

# 高信頼マルチキャスト

## 2

高信頼マルチキャスト (Reliable Multicast) は、IPマルチキャストの環境でTCPに匹敵する転送信頼性を確保するための技術である。IPマルチキャストは大きなデータを多数の受信者に配布する際に有効であるが、パケットの損失が発生したとき、部分欠落が許されないか望ましくないデータ、たとえば一般文書データや圧縮されたマルチメディアデータの配布には問題がある。高信頼マルチキャストはこのようなデータの大量配布を可能にする。

マルチキャストでは、TCPのAckによる再送機能を用いた転送信頼性の確保は、受信者が増えると応答あふれを生じる問題がある。したがって、応答をNackにして数を減らす、経路上でAckを併合して数を減らす、近隣受信者でグループを形成しその中でなるべく欠落を補填し送信者まで届く応答数を減らす、などの工夫が提案されている。また、送信側で誤り訂正符号による冗長データを同時に送出することによって、欠落を受信側で補填するFEC (Forward Error Correction) 法も考えられており、これは応答を必要としない、これらすでに提案されているいろいろな手法を簡単に紹介する。

また多数の提案がある背景には、マルチキャストではTCPのように唯一の方法ですべての場合の転送信頼性を確保することが難しい実態があり、IETFにおけるビルディングブロックによる標準化の方向を紹介する。

山内 長承

東邦大学 理学部情報科学科  
yamanouc@HyperResearch.com

### ○高信頼マルチキャストの背景○

高信頼マルチキャスト (Reliable Multicast) は、「高信頼」と訳したが特別な信頼性を要求するものではない。従来TCP/IPネットワークのマルチキャストでは、1対1通信でTCPによって提供されてきた転送の信頼性、すなわちデータの欠落や重複なく送出順に整順して受信者に渡すことができていなかった。マルチキャストにおいてもこのような転送信頼性を提供するものが、高信頼マルチキャストである。

#### 転送信頼性の必要性

IPマルチキャストは、同一の情報を多数の受信者に配布するという目的には、回線の使用効率という観点から優れた転送方法である。あるリンクの下流にいくつ受信者があってもそのリンク上では最大1コピーしかデータを転送せず、経路が分岐するときに初めてコピーを作成する。その観点から、従来はデータやプログラ

ムのコピーを多数の個所に作る、音声や動画を多数の受信者に放送する、多地点の遠隔会議で音声や動画を配布する、などの用途に利用されてきた。しかしながら、IPマルチキャストには転送信頼性がなくデータが欠落するため、アプリケーション内で転送確認をしたり複数回送などの方法で補ってきたし、音声や動画などのマルチメディアデータについてはデータ欠落による再生瞬断を許す条件で利用していた。

1対1通信では転送の信頼性をTCP (Transmission Control Protocol) に頼っている。TCPでは、Ack応答によるパケット欠落の検出、再転送機構、受信時の重複削除と整列機能によって、送出側で送り出した通りのデータを受信者に渡すことができ、たいていのアプリケーションはTCPを介してデータ転送をすることによってパケットの欠落の存在を忘れることができる。ところが1対多の通信の場合はAck応答が難しい。受信者の数が増えると送信者に戻るAck応答の数が増え、送信側のシステムやその接続されるネットワークでAckが集中してあふれる

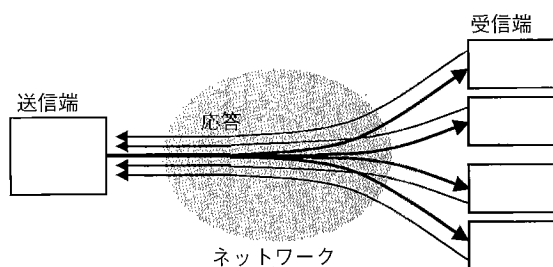


図-1 応答爆発

問題 (Ack Implosion, 応答爆発<sup>☆1</sup>) が発生する (図-1)。特にインターネットではスケラビリティ (規模の拡張性) を要求するので、応答爆発は避けねばならずTCPをそのまま利用するわけにはゆかない。

