

Title	MPLS研究開発プラットフォームAYAMEの設計・実装と拡張
Author(s)	宇多, 仁 ; 小柏, 伸夫; 宇夫, 陽次朗; 篠田, 陽一
Citation	電子情報通信学会論文誌 D, J87-D1(5): 536-543
Issue Date	2004-05-01
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/4665
Rights	Copyright (C)2004 IEICE. 宇多 仁, 小柏 伸夫, 宇夫 陽次朗, 篠田 陽一, 電子情報通信学会論文誌 D, J87-D1(5), 2004, 536-543. http://www.ieice.org/jpn/trans_online/
Description	

MPLS 研究開発プラットフォーム AYAME の設計・実装と拡張

宇多 仁^{†a)} 小柏 伸夫^{††b)} 宇夫陽次朗^{†††c)} 篠田 陽一^{†d)}

Design, Implementation and Extension of the AYAME MPLS Research and Development Platform

Satoshi UDA^{†a)}, Nobuo OGASHIWA^{††b)}, Yojiro UO^{†††c)}, and Yoichi SHINODA^{†d)}

あらまし インターネットの普及に伴い、網機能への要求が多様化してきた。このような中、次世代インターネットの基幹技術の一つとして MPLS が期待されてきた。筆者らは、MPLS を用いた研究開発を行う上での基盤ソフトウェアとなり得る MPLS 研究開発プラットフォーム AYAME の設計・実装を行ってきた。本論文では、AYAME の基本設計と実装の概略を示し、AYAME に関連して行った MPLS 関連研究及び AYAME に対する拡張の設計と実装をまとめた。これらの AYAME の拡張を通し、AYAME の初期設計の妥当性に関する評価を行い、AYAME が果たした MPLS 研究開発コミュニティに対する貢献をまとめる。更に、AYAME の今後の開発の方向性を示す。

キーワード MPLS, トラヒックエンジニアリング, IPv6, インターネット

1. ま え が き

インターネットは利用可能領域及び利用者数において既に社会的な通信基盤と定着している。インターネットの基本設計は通信の頑健性と平等な接続性の維持を最重要目的としており、提供するサービスは最善努力（ベストエフォート）型に基づいている。しかし、利用形態の多様化と利用者層の拡大とともに、更に多様な要求を実現する圧力にさらされている。

マルチプロトコルラベルスイッチング（MPLS: Multiprotocol Label Switching）[1] 技術は、IP（Internet Protocol）層の制約に縛られない網制御をインターネット上で実現でき、利用者要求に応じた多様なサービス

の提供を可能とする要素技術として注目されている。

筆者らは、このような MPLS の可能性に着目し、MPLS 技術を用いた研究開発活動を遂行・支援することを目的とし、MPLS 研究開発プラットフォーム AYAME [2] の開発を続けてきた。AYAME は、研究者・開発者が MPLS 技術を用いた新たなアーキテクチャのプロトタイプ実装や新規プロトコルの開発などに利用することを目的としたソフトウェア LSR（Label Switching Router）実装である。

本論文では、AYAME の基本設計と実装の概略を示し、AYAME に関連して行った MPLS 関連研究及び AYAME に対する拡張の設計と実装をまとめた。その上で、AYAME の拡張を通して得られた知見及び AYAME の性能評価から AYAME の基本設計の妥当性を論じ、AYAME の今後の開発の方向性を示す。

2. MPLS

2.1 MPLS の概要

MPLS は、IETF（Internet Engineering Task Force）で標準化が進められている、ネットワーク層プロトコル及びデータリンクメディアに非依存なラベルスイッチング技術である。

転送処理と制御処理を分離するアーキテクチャの提供は MPLS の特徴であり、これらが一体化された設計

[†] 北陸先端科学技術大学院大学情報科学センター，石川県
Center for Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST), 1-1 Asahidai, Tatsunokuchi, Ishikawa-ken, 923-1292 Japan

^{††} (株) インテック・ネットコア，東京都
Intec NetCore, Inc., 1-3-3 Shinsuna, Koto-ku, Tokyo, 136-0075 Japan.

^{†††} (株) インターネットイニシアティブ技術研究所，東京都
Research Laboratory, Internet Initiative Japan Inc., 1-105 Kanda Jinbo-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0051 Japan

a) E-mail: zin@jaist.ac.jp

b) E-mail: n-ogashi@jaist.ac.jp

c) E-mail: yuo@ijlab.net

d) E-mail: shinoda@jaist.ac.jp

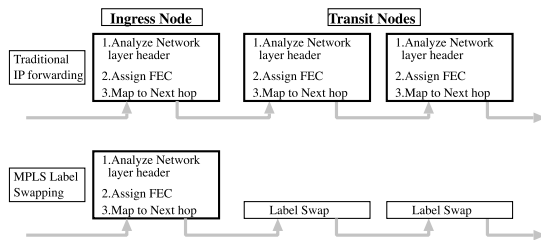


図 1 IP 層転送と MPLS ラベルスイッチング転送
Fig. 1 IP forwarding and MPLS label switching.

