

# PIMのIPv6対応

## 3

IPv6では、マルチキャストは基本仕様の一部に設計当初から含まれており、拡張機能としての位置づけであったIPv4のマルチキャストに比べて、より広範な普及が期待される。IPv6のマルチキャスト経路制御プロトコルとして、現状での唯一の選択肢がPIMである。PIMのケットフォーマットは複数のアドレス体系に対応しており、基本仕様に大きな変更を加えずにIPv6にも適用できる。IPv6の参照実装を開発しているKAMEプロジェクトでは、PIMを含め、IPv6マルチキャストの機能も実装し、運用している。その過程で、ランテーパーポイントへの転送によるスコープゾーン境界の逸脱、上流ルータの誤認といった、プロトコル仕様上の問題点を検証し、対処してきた。本稿では、PIMのIPv6対応を中心に、IPv6におけるマルチキャストの仕様を解説し、KAMEプロジェクトによる実装の特徴を紹介する。

神明 達哉

(株) 東芝 研究開発センター  
jinmei@isl.rdc.toshiba.co.jp

次世代インターネットの標準プロトコルとしてIPv6が注目を集めている。IPv6の設計にあたっては、現行IP (IPv4) の運用上の経験から、重要であるにもかかわらずIPv4においては拡張機能にとどまっていた機能を必須の基本仕様として取り込むという整理がなされた。そのような機能の中に、IPマルチキャストが含まれている。

IPv4においては、マルチキャストは一種の拡張仕様であり、必ずしもその存在を仮定できない。このため、たとえばマルチキャスト経路制御プロトコルの設計時には、マルチキャスト非対応ルータが混在しているネットワークをどのように扱うか、といった後方互換性の問題が生じる。一方、IPv6においては、マルチキャストは基本仕様の一部として含まれており、すべてのIPv6ノードがマルチキャストに対応していると仮定できる。また、実際に、近隣探索プロトコルのような基本仕様の中で、マルチキャストは積極的に利用されている。

本稿では、経路制御プロトコルPIM (Protocol Independent Multicast<sup>3)</sup>) のIPv6対応を中心に、IPv6におけるマルチキャストの仕様を解説する。まず、IPv6のマルチキャストアドレス体系とその特徴を述べる。次に、IPv6のマルチキャスト経路制御で利用されるプロトコルの概要を説明し、特にPIMをIPv6に対応させる際の従来との相違点を詳しく述べる。また、KAMEプロジェクトにおけるPIMの実装を紹介する。その際、現状のPIMの仕様における

問題点と、それらに対してKAMEプロジェクトの実装で施した解決法についても説明する。なお、本稿では、IPマルチキャストと、マルチキャスト経路制御プロトコル、特にPIMの仕様に関する知識を仮定する。

### ○IPv6マルチキャストのアドレス体系○

IPv6のアドレス体系<sup>1)</sup>には、マルチキャスト用の空間が予約されており、先頭の8ビットがすべて1であるアドレスがIPv6マルチキャストアドレスとして識別される。テキスト表現としては、ffからはじまるアドレスがマルチキャストアドレスであるということになる。

図-1に、IPv6マルチキャストアドレスの構造を示す。

この中で、4ビットの“スコープ”フィールドはそのアドレスが識別するグループの有効範囲を定めており、IPv6の特徴の1つである。IPv4にマルチキャストの概念が導入された当初は、あるマルチキャストアドレスが識別するグループの範囲を明示的に制限する枠組みが存

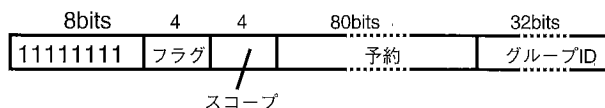


図-1 IPv6マルチキャストアドレスの構造

在しなかった。このため、初期段階では、IPヘッダの生存期間 (TTL) フィールドの値でグループの範囲を制限していた。しかし、この方法では実際のネットワークポロジを必ずしも正確には反映できない。その経験を踏まえ、IPv6ではアドレスの中で直接マルチキャストの範囲を制限する枠組みを導入している。現在、4ビットの空間のうち、リンクローカル (2)、サイトローカル (5) など、7つのスコープ値が定義または予約されている。

周知のIPv6マルチキャストアドレスがすでにいくつか定義されている。以下で、その中でも重要なアドレスについて説明する。

全ノードアドレス：与えられた範囲内のすべてのノードが属するグループを識別するアドレス。インタフェースローカルのff01::1とリンクローカルのff02::1という2つが定義されている。

