

L2 over MPLS の品質評価

勝野 聡[†] 山崎 克之^{††} 浅見 徹^{††} 江崎 浩^{†††}

Performance Evaluation of L2 over MPLS

Satoshi KATSUNO[†], Katsuyuki YAMAZAKI^{††}, Tohru ASAMI^{††}, and Hiroshi ESAKI^{†††}

あらまし 本論文では、MPLS 上に提供されるレイヤ 2 仮想専用線 (L2 over MPLS) について述べる。既存のネットワーク技術の中で、ATM はネットワーク品質に対する要求が厳しい。そこで、MPLS による ATM 仮想専用線について、特に、ATM セルの MPLS パケットへのカプセル化がもたらすネットワーク品質への影響を考察し、実際のルータにおける L2 over MPLS の実装において、ATM ネットワークとしての性能評価実験を実施する。理論的検討及び評価実験結果により、L2 over MPLS におけるネットワーク品質について、その仕様、実装、及び運用の観点から考察し、ATM 仮想専用線としての利用可能性を示す。

キーワード 仮想専用線、品質評価、ATM、MPLS

1. ま え が き

最近のインターネット技術の急速な進歩により、様々なアプリケーションとそれに伴うトラフィックが、旧来の電話サービスを中心に運用されてきたネットワークから、IP (Internet Protocol)[1]を用いたデータ通信ネットワークへと移行しつつある。このような背景のもとに、IP をすべての基盤として次世代のバックボーンネットワークを構築し、従来のアプリケーションを含むあらゆるサービスを提供しようとする動きが進んでいる。

従来、様々なサービスを統合したネットワークとして ATM (Asynchronous Transfer Mode)[2] が広く利用されてきた。高速ネットワークデータ通信サービスでは、ATM ネットワークの上で IP サービスを提供するのが一般的であり、国内における大規模ネットワークでも、ATM をベースとするネットワークが広く構築・利用されてきた。

しかしながら、最近のバックボーンネットワークに

対する高速化の要求により、IP を基盤とした回線速度 1 Gbit/s を超えるネットワーク技術が登場している。その一方で、ATM は、高品質かつ低遅延を要求される音声、映像サービスで利用されている。そこで、IP ネットワークの上に仮想 ATM ネットワークを構築することにより、高速なバックボーンネットワークと、利用者に対する高品質なネットワークサービスの提供を両立させることが考えられる [3]。

最近、このようなネットワークを実現するための技術として、MPLS (Multiprotocol Label Switching)[4]を用いて、IP ネットワーク上に仮想専用線 (VPWS: Virtual Private Wire Service) を提供するいくつかの方法 (L2 over MPLS) が提案されている。ところで、様々な L2 回線を IP 上で提供するためには、既存のネットワークで提供されてきたサービス品質を保持するための検討が必要である。そこで、本論文では、L2 over MPLS において、特に ATM を仮想専用線として実現した場合のネットワーク品質について検討する。

2. では、MPLS によって提供される L2 仮想専用線のネットワーク品質の評価方法について述べる。3. では、L2 over MPLS における L2 プロトコルの回線品質が最も問題となる ATM 仮想専用線において、特に、ATM セルのカプセル化がもたらすネットワーク品質への影響について述べる。4. では、L2 over MPLS を実装したルータを用いて、実際に ATM 仮想専用線を

[†] 通信・放送機構, 東京都
Telecommunications Advancement Organization of Japan,
2-31-19 Shiba, Minato-ku, Tokyo, 105-0014 Japan

^{††} KDDI 研究所, 上福岡市
KDDI R&D Laboratories, Inc., 2-1-15 Ohara, Kamifukuoka-shi,
356-8502 Japan

^{†††} 東京大学, 東京都
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo,
113-8656 Japan

構築し、ATM において要求される品質評価基準に基づいた性能評価実験について述べる。5. では、それまでの理論検討及び実験結果をもとに、その仕様、実装、及び運用の観点から考察する。6. では、L2 over MPLS における品質評価について総括する。

2. L2 over MPLS におけるネットワーク品質

L2 over MPLS は、IP ネットワークにおいて仮想専用線を提供する技術であり、Martini 方式 [5] 及び Kompella 方式 [6] が IETF に提案されている。これらの方式は、MPLS をバックボーンネットワークで稼働させ、Ethernet、ATM、フレームリレー等の既存の L2 プロトコルに対して、L2 フレームをカプセル化し、仮想的な回線を提供するものである (図 1)。Martini 方式と Kompella 方式とは、シグナリングの方法などに相違があるが、L2 フレームのカプセル化形式はともに基本的に Martini のカプセル化方式 [7] で定義される形式を用いている。

ここで、提供される L2 仮想専用線のネットワーク品質に対しては、様々な影響を考慮する必要がある。本論文で考察するネットワーク品質に影響を与える要因について図 2 に示す。ここで挙げる要因には以下のようなものがある。

- L2 フレームのカプセル化オーバーヘッド (packing overhead)
- L2 フレームのカプセル化遅延 (packing delay)
- カプセル化されたフレームの遅延揺らぎ (delay variation)

- IP パケット損 (packet loss) の L2 への影響

L2 over MPLS では、イーサネット、フレームリレー、ATM 等の仮想専用線を提供できる。ここで、イーサネットやフレームリレーは、主としてデータアプリケーション向けの技術であり、遅延・伝送損に対する許容度は高い。これに対して、ATM は、特に映像サービスもそのサービス対象として含めて設計された技術であり、ITU-T の勧告に厳密な品質基準が定められている。

