論　文

自己タイミング型パイプラインによる優先キューイング制御方式

林　秀樹[†*]　岩田　誠[†,††,†††]　寺田　浩詔[††]　島村　和典[†,††]

A Priority-Based Queueing Scheme Using Self-Timed Pipeline

Hideki HAYASHI[†*], Makoto IWATA[†,††,†††], Hiroaki TERADA[††], and Kazunori SHIMAMURA[†,††]

あらまし　インターネット上のサービスやアプリケーションの多様化に伴って，様々な通信品質（QoS）を保証できる QoS 制御技術の重要性が増している．本論文では，DiffServ を想定した QoS 制御実現法の一つとして，自己タイミング型パイプライン STP（self-timed pipeline）を活用した，優先キューイング制御方式を提案する．更に，提案方式の確率過程によるモデルと等価な評価が可能な離散事象シミュレータを用いた性能特性評価の結果を示し，代表的な既存のキューイング方式に比べて，広範なふくそう状態において廃棄率と遅延時間をともに低遅延で差別化できることを明らかにする．

キーワード　QoS，自己タイミング型パイプライン，ルータ，DiffServ，優先制御

1. まえがき

インターネットの浸透と広帯域化に伴い，多種多様な通信サービスやアプリケーションが導入されつつある．これらに要求される多様な通信品質（QoS）を保証するため，多くの QoS 制御技術が提案され [1], [2]，一部は商用のルータやスイッチ（ノード）内に既に実装されている．中でも，DiffServ は，Intserv に比べて，ネットワークのスケーラビリティを維持したまま，簡易に QoS 制御を実現する技術として各所で研究開発が進められている [3], [4].

本論文では，この DiffServ を想定した QoS 制御の一実現法として，高機能 LSI モジュールの実現に適した自己タイミング型パイプライン STP（self-timed pipeline）[5] を応用した，優先キューイング制御方式を提案する．また，本方式が，広範なふくそう状況において廃棄率と遅延時間をともに低遅延で柔軟に差別化できる特性を有していることを定量的に明らかにする．

優先度に基づく制御には一般に，キューイング時の廃棄制御を基礎にしたアクティブキュー管理方式 AQM（active queue management）と，優先度をもつクラス（あるいは，フロー）ごとに設けられた複数のキューからの読出し制御（スケジューリング）を目的としたフェアキューイング方式 FQ（fair queueing）[6]〜[8] が組み合わせて用いられる．そして，両者の特性が相補的に働き，廃棄率，遅延，帯域などが優先度に応じて差別化される．

FQ は，優先度の高いフローに対して，多くの帯域を割り当てるため，結果として遅延も低減させる効果がある．しかし，この制御の前段で行うキューイングによって生じる遅延（キューイング遅延）の低減には寄与しない．この結果，フロー数が多いと最大遅延が大きくなることが知られている [9]．一般に，このキューイング遅延の低減には，FQ と組み合わせて用いられる AQM の廃棄制御が効果を与える．

既存の AQM，例えば，RED [10] や，これを応用した RIO [11]，WRED [12]，FRED [13] 等では，キューイング前に平均キュー長に応じて確率的にパケットを廃棄した後，FIFO メモリにキューイングする．この結果，平均キュー長を抑制でき，キューイング遅延を

† 通信・放送機構高知通信トラヒックリサーチセンター，高知県
Kochi RC, Telecommunications Advancement Organization of Japan, A-501 Kochi University of Technology, 185 Miyanokuchi, Tosayamada-cho, Kami-gun, Kochi-ken, 782–8502 Japan
†† 高知工科大学，高知県
Kochi University of Technology, 185 Miyanokuchi, Tosayamada-cho, Kami-gun, Kochi-ken, 782–8502 Japan
††† 東北大学 21 世紀情報通信研究開発センター，仙台市
IT21 Center, Tohoku University, Katahira 2 Chome, Aoba-ku, Sendai-shi, 980–8577 Japan
* 現在，日本テレコム株式会社情報通信研究所

低減できる．しかし，ふくそう時に FIFO メモリ内のキュー長が長くなると，すべてのクラスに属するパケットの平均キューイング遅延が増大する．このため，リアルタイム性が要求されるフローが，低廃棄率を要求するフローの影響を受けやすくなり，結果的に遅延の増大を招くという問題がある．

更に，FQ では，低遅延のフローには廃棄率を低くしか設定できない．また，AQM では逆に，低廃棄率のフローには遅延時間を長くしか設定できない．これらの制約は両方式の特性に起因するものであり，柔軟な優先度の設定が不可能である．

これに対して本論文では，STP を応用した優先キューイング方式が，個々のデータの一時記憶と優先制御機能を局所的に分散実装できることに着目している．すなわち，分散的な実装によって，キューメモリ内部でのキューイングを必要最小限に抑えられ，低遅延かつ柔軟に各種の優先制御を実現できることを述べる．

次章では，直線状の STP を折り返した可変長キューイング機構を構成することによって，パケット廃棄制御と優先出力制御を低遅延で差別化できる優先キューイング制御方式を提案する．次に，本方式の数学的モデルを **3.** で定式化し，**4.** では，このモデルと等価な評価が可能な離散事象シミュレータを用いた性能特性評価結果を示し，本方式が既存の FQ や AQM に比べて低遅延で優先キューイング可能なことを述べる．

2. 自律型優先キューイング制御方式

本章では，自己タイミング型パイプライン STP による優先キューイング制御方式の基本的な構成と原理的特性を述べた後，優先度に応じた廃棄制御機能及び遅延制御機能をキューイング機構内部で自律分散的に実現する手法について考察する．

2.1 基本構成

直線状の STP 内では各パケットは以下のように自律的に移動する．すなわち，あるパケットがあるパイプライン段に到着すると，前方のパイプライン段に送出要求信号（Send）を送る．前方のパイプライン段が他のパケットを保持していなければ承認信号（Ack）を返す．Ack を受信すれば，パケットは前方のパイプライン段に移動する．このように，隣接するパイプライン段間でのみ Send 信号/Ack 信号（ハンドシェイク信号）を授受して，パケットの保持または移動を行う．

したがって，STP には，局所的な信号伝達のみによって動作時にだけ電力を消費する省電力特性や，パケット流量の変動に対する自律緩衝能力（エラスティック性）等，クロック同期回路では実現不可能な高集積回路実現に適した特性があり，データ駆動型チップマルチプロセッサの実用化にも活用されている [5]．

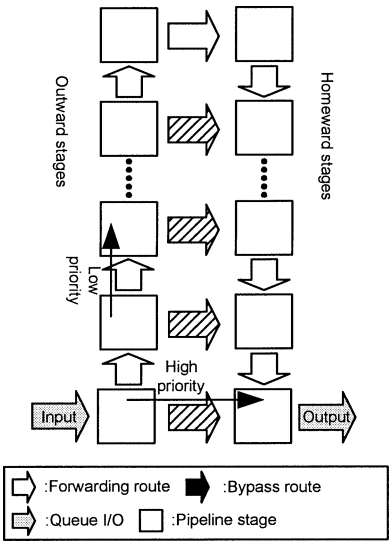

図 1　STP による優先キューイング制御方式の基本構成
Fig. 1　An self-timed priority-based queueing scheme.