全ルータアドレス：与えられた範囲内のすべてのルータが属するグループを識別するアドレス。インタフェースローカル (ff01::2)、リンクローカル (ff02::2)、サイトローカル (ff05::2) の3つのスコープについて定義されている。

## ○IPv6のマルチキャスト経路制御○

IPv6におけるマルチキャストの経路制御は、基本的にIPv4と同等のモデルに基づく。すなわち、各受信者と同一リンク内のルータとの間で、リンク内の受信者の有無を把握するためのプロトコルと、ルータ間で配送に必要な情報を交換・制御するための経路制御プロトコルの2つに分類できる。

ホストとルータの間で利用されるプロトコルが、マルチキャスト受信者探索 (MLD: Multicast Listener Discovery) プロトコル<sup>2)</sup>である。MLDの仕様は、IPv4における同等のプロトコルであるInternet Group Management Protocolのバージョン2 (IGMPv2) が基本になっており、その動作はIGMPv2を踏襲している。

ルータ間のプロトコルとしては、現状ではPIMが唯一の選択肢である。PIMのメッセージフォーマットは当初よりIPv6を含めた複数ネットワークプロトコルへの対応を考えて設計されており、IPv6への対応にあたって大きな修正は必要ない。PIMのIPv6対応については後の節で詳述する。

PIMを用いる場合には、RPF (Reverse Path Forwarding) のための経路情報として、ユニキャストパケット転送のための経路をそのまま利用することが多い。ただし、特にマルチキャストを広域に展開する場合に、ユニキャストパケットの転送用途とは独立した経路制御プロ

トコルをRPFのために用いることがある。この目的で利用されるのがMBGP (Multiprotocol Extensions for BGP-4) である。MBGPのパケットフォーマットもIPv6に対応しているので、IPv6対応PIMのRPF用経路制御プロトコルとしてMBGPも利用できる。

前述の通り、IPv4においてはマルチキャストは拡張機能という位置づけであったため、経路制御プロトコルを設計する際には、マルチキャストに対応しないルータとの混在環境を考慮しなければならない場面もある。そのような場合、IPv4のマルチキャスト経路制御では、マルチキャストパケットをユニキャストパケットにカプセル化するトンネリングを用いて、マルチキャスト非対応ルータを超えた転送を実現する。

トンネリングは、一般に新しい技術の普及期には便利な手法であるが、カプセル化による効率の低下、ネットワークポロジの複雑化といった弊害も併せ持っている。実際に、マルチキャストの普及がある程度進んだ段階で提案されたPIMでは、トンネリングは想定していない。IPv6においては、マルチキャストは基本仕様の一部として取り込まれており、IPv6対応ルータは原則的にマルチキャスト経路制御への対応も要求される。このため、IPv6のマルチキャスト経路制御を論じる際には、トンネリングは考慮しないことが普通である。

## ○PIMのIPv6対応○

PIMの最新仕様では、IPv6への対応に必要な事項が明記されている。PIMの仕様は、希薄モード (sparse mode, SM) および密集モード (dense mode, DM) の2つに分類される。ネットワーク規模の上での利点などから、現在の標準化の中心はSMであり、本稿でも原則としてSMを仮定して解説する。

### 利用アドレス体系

隣接PIMルータ間のメッセージは、ほとんどの場合にリンクローカルマルチキャストを用いる。この目的のために、全PIMルータアドレス“ff02::d”が定義されている。また、宛先が全PIMルータアドレスの場合には、送信元アドレスとしては出力インタフェース上のリンクローカルユニキャストアドレスを用いる。Helloメッセージはその一例であり、その送信元アドレスを用いてリンク内の指定ルータ (designated router, DR) が選出される。

また、受信者の加入・脱退に応じて配送情報をやり取りするためのJoin/Pruneメッセージに含まれる上流ルータフィールドには、RPFの経路表から得られたリンクローカルアドレスを指定する。ただし、特定の環境下では適切なリンクローカルアドレスを決定できない場

