

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

山口 雅信[†] 伊東 克能[†] 高崎 喜孝[†]

我々は増加しつつある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。従来は一般的に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いたが、近年のネットワークの高速広帯域化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り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と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り誤り制御を実行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た。本稿では、この R^3TP のパケットロス検出方式の詳細と従来のパケットロス検出方式との比較評価した結果について報告する。

Realtime Data Transfer Protocol R^3TP and Its Packet Loss Detection Scheme

MASANOBU YAMAGUCHI,[†] KATSUYOSHI ITO[†]
and YOSHITAKA TAKASAKI[†]

We investigate realtime packet communication, now in emerging demand, focusing on relationships between error mainly due to packet losses and timeliness of data reception. Traditionally, 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) with 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 novel scheme of packet loss detection employing RM (Resource Management) cell of ABT (ATM Block Transfer) technology as a packet loss identifier. In this paper are described 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

近年は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 保証の技術の研究が進んだことにより従来は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できつつある¹⁾。リアルタイム情報の代表的存在であ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) の集合体と考えることができる。リアルタイムデータをこの ADU の集合体としてとらえたうえで通信のリアルタイム性について考えると、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。我々はこれらの考え方に基づき、これまでに ATM のブロック転送方式である ABT (ATM Block Transfer) 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) を提案した^{2)~5)}。

本稿では、この R^3TP で使用しているパケットロス検出方式と他の方式との比較を中心にその特性評価

[†] 東洋大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Toyo University

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章で我々が提案した R^3TP をその中で使用している誤り制御機能を中心に説明する．4章で、シミュレーションを用いて他のパケットロス検出スキームと比較した R^3TP の誤り制御機能の特性について述べる．最後に5章でシミュレーション結果全体から得られた考察と全体のまとめを述べる．

2. 高速ネットワークにおけるリアルタイム通信

この章では高速ネットワークにおけるリアルタイム通信について、リアルタイムデータの構造と誤り制御を中心に述べる．

2.1 リアルタイム情報の性質

ネットワーク上で転送されるリアルタイムデータは以下の2つにより特性付けることができる．

- データの発生がリアルタイムか否(蓄積型)か
- 受信側で要求されるリアルタイム性の強さ(デッドラインの存在)

ストリーミング型のVoDなどのデータは作成時は蓄積型であるが、ユーザへの配送時にはリアルタイム性が要求される．その反対に気象情報などを収集して処理する場合のように発生はリアルタイムであっても中央の処理センタなどへの配送には必ずしも高いリアルタイム性は要求されないような比較的要求が緩いものもある．広義においては2つともリアルタイムデータであるともいえるが、本稿で論じるリアルタイムデータを前述の2つの特性に基づき、

- (1) 発生はリアルタイムであり、
- (2) 受信側でも(比較的)強くリアルタイム性が要求される、

と定義する．2つめの項目で比較的としたのは受信側でのバッファリングを行う場合も含むためである．本稿ではアプリケーションとしてTV電話やTV会議などの高い対話性が要求されるものを想定する．このようなアプリケーションで対話性を維持できる限界については過去の研究^{(6),(7)}などでいくつかの値が提示されているが、本稿では会話が違和感なく成立する上限とされている往復で200ミリ秒以内の遅延を許容限界として、それを可能な限り小さくとどめることを目指すこととする．また、データ自体はなんらかの構造を有する離散的なブロックの集合体であると考えられる．

2.2 ADU

リアルタイム通信で転送される情報は多種多様であるが、現在最も需要が多いのは音声や映像などの連続

メディアと呼ばれるものである．連続メディアはネットワーク上で転送されるときにはなんらかの符号化方式により構造化されたデータに変換される．この構造は情報源となるメディアの性質や符号化方式により様々であるが、どのような場合でもデータの基本単位となる構造が存在する(MPEGの各フレームやGoPなど)．その意味では情報源において連続的なアナログ情報であっても最終的には時間軸上に離散的に存在するデータ構造の集合体であると考えられることができる．この個々のデータ構造をADU(Application Data Unit⁸⁾)と呼ぶこととする．ADUという概念自体は元々はアプリケーションが扱うデータの処理単位という意味であるが、本稿では符号化されたリアルタイム情報の基本構造を一般化するための用語としてこれを使用する．たとえば、同じ毎秒30フレームのビデオデータでも、1フレーム単位で処理する場合には30ADU/秒であり、5フレームを1つのグループにまとめて処理する(MPEG1のGoPに相当する)場合には6ADU/秒となる．反対に、1フレーム内の1ラインや1ブロックをADUと考えることもできる．