これらの特性を更に応用したものが図 1 の STP による優先キューイング制御方式の基本構成である．この構成は STP を半分に折り，折返し点までの往路/復路の各段にバイパス経路を設けた可変長キュー構造をとる．このキューイング制御機構では，自律的な優先制御を実現するために，各パケットに自身の優先度情報(注1)を付与している．往路パイプライン内に存在するパケットは原則，バイパス経路への移動を試みる．復路側ステージにおいて，バイパス先がふさがっている場合，またはバイパス先への移動が優先度の高いパケットと競合する場合は，往路パイプライン内の前方段へ移動する．

このような動作によって，キュー出口がふくそうしていない場合は，入力パケットを最短遅延時間でキューから送出し，ふくそう時には，パケットを徐々に往路パイプライン内にキューイングするエラスティックな仕組みが実現できる．更に本基本構成では，復路側ステージに，バイパス先への移動が競合するパケットが

(注1)：DiffServ の場合，IP ヘッダ中の DSCP（DiffServ Code Point）が用いられる．

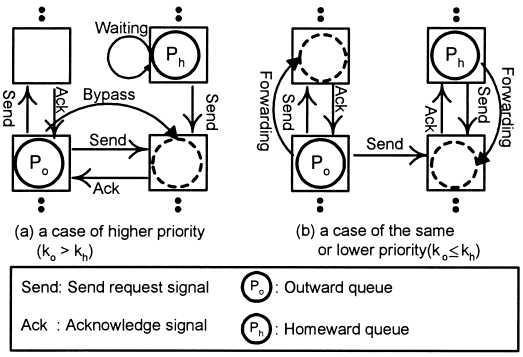

図 2　バイパス経路でのハンドシェイク手順
Fig. 2　A hand-shake protocol at each bypass stage.

存在する場合でも，往路側のパケットの優先度が高ければ，バイパス先に割り込み，先行できる．これによって，優先度が高いパケットはより短いキューイング遅延時間でキューから出力できることになる．

各ステージでパケット相互の優先度を比較してバイパス経路を通過すべきか否かを判断するための，ハンドシェイク手順を以下に示す．ただし，往路側パイプライン段のパケットを P_o（優先度 k_o），復路側パイプライン段のパケットを P_h（優先度 k_h）とする．

1)　移動先が競合する P_h が存在しない場合：P_o はバイパス経路に移動する．

2)　移動先が競合する P_h が存在し，かつ，$k_o > k_h$ の場合（図 2 (a)）：移動先ステージでは，双方のパケットから受信した送出要求信号（Send）に対して，P_o 側に対して承認信号（Ack）を返す．Ack を受信した P_o はバイパス経路に移動する．このとき，P_o は往路側パイプラインの前方段からも Ack を受信しているが，バイパス経路への移動を優先する．また，P_h はこの間待機する．

3)　移動先が競合する P_h が存在し，かつ，$k_o \leq k_h$ の場合（図 2 (b)）：P_h に対して Ack を返し，先入れ先出しキューイングを行う．このとき，P_o は前方段から Ack を受信すれば，往路側パイプラインの前方段へ移動する．

本キューイング制御方式では，このような局所的な振舞いの結果として，優先度の高いパケットが優先度の低いパケットを追い越せるため，単純な FIFO メモリを用いた従来の AQM や FQ に比べて，ふくそう時のキューイング遅延を低減できる．

2. 2　優先度に基づく廃棄制御

一般のキューイング制御では，バッファあふれを防ぐための廃棄制御方式が導入されている．RIO や WRED は，更に廃棄対象を差別化するために，パケットの廃棄優先度に応じて，あらかじめ設計された廃棄確率や廃棄しきい値をもとにしてパケット廃棄の有無を決定する．本提案方式においても，廃棄率の差別化のために，次の二つの廃棄制御を導入する（図 3）．

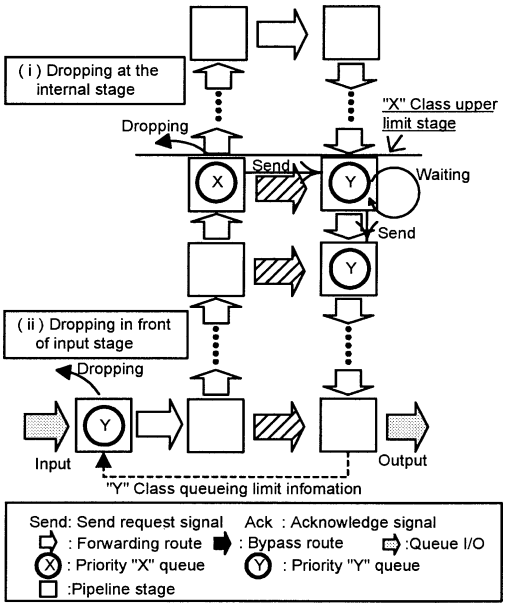

図 3　自律型優先キューイング制御方式の廃棄制御
Fig. 3　Dropping schemes based on an autonomous queueing control.

（i）　内部廃棄制御：キューイング機構内でパケットを廃棄する方式であり，優先度別にキューイング上限のステージをあらかじめ設定しておき，この上限に到達したパケットをすべて廃棄する．この方式は，廃棄率とキューイング遅延時間をともに差別化できる効果があると考えられる．

（ii）　事前廃棄制御：キューイング機構の入口で，廃棄優先度に応じてパケットを廃棄する．このときの廃棄率は，キューイング機構内の該当クラスのパケット数に基づき決定される．この方式は，キューイング機構が過負荷になることを未然に防ぎ，キューイング機構内の優先制御動作の向上に効果があると考えられる．

2. 3　優先度に基づく遅延制御

提案方式では，クラス間の遅延特性をより明確に差別化するために，各パケットの優先度に応じてバイパス可能なステージ（以下，BS と呼ぶ）を制限する機能

を，往路側の各パイプライン段に付加し，BS の範囲を複数段階に差別化できる．その基本構成を図 4 (a) に示す．この構成は，BS の範囲を 3 段階に差別化して設定することによって，3 種類のクラスに属するパケットの平均キューイング遅延を明確に差別化することを意図している．ただし，BS の制限によって，キューイング機構内で選択できるバイパス経路が減少し，全体の遅延が増加するおそれがある．そのため，本論文では次の 2 種類の手法を提案する．

（iii） クラス別入力段分離法：図 4 (b)

入力ステージを優先度によって分離し，入力後のパケットは基本構成の場合と同様に振る舞う．この手法では，優先度に依存した入力ステージから上段のステージが，その優先度をもつクラス（優先クラス）の BS となるため，設定された BS まで到達する遅延を解消でき，かつ，遅延偏差の縮小化が期待できる．

（iv） 優先クラスリマーク法：図 4 (c)

低負荷時，すなわち，キュー内の総パケット数がしきい値より少ないときのみ，入力パケットの優先度を見掛け上高く（リマーク）し，より短いキューイング経路が可能な BS 範囲が適用される．ただし，往路側の各パイプライン段では，バイパス先が競合する場合にはもとの優先度に基づくハンドシェイク手順により，バイパスまたは前方段への移動を決定する．この手法では，低負荷時にはできる限り最短経路でキューイングするため，遅延時間の平均並びに偏差の低減が期待できる．

以上のように，本優先キューイング制御方式は，乱数による確率的計算等を用いない，ごく簡単な優先転送/廃棄制御機能を STP の各ステージに付加することによって，廃棄率と遅延時間をともに低遅延で差別化することを意図した方式である．このため，DiffServ の AF クラス [14] のように相対的優先制御が要求される場合にでも，本章で述べた制御手法の組合せで差別化できることが期待できる．

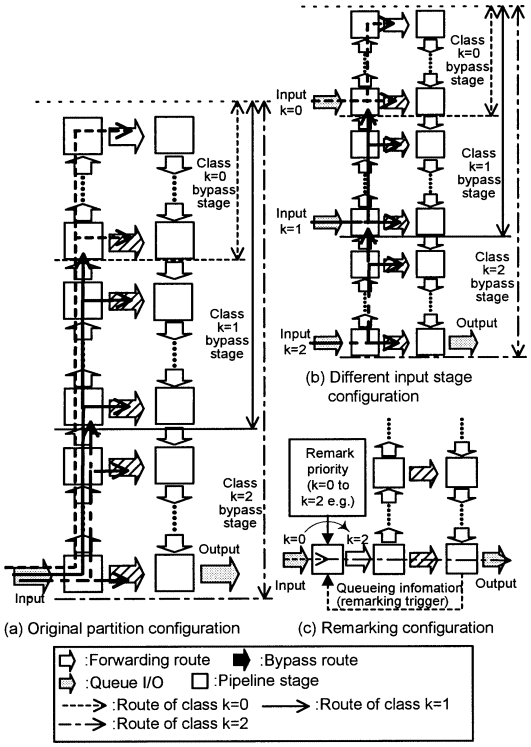

図 4 自律型優先キューイング制御方式の遅延制御
Fig. 4 Latency control schemes based on an autonomous queueing control.

