

# MPLS における IPv6 転送機構の実装と運用

宇多 仁†      小柏 伸夫†      宇夫 陽次朗‡      篠田 陽一††

† 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科      ‡(株) インターネットイニシアティブ 技術研究所  
†† 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学センター

既存の MPLS 網に対し、エッジルータを拡張することで IPv6 トラフィックを扱うことを実現した。この手法では、拡張対象が IPv6 を必要とする利用者が収容されているエッジルータに限られるため、既存の IPv4 を対象とした MPLS 網に容易に導入することが可能である。特に、MPLS-IX においては、エッジルータは IX 利用者側に置かれるため、IPv6 を必要とする IX 利用者側の拡張のみで対応可能な本手法の持つ意味は大きい。

本論文では、MPLS 網においてどのように IPv6 を扱うことができるかを議論した上で、MPLS 実装 AYAME への IPv6 対応拡張の組み込みについて述べる。さらに、本実装を用いて実運用環境上で行った運用実験に関して述べる。

## Implementation and Operation Issue of IPv6 Packet Forwarding on MPLS Network

Satoshi Uda†      Nobuo Ogashiwa†      Yojiro Uo‡      Yoichi Shinoda††

†School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology  
‡Reserch Lobaratory, Internet Initiative Japan, Inc.  
††Center for Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

We extended the AYAME MPLS environment to support IPv6 on MPLS network. On this design, we had some methods to support IPv6. We had compared these methods, and chose one. On applying this method, we can use IPv6 with only edge router extension of MPLS cloud. So we can install IPv6 extended LSR to existing MPLS network. It's good choice, because only a few MPLS router have supported IPv6 at the moment. Especially on MPLS-IX architecture, IX users can use IPv6 with no support of IX provider. Certainly it's no need for IX provider to extend IX core network.

In this paper, we discuss and compare methods to support IPv6 on MPLS network. We show issue of the design and implementation of MPLS extension for IPv6, and introduce our experimentation to use this implementation for IPv6 support "on the live network".

### 1 はじめに

MPLS (Multi Protocol Label Switching)[1] は、高速・高機能配送機構を実現する次世代インターネット技術の一つとして広く注目されている。分散 IX

研究会<sup>1</sup>においては、次世代インターネット・エクスチェンジの実現に MPLS 網を用いる方式を提案している (MPLS-IX)[2]。

既に MPLS 対応ルータ (LSR: Label Switching Router) は、複数のベンダにより製品化され、導

<sup>1</sup><http://www.distix.net/>

入も進みつつある。しかし、これらは主に IPv4 (Internet Protocol version 4) を対象とするものであり、IPv6 (Internet Protocol version 6) への対応は進んでいない。

我々は、MPLS-IX における IPv6 のトラフィック交換手法を設計し、我々が開発している MPLS 実装 AYAME[3, 4] に組み込んだ。さらに、本実装を用いて実環境での運用実験を行っている。

本論文では、MPLS 網における IPv6 トラフィックの取り扱い手法について述べる。その上で、AYAME に対する IPv6 転送機構の設計・実装について述べる。さらに、実環境における本実装の運用経験をまとめる。

## 2 MPLS と MPLS-IX

### 2.1 MPLS の概要

MPLS はネットワーク層プロトコル・データリンクメディアに依存しないラベルスイッチング技術である。そのラベルとして積み上げ可能なラベルスタック構造を採用している。

MPLS 網内では、パケットはラベルが付けられた状態で配送され、LSR 毎にラベルの参照/書き換えが行われた上で次ホップへ転送される。パケットに付けられるラベルは、そのパケットを受け取る LSR が行うべき転送挙動に対応するものである。

LSR 間では、ラベル値の広告などのためのシグナリングが行われる。このシグナリングには、LDP[5]、RSVP-TE[6]、CR-LDP[7] などのシグナリングプロトコルを用いる。これらにより、網内には端点間を結ぶ仮想的なパスが作られることになる。このパスを、LSP (Label Switched Path) と呼ぶ。

