

# MPLS ネットワーク上での格差サービスの実装と評価

西村 浩二<sup>†</sup> 松本 勝之<sup>††</sup>, 相原 玲二<sup>†</sup>

近年のインターネット電話やテレビ会議などの低遅延・広帯域を要求するアプリケーションの出現により、ネットワークに対して QoS (Quality of Service) の保証機能が求められるようになってきた。しかし、既存のネットワーク技術では、アプリケーションごとに十分な QoS を保証できないのが現状である。そのため、現在研究がさかんに行われており、MPLS (Multi Protocol Label Switching) 技術と Diffserv (Differentiated Services) 技術が注目されている。本論文では、MPLS の実装の 1 つである CSR (Cell Switch Router) をベースとする MPLS ネットワークを構築し、そのネットワーク上でパケット単位の格差サービスを提供する方式を設計し、実装を行った。さらに、この機能を利用するアプリケーションとして MPEG2 over IPv6 システムを取り上げ、評価実験を行った。その結果、本方式による通信品質の効果的な向上が認められた。

## An Implementation and Evaluation of a Differentiated Service in MPLS Networks

KOUJI NISHIMURA,<sup>†</sup> KATSUYUKI MATSUMOTO<sup>††</sup>, and REIJI AIBARA<sup>†</sup>

In recent years, many real-time applications (Internet phone, Internet radio, TV conference, and so on), which request the QoS (Quality of Service), have been appeared. However, existing networks can not guarantee enough QoS to those applications. For this issue, two technologies, MPLS (Multi Protocol Label Switching) and Diffserv (Differentiated Services) are discussed. In this paper, we construct an MPLS network by CSR (Cell Switch Router), which is one of the implementation of MPLS technology. Then, we design and implement a method to realize a differentiated service for each packet over this network. And then, we evaluate it with an application of MPEG2 over IPv6 system. From the result, the effective improvement of the QoS was recognized by employing this method.

### 1. はじめに

近年、インターネットはさまざまな用途に利用されるようになり、映像や音声の配信も行われるようになった。映像や音声を快適に楽しむためには画像がコマ落ちしない、音声途切れしないなどが要求されるが、それを実現するにはネットワークにおいてパケットを遅延なく配送したり、また、パケットが損失することのないよう配送を行う必要がある。これらの低遅延、低パケット損失率などの指標は総称して QoS (Quality of Service) と呼ばれ、現在さかんに研究が行われている。QoS 保証を実現するための技術は数多く提案されているが、本論文ではその中でも特に MPLS (Multi Pro-

ocol Label Switching)<sup>1)</sup> と Diffserv (Differentiated Services)<sup>2)</sup> に着目する。

MPLS では、同じ始点・終点・ポート番号を持つ一連のパケット (以下、フローと呼ぶ) に固定長の短いラベルを割り当て、中継ノードではそのラベルをハードウェアで高速にスイッチングすることによりパケットの高速転送を実現する。一方 Diffserv では、パケットごとに異なった DSCP (DiffServ Code Point)<sup>3)</sup> と呼ばれる識別子を付加することで、パケットごとに異なった振舞い (PHB: Per Hop Behavior) を指定することができる。

本論文では QoS 保証を実現するネットワークの構築を第 1 の目的とし、東芝 (株) により開発された MPLS の実装である CSR (Cell Switch Router)<sup>4)</sup> をベースとする MPLS ネットワークを構築する。そして、そのネットワーク上で格差サービスを実現する方式を設計し、実装を行う。また本方式を利用するアプリケーションの例として MPEG2 over IPv6 システムを取り上げ、評価実験を行う。その結果、十分な通信

<sup>†</sup> 広島大学総合情報処理センター  
Information Processing Center, Hiroshima University

<sup>††</sup> 広島大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Hiroshima University  
現在、日本テレコム株式会社  
Presently with Japan Telecom Co., Ltd.

帯域が確保できない場合でも、アプリケーションが本方式により提供される格差サービスを利用し、一部の packets を優先することで通信品質の向上が可能であることを示す。

## 2. 関連技術の動向

ここでは、本研究に関連する技術として、MPLS 技術と Diffserv 技術を概説する。

### 2.1 MPLS

MPLS は現在、IETF の MPLS ワーキンググループにて標準化が進められている技術である。MPLS はレイヤ 2 (ネットワーク層) のラベル [ ATM (Asynchronous Transfer Mode) における VPI (Virtual Path Identifier) / VCI (Virtual Channel Identifier) やフレームリレーにおける DHLI (Data Link Connection Identifier) ] とレイヤ 3 (トランスポート層) のラベル (IPv4/IPv6 アドレス) を対応付け、レイヤ 2 のラベルを用いてハードウェアで転送処理を行うことで、既存のルータの高性能化、高機能化を実現する。

MPLS の動作の概要を図 1 に示す。図 1 における LSR (Label Switch Router) とは、ラベルを用いてスイッチング処理を行うルータである。既存のルータでは、図 1-A のように IP パケットをホップバイホップで転送している。各中継ノードではパケットはレイヤ 3 まで引き上げられ、ルーティング処理が施された後、次のノードへ転送される。このとき、レイヤ 2 に ATM を利用する場合は、各中継ノードで IP パケットと ATM セルの間で分割と再構成が必要となるため、従来どおり中継ノードにおけるパケット単位でのルーティング処理が可能である反面、この処理が転送遅延の一因となっていた。LSR は LDP (Label Distribu-