3. マルコフ連鎖による解析モデル

本章では，自律型優先キューイング制御方式の性能特性解析を目的としてマルコフ連鎖によるモデルを定式化する．本方式における折返し型 STP の各ステージで非同期的に発生する事象（動作）は，起こり得る状態の確率の推移によってモデル化が可能である．具体的には，**2.1** に述べた Send 信号及び Ack 信号の伝搬時間を 1 : 1 とし，パケットの移動時間が 1 単位時間で行われると仮定すると，図 5 に示すように各ステージでのパケットの存在確率が離散時間で推移するモデルによって表せる．

ここで，折返し型パイプラインの入出力ステージを

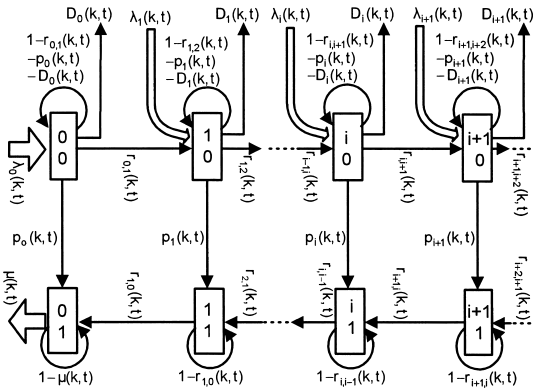

図 5 自己タイミング型キューイング方式の状態遷移
Fig. 5 A state transition of a self-timed queueing scheme.

基準として，キューイングの深さ i のステージを，往路側が第 $[i,0]$ 段，復路側は第 $[i,1]$ 段とする．$k(\geq 0)$ はパケットの優先度を示し，値が大きいほど低遅延が要求される．t は経過時間，$\lambda_i(k,t)$ は第 $[i,0]$ 段の入力パケットの到着確率，$\mu(k,t)$ は出力パケットの出力確率を示す．パケットが第 $[i,0]$ 段から，第 $[i,1]$ 段へバイパスする確率は $p_i(k,t)$，前方段へ移動する確率は $r_{i,i+1}(k,t)$ である．また，**2.2**（i）の内部廃棄制御を適用し，上限の第 $[i,0]$ 段にてパケットは $D_i(k,t)$ の確率で廃棄される．このように，パケットの廃棄確率を設定したステージを廃棄ステージと呼ぶ．復路側の第 $[i,1]$ 段においても，同様に前方段に移動する確率は $r_{i,i-1}(k,t)$ である．

更に，k クラスのパケットが時刻 t に第 $[i,0]$ 段に存在する確率を $ON_{i,0}(k,t)$，キューイングされているパケット数を $q(k,t)$，**2.2**（ii）の事前廃棄制御による廃棄確率を $D_A(k,q(k,t))$ とする．これらを用いて各確率を定式化すると，第 $[i,0]$ 段での，パケットの存在確率 $ON_{i,0}(k,t)$ の関係式は次のようになる．

$$\begin{aligned} ON_{i,0}(k,t) = & \lambda_i(k,t) \times \{1 - D_A(k,q(k,t))\} \\ & \times \{1 - r_{i-1,i}(k,t) \times ON_{i-1,0}(k,t-1)\} \\ & + r_{i-1,i}(k,t) \times ON_{i-1,0}(k,t-1) \\ & + \{1 - r_{i,i+1}(k,t) - p_i(k,t) - D_i(k,t)\} \\ & \times ON_{i,0}(k,t-1) \end{aligned} \tag{1}$$

ここで，

$$D_i(k,t) = \begin{cases} 1 - p_i(k,t) \\ \quad ([i,0] \text{ 段が } k \text{ クラスの廃棄ステージ} \\ \quad \text{のとき}) \\ 0 \ (\text{それ以外のとき}) \end{cases}$$

また，$p_i(k,t)$ は，ハンドシェイク手順の動作から次式で表される．N は k の最大値である．

$$\begin{aligned} p_i(k,t) = & \left\{ 1 - \sum_{l=k}^{N} ON_{i+1,1}(l,t-1) \right\} \\ & \times ON_{i,0}(k,t-1) \times \left[\sum_{k=0}^{N} r_{i,i-1}(k,t-1) \right. \\ & \left. + \left\{ 1 - \sum_{k=0}^{N} ON_{i,1}(k,t-1) \right\} \right] \end{aligned} \tag{2}$$

ここで，キューからの出力が $B(t)$ の確率でブロックされるとすると $\mu(k,t)$ は次式で示される．

$$\mu(k,t) = (1 - B(t)) \times ON_{0,1}(k,t-1) \tag{3}$$

ただし，式 (1)〜(2) は，入出力ステージと最上段ステージの場合を除く，中間ステージを対象とした式である(注2)．すべての式は $t \geq 1$ で成り立ち，$t = 0$ 時の各確率はすべて 0 である．

$\lambda_i(k,t)$ を与えて，これらの式を $\mu(k,t)$ について解くことにより，各クラスのパケットの遅延や廃棄率を求める．この式を代数的に解くことは非常に困難なため，代入計算を繰り返すプログラムを用いてこの式を解析した．解析の過程で各パケットの移動経過を記録すれば，遅延時間を算出可能である．また，平均した $\lambda_i(k,t)$ と $\mu(k,t)$ の比から廃棄率を求められる．解析結果については，**4.1** に述べる．

4. 評　　価

本章では，STP による優先キューイング制御方式の特性評価のために，**2.** で提案した廃棄制御手法 (i) (ii) と遅延制御手法 (iii) (iv) を組み合わせた 9 種類の構成の特性評価結果を示し，それぞれの特質を議論する．更に，最も良好な特性を示す構成と，既存方式とをそれぞれ遅延特性/廃棄特性における差別化について比較し，本提案方式の優位性を述べる．

4.1 評価方法

本評価では，多様な構成を許容できる提案方式に対して，その動作を柔軟に模擬して特性評価を行うために，STP 間のハンドシェイク信号の授受を基本イベントとする離散事象シミュレータを作成した．

まず，本シミュレータによる評価の信頼性を確認するために，前章に述べたマルコフ連鎖モデルによる解析結果との比較を行った．比較条件を合わせるために，本シミュレータの Send 信号及び Ack 信号の伝搬時間，並びにパケットの移動時間は前章と同様とする．

図 6 に，本シミュレータのパケット移動操作の一例を示す．各ステージ上のパケットは，前方段やバイパス先が空いていれば移動し，空いていなければ待つ．ただし，バイパス先への移動と復路側での移動が競合する場合は，各パケットの優先度に基づき動作が決定される．ここで，$k_i j$ は k_i クラスの j 番目のパケットを意味し，i の値が大きいほど優先度が高く，優先的に出力される．

（1） $k_0 2$ は，バイパス先への移動が競合する $k_0 1$

(注2)：入出力ステージから最上段のステージまで含めた，折返し型 STP 全体を表す一般化した状態の確率については，付録に示す．

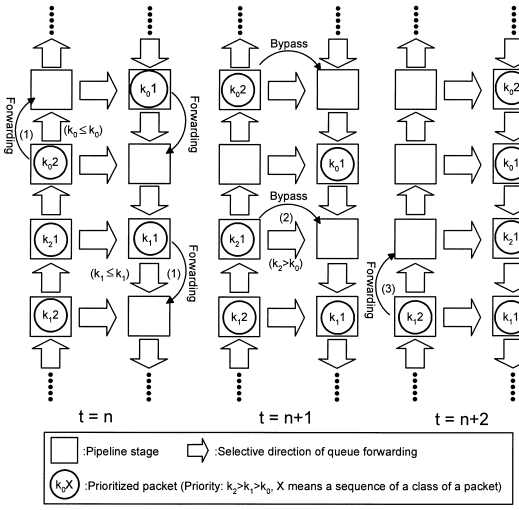

図 6　離散事象シミュレーションモデルにおけるパケット移動の一例
Fig. 6　An example of packets movement on the discrete events simulation model.

