

## IPv6 エニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM の設計および実装

松永 怜士<sup>†</sup> 阿多 信吾<sup>††</sup> 北村 浩<sup>†††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 大阪市立大学 大学院工学研究科 〒 558-8585 大阪府住吉区杉本 3-3-138

<sup>†††</sup> NEC コピキタス基盤開発本部 〒 108-8557 東京都港区芝浦 2-11-5

E-mail: <sup>†</sup>{s-matung,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>ata@info.eng.osaka-cu.ac.jp, <sup>†††</sup>kitamura@da.jp.nec.com

あらまし IPv6 の持つ新たな機能の一つとしてエニーキャストがある。エニーキャスト通信を実現するために規定されているエニーキャストアドレスは、特定の機能(サービス)に対して割り当てられるアドレスであり、クライアント側はエニーキャストアドレスを指定するだけで、対応する機能を提供する複数のサーバの中から最適なサーバと自動的に通信することができる。しかし、グローバルなエニーキャストサービスを提供するルーティングプロトコルは現状では標準化されておらず、現在のエニーキャストの利用は非常に限られている。そこで本稿では、ネットワーク上の任意の場所にサーバが存在する場合に必要となる、エニーキャストルーティングプロトコルの設計および実装を行う。特に、エニーキャスト通信とマルチキャスト通信との類似性に着目し、既存のマルチキャストルーティングプロトコルの一つである PIM-SM (Protocol Independent Multicast - Sparse Mode) を修正した、新たなエニーキャストルーティングプロトコル: PIA-SM (Protocol Independent Anycast - Sparse Mode) の実装を行う。さらに、PIA-SM を実装したノードを用いた実験により、エニーキャストアドレスを用いることで自動的に複数のサーバの中の 1 台へとパケットが転送されることを確認した。

キーワード IPv6 (Internet Protocol version 6), エニーキャスト, ルーティングプロトコル, PIA-SM (Protocol Independent Anycast - Sparse Mode)

### Design and Implementation of IPv6 Anycast Routing Protocol: PIA-SM

Satoshi MATSUNAGA<sup>†</sup>, Shingo ATA<sup>††</sup>, Hiroshi KITAMURA<sup>†††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Engineering, Osaka City University

3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan

<sup>†††</sup> Ubiquitous Platform Development Division, NEC Corporation

2-11-5 Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-8557, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{s-matung,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>ata@info.eng.osaka-cu.ac.jp, <sup>†††</sup>kitamura@da.jp.nec.com

**Abstract** Today, the use of anycast address is quite limited. One of the reasons is because there is no routing protocol providing a global anycasting service. In this paper we design and implement a new anycast routing protocol called PIA-SM (Protocol Independent Anycast - Sparse Mode). We focus on PIM-SM (Protocol Independent Multicast - Sparse Mode), which is one of multicast routing protocols available now, to develop an anycast routing protocol because anycast and multicast have many similar properties. We modified PIM-SM based on differences between multicast and anycast. We next describe technical issues to be solved on the implementation of PIA-SM. We also show some experimental results to demonstrate PIA-SM, and verify that PIA-SM enables routers to forward an anycast packet to an appropriate node of multiple candidate nodes.

**Key words** IPv6 (Internet Protocol version 6), Anycast, Routing Protocol, PIA-SM (Protocol Independent Anycast - Sparse Mode)

## 1. はじめに

IPv6における新たな機能の一つとしてエニーキャストアドレスがある。エニーキャストアドレスは同一の機能(サービス)を提供する複数のサーバに割り当てることが可能である。エニーキャストアドレスはネットワーク層の技術であるため、クライアントは既存のアプリケーションを変更することなく、既存のサービスに新しい機能が追加されたサービスを利用することができる。このような新しい機能としては、ネットワーク設定の自動化、サービス探索、サーバ停止に対する冗長性の確保などが挙げられる。例えば、既知のエニーキャストアドレスをインターネット上の全てのDNSサーバに割り当てて、現在はユーザが手動で設定しているDNSサーバのアドレスを、あらかじめOS上でDNSサーバのアドレスを設定できるようになる。さらに、すべてのノードが同じアドレスをDNSサーバとして用いても、実際にはノード別に最適なDNSサーバ、例えば最もホップ数の小さいDNSサーバと通信を行うことができる。また、今まで利用していたDNSサーバが停止したとしても、ルータが他のDNSサーバへの経路を探索し新たに利用可能なDNSサーバを発見するだけで、クライアントは最初に利用していたDNSサーバが停止したことを意識することなく、継続してDNSサービスを利用することが可能となる。エニーキャストアドレスはDNSに限らず、ネットワーク層より上位で動作するすべてのサービスにこのような機能を追加することができる。