になっている IP 層での転送より自由度が大きい。この特性から MPLS は VPN (Virtual Private Network) や IX (Internet Exchange) の実現技術 [3] ~ [5] などの仮想網構築技術として利用されている。またパス抽象の提供に基づく障害時の高速パス切換などの機能も同様に重要な応用用途である。

2.2 MPLS 配送

MPLS 網ではパケットの配送に短い固定長のラベルのスタックを用いる。ラベルは MPLS 網の境界 LSR で付加され、中継 LSR では入力ラベルに基づいてラベルの評価及び書換えと次段 LSR への転送処理が行われる (図 1)。ラベルに基づいた一連の転送処理によって、入口ルータ (Ingress LSR) から出口ルータ (Egress LSR) へのフローを仮想パスと捉える。この仮想パスを LSP (Label Switched Path) と呼ぶ。

LSP はラベル配布プロトコルを用いた LSR 間のラベル情報の交換によって構成される。ラベル配布プロトコルには LDP [6], RSVP-TE [7], CR-LDP [8] などが提案され標準化が進められている。IP 層の経路制御情報を MPLS 網に写像する目的には LDP が、IP 経路制御の制約を受けない配送 (トラヒックエンジニアリング) 用途には RSVP-TE 及び CR-LDP が利用される。

3. MPLS 研究開発プラットフォーム

3.1 MPLS 開発環境の必要性

コストに応じて通信品質や網資源を制御可能な MPLS 技術は、コアネットワークにおけるトラヒックエンジニアリング技術として発展している。コアネットワーク用機器は非常に高い転送性能に加え機器の信頼性や操作性能の高さが要求されるため、MPLS 技術はハイエンドルータにおける付加価値として扱われる傾向がある。このような位置付けは MPLS 技術の発展に寄与する一方で製品領域を限定している。

TCP/IP 技術の普及要因の一つとして自由に参照及び改編可能な実装の存在がある。TCP/IP の研究及び普及には 1981 年の BSD UNIX による参照実装が、IPv6 の普及には 1998 年に開始された KAME プロジェクトによる参照実装が非常に重要な役割を果たした。(1) 入手の容易性、(2) 改編可能性、(3) 再配布可能な 3 点を満たす実装は、研究者による研究を容易にするだけでなく研究者間の共通的な議論の基盤となるためインターネットへの新規技術導入に非常に重要である。MPLS 技術自体や MPLS 技術などによって実現される周辺技術に対しても、同様に様々な領域、分野に対する研究が必要であるが 1999 年時点では基盤となり得る開発環境はほとんど存在していなかった。改編可能な MPLS 環境の不在は研究開発のアクティビティを、広く一般に利用可能な MPLS 環境の不在は MPLS のシグナリング環境の改善や他の技術との連携や MPLS 網運用経験の蓄積を阻害する原因となっている。

3.2 AYAME

AYAME は、筆者らが 1999 年より開発を続けてきた研究・開発用の MPLS 環境である。研究環境のベースとなることを目的としており、容易に機能拡張が可能な基本設計を採用している。BSD ライセンスのもとでソースコードが公開されている UNIX 互換環境である NetBSD^(注1)をベースとした上で、拡張部分にも同様のライセンスを適用しているため、自由に利用・拡張・再配布可能な MPLS 環境となっている。

AYAME はモジュール構造でスタック構成要素を構築している (図 2)。主な構成モジュールは、カーネル内でパケット転送処理を行う MPLS 転送機構、ラベル情報交換などを行うラベル配布デーモン群、ノード内でのラベル値などのシステムリソースの管理を行う AYAME 制御デーモンである。

3.2.1 MPLS 転送機構

インタフェースから入力されたラベル付きパケットは、カーネル内の LSE (Label Switching Engine) に渡され、制御機構により設定された FIB (Forwarding Information Base) に基づきラベルの付加・破棄・置換が行われ、出力インタフェースから送出される。LSE は、ラベルスタック操作一般を行うコア部と、データリンク層及びネットワーク層ごとに特化した処理を行う特化モジュール群からなる。コア部では、汎用的な

