Østerbø and M. Jarschel, "Modelling of OpenFlow-based software-defined networks: The multiple node case," *IET Networks*, **4**, pp. 278–284 2015.
- [3] B. Xiong, K. Yang, J. Zhao, W. Li and K. Li, "Performance evaluation of OpenFlow-based software-defined networks based on queueing model," *Computer Networks*, **102**, pp. 172–185, 2016.
- [4] Y. Goto, H. Masuyama, B. Ng, W. K. G. Seah and Y. Takahashi, "Queueing analysis of software defined network with realistic OpenFlow-based switch model," In *Proceedings of IEEE 24th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, pp. 301–306, 2016.
- [5] W. Miao, G. Min, Y. Wu, H. Wang and J. Hu, "Performance modelling and analysis of software-defined networking under bursty multimedia traffic," *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, **12**, Article No. 77, 2016.
- [6] Y. C. Lai, A. Ali, M. M. Hassan, M. S. Hossain and Y. D. Lin, "Performance modeling and analysis of TCP connections over software defined networks," In *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2017.