

# リアルタイム通信プロトコル $R^3TP$ の実装

山口 雅信<sup>†</sup> 伊東 克能<sup>†</sup> 高崎 喜孝<sup>†</sup>

我々はリアルタイムパケット通信の需要に対して主にパケットロスに起因する誤りの回復と通信のリアルタイム性の維持との関係を中心に研究を行っている。従来はリアルタイム通信の誤り制御には再送よりも誤り訂正符号の付加による回復の方が適しているとされてきたが、ネットワークの高速広帯域化が進みつつあることにより再送による誤り制御も十分現実的な選択肢となりつつある。これまでに我々は再送による誤り制御を行いつつ高品質なリアルタイム通信を提供するための方法について検討し、ブロック転送方式や再送による誤り制御を採り入れたリアルタイム通信プロトコル  $R^3TP$  (Retransmission-based Reliable Realtime data Transfer Protocol) を提案してきた。リアルタイム通信で再送による誤り制御で十分なリアルタイム性を獲得するためには性能の良いパケットロス検出機能が不可欠であり、我々はそのような用途に適した ABT の RM セルを用いたパケットロス検出スキームを提案しシミュレーションによる検証を行い良好な結果を得た。その後、疑似的に ABT 機能を実現した ATM ネットワーク上に実装を行い、連続したパケットロスや転送するリアルタイム情報の性質に関して  $R^3TP$  が再送による誤り制御を行いながらリアルタイム通信を維持できることを確認した。本稿では、主にこの  $R^3TP$  の実装を用いた検証実験の結果について報告する。

## Implementation of Realtime Data Transfer Protocol $R^3TP$

MASANOBU YAMAGUCHI,<sup>†</sup> KATSUYOSHI ITO<sup>†</sup>  
and YOSHITAKA TAKASAKI<sup>†</sup>

Focusing on relationships between packet loss recovery and timelines of data reception, we have investigated realtime packet communication whose demand is now emerging. It has been assumed that error-correcting-code-based error recovery is more feasible for realtime use than retransmission-based error recovery, but recent advent of high speed and high throughput network makes the latter a meaningful option. We have proposed high quality realtime data transfer protocol  $R^3TP$  (Retransmission-based Reliable Realtime data Transfer Protocol) using block transfer technology and retransmission-based error recovery. Because retransmission-based error recovery in realtime data transfer requires a packet loss detection scheme with high responsibility, we have also proposed a scheme of packet loss detection employing RM (Resource Management) cell of ABT (ATM Block Transfer) technology as a packet loss identifier, and this packet loss detection scheme was confirmed to show good simulation results. We have implemented  $R^3TP$  on ATM network with pseudo ABT functionality, and it is confirmed that  $R^3TP$  has capability to realize realtime communication under contiguous packet losses using this implementation. In this paper are described implementation of the packet loss detection scheme for  $R^3TP$  and its evaluation results in comparison with conventional schemes of packet loss detection.

### 1. はじめに

近年アクセスネットワークの高速広帯域化が進み、リアルタイム性を要求するアプリケーションの需要も増加しつつある。また、QoS 保証技術の研究が進んだことにより、従来、あまり有効でないと考えられてきたリアルタイムデータ転送における再送による誤り制御が有効となる状況が出現しつつある。リアルタイム情

報を代表するビデオや音声は一般に連続メディアと呼ばれるが、これらは時間的にミクロな視点で考えた場合には離散的なデータブロック (ADU: Application Data Unit)<sup>1)</sup> の集合体と考えることができる。このような面からリアルタイム通信を考えると、個々の ADU 転送のリアルタイム性が維持されることで全体の連続メディアストリームとしてもリアルタイム性が維持されていると考えることができる。この ADU を構成するパケットのロスを可能な限り早く発見し再送できれば、再送による誤り制御は十分実用的なものになるといえ、そのためには ABT (ATM Block Transfer)<sup>2)</sup>

<sup>†</sup> 東洋大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Toyo University

などのブロック転送技術の使用が有効であるといえる。我々はこのような考察に基づき、これまでに ATM のブロック転送方式である ABT と再送による誤り制御を使用して高品質なリアルタイムデータ転送を行うトランスポートプロトコル  $R^3TP$  (Retransmission-based Reliable Realtime data Transfer Protocol) を提案し、シミュレーションによる検証<sup>3)~5)</sup>や、部分的な実装の構築を行ってきた<sup>6)</sup>。また、ATM によらない一般的な IP ネットワーク上での動作に関する検討も行っている<sup>7),8)</sup>。本稿では、 $R^3TP$  の実装の設計および評価結果について報告する。

次の 2 章では一般的なリアルタイムデータとその誤り制御に関する背景について述べ、3 章で  $R^3TP$  の機能と構成、4 章でその実装について、5 章ではこの実装を用いた実験結果について他の誤り制御方式との比較とあわせて示す。最後に 6 章で得られた結論をまとめる。