(注1): NetBSD Project: <http://www.netbsd.org/>

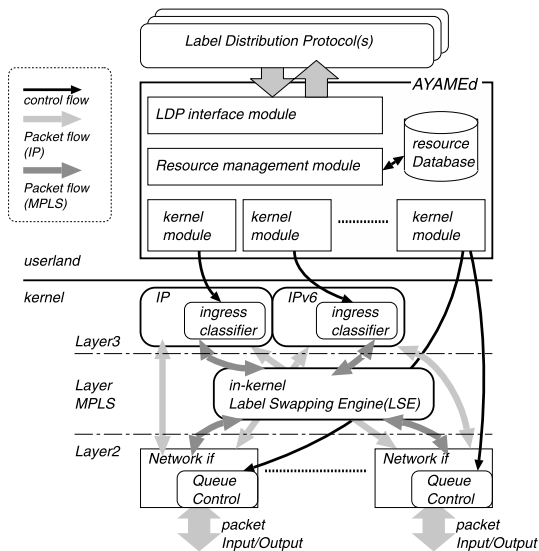


図2 AYAME のモジュール構成
Fig.2 AYAME module overview.

ラベルスタック表現である MPLS shim 形式でパケットを処理し、該当パケットを特化モジュールに渡し、必要に応じてデータリンク特有のラベル表現に変換する。最新の AYAME では、このような特化モジュールとして、IPv4, IPv6, Ethernet, ATM, MPLS over IP トンネルが実装されている。このモジュール分割によって、新たなデータリンクやネットワーク層への対応が容易である。また、FIB の更新においては、IP における経路表書換えと同様に、転送処理上の不都合が生じない限りのいかなる FIB 設定も可能としている。これは、管理者による強制的な FIB 設定などが自由に行え、特に実験などの際に有用である。

一方で、ラベルの付いていない入力パケット (Ingress LSR 処理) に対しては、ネットワークスタック内のあらゆる地点でのラベル決定を可能な構造として、多段パケット区分器を提案し実装している。これは、各レイヤの保持している情報に基づいたより細かな転送挙動の制御を実現するために導入した機構であり、各レイヤで決定したラベル情報をカーネル内でパケットを格納する構造である *mbuf* の付加情報として格納し、LSE に伝達するものである。

3.2.2 ラベル配布システム群

MPLS 網では LSP を確立するために用途に応じたラベル配布プロトコルを用いたラベル情報の交換を行う。AYAME では、ラベル配布プロトコルをプロトコルごとの実装とし、複数のラベル配布プロトコルに

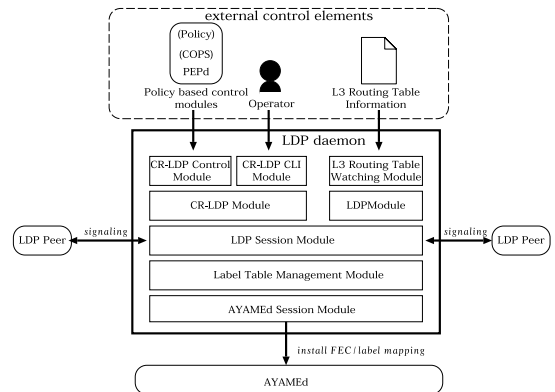


図3 AYAME のモジュール構成 (ldpd)
Fig.3 AYAME module overview (ldpd).

対応可能なモジュール構造を採用している。AYAME で実装されているラベル配布プロトコル実装は、*ldpd* (LDP, CR-LDP) 及び *rsvpd* (RSVP-TE) である。

ラベル配布プロトコル実装においても、拡張性を考慮し内部構造を細かくモジュール化している。*ldpd* では、図3の内部構造となっている。

3.2.3 AYAME 制御デーモン (ayamed)

AYAME ではカーネル内の LSE とラベル配布システムとの連携及びシステムリソースの管理を行うために、専用の制御デーモン (*ayamed*) を実装している。

LSR 上では、各種ラベル配布システム群の動的なラベル利用を含め、様々なシステムがラベルを用いており、このリソースを管理する必要がある。AYAME では、外部スイッチング機構の導入などを検討し、管理対象の LSE がカーネル内 LSE のみに限定されないと予想されることから、ラベル空間等のリソース管理に制御デーモンを用いる方式を採用した。

また、カーネル側では、特に多段パケット区分器などは、既存カーネルに実装されているフィルタリング機構の拡張などで構成していることから、レイヤや機能ブロックごとに別々の API を利用している。*ayamed* は、これら複数の API を介した制御を隠ぺいし、MPLS アーキテクチャ仕様に沿ったテーブル構造とその制御をラベル配布システム群に提供する。具体的には、MPLS の転送挙動を格納する FTN (FEC-to-NHLFE Map), ILM (Incoming Label Map), NHLFE (Next Hop Label Forwarding Entry) と呼ばれるテーブルに対する操作を、UNIX ソケットを介して行うインタフェースを採用している。メッセージには TLV 形式を用いることで、将来の拡張性を保っている。特に、FTN