より優先度が高くないため，前方段に移動する．また，$k_1 1$ は，$k_1 2$ より優先度が低くないため，前方段に移動する．($t = n \rightarrow t = n+1$)

（2） $k_2 1$ は，バイパス先への移動を優先させ，競合する $k_0 1$ より優先度が高いため，バイパスする．($t = n+1 \rightarrow t = n+2$)

（3） $k_1 1$ パケットが移動しないため，一部詰まったパイプライン内においても，$k_1 2$ パケットは前方段が空いているため可動である．したがって，$k_1 2$ パケットに続くパケットは $t = n+3$ 以降可動となる．

本シミュレータは，（3）のようにふくそう時でも，空きステージがあればパケットが移動し，ある程度処理が継続できるエラスティック性を包含したシミュレーションが可能である．

提案方式は，キューの成長/縮退過程，及び，負荷条件によって，特性が異なると予想される．このため，初期状態からキューが成長し，最大キュー容量に達するまで入力を続け，その後，キューが消滅するまでの平均遅延と廃棄率特性を観測するものとした．更に，ふくそうのため，出力ポートの競合や出力バッファあふれを生じ，瞬間的にキュー出力できない確率を，出力帯域の閉そく率 $B(t)$（出力閉そく率）と呼び，これを 0.1〜0.9 まで変化させ，相対的な優先制御が要求される DiffServ の AF クラス [14] を想定して，優先度が 3 クラス（$k = 0, 1, 2$）のパケットを交互に順に入力して，クラスごとに特性を計測した．ここで，出力閉そく率が 0 である場合，入力帯域と出力帯域は等しいものとする．

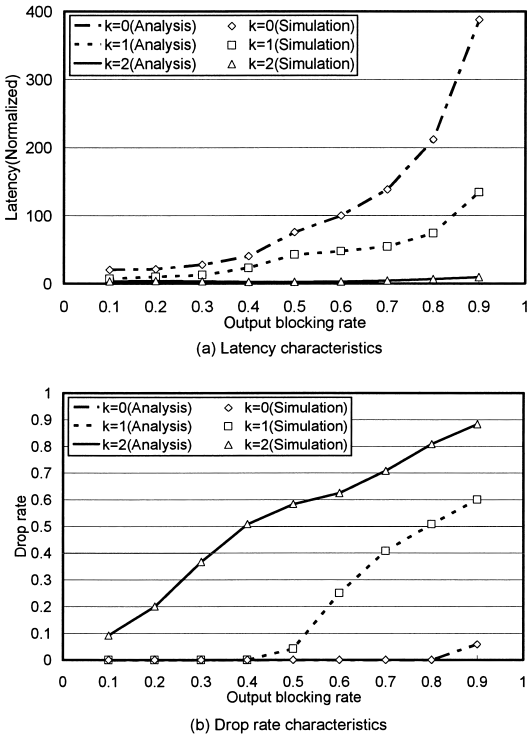

図 7　理論解析とシミュレーション結果の比較
Fig. 7　A comparison of analysis and simulation.

図 7 は，往路/復路パイプライン段がともに 100 段（$i = 0$〜99）で，事前廃棄率 $D_A(k, q(k,t)) = 0$，入力ステージが $[0,0]$ 段（$k = 0, 1, 2$），廃棄ステージが，$[9,0]$ 段（$k = 2$），$[49,0]$ 段（$k = 1$），$[99,0]$ 段（$k = 0$）の場合のキューイング遅延特性と廃棄率特性の比較結果を示している．ただし，入力パケットは，最小サイズの IPv4 パケットを用い，投入間隔を，ハンドシェイク手順が連続して行われる十分短い間隔とした．そして，キューイング遅延時間は入力パケットの投入間隔の最小値を 1 として正規化している．他のいくつかの条件でもシミュレーション評価と解析結果は一致しており，作成したシミュレータの信頼度は充分であると判断した．

よって，以降の特性評価では本シミュレータを用いた．比較評価においても本シミュレータに既存方式を実装し，提案方式の遅延特性/廃棄特性を比較した．

4.2 特性評価

QoS 評価項目を，遅延特性（平均遅延）と廃棄特性（廃棄率），遅延分散特性（遅延分散），帯域差別化特性（帯域差），の四つとし，これらの特性に対する目標値をバランス良く実現することを指標として，**2.** に述べた各制御手法を組み合わせた 9 種類の構成について，その特性を評価した．なお，これらの特性はパケットの順序保障を前提とし，順序逆転したパケットはすべて廃棄するものとし，各構成におけるパケットの順序逆転率についても評価対象とした．評価条件の，パイプライン段数，クラス，出力閉そく率の変化範囲については図 7 と同様とし，入力パケットは，入力間隔を同様の条件とし，キューイング機構が過負荷状態に達し，一定時間経過するまで投入するものとした．また，この入力パケットの各クラスの構成比を均一とし，かつ同一クラスのパケット間隔をランダムにした．

この評価条件下で，各目標値を次のように設定した．

– 平均遅延：400 以下(注3)，及び差別化可

– 廃棄率：差別化可

– 遅延分散：各クラスの分散値が 20000 以下(注4)

– 帯域差：廃棄率の低いクラスほど占有帯域が高いこと，及び中廃棄率のクラスはほぼ占有帯域を変化させずに維持できること

– 順序逆転：順序逆転したパケットの廃棄が，廃棄率の差別化に影響しないこと

これらの目標のうち，差別化可は必須の目標とする．

まず，各制御手法におけるパラメータの影響並びに適切な値を調べるために，シミュレータを用いて事前評価した結果について考察する．

（i） 内部廃棄制御：廃棄ステージ

キューイング機構内のすべてのパイプラインステージを有効に活用するためには，$k = 0$ クラスの廃棄ステージは $[99, 0]$ 段が望ましい．その他のクラスの廃棄ステージは，できるだけ下部に設けた方が，順序逆転が軽減される．これは，クラスごとのパケットの動きが抑制され，同一クラスのパケットの順序が入れ換わりにくくなるためと思われる．ただし，廃棄ステージの位置がキューの入出力口に近すぎると，深くキューイングできないため，ふくそう時に廃棄率が上昇する．遅延制御を組み合わせる場合は，クラスごとのバイパスステージ BS が設けられ，廃棄ステージがバイパスできる上限ステージとなる．このため，各 BS の範囲が重複しないように区分して設定でき，廃棄ステージをそれほど下部に設けなくても，クラスごとの遅延特性が顕著になり，明確に差別化ができる．これは，区分化により，同一クラスに属するパケットの動作を均質化できるためである．このため，遅延制御を組み合わせて廃棄ステージの位置を調整すると，廃棄率と順序逆転の低減により効果がある．

具体的には，最も遅延の大きい $k = 0$ クラスの BS と 2 番目に遅延の大きい $k = 1$ クラスの廃棄ステージを隣接させずに，間を空けると順序逆転及び廃棄率の低減に効果があることが分かった．この理由を以下に考察する．