また、音声やビデオなどの転送では、データ内の冗長性が高いのでパケット欠落が発生しても音声・ビデオの瞬断が起こるだけでそのまま再生できるとされてきた。ところが、MPEGなどのようにマルチメディア圧縮とコーディングの技術・規格が普及した結果、最近のマルチメディアはデータの欠落に対して脆弱になっている。具体的には次の3つの要素を挙げることができる。まず、データの圧縮率を上げるためにたとえばMPEGではフレーム間の差分をコード化することによって、変化が少ない場合の情報量を減らしている。前の絵がデータ欠落により再生できないと、それを参照して作られる次の絵も再生できなくなる。

第2点として、データが音声や画像だけでなくデータの構造全体を記述するヘッダを含むようになっている。その部分が欠落すると、データの構造情報や再生に関する制御情報、たとえばフレームの大きさやレート、フレーム内の構造の記述などの情報が失われ、フレーム全体やビデオ全体が再生できなくなってしまう。

第3点として、可変長フィールドからなるコーディングの結果、データの同期がとりにくいという問題がある。固定長のデータであれば、データの欠落があっても位置を特定することによって次のフィールドの先頭を見つけることができるが、長さの記述と可変長フィールドの組合せの場合欠落後のフィールドがどこから始まるのかわからない。MPEGには同期をとるための符号が一定数のフレームごとに挿入されるが、それまでの間のフレームは再生することができない。

このような理由から、データの欠落による被害は想

像以上に大きく、再生が数秒にわたって停止したり、場合によってはヘッダ情報が失われたために次にヘッダ情報があるまでのかなりの時間にわたって再生できない、または再生器が停止してしまうことが起こる。この理由から、たとえ動画や音声などのマルチメディアデータであっても、データの欠落は望ましくなく、転送の信頼性確保は安定した再生に不可欠であるといえる。

## 応用分野の分類

ここで、高信頼マルチキャストの応用分野、すなわちIPマルチキャストに転送信頼性が加わった場合に何が可能になるか、概観しておこう。

### (1) 情報配布

マルチキャストは情報の多数地点への配布の効率がよい。1対1の転送では配布先の数と転送データの量に比例して総転送量が増えるので、大きな転送帯域が長い転送時間が必要になる。マルチキャストを用いることによって配布先の数に無関係に1回転送すればよいので転送帯域・転送時間が圧縮されるが、転送信頼性によって任意のデータのマルチキャスト配布が可能になる。

具体的には、多数の拠点に対して、その拠点で処理に用いるデータ、ソフトウェア、その拠点の従業員等に対する情報などを一斉配布する場合、効率向上が期待できる。現実にも用いられた例として、POSで用いるその日の価格データの全国店頭への配布、かなり大量になるCADデータ変更分の全国工場への即日配布、大きなアプリケーションソフトウェアのバージョンアップの即日配布、社内広報や従業員の訓練・教育のためのビデオデータファイルなどを本社から全国拠点内サーバへ一斉配布するなどの応用がある。ここに掲げた例は極端な即時性は要求されず、数時間から1日程度の遅延は許されるものが多い。

### (2) データベースの同期

上記(1)と同じような転送を行うが、たとえば応答時間の改善を狙って各地にキャッシュサーバを置いているとき、それらの間の内容の同期をとるためにマルチキャストを用いる。この中には業務データのデータベースのように即時に正しく変更されることが要求されるものから、Webキャッシュサーバのようにあまり即時性の要求されないものまで、いろいろなものがある。

### (3) 放送

インターネット、社内IPネットワーク上でラジオやTV放送、会議の中継や多地点会議などを行うもので、転送と再生が同時に行われるストリーム転送であることが上記(1)、(2)とは異なる。転送と再生を並行して行

