JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	バースト性をもつ動画の送信におけるQoS制御に関する研究
Author(s)	細川，均
Citation	
Issue Date	2007-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/3577
Rights	
Description	Supervisor:日比野　靖，情報科学研究科，修士

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

修 士 論 文

バースト性をもつ動画の送信における QoS 制御に関する研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

細川 均

2007 年 3 月

修 士 論 文

バースト性をもつ動画の送信における QoS 制御に関する研究

指導教官　日比野靖 教授

審査委員主査　日比野靖 教授
審査委員　田中清史 助教授
審査委員　丹康雄 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

410106 細川 均

提出年月: 2007 年 2 月

Copyright © 2007 by Hitoshi HOSOKAWA

概 要

本論文では、ネットワーク上で時間を守る必要のあるフローに対する QoS(Quality Of Service) 保証の例として、リアルタイムビデオ通信の品質を保ちたいという要求に対応した QoS 制御システムを研究の対象としている。MPEG2 のリアルタイム通信に関して、アクセス系に非同期式の IP ネットワーク、バックボーンに同期式の GMPLS(Generalized Multi-Protocol Label Switching) で構成されるビデオストリームに限定されたネットワークにおける QoS(Quality of Service) 制御機構について提案、評価している。

MPEG2 の GOP (Group of Picture) 構造に着目した呼受付制御機構やパケットスケジューリング機構などを用いて、複数の MPEG2 ストリームの QoS を保証し同期式通信網の使用率を高めることを目的としている。そして、計算機のシミュレーションによって、提案方式の効果について評価している。

目 次

第 1 章　はじめに **1**
1.1　背景と目的 1
1.2　本論文の構成 2

第 2 章　動画ストリームのリアルタイム性 **3**
2.1　リアルタイム性の確保 3
2.2　従来の QoS 制御機構と課題 3

第 3 章　スイッチング特性 **5**
3.1　パケット通信と回線交換 5
3.2　GMPLS 5

第 4 章　MPEG2 のトラヒック特性 **6**
4.1　GOP 構造 6
4.2　MPEG2-TS 8
4.3　データの欠損とエラー範囲 8

第 5 章　QoS 制御機構 **11**
5.1　提案手法の概要 11
5.2　呼受付制御機構 12
5.2.1　サービスクラス 12
5.2.2　パケットフォーマット 12
5.2.3　呼受付制御 14
5.3　パケットスケジューリング機構 17
5.3.1　クライアント PC の送信方式 17
5.3.2　流入部のパケット監視機構とキューイング 17
5.3.3　パケットスケジューリング 18
5.3.4　遅延パケットの破棄 19

第 6 章　シミュレーションによる実験 **20**
6.1　実験方法と条件 20
6.2　評価方法 23

6.3 結果 25
6.3.1 各サービスクラスの送信可能数 25
6.3.2 フレームの遅延時間 28
6.3.3 I ピクチャの遅延揺らぎ 30
6.3.4 フレームの到着遅延 34

第 7 章 結論 37
7.1 結論と考察 37
7.2 課題 37

付 録 A 高帯域幅なバックボーンでのシミュレーション実験 41
A.1 SDH STM-4 相当におけるシミュレーション実験 41
A.2 結果 41
A.2.1 各サービスクラスの送信可能数 41
A.2.2 フレームの遅延時間 42
A.2.3 I ピクチャの揺らぎ 46
A.2.4 フレームの到着遅延回数 48
A.3 結論 49

第1章　はじめに

1.1　背景と目的

近年、ADSL や FTTH などの高速回線の普及により、局舎から個人の自宅まで 1 本の独立した回線で通信することが可能になってきた。しかし局舎で IP ルータへ単に収容されるだけであるから、品質はどこまでも悪くなる可能性を持つベストエフォートサービスにしかすぎない。

一方、高速回線の普及でインターネット上で動画通信、特に MPEG2 動画を送信することに注目が集まっている。MPEG2 は符合圧縮されているので、一旦データの損失が発生すると連続的に画像が乱れてしまう。VOD(Video On Demand) のようなリアルタイム性を要求されないアプリケーションの場合は、受信側端末やネットワーク内の機器でバッファリングをすることで品質を保てる場合が多い。しかし、TV 電話のようなリアルタイム性を要求される動画通信ではパケットの遅延が致命的な品質の劣化となるので、バッファリングはできない。パケットの損失は致命的になってしまう。インターネットは非同期のベストエフォート型通信方式であるので、遅延、遅延の揺らぎ、パケットの損失が発生してしまい、品質を保証できない。そこで品質劣化要因を制御し、QoS を保証することが盛んに研究されている。

一方、同期式通信の場合は品質を完全に保証する。次世代のバックボーンとして同期式通信の GMPLS(Generalized Multi-Protocol Switching) が期待されているが、非同期式の IP 網から同期式通信網の特徴を活かした方式のパケットスケジューリング機構は確立されていない。

本研究では MPEG2 のトラヒック特性を考慮し、複数の MPEG2 動画送信時の品質を保証することを目的に、GMPLS 網をバックボーンとするビデオストリームに限定したネットワークを対象とした、QoS 制御システムを提案する。図 1.1 に対象とするネットワークを示す。アクセス系は非同期式の IP 網で、バックボーンは同期式の GMPLS 網である。バッファリングを 1 フレーム分 (33.3ms) という条件下で、パケットの損失が少なく、バックボーンにおける保証されるフローの使用率が高い QoS 制御システムを提案し、その QoS 制御機構の効果を評価する。

提案手法では、呼受付制御機構とパケットスケジューリング機構により、受信側でのリアルタイム性を確保しつつ、キューからのパケットの溢れと遅延、遅延の揺らぎによるパケットのアンダーランエラーを防止することを試みる。本研究で取り扱う MPEG2 動画は NTSC 方式で、平均ビットレートは約 10Mbps、GOP 構造は N=15、M=3 のみを前提と

している。

なお、本論文では度々バーストと言う言葉が出てくる。本来、バーストとは長大なパケット列が連続的に送信されることをいうが、本研究では動画 1 フレーム分のパケット列をバーストと定義している。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章では動画ストリームのパケット通信におけるリアルタイム性を確保するための問題点について述べる。第 3 章では非同期式ネットワークと同期式ネットワークの特性と本研究で対象とする GMPLS について述べる。第 4 章では本研究で取り扱う MPEG2 の特徴とリアルタイム通信におけるトラヒック特性について述べる。第 5 章では本研究で提案する QoS 制御方式について詳細を述べる。第 6 章では本提案方式の効果を確認するための計算機によるシミュレーション実験について、その実験条件や評価方法を示す。さらに実験結果を示し、提案方式の効果について考察する。第 7 章では本研究の結論と今後の課題についてまとめる。

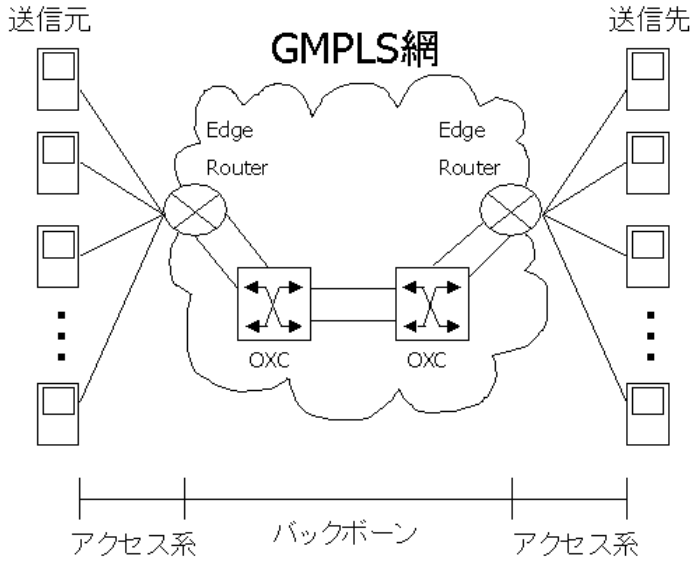

図 1.1: 対象とするビデオストリーム限定のネットワーク

第2章　動画ストリームのリアルタイム性

2.1　リアルタイム性の確保

動画通信におけるリアルタイムの用件は、国際的に片方向の遅延を 200ms 以内に抑えることをいう。

動画は大容量のデータである。原画をそのまま送信しようとすると、解像度を 640 × 480、毎秒 30 フレームの動画の場合、約 220Mbps もの帯域幅が必要になってくる。この帯域を使用するのはかなり難しいので、一般的に、動画通信をする場合は圧縮・伸張するのが当たり前となっている。現在、動画圧縮としては MPEG2 が主流であり、蓄積データにおいて普及している。しかし、動画通信に MPEG2 を使用するのは一般人レベルではネットワークコストや品質の保証、ネットワーク負荷をどうするか問題が多く、普及していない。特に品質を完全に保証するには、かなりの高帯域が必要とされてネットワークを占有しなければならなくなる。一般に DVD ビデオの画質で平均約 7 から 8Mbps であるが、実際には MPEG2 はデータレートの変動幅が激しく、リアルタイムで通信するには、受信側のバッファリングを最低限必要な 1 フレーム分 (33.3ms) に抑えて、MPEG2 データの最大帯域幅を保証するだけのリソースを確保してバースト的にパケットを送受信する必要がある。これをベストエフォート通信である普通の IP 網で行い、品質を保つのはかなり無理がある。

現在のインターネットなどで行われている動画通信では、バッファリングを行うことで実現しているものがほとんどである。厳密にリアルタイム性を実現するならばバッファリングは短ければ短いほど良い。

2.2　従来の QoS 制御機構と課題

これまでに、動画ストリームの QoS 制御手法として様々な提案がされている。最も一般的な手法は優先スケジューリングを用いるものである。QoS 制御手法として代表的な Diff-Serv(Differentiated Services) も本質的には優先スケジューリングを用いた QoS 制御手法である。

完全優先スケジューリングは複数のサービスクラスを設け、ルータにおいて高い優先度のパケットから送信を行うパケットスケジューリングアルゴリズムである。問題点としては流入するトラヒックの量に制限を設けていないので、ネットワークの帯域幅を越えればキュー内の待ち行列は無限に発散し、品質を保証できなくなるという欠点がある。

この欠点を補うために、呼受付制御をすることで、トラヒックの量に制限を持たせる呼受付制御機構を実装した完全優先スケジューリングも提案されている。

しかし、いずれの場合もそこに流すトラヒックの性質を省みることはなく、全てのパケットを優先順に基づいてだけ取り扱っている。トラヒックの特性を考慮すれば、そのアプリケーションに特化した高品質のサービスが提供できると考える。

また、従来の呼受付制御機構は最優先クラスは最大帯域を保証するために、1フローで非常に大きな帯域が要求される。しかし、実際にはデータの変動があり、そのためにネットワーク内にはかなりの空きができ、ネットワークのリソースが大量に余る場合がある。従来はその余ったリソースを下位クラスに与えることで、優先クラスのデータ通信の空いている時間を有効利用しようとしてきた。しかし、これではごく一部の最優先クラスのクライアントにだけ、遅延や画像の乱れの少ない高品質な動画を送信するために、非常に大量のリソースを割り振ることになる。パケット通信における多重化の有利性が消されてしまっている。

最大帯域を保証する最優先クラスのサービスをより多くのクライアントに提供できることが理想的である。

第3章　スイッチング特性

3.1　パケット通信と回線交換

パケット通信は非同期式なので多重化するには非常に効率がよい。しかし非同期であるからパケットが同時に到着した場合や、別のパケットの送信中にパケットが到着した場合には、キュー内で待ち時間ができることで、遅延の揺らぎが発生し、品質を保証できない。逆に回線交換はその回線のリソースを占有して使えるので品質を完全に保証できる。しかし、一方で、使っていても使っていなくても常に占有している状態にあるので、多重化には不向きで非常に高価となってしまう。

現在の一般的な都市における非同期式の IP ネットワークのバックボーンは、同期式の SDH/SONET(Synchronous Digital Hierarchy/Synchronous Optical Network) で構築されている。SDH/SONET は同期式通信で回線交換網なので、品質は完全に保証できる。しかし、現在の使われ方はその上に単に非同期の IP パケットを垂れ流しているだけであり、本来の SDH/SONET が持つ品質を保証するという同期通信の特性を放棄している状態であり、同期式通信の特性が利点が活かされていない。

3.2　GMPLS

次世代のバックボーン技術として GMPLS が期待されている。MPLS(Multi Protocol Label Switching) のラベルと言う概念をパケットだけでは無く、TDM(Time-Division Multiplex Capable) や LSC(Lambda Switch Capable)、FSC(Fiber Switch Capable) にまでに一般化して適用したプロトコルである。であるから一元的にパスの構築ができ、光パスによるサーキットスイッチングとして使用できる。また、OXC(optical cross connect) による完全な光スイッチングを行い、光 ⇒ 電気 ⇒ 光の変換によるオーバーヘッドを無くすものである。これにより非常に遠距離の各地を高速に伝送することができ、本当の意味での光ネットワークの実現が期待できる技術である。しかしながら、このサーキットスイッチングの特性を活かすためのパケットスイッチングの方式は SDH/SONET と同様に、確立していない。非同期の IP パケットを単にパスを張った λ の上に伸せて送信するだけでは、遅延の揺らぎが生じて同期式通信の利点を利用することができない。