$k = 0$ クラスのパケットは，廃棄されにくいため，パイプラインステージの上部に滞留する傾向にある．このため，$k = 1$ クラスのパケットは，パイプライン上部でバイパスしにくくなり，廃棄ステージで廃棄されやすくなる．もし，パイプライン上部で $k = 1$ クラスのパケットが $k = 0$ クラスのパケットをバイパスすると，復路ステージの前方にも，$k = 0$ クラスのパケットが存在する可能性が高い．この際，先にバイパスしたステージより下部のステージで別の $k = 1$ クラスのパケットが，$k = 0$ クラスのパケットをバイパスし，$k = 1$ クラスに順序逆転を生じる可能性がある．したがって，$k = 1$ クラスのパケットを上部のパイプラインステージに移動しないように，廃棄ステージを低めに設定すると，このような状況が起こりにくくなり，廃棄率や順序逆転現象が改善される．

以上より，$k = 1$ クラスの廃棄ステージを，$[44, 0]$ 段〜$[49, 0]$ 段，$k = 2$ クラスでは $[4, 0]$ 段〜$[9, 0]$ 段程度に設定することが望ましいことが分かった．

（ii） 事前廃棄制御：クラス別キューイングしきい値

廃棄率が高いクラスほど小さくすると，廃棄率の差別化に有効であるが，遅延の差別化にはあまり寄与しない．ただし，各クラスのしきい値の合計を小さくすると，遅延も全体的に減少する．全般に合計値は 60〜70 程度が望ましいことが分かった．この理由は，キューイング機構への過剰なパケット流入を抑制すると，キューイング機構内でパケットが円滑に移動できるためと考えられる．

（iii） クラス別入力段分離法：入力ステージ

事前廃棄制御のみを適用する場合，入力ステージの

(注3)：**4.1** の条件で正規化した値．後述の比較評価のため，WFQ 方式を試行した結果，最も低遅延のクラスでも 400 以上（出力閉そく率 0.9 のとき）であることが分かっている．

(注4)：正規化した遅延に基づく値．（注 3）同様に試行の結果，最も遅延分散の小さなクラスで 40000 以上（出力閉そく率 0.9 のとき）となり，この半分の値を目標とした．

ステージ間隔が大きい方が廃棄特性が改善されることが分かった．しかし，全般的に特性は悪い．この理由は，入力ステージへの入力パケットと，キューイングされ前方段に送られるパケットの競合によると考えられる．内部廃棄制御を適用する場合は，$k = 1$ クラスの BS が広くとれるように入力ステージを設定するほうが望ましく，廃棄ステージの前方段を入力ステージにするとより特性が良くなる．この理由は，内部廃棄により，前述の入力ステージでのパケットの競合を解消でき，$k = 1$ クラスが，廃棄されにくい $k = 0$ クラスの滞留の影響を回避できるためであると考えられる．クラス別の入力ステージは，廃棄ステージが設定される場合，その前方段とし，$[0, 0]$ 段 $(k = 2)$，$[5, 0]$ 段〜$[20, 0]$ 段 $(k = 1)$，$[50, 0]$ 段〜$[80, 0]$ 段 $(k = 0)$ が望ましいことが分かった．

（iv） 優先クラスリマーク法：バイパス下限段とリマーク用しきい値

クラス別のバイパス下限段は，内部廃棄の場合，既に廃棄ステージの説明で述べたように，低めのステージに設定し，最も遅延の大きいクラスについては間を空けて設定する方が特性が良い．しかし，事前廃棄の場合は，最も遅延の大きいクラスのバイパス下限段を，更に下部側に設定し，他のクラスのそれを調整した方が遅延分散を抑制できる．この理由は，キューイング機構内でパケットが廃棄されないため，早くバイパスして外部に出力される方が，全体の遅延や遅延分散を抑制できるためと考えられる．

また，リマーク用のクラス別キューイングしきい値は，パケットの挙動に大きな影響を与える．この値が大きすぎると順序逆転を多発させる傾向がある．リマーク用しきい値は，制御手法の組合せにもよるが，おおむね 20 パケット程度に設定すると，順序逆転を避けながら，低負荷時の最短経路の活用を行えることが分かった．

以上の各制御手法のパラメータに関する考察に基づいて，適切なパラメータを用いた 9 種類の優先キューイング制御方式の特性評価を行った．前述の QoS 評価項目の目標値を基準とし，基準を満たし最も特性の良い場合を○（3 点），それ以外でいずれかの基準を満たす場合を△（2 点），基準を満足できない場合を×（1 点）として三段階評価を行い，これらを合計したものを総合評価とした．この結果を表 1 に示す．

表 1 の評価結果より，事前廃棄制御のみの場合を除けば平均遅延が安定していることが分かる．これは，

表 1 優先キューイング制御方式の総合評価結果
Table 1 Overall evaluation results of proposed schemes.

廃棄制御	遅延制御	平均遅延*	遅延分散*	廃棄率	帯域差	順序逆転	総合評価**
内部廃棄	なし	△ (792)	△ (15018)	△	△	×	9
	入力段	△ (754)	△ (11668)	△	×	×	8
	リマーク	△ (648)	△ (6815)	×	×	○	9
事前廃棄	なし	× (不可)	× (26604)	△	△	×	7
	入力段	× (不可)	△ (17922)	△	△	×	8
	リマーク	× (不可)	△ (12764)	△	△	×	8
内部廃棄と事前廃棄	なし	△ (411)	△ (5064)	△	△	×	9
	入力段	△ (380)	△ (3499)	×	×	×	7
	リマーク	○ (370)	○ (3415)	○	△	△	13

* 括弧内の数値：**4.1** の条件で正規化した各評価結果の参考値．不可：差別化不可
** ○：3 点，△：2 点，×：1 点とした合計値

提案方式が，低遅延で遅延の差別化を行えるキューイング特性を有していることを裏づけている．事前廃棄のみ適用した場合の平均遅延は，差別化が困難であり，クラス間の差もほとんどないことが分かった．このため，事前廃棄だけではキューイング遅延に関する差別化が難しいと考えられる．これは遅延分散の特性が悪い要因でもある．ただし，事前廃棄制御は内部廃棄制御と組み合わせると，副次的な効果を生むことが評価結果から分かる．

遅延制御別に遅延分散を見ると，優先クラスリマーク法の場合の特性が最も良い．これは，クラスごとに BS が設定されるため，クラスごとのパケットの動作が均質化するためと考えられる．クラス別入力段分離法においても BS は定義されている．しかし，もともと同一の入力口から入力されたパケットが，各 BS に振り分けられ，その後復路側ステージで合流する優先クラスリマーク法とは異なり，クラス別に入力段を分離して入力されるこの手法の場合，復路側ステージの合流時に競合を起こしやすくなる．これが遅延分散を大きくする原因と考える．

次に，組み合わせた廃棄制御別に遅延制御の効果を見ると，内部廃棄や事前廃棄を単独で遅延制御に組み合わせても，総合的な QoS を向上できないことが分かる．

内部廃棄制御は，クラスごとに異なる廃棄ステージを指定するため，簡易に廃棄率とキューイングの深さを差別化でき，同時に基本的な遅延の差別化も行える．しかし，これに遅延制御を組み合わせるとキューイング機構内のパケット分布に偏りが生じ，キューイング過程でクラスごとに廃棄する内部廃棄制御の利点を活かせない状況が生じる．この影響は，クラス別入力段分離法を組み合わせた場合の廃棄特性に顕著に現れる．この手法でいずれのクラスの BS も均等にした場合，パケットが入力してからほぼ同じタイミングで廃棄ステージに到達することになり，内部廃棄制御では廃棄率の差別化が難しい．したがって，不均等に BS を設定する方が廃棄特性が良くなる．優先クラスリマーク法においても，バイパス範囲が指定されるため，遅延制御を行わない場合に比べ，高ふくそう時に廃棄率の低いクラスのパケット廃棄率が上昇し，差別化できない場合が起こる．