<sup>☆1</sup> Implosionは爆縮と訳され、Explosionの反対であり、たとえばテレビの受像管を壊したときに内部の真空でガラスが内側に引き込まれる現象を表すのに使うが、日本語として耳慣れないのでここでは爆発、つまり送信端でみると応答が爆発的に多数到着するというイメージの爆発を充てておく。

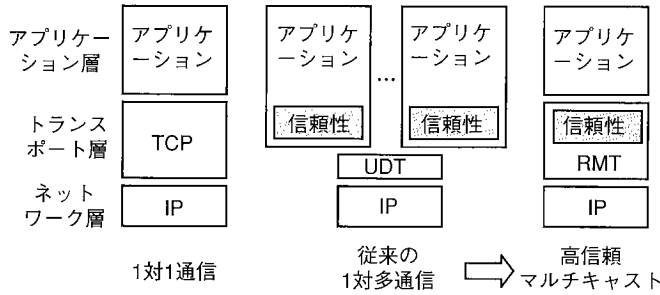


図-2 RMの位置づけ

うストリーム転送であるから転送の即時性、遅延変動の極小化が求められ、転送信頼性を実現する機構はその要求を満たさなければならない。規模の大小や放送が一般に開放されるか閉じたものであるかなどさまざまな形態がある。いずれも、転送信頼性によって音声やビデオの再生品質の向上を期待するものである。

**(4) 即時データ配布**

データの配布でありながら放送のように即時性の要求を持つもので、具体的にはディーリングルームシステムが挙げられる。株価や関連する情報を遅滞なくディーラー席のモニタに届けなければならない。

上記の例について利用形態や環境を見ると、次のような点を指摘することができる。

- 1) 要求される転送信頼性は必ずしも同じでない。たとえばデータベースの同期では1回の転送で失敗してもいずれ同期がとれればよいという場合もあるが、データ転送の例では確実な転送が要求されるものが多い。特に確実な転送が要求される場合には、転送信頼性の機構が正しく動作したかどうかをアプリケーションに報告し、チェックを受ける仕組みが要求されることもある。
- 2) 即時性の要求はさまざまである。ストリーム配信やディーリングルーム端末への株価の配信のように秒以下の即時性を要求する場合もあれば、Webキャッシュの同期のように1日程度の遅延を許す場合もある。これによって転送信頼性確保の方法選択が影響を受ける。
- 3) 配布の規模もさまざまである。ディーリングルーム端末への株価配信は、端末数も配布データ量も小さい。データ配布やソフトウェア配布はデータ量が大きい可能性がある。放送は受信者数が非常に大きくなる可能性がある。

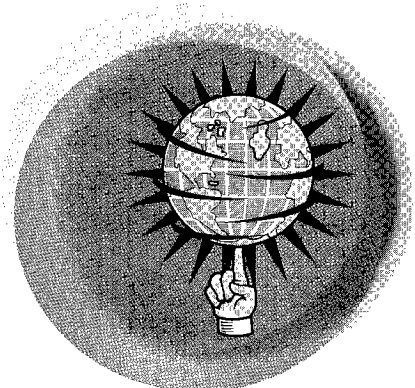
以上のように、高信頼マルチキャストに対する要求条件はアプリケーションによって多岐にわたり、各々に異なる要求が存在する (RFC2357, RFC2887 参照)。

さらに、高信頼マルチキャストを実際に利用する場合は回線環境についても考える必要がある。具体的には、最近手近なサービスとなってきた衛星、無線、CATVなどのリンク媒体は、多数の受信者に効率よくマルチキャスト転送することができる。これらを用いたマルチキャストでは、規模が数千から数万に及ぶ大きなものになること、回線上の雑音等によるパケット紛失の発生頻度が光ファイバなどに比較して大きいこと、衛星などでは下りの片方向回線で上り回線がなく、応答を返す場合には別途回線を用意しなければならないこと、などの特徴があり、損失データ回復方法の設計に影響を与える。