非同期式の IP パケットで動画通信の QoS を保証する場合に、品質を完全に保証できる同期式通信の特性を活かすことを考えることが必要である。

第4章　MPEG2のトラヒック特性

4.1　GOP構造

MPEG2は空間型圧縮と時間型圧縮の双方を利用した非可逆圧縮である。各フレームが独立しているわけではなく、GOP(Group Of Picture) という単位で圧縮・伸張が行われる。それを説明したのが図4.1で、これはGOP構造がN=15、M=3の例である。NはGOP構造を構成するピクチャの数を表しており、Iピクチャから次のIピクチャまでのピクチャ数でもある。MはIもしくはPピクチャが何枚毎にあるかを表している。GOPには、３種類のピクチャが定義されており、それぞれについて説明する。

原画像をDCT(Discrete Cosine Transform) したIピクチャ。直前のIまたはPピクチャから差分をとったPピクチャ。前後のI、もしくはPピクチャから双方向予測したBピクチャの３種類がある。一般に、データサイズはIピクチャが最も大きく、次いでPピクチャ、Bピクチャの順に大きくなる。このデータサイズについては参考文献[3] によれば、もちろん調査した動画の性質やエンコーダにも依存するのだろうが、平均データサイズの比I:P:Bが4:2:1というものになったとある。これは、仮に、平均10MbpsのMPEGを10Mbpsの回線でリアルタイムに送受信しようと思っても、データの変動によって遅延の揺らぎが生じ満足の行く品質にはならないということを示している。図4.2はMPEG2のリアルタイム通信における帯域の時間変化を先ほどのピクチャのデータサイズ比I:P:Bを4:2:1で表したものである。帯域が激しく変動しているのが見て取れる。

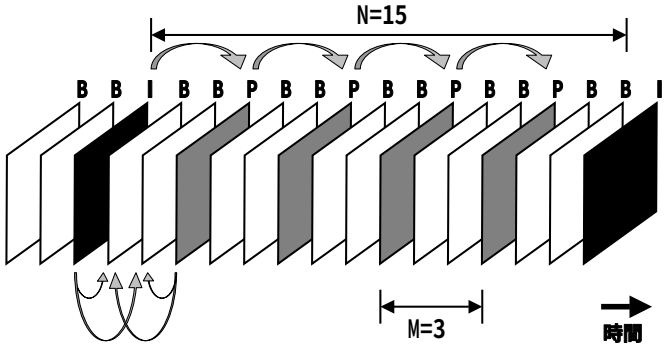

図 4.1: 各ピクチャの生成

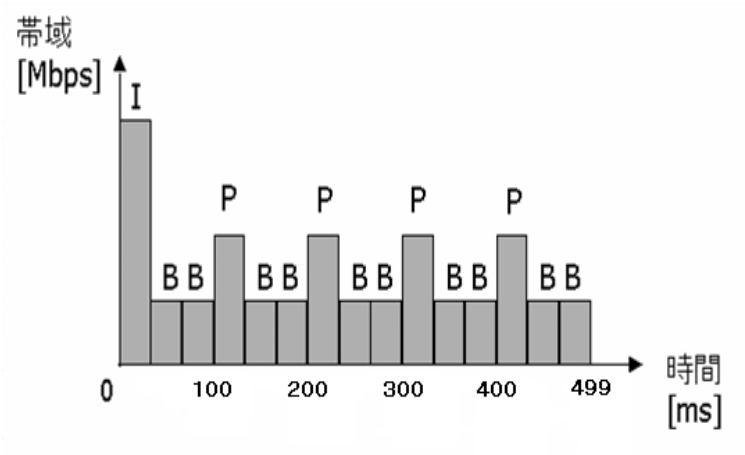

図 4.2: MPEG2 の帯域幅

4.2 MPEG2-TS

MPEG2 には蓄積データ向けのデータ構造である PS(Program Stream) だけでなく、通信用のデータ構造として MPEG2-TS(Transport Stream) が用意されている。この MPEG2-TS は地上波デジタル放送などで使われている。MPEG2-TS は TS パケットを送受信することで MPEG2 を再生する。TS パケットのフォーマットを図 4.3 に示す。

TS パケットは一般に、ヘッダ 4 バイト、ペイロード 184 バイトの固定長パケットであるが、地上波デジタル放送などでは、電波に乗せて送信するために、ノイズの影響を無くすためにリードソロモン符号が使われており、符号の分だけパケット長は大きくなっている。本提案方式では光ファイバーを使ったネットワークを対象としている。光ファイバーでのエラー率はほぼ 0 であることから、本研究ではエラー訂正符合の追加は行わず、図 fig:ts で示したヘッダ 4 バイト、ペイロード 184 バイトの固定長パケットのみを取り扱うこととする。

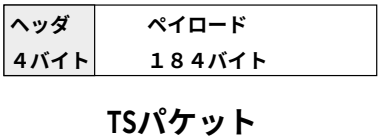

図 4.3: TS Packet のフォーマット

4.3 データの欠損とエラー範囲

図 4.4 は MPEG2 のエンコード前のフレーム順とエンコード後のビットストリーム順が入れ替わって、そしてデコード時にまた順番が入れ替わっていることを表している。このような順番の入れ替わりが起こるのは各ピクチャが図 4.1 のように生成されるからである。

このようなエンコード、デコードを行うので、MPEG2 は一旦データの欠落があると、その欠落したピクチャの種類によってエラーの影響が違ってくる。それを説明したのが、図 4.5 と図 4.6 と図 4.7 である。

I ピクチャが欠損すると GOP の欠損と次の GOP の B ピクチャ 2 枚に影響が及び、17 フレーム（約 566ms）の欠損につながる。P ピクチャが欠損すると欠損した P ピクチャより後ろの GOP に影響が及び、5〜14 フレーム (約 166.5〜466ms) の欠損につながる。B ピクチャが欠損すると、欠損した B ピクチャ1 フレームだけが欠損する。このことから、MPEG2 による動画通信において I ピクチャの欠損が品質に最も影響を与える。

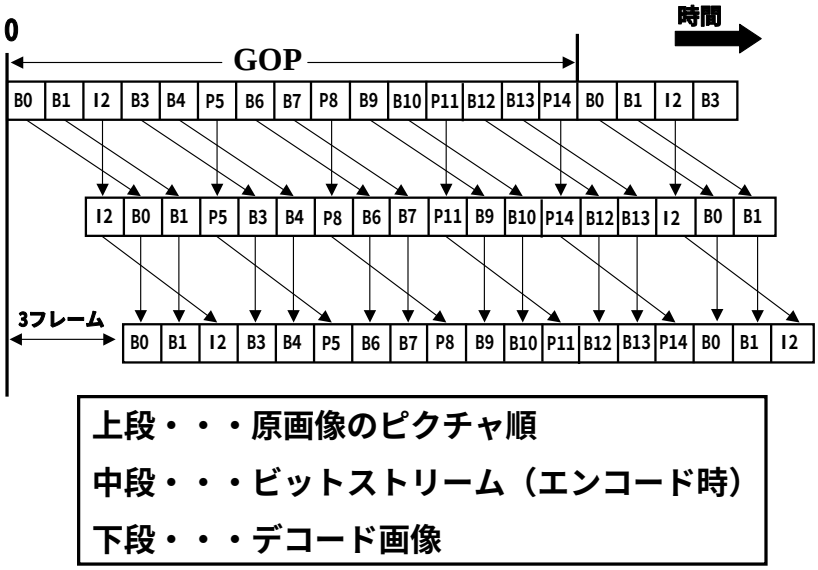

図 4.4: GOP のデータ再生順

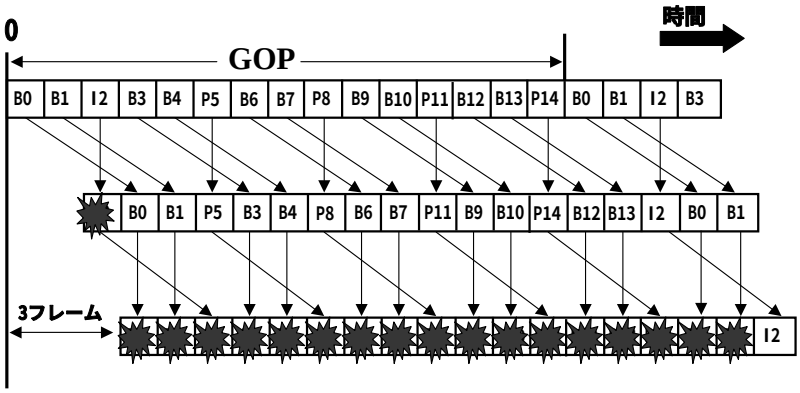

図 4.5: I ピクチャエラー時の影響範囲

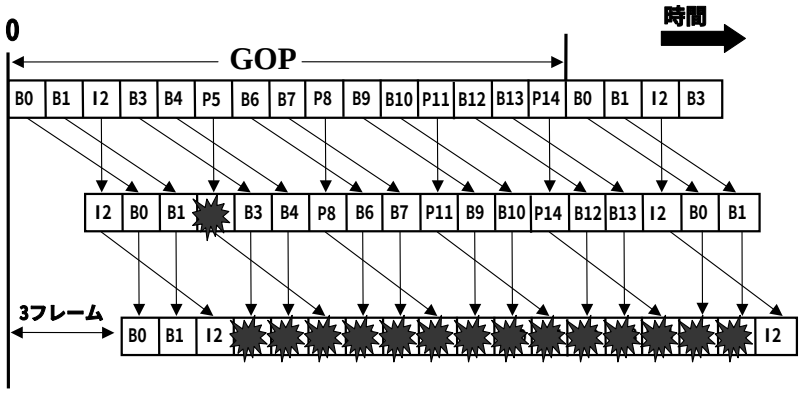

図 4.6: P ピクチャエラー時の影響範囲

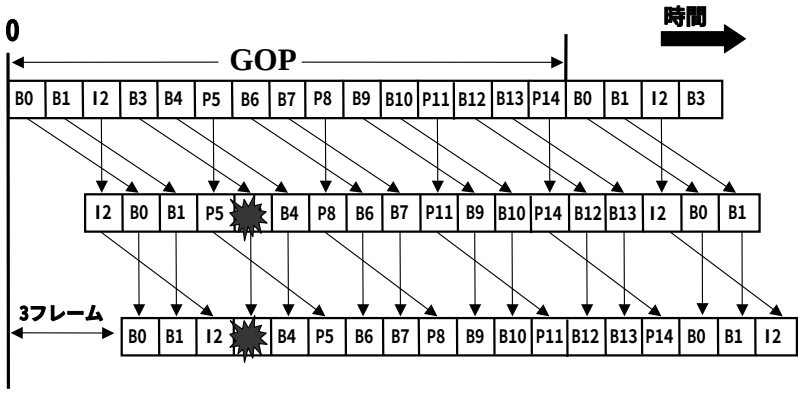

図 4.7: B ピクチャエラー時の影響範囲

第5章　QoS制御機構

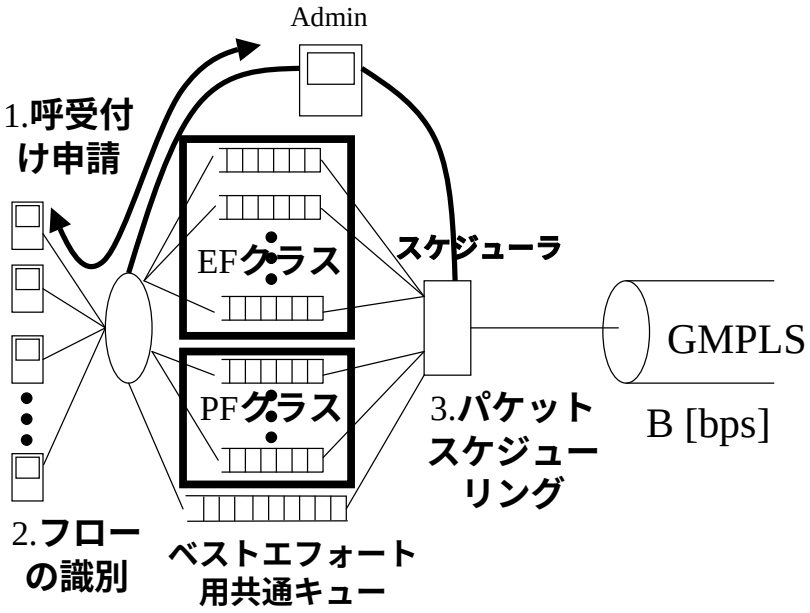

図 5.1: 提案方式概略図

5.1　提案手法の概要

MPEG2のトラヒック特性に着目したQoS制御手法を提案する。本研究ではWDMがより発達し、GMPLS網により各地を1本のλでパスが張ってあり、そこにSDHが載っているという環境を仮定している。図5.1は提案手法の概要である。1バーストを動画フレームに同期して送受信することを保証し、それにより受信側ホストによるバッファリングが最小限しか必要のないシステムを目指す。QoSを保証するための機構は呼受付制御とパケットスケジューリング機構の2つである。この2つを用いることで受信側でのリアルタイム性とキューイングにおける遅延、遅延の揺らぎによるパケットのアンダーランエラーを防止することを試みる。