テーブルの操作では、パケット特性に対する NHLFE を指定する必要があるが、パケット特性として指示する情報は、最も基本的な形態はあて先アドレスのみだが、ポート番号など第 4 層以上の情報も含められる場合があり形式を固定的に決められない。そこで、TLV 形式とすることで将来的に様々な特性を指定できる可能性をもたせた。更には、上述の外部スイッチング機構の導入などにより、複数の LSE を制御する場合には、*ayamed* によりそれらを単一の LSE としてラベル配布システム群へ提供することを目指している。また、LSE 構造を含めカーネル構造の大きく異なるシステムへの AYAME の移植の際には、*ayamed* のカーネル API 部を置き換えるのみで、ラベル配布システム群への影響を回避する効果が期待できる。

4. AYAME を用いた研究開発

本章では、筆者らが AYAME 実装を用いて行ってきた MPLS 関連の研究に関して紹介し、その実装において AYAME に対して行われた拡張に関して述べる。

4.1 細粒度トラヒック制御

インターネットは利用者層の拡大により、網品質に関する要求は利用者ごとに様々なものとなりつつある。このような中、筆者らは、MPLS 技術を用いて利用者からの動的な網品質要求をトラヒック制御に動的に反映させる手法を提案し、AYAME を用いて実証実験を行った。これは、MPLS 網上で、利用者からの品質要求に応じた MPLS LSP を動的に確立し、対象となるフロー群を該当 LSP を介して転送するものである。

この中で、利用者からの品質要求の変化に対し、フローの発生や消滅の頻度は大きい。その一方で、LSP の確立や更新では、パス品質に関する情報はパスを構成する全 LSR において必要となるが、フローに関する情報を必要とするのは Ingress LSR のみである。そこで、LSP の設定時に必要な要素を分類し、各要素の反映を最適化する Split-Phase 方式を提案した [9]。Split-Phase 方式のパス確立においては、パスを構成する全 LSR に必要な要素に基づき LSP の確立を行った上で、Ingress LSR のみに必要なフロー特性要素などを既設 LSP に遅延反映させるものである (図 4)。これにより、変動頻度が大きいフロー特性の更新に対しては、Ingress LSR のみでの反映処理で十分となり、パス全域にわたるシグナリングを抑制することができる。

この実装では、*ldpd* に対し下記の拡張を施した。

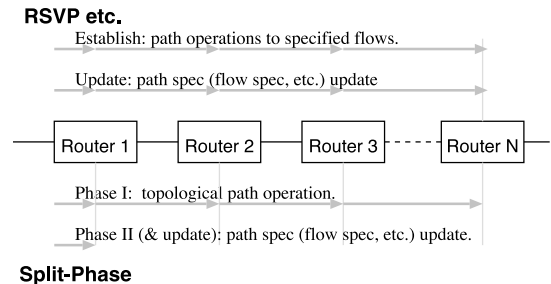


図 4 Split-Phase 方式と既存方式の比較
Fig. 4 Split-Phase LSP establishment.

[CR-LDP プロトコルへの対応] 既存 *ldpd* のセッション管理部を共有し、CR-LDP 依存部を追加実装する形で実現できた。なお、この CR-LDP 拡張には、筆者らの提案する Split-Phase 方式の LSP 確立への対応と、網制御システムとの連携機能が含まれている。

[カーネル内パケット区分器の拡張] 細粒度のフロー特性ごとにトラヒックエンジニアリングを行うために、IP のあて先アドレスのみではなく、ポート番号などに基づいたラベル決定を行えるよう拡張した。ここでは、帯域保証などの機能も必要であり、既存の ALTQ モジュールを拡張し対応した。これは、多段パケット区分器により実現した。

4.2 MPLS マルチキャスト

MPLS マルチキャストは標準化途中であり、様々な方式の提案評価が行われている。MPLS 網でのマルチキャストの実現を目指した方式の研究として、マルチキャスト拡張 LSE、マルチキャスト拡張 FIB、マルチキャスト拡張制御デーモンの 3 種の要素からマルチキャスト配送機構を AYAME 上で設計実装した [10]。本方式における AYAME の拡張の概略を示す。

[マルチキャスト用拡張 FIB と管理 API] マルチキャスト拡張 FIB はユニキャストの FIB と同様に、マルチキャスト拡張ラベル制御デーモンによって *ayamed* を介して確立される。マルチキャスト FIB エントリはユニキャスト FIB エントリと併用可能で、同一の管理インタフェースを用いて設定される。ユニキャストされるパケットとマルチキャストされるパケットは同一の入出力インタフェースを介して処理される。マルチキャスト制御のスキームごとにラベル制御デーモンの動作が異なることが想定されるため、制御インタフェースを提供する *ayamed* の汎用性が重要である。