このように、エニーキャストアドレスは非常に興味深い技術であるが、現状はほとんど利用されていない。この原因として、エニーキャスト通信に必要な多くの機能がまだ定義されていないことがあげられる。特に、エニーキャストアドレスを扱えるルーティングプロトコルが明確に規定されていないため、ネットワーク上の任意のノードにエニーキャストアドレスを割り当てて通信することができない(グローバルエニーキャストサービスが提供できない)、という問題点がある。

文献 [1] ではこの問題を解決するため、マルチキャスト通信とエニーキャスト通信との類似性をもとに、グループ管理方式やルーティングテーブル作成についてマルチキャストルーティングプロトコルを改変することでエニーキャストルーティングプロトコルが実現可能であることを示している。また、文献 [2] ではエニーキャストルーティングプロトコルの設計指針が記されている。しかしながら、これらの文献では実装段階について考慮すべき課題については議論されていない。そこで本稿では、[1]、[2] で提案されたエニーキャストルーティングプロトコルのうち PIA-SM (Protocol Independent Anycast - Sparse Mode) について、その動作の詳細設計ならびに実装を通じて、PIA-SM の実装時における技術課題について明らかにする。PIA-SM は PIM-SM (Protocol Independent Multicast - Sparse Mode) [3] をエニーキャスト通信用に改変したものである。PIM-SM は広域のネットワークにおいて利用されることを前提に設計されているマルチキャストルーティングプロトコルであり、PIM-SM をもとにエニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM を設計することで、広域ネットワークにおけるグローバルなエニーキャスト通信が実現可能になると考えられる。また、IPv6 において現在利用可能なマルチキャストルーティングプロトコルが PIM-SM のみであり、他のプロトコルを実現するためには IPv4 の実装を改変する必要があることから、PIA-SM は他のプロトコルと比較しても、容易に実現可能である。以上より、本稿では PIA-SM を対象とする。

本稿の構成は以下の通りである。2. では、PIM-SM (Protocol

表 1 エニーキャスト通信と他の通信の性質の比較

	通信対象	通信形態	アドレス空間
ユニキャスト	1	1 対 1	マルチキャストのアドレス以外
マルチキャスト	多数	1 対 多数	専用のアドレス
エニーキャスト	多数	1 対 1	ユニキャストと共用

Independent Multicast - Sparse Mode) を元にした PIA-SM の設計、および PIA-SM の動作概要を示す。次に 3. では、PIA-SM の実装時に明らかになった課題とそれに対する解決策について述べる。4. では実験により動作確認を通して PIA-SM の動作状況を示す。最後に 5. でまとめと今後の課題について述べる。

## 2. エニーキャストルーティングプロトコル PIA-SM

本章では PIM-SM をもとにした PIA-SM の設計と実装について述べる。エニーキャストではマルチキャストと異なり、あるエニーキャストアドレス宛に送信されたパケット(エニーキャストパケット)は、同一のエニーキャストアドレスを割り当てられてた複数のノード(エニーキャストレシーバ)の中の最適な 1 台のみに配送される。

表 1 に、IPv6 で定義されている、ユニキャスト、マルチキャスト、エニーキャストのそれぞれの通信方式を比較したものを示す。マルチキャストとエニーキャストは、ともに受信可能なノードが複数存在する。したがって、エニーキャストルーティングを考える場合には、複数ノードを管理する方法としてマルチキャストルーティングの方法が利用できる。しかし、実際に受信するノードに着目すると、マルチキャストでは同じアドレスが割り当てられたすべてのノードがマルチキャストパケットを受信するのに対し、エニーキャストでは同じアドレスが割り当てられたすべてのノードのうち 1 台のみがエニーキャストパケットを受信する。さらに、エニーキャストアドレスはユニキャストアドレスと同じアドレス空間より割り当てられるために、一般的にエニーキャストアドレスとユニキャストアドレスを区別できない。しかしながら、このことは既存のユニキャストルーティングを用いるだけでエニーキャストパケットをルーティングすることが可能であることを示している。よってエニーキャストルーティングを実現するには、複数ノードの管理をマルチキャストルーティングと同様に行ない、パケットの転送をユニキャストルーティングと同様に行なえばよいと考えられる。

マルチキャストルーティングプロトコルには、その適用範囲と伝搬性能に応じて 3 種類のプロトコルが定義されており [3-5]、文献 [1]、[2] ではマルチキャスト通信とエニーキャスト通信との類似性を元に、既存のマルチキャストルーティングプロトコルを改変して 3 種類のエニーキャストルーティングプロトコルを実現する方法を提案している。本稿では、これらの提案手法のひとつである PIA-SM の設計と実装を行う。