ところで、L2 over MPLS については、最近、提案に対する実装が登場したところであり、特に、ATM で要求されるネットワーク品質については十分な実証実験がなされていない。そこで、本論文では、L2 over MPLS におけるネットワーク品質に関する検討事項をもとに考察する。

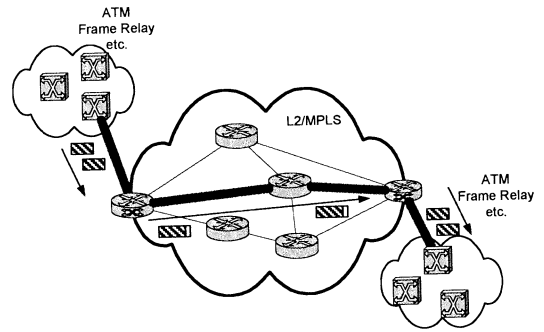


図 1 MPLS ベースの L2 仮想専用線の構成

Fig.1 Network architecture of MPLS-based L2 VPWS.

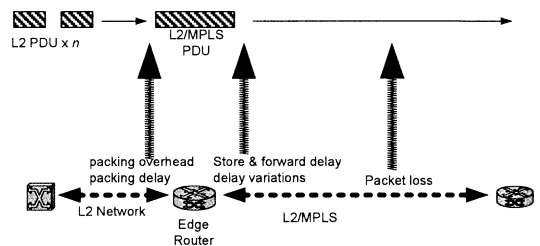


図 2 L2 仮想専用線におけるネットワーク品質評価モデル

Fig.2 Model for performance evaluation of L2 VPWS.

以下、本論文では、L2 over MPLS による ATM 仮想専用線の提供を「ATM over MPLS」と呼ぶ。

3. ATM over MPLS におけるネットワーク品質の検討

3.1 ATM セルのカプセル化形式

Martini のカプセル化方式では、ATM について、AAL5 モード及び ATM セルモードのそれぞれについてカプセル化形式を定めている。ここで、AAL5 モードは通常データ通信用プロトコルであり、ATM の品質評価基準について問題になることはない。そこで本論文では、ATM セルモードについて品質評価を実施する。

Martini のカプセル化方式に定められた ATM セルモードのカプセル化形式 [7] を図 3 に示す。本形式では、ATM の 53 バイトのセルから HEC (Header Error Check) を除く 52 バイトをカプセル化している。また、複数の ATM セルを一つのパケットにカプセル化することも可能である。図 3 は、二つのセルを 1 パケットにカプセル化した例を示している。

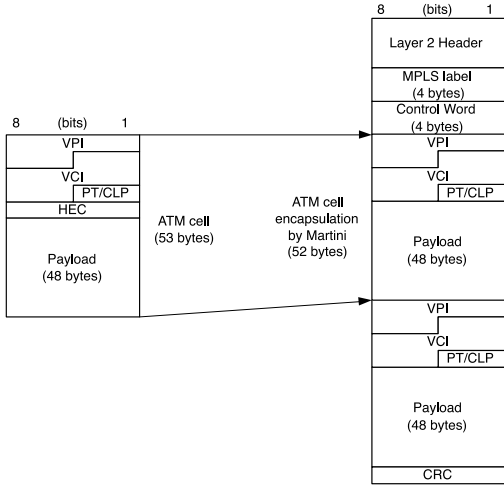


図3 ATM over MPLS セルのカプセル化形式
Fig. 3 Encapsulation format of ATM cells.

3.2 ATM over MPLS のカプセル化オーバーヘッド

ATM 仮想専用線を ATM over MPLS で実現した場合に、ATM セルを MPLS データユニットでカプセル化することによるオーバーヘッドについて考察する。ここでは、オーバーヘッドを、L2 レベルでのデータ伝送量の増加分という意味で用いる。オーバーヘッド h は、図 3 のカプセル化形式を用いた場合下記の式で表される。

$$h = \frac{L2H + ML + CC + 52n + CRC - 53n}{53n} \quad (1)$$

ここで、 $L2H$ はバックボーン側ネットワークの L2 ヘッダ長、 ML は MPLS ラベル長 (4 バイト)、 CC は Control Word (4 バイト) である。 CRC は 4 バイトであり、 n は 1 パケットにカプセル化される ATM セルの数である。バックボーン側の L2 プロトコルにギガビットイーサネットを用いた場合、

$$L2H = IFG + Preamble + DA + SA + Etype = 34 \text{ (Byte)}$$

である。この条件のもとで、式 (1) において、 n を変化させたときのオーバーヘッド h (%) の変化を図 4 に示す。この図から、ATM over MPLS のカプセル化では、 n の値によってオーバーヘッドの値が大きく変わることが分かる。

例えば、 $n = 1$ の場合、オーバーヘッドは約 85% となる。このため、OC-12 (622 Mbit/s) 相当の ATM セ

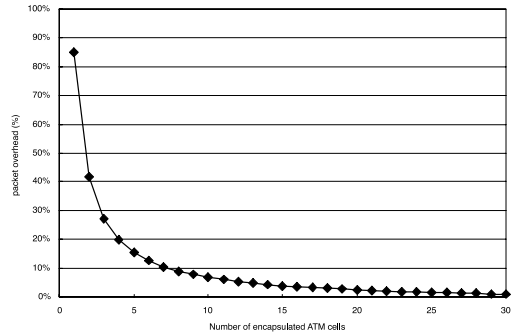


図4 ATM over MPLS のオーバーヘッド
Fig. 4 Overhead of ATM over MPLS.