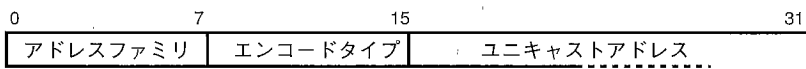


図-2 PIMのユニキャストアドレスのエンコードフォーマット

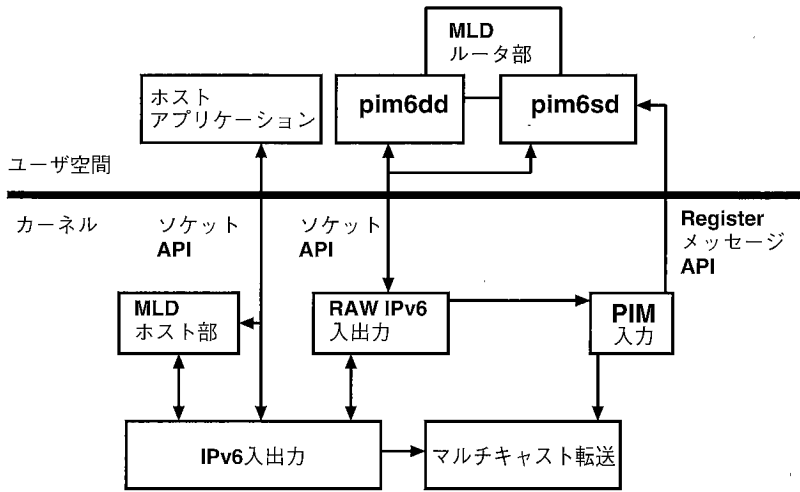


図-3 KAMEプロジェクトによるIPv6マルチキャストの実装

を用いる。IPv6アドレスの場合には、128ビットのアドレスを最上位ビットから順に32ビットずつ4つに区切り、それぞれの排他的論理和をとるという変換が推奨されている。

### チェックサム計算

PIMのメッセージにはチェックサムフィールドがあり、これによってデータ損壊を検出する。IPv4の場合には、PIMヘッダおよびPIMのデータ部分だけをチェックサム計算の対象とする。一方、IPv6では、TCPやUDPと同様に、疑似(pseudo)IPv6ヘッダを付加した上でチェックサムを計算する。

これは、IPv6にはIPヘッダ内にチェックサムフィールドがないため、IPヘッダ自身の損壊を検出する機能がないことに由来する。PIMのプロトコルは、IPヘッダの内容(特に送

信元アドレス)にも依存しているので、IPヘッダの損壊はPIMのプロトコル動作にも影響を与える可能性がある。そこで、疑似ヘッダを加えてチェックサムを計算することで、PIMのヘッダおよびデータに加えてIPヘッダが正常であることも検証する必要がある。

合がある。この問題については後の節で詳述する。

### アドレスのエンコーディング

PIMのメッセージ内で用いられるアドレスは、IPv4やIPv6を含むマルチプロトコルに対応できるように、アドレスファミリーの識別子を含む構造となっている。たとえば、ユニキャストアドレスのエンコーディングは図-2のフォーマットに従う。

ここで、“アドレスファミリー”がアドレスの識別子である。このフィールドの値はIANA(Internet Assigned Numbers Authority)が割り当てる値に基づいており、IPv6の識別子としては2を用いる。

### RP選出時のハッシュ値計算

PIM-SMでは、送信者からのマルチキャストパケットを受け取った指定ルータが、そのパケットをユニキャストにカプセル化し、ランデブーポイント(Rendezvous Point, RP)と呼ばれる特殊なルータに向けて転送する。各マルチキャストアドレスに対して、転送に利用されるRPはただ1つであるが、冗長性を確保するために、RPの候補は複数存在し得る。複数の候補から実際に利用するRPを決定するために、PIMの仕様ではマルチキャストアドレスとRPのアドレスから決まるハッシュ値を利用する。

ハッシュの計算式では、マルチキャストアドレスおよびRPアドレスをそれぞれ32ビット整数に変換した値

## KAMEプロジェクトによる IPv6 マルチキャストの実装

KAMEプロジェクト<sup>5)</sup>は、WIDEプロジェクトの研究者を中心とした、IPv6の開発プロジェクトである。KAMEプロジェクトは、仕様に正確に準拠したIPv6の実装を自由に参照できる形で提供することで、IPv6の早期普及を目標として活動している。MLDやPIMを含むIPv6マルチキャストの機能も、仕様策定の初期段階からKAMEプロジェクトで実装し、その成果によって標準化にも寄与してきた。また、その実装を利用して、デジタルビデオ画像の広域配信による分散会議といった実用的なアプリケーションを、IPv6マルチキャストで実現し、運用している。

KAMEプロジェクトによるIPv6マルチキャストの実装の全体構造を図-3に示す。

MLDのホスト側プロトコルは、すべてカーネル内で実現されている。また、一般のマルチキャストアプリケーションは、標準のソケットAPIを利用してユーザー空間で実現される。