[マルチキャスト用ラベルマッピング情報] 本実装ではマルチキャスト配送に必要なラベルマッピング情

報をカーネル空間内の拡張 FIB に保持する。マルチキャスト拡張 FIB は、ユニキャストの FIB と同様に NHLFE, ILM, FTN から構成される。マルチキャスト拡張 NHLFE は、POP, SWAP, PUSH の操作と出力インタフェースのペアをリスト構造とし、複数の出力先に対応させた。

[マルチキャスト拡張 LSE] マルチキャスト配送を実現するために LSE コア部を拡張し、拡張 FIB に基づき、入力されたパケットを必要に応じて複製し適切なネットワーク層スタックや LSE に出力可能とした。

ラベル付きパケットは、ラベル値から NHLFE を取得してリストの要素の数にパケットを複製され、指定されたラベル操作を行ってから出力される。出力先が MPLS 網であっても IP 網であってもラベル操作は共用可能である。上位層からのラベルなしパケットは、FTN からそのパケットに対する操作が記述する NHLFE を検索し、その NHLFE に従って、ラベル付きパケットと同様の処理を行う。

4.3 IPv6 への対応

筆者らは、既に提案されている MPLS 網上での IPv6 のサポートを実現するいくつかの方式の特徴を検討し、6PE model と呼ばれる方式を MPLS 網における IPv6 の最初の一步として選択し、その実装と運用により、6PE 技術の有効性の検証、相互接続性や運用上想定される問題の提起とその解決手法を示した [11]。

6PE は、MPLS 網内で IPv4 の経路制御とシグナリングによって生成された境界 LSR 間の LSP を IPv6 のパケット配送にも用いるという技術である。これは、IPv6 網を IPv4 網を越えて接続する手法 [12] の 1 つとして提案されている。この手法では、Edge LSR 間で IPv4 を用い BGP (A Border Gateway Protocol) [13] セッションを確立し、MP-BGP (Multiprotocol Extensions for BGP-4) [14] を用いて経路を交換する。経路交換においては、次ホップ情報として IPv4 写像アドレスを用い、次ホップの再帰探索に IPv4 経路表を用いる。これにより、最終的な探索結果に IPv4 経路制御と MPLS シグナリングの結果が用いられ、IPv6 パケットは LSP を介して配送される (図 5)。

本研究では、AYAME 及び経路制御ソフトウェア GNU Zebra を拡張し 6PE 機能への対応を行った。6PE 機能及び IPv6 パケット転送機能への対応のため AYAME に対して行った主な拡張は、以下である。

[LSE への IPv6 モジュールの追加] LSE の IPv6 特化モジュールを作成した。このモジュールでは、IPv6

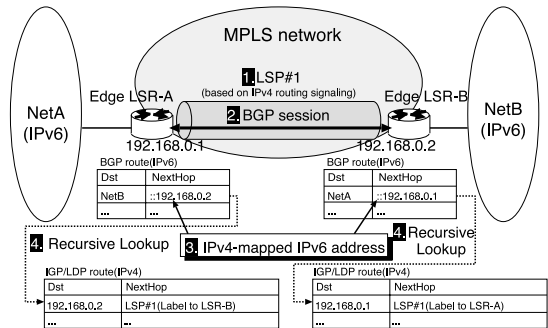


図 5 6PE による IPv6 経路交換とパケット転送

Fig. 5 IPv6 route exchanging on 6PE network.

パケットの TTL 情報を MPLS TTL に写像するなどの IPv6 パケットに特化した機能のみ提供する非常に小さなモジュールである。また、IPv6 スタック側では、MPLS で転送すべきパケットを LSE の IPv6 特化モジュールに渡す個所のみの拡張で実現できた。

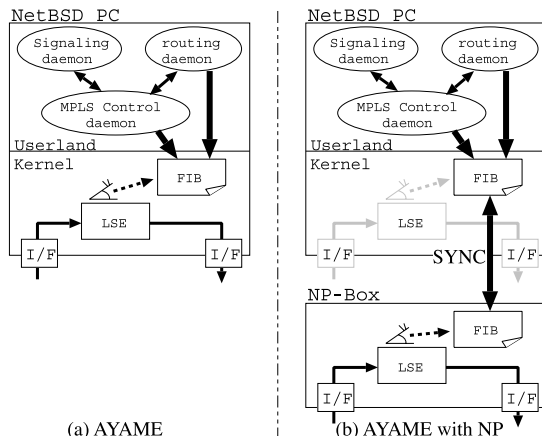
また、Zebra に対しては、下記の拡張を行った。

- *bgpd* へのラベル配布機能の追加
- *zebrad* の BGP 再帰探索ルーチンの改造

4.4 外部パケット転送機構との連携

AYAME ではソフトウェアによるネットワークスタック処理を行う。ソフトウェアルータは柔軟性が高く機能の拡張が容易である一方で、一般のハードウェア型ルータと比較してパケット転送性能などが非常に低く、実装の適用範囲が限定される場合が多い。そこでハードウェア機構を用いた外部パケット転送機構を活用することでソフトウェア実装の汎用性とパケット転送性能の向上を目指した研究を行った。外部転送機構としてはネットワーク処理に特化したプロセッサ (NP) を用いた。NP はプログラム可能なネットワーク処理専用プロセッサであり、ハードウェアレベルからの設計が不要なため利用しやすい。

