

光パケット交換機のバッファ構成におけるトラフィック性能比較

Traffic-Performance Comparisons between Buffer Configurations
for Optical Packet Switches

村上 泰司*

Yasuji Murakami

Abstract

Asynchronous optical packet switching seems to be a suitable transport technology for the next-generation Internet due to the variable lengths of IP packets. Fiber delay lines (FDLs) are a well-known technique for achieving optical buffers, and various optical buffer architectures using FDLs have been proposed. These are generally classified into two types of structure: feed-forward (FF) or feedback (FB). In the FF buffers, optical packets are delayed at the output ports by passing through step-increasing-length multiple FDLs to avoid contentions, and in the FB buffers, optical packets are delayed by being fed back in re-circulating loop FDLs to avoid contentions. We report the detailed characteristics of optical FB buffers with the Post-Reservation (PostRes) policy and clarify the superiority of the FB buffers through simulations. For comparison, we also show the characteristics of FBSI (FB with step-increasing-length FDLs) and FF buffers.

1. はじめに

インターネットにおける容量制限の究極は、個別部品の帯域制限によって決められるのではなく、エネルギー消費制限や熱拡散制限によると言われている[1]。最近の研究では、光パケット交換機が電氣的交換機と比較して格段のスループット改善やエネルギー節約をもたらすものではない、と報告されている[2]。しかしながら、データ転送速度が上昇すると、光交換構成の方がエネルギー効率は高くなることも同時に示されている。

光部品における開発の進展が、光パケット交換機技術のブレークスルーをもたらし、光信号のまま蓄積と交換する全光パケット交換を利用することが、現在のインターネットにおける問題点を解決するものと確信している。インターネットにおける可変長 IP パケットに対応するためには、非同期光パケット交換が次世代インターネットの転送技術に必須である。

出力ポートでのパケット衝突を回避するためには光バッファが必要であり、光バッファ構成には多くの提案がある[3-8]。いずれも光ファイバ遅延線 (optical fiber delay lines : FDL) を利用する方法である。光バッファとしてみた場合、FDL は次のような特徴を持つ。(1) FDL はその長さに比例した一定量の蓄積時間しか得られない。FDL での蓄積時間は、光ファイバ長に比例するので、FDL 長の単位を遅延時間で考える。これを時間粒度

*大阪電気通信大学 情報通信工学部 通信工学科

表 1. パケット交換機におけるバッファの分類

バッファ位置		バッファ利用法		バッファ構造
入力待ち行列形 (input queued)		ポート別 (shared per port)		前進形 (feed-forward)
出力待ち行列形 (output queued)	⊗	ポート共有 (Shared per node)	⊗	後進形 (フィードバック形) (Feedback)
入出力待ち行列結合形 (combined input output queued)				

(time granularity) と呼ぶ.

(2) 衝突回避に間に合わなければ, パケットは廃棄される.

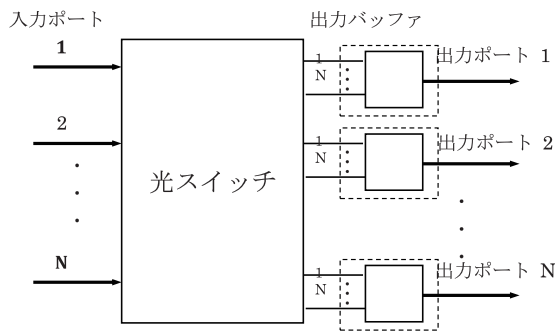
一般にパケット交換機の構成では, パケットスイッチに対するバッファの位置と接続のしかたにより, 表 1 のような分類が可能である. バッファ位置では, 入力側 (入力待ち行列形: input queued), 出力側 (出力待ち行列形: output queued), および入出力の両側 (入出力待ち行列結合形: combined input output queued) である[9]. 入力側に配置すると, 行列の先頭閉塞 (head of line blocking) によるスループットの低下が生じるので通常は出力側にバッファは配置される.

バッファの利用法では, 出力ポート別のポート専用バッファ (shared per port) とするか, またはポート共有 (shared per node) の大規模バッファとするかという選択がある. またバッファの構成では, 大きく分けて前進形 (feed-forward: FF) とフィードバック形 (feed-back: FB) に分類される. これら 3 つの分類における選択を組み合わせることで交換機が構成されるが, 当然それぞれ利点と欠点を持つ.

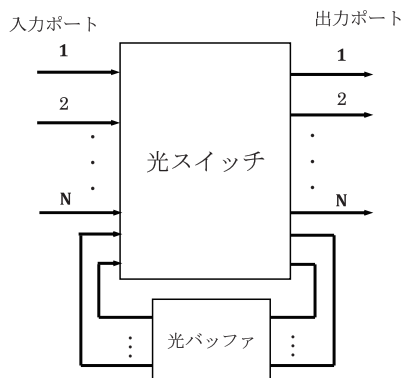
光パケットバッファに着目して, まずバッファ構造について述べる. 前進 (FF) 形では, 光パケットは出力ポートにて階段増加する長さを持つ複数の FDL により遅延させられる [3, 5]. 必要な遅延時間を実現する FDL に転送することにより, 出力時間差をつけ, 同時刻で同じ出力ポートに出力する光パケットどうしでの衝突をさけることが行われる. 多くの論文 [5, 10-15] により, FF 形光バッファの廃棄率と遅延時間が求められており, 既に一般分布のパケット長に対して精度の良い近似解法が得られている [16-17].

一方, フィードバック (FB) 形は, 出力にて衝突したパケットは周回ループにより一定時間遅延した後, 再度入力口に到着する構造である. このときの処理規則において, 入力にて周回するパケットを優先する PreRes (Pre-reservation scheme: 事前予約) 形と, 入力にて全て到着順に処理する PostRes (Post-reservation scheme: 予約なし) 形とが提案されている [4]. シミュレーションにより, RostRes 形を採用する方が, パケット廃棄率は小さいことが明らかにされている [4, 6].

表 1 に示すバッファ利用法に関して, 経済的な交換機構成を目指す目的で, 出力ポート共有形の FB バッファ利用法が提案され, 精力的な研究がなされている [8, 13, 18-19]. 提



(a) ポート別専有バッファ形



(b) ポート共有バッファ形

図 1. 光パケット交換機モデル

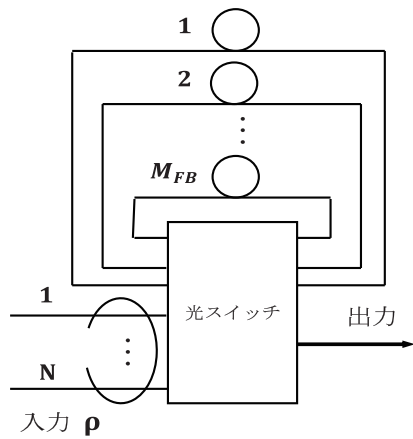
案された利用法では、1つの交換機内で、すべての出力ポート共有のフィードバック FDL が配備され、出力中のパケットに衝突して出力できないパケットの全てがこの共有バッファに転送される。この利用法は、出力ポート別に配備される専用バッファ利用法と同様に、出力待ち行列形に分類される。専用バッファ利用法と比較して、共有バッファ利用法は、当然コスト性能はよいであろう。ただし、1つの交換機を通過するすべてのパケットを同時に管理し運用する必要があるため、その制御は複雑となる。その点、専用バッファは出力ポートごとのパケット管理、運用となるので、制御は容易である。

一般に、FB 形における廃棄率と遅延時間に関する理論検討は十分とは言えない。シミュレーションによるもの[4, 6-8]、1ループにおける近似解[6]、および繰り返し計算によるもの[13, 18-19]などであり、多本ループにおける一般分布のパケット長でのバッファ特性は、未だ明らかではない。そもそも、待ち行列ネットワークにおいて、フィードバックル

ープの存在は、確率過程を複雑にして解析を困難なものとする[24, 25]。たとえば、最も単純な Jackson タイプの待ち行列ネットワーク、すなわち、フィードバックにある単一の M/M/1 システムにおいて、入力過程は Poisson 分布とはならない。したがって、その解析は、近似計算かシミュレーションによるものである。

本論文では、既発表[20]の内容に説明を加えて、シミュレーションにより FB 形光バッファの特性を詳細に解明し、その優位性を明らかにする。同じ遅延時間 D を持つ複数本の FDL 周回ループと光スイッチを、1出力ポートの光バッファとした出力待ち行列形光スイッチを考える。光バッファ出力での処理規則として、予約なし (PostRes) の到着順処理とする。比較のため、階段増加長 FDL を周回ループとした光バッファ (FBSI : feedback loop with step-increasing FDL) と階段増加長 FDL を遅延線としたフィードフォワード型光バッファ (FF) の特性を同時に示す。評価内容は、廃棄率と遅延時間である。