高信頼マルチキャストは、IPマルチキャストの登場 (RFC988として1986年刊行) 以来いろいろな形で試みられ、2回以上繰り返して送出する単純な方法やアプリケーションの中で受信確認を返送する方法からかなり複雑な方法までいろいろと提案されてきた<sup>☆2</sup>。

アプリケーションから転送の高信頼化機構を独立させて、1対1通信におけるTCPと同じように、アプリケーション間で共有できるトランスポート層機能としたいという動きは、インターネットの技術標準を策定するIETFの中で何度となく提案・議論された。この当時のIETFでの議論のポイントは、受信者数に対するスケラビリティが中心で、比較的小規模な配布だが簡便で実用的なビジネス向け利用を対象とする人々と、スケラビリティを要求しそのための複雑な機構を提案する人々とが議論を重ねた (図-2)。

プロトコルの標準化にはまだ技術が未成熟であるとして1996年からIRTF (Internet Research Task Force) の研究グループで議論を重ねたが、その中で、上で見たように応用場面や要求が多様なため、提案されるどのトランス



<sup>☆2</sup>たとえば <http://www.roads.lut.ac.uk/DS-Archive/MTP.html>, <http://www.nard.net/~tmont/rm-links.html>

ポート機構でも単独ではその多様な要求を満たすことができないという合意ができた。そこで、アプリケーションの要求ごとに必要な要素技術を取り込むことのできるビルディングブロック方式をとることが受け入れられ、現在までにいくつかの既存の提案をビルディングブロック要素に書き直す作業が行われてきている (RFC3048, draft-ietf-rmt-bb-track-01.txt, draft-ietf-rmt-bb-fec-02.txt, draft-ietf-rmt-bb-lcc-00.txt, draft-ietf-rmt-bb-tree-config-02.txt)。

### ○提案されている技術の例○

#### 単純再送

再送による損失パケットの回復 (ARQ, Automatic Repeat Request) を、マルチキャストにも応用しようとするもので、結果にかかわらず一定回数再送を繰り返す方式や、TCPのように受信端からパケット欠落の通報を受けて再送する方式が提案されてきた。あらかじめ決められた一定回数を繰り返す方式は実現が簡単であり、小規模でネットワークの性能があらかじめ分かっている LAN などでも利用するのに都合がよく、たとえば工場での加工制御コンピュータへのデータ配布やディーリングルーム型のアプリケーションに利用するには十分な機能を備えている。

他方、受信端からの通報を必要とする方式では前節に触れたように応答の爆発 (Ack Implosion) が発生するので、この対策が必要となる。配布規模が小さい場合は、総応答量が小さいので問題にならないが、単純に応答 (Ack) を返す方式では数十端末が上限となる。そのため、総応答量を小さくする工夫、具体的には1つの応答のデータ量を圧縮して小さくする、未着に対する応答だけを返す (Nack (否定応答) 方式)、複数のパケットに関する未着情報だけをまとめて応答とする (Selective Nack (選択的否定応答) 方式)、応答が同時に到着しないように応答送出時刻を分散させる (バックオフタイムによる応答遅延) などの工夫が可能であり<sup>1)</sup>、それによって実用可能な数千端末規模の配布が実現できる。

再送の単純な拡張による方式は、ネットワークやルータに手を加える必要がなく送受信両端のアプリケーションによって実現できるので、実用になるアプリケーションがいくつも作られている。ほとんどのものはUDPを介してIPマルチキャストを利用するアプリケーションプログラムの一部であり、マルチキャスト向けトランスポート層として分離されていない。