ソフトウェアルータの高速化の設計及び実装のプロトタイプとして、汎用 PC 上で動作するソフトウェア MPLS ルータとして設計実装された AYAME と、Intel 社の NP IXP1240 によって実現したラベルパケット転送機構によるハイブリッドシステム構築した [15]。AYAME のソフトウェア資産を最大限活用しながらパケット転送などの時間制約が大きな部分を高速化するために、NP 部分とソフトウェア部分の構造を図 6 に示すように設計した。この構造によって既存の AYAME のラベル配布システム等が下層の NP による配送部分との相互影響が排除可能である。



(a) AYAME

(b) AYAME with NP

図 6 外部パケット転送機構を用いた拡張
Fig. 6 Using an NP-Box for packet forwarding.

NP 対応のための AYAME の拡張を以下に示す．

[制御 PC 上での仮想インタフェースの実装] ソフトウェア実装の AYAME が動作する制御 PC において、NP 側に装着されたネットワークインタフェースを制御 PC 上の物理インタフェースと同一視するために仮想インタフェースを実装した．NP 上のインタフェースで受信した宛先パケットは、このインタフェースから制御 PC 上のソフトウェアに渡される．これにより、ラベル配布システム等の制御 PC 上のソフトウェアは NP の存在を意識することなく動作できる．

[NP 上での LSE の実装] NP 部分で受信したパケットを、FIB に従ってラベルスタック操作をした上で次ノードへ出力する．

[NP と制御 PC 間の FIB 同期機構の実装] NP 上の LSE は、NP 上の FIB を参照しパケット転送処理を行うが、制御 PC 側のラベル配布システム等は制御 PC の FIB に対して操作を行う．NP が正しくパケット転送動作を行うためには、NP 側の FIB を制御 PC の FIB と同期させる必要がある．

5. 評価

本章では、AYAME 実装の当初設計の妥当性に関する評価と、プロトコル相互接続性に関する評価を行う．

5.1 当初設計の妥当性

AYAME の開発にあたっては、初期設計当初から研究開発目的で実装の拡張が行われることを仮定し、その構造を拡張性に富んだものとするを重要課題としてきた．本節では、先に挙げたような AYAME に

対する様々な拡張をもとに、初期設計がその拡張性において妥当な設計であったことを示す．

AYAME の設計においては、その構造を機能別に細分化しモジュール化を行った．まず、LSE に関して見ると、4.3 で述べた IPv6 対応拡張や ATM や MPLS over IP など新たなデータリンク対応拡張の際、ネットワーク層プロトコルやデータリンクごとに新たに対応すべきものに特化した部分のためのプロトコル/データリンク依存モジュールを必要に応じて追加することで対応が可能であった．また、ラベル配布システムとリソース管理部分を切り離したことにより、*rsupd* など新規のラベル配布プロトコルの追加実装時が容易となった上に、複数のラベル配布プロトコルの同時実行も可能となった．

また、Ingress LSR においてパケットごとの利用 LSP を判断するパケット区分器の構造として、経路表探索時に限らずスタック中のパケット経路の様々な場所での判断が可能な構造として多段パケット区分器を提案し実装していた．4.1 で述べた細粒度トラヒック制御においては、パケットのあて先情報のみにとどまらず、フローを識別し利用 LSP を決定する必要があったが、パケット区分器がこのような設計となっていたため、容易に対応することが可能であった．

このように、当初設計において重視したモジュール化と多段パケット区分器の採用は、その後の様々な機能追加のためのシステム拡張を容易なものとし、AYAME の拡張性に大いに貢献したといえる．

5.2 相互接続性

インターネットは、単一の実装で動作するネットワークではない．制御プロトコルは標準化が行われ、その標準に基づいて様々な実装がなされ、ネットワーク内では様々な実装が相互に接続され動作している．よって、ルータ実装を行う上では、他のルータ実装との間の相互接続性は重要である．

筆者らは、AYAME の他実装との相互接続性検証のために、次世代 IX 研究会^{注2)}ルータ相互接続ワーキンググループが開催する MPLS ルータ相互接続実験に第 1 回より毎回参加している．この相互接続実験には国内外から多数のベンダが参加しており、2003 年 8 月までに 7 回の実験が開催された．相互接続試験の対象機能としては、下記のように多岐にわたる．