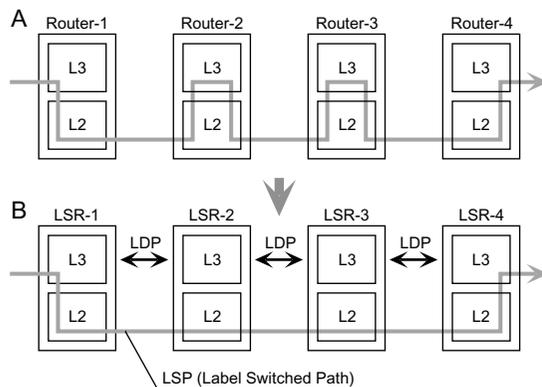


図 1 MPLS の概要

Fig. 1 Outline of MPLS.

tion Protocol)<sup>5),6)</sup>により、隣接する LSR 間でフローとラベルの対応関係を共有する。そして、各 LSR 内にラベルの変換テーブルを持つことで、始点 LSR から終点 LSR までの LSP (Label Switched Path) と呼ばれるパスが確立される (図 1-B)。一度ラベルを割り当てられたフローは、中継ノード上ではレイヤ 2 のみで転送が行われるようになる。

### 2.2 Traffic Engineering over MPLS

MPLS は、トラフィックの分散やルータの負荷分散を行う Traffic Engineering (以下、TE と呼ぶ) を実現するうえで重要な技術である<sup>7)</sup>。TE を実現するにはフローの分散を制御できる必要があるが、MPLS ではそれを容易に行うことができる。前節で述べたように LSR は LSP を確立してパケットの転送を行うが、その際中継ノードではラベルのみを用いて転送されるため、終点アドレスの情報を必要としない。

従来のネットワークでは、終点アドレスの情報のみを利用した転送を行っていたため、同じ終点アドレスを持つパケットはすべて同じ Next Hop に転送されていた。しかし、MPLS では同じ終点アドレスを持つパケットに対しても複数の経路を提供することができる。これにより、トラフィックの分散、負荷分散、輻輳回避などが実現できる。

### 2.3 Diffserv

Diffserv は現在、IETF の Diffserv ワーキンググループで標準化が進められている技術である。Diffserv では、DSCP と呼ばれる識別子を用いてパケットごとに異なった振舞い (PHB) を指定する。従来のルータでは、すべてのパケットを対等に取り扱うベストエフォート型の処理を行っていたため、アプリケーションごとに異なった QoS を提供することは困難であった。しかし Diffserv 技術を導入することにより、パケットごとに異なる優先度を指定することが可能となる。

図 2、図 3 にそれぞれ IPv4、IPv6 のヘッダで DSCP を記述するフィールドを示す。IPv4 では従来サービスタイプ・フィールドとして定義されていたフィールドを再定義して使うことになっている。また、IPv6 ではトラフィッククラス・フィールドを利用する。DSCP と PHB の対応付けはサービスプロバイダが規定することになっており、一般的な方針はまだ決まっていない。

### 2.4 MPLS Support of Differentiated Services

MPLS ネットワークにおいて格差サービスをサポートする研究が、IETF の MPLS ワーキンググループにおいて行われている。ここでは各種レイヤ 2 プロコ

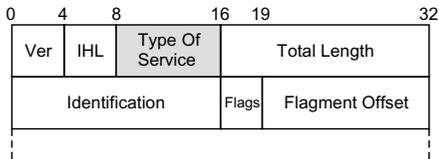


図 2 サービスタイプ・フィールド (IPv4 ヘッダ)  
Fig. 2 Type of service field in IPv4 header.

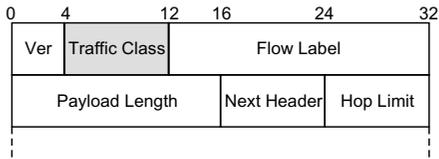


図 3 トラフィッククラス・フィールド (IPv6 ヘッダ)  
Fig. 3 Traffic class field in IPv6 header.

ルに対し、どのような方式で格差サービスを実現すればよいかを検討している<sup>8)</sup>。レイヤ 2 に ATM を用いる場合は 2 通りの方式が提案されている。1 つは DSCP と ATM ヘッダの CLP (Cell Loss Priority) フィールドを対応付け、適切なスケジューリングを行う方式である。もう 1 つは、CBR (Constant Bit Rate), VBR (Variable Bit Rate), ABR (Available Bit Rate), UBR (Unspecified Bit Rate) などの ATM のトラフィッククラスを利用する方式である。しかし、どちらの方式も実装はまだ行われていない。

そこで本研究では、後者の方式の実装を行った。実装ではフローごとに ATM のトラフィッククラスやパラメータを設定することでフロー単位での格差サービスを実現するほか、同一フローの中でも格差サービスが利用できるようにした。その際、1 つのフローが複数のパスに分散することとなり、厳密にはパス間でのパケット順序の並べ替えが必要となる。しかし、これは本論文の対象外とし、アプリケーションが RTP などの情報により自身で制御するか、TCP の機能に頼ることとした。