ル転送レートに対して、MPLS 側のインタフェースにギガビットイーサネットを用いた場合、最大セル転送レートは、約 540 Mbit/s 以上に設定できない。これは、 $n = 1$ の場合、1 フレームの長さ L は、式 (1) を参照して、

$$L2H + M2L + CC + 52 \times 1 + CRC = 34 + 4 + 4 + 52 + 4 = 98 \text{ (Byte)} = 784 \text{ (bits)}$$

であるから、送信可能なフレーム数が、 $1,000,000,000/784 = 1,275,510$ (frame/s) となり、ATM over MPLS での最大セル転送レートが、 $53 \times 8 \times 1,275,510 = 540,816,240$ bit/s に抑えられるためである。

オーバーヘッド削減効果は、セル多重度を 8 個以上にすると 10% 以下となる。したがって、オーバーヘッド削減を目的にセル多重を行う場合は、8 個程度が一つの目安となる。一方、セル多重を行う場合には、多重化に伴う遅延の増加、及び、パケット損に伴うパケット内セルの一括損失が問題であり、セル多重度を小さくする必要がある。次節以降では、遅延・損失の品質条件下での多重セル数に関する検討を行う。

3.3 ATM over MPLS のカプセル化遅延

ATM セルを MPLS パケットでカプセル化した場合のカプセル化遅延について考察する。CBR (Constant Bit Rate) の ATM セル転送時に複数の ATM セルを一つの MPLS パケットにカプセル化した場合、カプセル化による最大遅延及び遅延の揺らぎは、ATM セルの転送間隔と ATM セル数に比例する。カプセル化による遅延を d (μ s)、ATM セル転送レートを r (Mbit/s)、1 パケットにカプセル化される ATM セルの数を n とすると、予測される遅延 d は、

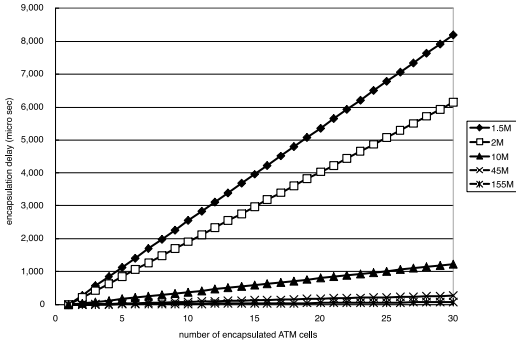


図 5 ATM over MPLS のカプセル化遅延
Fig. 5 Encapsulation delay of ATM over MPLS.

$$d = 53 \times 8 \times (n - 1) / r (\mu s) \quad (2)$$

で計算される。ATM セル転送レートとして、 $r = 1.5, 2, 10, 45, 155$ Mbit/s に対して、式 (2) から計算したカプセル化による遅延の値を図 5 に示す。

セルの転送遅延は、特に ATM の CBR におけるネットワーク品質において、転送遅延及び遅延の揺れに大きな影響を与える。ATM のセル転送性能に関する指標を定める ITU-T 勧告 I.356 [8] では、stringent class に対する CTD (Cell Transfer Delay, セル遅延時間) を 400 ms, 2pt. CDV (Cell Delay Variation, セル遅延変動) を 3ms と定めている。これを図 5 と比較すると、特にセル転送レートが 1.5 Mbit/s 及び 2 Mbit/s のような比較的低速の場合、10 個以上のセルのカプセル化では、最大遅延時間は 2~2.5 ms 程度になると予測され、特にセル遅延変動に影響を与える可能性があることが分かる。

ただし、後述する評価実験の項でも述べるが、実際の実装では、複数のセルをカプセル化するために無限時間待つことはあり得ないため、あるシステムで定められた時間が経過すると、カプセル化されるセル数が指定された数より小さくともそのパケットが送出される。このため、遅延の値は、図 5 に示された値より小さいある一定の値に抑えられると予測される。

3.4 ATM over MPLS のパケット損

ITU-T 勧告 I.356 では、セル損のパラメータとして、SECBR (Severely Errored Cell Block Ratio) を定めている。SECBR は、測定対象となるセルブロックにおける重大なエラーを生じたセルブロックの割合である。セルブロックを M 個の連続するセルと定義したとき、そのうち N 個以上のセルがエラーとなった場合に「Severely Errored Cell Block」とみなされる。

表 1 セルブロックサイズと SECBR
Table 1 Cell block sizes and SECBR.

User Information Rate r (in Mbit/s)	M (cells)	N (cells)
$1.23 < r \leq 2.46$	256	8
$9.83 < r \leq 19.66$	2480	64
$39.32 < r \leq 78.64$	8192	256

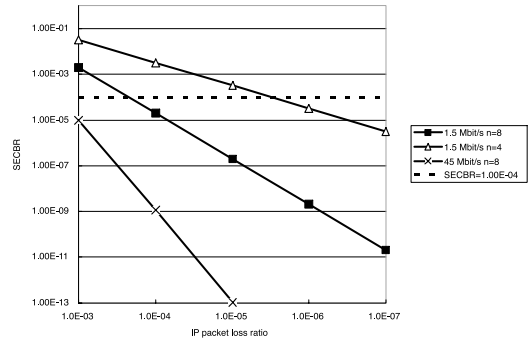


図 6 ATM over MPLS の IP パケット損失率と SECBR
Fig. 6 IP packet loss ratio versus SECBR.