一方，事前廃棄制御は，キューイング機構内への過剰なパケット流入を防ぎ，本提案方式の特長であるキューイング機構内でのパケットの自律可動性を補償する．このため，高ふくそう時でもキューイング機構内で優先度に応じた差別化を行えることが期待される．ただし，優先度別に流入パケット数を制御できても，キューイングの深さの差別化はできない．特にクラス別入力段分離法では，入力したパケットとキューイングしたパケットが競合する場合があり，遅延や廃棄率の特性に悪い影響を与え，遅延変動を伴う．したがって，事前廃棄制御だけでは，遅延分散の抑制や遅延の差別化が難しい．

以上の議論より，内部廃棄や事前廃棄だけでは QoS 特性を全般的に満足することができない．より厳密に差別化するには，遅延制御とともに，内部廃棄制御と事前廃棄制御を組み合わせる構成が望ましいといえる．この結論は，表 1 の総合特性評価の結果にも現れており，優先クラスリマーク法による遅延制御に加えて内部廃棄制御と事前廃棄制御を組み合わせて適用した構成が総合的に最も優れている．この構成では，クラスによるバイパス範囲の指定が，遅延の揺らぎを抑制し，リマーキング処理による最短経路の活用が平均遅延も抑制する．また，バイパス範囲が指定され，パケットの可動性が制限される欠点を事前廃棄制御によって補えるため，遅延制御と廃棄制御を相互に効果的に活用できる構成であると考える．

4.3 既存方式との比較評価

特性評価の中で最も優先制御に優れたキューイング制御方式の遅延特性を，帯域割当の重みにより遅延の差別化を容易に行える WFQ [15] と比較した．ただし，WFQ の各キューには，キューイング遅延を低減させるため，RED が組み合わされているものとする．廃棄特性の比較対象としては，WFQ は本来廃棄制御方式でなく，各キューの Drop Tail に依存した固定的な廃棄特性を示し，妥当でない．このため，RED の廃棄パラメータをクラスごとに異なるように設定して，優先度に応じた廃棄率の差別化を行える WRED を用いた．

この際，提案方式における内部廃棄制御の廃棄ステージは $[9,0]$ 段（$k=2$），$[49,0]$ 段（$k=1$），$[99,0]$ 段（$k=0$）であり，事前廃棄制御のクラス別キューイングしきい値は $(q(0,t),q(1,t),q(2,t)) = (45,15,5)$ である．また，優先クラスリマーク法における，バイパス下限段は $(k=0,k=1,k=2) = (80,10,0)$ であり，リマーク用しきい値は $(k=0 \to 1,\ k=1 \to 2,\ k=0 \to 2) = (20,0,0)$ である．

比較条件を合わせるため，WRED のキューバッファサイズは，提案方式のパイプライン段数に合わせた 200 パケットとし，WFQ の各キューバッファサイズは，200 パケットを 3 クラスで均等に分割した 66 パケットとしている．また，WRED の $k=0$ 相当クラスの max_{th} を，提案方式のクラス別キューイングしきい値の合計値とし，WFQ に組み合わせた RED の max_{th} は，この値の 1/3 とした．その他の RED パラメータについては，文献 [10], [11] を参考にして，$w_q = 0.002$ とし，$max_{th} = 3min_{th}$ を目安に試行し，最も特性の良かったものを適用した．具体的には，WRED の $k=0$ に相当するクラスでは，$(min_{th}, max_{th}, max_p) = (25, 65, 0.02)$，$k=1$ 相当クラスでは，$(min_{th}, max_{th}, max_p) = (15, 25, 0.1)$，$k=2$ 相当クラスでは，$(min_{th}, max_{th}, max_p) = (5, 15, 0.3)$ とした．WFQ に組み合わせた RED では，$(min_{th}, max_{th}, max_p) = (7, 22, 0.02)$ とした．また WFQ の帯域割当の比が，各クラス遅延にほぼ反比例することから，提案方式の各クラスの BS 経路の平均長を参考にして，$k=0, k=1, k=2$ 相当クラスの帯域割当比を，それぞれ $1:3:9$ とした．入力パケットのクラス構成比は，パケットの到着確率に合わせ，その他の評価条件は前節同様である．

図 8 に各優先クラスの遅延特性に関する比較結果

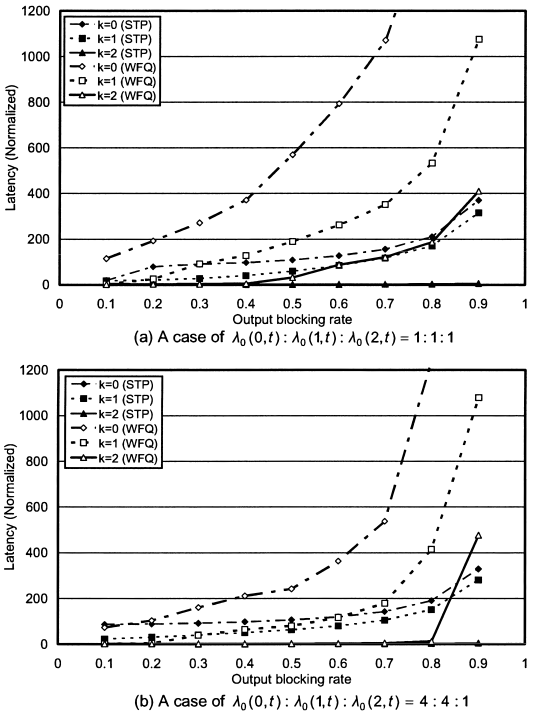

図 8　WFQ と提案方式の遅延特性の比較
Fig. 8　The comparison of latency characteristics between a WFQ and a proposed scheme.

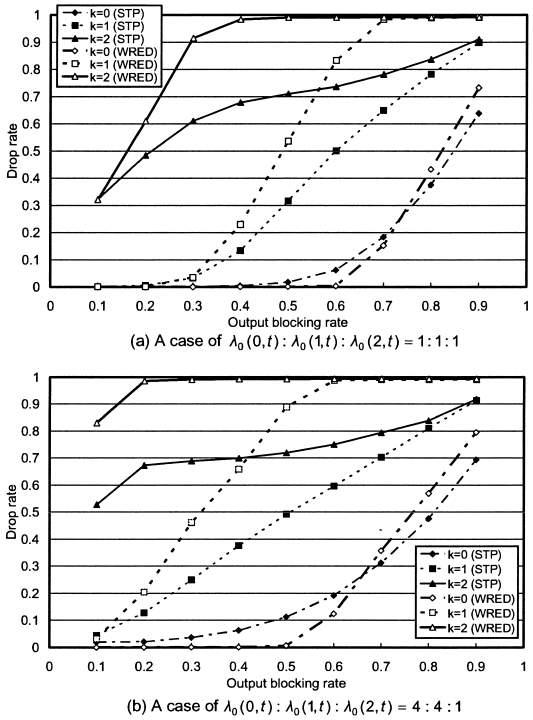

図 9　WRED と提案方式の廃棄特性の比較
Fig. 9　The comparison of drop rate characteristics between a WRED and a proposed scheme.