周回ループを用いた光バッファでは、周回ループ数に制限をつけることが必要とされて



(a) FB バッファ

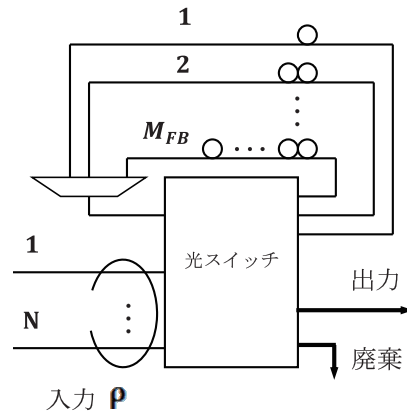
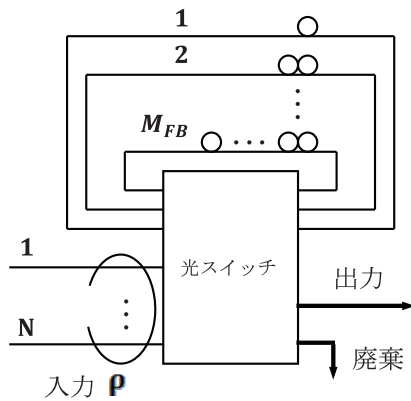
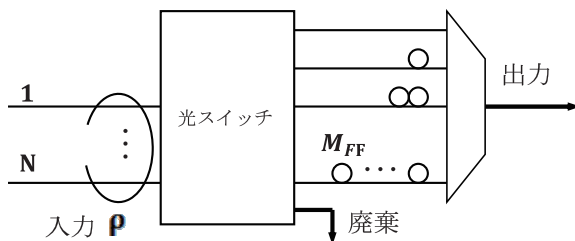


図 3. 光多重装置を用いた FBSI
バッファモデル



(b) FBSI バッファ



(c) FF バッファ

図 2. 光バッファ構造モデル

いる[21-23]. 光ループ内に光パケット信号が周回する間, 周回ループでの損失を補う光増幅器で発生する増幅された光雑音 (ASE : amplified spontaneous emission) と光スイッチにおける光漏話が蓄積されて, 信号の S/N 比が低下する. その S/N 比劣化が, 受光レベルを超えることを防ぐためである. その制限は, 各デバイスと伝送速度に大きく依存し, 2 から 30 回までの範囲で大きく変化することが報告されている[22]. 本論文では, 最初に周回制限を付けなくて, 周回制限のない純粋な特性をまず明らかにする. 次に, 周回制限による廃棄率の上昇結果を議論する. 少なくとも, 現在周回制限の適切な値は報告されておらず, その値はデバイスの性能によりあまりに大きく変動する. 将来における光デバイスの開発と改良が, 周回制限を緩和するものと期待している.

2. モデル

表 1 に示すバッファの分類において, バッファ位置を出力待ち行列とした構成例を図 1 に示す. 図 1(a)は, ポート別専有バッファ形パケット交換機の構成例である. N 個の入力

光ポートと N 個の出力光ポートとを接続する構成において、 $N \times N^2$ の非閉塞光パケットスイッチと各出力ポートに配置されるポート専用光バッファを配備している。図 1(b)は、ポート共有バッファ形パケット交換機の構成例である。フィードバック光ループの本数を M_{FB} とすると $(N + M_{FB}) \times (N + M_{FB})$ の非閉塞光パケットスイッチと共有バッファという構成となっている。ポート共有バッファ構成では、ハードウェア点数が削減されるためコスト性能はよいと考えられるが、交換機を通過するパケット全てを管理、運用する必要から、その制御アルゴリズムが複雑化する。本論文では、各出力ポート別の制御となるポート別専用バッファ構成に着目し、そのバッファ構造比較を行う。

研究する光バッファ構造モデルを、図 2 に示す。図 2(a)と(b)は周回ループ FDL を用いたフィードバック形光バッファを、(c)は階段増加長 FDL (step-increasing-length FDL) を用いたフィードフォワード型光バッファを示す。このうち、図 2(a)は、固定長 FDL 周回ループ (fixed-length FDL re-circulation loops) を持つ光バッファであり、図 2(b)と(c)は階段増加長 FDL を持つ光バッファである。階段増加長 FDL では、FDL 内を転送した光パケットどうしが出力で衝突しないように入力する FDL が選択される。したがって、図 2(b)の構成では、フィードバックループからの出力パケットはスイッチ入力の際には一本化されるため、多重装置を用いて入力ポートを 1 ポートとすることが可能である。図 3 は、図 1(b)と同じバッファ特性を持つもう一つの形態である。

3. 各バッファ構成とアルゴリズム

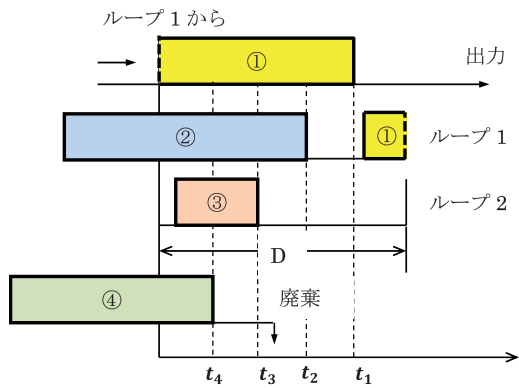
各光バッファの構成とパケット転送アルゴリズムは次のとおりである。

1) 固定長 FDL 周回ループバッファ (以下 FB と呼ぶ)

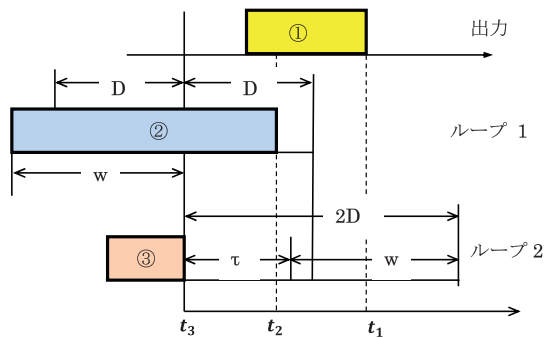
FB バッファは、 N ポートの入力、1 ポートの出力、 M_{FB} ポートの周回フィードバックループ、および 1 ポートの廃棄出力が $(N + M_{FB}) \times (2 + M_{FB})$ スイッチに接続される。 M_{FB} 本の周回ループは、すべてファイバ長 D の固定長 FDL である。ここで、 D は時間粒度であり、光ファイバ長を L とすると、 $D = nL/c$ (n : 光ファイバの実効屈折率、 c : 真空中の光速) となる時間単位の定数で定義する。

入力側では、入力 N ポートからの到着パケットと周回ループ M_{FB} ポートからの到着パケットともに、到着順に処理される。すなわち、予約なし手順 (PostRes) で処理される。出力側では、光パケットは、出力時点で出力が空いていればそのまま出力されるが、別のパケットが出力中のため塞いでいる場合には、周回ループに転送される。1 番目の周回ループより順に空いているループを探して転送されるが、 M_{FB} 本すべてが塞がれている場合は廃棄される。 M_{FB} 本の周回ループはすべて同じ長さであるので、この周回ループでのバッファ処理は到着順処理 (First-come first-service : FCFS) ということとなる。

予約なし手順 (PostRes) では出力したパケットごとに処理すればよいので、アルゴリズムは簡単であり、かつ周回ループバッファでは廃棄率が低いことが知られている [4, 6]。シミュレーションでは、最初周回回数制限を考慮しないで進める。すなわち、出力できない周回光パケットは、無限回ループを周回することが可能である。光信号の場合には周回するごとに光増幅による光雑音が重畳され受信限界に達することが想定されるので、特定



(a) FB バッファ



(b) FBSI バッファ

図 4. 2つの周回ループを持つ光バッファにおけるパケットフロー

iD ($i=1,2,\dots,M_{FB}$) となる階段状の遅延を持つ。光パケットの処理は、入力側、出力側ともに固定長 FDL 周回ループバッファと同じである。すなわち、入力側では到着パケット順に処理し、出力側では、出力、周回ループ、廃棄の優先順で転送する。ただし、周回ループにおける階段状の遅延設定により、周回ループの出力では各周回パケットどうしの衝突が起きないように転送される。したがって、図 3 に示すように、周回ループの出力から光スイッチに入力するポートでは多重装置により入力ポートを 1 つとすることが可能である。