M と N の値は、ATM セル転送レート r に依存して定められている。その一部を表 1 に示す。

ATM over MPLS における SECBR は、式 (3) のように表される [3]。

$$SECBR = \sum_{i=L}^{M'} M' C_i p^i (1-p)^{M'-i} \quad (3)$$

ここで、 p は IP パケット損失率、 M' は M 個のセルを含むパケットの数、 L は N 個のセル損をもたらす最小のパケット数である。定義より、 M', L' は、1 パケットにカプセル化される ATM セル数 n を用いて、 $M' = M/n, L' = N/n$ として計算される。式 (3) より、 $r = 1.5$ Mbit/s, $n = 4, 8$ の場合、及び $r = 45$ Mbit/s, $n = 4$ の場合のそれぞれについて、IP パケット損失率 p に対する SECBR の値を図 6 に示す。例えば、 $r = 1.5$ Mbit/s, セル多重数 $n = 4$ の場合、SECBR 条件の $M = 256$ セルブロックとなるパケット数 M' は、 $M' = (256/4) = 64$ と計算される。また、 $N = 8$ 個のセル損となるパケット数 L は、 $L = (8/4) = 2$ と計算される。

ITU-T 勧告 I.356 は、SECBR の推奨値を 10^{-4} と定めている。図 6 において、 $SECBR = 1.0E - 04$ の値を破線で示す。式 (3) 及び図 6 を参照して、I.356 の規定を満足するための IP パケット損失率 p を求めると、例えば、 $r = 1.5$ Mbit/s, $n = 4$ の場合、

$p = 2.2E - 04$ となり、また、 $n = 8$ の場合、同損失率は、 $p = 3.1E - 06$ となる。

以上の点から、L2 over MPLS における ATM 仮想回線の提供にあたっては、様々なネットワーク側の条件に応じてカプセル化するセルの数を適切に調節する必要があるといえる。

4. ATM over MPLS の品質評価実験

4.1 ATM over MPLS 評価用ネットワーク

L2 over MPLS を実装したルータを用いて MPLS による ATM 仮想専用線を構築し、ATM の品質評価基準に基づいた性能評価実験を実施した。

評価用 ATM ネットワークの構成を図 7 に示す。本ネットワークは、ATM 性能測定装置と、ギガビットイーサネット及び ATM インタフェースを有する 2 台のルータから構成される。これらのルータを 1000Base-SX で相互に接続し、ルータ間で MPLS ネットワークを構成して、互いのルータの ATM インタフェース上に ATM 仮想専用線を設定した。一方のルータの ATM インタフェースに ATM 性能測定器を、また、反対側のルータの ATM インタフェースのポートの出力と入力を物理的に接続し、ATM 測定器から送出された ATM セルを折り返して、再び ATM 測定器に返すように設定している。

本評価実験の結果について、ルータごとの実装依存性を正しく評価することを目的として、異なるベンダによる 2 種類のルータの実装を評価した。以下、本論文では、これらのルータの機種を、タイプ A 及びタイプ B と呼ぶ。タイプ A のルータは、ギガビットイーサネットと ATM OC-12 インタフェースを備え、Martini 方式に準拠した L2 over MPLS を実装している。一方、タイプ B のルータは、ギガビットイーサネットと ATM OC-3 インタフェースを備え、Martini

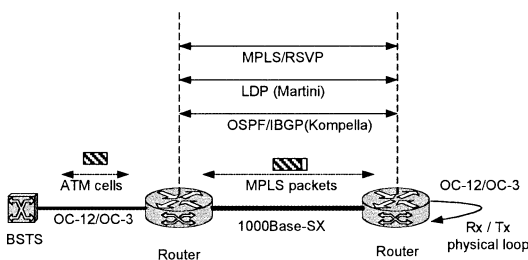


図 7 ATM over MPLS 評価用ネットワーク
Fig. 7 Evaluation network of ATM over MPLS.

方式及び Kompella 方式に準拠した L2 over MPLS を実装している。本実験では、図 7 において、タイプ A のルータ 2 台を接続した場合、及び、タイプ B のルータ 2 台を接続した場合について評価実験を実施した。なお、タイプ A、B のルータは、ともに Martini 方式に準拠した実装を行っているが、実装の細部において相違があり、相互接続性を検証することは困難であったため、タイプ A とタイプ B のルータを接続した実験は実施しなかった。

ATM の品質測定装置として、BSTS [9] を用いた。BSTS は、ATM AAL1 を用いて、タイムスタンプ付きセルを特定のセル速度で送出し、測定対象ネットワークからそれらのセルを受信することによって、セル伝送間隔やセル伝送遅延を測定する機能を有する。

4.2 ATM over MPLS におけるセル遅延と遅延揺らぎ

3.2 より、ATM の 1 セルを MPLS の 1 フレームにカプセル化する場合のオーバーヘッドは大きい。そこで、複数のセルを 1 フレームにカプセル化し、MPLS 網の帯域を有効活用することが考えられる。しかし、3.3 での考察により、複数セルを 1 パケットにカプセル化すると、特にセル転送レートが低い場合に、セル遅延及び遅延の揺れが問題になり、ATM 利用者が期待するネットワーク品質が得られない可能性がある。そこで、ATM over MPLS におけるセルの遅延測定実験を実施した。