- MPLS の基本機能

(注2): 次世代 IX 研究会: <http://www.distix.net/>

- MPLS-IX に特化した機能
- 複数ベンダで実装が進む新機能

この次世代 IX 研究会は、ルータベンダのみならず、MPLS 網を用いたサービス提供事業者や学術系研究者など幅広い参加で成り立っている。ルータ相互接続実験の試験対象項目選定にあたっては、実運用を行う立場からの試験対象項目への要望などが取り入れられ、実運用を意識した実験が行われている。

ルータ実装においては、仕様化されている最低限の機能の実装で、あらゆる実装との相互接続性が確保できるとは限らない。そこで、筆者らは AYAME の開発において、この相互接続実験を、他ベンダ実装との相互接続性向上の数少ない重要な機会と位置づけている。

AYAME 実装の相互接続性試験ではおおむね良好な結果が得られている。特に、MPLS の基本機能及び MPIS-IX の境界 LSR に必要な機能群では、初回から優秀な成績を収めている。これは、AYAME を用いた研究開発において、複数ベンダ環境での実験ネットワークの構築等も可能であることを示している。更に、実験会場において問題の生じた状況を開発者自らが調査・更新することで、AYAME 実装の相互接続性は毎回向上している。

5.3 採用・運用実績

AYAME によって提供されている MPLS プラットホームは、他実装との相互接続性が高く実用的に利用可能でありながら入手及び利用が容易な MPLS LSR 実装として成熟している。現在では、研究開発・実験運用・教育など様々な用途で広く利用されている。

研究開発用途では、AYAME の開発プロジェクトでの利用はもちろんのこと、外部においても、MPLS 技術を応用したネットワークサービスに関する研究開発のプロトタイプ実装、MPLS 網を用いた移動体通信網における高品質サービスに関する研究、GMPLS (Generalized MPLS) [16] による光スイッチング網の制御システムなどの研究開発に採用されている。

実験運用用途では、次世代 IX 研究会による MPLS-IX 実証実験網に接続するの多くの組織での境界 LSR、各種実験での MPLS トランスポート構成要素として利用されている。特に前者では、実際に接続組織間の実トラフィックの交換が行われており安定性が確認されている。また、6PE や MPLS マルチキャストといった最新の成果も取り入れた実験を行っている。

教育目的としては、MPLS 網の構築実習や挙動観察の対象として用いられている。MPLS は ISP 等のパッ

クボーン技術であり、多くの商用 LSR は非常に高価である。一方で、AYAME は多くのベンダの機器と相互接続可能な数少ないフリーな MPLS LSR 実装であり、教育目的で手軽に利用可能である。そのため国内外の複数の大学及び研究機関で利用されている。

6. 課題と今後の展開

前章までで述べたとおり、AYAME は、開発当初の基本機能のみの実装から、筆者らがやってきた様々な研究活動の成果により様々な拡張がなされている。このような拡張機能は、逐次 AYAME 公開パッケージに組み込んでいる。これにより、最新の公開パッケージには、提供される機能に偏りはあるものの、MPLS の最新技術や筆者らの提案する独自拡張などが含まれており、MPLS LSR の一般的な用途にとらわれず様々な応用が可能なシステムとなっている。

しかし、一部の拡張機能や、利用者から寄せられた拡張パッチなど、整合性などの問題から現時点で公開パッケージに含まれていない拡張もいくつか存在する。これらを公開パッケージに含めていくことは、MPLS を用いた研究開発コミュニティに対する大きな貢献となると考えており、今後の大きな課題である。

また、5.3 で挙げたような、AYAME パッケージの利用者層の拡大に伴い、補助文書類の不足も問題となっている。これらの充実も、AYAME の対象領域を更に広げていくためには重要である。

7. む す び

筆者らは、MPLS 研究開発プラットフォーム AYAME の開発を行ってきた。AYAME は MPLS に関する研究開発活動において利用されることを前提とし、初期設計時から、特に、高い拡張性をもった設計とすることを意識してきた。開発開始当初の AYAME は MPLS の基本機能を中心とした実装であったが、その後の様々な研究活動においてその実証実験等に用いる実装として重要な役割を担ってきた。

このような活動を通して、AYAME には次々と多くの拡張が施されてきた。本論文では、AYAME の初期設計時に高い拡張性を提供するためにとった構造が、実際の AYAME の拡張において果たした役割をまとめ、初期設計の妥当性について評価した。また、現在の AYAME の適用事例を挙げ、MPLS を用いた研究開発コミュニティに様々な形で AYAME が貢献していることを示した。