## 2. 背景

この章ではリアルタイム情報や誤り制御の性質など研究の背景について述べる。

### 2.1 リアルタイム情報の性質

リアルタイム通信といえば電話からストリーミング型の映像配信までを含む広い概念であるが、本稿ではリアルタイム通信を特にデータの発生がリアルタイムでかつ受信側で高いリアルタイム性が要求されるものを指すものとする。このリアルタイム情報はその情報源や符号化方式により様々な種類があるが、時間軸上に一定、あるいは不定間隔ごとに何らかの構造を持つ情報が発生するという性質を共通して持っている。これは 1 つ以上の映像フレームや一定時間分の音声データなどが考えられるが、これを ADU (Application Data Unit) と位置付ける。これによりリアルタイム情報も時間軸上において何らかの間隔ごとに発生するデータの集合であると見なすことができる。送信側も受信側もこの ADU を単位とした処理を行っていることになり、伝送速度が大きく ADU 発生間隔が長いほどこの ADU はパースト性の高いものとなる。この ADU のパースト性の高さに適した転送方式としてブロック転送方式が有望であると考え、その中でも ATM のブロック転送方式である ABT (ATM Block Transfer) に注目した。

### 2.2 リアルタイム通信と誤り制御

データ通信における誤り(ここではビット誤りとパケットロスの両方を含む)制御には、大きく分けて誤りの検出とその後の回復という 2 つの段階がある。

一般的な誤り検出手法には、データそのものに誤り検出符号を含めるものと、別個に ACK や NAK を使用するものがある。誤り検出符号はその後の回復まで行えるものが多く、Reed-Solomon 符号を複数のパケットをインターリーブして適用しパケットロスに対する回復能力を備えているものもあるが、一般に検出および回復能力を高めるほど冗長なデータを多く含み、さらには誤りの検出が可能な最低数のパケットが到着するまでに検出のための処理時間を必要とする。ACK を使用する場合には機構としては単純なもので済むが、タイムアウトを待つという性質上高速な応答を実現することが難しく、高度なリアルタイム性を実現することは難しい。多少の誤検出が生じても検出の高速性を実現しようとするものもあるが、ネットワークの利用効率という観点からは不必要な再送の発生は望ましくない<sup>9),10)</sup>。リアルタイムデータの誤り(パケットロス)はどのような手段で回復を行う場合でも可能な限り早く検出できることと同時に、誤検出が発生しないことが望ましいが、NAK を用いる検出では最低でも Round Trip Time (RTT) + 1ADU 分の検出時間を要する。

回復には大きく分けて ARQ (Automatic Repeat Request) —再送— と FEC (Forward Error Correction) —訂正— の 2 種類が存在する。これについては文献 1), 11) などをはじめとして様々な研究が行われている。一般的には構造や処理の簡単さという点では ARQ の方が優れているが、帯域不足や遅延の問題からリアルタイム通信ではこれまで ARQ はあまり有効とは考えられていなかった。しかしながら、以前より一般的な IP ネットワークでも条件によっては ARQ が有効であるという指摘もあり<sup>12)</sup>、さらに ATM ネットワークでは事前に QoS パラメータを与えることでネットワークによる一定の QoS の提供を前提にすることが可能である。さらに ADSL や FTTH が普及しつつある現在では速度や帯域に関する制約が大きく変化しており、誤り率が比較的低い状況下では ARQ は十分現実的な選択肢であり、そのうえ、つねに冗長な訂正情報も送信しなければならない FEC よりもネットワークの利用効率が良いといえる。

## 3. $R^3TP$ の機能と構成

この章では我々が提案している  $R^3TP$  の機能と構成について述べる。

### 3.1 $R^3TP$ とそのコネクション

$R^3TP$  (Retransmission-based Reliable Realtime data transfer protocol) は高品質なリアルタイム情

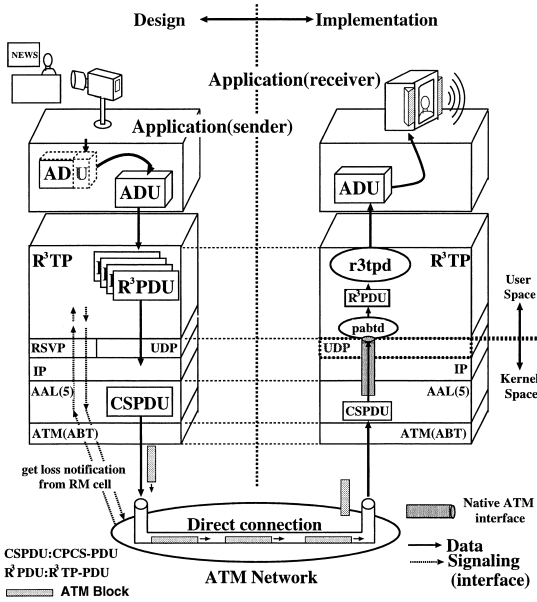


図1  $R^3TP$   
Fig. 1  $R^3TP$ .

報通信の提供を目的としたトランスポートレイヤプロトコルであり、2.1節で述べたADUの集合体としてのリアルタイム情報を効率的に転送するためにブロック転送技術(ABT)と再送による誤り制御を組み合わせたことを特徴としている(図1)。このため、ABTが利用可能なIP over ATMネットワークでの動作を前提としている(これとは別に特定の物理ネットワークを前提としないプロトコルの検討も進行中である<sup>7)</sup>)。 $R^3TP$ では通信の開始時に確立したATM(ABT)コネクション<sup>13),14)</sup>を $R^3TP$ コネクションが使用する。そして後述のロス検出を実行するために $1R^3TP-PDU$ を1ATMブロックに対応するサイズで送信する。 $R^3TP$ ではADUを転送の基本単位と考え、個々のADU転送においてそのリアルタイム性を維持することでリアルタイムデータ転送全体のリアルタイム性も維持している。