周回ループで転送される光パケットでは、すでに周回ループを転送しているパケットのため待ち時間 w が必要なとき、(i) $iD \leq w < (i+1)D$ ならば $(i+1)$ 番目の周回ループに転送され、(ii) $M_{FB}D < w$ ならば廃棄される。したがって、各周回パケットには

$$\tau = \left\lceil \frac{w}{D} \right\rceil D - w,$$

の周回回数に達した光パケットは廃棄されるとした設定でのモデルが検討されている [6, 21-23] が、本研究は、まず周回回数制限を設定しない理想的な周回ループでの廃棄率、遅延特性比較を明らかにする。廃棄率に対する周回制限の影響は、第 5.2 節にて検討する。

図 4(a)は、 $M_{FB}=2$ の場合でのパケット転送の様子を示している。ループ 1 を転送したパケット①は、時刻 t_1 で出力されると、 t_2 で到着した新規パケット②は出力が塞がっているためループ 1 に廻り、さらに t_3 で到着した新規パケット③は出力とループ 1 が塞がっているためループ 2 に廻った。 t_4 にて到着した新規パケット④は、出力、ループ 1,2 すべてふさがれているため廃棄された。

また、ループ 1 とループ 2 では FDL 長が同じであるため、パケット②と③は入力時と同じパケット間隔を保持したままでループを出力する。

2) 階段増加長 FDL 周回ループバッファ (以下 FBSI と呼ぶ)

FBSI バッファにおける M_{FB} 本の周回ループ FDL では、 i 番目の FDL で

の空期間 τ が付加される。ここで、 $\lceil x \rceil$ は、 x を超える最小整数を意味する。

図 4(b) に、パケット転送の様子を示す。周回ループは、遅延長 D のループ 1 と $2D$ のループ 2 の 2 本としている。 t_1 で到着したパケット①は出力が空いていたので無事出力した。 t_2 で到着したパケット②は、出力がパケット①で塞がっているため、ループ 1 に転送した。このとき、 t_3 で到着したパケット③は待ち時間 w が $D < w < 2D$ となるため、ループ 2 に転送されるが、空期間 τ が付加される。

なお、階段増加長 FDL 周回バッファは、総バッファ長が $1/2 M_{FB} (M_{FB} + 1) D$ であるため、固定長 FDL 周回バッファに較べて $1/2 (M_{FB} + 1)$ 倍の長さとなっている。遅延時間の比較の時には注意する必要がある。

3) 階段増加長 FDL 前進バッファ (以下 FF と呼ぶ)

FF バッファにおける M_{FF} 本の階段増加長 FDL では、 i 番目の FDL で iD ($i = 1, 2, \dots, M_{FF}$) となる階段状の遅延となる。出力が塞がっているときの FDL の選択は階段増加長 FDL 周回ループと同じであり、待ち時間 w が必要なとき、(i) $iD \leq w < (i+1)D$ ならば $(i+1)$ 番目の FDL に転送され、(ii) $M_{FF}D < w$ ならば廃棄される。この前進バッファに対する、廃棄率はよく研究されており精度のよい近似計算法が得られている [16-17]。

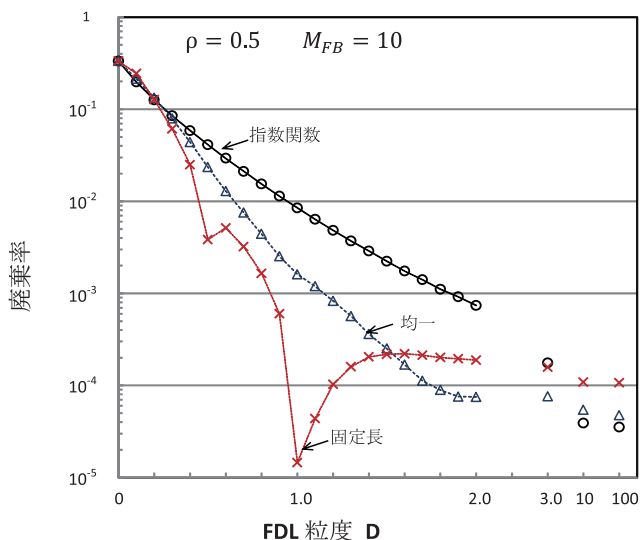


図 5. $\rho = 0.5$, $M_{FB} = 10$ における FB バッファ

の廃棄率 (○, △, および×印はそれぞれ、パケット長が指数関数, 均一, および固定長分布関数の場合を示す)

4. シミュレーション結果

図 2 の各光バッファモデルに対するシミュレーションを、最大 10^8 パケットを用いて行った。したがって、廃棄率シミュレーションの結果は 10^{-8} 以上の範囲である。シミュレーション手法は付録に記載した。

入力パケットは Poisson 到着を仮定し、パケット長分布に 1) 指数関数, 2) 均一, および 3) 固定長の各形態を用い、各分布の平均パケット長を 1 として規格化した。したがって、負荷 ρ は、そのまま到着率 λ となる。

4.1 FDL 粒度 D 依存性

図 5 に、負荷 0.5, $M_{FB} = 10$ における FB バッファのパケット廃

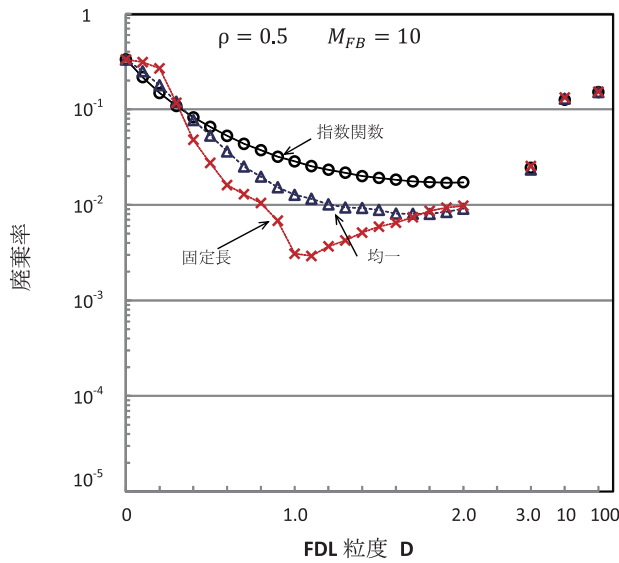


図 6. $\rho = 0.5$, $M_{FB} = 10$ における FBSI バッファの廃棄率 (記号は図 5 と同じ意味である)

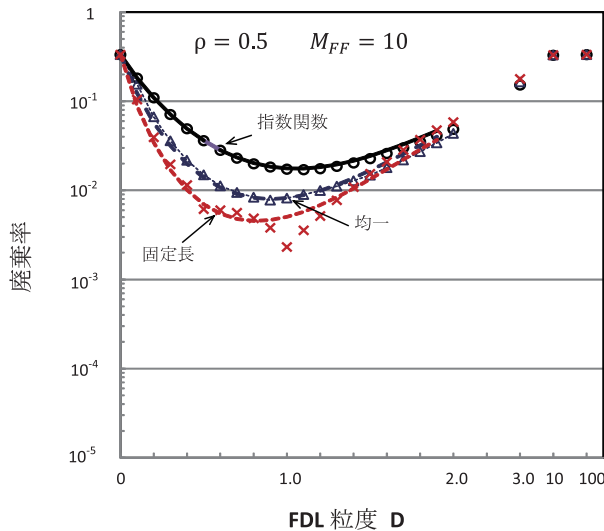


図 7. $\rho = 0.5$, $M_{FF} = 10$ における FF バッファの廃棄率 (記号は図 5 と同じ意味である)

FDL ともに固定長分布では $D=1.0$ で急激な落ち込みが見られる。図 7 の太線は、パケットの仮想待ち時間を指数関数と仮定して行う近似計算において、4 次項までを考慮して求めた理論値を示す[16-17]。固定長分布の $D=1.0$ を除いた領域でシミュレーションとよく一致する。しかしながら、固定長における $D=1.0$ での落ち込みを説明できていない。

棄率を、FDL 粒度 D に対して示す。 D は 0 から 2.0 まで、および 3.0, 10, 100 で変化させた。到着パケットのパケット長分布が、 \circ は指数関数分布、 \triangle は均一分布、および \times は固定長分布となっている場合を示す。