### 3. MPLS ネットワークの構築

本研究では、まず広島大学～広島市立大学間に MPLS ネットワークを構築し、MPLS ネットワークの性能を評価するための実験を行った。

#### 3.1 ネットワークの概要

図 4 のような MPLS ネットワークを構築した。LSR エッジルータ、LSR コアルータはそれぞれ広島大学 (広島市)、広島市立大学 (広島市) に設置した。CSR エッジルータおよび CSR コアルータのコントローラ部分は PC である。PC のスペックを表 1 に示す。また使用した OS、IPv6 実装<sup>9)</sup>、MPLS 実装、ATM

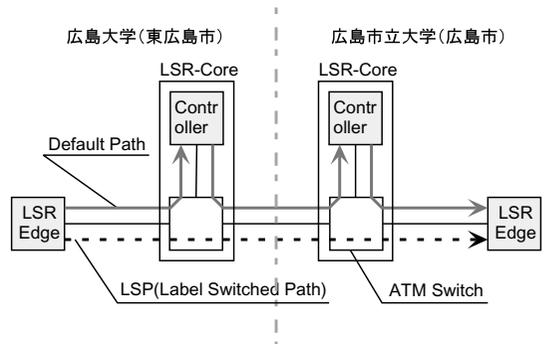


図 4 MPLS ネットワーク  
Fig. 4 MPLS network.

表 1 LSR のハードウェアスペック  
Table 1 Hardware specification of LSR.

設置場所	機能	CPU	メモリ
広島大学 (広島市)	LSR-Core	Pentium III 450 MHz	128 MB
	LSR-Edge	Pentium II 300 MHz	64 MB
広島市立大学 (広島市)	LSR-Core	Pentium II 333 MHz	64 MB
	LSR-Edge	Pentium Pro 180 MHz	128 MB

表 2 LSR の構成  
Table 2 Configuration of LSR.

項目	型番、バージョンなど
OS	BSD/OS 3.1
IPv6 実装	kame-19991220-bsdi3-snap (WIDE)
MPLS 実装	CSR for KAME for BSDI3.1 (東芝)
ATM NIC	ENI-155p-MF-C (Efficient Networks)
ATM スイッチ	AN-1000 (日立製作所)

NIC (Network Interface Card), ATM スイッチを表 2 に示す。今回構築した大学間 ATM 回線の使用可能帯域は 35 Mbps である。ただし、ATM、AAL5、IP、TCP などのヘッダオーバーヘッドを考慮すると、ユーザペイロードに使用できる帯域は IPv4 の場合で約 30.4 Mbps、IPv6 の場合で約 30 Mbps となる。

#### 3.2 性能測定

広島市立大学の LSR-Edge から広島大学の LSR-Edge まで、既存のルータと同様にホップバイホップで転送を行った場合と、双方の LSR-Edge 間に LSP を確立し、途中の LSR-Core では ATM スイッチでのスイッチングのみとなるようにした場合の性能を比較した。両者の比較においては、特にホップ数とスループットの関係に着目した。性能測定には IPv6 対応の Netperf<sup>10)</sup> を利用した。メッセージサイズ 8 K バイトのデータを 60 秒間連続して送り出し、ソケットバッファサイズを 512 バイトから 64 K バイトまで変化さ

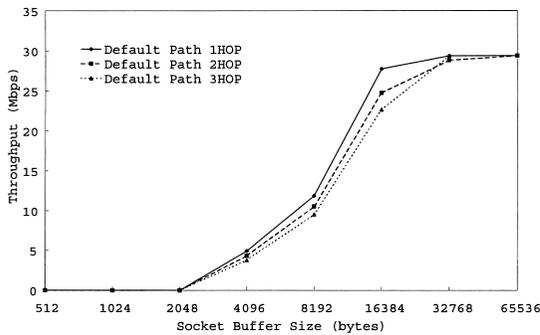


図 5 ホップバイホップ転送を行った場合のスループット (IPv6)  
Fig. 5 Throughput (hop-by-hop, IPv6).

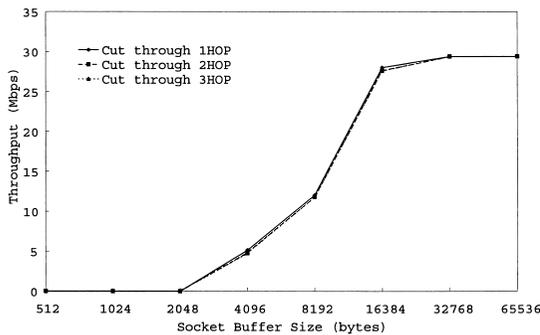


図 6 LSP を使用した場合のスループット (IPv6)  
Fig. 6 Throughput (LSP, IPv6).

せながら、スループットの変化を記録した。測定には TCP を使用し、IPv4 と IPv6 の両方で行った。

IPv6 の測定結果を図 5 と図 6 に示す。図 5 はホップバイホップで転送を行った場合の結果である。ホップ数が増加するにつれてスループットが減少しているのが分かる。ここで、ソケットバッファサイズが大きい場合に差がないのは回線が飽和状態となったためである。一方、図 6 は LSP を確立し ATM スイッチでスイッチングを行った場合の結果である。ホップ数の増加がスループットに与える影響が軽減されており、IPv4 の場合においてもほぼ同様な結果が得られた。

#### 4. 設計と実装

既存の MPLS の実装では、TE のための複数経路の提供や、格差サービスの提供は行われていない。そのため、QoS 保証を要求するアプリケーションに対して低遅延のサービスしか提供できなかった。そこで本研究では、同一の終点アドレスに対して複数の経路を選択可能とし、また QoS 保証を要求するアプリケーションに対してパケット単位で格差サービスを提供可能な方式を実装する。

Destination Address	Source Address	Dst Port	Src Port	QoS	VCI
192.168.4.0	192.168.1.1	*	*	*	40
192.168.4.0	192.168.1.2	*	*	*	50
192.168.3.0	192.168.2.1	*	*	0	60
192.168.3.0	192.168.2.1	*	*	1	70

図 7 QoS フロールーティングテーブル  
Fig. 7 QoS flow routing table.