5.2 呼受付制御機構

5.2.1 サービスクラス

最初に呼受付制御機構について説明する。呼受付制御機構を行う理由は、ネットワークへ流れてくるトラヒックを制限することで、リソースが足りなくなるのを防ぎ、待ち行列が無限に発散しないようにするためである。呼受付制御はパケットのアンダーランエラーを防止する最も重要な方法の一つである。

本提案手法では3つのサービスクラスを定義する。まず最大帯域を保証する最も優先権が高いEF(Expedited Forwarding)クラス。次に優先権が高いPF(Pedicted Forwarding)クラス。そして何も保証をしないBE(Best Effort)クラスである。それぞれのクラスの特徴について以下に箇条書きする。

1. EF(Expedited Forwarding)クラス
   - 呼受付制御により、各ピクチャの最大帯域幅を保証する。
   - GMPLSへの転送の優先度は最も高く、最優先される
   - タイムスロットを割り当て、Ingress Routerで1フレーム毎に同期式にGMPLS網へ転送をする
   - フロー毎にキューを用意して、パケットの流入数を監視し、出力数を管理する
2. PF(Pedicted Forwarding)クラス
   - 呼受付制御により、各ピクチャの平均帯域幅を保証
   - GMPLSへの転送の優先度はEFクラスの次に高い
   - タイムスロットを割り当て、Ingress Routerで1フレーム毎に同期式にGMPLS網へ転送をする
   - フロー毎にキューを用意して、パケットの流入数を監視し、出力数を管理する
3. BE(Best Effort)クラス
   - 共通のキュー1つでキューイングする
   - 帯域保証は行わない
   - タイムスロットへの割り当ては行わない

5.2.2 パケットフォーマット

本提案システムではパケットフォーマット(図5.2)は固定長とする。ペイロードにはTSパケットを7個詰め込むことで1316バイトにする。リアルタイムストリームなので、トランスポートプロトコルはUDPとRTPにする。これによって合計1356バイト長とする。

固定長とする理由はフラグメンテーションの回避と最大バースト長を求めやすいことがあげられる。欠点としては、パケット長を調整するためにダミーデータの挿入が必要となる場合がある。

IP	UDP	RTP	**ペイロード**
20	8	12	1316

図 5.2: IP パケットのフォーマット

5.2.3 呼受付制御

本提案方式のEF、PFクラスは、送受信を動画フレームに同期して1バーストずつ行われることから、タイムスロットル方式の帯域制御と転送方式を取り入れることで、キュー内での待ちが均一化し、揺らぎが解消されるように試みる。

以下に提案方式を説明する。タイムスロットはGOPに同期し、500[ms]を15分割して設定されている。EFクラスはMPEG2の各ピクチャの最大帯域幅を申請する。PFクラスはMPEG2の平均帯域幅を申請する。呼受付サーバはこの平均帯域幅から各ピクチャの平均帯域幅を計算する。ここで用いるのは、MPEG2の説明で紹介した参考文献から引用する各ピクチャのデータサイズ比がI:P:B=4:2:1である。これを用いて各ピクチャの帯域を計算し、そこからTSパケットの数を算出する。そして先ほど説明した固定長のIPパケットにTSパケットを詰め込むことで、各ピクチャを構成するIPパケットの数を求め、各ピクチャの平均ビットレートを求める。この平均ビットレートをPFクラスでは保証することにする。以下に簡単な方程式でビットレートを求めるための過程を数式で示す。

I:P:Bのデータサイズ比が4:2:1。平均ビットレート10MbpsのMPEG2の本提案方式におけるIPパケット通信による、各ピクチャのビットレートを求める。1GOPは500ms、GOP内のIピクチャの数は1枚、Pピクチャは4枚、Bピクチャは10枚である。Bピクチャのデータサイズをxとおく。10Mbpsはバイトに直すと、1.25MB/sとなる。

$$2(1 \times 4x + 4 \times 2x + 10 \times x) = 1.25 \times 10^3$$

$$44x = 1.25 \times 10^3$$

$$x = \frac{1.25 \times 10^3}{44}$$

次に、TSパケットのペイロードが184バイトより、

$$TS = \frac{1.25 \times 10^3}{44 \times 184}$$

$$TS = 155\text{個}$$

BピクチャのTSパケット数が求まったので、そこからIPパケットの数を求めて、

$$155/7 = 23\text{個}$$

よって23個。これからBピクチャのストリームのビットレートを求めると、

$$1356 \times 23 \times 30 = 935640B/s$$

ゆえに、約7.4Mbpsになる。同様にして、PピクチャはTSパケットが309個、IピクチャはTSパケットが618 個。よってPピクチャのIPパケット数は45個。Iピクチャは89個となる。ここから、IPパケットのストリームの平均値を求めると、約10.8Mbpsが求まる。これらから帯域の計算を行い、呼受付を許可、不許可を判断する。図5.4が呼受付制

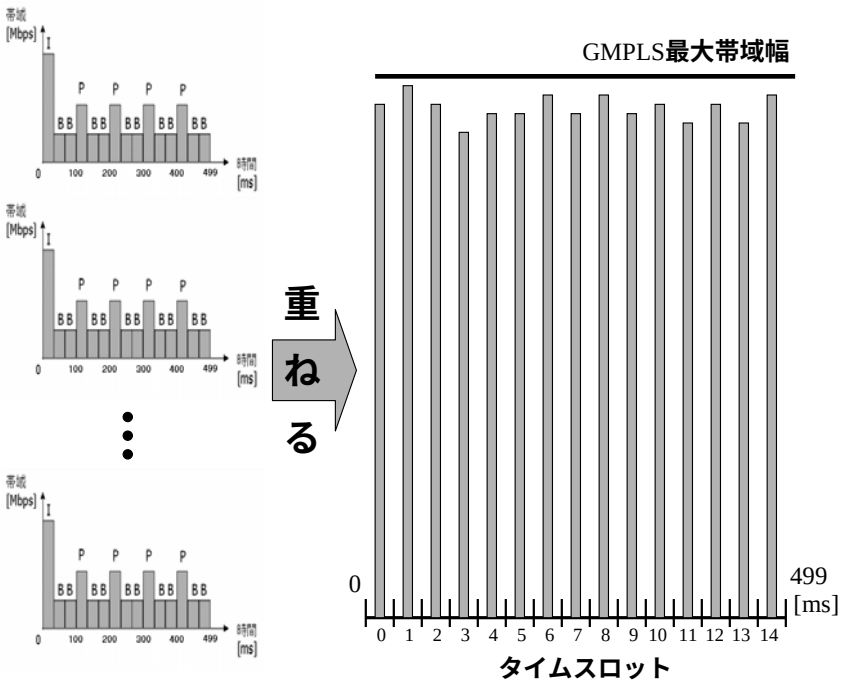

図 5.3: 帯域計算概略図

御アルゴリズムのフローチャートになる。基本的な戦略は最も帯域の低いところに申請呼のＩピクチャを入れることである。そして他のスロットの帯域がバックボーンの帯域を越えてなければ、そのスロットを候補にする。そして、候補の中からＩピクチャが重ならないものを選び、その中から現在時刻に最も近いタイムスロットを選択する。

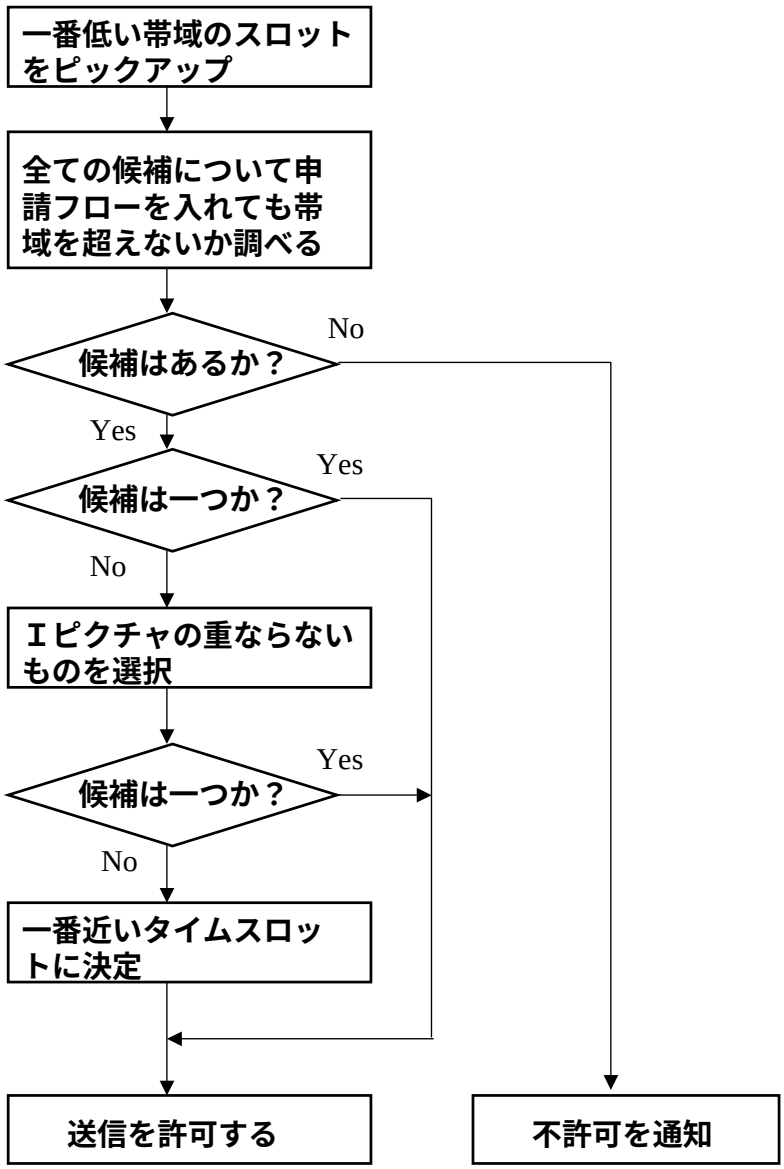

図 5.4: 呼受付制御アルゴリズムのフローチャート

5.3 パケットスケジューリング機構

5.3.1 クライアント PC の送信方式

送信するクライアントは動画フレームの間隔、すなわち 1 バーストを 33.3ms 毎に送信しなければならない。その際、送信の仕方としてはパケットを連続的に送ることにする。これによってパケットのギャップをフレームとフレームの間だけ非常に大きくすることができ、Ingress Router にて十分にフレーム間を識別することができると期待される。

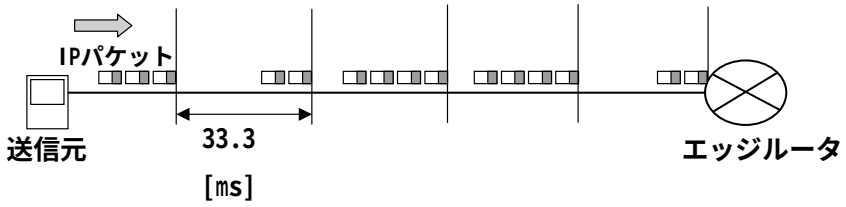

図 5.5: 送信ホストの送信方式

5.3.2 流入部のパケット監視機構とキューイング

ルータの流入部では常にパケットが到着してないかを監視している。そしてルータは初めのパケットが到着してから 33.3ms 間隔でパケットの数を数えることで 1 フレーム分のパケット数を知ることができる。この 1 バーストをルータ出力部でフレーム間隔に 33.3ms 毎に送信してやることで遅延の揺らぎを小さくすることが期待できる。また申請された最大バースト長よりも長大なパケット列が到着しても、それは申請された最大までしか送信しないことにする。

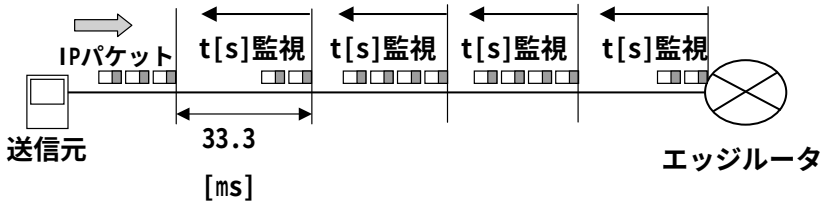

図 5.6: 流入部パケットのパケット監視機構

5.3.3 パケットスケジューリング

本提案方式では3つのサービスクラスを定義している。EF、PF の各クラスはそれぞれのフローに1つのキューが用意され、キューイング行う。スケジューリングアルゴリズムにはマルチレベルラウンドロビンを用いることにする。これはラウンドロビン方式と完全優先スケジューリングとを組み合わせたものである。パケット送信の優先順位は EF、PF、BE の順である。これによって完全優先スケジューリングを各サービスクラス1つだけのキューを用いて実行するよりもキューが多いので、優先クラス転送中の下位クラスの転送を防ぎ、優先クラスのパケットのバーストが揺らがないで到着する。