受信側アプリケーションにおいても、このADUを基本単位として処理が行われる．これらの情報をネットワークを介してリアルタイムに転送する場合、送信側アプリケーションはADUごとに(場合によっては複数をまとめる場合もあるが)送信を行い、受信側アプリケーションもADUを単位として受信、再生処理を行うことになる．その結果、元々は連続性の高いデータもバースト性の高いデータブロックが間隔をおいて発生することになり、そのバースト性の高さに適した転送方式を用いることで効率の良いリアルタイムデータ転送が実現できると考えられる．

2.3 ブロック転送(ABT)

前節であげたバースト性の高いデータに適した転送方式としてブロック転送方式がある．ABT(ATM Block Transfer)はATMにおけるブロック転送方式であり、その詳細はITU-T勧告I.371⁹⁾およびI.371.1¹⁰⁾で規定されていて、その特性に関する研究は文献11)~14)などで行われている．

ABTではATMブロックというブロック単位で転送が行われ、ATMスイッチ内のバッファ不足やその他の理由で破棄が発生する場合にも個々のセル単位ではなくブロック単位で破棄される．

ABTにはABT/DT(Delayed Transmission)とABT/IT(Immediate Transmission)の2種類があり、どちらもコネクション確立時にはなく実際に各ATMブロックの転送を行うときにRM(Resource

Management)セルによりネットワーク資源の確保を行う。DTが資源確保の確認応答を待ってからブロックの送信を開始するのに対し、ITでは資源確保のためのRMセルのすぐ後にATMブロックの送信を開始する。このため、DTではRMセルが往復する分の時間待つことになり即応性には欠けるもののITよりは転送が成功しやすく、ITではその反対に即応性はあるもののネットワークの状況によってはブロックの破棄確率が高くなる。

リアルタイム通信でのABTの使用を考えた場合、先にあげたデッドラインという時間的制約の存在からDTのようにRMセルの往復を待つ方式よりも、即座に送信を開始できるABT/ITの方が適しているといえる。しかしながら、ITでは送信後にブロックが破棄される可能性があるためその使用にはなんらかの誤り制御が必要となる。

2.4 再送による誤り制御

データ転送時の誤り(ここではパケット内のビット誤りとパケットロスの両方を含むと考える)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。ACKを使用するものの中には、多少の誤検出が生じてでも検出の高速性を実現しようとするものもあるが、特に再送により回復を行う場合にはネットワークの利用効率という観点から不必要な再送の発生は望ましくない。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期に検出できると同時に、誤りの誤認識が発生しないことが望ましい。

次に回復について考えると、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8), 15)などをはじめとして様々な研究がなされている。従来はリアルタイムデータの転送ではネットワーク帯域の不足と遅延上限が保証されないことからARQによる誤り制御は現実的ではないとされてきた。これは輻輳時の再送は余計に帯域を消費して更なる輻輳を招くということと、その結果として再送が間に合わずに無駄になるという点が大きな理由であった。しかしながら、文献1)などにより一般的なIPネットワークでも条件によってはリアルタイム通信でARQが有効であるという指摘もあり、さらにATMでは事前にQoSパラメータを与えることでネットワークが一定のQoSを提供するこ

とができることから、ARQによる誤り制御は十分現実的になってきているといえる。特に誤り率が比較的低い状況下では、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。