図 5 より、指数関数、均一分布では D の増加とともに廃棄率は単調に減少するが、 D が 3 以上では 5.0×10^{-5} 近傍にて飽和している。飽和する理由は、 D の増加によって遅延時間が長くなるだけであり、空期間が増えることはないためである。この点は、 D の増加により平均 $D/2$ 空期間が増加する FBSI, FF バッファとの違いとなる。一方、固定長分布では $D=1.0$ で廃棄率の急激な減少が見られ、 10^{-5} 近傍にまで達している。

図 6 と 7 は、負荷 0.5, $M_{FB}=M_{FF}=10$ における FBSI バッファと FF バッファの廃棄率をそれぞれ示す。FBSI および FF バッファでは、ともに指数関数分布と均一分布では D の変化に対して廃棄率は穏やかな変化をしており、 10^{-2} 近傍の最低値となっている。これは、 D の増加によりパケットの空期間が増大するためである。FBSI では D の増加とともに廃棄率は減少するが、2.0 近傍で飽和し、3 以上では逆に増加する。FF では、 $D=1.0$ 近傍で廃棄率は最低値となり D の増加とともに増加する。しかしながら、FBSI、

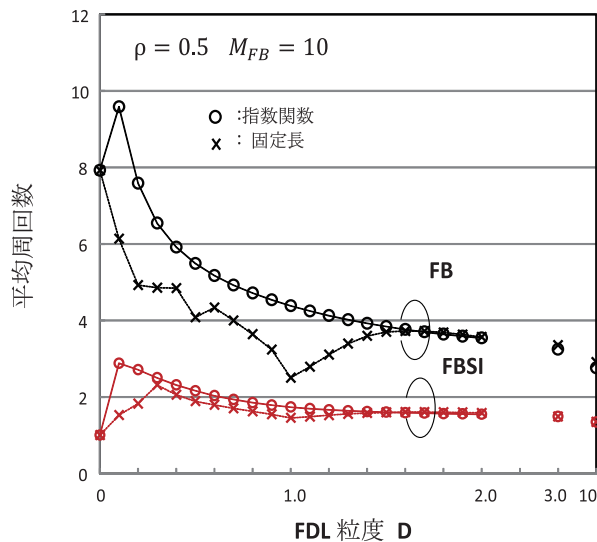


図 8. $\rho = 0.5$, $M_{FB} = 10$ における平均周回数
(記号は図 5 と同じ意味である)

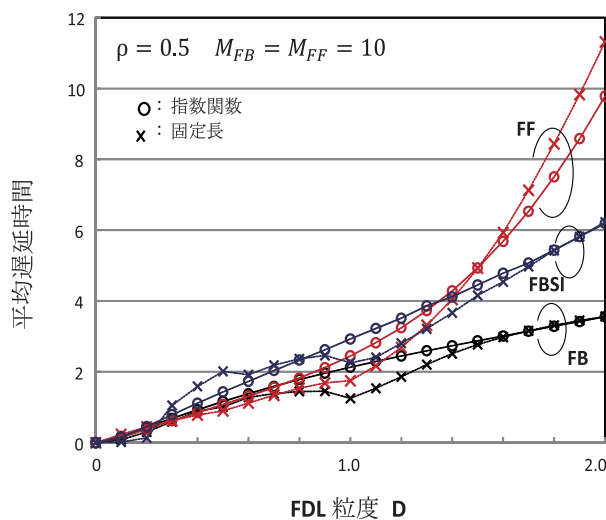


図 9. $\rho = 0.5$, $M_{FB} = M_{FF} = 10$ における平均
遅延時間 (記号は図 5 と同じ意味である)

図 5-7 から、廃棄率の観点では FB が最も優れており、FBSI と FF に比較して 10^{-2} 程度低い廃棄率が得られることと、固定長では $D=1.0$ にて急峻に減少するという特異な現象が存在することが結論付けられる。

図 5-6 の廃棄率を得た状態において、周回ループに転送された光パケットの平均周回数を図 8 に示す。光パケットは廃棄されたものを含む。均一分布は指数関数とほぼ同じ結果であるので、指数関数と固定長のみを示した。FB では、 D の増加とともに平均周回数は減少するが 4 周程度で飽和している。FBSI では、 D に広い範囲にわたり 2 周以下となり飽和している。この場合、周回制限が 10 周程度であれば廃棄率に大きく影響を及ぼすことはない。FB の平均周回数が FBSI のそれより倍近いことは、バッファとしての能力が 2 倍あり、このため廃棄率が格段に低いと考えられる。

図 9 は、図 5-7 と同じ条件における通過パケットの平均遅延時間を示す。光スイッチ自身での遅延はないとしているので、遅延はすべて FDL によるものである。時間単位は、平均パケット長が通過するのに要する時間である。例えば、40Gbps で転送される平均長 1000byte のパケットでは、

0.2 μ sec となる。エンド-エンド間で最大 100 台の光スイッチの存在を仮定すると、光スイッチ全数による転送遅延は 20 μ sec となる。この場合、エンド-エンド間での全バッファ転送遅延を 1msec 以下とするための要件は、遅延を 50 以下とすることであり、十分に余裕がある。

図 9 では、 D の増加とともに、平均遅延時間は長くなるが、FB、FBSI 及び FF のうち、FB の平均遅延が最も小さい。周回回数が多いにもかかわらず、遅延が小さいのは、総バ

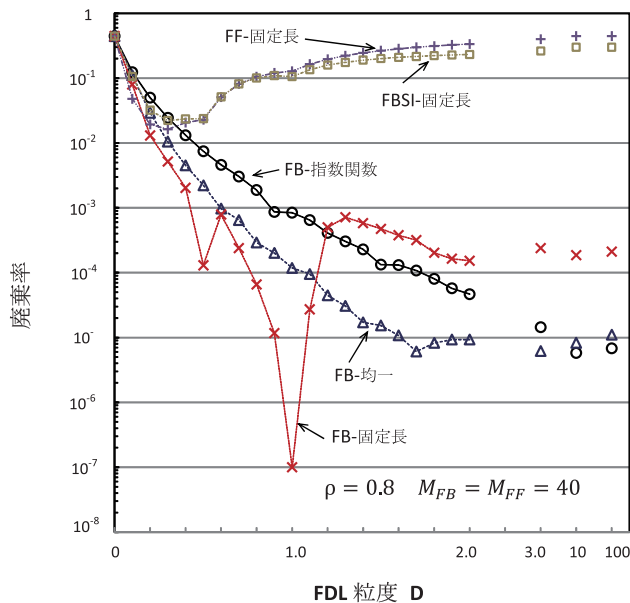


図 10. $\rho = 0.8$, $M_{FB} = M_{FF} = 40$ における廃棄率 (記号は図 5 と同じ意味である)

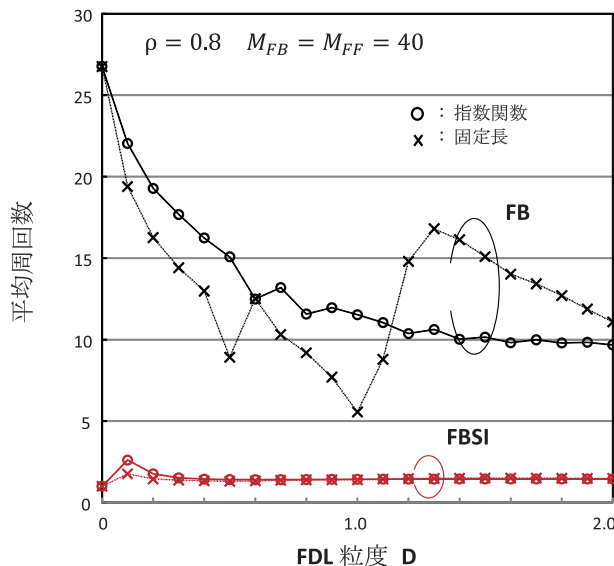


図 11. $\rho = 0.8$, $M_{FB} = M_{FF} = 40$ における平均周回数 (記号は図 5 と同じ意味である)

ッファ長が短いせいである。いずれの場合も、 D が 2.0 以下であれば、平均遅延時間は 12 以下である。

負荷を 0.8, ループ数やバッファ数を 40 とした場合の廃棄率を、図 10 に示す。比較のため、FBSI と FF の場合は固定長分布のみを示した。

図 5 にて示された各バッファの特徴がより強調されて、図 10 に現れている。すなわち、1)FB における指数関数と均一分布では、 D の増加とともに廃棄率は減少し、 D が 2 以上で飽和している、2)FB の固定長では $D=1.0$ で廃棄率の急峻な落ち込みが見られる、3)FF と FBSI の固定長分布では、 $D=0.25$ 近傍にて廃棄率は最低となり、 D の増加と共に増加する。FF では空期間がパケットに付着するため、負荷 0.8 の場合、 $D=0.5$ にて実効負荷が 1 となる[3, 10]。したがって、 D が 0.5 以上では負荷が 1 以上となる過負荷状態である。