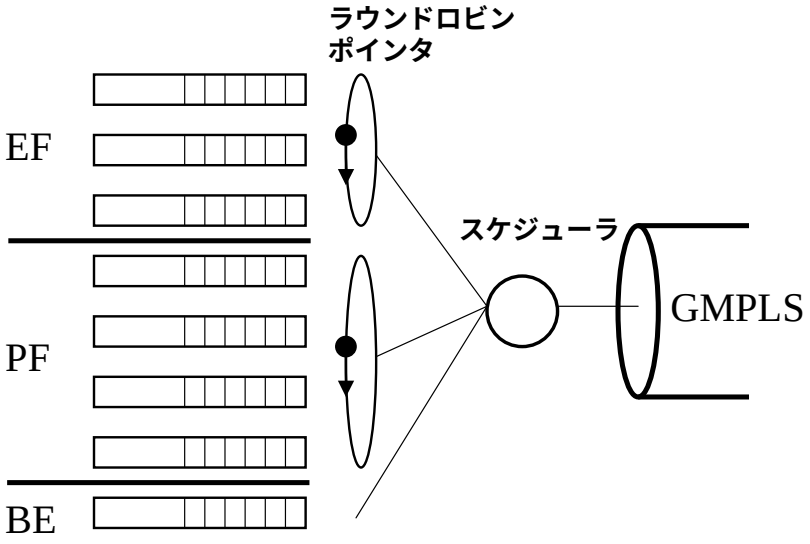

図 5.7: Multi-Level Round Robin

5.3.4 遅延パケットの破棄

PF クラスは各ピクチャの平均データサイズで呼受付申請を判断しているために、平均以上のデータサイズのピクチャが送信されてきたときにパケットの遅延が生じることが予想される。一旦、遅延が起こったパケットは動画通信においては画面に映らないデータとなってしまう。MPEG2 でのデータ欠損について説明した際に、各ピクチャは時間型に圧縮されているために、データのデコード時にはそれぞれが密接に関係することを示した。特に I ピクチャは GOP 全てと次の GOP のデコードにも関係するので、非常に重要なデータである。P ピクチャもこれがなければ、以降のピクチャが生成できないので、I ピクチャの次に重要である。またこれらのピクチャは受信側に到着しても一旦バッファリングされて他のフレームのデコードに使われる。そして自身が画面に映るまでには 2 フレームの空き時間がある。対して、B ピクチャは到着すれば直ぐにデコードされて、画面に映ることになる。一旦データが遅延すれば、そこでそのフレームは欠損が生じることになる。このことから、各ピクチャが遅延した場合に下記の方策でパケットを棄てて、遅延パケットが無駄に転送されないようにし、GMPLS 網内の帯域を無駄使いしないようにする。

- I ピクチャが遅延した場合
  - 期限迄に送信仕切れなかった I ピクチャのパケットを次の転送サイクルに送信することにし、本来次の転送サイクルに送信する予定だった B ピクチャのパケットを棄ててしまう。
  - 更に次の転送サイクルでも送信仕切れなかった場合は最大でその I ピクチャが所属する GOP が終わるまで保持し、次の GOP の I ピクチャが来たら、送信しきれなかったパケットは全て棄ててしまう。
- P ピクチャが遅延した場合
  - 期限迄に送信しきれなかった P ピクチャのパケットを次の転送サイクルに送信することにし、本来次の転送サイクルに送信する予定だった B ピクチャのパケットを棄ててしまう。
  - 更に次の転送サイクルでも送信仕切れなかった場合は最大でその I ピクチャが所属する GOP が終わるまで保持し、次の GOP の I ピクチャが来たら、送信しきれなかったパケットは全て棄ててしまう。
- B ピクチャが遅延した場合
  - 期限迄に送信しきれなかった B ピクチャのパケットは棄ててしまい、次のピクチャのパケット転送に備える。

第6章　シミュレーションによる実験

6.1　実験方法と条件

本提案方式の効果を検証するために、計算機によるシミュレーションで確認する。シミュレーション実験で本提案方式の効果を検証するために比較対象として、Ingress Router 側で呼受付制御機構を実装し、完全優先スケジューリングを用いるシステムを採用する。完全優先スケジューリングを用いるのは、Diff-Serv(Differentiated Services) が本質的には複数のサービスクラスを定義して優先スケジューリング用いたサービスだからである。本提案方式と同じく、複数のサービスクラスを定義して優先スケジューリングを行い、Ingress Router でトラヒックコントロールを行いバックボーン内でのルータは転送だけに従事する方式であるという点が共通している。以下では、比較対象の QoS 制御方式を呼受付制御機構付き単純優先スケジューリング、もしくは単純優先スケジューリングと表記することにする。

以下に実験方法、条件、結果を記す。

まず実験方法は C 言語のプログラミングによる計算シミュレーションを行う。シミュレーション実験における条件を以下に示す。

1. シミュレーションの前提条件
   - 各送信ホストはフレーム間隔でパケット列を送信する。その際のデータサイズと頻度をパケットの個数で表し、以下の図 6.1 に示す。I ピクチャが平均 89 個、P ピクチャが 45 個、B ピクチャが 23 個となっている。
   - MPEG2 の各ピクチャは平均で I:P:B の比が 4:2:1 になると仮定する。
   - 各送信ホストの送信開始時刻はランダムである。
   - アクセス系は収容先のルータまで一人で使っている専用の非同期式 IP ネットワークとする。
   - バックボーンは同期式 GMPLS で、その波長 1 つに SDH STM-1 相当が割り当てられており、この 1 波長を使って通信することにする
   - GMPLS 網内では光ルーティングによって Ingress Router から Egress Router まで送られるので、遅延揺らぎやオーバーヘッドがない。
   - ルータの速度は無限に速いと仮定し、スィッチングの時間はシミュレータ内の１クロックで完了する。

- 各受信ホストはバッファリングを 1 フレーム分 (33.3ms) しかしないものとして、1 フレームを構成する全パケットが到着許容時刻までに到着したかを判断する。このとき、提案手法は同期式に送信しているので、バッファリングは同期式にする。呼受付制御機構付きの単純優先スケジューリングは非同期式とする。
- BE クラス用のキューの長さは限界がないとする。
- パケットが溢れたりコリジョンが起きることはないとする。

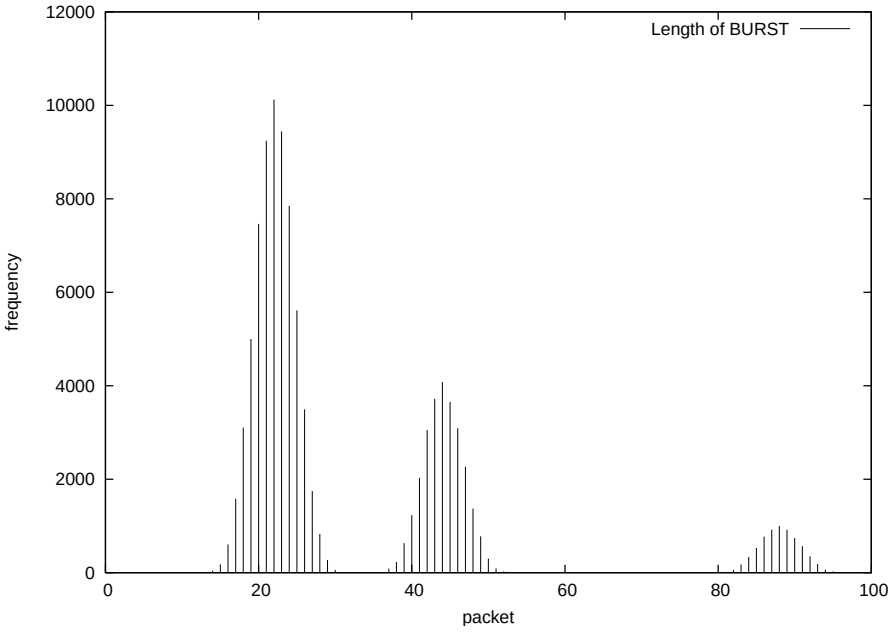

図 6.1: バースト長の頻度 (10 万パケット)

2. 呼受付制御機構付き単純優先スケジューリングの条件

- サービスクラスは EF クラス、AF(Assured Forwarding) クラス、BE クラスの 3 つを定義する。優先度は EF、AF、BE の順に高い。
- EF クラスは EF クラスによる最大帯域幅の合計が SDH の最大帯域幅を越えていなければ送信を許可する。
- AF クラスは EF クラスと AF クラスの平均帯域幅の合計が SDH の最大帯域幅を越えていなければ送信を許可する。
- パケットスケジューリングは各クラスに 1 つのキューを用意し管理する。スケジューリングアルゴリズムは完全優先スケジューリングアルゴリズムを用いて、優先度は EF、AF、BE の順に高いとする。

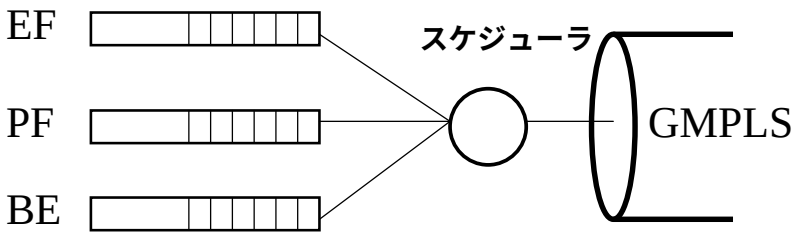

図 6.2: 完全優先スケジューリング

3. シミュレータ内の設定値

- 1 クロック=0.72us とする。
- 1ms=1389 クロックとする。
- 送信ホスト局舎間は 2km、バックボーンの長さは 200km とする。
- 光ファイバー内の信号の速度は、ファイバーの屈折率を 1.5 として 20 万 km/s とする。
- アクセス系の帯域幅は 100.23552Mbps バックボーンは 150.67872Mbps とする。これはあくまでも、シミュレータ内の数値であり、実世界のものとは少々の差がある。

6.2 評価方法

シミュレーション実験での評価方法について説明する。評価に用いるのは、網内に全てのフローが送信し始める、シミュレータ内での 2 秒から 110 秒までの 108 秒間の送・受信パケットとする。網内がパケットで満たされて安定してから各フロー 10 万パケット以上観察することで、安定した状態の結果を得るためである。この 108 秒間で各送信ホストは 10 万パケット以上を送信し、ほぼ全てのサービスクラスのホストが 10 万パケット以上を受信する。

評価項目を以下に示す。

- 各サービスクラスの送信可能数
- フレームの遅延時間
- I ピクチャの到着時間 (フレームを構成する最初のパケットから最後のパケットが到着するまでの時間) の揺らぎ
- フレームの到着遅延数

各サービスクラスの送信可能数はその QoS 制御機構によるバックボーンの使用率をどれだけ保証するフローで埋めることができるかを評価する。各フレームの遅延時間は短ければ短いほど、リアルタイム性が良くなるので、これを評価する。I ピクチャの到着時間の揺らぎからは各サービスクラス内のフロー間で、どれだけ満足感に差があるかを評価する。1 フレームを構成するパケットが全て揃って、映像が映されると仮定して、フレームの到着が遅延した枚数からフレームの欠損率を評価する。また、バッファリングは 1 フレーム分 (33.3ms) しか行わない。このとき、提案手法は同期式的送信を Ingress Router で行っているので、受信側でのバッファリングも同期式方式 (図 6.3) とする。一方、単純優先スケジューリングの方は非同期式なので。受信側でのバッファリング方式は非同期式

(図 6.4) とする。同期式方法は最初に到着したパケットから同期式にバッファリングしていく。このバッファリング時間は 33.3ms とする。この期間に次のフレームのパケットが全て到着しない場合はフレームの到着遅延が発生したとする。非同期式方法は、各フレームの最後のパケットからバッファリングしていく。バッファリングする時間は同期式と同じく 33.3ms とする。この期間に次のフレームのパケットが全て到着しない場合はフレームの到着遅延が発生したとする。

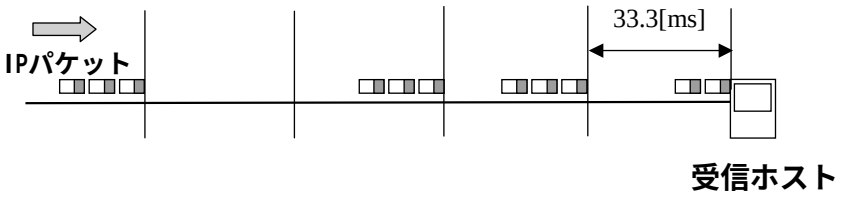

図 6.3: 同期式のバッファリングによる評価方法

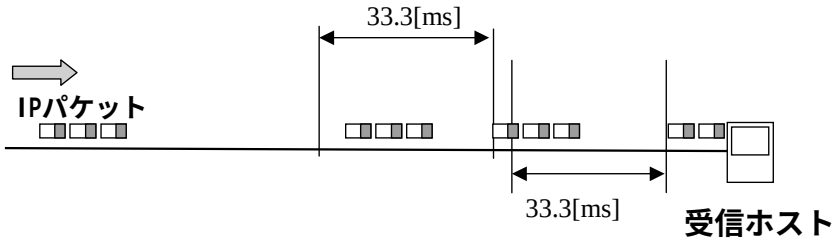

図 6.4: 非同期式のバッファリングによる評価方法

6.3 結果

6.3.1 各サービスクラスの送信可能数

まず、呼受付成功数について評価する。下の表の括弧内はGMPLS網に対するそのサービスクラスの使用率である。

QoS制御法	EF	PF/AF	EF+PF/AF
提案手法	10(0.71)	13(0.93)	EF9 + PF1
単純優先	4(0.28)	13(0.93)	EF4 + AF9