複数の受信ノードの管理は PIM-SM と同様に、ランデブーポイントと呼ばれる 1 台の特別なルータを準備し、ランデブーポイントを根とした共通の配送木(ランデブーポイントツリー)を作成することで実現する。一方パケットの転送は PIM-SM と異なり、経路上の各 PIA ルータがそれぞれのエニーキャストレシーバに対する最適さの度合い(メトリック)にしたがって 1 つのレシーバを選択し、そのレシーバに対してエニーキャストパ

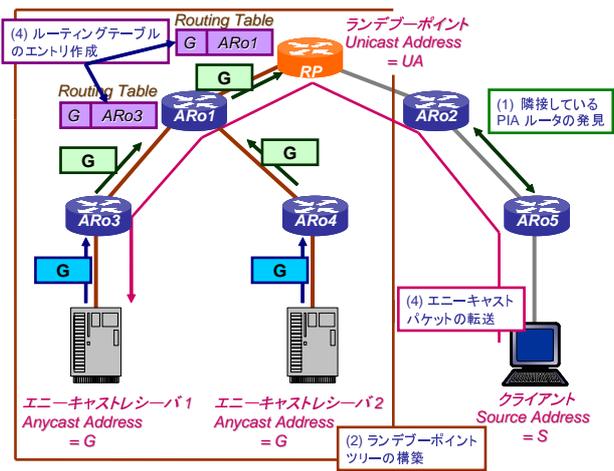


図1 PIA-SMの概要

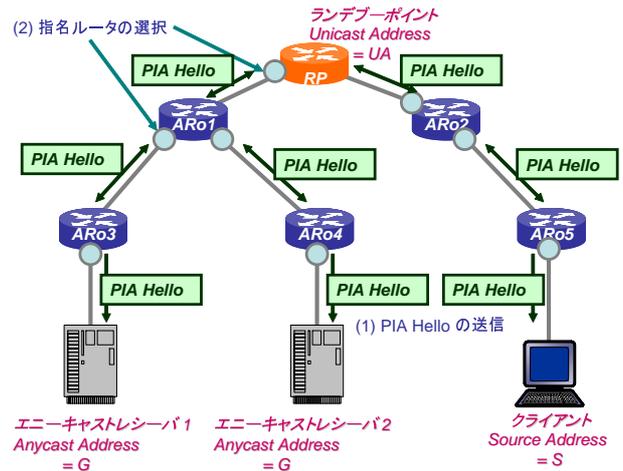


図2 隣接 PIA ルータの発見

ケットを配送することで実現する。具体的にはまず、それぞれのエニーキャストレシーバが自身のメトリックを PIA ルータに通知する。PIA ルータは受信したメトリックを比較し、最も良いメトリックのエニーキャストレシーバを選択して、このメトリックを上流の隣接する PIA ルータへ通知する。ここで、エニーキャストレシーバからランデブーポイントへ向かう方向を上流、逆向きを下流と呼ぶ。上流の PIA ルータではエニーキャストレシーバのメトリック、下流の PIA ルータから送られてきたメトリックをすべて比較し、最適なメトリックを持つエニーキャストレシーバまたは PIA ルータへ転送先として選択する。この動作をランデブーポイントツリーに沿ってエニーキャストレシーバからランデブーポイントまでの各 PIA ルータが順に行い、ランデブーポイントから最適なエニーキャストレシーバまでの経路が決定する。

PIA-SM の動作概要を図 1 に示す。処理手順は以下に示すとおりである。ただし、ここではすべてのルータがエニーキャストパケットを処理可能 (PIA ルータ) であると仮定する。

#### (1) 隣接 PIA ルータの発見

各 PIA ルータは、メッセージを交換して直接接続している PIA ルータを発見する。

#### (2) ランデブーポイントツリーの構築

エニーキャストレシーバは自身のエニーキャストアドレスを隣接する PIA ルータに通知する。エニーキャストレシーバの存在を検知した PIA ルータは、上流の PIA ルータへそのエニーキャストアドレスを通知する。この通知はランデブーポイント以外のルータによって繰り返され、最後にランデブーポイントに到達する。その結果、ランデブーポイントを根とし、エニーキャストアドレスが通知された経路を枝、エニーキャストレシーバを葉としたランデブーポイントツリーが各エニーキャストアドレスごとに作成される。図 1 では、RP、ARo1、ARo3、ARo4 およびエニーキャストレシーバ 1、2 によってランデブーポイントツリーが構成される。

#### (3) ユニキャストルーティングテーブルへの登録

ランデブーポイントを含む各 PIA ルータは、ランデブーポイントツリーを構成する経路の中からエニーキャストレシーバのメトリックを基準に 1 つの経路を選択する。そして、それぞれのユニキャストルーティングテーブルに、選択した経路をエニーキャストアドレスのエントリとして作成する。これにより、ランデブーポイントからエニーキャストレシーバまでの間は、宛先アドレスがエニーキャストアドレスのパケットもユニキャストパケットと同様ユニキャストルーティングで転送される。