を示し，図 9 には廃棄特性に関する比較結果を示す．図 8 から，広範なふくそう状況において，本提案方式のキューイング遅延は小さく，かつ遅延の差別化が行われていることが分かる．このうち図 8 (b) は，優先出力されるパケットが少なく，WFQ 全体の平均遅延が小さくなる場合の結果である．この比較でも，提案方式は全般にキューイング遅延が小さいことが示されている．このことから，本提案方式のバイパスによる遅延抑制効果は，入力負荷バランスや出力閉そく率にかかわらず有効であるといえる．また，遅延の差別化によって低遅延を要求するアプリケーションの性能改善が期待される．

本提案方式の廃棄特性に関しては，図 9 から，低廃棄率のクラスの廃棄率特性を維持しながら，高廃棄率のクラスの，出力側の閉そく率に伴う廃棄率の上昇が抑制できていることが分かる．更に図 9 (b) より，高廃棄率のクラスのパケットが少なく，このクラスのパケットが廃棄されやすい状況でも，同様に廃棄率の上昇を抑制できることが分かる．

図 8 (a)，図 9 (a) の評価では，提案方式の投入フローのうち最大 7%のパケットの順序逆転が生じ，これらの廃棄を加味した特性を示し，比較している．図 8 (b)，図 9 (b) では，最大 0.5%順序逆転パケットを生じ，これを廃棄した特性で比較評価している．順序逆転パケットを廃棄しても，提案方式の特性には十分に優位性がある．

以上の評価結果を通して，本提案方式が既存の WFQ 方式に比較して，キューイングに伴う遅延を抑制し，既存の WRED 方式に比較して，出力側がふくそうしても廃棄を抑制できることを確認した．また，廃棄制御や遅延制御を組み合わせることによって，本来の低遅延特性に加えて，多様な差別化特性を示せることも明らかになった．

一方，実装面では，既存の WFQ を ASIC により高速実現する場合，スケジューリング可能な最大クラス数 N_c に依存して，仮想時刻の計算部，及び，出力部のソータのハードウェア規模が増大する．提案方式の場合，N_c はハードウェア規模の増加の主要因にはならない．しかし，WFQ のキューが単純なオンチップ RAM モジュールで実装可能であるのに対し，提案方式

の場合，総パイプライン段数がキューの総容量となるため，キューの容量分 N_q だけパケット転送制御回路や優先度比較回路が必要になる．一般には，$N_c \ll N_q$ であるため，例えば，N_c が 16 クラスで N_q が数十 k バイト以上になると WFQ に比べて提案方式の方がハードウェア費用を要する．しかしながら，今後の集積化技術の進展を考慮すれば多少のコスト増は無視できるため，従来の FQ や AQM では不可能であった柔軟な差別化が低遅延で実現できる利点をもつ提案方式に優位性があると考える．

5. む す び

本論文では，高機能 LSI モジュールの実現に適した自己タイミング型パイプライン機構 STP を応用して，DiffServ 向き優先キューイング制御方式を提案した．また，本方式が，従来のアクティブキュー管理方式 AQM やフェアキューイング方式 FQ に比べて，パケットの優先度に応じて，廃棄率及びキューイング遅延時間を柔軟に差別化すると同時に，ふくそう時の平均キューイング遅延を低減できる方式であることを，定量的評価を通して，示した．

本方式の実現可能性の検証のために，0.18 μm 標準 CMOS ロジックセルを用いて試作した LSI チップ [16] は，**2.1** に示した基本構成しか実装していないが，約 100 M パケット/秒のキューイング速度を達成しており，回路実装上の課題も解決済みである．

本論文では優先キューイング制御方式の基礎的な平均キューイング特性を高めるための，廃棄制御法，遅延制御法を示した．現在，更に TCP の各種フロー制御との親和性の評価や，エンドツーエンド遅延の低減に必須となるパケット整順機能の検討を行っている．これらに関しては，稿を改めて論じる予定である．

謝辞　本研究の実施に伴い，御協力頂いた通信・放送機構ギガビットネットワーク研究開発プロジェクトの関係諸氏に深く感謝致します．また，本研究の一部は，「文部科学省平成 15 年科学技術試験研究 RR2002（次世代モバイルインターネット端末の開発）」により行われました．

文　　献

[1] H. Lu and I. Faynberg, “An architectural framework for support of quality of service in packet networks,” IEEE Commun. Mag., vol.41, no.6, pp.98–105, June 2003.

[2] 阪田史郎，“インターネットにおける QoS 制御，” 信学誌，vol.85, no.10, pp.749–755, Oct. 2002.

[3] T. Aimoto and S. Miyake, “Overview of Diffserv technology: ITS mechanism and implementation,” IEICE Trans. Inf.& Syst., vol.E83-D, no.5, pp.957–964, May 2000.

[4] B.E. Carpenter and K. Nichols, “Differentiated services in the Internet,” Proc. IEEE, vol,90, no.9, pp.1479–1494. Sept. 2002.

[5] H. Terada, S. Miyata, and M. Iwata, “DDMP’s: Self-timed super-pipelined data-driven multimedia processors,” Proc. IEEE, vol.87, no.2, pp.282–296, Feb. 1999.

[6] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, “Analysis and simulations of a fair queueing algorithm,” Proc. ACM SIGCOMM ’89, pp.1–12, 1989.

[7] M. Shreedhar and G. Varghese, “Efficient fair queueing using deficit round robin,” Proc. ACM SIGCOMM ’95, pp.231–242, 1995.

[8] S. Floyd and V. Jacobson, “Link-sharing and resource management models for packet networks,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol.3, no.4, pp.365–386, Aug. 1995.

[9] 菅野政孝，日下貴義，松田栄之，木幡康弘，白鳥則郎，“IP ネットワークにおけるパケットスケジューリング方式 IPS の提案と評価，” 情処学論，vol.40, no.1, pp.66–75, Jan. 1999.

[10] S. Floyd and V. Jacobson, “Random early detection gateways for congestion avoidance,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol.1, no.4, pp.397–414, Aug. 1993.

[11] D. Clark and W. Fang, “Explicit allocation of best-effort packet delivery service,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol.6, no.4, pp.362–373, Aug. 1998.

[12] http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/software/ios111/cc111/wred.htm

[13] D. Lin and R. Morris, “Dynamics of random early detection,” Proc. ACM SIGCOMM ’97, pp.127–137, 1997.

[14] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, and J. Wroclawski, “Assured forwarding PHB group,” RFC2597, June 1999.

[15] A.K. Parekh and R.G. Gallager, “A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The single-node case,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol.1, no.3, pp.344–357, June 1993.

[16] M. Iwata, M. Ogura, Y. Ohishi, H. Hayashi, and H. Terada, “100 Mpps fully self-timed priority queue: FQ,” 2004ISSCC, Session 8.1, Feb. 2004.

付　　録

1. 折返し型 STP のマルコフ連鎖モデル

提案方式の折返し型 STP の各ステージ上のパケットの動作は，ある時刻における各ステージでのパケットの存在確率の離散時間推移により表現できる．この

パケットの存在確率は，一定の過去の状態によってのみ定まり，マルコフ過程として取り扱うことが可能である．提案方式の取り扱う優先クラス数が k_{tot} の有限値である場合，各ステージの状態は，いずれかのパケットが存在する k_{tot} 通りの状態と，いずれのパケットも存在しない 1 通りの合計，$k_{tot}+1$ 通りの整数個の状態空間がある．したがって，離散時間型有限マルコフ連鎖としてモデル化が行える．

以下に，最上段の往路側を $[m,0]$ 段，復路側を $[m,1]$ 段とする折返し型 STP の，$[i,0]$ 段及び $[i,1]$ 段（$0 \le i \le m$）における，一般化した状態の確率を求める式を記す．ここで用いる確率は，本文 **3.** で用いたものと同意である．

1.1 パケットの存在確率 ON

$[i,0]$ 段にパケットの存在する確率 $ON_{i,0}(k,t)$ の関係式は次式で表される．

$$\begin{aligned} ON_{i,0}(k,t) = \lambda_i(k,t) &\times \{1 - D_A(k,q(k,t))\} \\ &\times \{1 - Q_i(k,t)\} + Q_i(k,t) \\ &+ \{1 - S_i(k,t) - D_i(k,t)\} \\ &\times ON_{i,0}(k,t-1) \end{aligned} \tag{A·1}$$