また、リアルタイム通信では、通信のリアルタイム性を維持するためにデータが受信側で必要とされる時刻までに到着していなければならない。これがデッドラインと呼ばれるものであるが、誤り発生時に再送を行う場合はこのデッドラインまでにADUが(回復も含めて)利用可能にならなければリアルタイムデータとしての価値は失われてしまう。現在実際に行われているリアルタイム通信の中には、間に合わなかったADUを破棄して通信を続ける方式もあるが、より高品質なリアルタイム通信の実現を目指すためにはより確実性の高い再送の実現が必要であると我々は考える。また、リアルタイムデータの中には音声のようにADUの破棄や遅延が品質に重要な影響をもたらすものもある。パケットロスの検出方法によっては多少の誤検出が生じてで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見た場合、不必要な再送の発生は望ましくない。受信側でADUのバッファリングを行うことによりデッドラインに関する条件を緩和することも可能であるが、通信のリアルタイム性という点から考えた場合に厳格なリアルタイム性を要求する通信では可能な限りバッファ時間は短いことが望まれる。以上の考慮をもとに、我々はリアルタイム通信に対しては再送を使用した高品質な通信を提供しつつ、無駄な再送を発生させないことによりネットワークの利用効率についても考慮した通信方式として R^3TP を提案してきた。

3. R^3TP

この章では我々が提案している R^3TP について、その誤り制御についてを中心に述べる。

3.1 R^3TP とそのコネクション

R^3TP は図1で示したABT機能を持つIP over ATMネットワーク上で、再送による誤り制御を使用して高品質なリアルタイム情報通信を提供するコネクション指向のトランスポートレイヤプロトコルである。 R^3TP コネクションの確立時に文献16), 17)に基づきATM(ABT)コネクションの確立を行い、このATMコネクション上で R^3TP を実行する。このマッピングのためにRSVP¹⁸⁾も使用する。そして後述のロス検出のために $1R^3TP$ -PDUが1ATMブロックに対応するサイズで送信する。 R^3TP では転送の

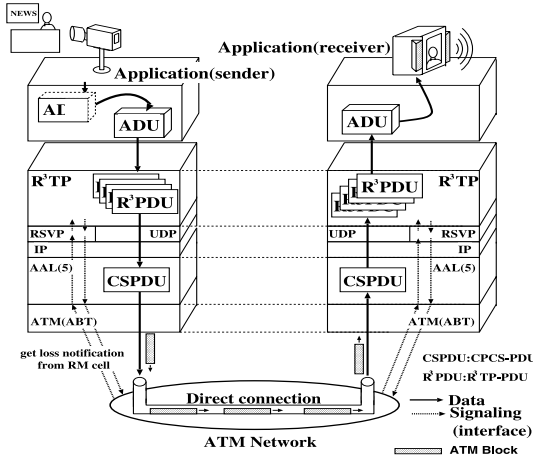


図 1 R³TP
Fig. 1 R³TP.

ADUを基本単位と考え、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する。

3.2 R³TPの誤り制御

R³TPではR³TP-PDUのロスが検出されると失われたR³TP-PDUそのものを再送する(データ転送時のエラーとしては、PDUそのものが失われる場合と中身に誤りのあるPDUが受信される場合があるが、後者の場合には下位レイヤの機構により検出および破棄され、トランスポートレイヤ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の方式をとらず、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、前述のようにリアルタイム通信で再送を使用する場合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、そのために我々はこの後で述べる新しいパケットロス検出方式を採用している。

R³TPに要求される高速かつ高精度なロス検出方式として、我々は図2に示すRMセルの情報を利用するロス検出を提案する。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するものである。

このRMセルには送信元へ送り戻されるときにこのATMコネクションの経路全体で資源確保が成功していたかを示す情報が含まれる。資源確保の失敗はすなわち中途のATMスイッチでATMブロックが破棄さ

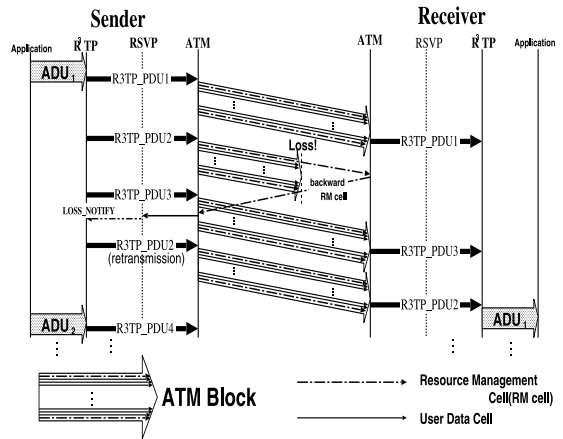


図 2 新しいロス検出スキーム
Fig. 2 Novel packet loss detection scheme.