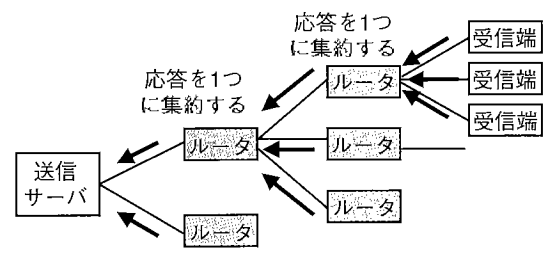


図-3 応答集約

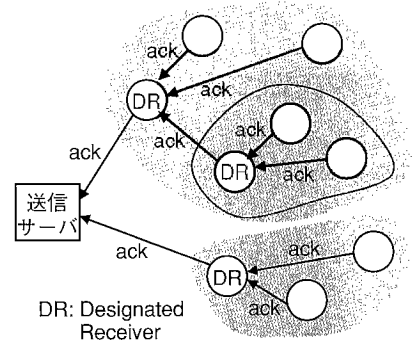


図-4 RMT (Reliable Multicast Transport Protocol)

#### 応答の集約

応答は、データ転送時の経路を逆にたどって受信端から送信端へ送り返される<sup>3)</sup>。つまり、データのマルチキャスト転送時に分岐したルータで、応答を逆に集約 (Ack Migration または Merge) することにより、送信端に届く応答の個数を減らすことができる。当初Cisco社とTibco社が提案したPGM (Pragmatic General Multicast, 当初はPretty Good Multicastと称した)<sup>2)</sup>はこの仕組みを使ったプロトコルの例である (図-3)。

応答の集約はルータで行うか、集約用の中継サーバをマルチキャスト転送経路にそって分岐点に置くかの方法で行う。PGMの場合ルータメーカーであるCisco社がルータでの集約機能を提供している。応答はトランスポート層またはアプリケーション層の機能に属するので、ルータがIP層の制御だけを行うというネットワークの階層モデルから見ると、層の境界の違反 (layer violation) になるという反論がある。

またPGMの場合はNackを受けたルータがNackを集約すると同時に、下流に対してNackを受信した旨の確認応答を流すことによって、Nack転送の信頼性を確保し、さらにNack確認応答を先に見た受信端はNack送出を抑制 (Nack suppression) することによってネットワークの負荷を軽減する機能を持っている。

<sup>3)</sup> かならずしも同じ経路というわけではなく、別の経路を通ることも許される。しかし、一般には同じ経路を逆に進むことが多いだろう。

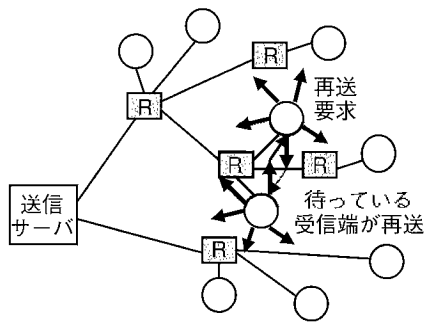


図-5 SRM (Scalable Reliable Multicast)

### 受信者間で欠落を補完する

Purdue大学/AT&Tベル研究所から提案されたRMTP (Reliable Multicast Transport Protocol)<sup>3)</sup> (図-4)は、近隣の受信者をグループ (local region) 化し、そのグループごとに代表の受信者 (Designated Receiver, DR) を立て、代表受信者がグループ内の受信者からのAck応答を受け必要な再送を行う仕組みを定義している。グループ代表者自身がデータを受け取れなかった場合は、さらに上位のグループの代表者に、最上位のグループの代表者は送信端に再送を要求する。グループの管理や代表受信者選定の問題が残るが、送信端へ多数の応答が集中する応答爆発は発生しない。

SRM (Scalable Reliable Multicast)<sup>4)</sup> (図-5)はRMTPのように近隣受信者のグループを明確に作るのではなく、データ欠落の発生した受信者は全受信者に対して再送要求を出す。その要求が伝播する中で、すでに当該のデータを受け取っている受信者はデータを再送する。原理的には距離の近い受信者間でなるべくデータを補い合うことが期待されるので、実際はゆるい受信者グループができると考えられる。ただし、RMTPのように代表者が固定的に立つことはない。

複数の受信者が同じデータを紛失して再送要求を出したい場合や、複数の受信者が同じ再送要求を受けて答える場合、再送要求や再送データが無駄に送られないように、距離から伝播状況を予想して一定の時間を待ってから送出する機構とし、それでも発生する無駄について推定している。RMTPのようにグループの管理