#### 4.1 複数経路の提供

複数の経路を効率良く利用するためには、フローに対し柔軟にラベルを設定できなければならない。しかし本研究で使用する CSR の実装では、使用するラベルは終点アドレスのみから決定されていた。その理由の 1 つは、QoS を考慮した経路制御プロトコルがまだないということである。もう 1 つの理由として、基幹ネットワークでの利用を主な目的とする実装ではラベル資源を節約するため経路集約が一般に行われるということも考えられる。

そこで本研究では以下の方針により実装を行った。まず、本研究では格差サービスの導入による効果に注目するため経路の設定は静的に行うこととし、経路制御プロトコルは本論文の対象としない。また経路集約を行うのは運用上の問題であるため、ここでは経路集約については考慮しない。結果として、始点と終点のアドレスとポート番号、そして次節で述べる QoS 情報から次ノードを決定することができるように図 7 に示す QoS フロールーティングテーブルを新たに定義し、このテーブルの検索を CSR が行うフロールーティングテーブルの検索の前に行うようにした (図 8)。QoS フロールーティングテーブルの検索を導入することによる処理のオーバーヘッドは、フロールーティングテーブルの検索と同等である。

本方式の導入により、図 9 のようにネットワークが構成されているとすると、図 7 のテーブルを持つ ingress LSR に到着した 192.168.1.1 を始点アドレスとするパケットはレイヤ 2 において奥の経路を、192.168.1.2 を始点アドレスとするパケットは手前の経路を經由して 192.168.4.0 のネットワークに到達する。

#### 4.2 格差サービスの提供

次に格差サービスを提供する方式について述べる。ラベルと対応付けるフローの粒度については、同一フロー内での優先度制御が可能となるよう PQT (Port Quadruples with TOS)<sup>11)</sup> と同様の方式を採用した。すなわち、図 2 における TOS フィールドや図 3 に

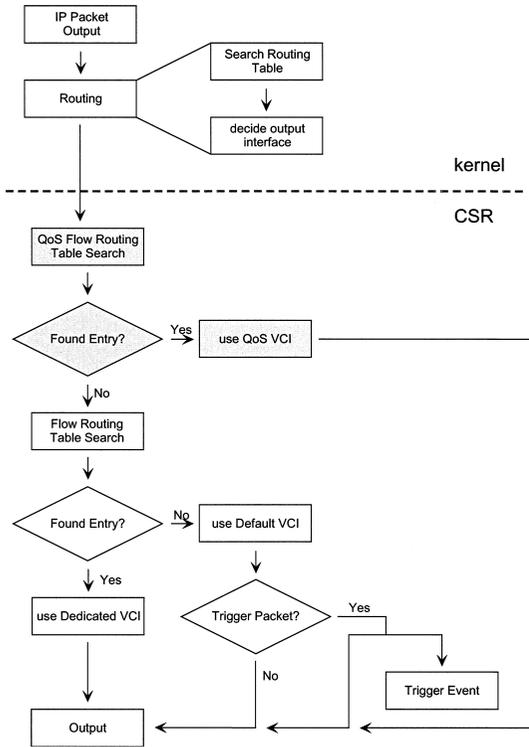


図 8 QoS フロールーティングテーブルの検索  
Fig. 8 Retrieval of QoS flow routing table.

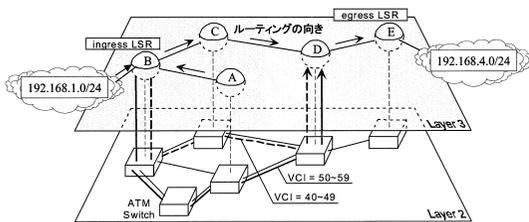


図 9 複数経路の提供  
Fig. 9 Providing multiple routes.

おけるトラフィッククラス・フィールドに格納された DSCP を図 7 に示すテーブルの QoS フィールドに対応付け、各エントリとラベルとの対応付けを行う。

これにより、異なる DSCP を持つパケットはそれに対応した異なる LSP を利用できるようになる。そして、それぞれの LSP に対して ATM トラフィッククラスを適切に設定することで、フロー単位だけでなくパケット単位の格差サービスも提供することが可能となる。ただし 2.3 節でも述べたように、一般的な DSCP と PHB との対応付けは未定である。そのため本研究では対応は、送信者と受信者を結ぶ経路上のすべてのノード間であらかじめ決定することとした。

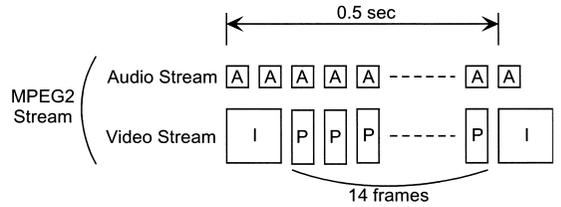


図 10 MPEG2 ストリーム  
Fig. 10 MPEG2 stream.