れたことを示しており、このRMセルの情報をR³TP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R³TP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と同時にRMセルに含まれる情報を利用するためネットワークにより廃棄されることがなく、NAK情報が失われる可能性が非常に低い。
- (2) 理想的な状況では1セル分の往復時間でブロックロスを検出することができるため、非常に高速な検出が期待できる。
- (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(R³TP)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できることが条件となる。R³TP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R³TP-PDUとATMブロックの対応を認識することができる。このことにより、1ブロック

表 1 作成したシミュレーションモデル
Table 1 Simulation model.

作成モデル	R^3TP , RSVP ABT (ATM モデルの拡張)
ロス検出スキーム	RM セルスキーム ACK スキーム (比較用) NAK スキーム

表 2 共通パラメータ
Table 2 Common parameters.

Block Cell Rate (ABT)	100 Mbps
Back Ground Traffic	90% (in OC12)
プロトコル処理時間	0.12 msec

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。これに関しては、 R^3TP は 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ことで解決している。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、この新しいロス検出方式を RM セルスキームと呼ぶこととする。

4. シミュレーションモデルによる特性評価

前章で述べた RM セルスキームの有効性を検証するために、 R^3TP のシミュレーションモデルを作成して他のロス検出方式との比較を行った。ネットワークシミュレータには OPNET version6.0.B (OPNET 社) を使用した。また、追加作成したモデルに関する情報を表 1 に、本稿のシミュレーションで共通に使用するパラメータを表 2 に示した。このうち、プロトコル処理時間は現在構築中のプロトタイプ実装を使用して R^3TP 以下の層のプロトコル処理時間を実測したものを使用した (測定環境は Celeron 667 MHz, Memory 128 MB の FreeBSD 4.2R が動作している PC である)。

4.1 基本的な性質

RM セルスキームを使用した R^3TP でリアルタイム通信を行う状況を想定したシミュレーション結果を示す。このシミュレーションは図 3 で示すネットワークを想定したもので、ボトルネックを生じやすい環境を想定して図中央の基幹部分のリンクを OC12、左右のアクセス網部分のリンクを OC3 としている。そし

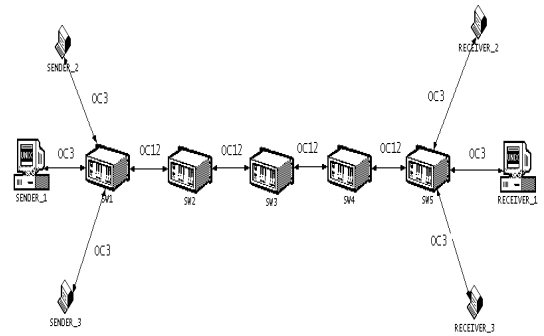


図 3 想定したネットワーク環境
Fig. 3 Simulated network environment.

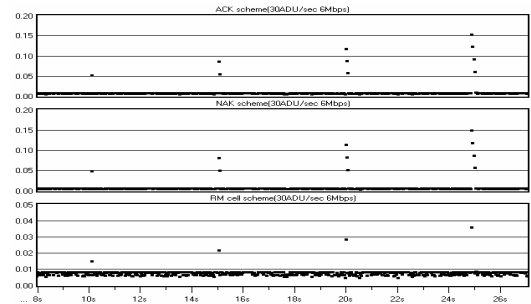


図 4 シミュレーション結果

Fig. 4 Simulation results.

てその他のパラメータを表 2 として SENDER_1 から RECEIVER_1 間でリアルタイムデータ転送を行った場合の結果である。このグラフでは、横軸にシミュレーション内の時刻、縦軸に対応する時刻に SENDER_1 で生成された ADU が RECEIVER_1 で利用可能になるまでに (再送が生じた場合も含めて) 要した時間を示している。グラフのプロットのうち、他のプロットと比べて転送時間が大きなものがパケットロスとその後再送による回復を示している。また、同一条件で ACK スキームと NAK スキームでロス検出を行う R^3TP モデルによるシミュレーション結果もともに示したものが図 4 である。ここで使用している ACK スキームとは送信側で ACK に対するタイムアウトが後続パケットの ACK の到着によりパケットロスを検出するものであり (タイムアウト値算出は適応型), NAK スキームは受信側でシーケンス番号の監視により抜けたパケットをロスと判断して NAK を送信するものである。また、このシミュレーションに限り n 周期めで n 個の連続したパケットロスが発生するようプログラムしたモデルを使用して、1 から n 個のバースト的なロスが発生した場合の回復性能について 1 つのグラフで確認できるようにまとめている (前のパケットロスが次の周期のパケットロスに影響を与え