廃棄率における FB と FF, FBSI との差は明らかである。FF と FBSI では最低で 2×10^{-2} であるのに対して、FB では D が 1.0 以上にて 10^{-4} の廃棄率に達している。とくに、固定長では $D=1.0$ の落ち込みでは 10^{-7} に達している。

図 11 は、図 10 を得た場合における平均周回数を示す。FBSI では、 D の広い範囲にわたり 1.5 周近傍で変化しないのに対して、FB では D の変化に対して大きく変化すると同時に、10 周以上となっ

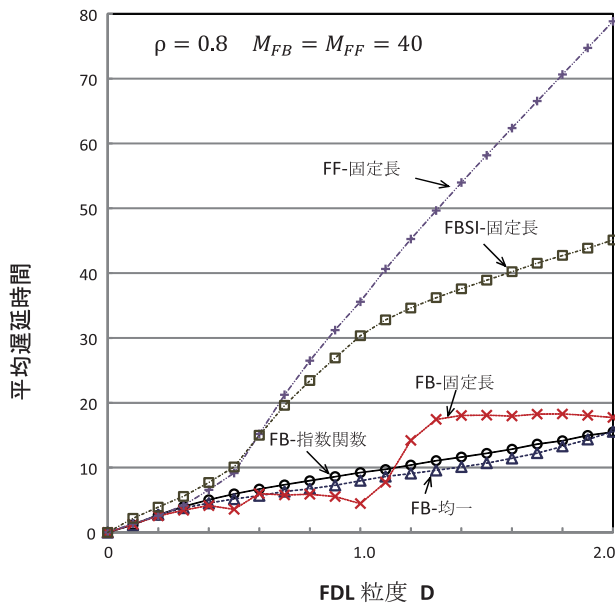


図 12. $\rho = 0.8$, $M_{FB} = M_{FF} = 40$ における平均

遅延時間 (記号は図 5 と同じ意味である)

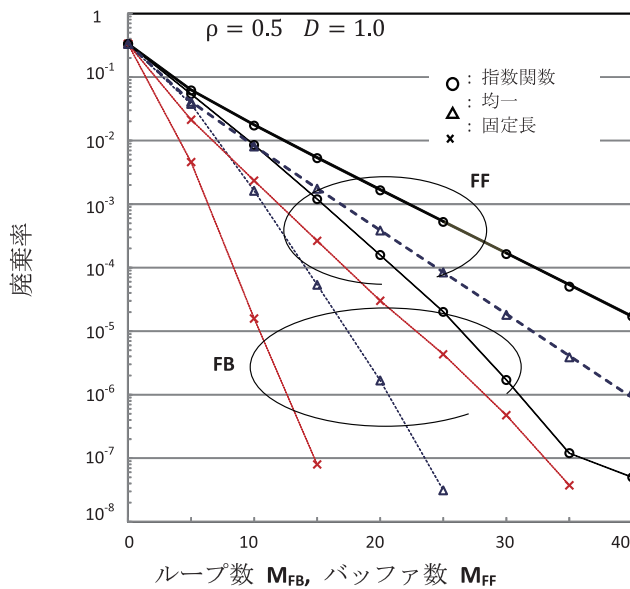


図 13. $\rho = 0.5$, $D = 1.0$ における廃棄率

(記号は図 5 と同じ意味である)

ている。ただし、固定長では、 $D=1.0$ にて 5.5 周に落ち込んでいる。周回数多いことはバッファ能力が高いことを意味しており、この結果図 10 に示すような低い廃棄率を得ている。

図 12 は、図 10 と 11 と同じ条件における通過パケットの平均遅延時間を示す。FF と FBSI では、 D が 0.5 以上で急激に増加するが、FB での増加は緩やかであり 20 以下となっている。FB の平均周回数が 10 周以上と FF や FBSI の 10 程度であるのに、FB の平均遅延時間が小さい理由は、総 FDL 長が FF や FBSI のそれぞれの 1/20 倍と短いためである。

4.2 ループ数 M_{FB} 依存性

負荷 0.5、 $D=1.0$ において、ループ数 M_{FB} とバッファ数 M_{FF} に対する廃棄率を、図 13 に示す。

○で指数関数、△で均一、および×で固定長の各分布を示した。FF と比較すると、FB ではほぼ半分のループ数で同じ廃棄率を得ている。たとえば、固定長分布で比較すると前進バッファでは $M_{FF}=23$ で 10^{-5} の廃棄率を得るが、周回ループでは $M_{FB}=11$ で 10^{-5} を得る。

負荷 0.8 における廃棄率を図 14 に示す。粒度 D は FB では $D=1.0$ としたが、FF では最低値となる $D=0.25$ を採用した。負荷 0.5 と比較すると、FB と FF との差は一層顕著となる。たとえば、FB の固定長分布では 10^{-5} の廃棄率を得るループ数は $M_{FB}=29$ であるが、FF ではバッファ数 $M_{FF}=200$ となる。7 倍のバッファ数が必要となる。

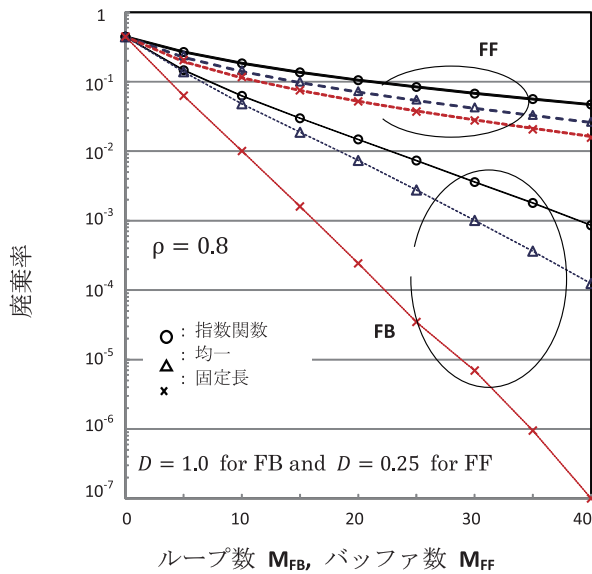


図 14. $\rho = 0.8$, $D=1.0$ (FB バッファ),
 $D=0.25$ (FF バッファ) における廃棄率
 (記号は図 5 と同じ意味である)

2) FB バッファの場合、パケット長が固定長であると、非同期入力にかかわらず $D=1.0$, すなわちパケット長がループ長に等しい時、廃棄率の急峻な落ち込みが現れる。ことが明らかとなった。

固定パケット長にて廃棄率が低減する理由を、図 15 にて考察する。

図 15(b)は、 $D=1.0$ の場合におけるパケットの流れを示す。パケット長とループ長が等しいため、3 つのループにはパケットが隙間なく周回している。出力パケットの繁忙期間が途切れるとき、図では t_1 と t_2 の間、が周回パケットの出力できるタイミングである。すなわち、周回パケットの先頭が t_1 と t_2 の間に入る時であるので、その確率は $(1 - \rho_{out})/D$ となる。ここで、 ρ_{out} は出力負荷であり、入力負荷 ρ 、廃棄率 P_B に対して $\rho_{out} = \rho(1 - P_B)$ より計算される。したがって、この場合は、周回パケットが個々の周回ループを専有して待機している状態であり、その出力は確率 $(1 - \rho_{out})/D$ のランダムサービス規律となる。

図 15(a)は、 $D < 1.0$ の場合におけるパケットの流れを示す。固定長が 1 つのループに収まりきれないので、1 ループを周回すると、別のループを周回する。パケット③はループ 1 を周回して、パケット先頭はループ 2 に入っている。したがって、 $D=1.0$ の場合より、廃棄確率は高くなる。 $D=1/2$ の場合、2 つのループを専有すれば、図 15(b)と同じ状態が実現されるので、廃棄率は低くなる。図 5, 10 において $D=1/2$ で廃棄率の落ち込みが見られる理由である。ただしこの場合、実効的なループ数は半減する。

図 15(c)は、 $D > 1.0$ の場合を示す。1 つのパケットが 1 つのループを専有している状態を示しており、光バッファと容量は図 15(b)と同じであるが、パケット周回から抜け出して出力される確率は図 15(b)と同じ $(1 - \rho_{out})/D$ であるので、 D が大きいと低下する。その分、周回回数が増える。このことは、図 8 と 11 において、 $D=1.0$ にて平均周回回数が最小で