このように、提案手法の方が最大帯域幅保証を行うクラスでの呼受付できる数が多くなった。これはタイムスロットでIピクチャを帯域の低いスロットに割り当てているからである。PF/AFクラスの単体での送信可能数は同じであるが、EF+PF/AFで混合した場合は呼受付制御機構付き単純優先スケジューリングの方が多くなる。これは各フローの平均を単純に加算してGMPLS網の帯域幅を越えたか判断しているからである。しかし、EFクラスは4本以上増やすことができないので、提案手法の方がフローの割合を柔軟に決定することができる。

EFクラスを単体で10フロー、PFを単体で13フローを受け付けたときの帯域計算の結果をそれぞれ図6.5と図6.6に記す。保証クラスのフローができるだけ帯域を万遍なく使おうとしているのが見て取れる。

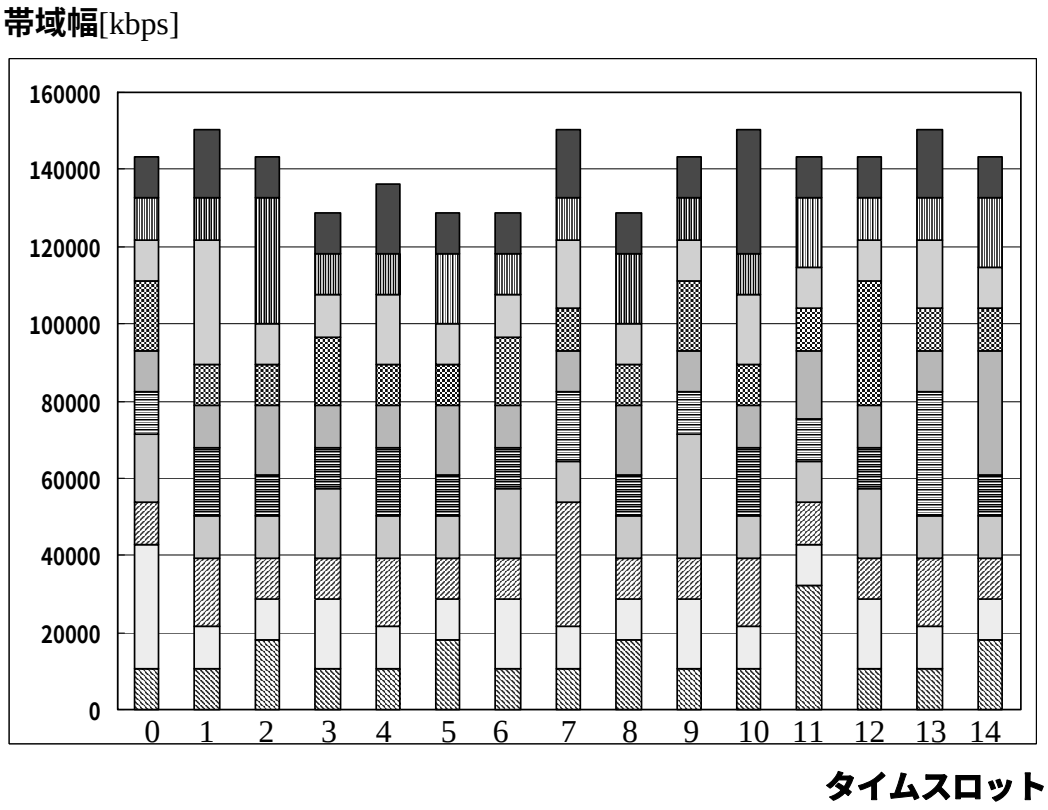

図 6.5: 呼受付計算 (EF クラス 10 フロー)

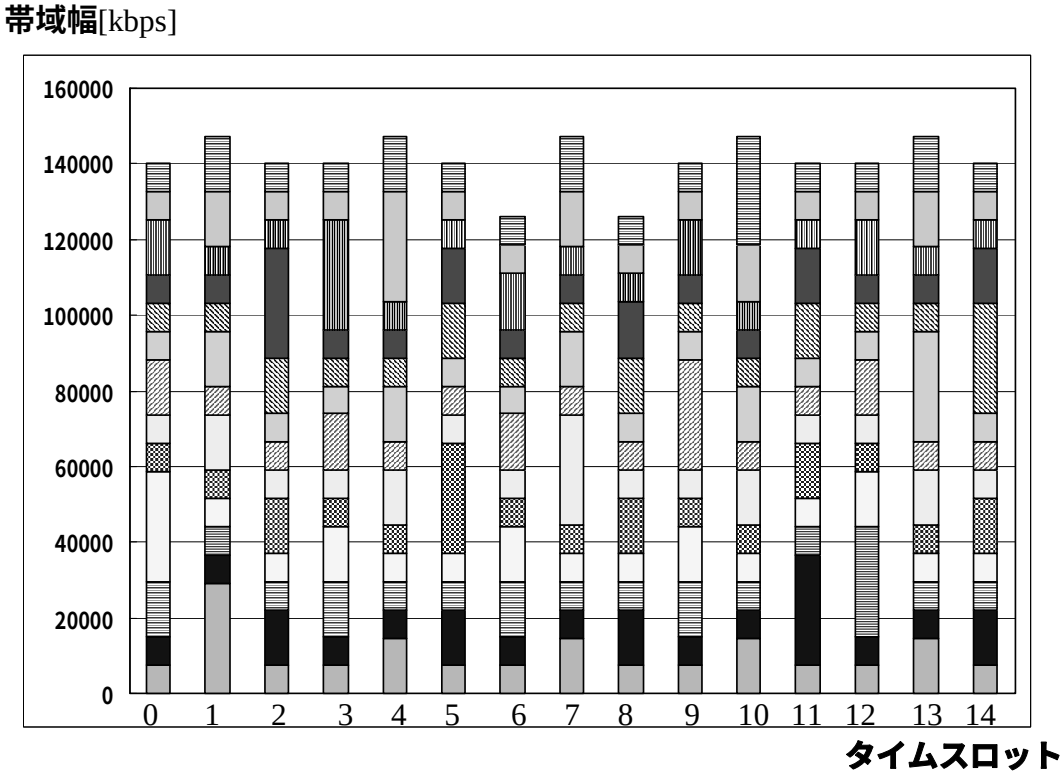

図 6.6: 呼受付計算 (PF クラス 13 フロー)

6.3.2 フレームの遅延時間

次に各クラスのフレームの遅延時間について見る。グラフはEF、PF、BEのフローを1:1:1の割合で流した場合のフレームの遅延時間を計測したグラフである。提案手法に関しては、Ingress Routerにて割り当てたタイムスロットまで転送を行わないので、その分の遅延が発生している。それによってリアルタイム性が低くなっている。呼受付申請を行い、運良く近くのタイムスロットが空いていれば遅延が少なくリアルタイム性の確保ができるが、逆に近くのタイムスロットに空きがなければ最大500ms近くキュー内で待つことになるので、リアルタイム性を保つことができなくなる。

これに対して、単純優先スケジューリングの方は到着して他に転送中のパケットが無ければ直ぐに転送できることから、非常に速く到着しており、リアルタイム性が高い転送結果となっている。

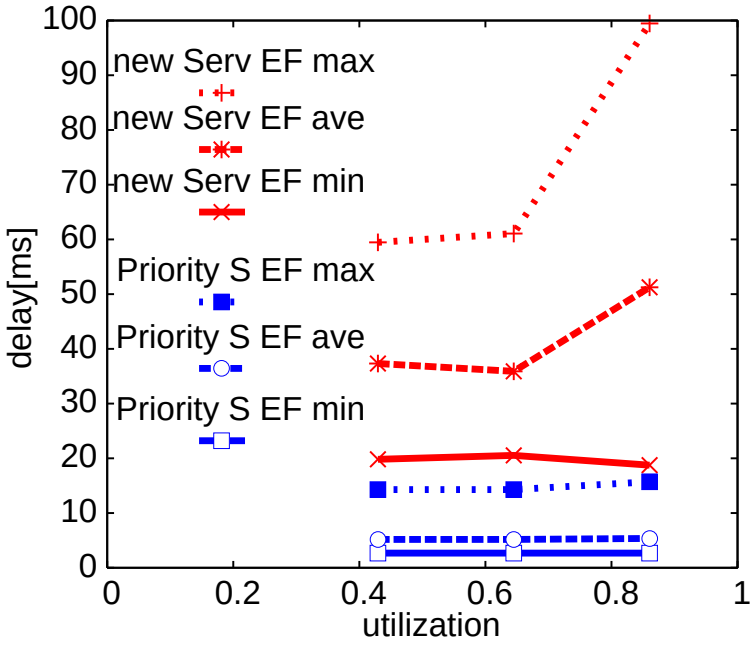

図 6.7: EF クラスのフレーム遅延

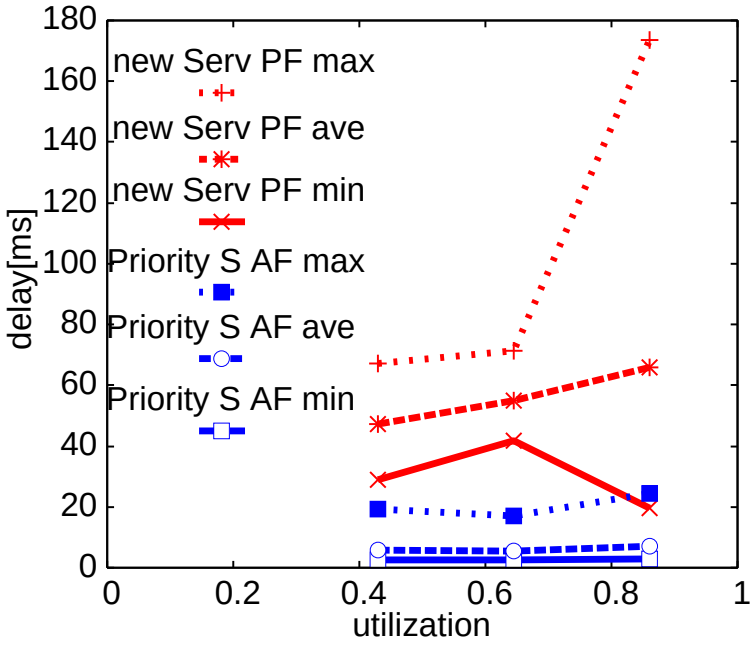

図 6.8: PF、AF クラスのフレーム遅延

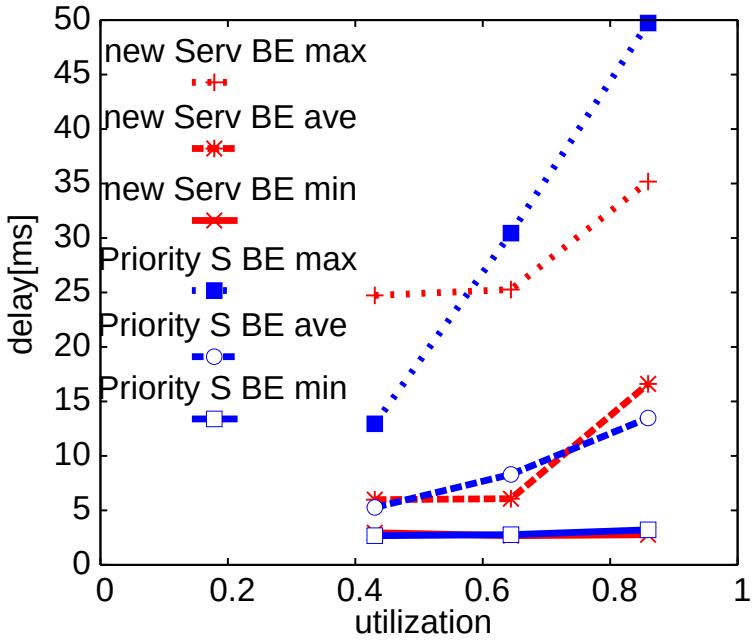

図 6.9: BE クラスのフレーム遅延

6.3.3 I ピクチャの遅延揺らぎ

次に各クラスの I ピクチャのフレーム遅延の揺らぎを見る。これらのグラフも EF、PF、BE を 1:1:1 の割合で流した場合の I ピクチャのフレームの到着時における揺らぎを計測した結果である。提案手法の EF クラスを比較すると、提案手法の方が単純優先スケジューリングよりも到着時間に揺らぎがない傾向にある。これはキューをフロー毎に用意してマルチレベルラウンドロビンで転送をしているので、EF クラスのパケットが選択される確率が高くなるためである。EF クラスにおける同じレベルのサービス内での満足度は提案手法の方が高い。しかし中間クラスの比較においては AF クラスが良いときもある。対して PF クラスは、タイムスロットで送信開始時刻が決められているので、同レベルのフローが多くなればなるほど増加する傾向があり、これは EF と共通の特性である。