さらに、MPLS は、次世代インターネットにおけるネットワークの高機能化・高速化に対応するための技術として設計されたため、インターネット技術との親和性に優れている。

### 2.2 MPLS-IX

インターネット・エクスチェンジ (IX: Internet eXchange) を MPLS を用いて構築する手法 (MPLS-IX) が提案されている。

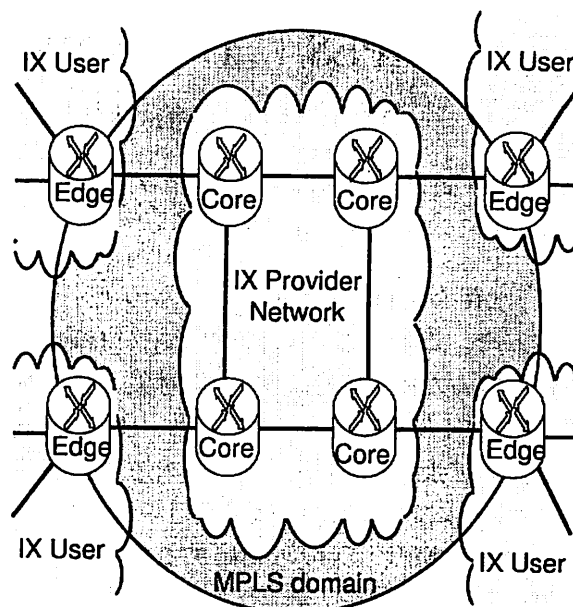


図 1: MPLS-IX アーキテクチャ

一般的な MPLS 網の構築形態は、特定ネットワークを MPLS 化した上で、エッジ LSR に利用者回線を収容する形態である。しかし、MPLS-IX においては、IX の利用者側に MPLS 網のエッジルータを配置するアーキテクチャとなっている。これは、MPLS-IX アーキテクチャの特徴的な点である。つまり、MPLS-IX においては、MPLS 網は、

- IX 提供者の設置するコアルータ群
- IX 利用者 (ISP) の設置するエッジルータ

から成る。(図 1)

このような網において、LDP / RSVP-TE / CR-LDP などのシグナリングを用い、トラフィック交換を行う IX 利用者間に LSP を作成する。その LSP 上で eBGP[8] を用いた経路交換を行い、それに基づいて LSP を介したトラフィック交換を行う。

MPLS-IX の特徴として、以下の点が挙げられる。

- IX 提供者側ルータ (コアルータ) は、MPLS-IX 外の経路を必要としない。
- IX 利用者を収容するデータリンクメディア、さらには、コアルータ間に用いるデータリンクメディアに制約がない。

このような特徴により、IX 内での IP 層の高度な経路制御を可能としつつ、IX で重要とされるバイラテラル (bilateral) ポリシモデルが実現できる。さらには、MPLS の特徴であるトラフィックエン

エンジニアリング技術を用いることにより、IX 提供者はさらに細かな網内でのトラフィック制御を行うことも可能である。

## 3 MPLS 網での IPv6

### 3.1 IPv6 転送機能の実現

MPLS 網における IPv6 サポートには、いくつかの手法・段階がある。どの手法を選択するかは、網を構成する LSR の機能に依る。

1. エッジ LSR のみで IPv6 対応を行い、シグナリング等は IPv4 のものをそのまま用いる。コアルータなどでの対応が全く必要ない。このため、既存 MPLS 網を容易に IPv6 に対応させることが可能である。
2. シグナリングトランスポートには IPv4 を用い、IPv6 に関する情報も交換する。シグナリングプロトコルの IPv6 対応拡張が必要だが、未だ仕様が確定していない。コアルータを含め、IPv6 トラフィックを扱う全てのルータでの対応が必要である。
3. シグナリングトランスポートも含め、全ての制御に IPv6 を用いる。現状の IPv4 と全く同等の扱いで IPv6 を扱うことができる。特別な処理が必要なく IPv6 のみを対象と考えると最も単純な形態だが、全てのルータを IPv6 対応させなければならない。