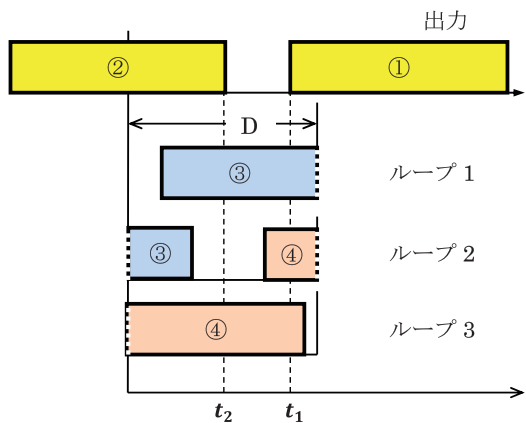
ループ数とバッファ数は光スイッチのポート数に加えられるため、7 倍のバッファ数は 7 倍×7 倍の規模のスイッチを必要とし、スイッチコストはポート数の 2 乗で増加すると考えられるので、 7^2 倍となる。

5. 考察

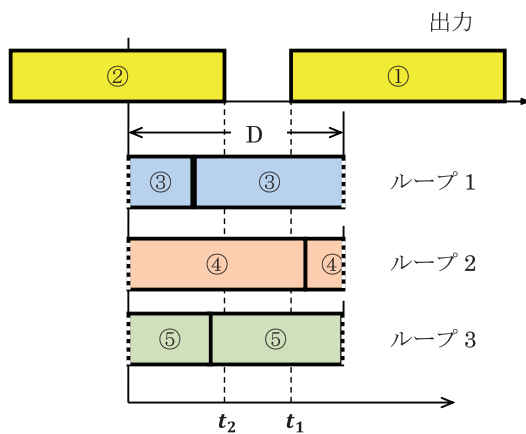
5.1 固定長分布における $D=1.0$

4 章での議論により、

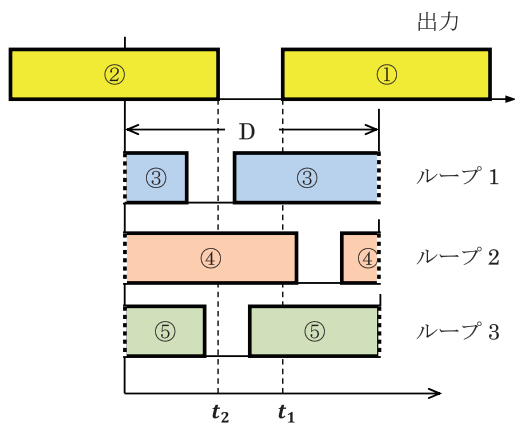
1) FF バッファと比較して FB バッファは 10^{-2} 程度廃棄率を低減できる。逆に同じ廃棄率を求めるとバッファ数を 1/2 (負荷 0.5) から 1/7 (負荷 0.8) まで低減できるため、光スイッチ規模を大きく縮小できる。



(a) $D < 1.0$



(b) $D = 1.0$



(c) $D > 1.0$

図 15. 3 周回ループを持つ FB バッファにおけるパケットフロー

あることから理解される。

5.2 周回数制限

図 2 に示す光ループバッファ構成を考えたとき、1 ループを周回する光パケットは各素子からの損失と光雑音を被る。FDL、光スイッチなどを通過する際に受ける損失と、これら損失を補う光増幅器にて発生する増幅された自然光雑音である。また、光スイッチを構成する現実的な方法は、光波長変換素子 (TWCs : tunable wavelength converters) とアレー光導波路格子 (AWGs : arrayed waveguide grating) を用いた波長スイッチであるが、この場合には AWGs での光漏話雑音加わる。これらの光雑音が信号の SN 比を劣化させるため、ループ周回数に制限を加えることが必要であると考られている [21-23]。周回制限は廃棄率を大幅に増加させるため、フィードバック型光バッファの欠点とされている。

図 16 に、図 5 と同じ条件である負荷 0.5、 $M_{FB}=10$ の場合における廃棄率を示す。簡単のためパケット長が固定長の場合のみを示した。 $D=1.0$ では、周回制限のない場合 10^{-5} の廃棄率は、5 周回制限とすると 10^{-2} まで増加する。しかしながら、20 周回制限では、 $D=1.0$ 以下において周回制限のない場合の廃棄率と較べほぼ同じ値となっている。図 8 に示すように、 $D=1.0$ では、平均周回数は約 2.5 である。したがって、廃棄率に対して周回制限の影響を抑えるためには、少なくとも平均周回数の 7 倍以上の制限数とする必要がある。

FDL 長を具体的に考えると、40Gbps の光パケットにおいてパケット長 1000 バイトの伝播時間は 0.2μ

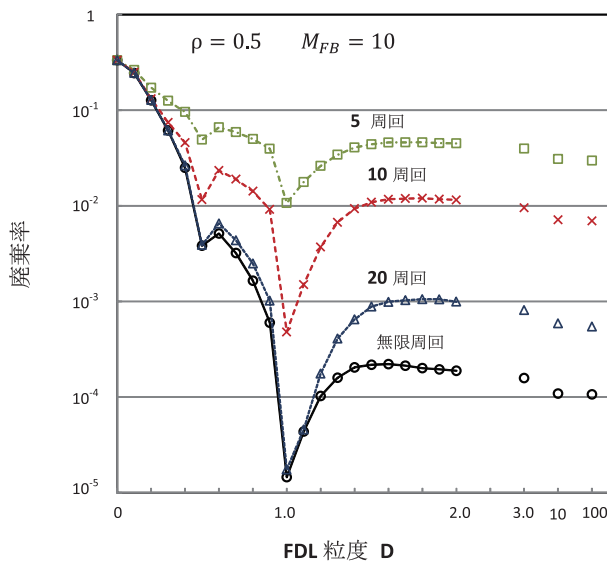


図 16. 周回制限のある FB バッファにおける廃棄率 ($\rho = 0.5$, $M_{FB} = 10$)

とすると固定長パケットでは平均周回数が小さくなるので、周回制限は緩和されるであろう。しかしながら、制限の撤廃には、将来における光スイッチの低損失化を期待する必要がある。

6. 結論

出力待ち行列形光パケット交換機における光 FDL バッファを、出力ポート別専有バッファで配備した。このとき、バッファ構造の最適化を図る目的で、各種構成における特性をパケットシミュレーションにより解明した。その結果、FBSI、FF と比較して、予約なしアルゴリズムによる FB バッファの優位性を明らかにした。

主な成果は以下のとおりである。

- 1) FB バッファにおけるパケット廃棄率は、FF バッファの約 10^{-2} 倍となる。同じ廃棄率を求めるとすると、FB バッファではそのポート数を、FF バッファの $1/2$ ($\rho = 0.5$) から $1/7$ ($\rho = 0.8$) に減少することができる。
- 2) パケット長が固定長の場合、FB バッファでは $D=1.0$ で、すなわちフィードバック FDL 長がパケット長と同じになると、廃棄率の急峻な落ち込みが見られた。この急峻な落ち込みは、周回ループ内で空期間なく光パケットが周回し、出力するまで 1 本の周回ループを専有することができるため生じる。

今回の研究では、 10^8 パケットのシミュレーションを実行した。この結果は、今後 WDM 光パケット交換機やネットワークにおけるスループットを向上されることに利用できるはずである。

sec であるので、FDL 長では 40m である。光ファイバ損失を 0.2dB/km とすれば 0.008dB となり、FDL 自身の損失は無視できる。光スイッチでの損失が大きく、この損失を補う光増幅器は必須である。すなわち、光スイッチの損失が小さければ、増幅利得は制限できて周回制限が緩和されると考えられる。

光スイッチの損失はポート数に比例して大きくなる傾向があるので[22]、光スイッチのポート数を小さくすることが周回制限を緩和することに有利である。図 13 と 14 が示すように、FB バッファは、バッファ数を小さくできる。また、図 8 と 11 が示すように、 $D=1.0$

付録

3 章にて説明したアルゴリズムに基づいて作成したフローチャートを図 17 に、また FORTRUN プログラム例を表 2 に示す。共に、周回制限がある場合の例である。

判断は、スイッチ入力パケット種類とスイッチ出力先にある。すなわち、

- 1) スイッチ入力時に、最初に入力するパケットは新規到着パケットか、それとも周回パケットか、
 - 2) スイッチ出力するパケットは、出力転送、周回ループ転送、および廃棄の 3 つの出口があるが、どれに該当するか、
- ということにある。