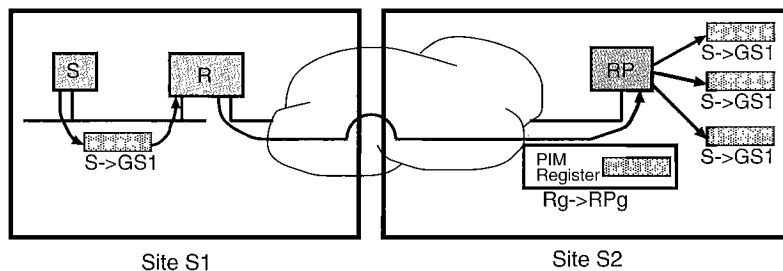


図-4 カプセル化によるゾーン境界の逸脱

IPv6 マルチキャスト転送は、BSD系OSのIPv4 マルチキャスト転送部をIPv6用書き換えて実現した。また、PIMのIPv6対応は、米国南カリフォルニア大で開発されたIPv4用のPIMの実装である“pimd”をIPv6用書き換えて実装した。

PIMのプロトコルのうち、大部分はユーザ空間のソフトウェアとして実装した。ユーザ空間ソフトウェアには、SM用のpim6sd、DM用のpim6ddの2つがあり、MLDのルータ側のプロトコル処理部は両者に共通している。MLDと、Registerメッセージ以外のPIMのメッセージ送受信には、raw IPv6ソケットのAPIを用いる。

PIM-SMの処理の中で、Registerメッセージにカプセル化されたパケットはカーネル内でカプセル化をほどこいて転送される。また、Registerメッセージ自体の処理のために、専用のAPIを用いてパケットの一部をユーザ空間へ渡している。これらの処理については、前述したpimdの実装方式を踏襲した。

## ○現状の仕様における問題点とその対応○

### カプセル化によるスコープゾーンの逸脱

前述の通り、IPv6のマルチキャストアドレスにはスコープの概念があり、あるマルチキャストアドレスはそのスコープゾーン内でのみ有効となる。ゾーン境界のルータは、転送しようとするパケットの送信元および宛先アドレス、入カインタフェースから適切なゾーンを求め、パケットがそのゾーン境界を超えて転送されないように制御する。

ところが、PIMのRegisterメッセージによって、カプセル化されたマルチキャストパケットが本来のゾーン境界を超えてしまう場合がある。図-4を用いて、その例を説明する。

図-4において、サイトS1内のサイトローカルマルチキャストアドレスGS1宛パケットを、送信者Sから受け取ったルータRが転送する場面を考える。ルータRは、そのパケットをユニキャストパケットにカプセル化し、GS1に対応するRPへ転送する。ここで、RPがグローバル

アドレスRPgで識別されており、さらに、RPがサイトS1とは異なるサイトS2に属しているとする。この場合、ユニキャストパケットの送信元アドレスRgとしてグローバルアドレスを用いれば、そのユニキャストパケットはサイト境界を超えて転送される。その結果、もとのマルチキャストパケットは本来属していたサイトとは異なるサイトS2内で配

送されてしまう。

このような、マルチキャストアドレスが本来属すべきゾーン境界を超えた転送を防ぐために、筆者はカプセル化を施すルータに対して以下の制約を課すことを提案している<sup>4)</sup>。

PIM Registerメッセージにカプセル化されるマルチキャストパケットの送信元および宛先アドレスのスコープは、Registerメッセージの送信元および宛先アドレスのスコープと等しいか大きくなければならない。

ルータRがこの制約に従う場合には、たとえばユニキャストパケットの送信元アドレスとしてサイトローカルアドレスを用いることで、この問題を回避できる。図-4の例では、ユニキャストパケットはサイト境界で破棄されるため、少なくともマルチキャストパケットが本来属するサイトと異なるサイトで配送されることはない。

ただし、現状では、この制限はKAMEプロジェクトによる実装には含まれていない。KAMEおよびWIDEプロジェクトにおける運用上は、PIMドメインを単一サイト内に限定し、また組織ローカルおよびグローバルマルチキャストアドレスを利用しないという制限を設けることでこの問題に対処している。

### RPF上流ルータの認識

PIMの仕様では、RPFの上流ルータはリンクローカルアドレスで識別すると定義されている。IPv6用に定義されているIGP (Interior Gateway Protocol) はすべてリンクローカルアドレスによって次ホップを識別するので、RPFによる上流ルータをユニキャストのIGPによって求める場合にはこの定義は妥当であるといえる。

しかし、一般には、RPFの上流ルータが常にリンクローカルアドレスで識別できるとは限らない。たとえば、広域の経路制御プロトコルであるBGPでは、次ホップとしてリンクローカルアドレス以外のアドレスが利用されることがある。これには、MBGPによってユニキャストの経路制御とは独立したRPFを実現する場合も含まれ