3.2  $R^3TP$ の誤り制御

$R^3TP$ では $R^3TP-PDU$ のロスが検出されると失われた $R^3TP-PDU$ そのものを再送する(データ転送時のエラーとしては、途中でPDUが破棄される場合と誤りのあるPDUが受信される場合があるが、後者の場合には下位層の機構により検出および破棄されるためトランスポート層としてはどちらの場合でも最終的にはPDUの損失になると考える)。このとき、一時的に到着するPDUの順番が入れ替わることがあるが、TCPなどで用いられるGo-back N方式をとら

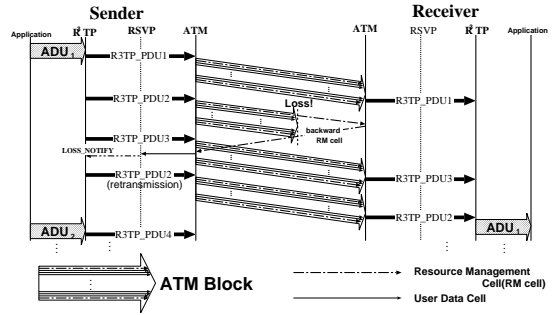


図2 RMセルを使用したロス検出スキーム  
Fig. 2 Packet loss detection scheme with RM cell.

ず、入れ替わった順番を正してADUごとに受信側アプリケーションへと渡すことにより、余分なデータ転送が生じることを避けるとともにリアルタイム性の維持を容易にする。

また、前述のように再送による誤り制御を用いてリアルタイム通信を実現するためには高速かつ精度の高いパケットロス検出方式が必要とされるが、そのため我々はABTのRMセルの情報を利用するパケットロス検出方式を採用している。

$R^3TP$ に要求される高速かつ高精度なロス検出方式として、図2に示すRMセルの情報を利用するロス検出を使用している<sup>5)</sup>。このRMセルはABT/ITでATMブロックを転送するときに資源確保のために送信元が送出するものであり、途中のATMスイッチでATMブロックのための資源確保に成功したか否かがマークされて最終的に送信元まで送り返される。

資源確保の失敗はすなわち途中のATMスイッチでATMブロックが破棄されたことを示しており、このRMセルの情報を $R^3TP$ で知ることができればNAK情報として活用することができる。そこで、ATMコネクションの確立にも使用しているRSVPをRMセルの情報を抽出できるように一部機能拡張を行い、この情報をトランスポートレイヤプロトコルである $R^3TP$ でNAK情報として使用することでパケット(ATMブロック)ロス検出を行う。

この方式の利点としては以下の点があげられる。

- (1) ABT/ITの構造上、ブロックロスを正確に検出できる。また、RMセルはネットワークにより破棄されることがないためにNAK情報が失われる可能性が非常に低い。
- (2) 基本的にPDU本体がすべて受信されるまで待つ必要がないため、理想的な状況では1セル分の往復時間という非常に高速なブロックロス検出が期待できる。

(3) ネットワーク(ATM)の情報を積極的に利用することにより、レイヤ間で重複する処理を減らしてトランスポートレイヤプロトコル( $R^3TP$ )の構造を簡略化することができる。

資源確保の失敗を検出すると、RM セル内の SN (Sequence Number) フィールド内の情報により失われたブロックを特定するが、この情報をロス情報として使用するためには失われたブロックと上位レイヤの PDU との間の明確な対応関係が識別可能であることが条件となる。 $R^3TP$  では、通信ごとに個別の ATM コネクションを設定し、あらかじめ下位レイヤでフラグメント化が発生しないサイズで PDU を作成して送信することで  $R^3TP$ -PDU と ATM ブロックの対応を認識することができる。これにより、1 ブロックロス =  $1R^3TP$ -PDU のロスとなる。これ以降はこの  $1R^3TP$ -PDU のロスを単にロス、あるいはパケットロスと呼ぶこととする。

このロス検出方式では、物理ネットワークである ATM に属する RM セルの情報をいかにしてトランスポートレイヤで利用できるようにするかが課題となる。ATM NIC から直接情報を得られることが理想的であるが、現状ではそのようなインタフェースの実現は難しく、ATM コネクションの確立にも使用している RSVP を一部拡張して RM セルの情報を  $R^3TP$  が理解できる NAK 情報に変換する機能を持たせるなどの代替案が考えられる。一般的なロス検出方式である ACK スキームや NAK スキームと対比し、このロス検出方式を RM セルスキームと呼ぶこととする。

これまでにこの RM セルスキームと既存のロス検出スキームの比較をシミュレーションにより行い、RM セルスキームが良好な性能を示すことを確認している<sup>5)</sup>。

### 3.3 再送を使用したリアルタイム通信が可能となる条件

この節ではリアルタイム通信の誤り制御として再送の使用を可能とする条件について検討する。例として、図 3 に基づき考察する。ここでは (a) 周期  $T$  ごとに  $ADU_i$  が生成され、(b) 長さ  $t_s$  秒の PDU として速度  $B_t$  で送出される。(c) これが伝搬遅延  $T_{td}$  を経て受信されるが、パケットロスが発生するとロスの検出と再送により  $T_r$  秒経過後に受信される。(d) 受信側では一定のバッファリング時間  $T_b$  の後にこの情報が再生されるものとする。すべての ADU においてこの状況が成立するならば通信が成立し、さらに  $T_b$  が小さいほど通信のリアルタイム通信が良好であると考えられる。