をする必要がないが、他方重複した再送要求や再送の発生する確率がある程度存在する。推定伝播時間に応じて応答送出を待つので、長く設定すれば無駄な再送要求や再送の発生が少なくなると考えられるが転送時間が長くなる。待ち時間の設定を適応的に変更することが考慮されているが、かなり複雑になると考えられる。

### 前方誤り訂正 (FEC) を用いて欠落パケットを回復する

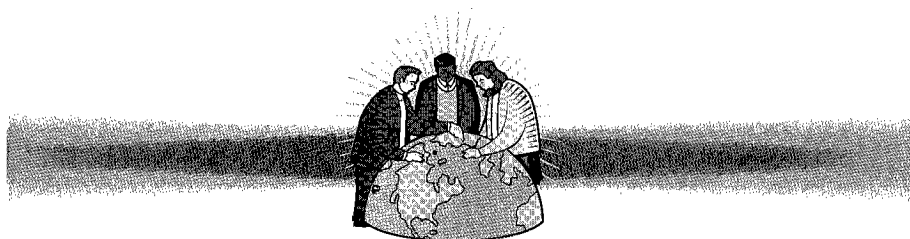
前方誤り訂正 (以下FECと略す)は、誤り訂正符号を用いてデータの欠落を回復する手法であるが、これを欠落パケットの回復に用いることができる。送出端でもとの送信データに対して冗長符号を計算し、別パケットとして送出する。受信端では一部のパケットが欠落しても受信できたパケットと送信時に付加した冗長符号からもとの送信データを回復できる (図-6)。

損失データ回復に用いる誤り訂正符号はいろいろと提案されており、回線のビット誤りや磁気記録媒体のビット誤りの訂正によく用いられるReed-Solomon符号を用いる例が多いが、より回復計算負荷の軽い他の符号を用いる提案<sup>5)</sup>もある。

FECによるパケット回復では、冗長度によって回復できる欠落パケット数の上限が決まるが、冗長度を送信時に決めてしまうので、パケット損失率が変動して回復限界を超えると回復できなくなる。つまり、損失率の変動がある場合完全な回復は期待できない可能性がある。パケット損失が雑音等により発生しその上限が予想される場合はほとんど完全な回復を期待できるが、現状の有線インターネットのようにほとんどのパケット損失がネットワークの輻輳によって発生する場合、かつ帯域制御などを行わずベストエフォートでの転送をしている場合では、パケット損失の上限を予想することは難しい。損失率にある程度の余裕を見込んだとしても、条件が悪いと損失パケットを回復できないケースが起こり得るという問題がある<sup>6)</sup>。