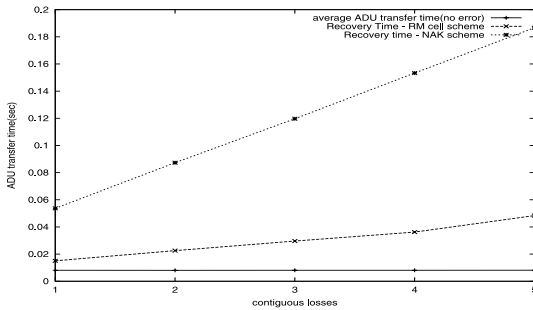


図5 連続発生したロスに関する特性

Fig. 5 R^3TP simulation with each loss detection.

ないよう十分大きな周期をとっている)。これは、単一のロスから連続した複数個のペケットロスが生じた場合までの回復性能についてより分かりやすい結果を得るためであり、以降のシミュレーションではブロックロス率に基づくモデルを使用している。

この結果を各スキームでの連続発生したペケットロスの数を基に整理したのが図5であり、各プロットは対応する個数のペケット発生時の回復時間を表している。

このシミュレーションでは1から4個の連続発生したペケットロスまでの回復性能を見ることができるが、RMセルスキームは他の2つのロス検出方法と比べてペケットロスが連続して生じた場合でも回復に要する時間がきわめて短いため、誤り制御として再送を使用する場合に通信のリアルタイムを維持するのに適していることが分かる。

具体的な数値を見てみると、RMセルスキームは連続したペケットロスが3つまでの場合に回復にかかる時間がADUの生成間隔の33ミリ秒以下であり、次のADUの送信に影響を与えずに再送を完了している。また、2つめ以降のペケット転送への影響がほとんど見られないことから、連続したペケットロスへの耐性も非常に高いことが分かる。

また、ACKスキームとNAKスキームを使用した場合の結果が非常によく似ているが、これはACKスキームでもロスが発生した場合に送信側でタイムアウトを検出するよりも先に後続のADUが到着することでロスが検出されるため、NAKを使用した場合とほぼ同等の検出速度になるためである。ACKスキームではタイムアウトに関するパラメータを調整することで検出速度を上げることもできるが、パラメータを綿密に調整すればするほど構造が複雑になり汎用性が乏しくなるだけでなく、誤検出率との間にトレードオフが発生する。この結果をふまえて、これ以降のシミュレーションではNAKスキームのみを比較対象として

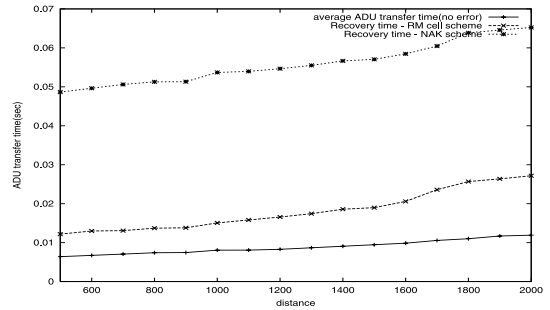


図6 伝送距離に関する特性

Fig. 6 Dependence of the ADU transmission delay on the transmission distance.