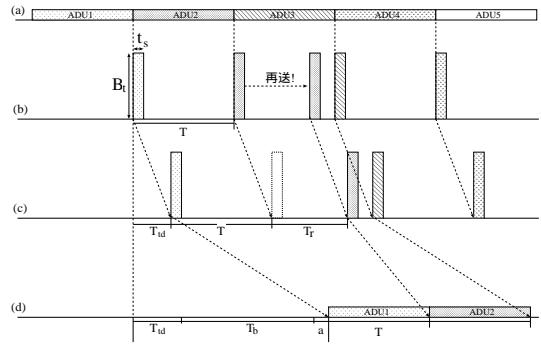


図 3 再送を用いるリアルタイムパケット通信のイメージ  
Fig. 3 Scheme of real-time-packet communication using retransmission.

#### (1) 再送による回復が可能となる条件

再送による回復を行っても通信が維持できるためには、回復に要する時間  $T_r$  とバッファリング時間  $T_b$  は以下の条件を満たさなければならない ( $a$  はプロトコル処理時間)。

$$T_r \leq T - t_s - a \tag{1}$$

$$T_b > T + T_r \tag{2}$$

また、ADU の送出速度  $B_t$  と再生時の平均速度  $B_r$  の間には以下の条件が存在する。

$$B_t \geq \frac{T}{t_s} B_r \tag{3}$$

再送を前提としたパケットロス検出は ACK, NAK のどちらを使用するものでも送信元へ情報を送り戻さなければならないが、そのためには最短でも 1 パケット分の送出時間  $t_s$  と RTT 分の時間が必要であり、それに加えて各検出方式ごとに固有の時間がかかる。この検出方法固有の時間を  $t_d$  とすると以下の不等式も成立する。

$$T_r \geq RTT + t_s + t_d \tag{4}$$

式 (1), (3), (4) から、以下の条件を導くことができる。

$$1 - \frac{B_r}{B_t} - \frac{a}{T} \geq \frac{T_r}{T} \geq \frac{RTT}{T} + \frac{B_r}{B_t} + \frac{t_d}{T} \tag{5}$$

この式を縦軸を  $B_r/B_t$ 、横軸を  $T_r/T$  とする座標系にプロットすると図 4 が得られる。縦軸上の 3 点  $1 - a/T$ ,  $\frac{1}{2}\{1 + (RTT - a + t_d)/T\}$ ,  $(RTT + t_d)/T$  がこの順番になることが再送が適用可能である条件となり、グラフ中のハッチングした領域が適用可能領域となる。

これを整理すると、

$$1 - (RTT + a + t_d)/T > 0 \tag{6}$$

つまり RTT、プロトコル処理時間  $a$ 、パケットロスの検出に要する時間の和  $t_d$  が ADU の発生周期  $T$  を

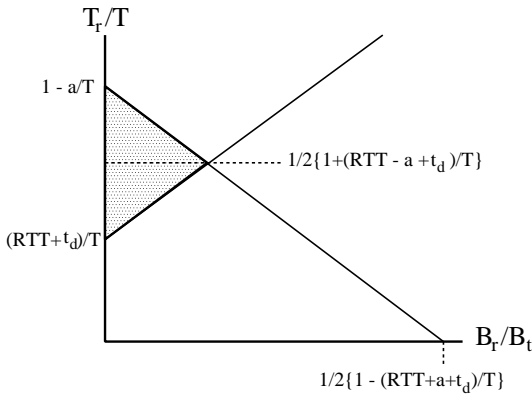


図 4 再送が可能な領域

Fig. 4 Retransmission-capable zone for retransmission delay and bandwidth.

超えないことが条件となる。

また、式 (5) から伝送速度に関して以下の条件が得られる。

$$B_r/B_t \leq 1/2\{1 - (RTT + a + t_d)/T\} \quad (7)$$

$RTT + a + t_d$  が  $T$  を超えない範囲で大きくとれる方が適用可能な範囲が広がるが、同時に大きな送出速度  $B_t$  が要求される。

最後に受信側でのバッファリング時間について考察する。

バッファリング時間を  $T_b \geq nT + T_r$  ( $n : n \geq 0$  の整数) とすると、 $T_b/T \geq n + T_r/T$ 。ここで式 (6) より  $T_r/T \leq 1$  であるから  $T_b/T \geq 1$  が得られる。そのため、条件を満たす最小の  $T_b$  として  $T$  が望ましいが、 $2T$  とする方が安全であろう。

$T_b$  が大きいほど誤り発生時の回復に余裕があるが、リアルタイム性を維持するという観点からは  $T_b$  は可能な限り小さい方が望ましい。リアルタイム性を維持できる限界としては過去に様々な検討が行われているが、TV 電話や会議などのような会話を主体とするものでは往復分の遅延が 200 ミリ秒を超えると円滑な会話の維持が難しくなるという報告がある<sup>15),16)</sup>。そのため、 $T_b$  の選択は最も小さな  $T$  が望ましいが、通信のリアルタイム性の低下が許容される範囲内でバッファリングを行うことでそれよりも大きな  $nT$  をとることが可能である。たとえば 30 ADU/秒のビデオシーケンスの場合、前述の報告から許容される遅延として 99 ミリ秒までのバッファリングが可能である ( $n = 3, T = 33$  msec)。

#### 4. $R^3TP$ の実装

3 章において  $R^3TP$  の基本的な設計について述べ

表 1  $R^3TP$  API  
Table 1  $R^3TP$  API.