#### (4) エニーキャストパケットの転送

クライアントがエニーキャストパケットを送出すると、クライアントに直接接続された PIA ルータがこのパケットを受信する。PIA ルータは、受信したエニーキャストパケットにランデブーポイントのユニキャストアドレスを付加してランデブーポイントにユニキャストで送信する。この動作をカプセル化と呼ぶ。ランデブーポイントがこのカプセル化されたパケットを受信すると、まず元のエニーキャストパケットを取り出し、その後ランデブーポイントツリーに沿って、最適なエニーキャストレシーバにパケットを転送する。

これら (1) から (4) の手順について、以下の節で順に説明する。

#### 2.1 隣接 PIA ルータの発見

PIA ルータは、直接接続している PIA ルータを知るために、PIA Hello メッセージを交換する。それぞれの PIA ルータによって送信された PIA Hello メッセージは、セグメント内でブロードキャストされる。その結果、各 PIA ルータが直接接続している PIA ルータを検知することができる。これをすべての PIA ルータが行うことで、各ルータは自身の隣接ルータを認識することができる。その後、各セグメント上に存在する PIA ルータの中の 1 つがそのセグメントに対する指名ルータとして選択される。図 2 では、各セグメント上において丸印がついている PIA ルータが指名ルータとして選択されたルータである。各セグメントの指名ルータのみがエニーキャストレシーバを検知するためのメッセージをセグメント上に送信することで、メッセージがセグメント上で重複して送信されないようにする。

#### 2.2 ランデブーポイントツリーの構築

図 3 にランデブーポイントツリーを構築する手順を示す。ランデブーポイントツリーの構築には、ARD Report と PIA Join の 2 種類のメッセージが用いられる。ARD (Anycast Receiver Discovery) は ICMPv6 MLD をエニーキャストアドレスが扱えるように拡張したもので、文献 [6] で提案されている手法を本稿では ARD と呼ぶ。ARD Report はエニーキャストレシーバが受信したいエニーキャストアドレスを PIA ルータに通知するメッセージである。PIA ルータは、ARD Report によって PIA ルータとエニーキャストレシーバの間を、PIA Join によって PIA ルータ同士をそれぞれつなぎ、ランデブーポイントツリーを構築する。以下の節では ARD Report による処理と PIA Join による処理をそれぞれ述べる。

##### 2.2.1 ARD Report による処理

ARD Report は PIA ルータとエニーキャストレシーバの間で

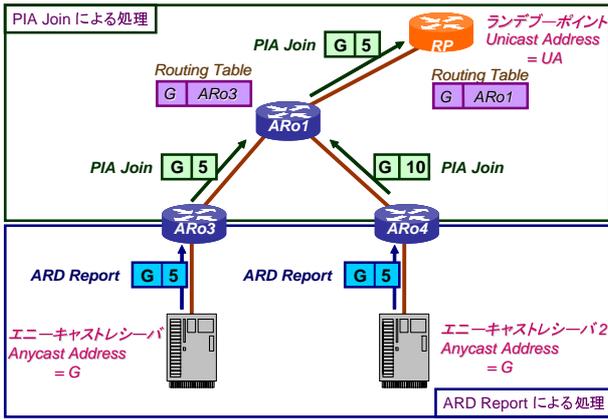


図3 PIA ルータによるランデブーポイントツリーの構築

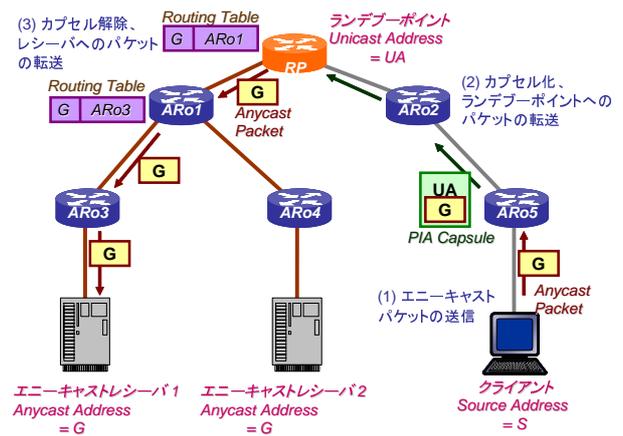


図4 エニーキャストパケットの転送

交換されるメッセージである。エニーキャストレシーバはエニーキャストアドレス G 宛のパケットを受信したい場合、エニーキャストアドレス G を含めた ARD Report メッセージを直接接続している PIA ルータに送信する。ARD Report の送信はすべてのエニーキャストレシーバによって行なわれる。PIA ルータは ARD Report を受信するとエニーキャストレシーバの存在を検知する。文献 [6] により、ARD Report の送信元アドレスはエニーキャストレシーバのリンクローカルアドレスである。PIA ルータは受信した ARD Report の送信元アドレスをエニーキャストパケットの転送先として用いる。これは、同一セグメント上に同じエニーキャストアドレスを持つエニーキャストレシーバが複数存在する場合に、PIA ルータはパケットの転送先を一意に決定しなければならないためである。IPv6 の仕様により同一セグメント上ではリンクローカルアドレスによってインターフェイスを一意に決定することができる。