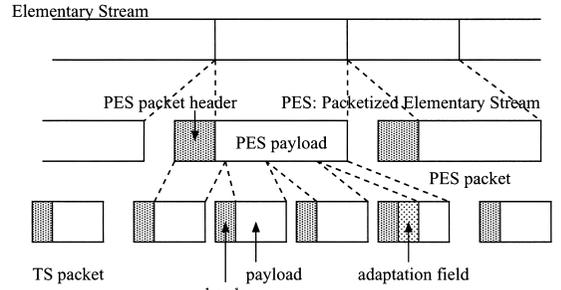


図 11 MPEG2 ストリームのパケット化  
Fig. 11 Packetization of MPEG2 stream.

### 5. アプリケーションと評価

本研究では、MPLS ネットワークにおいて格差サービスを実現する方式を設計し、その実装を行った。以下では、本方式を利用するアプリケーションとして、遠隔会議や遠隔講義などで多く用いられる MPEG2 の IPv6 による伝送を取り上げ、本研究で行った実験とその評価について述べる。

#### 5.1 MPEG2 ストリーム

MPEG2 ストリームは、映像と音声の 2 つの ES (Elementary Stream) から構成されている。映像 ES は、さらに I ピクチャ、P ピクチャ、B ピクチャに分けることができる。I ピクチャは 1 画面全体を圧縮・符号化したものである。一方、P ピクチャは前画面 (I または P ピクチャ) からの差分情報をもとに圧縮・符号化したものであり、B ピクチャは前後の画面からの差分情報をもとに圧縮・符号化したものである。これらがある順序で出現することで GOP (Group of Pictures) を形成し、GOP を繰り返すことで映像 ES が構成される。本研究では、図 10 に示すような 1 つの I ピクチャに 14 個の P ピクチャ (P<sub>1</sub> ~ P<sub>14</sub>) が続く GOP を単位とする MPEG2 ストリームを使用した。ここで映像・音声を含む全体の帯域は 8 Mbps であり、うち音声は 256 Kbps である。

また本研究では、MPEG2 ストリームをパケット化した TS (Transport Stream) として伝送する。TS

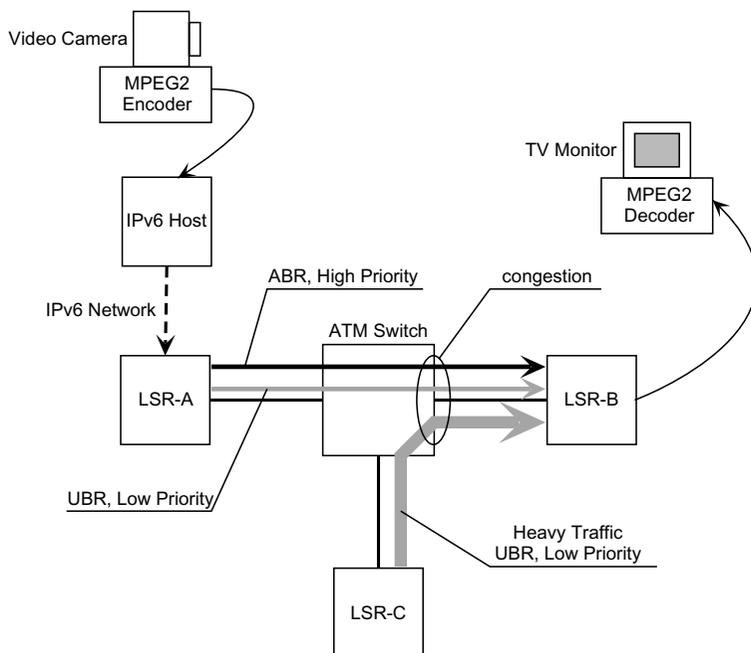


図 12 実験環境

Fig. 12 Environment of the experiment.

では 188 バイト固定長の TS パケットを識別や伝送の最小単位としており、映像と音声の ES は図 11 のようにパケット化される。映像 ES はまず各ピクチャに分割され、それぞれにヘッダ（再生に必要な時刻管理情報などを持つ）を付けて可変長の PES（Packetized ES）パケットとなる。さらにこれを分割して TS パケットが作られる。一方音声 ES の場合は、1 つの TS パケットに 1 つの PES パケットが含まれるように均等に分割される。このほかに TS パケットの識別子情報を持つ制御用の TS パケットなどが加わり、TS が構成される。

本研究で実装したシステムでは、1 つあるいは複数の TS パケットをさらに IPv6 パケットにカプセル化して伝送する。その際、IPv6 パケットのトラフィッククラス・フィールドに任意の DSCP を設定できるようになっている。

## 5.2 実験環境

実験の環境を図 12 に示す。LSR-A と LSR-B の間には、あらかじめ低優先度（UBR）の LSP と高優先度（ABR）の LSP が確立されている。それらに加

えて、LSR-C と LSR-B との間にも低優先度の LSP を確立した。LSR-C から LSR-B へ大量のトラフィックを発生させることで、ATM スイッチ内の低優先度の LSP 間に輻輳を発生させることができる。