以下に、本評価実験における ATM セルの遅延測定結果を示す。図 8 は、評価対象ルータとしてタイプ A のルータを用いた場合の ATM セルの平均遅延時間の測定結果である。タイプ A のルータは、ATM セ

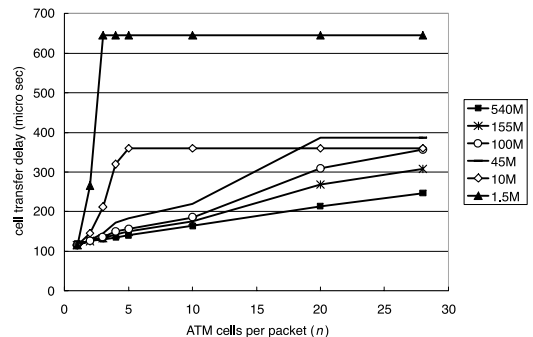


図 8 ATM セルの平均遅延時間 (ルータタイプ A)
Fig. 8 Mean ATM cell transfer delay. (Router type A)

ル結合転送モードを実装しており、ルータの設定パラメータによって、1 フレームにカプセル化可能なセル数の上限を設定可能である。以下、本論文では、このパラメータを `atm-cells-per-packet` と記す。また、別のパラメータによって、複数の ATM セルをカプセル化するときの、ルータ内部における最大待ち時間を $1 \sim 140 \mu\text{s}$ の間で設定可能である。図 8 は、パラメータ `atm-cells-per-packet` を 1 から 28 の間で変化させ、上記最大待ち時間パラメータを $140 \mu\text{s}$ (既定値) に設定し、遅延の値をグラフ化したものである。

なお、本測定結果は、各ルータの ATM over MPLS の実装の制限により、図 7 のような構成で測定を実施しており、2 台のルータ間の往復セル遅延を測定しているため、測定される ATM セルは 2 回のカプセル化を経ている。しかし、いったんカプセル化して再度分割されたセルの到着分布は、同じ条件で再度カプセル化されるならば不変であると想定されるため、測定結果は、1 回のカプセル化遅延を反映しているものとみなせる。

本実験の測定結果は以下のとおりである。

- `atm-cells-per-packet` = 1 の場合、本測定環境でのセル遅延時間は、セル転送速度によらず一定で約 $110 \sim 120 \mu\text{s}$ であり、遅延揺らぎは数マイクロ秒である。
- `atm-cells-per-packet` を大きくすると、セル伝送遅延が比例して大きくなる。
- `atm-cells-per-packet` の値が 28 を超えるとセル遅延時間はそれ以上大きくならない。
- セル転送速度が低い場合、`atm-cells-per-packet` の増加によるセル伝送遅延への影響が大きい。
- `atm-cell-per-packet` を大きくしても、ある特定の値を超えてセル遅延時間が大きくなることはない。

これらの測定結果は、3.3 の考察結果、及び図 5 の傾向と一致する。また、別パラメータの設定により、セル遅延時間の最大値を抑えるような実装になっているものと推測される。

同様に、タイプ B のルータを用いた場合の ATM セルの平均遅延時間を図 9 に示す。タイプ B のルータでは L2 over MPLS として Martini 方式及び Kompella 方式を実装しているが、ATM セルのカプセル化方式は同等であり、本実験において、遅延時間に関する差異は見られなかった。タイプ B のルータでも、タイプ A のルータと同等のパラメータ `atm-cells-per-packet`

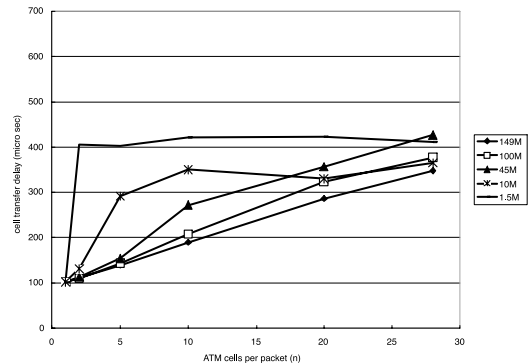


図 9 ATM セルの平均遅延時間 (ルータタイプ B)
Fig.9 Mean ATM cell transfer delay. (Router type B)

によって、1 フレームにカプセル化可能なセル数の上限を設定可能である。測定結果より、タイプ B のルータにおける平均遅延時間の傾向は、タイプ A のものとよく類似している。これは、セル遅延時間に関する特性が、実装に依存しておらず、ATM over MPLS のカプセル化方式によるものであることを示唆している。

また、ITU-T 勧告 I.356 では、「2-pt. CDV (Cell Delay Variance)」を「CTD (Cell Transfer Delay : セル伝送遅延) の上位及び下位 10^{-8} quantile (偏差範囲) での差分」と定義している。上記勧告では、2-pt. CDV は、stringent class で 3 ms, stringent bi-level class で 6 ms とされている。そこで、この定義をもとに、測定された ATM セル遅延の最大値と最小値の差 (100%quantile CDV) を算出した。この値では、伝送遅延部分が打ち消され、セルを MPLS フレームにカプセル化する部分の遅延が明確に反映される。

タイプ A のルータを評価対象とした ATM セルの伝送遅延時間の測定結果から算出した遅延揺らぎの値を図 10 に示す。同様に、タイプ B のルータによる測定結果から算出した遅延揺らぎの値を図 11 に示す。これらの図より、ATM セルの遅延揺らぎが、カプセル化される ATM のセル数に比例する傾向を示していることが分かる。これは、図 5 及び式 (2) により算出されるカプセル化遅延に相当する性質を示している。