各項の必要条件から分かるとおり、順に導入されることになると思われる。

中でも、1 の方式は、IPv6 を必要とするエッジルータのみの対応で導入でき、既に構築されている MPLS 網を必要に応じて IPv6 対応させることができ、IPv6 への移行期である現状には重要な技術である。

### 3.2 MPLS-IX の IPv6 拡張

MPLS-IX において、IPv6 の経路交換・トラフィック交換を実現した。

我々は、既設の MPLS-IX において IPv6 対応を実現するために、前節の 1 の手法を選択した。これにより、コアルータが IPv6 に対応していない

状況においても、IPv6 対応を望む IX “利用者” のエッジルータのみの対応で実現できる。

この設計にあたり、我々は、

- BGP ルータ間で IPv4 で eBGP セッションを確立したうえで、MP-BGP (Multiprotocol Extensions for BGP-4) [9] を用いる。
- 広告する IPv6 経路情報の BGP next hop 情報には IPv4 アドレスを IPv4 写像アドレス (IPv4-mapped IPv6 address) を用いる。

こととした。

さらに、LSR で BGP 経路の IPv4 写像アドレスを再帰探索する際に IPv4 経路表を探索することとした (図 2)。これにより、最終的な探索結果に IPv4 での経路制御と MPLS シグナリングの結果が用いられることとなる。つまり、IGP の経路制御と MPLS シグナリングには手を加えることなく、IPv6 の経路交換・トラフィック交換を実現できた。

この方式は、“Connecting IPv6 Islands across IPv4 Clouds with BGP” (draft-ietf-ngtrans-bgp-tunnel) [10] における MP-BGP over IPv4 アプローチ (Tunneling over MPLS LSPs) の MPLS-IX アーキテクチャへの適用である。

## 4 実環境における運用実験

### 4.1 AYAME

我々は、研究・開発用の MPLS スタックとして、“AYAME”<sup>2</sup> の設計・実装を行っている。今回、前章で述べた IPv6 対応拡張を AYAME に組み込み運用実験を行った。