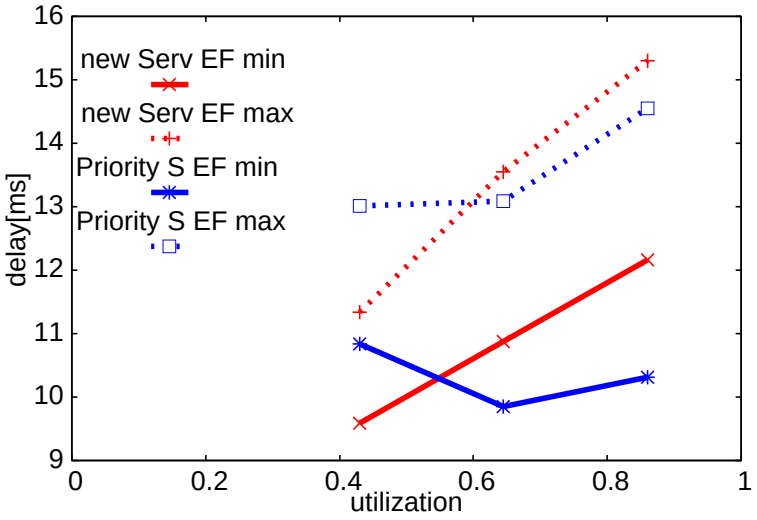

図 6.10: EF クラス I ピクチャの遅延揺らぎ

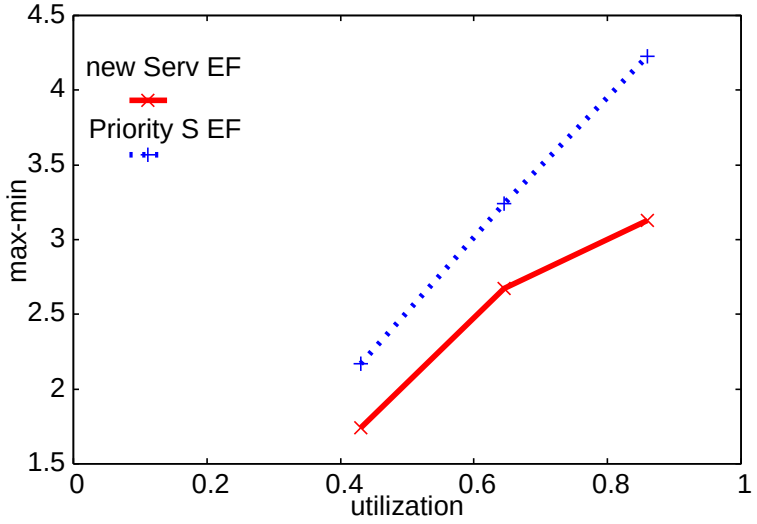

図 6.11: EF クラス I ピクチャの遅延揺らぎ (最大-最小)

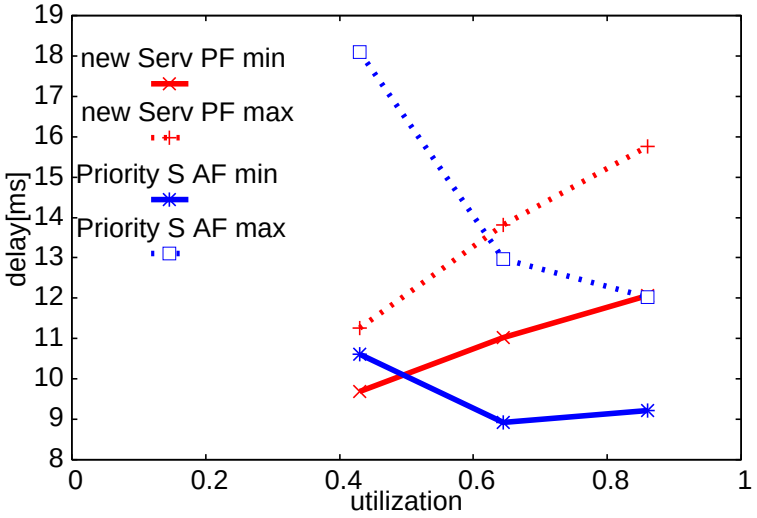

図 6.12: PF クラス I ピクチャの遅延揺らぎ

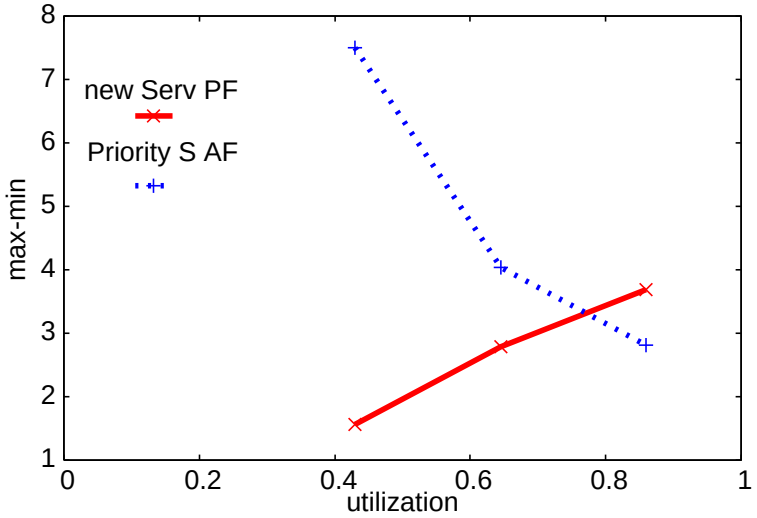

図 6.13: PF クラス I ピクチャの遅延揺らぎ (最大-最小)

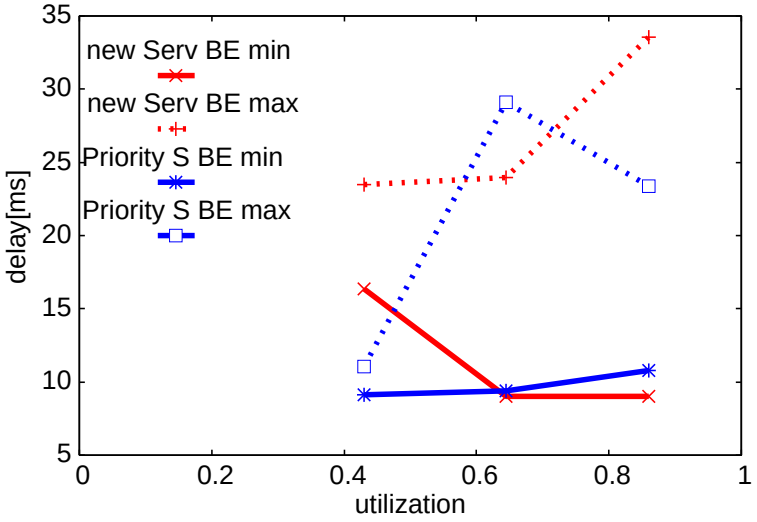

図 6.14: BE クラス I ピクチャの遅延揺らぎ

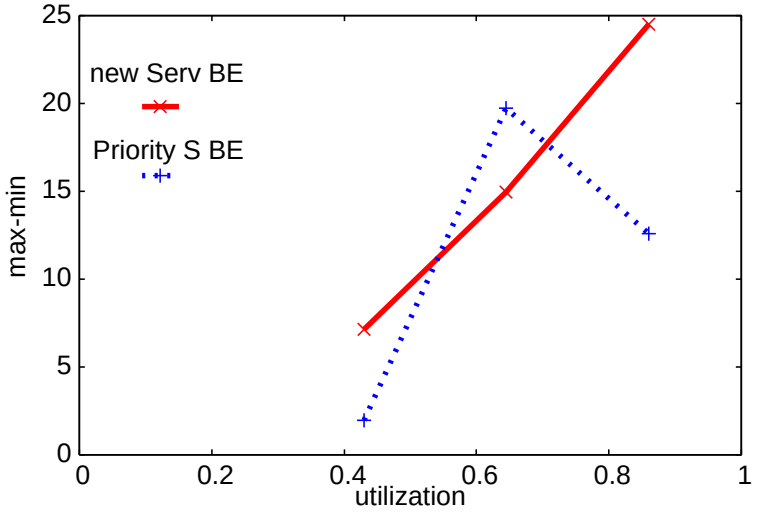

図 6.15: BE クラス I ピクチャの遅延揺らぎ (最大-最小)

6.3.4 フレームの到着遅延

- 提案手法

フロー本数				フレームの遅延数 / フレーム総数		
EF	PF	BE	使用率	EF	PF	BE
2	2	2	0.43	0 / 6477	0 / 6477	0 / 6480
3	3	3	0.65	0 / 9716	0 / 9715	0 / 9720
4	4	4	0.86	0 / 12953	0 / 12952	3 / 12960
4	6	0	0.72	0 / 12954	0 / 19423	-
4	7	0	0.79	0 / 12951	0 / 22659	-
4	8	0	0.86	0 / 12947	0 / 25900	-
9	0	0	0.65	0 / 29135	-	-
10	0	0	0.72	0 / 32377	-	-
0	12	0	0.86	-	0 / 38847	-
0	13	0	0.93	-	398 / 42076	-

- 単純優先スケジューリング (バッファリングが 33.3ms の場合)

フロー本数				フレームの遅延数 / フレーム総数		
EF	AF	BE	使用率	EF	AF	BE
2	2	2	0.43	3121 / 6480	3052 / 6480	2752 / 6480
3	3	3	0.65	4700 / 9720	4745 / 9720	4253 / 9720
4	4	4	0.86	5744 / 12960	5791 / 12960	6885 / 12958
4	6	0	0.72	5722 / 12960	8854 / 19440	-
4	7	0	0.79	5721 / 12960	10208 / 22679	-
4	8	0	0.86	5728 / 12960	11351 / 25919	-
4	9	0	0.93	5790 / 12960	11781 / 29157	-
3	0	0	0.21	4694 / 9720	-	-
4	0	0	0.28	5720 / 12960	-	-
0	12	0	0.86	-	17734 / 38879	-
0	13	0	0.93	-	18334 / 42117	-

- 単純優先スケジューリング (バッファリングを 66.6ms に増やした場合)

フロー本数				フレームの遅延数 / フレーム総数		
EF	AF	BE	使用率	EF	AF	BE
2	2	2	0.43	0 / 6480	0 / 6480	0 / 6480
3	3	3	0.65	0 / 9720	0 / 9720	0 / 9720
4	4	4	0.86	0 / 12960	0 / 12960	2 / 12958
4	6	0	0.72	0 / 12960	0 / 19440	-
4	7	0	0.79	0 / 12960	0 / 22679	-
4	8	0	0.86	0 / 12960	5 / 25919	-
4	9	0	0.93	0 / 12960	108 / 29157	-
3	0	0	0.21	0 / 9720	-	-
4	0	0	0.28	0 / 12960	-	-
0	12	0	0.86	-	0 / 38879	-
0	13	0	0.93	-	0 / 42117	-

次に各クラスのフレームが許容時間内に到着したかどうかについて見る。提案手法では保証されているクラスにおいて、フレームが許容時間内に到着しなかったことが、PF クラスを 13 フロー許可したときに 42076 フレーム中 398 回起こっている。率にして 0.95%である。このときの GMPLS 網におけるネットワークの使用率は 0.93 である。このフレーム遅延の原因を更に探ってみると、PF クラスの遅延パケット破棄機構が作動したのがわずかに 9 回であった。詳しくみていくと遅延したフレームは GMPLS 網には時間内 (33.3ms 以内) に転送されている。しかし次の Egress Router で遅延が起きていることが判明した。原因としては、高使用率で同レベルのサービス呼が多数あるとき、図 6.16 のようにラウンドロビンで GMPLS へ時間内に送信できたとしても、図 6.17 のように、長いパケット列を送信しなければならないフローが制限時間の最後に非常に高ビットレートで送信されている。Egress Router に到着したときにはアクセス系の 100Mbps がボトルネックになって、制限時間 33.3ms に送信できずに遅延が発生している。これは空間的には帯域を満たしていても、時間的な軸に戻った場合に品質を保証できなかった例である。また、今回の実験では PF クラスのフローを 13 本流したときにしか確認できなかったが、バックボーンとアクセス系の帯域が違えば違うほど、同レベルのフローだけでバックボーン内を高使用率で転送されている場合に、一番長大なバーストをタイムスロット内に転送しなければならないフローで起り得る問題だと考えられる。

これに対して、単純優先スケジューリングの方は 33.3ms での非同期式でのバッファリングでは圧倒的に足り無いことがあり、サービスクラスに関係なく、割合的に 2 回に 1 回位の割合でフレームの遅延が起こっており、フレームレートが一定にならないために動画としては 15fps の動画よりも違和感のある品質が低いものになってしまう。非同期式ではバッファリングをもっと長くする必要がある。そこで、バッファリングを 2 倍の 66.6ms にして評価した結果も示す。これを見ると、33.3ms のときとは一転してフレームの到着遅延が激減している。これらの結果から単純優先スケジューリングの場合はバッファリン

グを多くすると、フレームの到着遅延が少なくなり品質を保証できることが分かる。しかし、EF フロー 4 本、AF フロー 8 本で AF クラスにおいて 25919 フレーム中 5 回、EF フロー 4 本、AF フロー 9 本で AF クラスにおいて 29157 フレーム中 108 回とフレームの到着遅延が起きている。優先度の異なるクラスが混在する場合では、単純優先スケジューリングは高使用率になると下位クラスを保証できなくなるということが言える。