コネクション管理	<code>r3tp_active_open()</code> , <code>r3tp_passive_close()</code>
データの送受信	<code>r3tp_send()</code> , <code>r3tp_receive()</code>

たがこれを実装するためには ABT 機能を持つ ATM ネットワークが必要となる。しかしながら、ABT 機能を持つ ATM スイッチを入手できなかったため通常の ATM ネットワークに疑似的な ABT 機能を実現した上に  $R^3TP$  の実装を構築した。

#### 4.1 基本的な構造

FreeBSD 上に構築した実装としての  $R^3TP$  を図 1 の右側の部分に示す。 $R^3TP$  の機能主体は `r3tpd` という名前のデーモン (daemon) として構築した。図 1 右側にある同名の楕円形のオブジェクトがこれに相当する。この `r3tpd` が  $R^3TP$  のセッション管理、疑似 ABT (後述) を使用したコネクションの管理などを行う。 $R^3TP$  のコネクションはコネクションごとに独立したエンティティとしてプロセスを動的に起動して対応する。アプリケーションに対しては API を `r3tp_open()` などのライブラリ関数の形で提供し、これらの関数を介して  $R^3TP$  の機能を使用する (表 1)。

RM セルスキームによるパケットロス検出機能は次節で述べる疑似 ABT 機能との関係により実現している。

#### 4.2 疑似 ABT

疑似 ABT 機能は、使用している ATM アダプタが ABT を直接サポートしないために代替機能として作成した。ABT は RM セルを使用してブロック転送の制御を行っているが、これを疑似的に実現するために FreeBSD に組み込まれている Native mode ATM インタフェース<sup>17)</sup>を使用した (以後これを NATM と略記する)。この NATM インタフェースはソケットインタフェースから直接 ATM コネクションを制御することができる。そのため、NATM を使用することでユーザプロセスのレベルで動的に ATM コネクションの確立や解放、直接のデータの送受信が可能になる。この機能を利用して  $1R^3TP$  コネクションが 1 つの ATM コネクションを占有できるようにした。さらに、直接 RM セル相当の情報 (これを疑似 RM セルと呼ぶ) を生成して疑似的に ABT の機能を再現した。この疑似 RM セルには RM セルとまったく同じフォーマットを持たせていて、意味論的には ATM ブロックに先立って送られる F (Front) RM セルと T (Trail) RM セルの 2 種類がある。FRM セルによりリンクや ATM スイッチ内の資源確保を行い、TRM セルでその資源

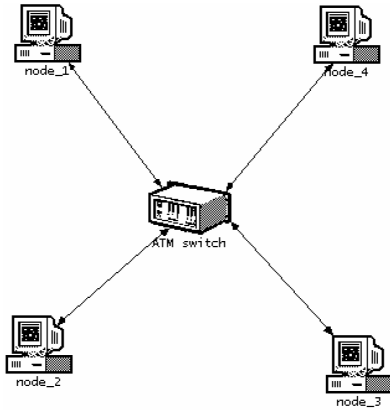


図5 実験用ネットワーク  
Fig. 5 Experimental network.

を解放する (TRM セルが次の FRM セルを兼ねる場合もあるが、ここでは扱わない)。そのため、これらの RM セル内の情報を監視することでブロックの転送状況を把握することができる。3章で述べた  $R^3TP$  の設計では RM セルの情報を得るための中継役として RSVP を提案したが、この疑似 ABT では ATM コネクション管理など RSVP の機能もあわせ持つ形になっているためこの監視機能も疑似 ABT 内で持つこととした。

5. 実験による評価

前の章で述べた実装を使用している検証実験を行った。実験は FreeBSD 4.6Release が動作している PC (CPU : Celeron 466 MHz, Memory : 128 MB) と ATM アダプタ (Adaptec 社の ANA-5940) と ATM スイッチ (ForeRunnerLE155) で構成される実験用ネットワーク (図5) 上で行った。各 PC-ATM スイッチ間のリンク容量は 155 Mbps であり、遅延モジュールにより各リンクは 2.5 ミリ秒のリンク遅延を持っている。IP over ATM 用の PVC のほかに  $R^3TP$  コネクション確立時には疑似 ABT 用の VC も確立される。

各 PC は前章で述べた  $R^3TP$  本体のほかに疑似 ABT 機能を実装している。疑似 ABT を実現するために使用している Native mode ATM には MTU の上限が 2,048 バイトであるという問題点があり、これを解決するために上位層の大きな MTU サイズとの違いを吸収するためのアダプテーションもここで行っている。このため、パケットロスは Native mode ATM の MTU に関係なくつねに  $R^3TP - PDU$  単位で発生し、パケットロス = PDU ロスである。

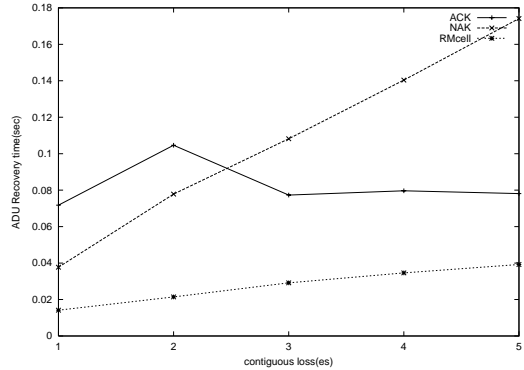


図6 連続したパケットロスに対する ADU の回復時間  
Fig. 6 ADU recovery time for contiguous packet losses.