上記の環境で、本実験では次のように MPEG2 ストリームを伝送した。

- (1) MPEG2 エンコーダはビデオカメラからの映像と音声を取り込み、MPEG2-TS を生成して IPv6 ホストに送る。
- (2) IPv6 ホストは MPEG2-TS を受信し、TS パケットの属性（I ピクチャ、P ピクチャ、音声、制御）を識別しながら、6TS パケットごとに 1 つの IPv6 パケットを生成する。ただし、途中で属性が変わる場合はそこで IPv6 パケットを終端させる。そして、属性ごとにあらかじめ決められた DSCP を IPv6 ヘッダのトラフィッククラス・フィールドに設定して IPv6 ネットワークに送出する。
- (3) LSR-A は IPv6 パケットを受信し、特定の DSCP を持つパケットは高優先度の LSP を使って、それ以外は低優先度の LSP を使って LSR-B へ転送する。
- (4) LSR-B は IPv6 パケットを受信し、MPEG2-TS を再構成して MPEG2 デコーダに送る。
- (5) MPEG2 デコーダはモニタに映像と音声を再生

本研究で使用した ATM スイッチでは UBR に対して ABR を単純に優先する完全優先制御が行われていた。また、それぞれの LSP の PCR（Peak Cell Rate）は回線帯域（155 Mbps）とし、ABR の LSP の MCR（Minimum Cell Rate）は 0 とした。

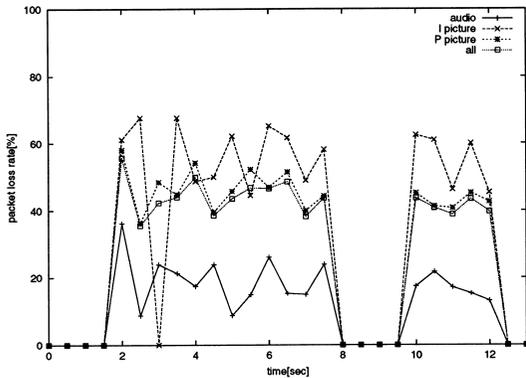


図 13 パケット損失率 (評価実験 1 (2) の場合)

Fig. 13 Packet loss rate (in case of Exp. 1 (2)).

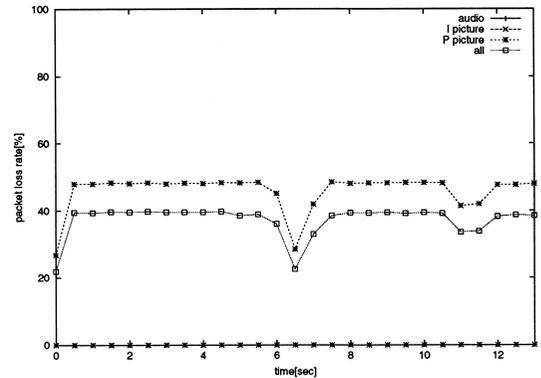


図 14 パケット損失率 (評価実験 1 (4) の場合)

Fig. 14 Packet loss rate (in case of Exp. 1 (4)).

する。

### 5.3 評価実験 1

まず最初に、以下の 4 通りの MPEG2 over IPv6 伝送実験を行った。ただし、(2)~(4) の実験では LSR-C から LSR-B へ Netperf で 140 Mbps のトラフィックを発生させ、ATM スイッチ内で輻輳が発生するようにした。

- (1) 輻輳なし、優先度の指定なし (低優先度)。
- (2) 輻輳あり、優先度の指定なし (低優先度)。
- (3) 輻輳あり、MPEG2 ストリームを構成するすべてのパケットに高優先度を指定。
- (4) 輻輳あり、P ピクチャの一部 ( $P_8 \sim P_{14}$ ) を含むパケットに低優先度、その他のパケットに高優先度を指定。

実験の結果、(1) ではすべてのパケットが損失なく伝送され、MPEG2 デコーダにおいて正常に再生された。しかし、(2) では 1.5~8 秒と 10~12.5 秒の各区間で I ピクチャ、P ピクチャ、音声それぞれに図 13 に示すようなパケット損失が発生した。パケット損失率は時間の経過とともに激しく変化し、音声は頻繁に途切れ、映像はモザイク状となった。また、パケット損失のない区間では映像・音声とも正常に再生された。(3) では、輻輳時においてもパケットが損失なく伝送され、(1) と同様に MPEG2 デコーダにおいて正常に再生された。この結果から、本方式の優先度制御機能が正常に動作していることが確認された。

一方 (4) は、割当て可能な帯域が少なく MPEG2 ストリームを構成するすべてのパケットに高優先度を与えることができない場合である。伝送中の各要素のパケット損失率を図 14 に示す。特異な点を除くと P

ピクチャを含むパケットの 48.1% (全体の 38.6%) が損失し、低優先度の LSP で伝送したパケットのほとんどを失っていた。(4) の MPEG2 ストリームを再生すると、映像については GOP 単位と思われる間隔で周期的にモザイク状の乱れが現れた。一方音声については途切れることなく再生され、全体的には (2) よりも症状の軽減が見られた。また 2.4 節で述べたパケットの並べ替えの問題は、2 本の LSP が同一の経路を通り使用帯域も少なかったため発生しなかった。