扱う。

4.2 通信距離に関する特性

次に、送受信者間の距離によって伝送遅延が変化した場合についてのシミュレーション結果を図5と同様な形でまとめたものを示す(図6)。ここでは、送受信ホスト間の距離が約500 kmから2000 kmまでの場合についてシミュレーションを行い、グラフの横軸としている。また、4.1節のシミュレーションではペケットロスは発生そのものをプログラムしていたが、これ以降では経路上のATMスイッチのバッファ不足によって資源確保が失敗したときにブロックロスが発生するモデルを使用している。通信はそれぞれSENDER_1,2,3とRECEIVER_1,2,3間で行い、これらの帯域予約の合計を過剰予約とすることでブロックロスが発生させている(その他のパラメータは表2と同じ)。

この結果を見ると、RMセルによるロス検出ではNAKによるものと比較して、通信距離が増大した場合でも影響が少ないことが分かるが、これは主としてそれぞれのスキームの仕組みにより1個のRMセルと $1R^3TP$ -PDUの大きさの違いから生じているとみられ、3.2節であげたRMセルスキームで期待される3つの特性のうち2つめがよく現れているといえる。

4.3 アプリケーションデータに関する特性

転送するデータ量を1から6 Mbpsまで変化させたシミュレーション結果を示す(図7)。このシミュレーションでは、ADUの生成速度を30ADU/secと固定して平均ADUサイズを変化させることで全体のデータレートを変化させている。図7を見ると、RMセルスキームではデータレートの増大によって回復に要する時間も増えているものごとくわずかな増加であり、最もデータレートの大きい6 Mbpsの場合でも33ミリ秒以内、つまり次のADUが生成されるまでに再送が完了していて受信側アプリケーションへ渡すことができている。NAKスキームでも全体的な傾向は同様

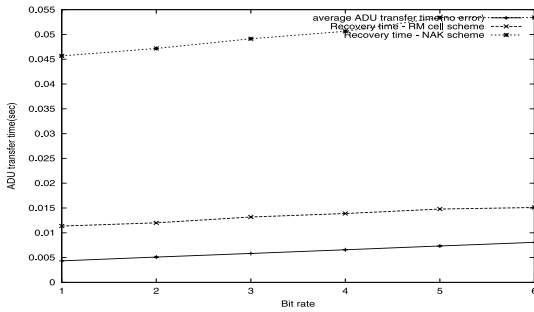


図7 データレートに関する特性 (ADU 生成速度は 30ADU/sec で固定)

Fig. 7 Dependence of the transmission delay on the ADU size.

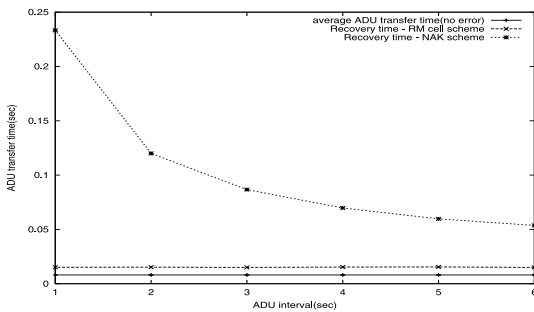


図8 データレートに関する特性 (平均 ADU サイズも変化)
Fig. 8 Dependence of the transmission delay on the ADU rate.

表3 図8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).

データレート (Mbps)	1	2	3	4	5	6
ADU 生成間隔 (sec)	0.2	0.1	0.67	0.05	0.04	0.03

であるが絶対的な回復時間が大きなものとなっている。

次に、平均ADUサイズを固定してADUの生成速度を変化させることでデータレートを変化させたシミュレーション結果を示す(図8)。このグラフではNAKスキームが図7とは反対にデータレートが大きくなるほど回復時間が短くなることを示している。これはデータレートの増大によるものではなく、実際にはADUの生成間隔が小さくなったために検出精度が向上したものである(表3)。それに対して、RMセルスキームはビットレートに対してほぼ影響を受けずに安定して高速なロス回復を実現しているといえる。

最後にデータレートを固定(6Mbps)してADUの生成速度を変化させたシミュレーション結果を示す(図9,表4)。このグラフにはNAKスキームで

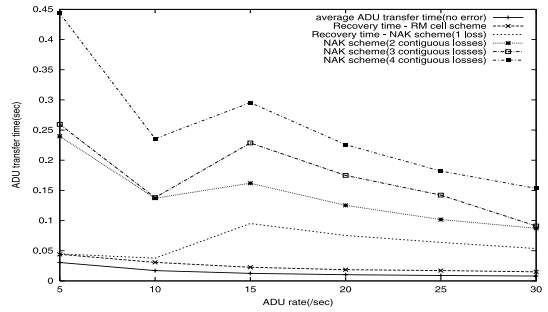


図9 ADU生成速度に関する特性 (データレートは6Mbpsで固定)

Fig. 9 Dependence of the transmission delay on the ADU rate.