5.1 基本的な特性

まずはじめに、 $R^3TP$  の基本的なパケットロス回復性能を調べるための実験を行った。ここでは、ネットワークの MTU を AAL5 の上限である 64 KByte、転送データのサンプルとして 30 ADU/秒、6 Mbps (1 ADU あたり 25 KB) の MPEG2 ビデオを模したデータを随時生成し、図5の node\_1 - node\_2 間で転送している状況でのパケットロス発生時の回復性能を確認した。

図6はこの転送中に発生したパケットロスとそれに対応する ADU の回復に要した時間を抽出したものであり、1 から 5 のパケットロスの連続発生数 (単位は ADU) ごとに抽出したものである。グラフの横軸は連続発生したロスの数であり、縦軸はそのときの ADU 転送時の (検出と再送を含めた) 回復時間を表している。なお、実験に使用した 2 台の PC は精密な時刻同期を持たないため、転送時間は ADU を往復させて測定した。図6を含むすべてのグラフにおける ADU の転送時間は node\_1 → node\_2 → node\_1 という往復の時間を表している (この通信での往復の伝搬遅延は  $2.5 * 4 = 10$  ms である)。測定は node\_1 で  $R^3TP$  が送信用アプリケーションから送信要求とともに ADU を受け取った時刻を開始時刻、その後 ADU が node\_2 への転送の後再び node\_1 へ戻ってきて受信アプリケーションへ提供可能となった時刻を終了時刻として、この差分を個々の ADU の転送時間とした。そして 5 分間の通信を 5 回行い、この転送中にパケットロスが生じてロス検出および再送による回復が行われたものを抽出し、その中で最大の転送時間をグラフにプロットした。

ACK スキームによる回復はロスが連続発生した場合でもその影響が比較的小さいものの、タイムアウトを待つという機構上高速な回復を得られないという問

表 2 図 6 における RM セルスキームでの回復時間  
Table 2 Recovery time of RM cell scheme in Fig. 6.

連続パケットロス数	1	2	3	4	5
回復時間 (sec)	0.014157	0.020431	0.024142	0.027623	0.031214

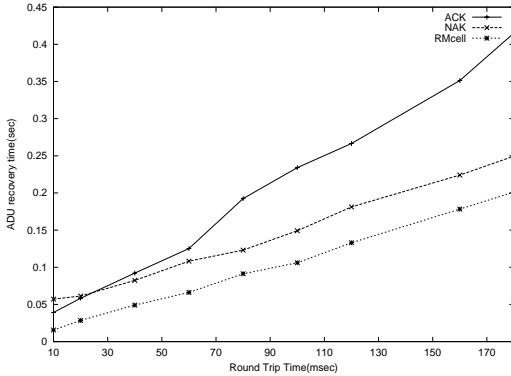


図 7 伝搬遅延に対する ADU の回復時間

Fig. 7 ADU recovery time for propagation delay.

題がある。単発のパケットロスでは、NAK スキームによる回復は ACK スキームよりは回復が早いロス連続発生に弱いという性質を示している。

それに対して、RM セルスキームを使用した回復は他の ACK, NAK に比して非常に高速に回復が行われている。この回復は ADU の生成間隔である 33 ミリ秒より十分に小さな値であり、3.3 節で導いた条件 (式 (6)) を満たし、この実験中では受信側でのバッファリングに頼らずにリアルタイム性を維持した通信が可能であることを示している (具体的な値を表 2 に示す)。さらに、ロスの連続発生時でも大きな変化はなく、実装においても安定した性能を提供できることを示している。

### 5.2 伝搬遅延に関する評価

次に、遅延モジュールによる伝搬遅延に関する実験を行った。伝搬遅延以外の条件は 5.1 節と同じである。図 7 にその結果を示す。このグラフは縦軸がパケットロス発生時の ADU の回復時間、横軸が伝搬遅延 (往復分) であり、前節と同じ 30 ADU/sec, 6 Mbps のリアルタイムデータを ACK, NAK, RM セルスキームそれぞれのパケットロス検出スキームを使用してパケットロス回復を行った通信の結果をプロットしている。

伝搬遅延の増大の影響を最も受けているのが ACK スキームであった。これは伝搬遅延の増大が再送を開始するためのタイムアウト値を大きなものにするためにパケットロス発生時の検出を遅らせてしまうことが原

因である。そのために伝搬遅延が 10 ミリ秒のときには NAK スキームよりも良い性能を示していたものが伝搬遅延の増大につれて最も回復速度が遅いものとなっている。NAK スキームによるロス検出では、伝搬遅延が小さなときには ADU の生成間隔が検出速度に対して支配的であったが、ADU 生成間隔よりも伝搬遅延の方が大きい場合には伝搬遅延の影響の方が大きくなっている。

RM セルスキームによる回復でも再送という手段をとる以上伝搬遅延の影響は避けられないが、他の 2 方式よりも回復に要する時間の増大が比較的少なく抑えられており、伝搬遅延以外のオーバーヘッドが少ないことが分かる。