呼受付制御機構付き単純優先スケジューリングの結果からも、QoS を保証するにはアドミッションコントロールが最も重要だということがわかる。

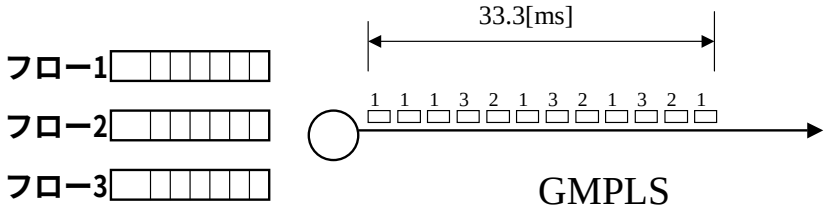

図 6.16: 同レベルのフローによる高使用率時

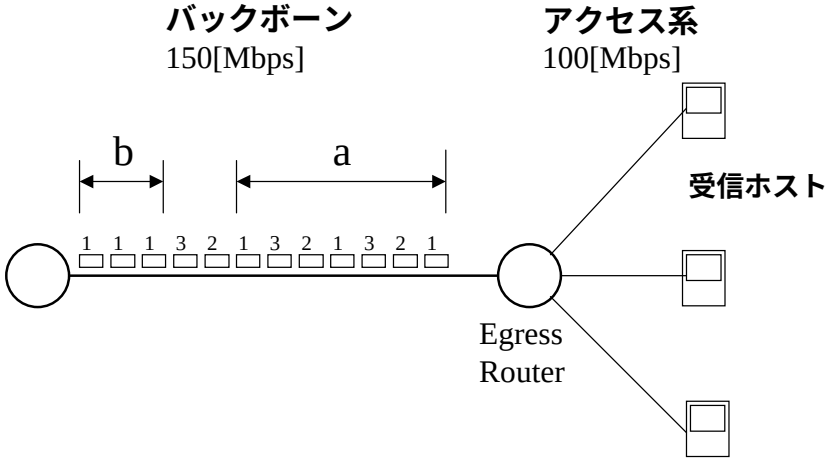

図 6.17: 同期非同期接続における問題

第7章　結論

7.1　結論と考察

MPEG2のトラヒック特性に着目し、GMPLSを対象とするQoS制御システムを提案した。具体的には、タイムスロット方式の呼受付制御機構とパケットスケジューリング機構を提案した。本提案手法の効果を確認するために計算機によるシミュレーション実験をした。

その結果、呼受付制御機構を実装した単純優先スケジューリングに比べて、提案手法は品質保証する最優先フローをより多く受付、送信できるという結果が得られた。またフレームの許容時間内の到着をかなり高使用率まで保証できることが示せた。反面、リアルタイム性が低くなるという、トレードオフが起きた。しかし、同一クラス内のフロー間の公平性は高いことを示した。

一方、本提案手法の評価の対象として選んだ、呼受付制御機構付きの単純優先スケジューリングはバッファリングが少ないとリアルタイム性は高いがフレーム落ちを頻発し、バッファリングを多くするとフレームの到着遅延数が少なくなるが、リアルタイム性が本提案手法とあまり変わらなくなることを示した。また同一クラス内のフロー間の公平性は提案手法より低く、偏ることを示した。

7.2　課題

提案手法のリアルタイム性に関しては到着時刻とルータのタイムスロットの差がそのまま影響してくる。これを満足する方法として、タイムスロットの探索範囲を限定する方法が考えられる。例えば、高いリアルタイム性を必要とするときは、タイムスロットの探索範囲を到着から3スロットに限定する。逆に多少の遅延があっても良いので、帯域の保証だけをしてほしいときは、15スロット全てを探索する。このように、本提案方式はそれぞれ異なったQoSを保証するサービスクラスを複数提供できる可能性がある。この考えられる様々なサービスクラスについての効果を確認し、またどういうサービスを選択し提供するかという課題が残る。

次に、PFクラスのフローが13フローのときに起こった、Egress Routerでの遅延をどう取り扱うかで課題が残る。これを解決する方法としては、Egress側でも33.3msのバッファリングをするや、パケットスケジューリングにおいてラウンドロビンの滞在時間を1パケット時間からピクチャの種類に応じて変更するなど様々方式が考えられる。Egress

側でバッファリングする場合は、バースト性を緩和して送信できるが、受信ホストでバッファリングを33.3msに制限して、極力バッファリングしない方式だったのが、ネットワーク側で更にバッファリングすることになり、あまり好ましく無いようにも思われる。ただ、既にリアルタイム性が無いことを省みて、更に1フレーム遅延が増えることを変わらないと思うか、より重い負担だと思うかはユーザの満足度に任される所だと考える。

最後に、より多くのGOPに適用するという課題がある。本論文で取り扱ったのはN=15,M=3のMPEG2のみである。これをより多くの種類のGOPを送信する場合にどうするかである。素なGOPをタイムスロットに割り当てるのは非常に難しくなり、効率も悪くなることが予想される。そこで、一つの考えとしてはGOPを限定することで、タイムスロットスケジューリングを可能とすることが挙げられる。実際に、MPEG2のエンコードでよく使われるGOP構造は限られてくる。動画は日本のTVで使われるNTSC方式なら毎秒30フレームというように規格が決まっており、それをMPEG2にエンコードする際には、エンコードしたい動画のフレームレートの約数にGOPのNを設定することが多い。編集や画質、圧縮などの効率からフレームレートと素な数値はあまり使われない。

そこで例えば、GOPをN=5,6,10,12,15,20のみに限定するといった方法が考えられる。こうすれば、Nの公倍数である60スロットを計算すればタイムスロット割り当てが可能である。

謝辞

日頃から熱心にご指導くださった日比野靖教授にこの場をお借りして、深く感謝いたします。ネットワーク、計算機アーキテクチャから雑学にまで多岐にわたり、本にも載っていない貴重な事を学ばせていただき、幸せに思います。

また、貴重なご意見をくださった計算機アーキテクチャ講座の田中清史助教授、菅原英子助手に深く感謝いたします。また、一緒に学んだ計算機アーキテクチャ講座の皆様に深く感謝いたします。

最後に、私が大学院に進学するのを暖かく見守ってくれた両親、並びに家族に深く感謝します。

参考文献

[1] 青山友紀, 山中直明, MPLS とフォトニック GMPLS, 電気通信協会, 2003.

[2] 河西宏之, 辻久雄, 槙一光, 上田裕巳, わかりやすい SDH/SONET 伝送方式, オーム社,2001.

[3] 平田謙司, 品川高廣 吉澤康文, MPEG におけるピクチャの優先度を考慮した配信方式, spa2005 poster, 2005.

[4] 斎真一朗, GMPLS に向けたサイクル・リジット型トラヒックの QoS 制御, 北陸先端科学技術大学院大学, 修士論文, 2005.

付 録A　高帯域幅なバックボーンでのシミュレーション実験

A.1　SDH STM-4相当におけるシミュレーション実験

現実世界において、WDMの1波長の上には6章で行ったシミュレーション実験より高帯域のパスが張られているのが一般的である。そこで6章のバックボーン150Mbpsより高帯域幅なSDH STM-4、600Mbps相当におけるシミュレーション実験を行い、その特性がどのようになるかを考察した。シミュレーション実験の前提条件、並びに呼受付制御機構付き単純優先スケジューリングの条件は本章での実験と同じで、シミュレータ内での設定値を変更して行う。また、評価方法も本章との同じで変更はない。

以下に変更したシミュレータ内での設定値を書き記す。

- シミュレータ内の設定値
  - 1クロック=0.1799856usとする。
  - 1ms=5556クロックとする。
  - 送信ホスト局舎間は2km、バックボーンの長さは200kmとする。
  - 光ファイバー内の信号の速度は、ファイバーの屈折率を1.5として20万km/sとする。
  - アクセス系の帯域幅は100.11875Mbpsバックボーンは602.71488Mbpsとする。これはあくまでも、シミュレータ内の数値であり、実世界のものとは少々の差がある。

A.2　結果

A.2.1　各サービスクラスの送信可能数

呼受付成功数について評価する。下の表の括弧内はGMPLS網に対するそのサービスクラスの使用率である。

QoS 制御法	EF 単体	PF/AF 単体	EF+PF/AF 混合
提案手法	42(0.75)	54(0.96)	EF30+PF15,EF25+PF20
単純優先	18(0.32)	55(0.98)	EF18+AF37

GMPLS 網の帯域幅を大きくしても、このように提案手法の方が最大帯域幅保証を行うクラスでの呼受付数は多くなる。逆に、平均帯域幅保証を行うクラスでは単純に平均帯域幅を加算して帯域計算する呼受付制御機構付き単純優先スケジューリングの方が、呼受付数は多くなる。また、EF クラスと PF/AF クラスを混合した場合も単純に平均帯域幅を加算している呼受付制御機構付き単純優先スケジューリングの方が合計フロー数では多くなるが、EF クラスは 18 本より増やすことができないので、提案手法の方が最大帯域幅保証を行うクラスの割合を多くすることができ、柔軟性がある。

A.2.2 フレームの遅延時間

次に各クラスのフレームの遅延時間について見る。グラフは EF、PF、BE のフローを 1:1:1 の割合で流した場合のフレームの遅延時間を計測したグラフである。提案手法は、バックボーンの帯域幅が増大したことで呼受付されるフロー数が増え、それによってタイムスロットの空きが近くに存在しない場合が目立ってきており、遅延が 150Mbps のときに比べて大幅に増えている。一方、単純優先スケジューリングの方はバックボーンの帯域幅が増大したことで、遅延が 150Mbps のときより更に短くなっている。