そこで、ATM セル転送速度 $r = 1.5, 10, 45, 100, 155 \text{ Mbit/s}$ (タイプ B のルータでは最大 149 Mbit/s) の場合について、算出されたセル遅延揺らぎと、式 (2) により算出されたカプセル化遅延の計算値の比較を図 12 及び図 13 に示す。この結果より、タイプ A のルータでは、カプセル化されるセル数 n が 10 程度

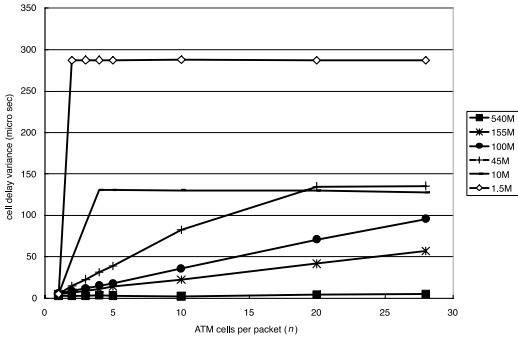


図 10 ATM セルの遅延揺らぎ (ルータタイプ A)
Fig. 10 ATM cell delay variance. (Router type A)

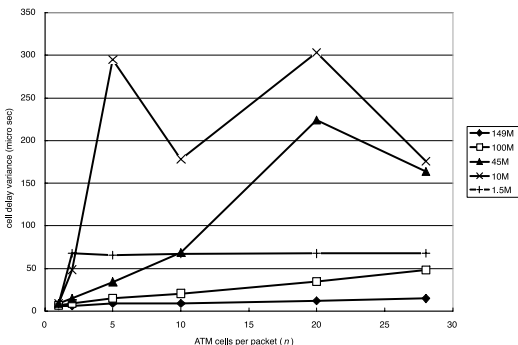


図 11 ATM セルの遅延揺らぎ (ルータタイプ B)
Fig. 11 ATM cell delay variance. (Router type B)

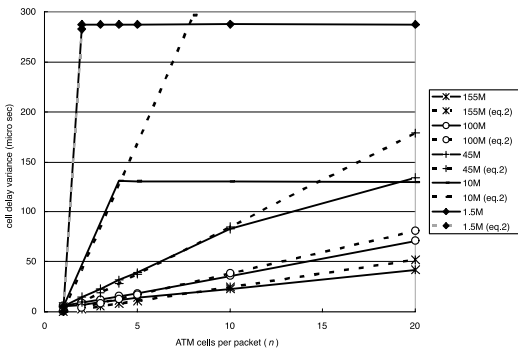


図 12 ATM セルのカプセル化遅延計算値と、遅延揺らぎの実測値との比較 (ルータタイプ A)
Fig. 12 Comparison of calculated ATM cell encapsulation delay and the measured delay variance. (Router type A)

より小さければ、セル遅延揺らぎの値はカプセル化遅延の値によってよく推定できることが分かる。

なお、本考察では、カプセル化されたパケットから ATM セルが出力される時に、すべてのセルが同時に出力されると仮定している。したがって、 n の値が

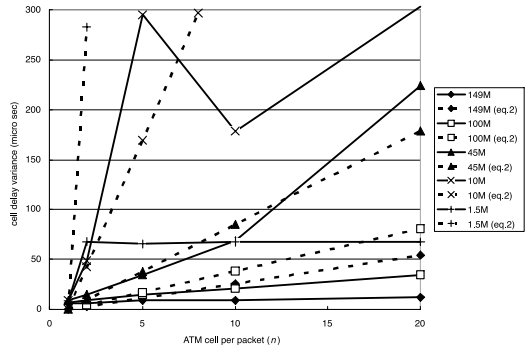


図 13 ATM セルのカプセル化遅延計算値と、遅延揺らぎの実測値との比較 (ルータタイプ B)
Fig. 13 Comparison of calculated ATM cell encapsulation delay and the measured delay variance. (Router type B)

大きくなると、この仮定は必ずしも当てはまらないため、計算されたカプセル化遅延の値と比較して、実測されたセル遅延揺らぎの値が小さくなると推測される。一方、タイプ B のルータでは、タイプ A と傾向は同様であるが、推定値の誤差はより大きい。セルのカプセル化以外の要因が遅延にかかわっている可能性があり、ルータにおける実装を更に詳細に検討する必要がある。

4.3 実際の IP 網におけるパケット遅延

本論文で検討した ATM over MPLS の品質と IP ネットワークにおけるネットワーク品質の関係について述べる。前節までは、図 2 におけるエッジルータまでの部分について評価を行ってきた。しかし、実際の ATM ネットワークとして評価するためには、IP パックボーン部分の品質を合わせて評価する必要がある。そこで、実際の IP ネットワークでの遅延変動を評価するため、一つの例として日米間の国際インターネット回線の遅延変動を測定した。測定対象としたネットワークは、KDDI 研究所と米国 Palo Alto の KDDI 米国研究所の間を接続する 150 Mbit/s の WIDE IPv6 国際回線である。測定方法として、パケット長 72 バイト及び 1500 バイト長のトラフィック発生ソフトウェアにより生成した UDP パケットを、日米間双方向で 1 秒ごとに 24 時間送受信し、GPS (Global Positioning System) の時刻情報に同期された IP トラフィック収集装置 [10] により、送受信したパケットの遅延変動を 1 マイクロ秒超の精度で取得した。