### 再送と前方誤り訂正 (FEC) との組合せ

上記で挙げたような方法は組み合わせることができるが、特に再送とFECを組み合わせると効果が大きい。



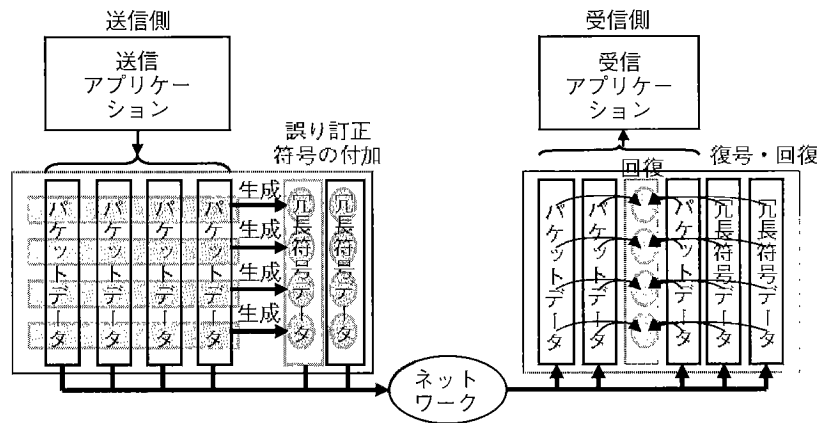


図6 前方誤り訂正によるパケット回復

まずFECを用いることによって回復可能限界までのパケット損失を回復することにより、ほとんど損失は残らなくなるが、一部に回復限界を超えた損失が発生した場合その部分を再送によって回復する。これによって、損失を通知する応答の個数が減り応答爆発が軽減される一方、FECが損失変動に追従できない欠点を再送によって補うことによって、変動があっても完全に損失パケットを回復することができる。上り回線が利用できない、再送による遅延が許されない、などの場合を除けば、FECと再送が相互補完的に作用し十分な転送信頼性を実現できるので、効果の大きい組み合わせであるといえるだろう。

### ○将来の展望○

同一データの大量配布は将来とも必要であることは間違いなく、転送の効率がよいマルチキャストないし放送型の転送も欠かすことができない。そこでの転送信頼性の要求もまた必ず必要となる。IPマルチキャストの広域インターネットにおける経路制御等の技術が安定しつつある現在、そのマルチキャストをさまざまな場面で実用するためには、転送信頼性の技術がぜひ確立している必要がある。

高信頼マルチキャストの普及のためには、アプリケーションから高信頼化機構を独立させて、アプリケーション共通のトランスポート層機能とし、さらにその機能とプロトコルを標準化することが必要である。IETF rmtワーキンググループでの標準化はまさにそれを目指したものであるが、アプリケーション間で共有できる単一のトランスポート機構を作ることは難しいためビルディングブロック方式を用いることは前に触れた。過去に提案された技術を書き直す形で、いくつかの要

素ブロックが提案されている

現在残された問題には次のようなものが挙げられる。

- 既存の要素技術では必ずしもアプリケーションの要求に十分答えていないと考えられる。さらなる個別の要素技術の開発とそれらのビルディングブロックとしての標準化が必要である。
- 要素の組合せ技術がほとんど考えられていないので、技術的に組合せの可能性と有効性を確認することとその標準への反映が必要である。
- 要素を選択して使う場合、選択の基準が明らかでないため、それを明らかにすることが必要である。

これらの技術・知見・経験・標準が整わないと、ユーザやプログラマがTCPのように高信頼マルチキャストを手軽に利用することができない。最近IPマルチキャストがグローバルなインターネット環境で徐々に利用可能になってきており、それに合わせて高信頼マルチキャストへの要求が高まるものと考えられ、我々技術者は技術・知見・経験を更に積み重ね、標準化する努力を要求されている。

#### 参考文献

- 1) 山内長承, 城下輝治, 佐野哲史, 高橋 修: 高信頼同報バルク転送機構, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.6, pp.2009-2019 (June 1998).
- 2) Speakman, T. et al.: PGM Reliable Transport Protocol Specification, IETF Draft <draft-speakman-pgm-spec-06.txt>, Internet Society (Feb. 2001).
- 3) Lin, J. C. and Paul, S.: RMT: A Reliable Multicast Transport Protocol, Proc. IEEE INFOCOM '96, pp.1414-1424 (Mar. 1996).
- 4) Floyd, S., Jacobson, V., Liu, C-G., McCanne, S. and Zhang, L.: A Reliable Multicast Framework for Light-weight Sessions and Application Level Framing, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.5, No.6, pp.784-803 (Dec. 1997).
- 5) Luby, M., Vicisano, L., Rizzo, L., Gemmel, J., Crowcroft, J. and Lueckenhoff, B.: RMT BB Forward Error Correction Codes, Internet Draft <draft-ietf-rmt-bb-fec-02.txt>, Internet Society (Nov. 2000).
- 6) 山内長承: 前方誤り訂正による損失パケット回復のインターネットマルチメディア転送への応用, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ2000論文集, pp.145-150 (Dec. 2000).

(平成13年6月13日受付)