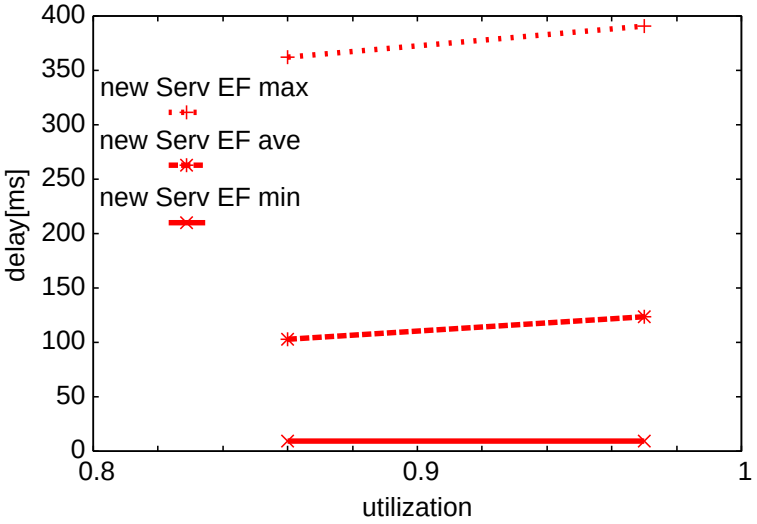

図 A.1: 提案手法 EF クラスのフレーム遅延

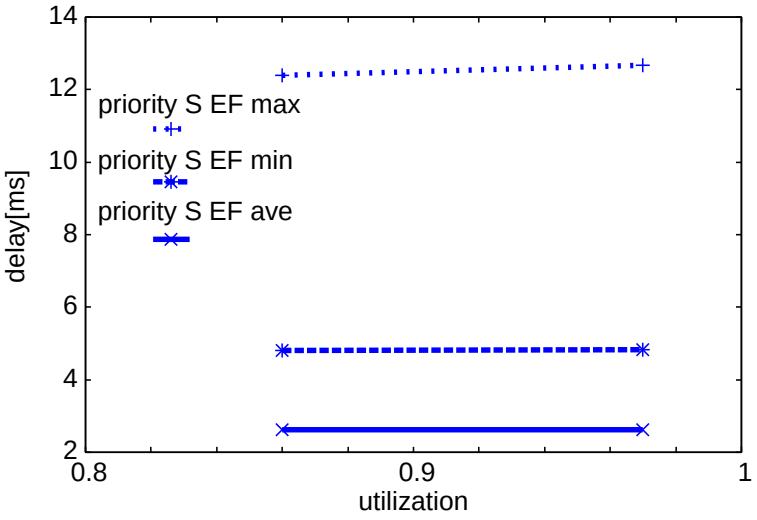

図 A.2: 優先スケジューリング EF クラスのフレーム遅延

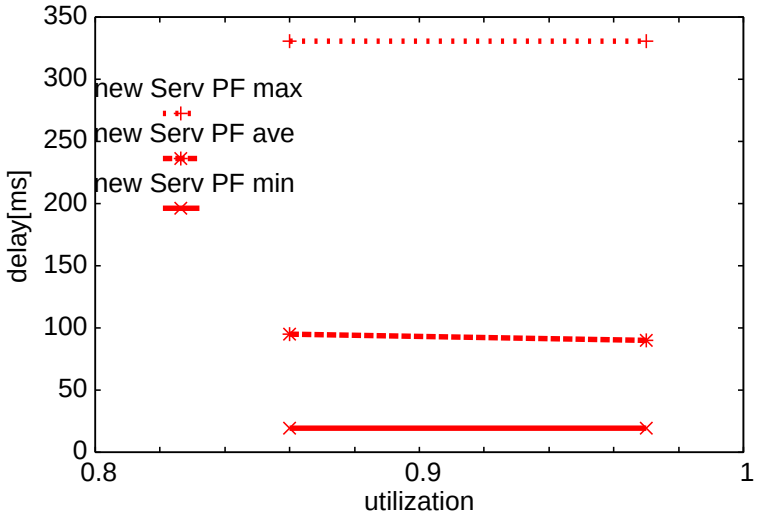

図 A.3: 提案手法 PF クラスのフレーム遅延

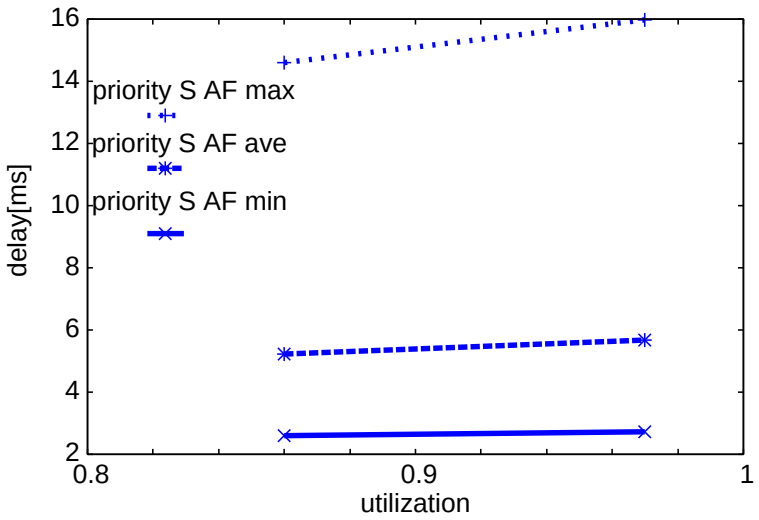

図 A.4: 優先スケジューリング PF クラスのフレーム遅延

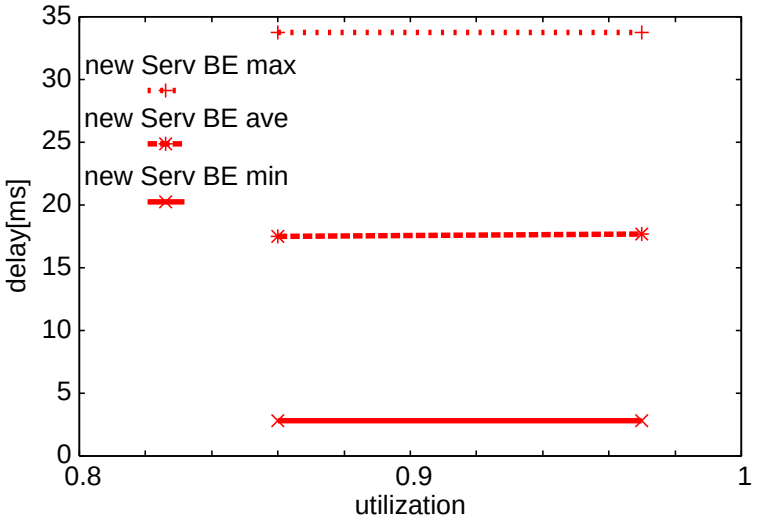

図 A.5: 提案手法 BE クラスのフレーム遅延

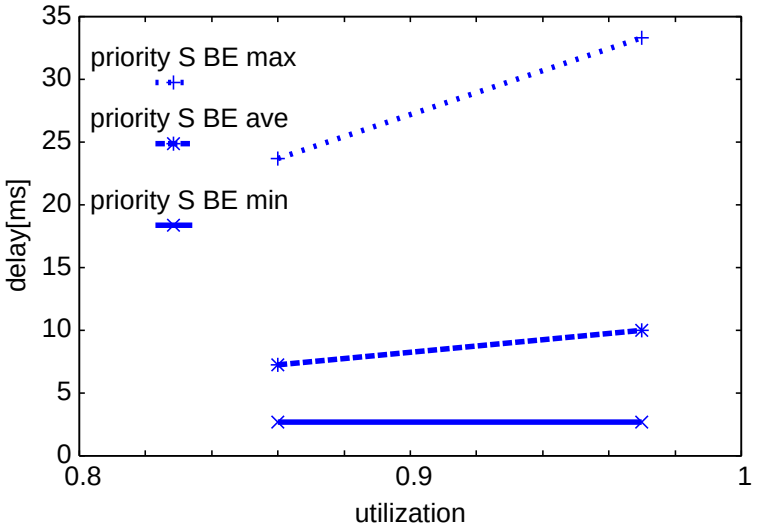

図 A.6: 優先スケジューリング BF クラスのフレーム遅延

A.2.3　I ピクチャの揺らぎ

次に各クラスのI ピクチャのフレーム遅延の揺らぎを見る。これらのグラフも EF:PF/AF:BE を 1:1:1 の割合で流した場合のI ピクチャのフレーム到着時における揺らぎを計測した結果である。提案手法の保証クラス EF,PF は共にマルチレベルラウンドロビンの効果が出ており、バックボーンが 600Mbps になったことで、150Mbps のときよりも揺らぎが小さくなっている。提案手法の保証クラス 2 クラスの揺らぎの大きさは EF の方が小さい。

一方、単純優先スケジューリングの方もバックボーンが高速になったが、AF クラスの使用率 0.86 で 150Mbps のときと 600Mbps のときで比べると揺らぎが大きくなっている。また提案手法と単純優先スケジューリングを比べると、EF、PF/AF 全てで提案手法の方が揺らぎが小さい結果となっている。

提案手法はマルチラウンドロビンを使用することで、同一クラス内のフロー間に公平にバックボーン高速化の恩恵を受けているのに対して、単純優先スケジューリングは高速化の恩恵が特定のフローに偏っていると考えられる。

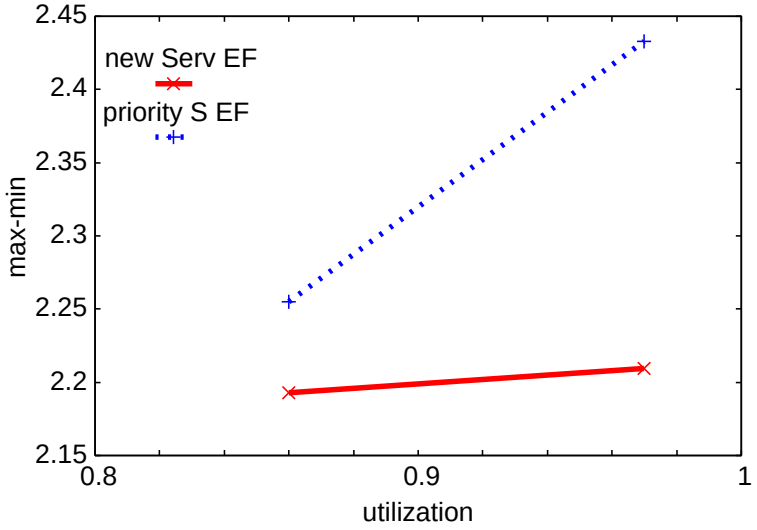

図 A.7: EF クラスI ピクチャの遅延揺らぎ（最大-最小）

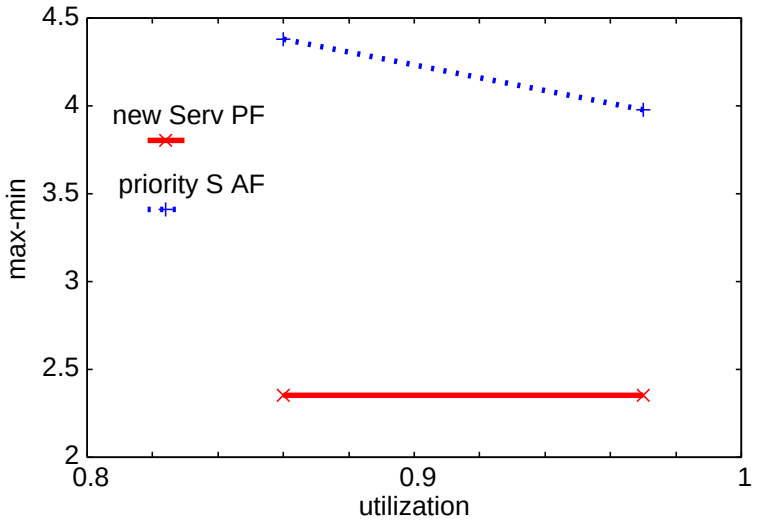

図 A.8: PF/AF クラス I ピクチャの遅延揺らぎ（最大-最小）

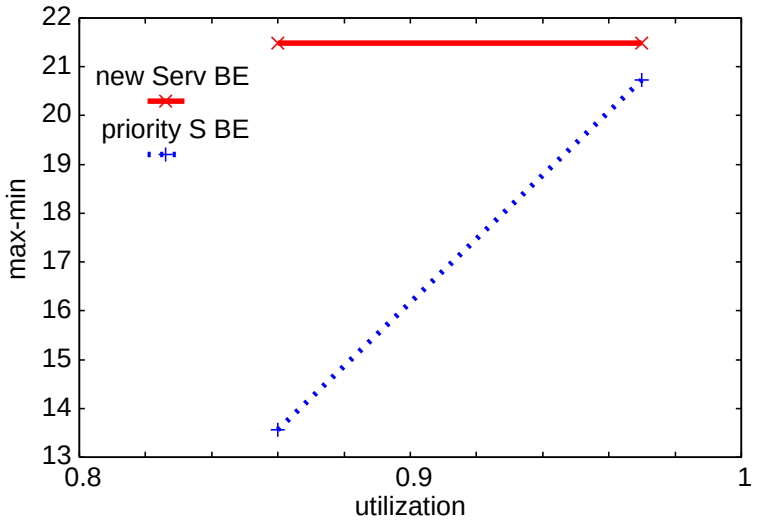

図 A.9: BE クラス I ピクチャの遅延揺らぎ（最大-最小）

A.2.4 フレームの到着遅延回数

- 提案手法

フロー本数				フレームの遅延数 / フレーム総数	
EF	AF	BE	流入量の対 GMPLS 比	EF	PF
16	16	16	0.86	0 / 51785	0 / 51797
18	18	18	0.98	0 / 58247	0 / 58275
18	30	18	1.18	0 / 58255	0 / 97113
20	20	10	0.9	0 / 64745	0 / 64747
25	20	15	1.08	0 / 80903	0 / 64739
30	15	18	1.13	0 / 97086	0 / 48556
42	0	18	1.08	0 / 135968	-
0	52	6	1.04	-	29 / 168307
0	53	6	1.06	-	580 / 171549
0	54	6	1.08	-	3502 / 174787
5	48	6	1.06	0 / 16186	1041 / 155363

- 単純優先スケジューリング（バッファリングが 66.6ms の場合）

フロー本数				フレームの遅延数 / フレーム総数	
EF	AF	BE	流入量の対 GMPLS 比	EF	AF
16	16	16	0.86	0 / 51840	0 / 51840
18	18	18	0.98	0 / 58320	0 / 58320
18	37	18	1.3	0 / 58320	0 / 119872
0	54	6	1.08	-	0 / 178192
5	48	6	1.06	0 / 16200	0 / 155518
5	50	6	1.09	0 / 16200	0 / 161992

次に各クラスのフレームが許容時間内に到着したかどうかについて見てみる。今回は BE クラスのフローを流すことでバックボーンの帯域幅よりも流入量が大きくなっていることが多いため、BE クラスのパケットはキュー内でずっと待たされており、リアルタイム動画として成り立つデータは受信側に到着していない。そこで BE クラスのフレームの遅延に関しては省略する。提案手法では、GMPLS 網 150Mbps でシミュレーション実験したときと同じく、PF クラスで高使用率となると Egress Router にて遅延が起きている。今回の実験では遅延パケットの破棄機構が 1 度も作動せずに、時間内に GMPLS 網へ転送されており、全て Egress 側で遅延が起っている。これはバックボーンが大きくなったために、送信フローの本数が増えたことで実際に流れているフローの帯域が平均化、平滑化されて GMPLS 網の最大帯域幅を越える確率が低くなり、今回の実験では最大帯域幅を越える事が起らなかったためだと予想される。更に、各フレームのデータ量の変動量が対バックボーン比で小さくなったことで、データ量の変動が与える影響が小さくなったこと

もあげられる。また、アクセス系の 100Mbps との速度差が開いたことで、アクセス系の速度がより大きなボトルネックとなったと予想される。

一方、単純優先スケジューリングの方はバッファリングを 33.3ms にした場合は 150Mbps の場合と同じく、サービスクラスに関係なく、遅延が起っているので、バッファリング 66.6ms における結果を示す。これを見ると、保証クラスではフレームの遅延が起っていない。これもバックボーンが大きくなったことで、送信フローの本数が増え、流れているフローの帯域が平均化、平滑化された事で最大帯域幅を越えなくなったためだと予想される。

A.3 結論

GMPLS 網の最大帯域幅を大きくし、シミュレーション実験を行った。その結果、提案手法はバックボーンの帯域幅が大きくなり、アクセス系との速度差が大きくなるほど Egress 側での遅延が起る傾向があることが分かった。また近いタイムスロットが空いてないことが多く、それによって遅延が増大することを確認した。リアルタイム性が著しく良くない場合がある。これを満足させるためにもタイムスロットの探索範囲を限定するなどのサービスクラスの必要性が高くなった。

また、呼受付制御機構を実装した単純優先スケジューリングは、バックボーンの帯域幅が大きくなればなるほど、遅延の発生が無くなることを確認できた。一方で、同一クラス内のフロー間の公平性が、提案手法に比べて劣ることがはっきりしてきた。

以上の結果から、バックボーンの帯域幅と送信する MPEG2 の帯域幅の比が小さいときは提案手法が、比が大きいときは単純優先スケジューリングがより効果的である。つまり、リソースが潤沢にあるかないかで効果的な方法は異なり、リソースが潤沢ならば簡単な方法が有効であり、リソースが少ないならば、本提案方式が有効となってくる。