### 2.2.2 PIA Join の送信

エニーキャストレシーバの存在を検知した PIA ルータは、ARD Report に書かれたエニーキャストアドレス G を含んだ PIA Join メッセージを上流の PIA ルータへ送信する。この時、ランデブーポイントのユニキャストアドレスは既知であるものとする。PIA Join を下流から受信した PIA ルータは、下流にエニーキャストレシーバの存在を検知し、さらに上流の PIA ルータへ PIA Join を送信する。この結果、エニーキャストレシーバからランデブーポイントまでのすべての PIA ルータを PIA Join が通過し、ルータは下流のレシーバの存在を検知できる。そして、PIA Join が通過した経路はランデブーポイントツリーを構成する経路となる。

### 2.3 ユニキャストルーティングテーブルへの登録

2.2 で作成したランデブーポイントツリーはすべてのエニーキャストレシーバへの経路をもとに構築した配送経路である。次に、その中から最適な 1 つの経路を選択するために、各ルータにおいて最適なレシーバに対する経路をユニキャストルーティングテーブルに作成する。最適な経路を選択する際には ARD Report および PIA Join メッセージに含まれるメトリックの値が最小のものを選択する。ただしメトリックの値は同一エニーキャストアドレスを持つノード間で何らかの指標にもとづき決められたものであるとする。図 3 では、ARD Report および PIA Join 中の数字がメトリックを表す。2 つの PIA Join を受信した ARo1 は、メトリックが最も小さい PIA Join (メトリック 5) を送信した ARo3 をエニーキャストアドレス G の転送先として選択する。

### 2.4 エニーキャストパケットの転送

エニーキャストパケットが転送される手順は以下の通りであ

る (図 4)。

(1) クライアントからエニーキャストパケットを送信  
クライアントはエニーキャストアドレス G 宛にパケットを送信する。

(2) ランデブーポイントへエニーキャストパケットを転送  
クライアントに直接接続する PIA ルータはエニーキャストパケットを受信すると、パケットの宛先アドレスに対応したランデブーポイントを探る。その後、ランデブーポイントのユニキャストアドレスでエニーキャストパケットをカプセル化し、ランデブーポイントへ送信する。図 4 ではエニーキャストアドレス G 宛のパケットをカプセル化し、ランデブーポイントのユニキャストアドレス UA へ送信している。このカプセル化されたエニーキャストパケットを PIA Capsule と呼ぶ。

(3) エニーキャストレシーバへパケットを転送

PIA Capsule を受信したランデブーポイントは、まず、カプセル化を解除して元のエニーキャストパケットを取り出す。そしてエニーキャストパケットはユニキャストパケットと区別されることなく、ランデブーポイントから最適なエニーキャストレシーバまでユニキャストルーティングで転送される。図 4 ではエニーキャストパケットがランデブーポイントから ARo1、ARo3 と転送され、最後にエニーキャストレシーバ 1 に到達する。これは 2.3 でユニキャストルーティングテーブルにエニーキャストアドレスのエントリを作成したことで実現される。

PIM-SM では、同じ送信元からのパケットの転送量がランデブーポイントで設定された転送量を超えると送信元ツリーへの転送経路の移行が行なわれるが、PIA-SM では送信元ツリーへの転送経路の移行は考えない。これは、同じ送信元が連続して同じエニーキャストアドレスに連続してパケットを送信する利用法はほとんどないと考えられるためである。同じエニーキャストアドレスが割り当てられたノードは一般に複数存在するため、クライアントが連続して同じエニーキャストアドレスにエニーキャストパケットを送信したとしても、すべて同じエニーキャストレシーバに到達するとは限らない。そのため、エニーキャストレシーバと連続した通信を行なう場合は、文献 [2] で提案されているアドレス解決プロトコルによってエニーキャストアドレスをユニキャストアドレスに対応づけ、解決したユニキャストアドレスに対して連続した通信を行なうのが現実的である。つまり、送信元ツリーを用いてエニーキャストパケットの経路を最適化しても、連続した通信ではユニキャストによる通信を行うため経路が変化する可能性がある。よって、PIA-SM ではランデブーポイントツリーによるルーティングのみを考える。