### 5.4 評価実験 2

評価実験 1 では、大量のトラフィックを同時に流すことでパケット損失を発生させた。これは実環境下での評価として意味がある。しかし、パケット損失率の制御が困難であるためパケット損失率とアプリケーションの品質 (画質など) の関係を定量的に評価することは難しい。

そこで、あらかじめ IPv6 パケットでカプセル化した MPEG2 ストリームを保存し、任意の属性 ( $P_n$  ピクチャなど) のパケットを抜き取って、GOP あたりのパケット損失率を一定の値に固定した。評価実験 2 では 30 秒 (60GOP) の MPEG2 ストリームを用い、パケット損失率を 4% と 38.6% に設定して、優先制御を行わない場合と評価実験 1 (4) の優先制御 ( $P_8 \sim P_{14}$  を含む IPv6 パケット以外を高優先とする) を行う場合について、LSR-B が受信する MPEG2 ストリームを作成した。属性別のパケット損失率の平均を表 3 に示す。

実験の結果、優先制御を行わない場合は、パケット損失率が増加するにつれて映像・音声ともに乱れが激しくなった。4% では映像にモザイク状の乱れが生じ、音声も途切れることがあるため、実用の限界と思われる。また 38.6% では映像・音声ともに内容を判別でき

ただし、PES ヘッダを含む先頭のパケットは高優先度とした。

表 3 属性別のバケット損失率 (%)

Table 3 Packet loss rate according to the packet attributes (%).

バケットの属性	優先制御なし		優先制御あり	
	4%	38.6%	4%	38.6%
制御	4.17	36.67	0.00	0.00
音声	4.21	37.79	0.00	0.00
I ピクチャ	4.30	39.64	0.00	0.00
P <sub>1</sub> ピクチャ	4.36	38.60	0.00	0.00
P <sub>2</sub> ピクチャ	4.28	39.47	0.00	0.00
P <sub>3</sub> ピクチャ	3.79	38.53	0.00	0.00
P <sub>4</sub> ピクチャ	4.17	37.07	0.00	0.00
P <sub>5</sub> ピクチャ	3.43	35.99	0.00	0.00
P <sub>6</sub> ピクチャ	4.10	39.63	0.00	0.00
P <sub>7</sub> ピクチャ	3.36	39.06	0.00	0.00
P <sub>8</sub> ピクチャ	4.16	40.70	8.94	96.33
P <sub>9</sub> ピクチャ	4.51	39.23	9.09	96.34
P <sub>10</sub> ピクチャ	3.48	41.05	11.48	96.33
P <sub>11</sub> ピクチャ	3.29	36.44	10.66	96.34
P <sub>12</sub> ピクチャ	3.67	39.20	10.09	96.33
P <sub>13</sub> ピクチャ	3.89	37.81	10.09	96.35
P <sub>14</sub> ピクチャ	4.64	37.64	9.47	95.98

ない状態であった。一方優先制御を行った場合は、映像に関しては4%では各GOPの後半にモザイク状の乱れが目立つようになり、38.6%では各GOPの前半は正常に再生されるが後半はモザイク状となる状態が評価実験1(4)よりも顕著に現れた。音声に関しては、いずれの場合でもまったく途切れなかった。

動画像の画質の良否を表す指標の1つとしてPSNR (Peak Signal to Noise Ratio)がある。PSNRは、原画像および比較画像における画素 $(x, y)$ の輝度値をそれぞれ $f(x, y)$ および $f'(x, y)$ 、画像の大きさを $w \times h$ 、原画像における輝度値の最大値を $f_{max}$ とすると、次のように表される<sup>12)</sup>。

$$PSNR = -10 \log_{10} \frac{\sum_{(x,y)} (f(x,y) - f'(x,y))^2 / (w \times h)}{f_{max}^2}$$

図15に優先制御の違いおよびバケット損失率の違いによるMPEG2ストリームの画質の変動の様子(一部)を示す。図15ではGOPとの関係が分かりやすいように、シーケンス番号0から15ピクチャごとにGOPが始まるように調整している。またシーケンス番号60でPSNRが向上するのは、複雑なシーンから簡素なシーンにシーンチェンジが起こったためである。図15から、優先制御を行う場合はバケット損失率が大きくなるにつれて各GOPの後半(P<sub>8</sub>~P<sub>14</sub>)のPSNRの低下が著しくなっており、前述の主観評価とも一致する。また、同一バケット損失率における優先制御を行わない場合と比較して画質の劣化が抑えられていることから、本方式の有効性が確認された。

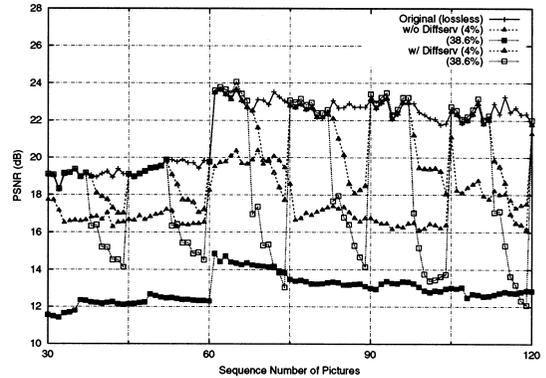


図 15 MPEG2 ストリームの画質の変動  
Fig. 15 MPEG2 stream quality variation.

表 4 MPEG2 ストリームの内訳

Table 4 Bandwidth of MPEG2 stream according to the packet attributes.