ここで，$D_A(k,q(k,t))$ は，本文 **2.2** で述べた (ii) の事前廃棄制御による廃棄確率を表す．また，$D_i(k,t)$ は本文 **2.2** で述べた (i) の内部廃棄制御による廃棄確率であり，$Q_i(k,t)$，$S_i(k,t)$ はステージに依存する確率関数である．これらは，次のとおり表される．

$$D_i(k,t) = \begin{cases} 1 - p_i(k,t) \\ \quad ([i,0] \text{ 段が } k \text{ クラスの廃棄ステージ} \\ \quad \text{のとき}) \\ 0 \ (\text{それ以外のとき}) \end{cases}$$

$$Q_i(k,t) = \begin{cases} r_{i-1,i}(k,t) \times ON_{i-1,0}(k,t-1) & (i \ge 1) \\ 0 & (i = 0) \end{cases}$$

$$S_i(k,t) = \begin{cases} p_i(k,t) \\ \quad ([i,0] \text{ 段が } k \text{ クラスの廃棄ステージ,} \\ \quad \text{または，} i = m \text{ のとき}) \\ r_{i,i+1}(k,t) + p_i(k,t) \\ \quad (\text{それ以外のとき}) \end{cases}$$

また，$[i,1]$ 段での，パケットの存在確率 $ON_{i,1}(k,t)$ の関係式は次式で表される．

$$\begin{aligned} ON_{i,1}(k,t) = p_i(k,t) &\times ON_{i,0}(k,t-1) + R_i(k,t) \\ &+ \{1 - M_i(k,t)\} \times ON_{i,1}(k,t-1) \end{aligned} \tag{A·2}$$

ここで，$R_i(k,t)$，$M_i(k,t)$ はステージに依存する確率関数であり，次のとおりとなる．

$$R_i(k,t) = \begin{cases} r_{i+1,i}(k,t) \times ON_{i+1,1}(k,t-1) \\ \quad (i \le m-1) \\ 0 \ (i = m) \end{cases}$$

$$M_i(k,t) = \begin{cases} r_{i,i-1}(k,t) & (i \ge 1) \\ \mu(k,t) & (i = 0) \end{cases}$$

1.2 パケットのバイパス確率 p

パケットが $[i,0]$ 段から $[i,1]$ 段へバイパスする確率 $p_i(k,t)$ は次式で表される．N は k の最大値である．

$$\begin{aligned} p_i(k,t) = &\left\{ 1 - \sum_{l=k}^{N} ON_{i+1,1}(l,t-1) \right\} \\ &\times ON_{i,0}(k,t-1) \times \left[\sum_{k=0}^{N} M_i(k,t-1) \right. \\ &\left. + \left\{ 1 - \sum_{k=0}^{N} ON_{i,1}(k,t-1) \right\} \right] \end{aligned} \tag{A·3}$$

ここで，$M_i(k,t)$ は前節と同様である．

1.3 パケットの前方段移動確率 r

パケットが，往路側ステージの $[i,0]$ 段から前方段の $[i+1,0]$ 段へ移動する確率 $r_{i,i+1}(k,t)$ は次式で表される．ただし，$0 \le i \le m-1$ とする．

$$\begin{aligned} r_{i,i+1}(k,t) = &ON_{i,0}(k,t-1) \\ &\times \left[\sum_{k=0}^{N} \{S_{i+1}(k,t-1) + D_{i+1}(k,t-1)\} \right. \\ &\left. + \left\{ 1 - \sum_{k=0}^{N} ON_{i+1,0}(k,t-1) \right\} \right] \\ &\times \{1 - p_i(k,t) - D_i(k,t)\} \end{aligned} \tag{A·4}$$

ここで，$S_i(k,t)$ は **1.1** と同様である．

また，パケットが復路側ステージの $[i,1]$ 段から $[i-1,1]$ 段へ移動する確率 $r_{i,i-1}(k,t)$ は次式で表される．ただし，$1 \le i \le m$ とする．

$$\begin{aligned} r_{i,i-1}(k,t) = &ON_{i,1}(k,t-1) \times \left\{ 1 - \sum_{l=k+1}^{N} p_{i-1}(l,t) \right\} \\ &\times \left[\sum_{k=0}^{N} M_{i-1}(k,t-1) \right. \\ &\left. + \left\{ 1 - \sum_{k=0}^{N} ON_{i-1,1}(k,t-1) \right\} \right] \end{aligned} \tag{A·5}$$

ここで，$M_i(k,t)$ は **1.1** と同様である．

1.4 パケットの出力確率 μ

パケットが，パイプラインから出力される確率 $\mu(k,t)$ は次式で表される．

$$\mu(k,t) = (1 - B(t)) \times ON_{0,1}(k, t-1) \qquad \text{(A·6)}$$

ここで，$B(t)$ は本文 **3.** で用いた出力がブロックされる確率と同様である．

以上の式 (A·1)〜(A·6) は，$t \geq 1$ で成立し，$t = 0$ 時の各確率はすべて 0 である．

（平成 15 年 10 月 30 日受付，16 年 2 月 9 日再受付）

林　　秀樹　（正員）

昭 63 阪大・工・通信卒．平 2 同大大学院工学研究科博士前期課程了．同年日本テレコム(株)入社．平 14 から平 16 まで通信・放送機構高知通信トラヒックリサーチセンター研究員として出向．平 16 高知工科大大学院・工学研究科博士後期課程了．同年日本テレコム(株)情報通信研究所に復帰，現在に至る．博士（工学）．QoS 技術に関する研究に従事．情報処理学会会員．

岩田　　誠　（正員）

昭 61 阪大・工・電子卒．平 3 同大大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学．同年大阪大学工学部助手，平 9 高知工科大学情報システム工学科助教授，平 13 同教授，現在に至る．博士（工学）．平 11 から平 16 まで通信・放送機構高知通信トラヒックリサーチセンター研究フェロー．平 14 より東北大学電気通信研究所 IT21 センター客員助教授兼任．並列ネットワークプロセッサとそのソフトウェア環境の研究に従事．情報処理学会，IEEE 各会員．

寺田　浩詔　（名誉員）

昭 31 愛媛大・工・電気卒．昭 36 阪大大学院通信工学専攻博士課程了．同年大阪大学工学部助手，講師，助教授を経て，昭 51 教授，平 9 同大学定年退官，名誉教授．同年高知工科大学教授，平 13 同副学長，現在に至る．博士（工学）．平 9 より日本テレコム(株)情報通信研究所所長兼務．この間主として交換機などの実時間高度並列処理向きの言語・アーキテクチャの研究に従事．昭 63 本会業績賞，同年小林記念特別賞受賞．本会副会長などを歴任．平 9 より本会理事（企画室長）．平 13 より本会フェロー，同年エリクソン・テレコミュニケーション賞，平 15 本会功績賞，平 16 より本会名誉員，IEEE シニア会員，情報処理学会，映像情報メディア学会，ソフトウェア科学会，電気学会等各会員．

島村　和典　（正員）

昭 47 阪大・工・電気卒．昭 49 同大大学院工学研究科博士前期課程了．同年日本電信電話公社（現日本電信電話株式会社）入社．画像通信研究部長・NTT Berhad Director General 等を歴任．平 10 より，高知工科大情報システム工学科教授，現在に至る．博士（工学）．平 11 から平 16 まで通信・放送機構ギガビットネットワーク研究開発プロジェクトサブリーダ兼任．次世代インターネット技術・ディジタル画像通信技術・フルメディア通信アプリケーションの研究に従事．DAVIC Specification 1.0 個人貢献業績賞・画像電子学会論文賞受賞．映像情報メディア学会，情報処理学会，画像電子学会，IEEE 各会員．