### 5.3 リアルタイム情報の性質に関する評価

転送されるリアルタイム情報である ADU の性質に関する実験を行った。この実験では総ビットレートが同じで ADU 生成間隔を変化させた場合、たとえばビデオデータを各フレームを ADU としている場合から複数のフレームをまとめて MPEG の GoP などのように扱う場合を想定し、伝搬遅延などその他の条件は 5.1 節の実験と同じである。RM セルスキームによる結果を図 8, ACK および NAK スキームを使用した場合の結果を図 9 に示す。グラフ横軸のビットレートはそれぞれ表 3 の ADU 生成間隔に対応する。

ADU 生成間隔の影響を最も受けるものは NAK スキームであることが分かる。これは NAK スキームではパケットロスがロス発生後の次のパケット到着により検出されるという性質によるものであり、パケットロスが連続して発生する場合にはさらに検出に時間を要している点もこのことを裏付けている。それに対して ACK および RM セルスキームのパケットロス検出性能は ADU 生成間隔からの影響を受けにくく安定しており、さらに RM セルスキームによるロス回復は高速に行われている。

### 5.4 考察

今回の実装による検証実験の結果は RM セルスキームによるパケットロス検出とその後の再送がリアルタイム通信の誤り制御として有効であることを確認できるものであり、過去のシミュレーションによる検証の結果ともおおむね一致するものであった。

5.1 節において、RM セルスキームは連続して発生し

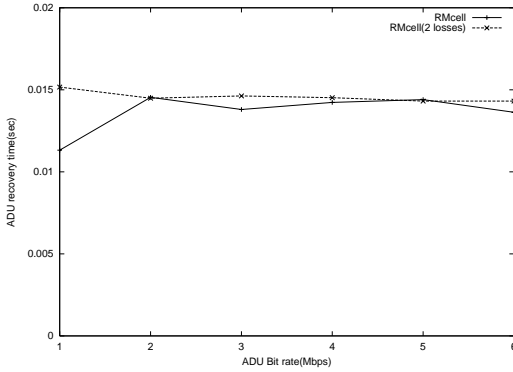


図 8 ADU 生成間隔に対する ADU の回復時間 (RM セルスキーム)

Fig. 8 ADU recovery time for ADU interval (RMcell scheme).

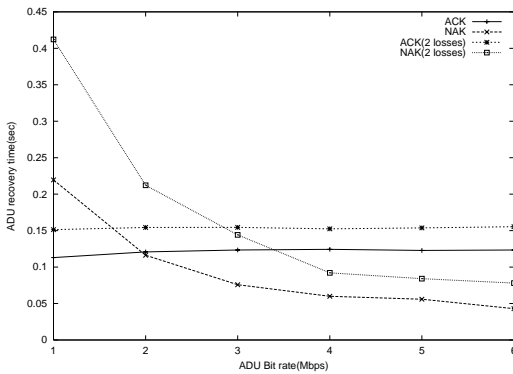


図 9 ADU 生成間隔に対する ADU の回復時間 (ACK, NAK スキーム)

Fig. 9 ADU recovery time for ADU interval (ACK, NAK scheme).

表 3 図 8, 9 のデータレートと ADU 生成間隔の関係  
Table 3 Relation between data rate and ADU rate (Fig. 8, 9).

データレート (Mbps)	1	2	3	4	5	6
ADU 生成間隔 (sec)	0.2	0.1	0.667	0.05	0.04	0.033

たパケットロスによる影響を受けずに安定して高速な回復性能を示した。回復時間は伝搬遅延 10 ミリ秒で最も多く連続してパケットロスが発生したとき (ADU5 個分) でも 31 ミリ秒であった。このような短い時間でロスの検出が行えるのは RM セルスキームが ATM ブロックの先頭の情報でロスを判断できるためであり、この時間は 3.3 節で導いた条件 (式 (6)) における  $RTT + a + t_d$  に相当し、33 ミリ秒である T に対して条件、式 (6) の左辺は 0.061 であり式 (6) が成立する範囲内にある。

5.2 節では伝搬遅延の増大に対して 3 つのパケットロス検出すべての回復時間が増大していく実験結果を得たが、その中でも RM セルスキームは最も速い回復性能を示している。しかしながら、T に対して伝搬遅延が大きくなるにつれて伝搬遅延がパケットロスの回復時間に対して与える影響がより支配的となっていくことも確認した。

5.3 節では ADU の生成間隔が与える影響を確認した。このことにパケットロスの回復性能が最も影響を受けたのが NAK スキームであり、特に ADU 生成間隔が大きくなると (0.1 秒以上) には最もパケットロス回復に時間を要している。これは GoP などのように ADU を時間的にやや大きな範囲にとる場合は NAK スキームによるパケットロス回復がやや劣っており、パケットサイズを小さくとるなどの工夫が必要であることを示している。

これらの実験全体を通して、RM セルスキームは今回実験で使用した 3 つのパケットロス検出スキームのうちで最も安定して高速なパケットロス検出性能を示し、3.3 節で導いた条件 (式 (6)) に対しても伝搬遅延が大きい場合を除けばその条件を満たしている。同時に、 $T_r$  を非常に小さな値に抑えることができるため受信側で行うバッファリングも最少に抑えることが可能であり、これは会話などの通信のリアルタイム性を維持するために大きく役立つことが期待できる。