表4 図9のADU生成速度と平均ADUサイズの関係
Table 4 Relation between ADU rate and average ADU size (Fig. 9).

ADU 生成速度 (/sec)	5	10	15	20	25	30
平均ADUサイズ (KB)	150	75	50	37.5	30	25

ケットロスが1から4個まで連続発生した場合の回復時間も示している(RMセルスキームではパケットロスの連続発生に対して変化がごくわずかであるため省略した)。このグラフではNAKスキームはADUの生成速度が10ADU/secのときに回復時間が減少した後15ADU/secで増加し、それ以降は再び減少するという傾向を示して、パケットロスの連続発生数が多いほどこの傾向を強く示している。これは、データレートを固定した状態ではADUの生成速度の増加に対して個々のADUサイズが減少するためである。10ADU/secから15ADU/secの間に R^3TP -PDUのフラグメンテーションが発生する境界が存在する。このフラグメンテーションにより R^3TP -PDUの送信間隔が短くなり、その場合には図8が示すようにNAKスキームでも回復時間が向上する。パケットの連続発生数が増加した場合にはこのことに加え、今度は反対に図5が示すようにパケットロスが連続して発生するほど回復に時間がかかるために、より強調されてこのような傾向を示している。NAKスキームがそのような傾向を示しているのに対し、RMセルスキームはADU生成速度に対してもほぼ変わらない回復時間を示している。絶対的な回復時間を見ても、NAKスキームが一時的に回復時間が短くなる場合でもRMセルスキームの回復時間の方が短い。

図7, 8, 9の3つすべての結果から見て、NAKスキームがアプリケーションデータの性質によってその

表5 それぞれのロス検出スキームの比較
Table 5 Comparison each loss detection scheme.

	ACK	NAK	RM cell
検出速度と精度	x		
構造の複雑さ	x		
汎用性			

回復時間に大きく影響を受けるのに対して、RM セルスキームはつねに安定して高速な回復を実現しているといえ、3.2 節であげた RM セルスキームに期待される特性をよく示しているといえる。

5. 考察とむすび

RM セルスキームと比較で使用した ACK, NAK 両スキームに関して、その構造と前章のシミュレーション結果から、ロスの検出速度および精度、構造の複雑さ、汎用性の3つの点について比較を行った(表5)。

まずロス検出の精度と速度という点から見た場合、ACK スキームは4.1 節でも述べたようにリアルタイム通信に適したタイムアウトの決定が難しいという問題点がある。非リアルタイム通信で TCP を使用するような信頼性のみを求める場合と違い、リアルタイム通信ではパケットロスをどれだけ早く正確に検出できるかが通信のリアルタイム性の維持という問題に重要な影響を与える。そのような場合 ACK スキームを使用するには個々の環境に向けたパラメータの調整を行うか、高度に適応的なアルゴリズムが必要とされるため、汎用性を欠いたり複雑さを増したりしてしまうことになりやすい。NAK スキームでは、個別に発生するロスは比較的高速に検出することができる。パケットロスを誤認識する可能性もきわめて低い。しかしながら、パケットロスが連続して発生する場合にはその後はじめて受信されるデータを待たなければロスを確認できないという欠点を持つ。パケットロスの連続発生に対処するために1パケットの大きさを制限したり受信側でタイムアウトを設定したりするなどの拡張を行うこともできるが、これは構造の単純さを失うことになりやすい。

それに対して RM セルスキームは非常に精度が高く高速なパケットロス検出を提供すると同時に、トランスポートレイヤプロトコル(R^3TP)自身の構造を比較的単純なままで実現することができる。これは対話性が要求されるアプリケーションには非常に有益であると考えられる。ネットワーク内部で生じる遅延に関していえば、TCP に代表される ACK スキームを使用するプロトコルでは、RTT に加えて比較的大きなタイムアウト値(0.x ないし 1 秒を超える値)がと