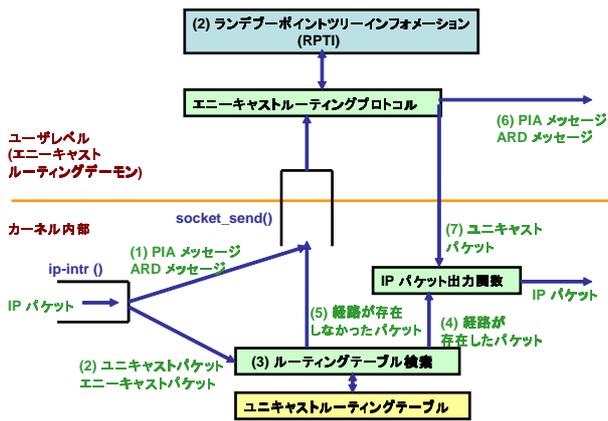


図5 FreeBSDにおけるPIA-SMの概要

### 3. PIA-SM プロトコルの実装

本章では、2. で述べた PIA-SM プロトコルをする際の実際の詳細な動作および解決すべき技術課題について述べる。PIM-SM ルータのデーモンプログラムは FreeBSD 上で実装されているため、本章では PIM-SM ルータのデーモンプログラムを改変することで PIA-SM ルータを FreeBSD 上に実装する手法を述べる。

FreeBSD において、ルーティングプロトコルはデーモンプログラムとして実装される。FreeBSD 上で動作する PIA-SM ルータのプログラムを以降では PIA デーモンと呼ぶ。PIA デーモン実装の概要は図 5 で示される。

FreeBSD では、カーネルが IP パケットを受信すると、IP 操作関数 `ip-intr()` をコールする。`ip-intr()` は受信したパケットの IP プロトコルの種類と宛先アドレスから適切な関数を選択し、その関数に処理を渡す。以下の節では、はじめに FreeBSD に実装する際の問題点について述べる。次に、受信したパケットがルーティングメッセージであった場合と、通常のパケットであった場合のカーネルの処理についてそれぞれ述べる。

#### 3.1 PIA-SM プロトコル実装時の問題点

PIA-SM を FreeBSD に実装する際の最も大きな問題点は、パケットの転送処理はカーネル内部で行うにもかかわらず、カーネル内部の情報では受信したパケットの宛先アドレスがエニーキャストアドレスかどうか判別できないことである。これは表 1 で示したようにエニーキャストアドレスとユニキャストアドレスの空間が共用であるという文献 [7] で定められた IPv6 の仕様により、IP アドレスだけではユニキャストアドレスとエニーキャストアドレスを区別することができないためである。そこで、エニーキャストパケットとユニキャストパケットを区別せずカーネル内部で転送処理を行なうこととし、ユニキャストルーティングテーブルに経路が存在すれば、その経路にしたがって転送する。ルーティングテーブルにエントリが存在しない場合、通常の FreeBSD ではデフォルトルータにパケットを転送するが、PIA-SM を実装した FreeBSD では、いったん PIA デーモンにパケットを渡し、パケットがエニーキャストパケットであるかの判別を行う。

#### 3.2 ルーティングメッセージ受信時のカーネルの処理

すべての PIA メッセージと ARD メッセージはカーネル内部のバッファから `socket_send()` 関数を通して PIA デーモンに渡される(図 5 (1))。PIA デーモンはこれらのメッセージから PIA-SM のプロトコルにしたがって、隣接する PIA ルータや

エニーキャストレシーバなどのランデブーポイントツリーに関する情報を集める(図 5 (2))。集めた情報を PIA-SM ではランデブーポイントツリーインフォメーション (RPTI) と呼ぶ。PIA デーモンはこの RPTI を元にユニキャストルーティングテーブルを操作し、エニーキャストアドレスの経路を作成、更新、削除する。

#### 3.3 通常パケット受信時のカーネルの処理

ルーティングメッセージでないすべての通常パケットはカーネル内部のバッファから `ip6_forward()` 関数に転送される(図 5 (3))。 `ip6_forward()` 関数では、受信したパケットの宛先アドレスをルーティングテーブルから検索する。ルーティングテーブルに宛先アドレスへの経路が存在したパケットは `ip6_output()` を通じて他のセグメントへ(図 5 (4))、経路が存在しなかったパケットは `rip6_input()` を通じて PIA デーモンへ転送される(図 5 (5))。通常の FreeBSD の実装では、ルーティングテーブルから経路が検索できなかったパケットはデフォルトルータへ転送される。しかし PIA-SM を実装した FreeBSD では、デフォルトルータへの転送を行う前に、パケットのアドレスがエニーキャストアドレスであるかをチェックする。PIA デーモンはカーネルから渡されたパケットの宛先がエニーキャストアドレスであるかどうかを RPTI から判別する。PIA デーモンが RPTI にパケットの宛先と同じアドレスをエニーキャストアドレスとして保持している場合、このパケットをエニーキャストパケットであると判断し、パケットを PIA Capsule にカプセル化してランデブーポイントのユニキャストアドレスへ送信する(図 5 (6))。そうでない場合はユニキャストパケットと判断し、パケットを `ip6_output()` 関数に渡しデフォルトルータへ転送する(図 5 (7))。