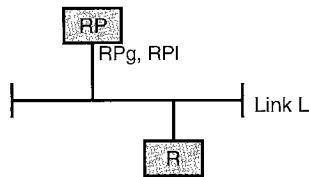


図-5 上流ルータのリンクローカルアドレスが決定できない例

る。また、手動でユニキャストの経路を設定する際に非リンクローカルアドレスを次ホップとして指定し、そのアドレスをRPFの上流ルータとして利用するという運用も考えられる。

さらに、通常のIGPを利用した経路制御環境下においても、上流ルータのリンクローカルアドレスを特定できない場合がある。その例を図-5に示す。図-5では、ルータRとランデブーポイントRPが同一リンクL上に存在し、サブネットを共有している。RPのリンクL上のインタフェースには、リンクローカルアドレスRPIとグローバルアドレスRPgが割り当てられている。RPは、PIMドメイン内の他のルータからはグローバルアドレスRPgによって認識される。これは、RegisterメッセージをRPに送信するために十分な広さのスコープに属するアドレスが必要なためである。このことは、RPと同一サブネット上に存在するRにとっても同様であるが、Rにおいては、RPgに対応するRPFの上流リンクローカルアドレスがRPIであることを通常のIGPでは検出できない。

KAMEプロジェクトによる実装では、Helloメッセージの拡張によってこの問題に対処している。各ルータは、Helloメッセージ送信の際に、送信インタフェース上のすべてのアドレスのリストをオプションとして追加する。このメッセージを交換することで、各ルータは、他のルータのグローバルアドレスとリンクローカルアドレスを対応させられる。

一方、RPFの上流ルータの識別子としてリンクローカルアドレスを用いるという制約を緩めることでもこの問題に対処できる。たとえば、図-5の例では、RにとってRPgが同一リンク上のアドレスであるという認識のもとに、上流アドレスとしてRPg自身を使えばよい。このような対処法の方が、既存のプロトコルおよび実装に対する影響は少ないと考えられるが、一方で、Helloメッセージによる近隣ルータ管理の情報とは連携できなくなる。たとえば、近隣ルータの瞬断を世代 (generation) IDを用いて検出した際に、ただちにJoin/Pruneメッセージを再送するという最適化は利用できない。

この問題に対する対処法は、現在IETFにおいて議論中である。その成果はPIMの仕様に対する修正という形で

反映される予定である。

## ○今後の展望○

IPv6マルチキャストは、ホスト側に関しては多くの実装で対応済みである。一方、ルータ側の実装、すなわちPIMのIPv6対応については、商用ルータでの搭載がまった段階であり、必ずしもすべての製品で利用できるとは限らない。ただし、PIMの仕様はほぼ固まりつつあり、IPv6への対応もその標準仕様の一部として取り込まれていることから、今後商用化も進むと考えられる。

IPv4のマルチキャストでは、放送型のアプリケーションを想定して、単一の送信者からの配送に限定することでプロトコルを簡潔にしたSSM (Source Specific Multicast) が主流になりつつある。この流れはIPv6におけるマルチキャストについても同様だと考えられる。

SSMに対応するためには、以下の拡張が必要になる。

- A) SSM用のマルチキャストアドレス空間の確保
- B) ホスト・ルータ間のプロトコルの拡張
- C) マルチキャスト経路制御プロトコルの拡張

A) については、マルチキャストアドレスの“フラグ”フィールド中の1ビットを、SSMアドレス用の識別子として利用するという提案がある。

B) については、現在、MLDの次期バージョンが提案されており、その中にSSMに対応するための機能が含まれている。

C) については、PIMの仕様の中にSSM用アドレスの場合の変更が含まれている。

このように、IPv6についても、SSMへの対応の準備は整っている。今後、上記の拡張提案の標準化と並行して、実装での対応も進むであろう。KAMEプロジェクトによる実装においても、MLDおよびPIMのSSM対応を進める予定である。

### 参考文献

- 1) Hinden, R. and Deering, S.: IP Version 6 Addressing Architecture, Internet Draft (2001).
- 2) Deering, S., Fenner, W. and Haberman, B.: Multicast Listener Discovery (MLD) for IPv6, RFC 2710 (1999).
- 3) Fenner, W., Handley M., Holbrook, H. and Kouvelas, I.: Protocol Independent Multicast-Sparse Mode (PIM-SM) : Protocol Specification (Revised) , Internet Draft (2001).
- 4) Jinmei, T.: Implementation and Deployment of IPv6 Multicasting, IINET 2000 (2000).
- 5) 神明達哉, 山本和彦, 萩野純一郎, 江崎 浩, 村井 純: KAMEプロジェクトによるIPv6基本ソフトウェアの開発, 情報処理, Vol.41, No.12, pp.1367-1372 (Dec. 2000).

(平成13年6月17日受付)