られることが多い。これは誤検出とそれによる余分な再送を避けるためには必要なものであるが、ADU 発生間隔(30ADU/sec なら 33 ms)と比較して非常に大きなものであり、パケットロスの検出に時間を要することになる。NAK スキームを使用するプロトコルの場合でも、最低でも $RTT+2ADU$ 分の時間が必要とされ、さらにパケットロスが n 個連続した場合には検出には $RTT+(n+1)ADU$ 分の時間を要することになる。それに対して RM セルスキームでは各 ADU ごとの最初に到着する RM セルでパケットロスの検出ができるため、ほぼ RTT 分の時間のみでパケットロスを検出することができる。また、パケットロスが連続して発生した場合でもこの検出時間は変わらない。そのため利用可能な帯域幅を超えるほどの再送が発生しない限りは非常に高速なパケットロス回復を維持し続けることができるうえに、受信側 R^3TP ではロス検出に直接関係する機能を必要としないため、アルゴリズムおよび機構を単純化することが可能である。

ただし、汎用性という点においては RM セルスキームは他の方式に一步譲ることになる。これは、今のところ ABT をサポートする ATM NIC およびスイッチが少ないためであり、そのような環境で動作させるためには問題となる可能性があるが、この点については物理ネットワークではなく R^3TP 自身などで ABT 機能を疑似的に実現することも検討している。

上述の考察をふまえたうえで、RM セルの情報を利用したロス検出を使用することで、再送による誤り制御を送受信者間の距離や転送するデータ量による制約を比較的受けずにリアルタイム通信に適用可能であることを確認することができた。これは特にユーザ間の対話性が重視されるアプリケーションでは非常に有効な特性であると考えられ、大容量が必要とされる高品質な音声や映像を使用する TV 会議などの実現が期待できる。

今後は様々な負荷状況における検証を行うとともに、マルチキャスト R^3TP におけるロス検出としても使用できるよう改良を進めていく。

参考文献

- 1) 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).
- 2) 山口雅信, 伊東克能, 高崎喜孝: ABT と再送を使用した高品質リアルタイムデータ転送プロトコル, 情報処理学会第 59 回全国大会講演論文集分

- 冊 3 (1V-07), pp.525-526 (1999).
- 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), No.437, pp.37-42, 電子情報通信学会 (1999).
 - 4) 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/輻輳制御特性, 情報処理学会第 60 回全国大会講演論文集分冊 3 (3R-06), pp.333-334 (2000).
 - 5) 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).
 - 6) Swinehart, D.: The Connection Architecture for the Etherphone System, Xerox PARC Technical Report, pp.CSL 91-8 (1991).
 - 7) ITU-T recommendation: *G114 One-way transmission time*.
 - 8) 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).
 - 9) ITU-T recommendation: *I371 Traffic control and congestion control in B-ISDN: Conformance definitions for ABT and ABR*.
 - 10) ITU-T recommendation: *I371.1 Traffic control and congestion control in B-ISDN: Conformance definitions for ABT and ABR*.
 - 11) Boyer, P.E. and Tranchier, D.P.: A reservation principle with applications the ATM traffic control, *Computer Networks and ISDN systems*, Vol.24, pp.321-334 (1992).
 - 12) Ata, S., Takine, T., Murata, M. and Miyahara, H.: Performance Comparisons of ABT/IT and DT in ATM networks, *Proc. IEEE GLOBECOM'97* (1997).
 - 13) 阿多信吾, 村田正幸, 宮原秀夫: トランスポート層を考慮した ABT の性能評価, 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J82-B, No.5, pp.951-959 (1999).
 - 14) Xie, G.G. and Lam, S.S.: Real-Time Block Transfer Under a Link-Sharing Hierarchy, *IEEE/ACM Trans.Networking February*, Vol.6, No.1, pp.30-41 (1998).
 - 15) 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).

- 16) IETF: RFC2379: RSVP over ATM Implementation Guidelines (1998).
- 17) IETF: RFC2380: RSVP over ATM Implementation Requirement RSVP over ATM (1998).
- 18) IETF: RFC2205: Resource Reservation Protocol (RSVP) Version1 Functional Specification (1997).

(平成 13 年 5 月 30 日受付)

(平成 13 年 12 月 18 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 年同大学大学院前期博士課程修了. 同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.