AYAME は、NetBSD に対する拡張としており、研究開発活動に自由に活用できるよう、

- 自由に利用・拡張・再配布可能なライセンス
- 拡張が容易な基本設計とソースコードの公開

などを基本方針とし開発を行っている。

### 4.2 AYAME の IPv6 対応拡張

前章で述べた IPv6 拡張の実現のために、AYAME に対して行った拡張は、大分すると以下のようになる。

<sup>2</sup><http://www.ayame.org/>

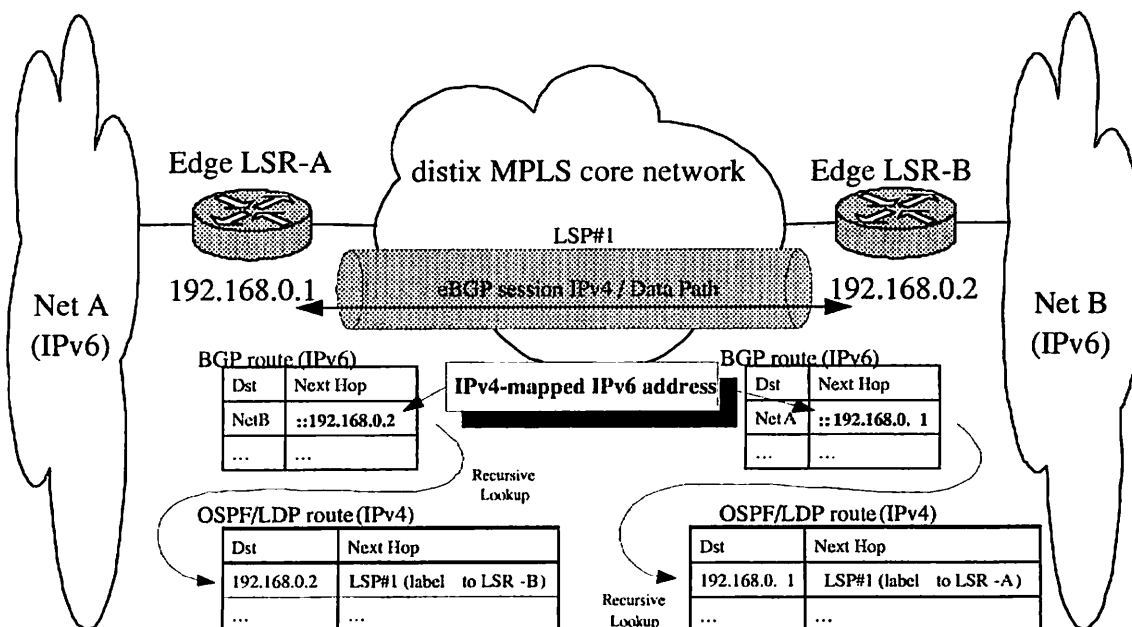


図 2: MPLS-IX での制御構造 (IPv6 拡張)

- zebra 経路制御デーモンの IPv4 写像アドレスへの対応
- IPv6 スタックの MPLS 対応
- MPLS スタックの IPv6 対応

まず、zebra 経路制御デーモンの IPv6 写像アドレスへの対応では、先の章でも述べたとおり、BGP によって得た経路の再帰探索にかかわる処理を拡張し、IPv4 経路表を参照するための拡張を行った。

次に、IPv6 スタックの MPLS 対応であるが、入力パケットをどの LSP を用いて転送すべきかを決定するためのパケット区分器を拡張し、IPv6 パケットを LSP へ転送することを可能とした。これは、ingress LSR で必要となる機能である。

最後に、MPLS スタックの IPv6 対応であるが、これは LSP から入力されたパケットを正しい L3 プロトコルスタックへ渡すための拡張である。既存の AYAME では、IPv4 を扱う部分のみ実装されていたが、IPv6 パケットを IPv6 スタックへ渡すための機能を追加した。これは、egress LSR で必要となる機能である。

これらの拡張により、AYAME で、前章で述べた IPv6 対応拡張機能を扱うことができるようになった。

### 4.3 運用実験

この IPv6 対応拡張を施した AYAME を、MPLS-IX に接続し、運用実験を行った。

今回の実験では、MPLS-IX として、北陸通信ネットワーク株式会社 (HTnet)<sup>3</sup> が実験的に構築している MPLS 網を用いた。このネットワークに接続する北陸先端科学技術大学院大学 (JAIST) と HTnet に AYAME LSR を設置し、両 LSR 間で eBGP による IPv6 経路交換とトラフィック交換を行った。

このネットワークのコアは、IPv6 には対応していない LSR 製品で構成されていた (図 3)。このような網上でも、今回我々が設計実装した手法により、IPv6 トラフィックを LSP を介して問題なく流すことができた。

上記の実験の際の、JAIST 側 LSR の経路表は図 4 のようになった。

eBGP セッションは、

- JAIST 側: 211.120.192.2
- HTnet 側: 211.120.192.1

の間で張られている。この 2 つの LSR 間には、それぞれの LSR を両端とする LSP が LDP を用いて確立されている (経路表の 1 行目)。eBGP で交換