### 4. FreeBSD 上での PIA-SM プロトコルの動作確認

実装した PIA-SM デーモンを実際にルータ内部で動作させ、エニーキャストパケットの転送が行なわれる様子を示す。

実験はクライアントが Web ページを閲覧することで行う。このとき WWW サーバである 2 台のエニーキャストレシーバに同じエニーキャストアドレスを割り当て、クライアントは自動的に最適な WWW サーバと通信を行う。実験を行なったネットワークの構成は図 6 である。エニーキャストレシーバ 1、2 には同一のエニーキャストアドレス `G(2001:218:ffcc:1::a)` を割り当て、各エニーキャストレシーバ上で WWW サーバを起動する。また PIA ルータにエニーキャストアドレスおよびメトリックを通知するために ARD デーモンを起動する。ARD デーモンは PIA ルータから送信された ARD Query を受信し、エニーキャストアドレス G と自身のメトリックを含む ARD Report を PIA ルータに送信するデーモンである。

3. で述べたように、エニーキャストレシーバはこのエニーキャストアドレス G をパケットの送信元アドレスには用いることはできず、TCP などのステートフルな通信にエニーキャストアドレスを直接使用できない。そこで本稿では、AARP [2] を用いてエニーキャストアドレスを用いた TCP 通信を実現する。AARP では、まず ICMPv6 Echo Request を送信し、受信した ICMPv6 Echo Reply の送信元アドレスを調べる。これによりエニーキャストアドレスを対応するユニキャストアドレスに解決し、エニーキャストアドレスに対するステートフルな通信を可能にする。この AARP をクライアント上で動作させることにより、クライアントは WWW サーバのエニーキャストアドレスを用いて HTTP コネクションを確立し Web ページを閲覧することができる。

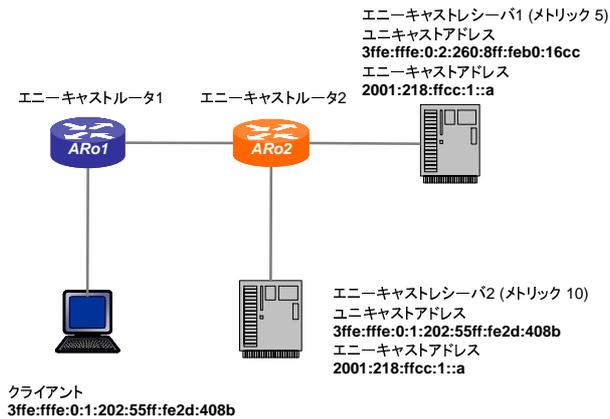


図6 実験環境

この実験の通信手順は以下の通りである。

- (1) PIA ルータはARD Query を各サブネット上に送信する。
- (2) エニーキャストレシーバ1 はメトリックを5としたARD Report をPIA ルータに返す。
- (3) エニーキャストレシーバ2 はメトリックを10としたARD Report をPIA ルータに返す。
- (4) クライアントがエニーキャストアドレスGを指定してwww ブラウザを起動する。

エニーキャストレシーバ1、2は、それぞれPIA ルータのARD Query に対してARD Report メッセージを返す。この時、各エニーキャストレシーバのメトリックがARD Report に含まれている。PIA ルータはメトリックの値の小さいエニーキャストレシーバへの経路を選択する。メトリックの値は各エニーキャストレシーバが一定の指標にもとづいて値を決定すべきであるが、今回はプロトコルの実験としてエニーキャストレシーバ1のメトリックを5、エニーキャストレシーバ2のメトリックを10としている。そのため、今回の実験ではARo2においてエニーキャストレシーバ1への経路が登録される。

以上の手順におけるARo2上のパケットの送受信記録をtcpdumpによる出力で示す(図7)。この記録ではARD Query/ReportメッセージがMLD Query/Listenerメッセージとして表示され、PIA CapsuleメッセージがPIM Registerと表示されている。これはパケットのフォーマットがそれぞれ同じであり、tcpdumpでマルチキャストパケットとして出力されるためで正常な出力である。まずエニーキャストルーター2がARD Queryを各サブネット上に送信する(1)。エニーキャストレシーバ1、2は、それぞれエニーキャストルーター2のARD Queryに対してARD Reportメッセージを返す(2)。次にクライアントのAARPが送信したエニーキャストアドレス宛のICMP Echo Requestパケットをエニーキャストルーター1がPIA Capsuleにカプセル化してランデブーポイントであるエニーキャストルーター2へ転送する(3)。エニーキャストルーター2はPIA Capsuleのカプセル化を解除し、パケットを最適なノードであるエニーキャストレシーバ1へ転送する(4)。その後エニーキャストレシーバ1のユニキャストアドレスを送信元としたEcho Replyがクライアントに向けて送信され(5)、最後にクライアントはエニーキャストレシーバ1のユニキャストアドレスに対しHTTPコネクションを確立している(6)。