本測定により得られた遅延変動の分布を図 14 に示す。実験結果より、平均パケット間隔 1 秒に対して、遅

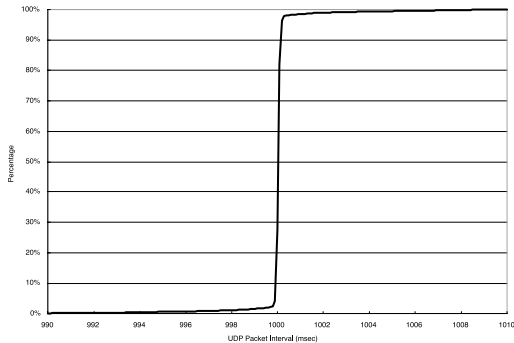


図 14 日米国際回線における IP パケットの遅延変動
Fig. 14 IP packet delay variance in a Japan-US international link.

遅延変動が ± 1.5 ms (2 pt. CDV として 3 ms) 以内に収まるのは全体の 97.5%, 同じく ± 3.0 ms (2 pt. CDV として 6 ms) 以内に収まるのは全体の 98.2% のパケットであった。これは、このまま ATM over MPLS のバックボーンとして使用する場合には I.386 の規定を満足しない値である。前節までで確認したように、エッジ部分での遅延揺らぎが十分小さくとも、バックボーンのネットワークの品質が良くなければ、エンドホスト間での品質が満足されない。

また、本測定におけるパケット損失率は、 $7.4 \sim 9.7 \times 10^{-4}$ であった。このようにパケット損失率が約 10^{-3} 程度の IP ネットワークにおいて、ATM over MPLS のネットワーク品質は、図 6 より、セル転送レート $r = 1.5$ Mbit/s の場合、 $n = 4, 8$ のいずれにおいても、I.356 に定められた SECBR の値 $1.0E-04$ を満足できない。 $r = 45$ Mbit/s, セル数 $n = 8$ の場合、SECBR は 10^{-5} となり、勧告の値を満足できる。

これらの結果は、ATM over MPLS の観点からは注意が必要とされる。このように遅延変動の大きい、あるいは、パケット損の無視できないネットワークでは、MPLS ネットワークのトラヒックエンジニアリング技術を利用した遅延変動抑制などの対策が必要であろう。

5. ATM over MPLS の品質に関する考察

本章では、図 2 に示した L2 仮想専用線におけるネットワーク品質評価モデルに基づいて、理論的検討及び評価実験の結果について考察する。

まず、L2 フレームのカプセル化オーバーヘッドについ

て考察する。3.2 における検討及び図 4 より、ATM over MPLS について 1 セルを 1 パケットにカプセル化した場合、オーバーヘッドが約 85% と大きく、バックボーンネットワークが十分高速でない場合には無視できない。遅延が問題とならない場合は、カプセル化するセル数を 8 個程度とすることでオーバーヘッドを 10% 以下にすることができる。

一方、L2 フレームのカプセル化遅延、遅延揺らぎ、パケット損の面から考察する。3.3 における検討及び図 5 より、複数セルを 1 パケットにカプセル化した場合、カプセル化による遅延・遅延揺らぎは、特にセル転送レートが数 Mbit/s 以下の場合、カプセル化するセルの数が 10 以上になると、ITU-T 勧告 I.356 で既定する ATM の品質評価基準を満足できない可能性があることを示した。

実際に L2 over MPLS を実装したルータを用いて、評価実験用 ATM 仮想専用線を構築し、カプセル化に伴うセル遅延・遅延揺らぎの測定を実施した。その結果、図 8 ~ 図 11 から、1 セルを 1 パケットにカプセル化した場合の遅延は、本実験環境で約 $100 \sim 120 \mu\text{s}$ 程度と非常に小さく、遅延揺らぎは数マイクロ秒の単位である。一方、複数セルを 1 パケットにカプセルした場合、セル遅延揺らぎの値は、セル多重度が 10 以下であれば図 5 の計算値とおおむね一致した。また、実際の実装では、カプセル化遅延の揺らぎの最大値が内部的に数百マイクロ秒に抑えられていることも確認した。

一方、バックボーン部分の品質評価の一例として、日米間の国際インターネット回線の遅延変動を評価した。測定結果により、通常の IP ネットワークでは、ATM の規定において要求される遅延変動・パケット損失率を満足できない場合があり、また、セル損 SECBR についてはセル多重化数が影響を与えることについて述べた。

IP ネットワークでのトラヒック測定の結果をもとに、ATM over MPLS を実際に構築し運用する場合についてまとめる。まず、バックボーンネットワークの容量に制限がある場合、利用する ATM のセル転送レートによって注意が必要である。セル転送レートが数 Mbit/s 以下の場合、セル多重化数を 2~8 個で適切に設定することにより、エッジ部分については品質の確保には運用上問題ない。一方、IP ネットワークの遅延変動やパケット損などの影響により、MPLS バックボーン網の品質が ATM の品質基準を満足できない