<sup>3</sup><http://www.htcn.ne.jp/>

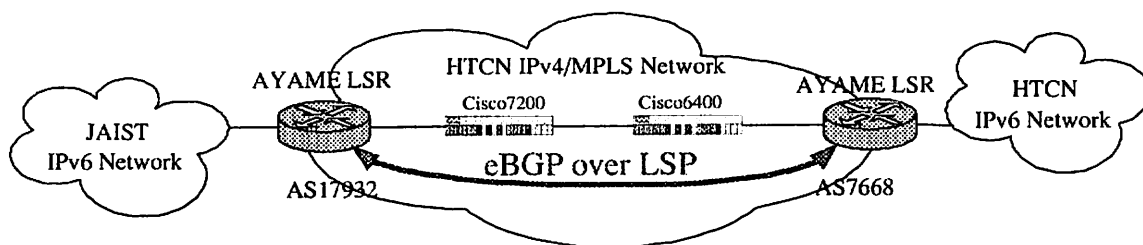


図 3: 実験トポロジ

S - static, B - BGP, M - MPLS,  
> - selected route, \* - FIB route

```
[IPv4 Routing Table]
M>* 211.120.192.1/32 [10/0]
    via LSP 0:20\
S- 211.120.192.1/32 [15/0]
    via 211.120.193.5, fxp0
B>* 150.65.0.0/16 [20/0]
    via 211.120.192.1
    (recursive via LSP 0:20)
B>* 203.178.128.0/19 [20/0]
    via 211.120.192.1
    (recursive via LSP 0:20)

[IPv6 Routing Table]
B>* 2001:308::/48 [20/0]
    via ::211.120.192.1
    (recursive via LSP 0:20)
```

図 4: JAIST 側 LSR の経路表 (抜粋)

された IPv4 経路 (経路表の 3~4 行目) は、nexthop が HTnet 側の LSR (211.120.192.1) に向いており、再起探索により LSP を用いて転送することが示されている。

本実験の焦点である IPv6 経路 (IPv6 経路表の 1 行目) については、nexthop が IPv4 写像アドレス (::211.120.192.1) となっている点が重要である。このアドレスは、もちろん、HTnet 側 LSR を示すものである。この経路の再帰探索は、通常の IPv6 経路表ではなく IPv4 経路表を用いて行われる。つまり、211.120.192.1 宛の経路を IPv4 経路表から探索し、IPv4 経路表 1 行目のエントリが用いられる。これにより、図中に例示した 2001:308::/48 宛のトラフィックは LSP を介して転送されることとなる。

#### 4.4 実トラフィック上での運用

上述の実験ネットワークの JAIST 側には、JAIST の実運用状態にあるネットワークが接続されている。Web 閲覧や電子メール配送など利用者の IPv6 トラフィックの多くはこの実験ネットワークを介し IPv6 インターネットと通信を行っている。つまり、日々の実トラフィックが流れる状態となっている。

このような状態で、我々の実装の安定性、長期運用から得られる知見の採取を目的とし、この実験ネットワークの運用を半年以上、現在も続けている。この実験では、我々の実装が極めて安定に動作している。

そこで、さらに大規模な運用実験として、HTnet と WIDE 6Bone<sup>4</sup> 間の上述の実験ネットワークと同様の方法での接続を開始した。この実験では HTnet と WIDE 6Bone 間の IPv6 トラフィックは、この実験ネットワークを流れることとなる。さらに、WIDE 6Bone は国内外の多くの IPv6 ネットワークと接続しているため、HTnet 利用者の IPv6 インターネットとの通信の多くがこの実験網を介して行われることとなる。

また、分散 IX 研究会<sup>5</sup>の運用している MPLS-IX 実証実験網においても、今後、本論文で述べた方式を用いた IPv6 トラフィックの交換実験を行うことを計画している。

#### 4.5 他実装との相互接続性

今回、我々が実装・実験運用したエッジルータの拡張により MPLS 網上で IPv6 トラフィックを転送する技術は、一般に 6PE 技術と呼ばれ、いくつかの商用ルータにも実装されつつある。

<sup>4</sup><http://6bone.v6.wide.ad.jp/>

<sup>5</sup><http://www.distix.net/>

前述の draft-ietf-ngtrans-bgp-tunnel において、MPLS 網内を通過するパケットに付くラベルについて、

- ラベルスタック 1 段で実現  
IPv4 のシグナリングで得られたラベルを IPv6 パケットに付加し、MPLS 網内を転送する。
- ラベルスタック 2 段で実現  
MP-BGP で経路情報交換の際にラベル情報も交換し、そのラベルを IPv6 パケットに付加する。さらに、IPv4 シグナリングで得られたラベルを付加し、MPLS 網内を転送する。