## 6. む す び

本稿では主にリアルタイム通信プロトコル  $R^3TP$  の実装とその検証実験について報告した。 $R^3TP$  ではパケットロス検出として RM セルスキームの使用を提案しているが、これは ABT の使用を前提としていた。ABT 機能を持つ ATM スイッチが入手できなかったため Native mode ATM を使用した疑似 ABT を代替として提案、実装して  $R^3TP$  の実装を行った。疑似 ABT の使用により実現した  $R^3TP$  の実装、ひいては再送による誤り制御と ADU ベースのブロック転送技術の使用はリアルタイム通信の実現に有効であることを確認できた。

今後は TV 電話などのアプリケーション類を  $R^3TP$  上に実装し、 $R^3TP$  がアプリケーションレベルに提供するリアルタイム性能の検証などを行っていく予定である。

## 参 考 文 献

1) Carle, G. and Biersack, E.W.: Survey of Error Recovery Techniques for IP-Based Audio-



- Visual Multicast Applications, *IEEE Network November/December*, Vol.11, No.6, pp.24-36 (1997).
- 2) ITU-T recommendation: *I371, I371.1 Traffic control and congestion control in B-ISDN: conformance definitions for ABT and ABR*.
  - 3) 山口雅信, 伊東克能, 高崎喜孝: 再送を用いたリアルタイムデータ転送プロトコルに適したロス検出方式, 信学技法 IN99-83, pp.37-42, 電子情報通信学会 (1999).
  - 4) Yamaguchi, M., Ito, K. and Takasaki, Y.: Packet loss detection scheme for retransmission-based realtime data transfer, *Proc. 7th International Conference on Parallel and Distributed Systems: Workshops*, pp.49-54, IEEE Computer Society (2000).
  - 5) 山口雅信, 伊東克能, 高崎喜孝: リアルタイムデータ転送プロトコル  $R^3TP$  とその誤り検出方式, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.2, pp.381-389 (2002).
  - 6) 山口雅信, 伊東克能, 高崎喜孝: リアルタイム通信プロトコル  $R^3TP$  の誤り制御機能の実装, 情報処理学会第 63 回全国大会講演論文集分冊 3 (2N-02), pp.599-600 (2001).
  - 7) 丸山英起, 山口雅信, 伊東克能: IP ネットワークにおけるリアルタイムデータ転送に適した再送方式の検討, 情報処理学会第 63 回全国大会講演論文集分冊 3 (3D-6), pp.279-280 (2001).
  - 8) 丸山英起, 山口雅信, 伊東克能: リアルタイムデータ転送に適した誤り制御方式 T-NAK の実験的検討, 情報科学技術フォーラム 2002 一般講演論文集第 4 分冊 (M-14), pp.61-62 (2002).
  - 9) Nonnenmacher, J., Biersack, E.W. and Towsley, D.: Parity-Based Loss Recovery for Reliable Multicast Transmission, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.6, No.4, pp.349-361 (1998).
  - 10) Kousa, M., Elhakeem, K. and Yang, H.: Performance of ATM Networks Under Hybrid ARQ/FEC Error Control Scheme, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.7, No.6, pp.917-925 (1999).
  - 11) IETF: RFC2198: RTP Payload for Redundant Audio Data (1997).
  - 12) Nonnenmacher, J., Biersack, E.W. and Towsley, D.: On retransmission based error control for continuous media traffic in packet-switching networks, *COMPUTER NETWORKS and ISDN SYSTEMS*, Vol.28, pp.719-736 (1996).
  - 13) IETF: RFC2379: RSVP over ATM Implementation Guidelines (1998).
  - 14) IETF: RFC2380: RSVP over ATM Implementation Requirement RSVP over ATM (1998).
  - 15) Swinehart, D.: The Connection Architecture for the Etherphone System, Xerox PARC Technical Report, pp.CSL 91-8 (1991).
  - 16) ITU-T recommendation: G114 One-way transmission time.
  - 17) Cranor, C.D.: INTERGRATING ATM NETWORKING INTO BSD (1998). <http://www.cccr.wustl.edu/pub/chuck/tech/bsdatm/bsdatm.html>

(平成 14 年 7 月 8 日受付)

(平成 14 年 11 月 5 日採録)



山口 雅信 (学生会員)

1971 年生. 1995 年東洋大学工学部情報工学科卒業. 2000 年東洋大学大学院前期博士課程修了. 東洋大学大学院後期博士課程在学中. コンピュータネットワークの研究に従事.



伊東 克能 (正会員)

1940 年生. 1962 年東京大学工学部電気工学科卒業. 同年三菱電機(株)入社. 1998 年東洋大学工学部情報工学科教授. 工学博士. レーザデータ, 赤外線画像装置, 公衆通信用光システム, 光 LAN, コンピュータネットワークの研究開発に従事. 電子情報通信学会, 情報理論とその応用学会, IEEE 各会員.



高崎 喜孝

1938 年生. 1962 年東京大学工学部電気工学科卒業. 同年(株)日立製作所入社. 1994 年東洋大学工学部電気電子工学科教授. 工学博士. デジタル伝送システム, 画像分配システム, 光通信システム, 光 LAN, 広帯域ネットワークの研究開発に従事. 電子情報通信学会, 電気学会, 映像情報メディア学会, 情報理論とその応用学会, IEEE 各会員.