FORTRUN における乱数引数では、random number により 0.0 から 1.0 までの乱数 x を得ることができるので、パケット到着間隔とパケット長分布に対する指数関数分布 y は、

$$y = -\frac{1}{\lambda} \log(1-x)$$

より求めた。ここで、 λ は負荷である。

計算は倍精度にて行った。求める廃棄率により最大 10^8 個のパケットシミュレーションとなるが、初期状態から定常状態に至る過渡的な状態は 1000 パケット程度で収束する。すなわち、 10^{-2} の廃棄率を 10^{-2} 精度で求めればよい場合には、10000 パケットのシミュレーションで十分である。

引用文献

- [1] R. S Tucker et al, "Evolution of WDM Optical IP networks: A Cost and Energy Perspective," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 27, No. 3, pp. 243-252, 2009.
- [2] G. Grasso et al, "Role of Integrated Photonics Technologies in the Realization of Terabit Nodes," J. Opt. Commun. Netw., Vol. 1, No. 3, pp. B111-B119, 2009.
- [3] F. Callegati, "Optical Buffers for Variable Length Packets," IEEE Commun. Lett., Vol. 4, No. 9, pp. 292-294, 2000.
- [4] C. M. Gauger, "Dimensioning of FDL Buffers for Optical Burst Switching Nodes," in Proc. 6th IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modelling, Feb. 2002.
- [5] R. C. Almeida, J. U. Pelegrini, and H. Waldman, "A generic-traffic optical buffer modeling for asynchronous optical switching networks," IEEE Commun. Lett., Vol. 3, No. 2, pp. 175-177, 2005.
- [6] A. Rostami and S. S. Chakraborty, "On Performance of Optical Buffers with Specific Number of Circulations," IEEE Photo. Tech. Lett., Vol. 17, No. 7, pp. 1570-1572, 2005.
- [7] T. Zhang, K. Lu, and J. Jue, "Shared Fiber Delay Line Buffers in Asynchronous Optical Packet Switches," IEEE J. Sel. Areas Commun. Vol. 24, No. 4, pp.118-127, 2006.
- [8] C. M. Gauger, H. Buchta, and E. Partzak, "Integrated Evaluation of Performance and Technology - Throuput of Optical Burst Switching Nodes Under Dynamic Traffic," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 26, No. 13, pp. 1969-1979, 2008.
- [9] たとえば、拙著「やさしい情報交換工学」森北出版（2009年），p.61，3.3.2 節。
- [10] Jianming Liu et al., "Blocking and Delay Analysis of Single Wavelength Optical Buffer with

- General Packet Size Distribution,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 27, No. 8, pp. 955-966, 2009.
- [11] H. E. Kankaya and N. Akar, “Exact Analysis of Single-Wavelength Optical Buffers with Feedback Markov Fluid Queues,” *J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 1, No. 6, pp. 530-542, 2009.
- [12] W. Rogiest, and H. Bruneel, “Exact Optimization Method for an FDL Buffer with Variable Packet Length”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 22, No. 4, pp. 242-244, 2010.
- [13] N. Akar and K. Sohraby, “Retrial Queuing Models of Multi-Wavelength FDL Feedback Optical Buffers,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 59, No. 10, pp. 2832-2840, 2011.
- [14] Murakami Y., “An Approximation for Blocking Probabilities and Delays of Optical Buffer With General Packet-Length Distributions,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 30, No. 1, pp. 54-66, 2012.
- [15] 村上泰司, “パケット交換機のトラヒック理論 (その2) — 一般分布パケット長に対する近似解法 —”, 大阪電気通信大学研究論集 (自然科学編), 第47号, p.11-31 (2012).
- [16] Y. Murakami, “Asymptotic Analysis for Blocking Probabilities of Optical Buffer with General Packet-Length Distributions,” *American J. Appl. Mathematics*, Vol. 2, No. 6-1, pp. 1-10, 2014.
- [17] 村上泰司, “パケット交換機のトラヒック理論 (その3) — 漸近解析による廃棄率高精度近似 —”, 大阪電気通信大学研究論集 (自然科学編), 第50号, p.3-26 (2015).
- [18] D. Tafani, C. McArdle, and L. P. Barry, “A Two-Moment Performance Analysis of Optical Burst Switched Networks with Shared Fibre Delay Lines in a Feedback Configuration,” *Optical Switching and Networking*, Elsevier, Vol. 9, No. 4, pp. 323-335, 2012.
- [19] N. Akar, and Y. Gunalay, “Dimensioning Shared-per-Node Recirculating Fiber Delay Line Buffers in an Optical Packet Switch,” *Performance Evaluation*, Vo. 7, No. 12, pp. 1059-1071, 2013.
- [20] Y. Murakami, “Blocking Probability Simulations for FDL Feedback Optical Buffers,” *American Journal of Networks and Communications*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-10, 2016.
- [21] R. Srivastava, R. K. Singh, and Y. N. Singh, “Design Analysis of Optical Loop Memory,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 27, No. 21, pp. 4821-4831, 2009.
- [22] Q. Xu et. al “Analysis of Large-Scale Multi-Stage All-Optical Packet Switching Routers,” *J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 4, No. 5, pp.412-425, 2012.
- [23] H. Rastegarfar, A. Leon-Garcia, S. LaRochelle, and L. A. Rusch, “Cross-Layer Performance Analysis of Recirculation Buffers for Optical Data Centers,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 31, No. 3, pp. 432-445, 2013.
- [24] J. R. Artalejo and A. Gomez-Corral, “Retrial Queueing Systems”, Springer, 2008.
- [25] E. A. Pekoz and N. Joglekar, “Poisson traffic Flow in a General Feedback Queue,” *L. Appl. Prob.*, Vol. 39, pp.630-636, 2002.