なお、AYAME 配布パッケージは、AYAME プロジェクトの Web ページ^(注3)において公開している。

謝辞 本研究の一部は、情報処理振興事業協会 (IPA) 平成 11 年度未踏ソフトウェア創造事業の助成により行われた。関係諸氏に深謝する。

文 献

- [1] E. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, RFC 3031: Multiprotocol Label Switching Architecture, IETF, Jan. 2001.
- [2] Y. Uo, S. Uda, N. Ogashiwa, S. Ohta, and Y. Shinoda, "AYAME: A design and implementation of the CoS capable MPLS layer for BSD network stack," Proc. INET2000, no.438, Internet Society, Yokohama, Japan, July 2000.
- [3] E. Rosen and Y. Rekhter, RFC 2547: BGP/MPLS VPNs, IETF, March 1999.
- [4] K. Muthukrishnan and A. Malis, RFC 2917: A Core MPLS IP VPN Architecture, IETF, Sept. 2000.
- [5] I. Nakagawa, H. Esaki, and K. Nagami, "A design of a next generation IX using MPLS technology," Proc. SAINT2002, pp.238-245, IPSJ, Nara, Japan, Jan. 2002.
- [6] L. Andersson, P. Doolan, N. Feldman, A. Fredette, and B. Thomas, RFC 3036: LDP Specification, IETF, Jan. 2001.
- [7] D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, and G. Swallow, RFC 3209: RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels, IETF, Dec. 2001.
- [8] L. Andersson, R. Callon, R. Dantu, L. Wu, P. Doolan, T. Worster, N. Feldman, A. Fredette, M. Girish, E. Gray, J. Heinanen, T. Kilty, and A. Malis, RFC 3212: Constraint-Based LSP Setup Using LDP, IETF, Jan. 2002.
- [9] 宇夫陽次郎, 宇多 仁, 小柏伸夫, 篠田陽一, "細粒度 SLA 遂行のための多重フェーズ LSP 設定機構の設計と実装," 信学論 (B), vol.J85-B, no.8, pp.1191-1198, Aug. 2002.
- [10] 小柏伸夫, 宇夫陽次郎, 宇多 仁, 篠田陽一, "MPLS マルチキャスト転送機構の設計と実装," マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPS2002), 情報処理学会, pp.239-244, 函館市, Oct. 2002.
- [11] S. Uda, N. Ogashiwa, Y. Uo, and Y. Shinoda, "IPv6 support on MPLS networks: Experiences with 6PE approach," Proc. SAINT2003 Workshops, pp.226-231, IEEE Computer Society, Orland FL, U.S.A, Jan. 2003.
- [12] J.D. Clercq, G. Gstaad, T. Nguyen, D. Ooms, S. Prevost, and F.L. Faucheur, Connecting IPv6 Islands across IPv4 Clouds with BGP, IETF Internet Draft (Work in Progress), Jan. 2002 (draft-ietf-ngtrans-bgp-tunnel-04).
- [13] Y. Rekhter and T. Li, RFC 1771: A Border Gateway

Protocol 4 (BGP-4), IETF, March 1995.

- [14] T. Bates, Y. Rekhter, R. Chandra, and D. Katz, RFC 2858: Multiprotocol Extensions for BGP-4, IETF, June 2000.
- [15] 渡辺林音, 宇多 仁, 小柏伸夫, 宇夫陽次郎, 篠田陽一, "ネットワークプロセッサを用いた MPLS ラベルスイッチングルータの実装," 信学技報, vol.103, no.62, pp.71-76, May 2003.
- [16] E. Mannie, ed., Generalized multi-protocol label switching architecture, IETF Internet Draft (Work in Progress), May 2003 (draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-07).

(平成 15 年 9 月 1 日受付, 12 月 13 日再受付)



宇多 仁 (正員)

1997 東京理大・理工卒。1999 北陸先端科技大学院大学情報科学研究科博士前期課程了。2004 同博士 (情報科学) 了。現在, 同大学情報科学センター助手。高機能高速ルータの研究及びあやめプロジェクトにおける MPLS ルータ開発に従事。



小柏 伸夫 (正員)

1999 芝浦工大・システム工卒。2001 北陸先端科技大学院大学情報科学研究科博士前期課程了。2004 同博士 (情報科学) 了。現在, (株) インテック・ネットコア勤務。マルチキャストシステムの研究及びあやめプロジェクトにおける MPLS ルータ開発に従事。



宇夫陽次郎 (正員)

1995 東工大・工卒。1997 北陸先端科技大学院大学情報科学研究科博士前期課程了。2003 同博士 (情報科学) 了。現在, (株) インターネットイニシアティブ技術研究所勤務。



篠田 陽一

1983 東工大・工卒。1985 同大学院工学部博士前期課程了。1988 東工大工学部助手。1989 東京工業大学工学部工学博士。1991 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。現在, 同大学情報科学センター教授。

(注3): AYAME Project: <http://www.ayame.org/>