場合がある。この場合には、MPLS のトラフィックエンジニアリングの利用を検討することも視野に入れるなど、運用上の注意が必要である。

6. む す び

本論文では、MPLS 上に提供される L2 仮想専用線 (L2 over MPLS) について行った評価実験と考察について述べた。ネットワーク品質の観点から最も問題となる ATM を取り上げ、MPLS による ATM 仮想専用線について、ATM セルの MPLS パケットへのカプセル化によるオーバーヘッド、セル転送遅延・遅延揺らぎについて考察した。更に、実際のルータによる ATM 仮想専用線実験網を構築して、ATM 品質評価実験を実施し、ITU-T 勧告に基づいて ATM の品質評価を実施して、エッジ部分に関しては問題なく利用可能であることを示した。一方、MPLS 網の遅延変動やパケット損失率などのネットワーク品質については運用上の注意が必要であることを指摘した。今後は、L2 over MPLS における、MPLS 網側の遅延・パケット損の測定とこれに応じたカプセル化セル数の考察や、QoS パラメータ、シグナリング等の検討を進める予定である。

謝辞 本論文の執筆にあたり、通信・放送機構 JGN IPv6 ネットワーク関係各位に感謝致します。また、本研究に際し御指導頂きました国立情報学研究所安達教授に感謝致します。

文 献

- [1] J. Postel, ed., Internet Protocol, Request For Comments: 791, Sept. 1981.
- [2] K. Asatani, T. Okada, M. Kawarazaki, Y. Maeda, K. Yamazaki, H. Ichikawa, S. Kuribayashi, and T. Ohba, Introduction to ATM Networks and B-ISDN, John Wiley & Sons, 1997.
- [3] T. Asami, K. Yamazaki, A. Kato, and M. Nakayama, "ATM over IP: A design and principles," Proc. 3rd Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT '99), Addendum, Ulaanbaatar, Mongolia, Aug. 1999.
- [4] E.C. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, Multi-protocol Label Switching Architecture, Request For Comments: 3031, Jan. 2001.
- [5] L. Martini, N. El-Aawar, G. Heron, D.S. Vlachos, D. Tappan, J. Jayakumar, A. Hamilton, E. Rosen, S. Vogelsang, J. Shirron, T. Smith, A.G. Malis, V. Sirkay, V. Radoaca, C. Liljenstolpe, D. Cooper, and K. Kompella, "Transport of layer 2 frames over MPLS," Internet Draft, draft-martini-l2circuit-trans-mpls-08.txt.
- [6] K. Kompella, M. Leelanivas, Q. Vohara, R. Bonica,

and E. Metz, "MPLS-based layer 2 VPNs," Internet Draft, draft-kompella-ppvnp-12vpn-02.txt.

- [7] L. Martini, N. El-Aawar, G. Heron, D.S. Vlachos, D. Tappan, J. Jayakumar, A. Hamilton, E. Rosen, S. Vogelsang, J. Shirron, T. Smith, A.G. Malis, V. Sirkay, V. Radoaca, C. Liljenstolpe, D. Cooper, and K. Kompella, "Encapsulation methods for transport of layer 2 frames over IP and MPLS networks," Internet Draft, draft-martini-l2circuit-encap-mpls-04.txt.
- [8] B-ISDN ATM layer cell transfer performance, ITU-T Recommendation I.356.
- [9] HP Broadband Series test System: 155/622 Mb/s ATM Analyzer User's Guide, Hewlett Packard Company, 1995.
- [10] S. Katsuno, K. Yamazaki, T. Kubo, T. Asami, K. Sugauchi, O. Tsunehiro, H. Enomoto, K. Yoshida, and H. Esaki, "High-speed IP meter HIM and its application in LAN/WAN environments," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E85-D, no.8, pp.1241-1249, Aug. 2002.

(平成 15 年 8 月 29 日受付, 12 月 12 日再受付)



勝野 聡 (正員)

平元東大・工・電気卒。平 3 同大学院修士課程了。同年国際電信電話(現, KDDI)(株)入社。以来、画像通信及び画像処理、IP トラフィック収集等に関する研究に従事。現在、通信・放送機構大手町 IPv6 システム運用技術開発センター研究員。平 9 本会

学術奨励賞受賞。



山崎 克之 (正員)

昭 55 電通大・通信卒。国際電信電話(現 KDDI)(株)において ISDN と共通線信号方式の開発と実用化、ATM のネットワークと品質制御の標準化と研究、IP ネットワークの網構成法・品質制御の研究、等に従事。現在(株) KDDI 研究所学術ネット

ワーク推進特命プロジェクトリーダー。工博。昭 63 本会学術奨励賞受賞。



浅見 徹 (正員)

昭 49 京大・工・電子卒。昭 51 同大学院修士課程了。同年国際電信電話(現 KDDI)(株)入社。ファクシミリ通信、JUNET 国際ゲートウェイシステム、ネットワーク障害診断システム、IP ネットワーク、等の研究・実用化に従事。現在(株) KDDI 研究

所代表取締役所長。昭 58 本会学術奨励賞, 平 9 前島賞各受賞。



江崎 浩 (正員)

昭 60 九大・工・電子卒．昭 62 同大大学院修士課程了．同年 (株) 東芝入社．平 2 米国ベルコア社客員研究員，平 6 米国コロンビア大学客員研究員．平 10 東京大大型計算機センター (現情報基盤センター) 助教授，平 13 同大大学院情報理工学系研究科助教授，現在に至る．工博．高速インターネットアーキテクチャの研究に従事．WIDE プロジェクト運営協議会委員．JGN 運営委員会委員．平 6 本会学術奨励賞，平 9 電気通信普及財団奨励賞，平 10 日刊工業新聞十大製品各受賞．