ループパケット廃棄率計算シミュレーションのフローチャート

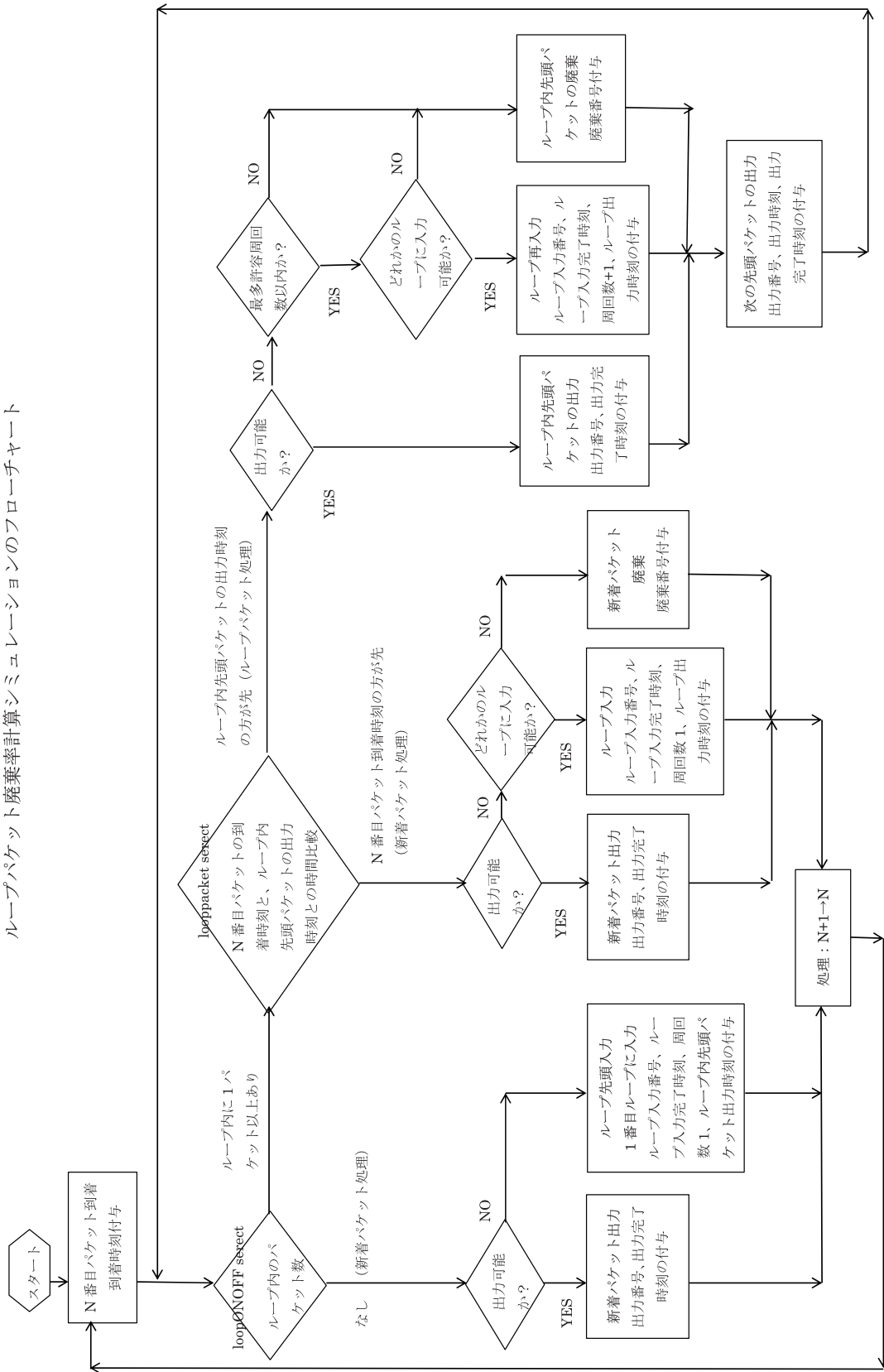


図 17. シミュレーションフローチャート

表 2. FORTRUN プログラム例

```

program manyloop!固定長、10 ループ、2015.2.26 改造 Ver.2 (2015.9.15)
implicit none
integer m,na,nb,N,LTi,LTa,H,Ha,HI,j,k,Bl,JudgeT,Pa,Pl,MCn,Hlv,Cn0
real*8 r0,D,Ta0,Tb0,Sb0,DTa0,fTa0,PB,De,Al
real*8, dimension(100000000) :: a0,a,s0,Ta,Sa,Tb,Sb
real*8, dimension(200000000) :: DTa,fTa
real*8, dimension(100) :: Di0,fi0
integer, dimension(200000000) :: Cn!周回数

r0=0.5d0!入力負荷
D=1.0d0!FDL の粒度
Bl=10!ループ数
N=2000000!パケット全数
MCn=5!最大周回数制限

Ta0=0.0d0!最新入力パケットの到着時刻

do 100 j=1,N
call random_number(a0(j))
a(j)=-(1/r0)*dlog(1.0d0-a0(j))

    Ta0=Ta0+a(j)
    Ta(j)=Ta0!j 番目到着パケットの到着時刻

Sa(j)=1.0d0!j 番目到着パケットのパケット長

100 continue

Tb0=0.0d0!最新出力パケットの出力時刻
Sb0=0.0d0!最新出力パケットのパケット長
nb=0!最新出力パケットの出力番号、または出力パケット総数

LTa=1!ループ出力における最新パケット番号、またはループ出力パケット総数-1
LTi=1!ループ入力における最新パケット番号、またはループ入力パケット総数-1

do 200 k=1,Bl
    Di0(k)=0.0d0!k 番ループにおける最新入力パケットの入力時刻
    fi0(k)=0.0d0!k 番ループにおける最新入力パケットのパケット長

200 continue

Pa=0!到着パケットに対して直接出力されるパケットの出力番号、または直接出力総数
Pl=0!ループパケットに対して出力出力されるパケットの出力番号、または出力総数
Ha=0!到着パケットのうち、直接廃棄されるパケットの番号、または廃棄総数
HI=0!ループパケットのうち廃棄されるパケットの番号、または総数
Hlv=0!ループ内パケットのうち、周回制限を超えるため廃棄されるパケット総数

1000 do 300 na=1,N!新規到着パケットの番号

500 loopONOFF:select case(LTi-LTa)!(LTi-LTa)は全ループ内パケットの総数

case(0)!全ループ内にパケットが残っていない場合

if(Ta(na)>=Tb0+Sb0) then!新規到着パケットが無事出力する場合
    nb=nb+1!出力パケットの出力番号、または総数
    Pa=Pa+1
    Tb(nb)=Ta(na)!nb 番目出力パケットの出力時刻
    Sb(nb)=Sa(na)!nb 番目出力パケットのパケット長
    Tb0=Tb(nb)!最新出力パケットの出力時刻
    Sb0=Sb(nb)!最新出力パケットのパケット長

else
    LTi=LTi+1!ループ入力が 1 パケット増える。必ずループに入力できる

```

Cn(LTi)=1!LTi 番のループ入力パケットの周回数

DTa(LTi)=Ta(na)+D!ループ内 LTi 番目パケットの出力時刻
fTa(LTi)=Sa(na)!ループ内 LTi 番目パケットのパケット長
Di0(1)=Ta(na)! 1 番目ループにおける最新入力パケットの入力時刻
fi0(1)=Sa(na)! 1 番目ループにおける最新入力パケットのパケット長
DTa0=DTa(LTi)!ループ出力における最新出力パケットの出力時刻
fTa0=fTa(LTi)!ループ出力における最新出力パケットのパケット長

end if

case(1:)!全ループ内にパケットが 1 個以上残っている場合

if(Ta(na)<=DTa0) then!新規到着パケットがループパケットより先着となる場合
JudgeT=0
else
JudgeT=1
end if

looppacket:select case(JudgeT)!新規到着パケットがループパケットより先着となる判断

case(0)!新規到着パケットがループパケットより先着となる場合

if(Ta(na)>=Tb0+Sb0) then!新規到着パケットを無事出力できる場合
nb=nb+1
Pa=Pa+1
Tb(nb)=Ta(na)
Sb(nb)=Sa(na)
Tb0=Tb(nb)
Sb0=Sb(nb)

else if(Ta(na)>=Di0(1)+fi0(1)) then! 第 1 ループに入力できる場合
LTi=LTi+1
Cn(LTi)=1

DTa(LTi)=Ta(na)+D
fTa(LTi)=Sa(na)
Di0(1)=Ta(na)
fi0(1)=Sa(na)

else if(Ta(na)>=Di0(2)+fi0(2)) then! 第 2 ループに入力できる場合
LTi=LTi+1
Cn(LTi)=1

DTa(LTi)=Ta(na)+D
fTa(LTi)=Sa(na)
Di0(2)=Ta(na)
fi0(2)=Sa(na)

·

·

(第 3 ループから第 9 ループまでの繰り返し)

·

else if(Ta(na)>=Di0(10)+fi0(10)) then! 第 10 ループに入力できる場合
LTi=LTi+1
Cn(LTi)=1

DTa(LTi)=Ta(na)+D
fTa(LTi)=Sa(na)
Di0(10)=Ta(na)
fi0(10)=Sa(na)

else!出力不可、全ループ入力不可の場合
Ha=Ha+1!到着パケットの廃棄が 1 つ増える

end if

```

case (1)!ループパケットが先着となり、処理を優先する場合

if(DTa0>=Tb0+Sb0) then
  nb=nb+1
  Pl=Pl+1!出力パケットのうちループパケットの出力番号が1つ増える
  Tb(nb)=DTa0
  Sb(nb)=fTa0
  Tb0=DTa0
  Sb0=fTa0

else if(Cn(LTa)>MCn) then!最新ループパケットパケットの周回数比較
  Hlv=Hlv+1

else if(DTa0>=Di0(1)+fi0(1)) then! 第1ループに入力できる場合
  LTi=LTi+1
  Cn(LTi)=Cn(LTa)+1

  DTa(LTi)=DTa0+D
  fTa(LTi)=fTa0
  Di0(1)=DTa0
  fi0(1)=fTa0
  .
  .
  ( 第2ループから第9ループまでの繰り返し)
  .

else if(DTa0>=Di0(10)+fi0(10)) then! 第10ループに入力できる場合
  LTi=LTi+1
  Cn(LTi)=Cn(LTa)+1

  DTa(LTi)=DTa0+D
  fTa(LTi)=fTa0
  Di0(10)=DTa0
  fi0(10)=fTa0

else
  Hl=Hl+1!ループパケットの廃棄が1つ増える

end if

800 LTa=LTa+1!最新ループ出力の番号が1つ増える
   DTa0=DTa(LTa)!最新ループ出力パケットの到着時刻
   fTa0=fTa(LTa)!最新ループ出力パケットのパケット長

go to 500

end select looppacket

end select loopONOFF

300 continue

H=Ha+Hl+Hlv!総廃棄パケット数
Al=(0.0d0+LTa)/(0.0d0+Pl+Hl+Hlv)!平均ループ周回数、廃棄パケットを含む

PB=(0.0d0+H)/(0.0d0+nb+H)!パケット廃棄率
De=D*Al*(0.0d0+Pl)/(0.0d0+nb+H)!平均遅延時間、廃棄パケット波除き通過パケットのみの集計

print *, r0, D, Bl, N,MCn
print *, nb, H, Hl,Hlv, PB
print *, LTa, LTi, Pl, Al, De

end program manyloop

```