の、2 種の方法が述べられている。

我々の実装 (AYAME) においては前者の方式を用いているが、6PE 対応とされる商用ルータでは後者の方式が実装されているものが多い。そこで、実際に我々の実装を実環境で運用を目指した場合、今後、これらの商用ルータとの相互接続性の検証を行い、後者の方式への対応などに関して検討する必要がある。

## 5 まとめと今後の課題

我々が設計・実装・運用した MPLS 上での IPv6 トラフィック処理手法は、MPLS 網のエッジルータの拡張のみで実現でき、IPv6 を扱う必要のあるエッジルータのみの拡張で IPv6 を扱うことができる。特に、MPLS-IX においては、IX 提供者の既存網に変更・影響を与えることなく IPv6 を扱うことができるため、IX 提供者に新たな負荷を与えることなく容易に実現が可能である。

このような手法は、IPv6 の導入期・IPv6 への移行期には重要である。

我々は、AYAME に対し、この IPv6 対応の拡張を施し、実ネットワークでの運用実験を行い、上記手法が実ネットワークで十分運用可能であることを示した。さらに、実装の安定性、長期運用から得られる知見の採取のために、上述の実験ネットワークの運用を現在も続けている。

現在、複数のベンダでも同様の機能を実現する動きがある。今後は、これらのベンダのルータとの相互接続性に関する考察、用いている手法の微妙な差異の調査・検証とそれらが与える影響を検

討したうえで、今回提案した手法・実装の改良を続ける予定である。

なお、今回の実験に用いた AYAME に対する IPv6 対応拡張は、既に AYAME 配布パッケージに含めて AYAME Project の Web ページにて公開している。

## 参考文献

- [1] E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon: "Multiprotocol Label Switching Architecture". RFC 3031, IETF. January 2001.
- [2] Ikuo Nakagawa, Hiroshi Esaki, Kenichi Nagami: "A Design of a Next Generation IX using MPLS technology". SAINT2002, IPSJ. January 2002.
- [3] Yojiro Uo, Satoshi Uda, Nobuo Ogashiwa, Satoshi Ohta, Yoichi Shinoda: "AYAME: A design and implementation of the CoS capable MPLS layer for BSD Network stack". Proceedings of INET2000, Internet Society. July 2000.
- [4] 宇多 仁, 宇夫 陽次朗, 篠田 陽一: "MPLS 実装 AYAME におけるパケット転送機構の設計と実装". pp. 127-132, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPS2000) 予稿集, 情報処理学会. December 2000.
- [5] L. Andersson, P. Doolan, N. Feldman, A. Fredette, B. Thomas: "LDP Specification". RFC 3036, IETF. January 2001.
- [6] D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, G. Swallow: "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels". RFC 3209, IETF. December 2001.
- [7] B. Jamoussi, Ed., L. Andersson, R. Callon, R. Dantu, L. Wu, P. Doolan, T. Worster, N. Feldman, A. Fredette, M. Girish, E. Gray, J. Heinanen, T. Kilty, A. Malis: "Constraint-Based LSP Setup using LDP". RFC 3212, IETF. January 2002.
- [8] Y. Rekhter, T. Li, Eds.: "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)". RFC 1654, IETF. July 1994.
- [9] T. Bates, Y. Rekhter, R. Chandra, D. Katz: "Multiprotocol Extensions for BGP-4". RFC 2858, IETF. June 2000.
- [10] J. De Clercq, G. Gastaud, T. Nguyen, D. Ooms, S. Prevost, F. Le Faucheur: "Connecting IPv6 Islands across IPv4 Clouds with BGP". Internet-Draft, Next Generation Transition Working Group, IETF. work in progress, January, 2002. (draft-ietf-ngtrans-bgp-tunnel-04)