以上よりPIA-SMプロトコルが正常に動作し、クライアントが最適なエニーキャストレシーバと通信できることが確認された。

```
(1) ARD Report の送信
17:19:03.644124 fe80::201:80ff:fe05:66b5 > ff02::1: HBH
icmp6: multicast listener query max resp delay: 10000 addr. ::[hl1m1]

(2) ARD Query の送信
17:19:03.644361 fe80::260:8ff:feb0:16cc > ff02::2: HBH
icmp6: multicast listener report max resp delay: 10000 addr. 2001:218:ffcc:1::a [hl1m1]
17:19:03.644369 fe80::202:55ff:fe2d:408b > ff02::2: HBH
icmp6: multicast listener report max resp delay: 10000 addr. 2001:218:ffcc:1::a [hl1m1]

(3) PIA Capsule の転送
17:19:03.646366 fe80::2d0:b7ff:fe69:c03 > fe80::280:45ff:fe2d:8369: pim v2 Register [lip6]

(4) カプセル化解除とエニーキャストパケットの転送
17:19:03.646384 3ffe:ffe:0:1:202:55ff:fe2d:408b > 2001:218:ffcc:1::a: icmp6: echo request

(5) Echo Reply の送信
17:19:03.646432 3ffe:ffe:0:2:260:8ff:feb0:16cc > 3ffe:ffe:0:1:202:55ff:fe2d:408b: icmp6: echo reply

(6) HTTP コネクションの確立
17:19:03.647130 3ffe:ffe:0:1:202:55ff:fe2d:408b.4215 > 3ffe:ffe:0:2:260:8ff:feb0:16cc.http:
S 3010621792:3010621792(0) win 57344 c-mss 16344,
nop,wscale 0,nop,nop,timestamp 316993596 0->(DF)
17:19:03.647161 3ffe:ffe:0:2:260:8ff:feb0:16cc.http > 3ffe:ffe:0:1:202:55ff:fe2d:408b.4215:
S 1509501247:1509501247(0) ack 3010621793 win 57344 <mss 16344,
nop,wscale 0,nop,nop,timestamp 316993596 316993596->(DF)
```

図7 実験結果

## 5. おわりに

本稿では、IPv6で新たに導入されたエニーキャスト通信を実現するために必要なエニーキャストルーティングプロトコルPIA-SMを設計した。さらに、PIA-SMルータを実機に実装し、エニーキャストパケットがPIA-SMルータによって作成された経路にしたがってエニーキャストレシーバに到達することを示した。

実装したPIA-SMでは、広域ネットワークで利用することを考えると、エニーキャストレシーバの選択が送信元によらず同一である、ランデブーポイントにおいてトラヒックが集中するといった問題点があり、今後はこれらについても議論する必要がある。

### 謝辞

本研究の一部は、総務省における研究プロジェクトである戦略的情報通信研究開発推進制度委託研究「新しいネットワークサービスを創出するIPv6エニーキャスト通信アーキテクチャの研究開発」によっている。ここに記して謝意を表す。

### 文献

- [1] S. Doi, S. Ata, H. Kitamura, M. Murata, and H. Miyahara, "Protocol Design for Anycast Communication in IPv6 Network," in *Proceedings of 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM'03)*, (Victoria), pp. 470-473, Aug. 2003.
- [2] S. Doi, S. Ata, H. Kitamura, and M. Murata, "IPv6 Anycast for Simple and Effective Service-Oriented Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 5, pp. 163-171, May 2004.
- [3] D. Estrin, D. Farinacci, A. Helmy, D. Thaler, S. Deering, M. Handley, V. Jacobson, C. gung Liu, P. et Sharma, and L. Wei, "Protocol independent multicast-sparse mode (PIM-SM): Protocol specification," *RFC2117*, June 1998.
- [4] D. Waitzman, C. Partridge, and S. Deering, "Distance vector multicast routing protocol," *RFC1075*, Nov. 1988.
- [5] J. Moy, "Multicast extensions to OSPF," *RFC1584*, Mar. 1994.
- [6] B. Haberman and D. Thaler, "Host-based anycast using MLD," *Internet draft draft-haberman-ipngwg-host-anycast-01.txt*, May 2002. work in progress.
- [7] S. Deering and R. Hinden, "Internet protocol, version 6 (IPv6) specification," *RFC2460*, Dec. 1998.