バケットの属性	占有率 (%)	占有帯域 (Kbps)
制御	0.08	6.34
音声	1.81	146.81
I ピクチャ	10.60	860.60
P <sub>1</sub> ~ P <sub>14</sub> ピクチャ	6.10 ~ 6.30	495.39 ~ 511.55
PES ヘッダを含む	5.40	438.22

本実験に使用したMPEG2ストリームの各属性の占有帯域は表4のようにになっている。このうちPESヘッダを含むバケットは約440Kbpsであり、これには制御と音声のバケットのすべてが含まれる。これらを最優先としたうえで、確保可能な帯域に応じてその他の映像バケットに段階的に優先度を設定することで、正常に再生可能なピクチャ数を制御することができる。

## 6. おわりに

本論文では、まず実環境下においてMPLSネットワークを構築し、中継ルータでのオーバーヘッドが軽減されることを確認した。そしてそのネットワーク上でバケット単位の格差サービスを提供する方式の設計および実装を行った。さらにこの機能を利用するアプリケーションとしてMPEG2 over IPv6システムを取り上げ、評価実験を行った。その結果、アプリケーションの特徴に応じて本方式を利用することでアプリケーションにおける品質の低下を抑えることが可能であることが明らかとなった。

本研究ではQoSフロールーティングテーブルやATMスイッチを静的に設定している。本方式がより有効に機能するには、ネットワークの状況やアプリケーションの特徴に応じて動的に通信経路を決定できる必要があるが、そのためにはQoSを考慮した経路制御

プロトコルや、終点アドレスに依存しない LSP を確立するための LDP<sup>13)</sup> の導入を検討する必要がある。

謝辞 評価実験にご協力いただいた広島大学工学部大塚玉記君に感謝します。本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓学術研究事業における研究プロジェクト「高度マルチメディア応用システム構築のための先進的ネットワークアーキテクチャの研究」(JSPS-RFTF97R16301)の支援を受けて実施された。ここに記して謝意を表す。

### 参 考 文 献

- 1) Rosen, E., Viswanathan, A. and Callon, R.: Multiprotocol Label Switching Architecture, Internet-Draft, draft-ietf-mpls-arch-06.txt (1999) (Work in progress).
- 2) Blake, S., Black, D., Carlson, M., Davies, E., Wang, Z. and Weiss, W.: *An Architecture for Differentiated Services*, RFC 2475 (1998).
- 3) Nichols, K., Blake, S., Baker, F. and Black, D.: *Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers*, RFC 2474 (1998).
- 4) Katsube, Y., Nagami, K. and Esaki, H.: *Toshiba's Router Architecture Extensions for ATM: Overview*, RFC 2098 (1997).
- 5) Andersson, L., Doolan, P., Feldman, N., Fredette, A. and Thomas, B.: LDP Specification, Internet-Draft, draft-ietf-mpls-ldp-06.txt (1999) (Work in progress).
- 6) Davie, B., Lawrence, J., et al.: MPLS using LDP and ATM VC Switching, Internet-Draft, draft-ietf-mpls-atm-03.txt (2000) (Work in progress).
- 7) Awduche, D., Malcolm, J., Agogbua, J., O'Dell, M. and McManus, J.: *Requirements for Traffic Engineering Over MPLS*, RFC 2702 (1999).
- 8) Faucheur, F., Wu, L., et al.: MPLS Support of Differentiated Services, Internet-Draft, draft-ietf-mpls-diff-ext-04.txt (2000) (Work in progress).
- 9) KAME Project, <http://www.kame.net/>.
- 10) Netperf, <http://www.netperf.org/>.
- 11) Callon, R., Doolan, P., et al.: A Framework for Multiprotocol Label Switching, Internet-Draft, draft-ierf-mpls-framework-05.txt (1999) (Work in progress).
- 12) 市川明男, 山岡克式, 酒井善則: MPEG の時間解像度の動的変更を用いた協調型マルチキャスト方式, 信学論 (B-I), Vol.J83-B, No.4, pp.597-606 (2000).
- 13) Jamoussi, B.: Constraint-Based LSP Setup using LDP, Internet-Draft, draft-ietf-mpls-crldp-03.txt (1999) (Work in progress).

(平成 12 年 5 月 23 日受付)

(平成 12 年 12 月 1 日採録)



西村 浩二 (正会員)

1990 年広島大学工学部第二類(電気系)卒業。1992 年同大学大学院工学研究科博士課程前期修了。全日空システム企画(株)を経て、現在、広島大学総合情報処理センター助手。マルチメディア機器のリアルタイム遠隔制御、ATM ネットワークの管理に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



松本 勝之 (正会員)

1975 年生。1998 年広島大学工学部第二類(電気系)卒業。2000 年同大学大学院工学研究科博士課程前期修了。現在、日本テレコム(株)。ATM ネットワーク、MPLS、Diff-serv に関する研究に従事。



相原 玲二 (正会員)

1981 年広島大学工学部第二類(電気系)卒業。1986 年同大学大学院博士課程修了。同大学同学部助手、同大学集積化システム研究センター助教を経て、現在、同大学総合情報処理センター助教授。工学博士。マルチプロセッサシステムの設計、製作、コンピュータネットワークの研究に従事。電子情報通信学会、IEEE Computer Society 各会員。