

# 産学連携による“MPLS-IX”アーキテクチャの研究と実用化

松嶋 聡<sup>†1</sup> 中川 郁夫<sup>†2</sup> 永見 健一<sup>†2</sup>  
 菊池 豊<sup>†3</sup> 江崎 浩<sup>†4</sup>

本論文では、MPLS-IX アーキテクチャの研究および実用化に関わる産学連携の研究開発プロジェクトについて、研究開発の内容および産学連携による共同研究の実施方法とその評価について述べる。本研究では、産学連携モデルによる共同研究を通して、MPLS-IX アーキテクチャの提案、設計、および実証実験による検証と評価を経て、MPLS-IX の実用化までを実施した。本研究プロジェクトの産学連携モデルの特徴は「産学連携による研究テーマの選定」、「コンソーシアムによる実証実験の実施」、「民間通信事業者による実用化」の3つのフェーズで実施したことにある。コンソーシアムには産学81組織が参加した。参加組織はMPLS-IXに関わる(1)ユーザ(IX利用者)、(2)提供者(事業者)、および(3)機器の実装者、の3種類に分類される。各参加者は、自分たちの利益を享受するためにコンソーシアムに参加し、共同で実証実験および検証・評価を実施した。多数の利益相反する民間組織が参加した共同研究プロジェクトを成功に導くうえでは、学術組織が中立的な立場でコーディネーションを行い、技術的な方向性、ビジョンを提示したことが大きい。

## Research and Realization of “MPLS-IX” Architecture by Collaboration of Academic and Industries

SATORU MATSUSHIMA,<sup>†1</sup> IKUO NAKAGAWA,<sup>†2</sup> KENICHI NAGAMI,<sup>†2</sup>  
 YUTAKA KIKUCHI<sup>†3</sup> and HIROSHI ESAKI<sup>†4</sup>

This paper gives the overview of activities related with the development and deployment of “MPLS-IX Architecture” in the next generation distributed IX development consortium. We have focused on the MPLS technology to apply to the nation-wide scale distributed IX operation by the commercial providers. This particular activity has achieved by the collaboration among academia and industry, while shearing the experimental testbed. Our collaboration includes the design of system framework, architecture, protocol, implementation and operational technologies/experiences. We have run the project with the following three phases; (1) defining the system framework and it's architecture and protocol, (2) experimental testbed operation while achieving the interoperability among different vendors and among providers, and (3) deployment of internetworking with commercial service network applying the proposed architecture. We can categorize the participants into the following three; (a) IX users (e.g., local ISP), (b) IX providers (e.g., nation-wide carrier-SP), and (c) equipment vendors. All participants have shared the common goal and their own goal to achieve the development and deployment of this particular activity. The academic members have played important roles; providing and proposing the technical solution against the system requirements raised by the industrial members, while showing the vision and direction of this particular system deployment in the commercial networks. Also, the academic members have played a neutral coordinator so that manufacturers with the conflicted interests could participate in the consortium activity.

### 1. はじめに

IX (Internet eXchange) はインターネットにおいて複数のISP (Internet Service Provider) 間の相互接続環境を提供する<sup>1)</sup>。すでに世界でも数百のIXが構築、運用されているが、従来のIXはデータリンクプロトコルに依存した技術を用いているため、そのデータリンクの性能と拡張性に制限されるなど、技術的にいくつかの深刻な課題をかかえている。

†1 ソフトバンクテレコム

SOFTBANK TELECOM Corporation

†2 インテック・ネットコア

INTEC Netcore Inc.

†3 高知工科大学

Kochi University of Technology

†4 東京大学大学院情報理工学系研究科

Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

MPLS-IX アーキテクチャは IX (Internet eXchange) に MPLS (Multi-Protocol Label Switching) を応用することにより新しい IX の相互接続モデルを実現する<sup>2),3)</sup>。その特長は、(1) プロトコル非依存な相互接続環境を提供する、(2) 広域分散環境での相互接続を可能にする、(3) 従来の IX を相互に接続する階層型 IX を実現する、にある。

本研究プロジェクトでは、産学連携モデルによる共同研究により、MPLS-IX アーキテクチャの提案、設計、および実証実験による検証と評価を経て、MPLS-IX の実用化までを実施した。

MPLS-IX アーキテクチャによる IX を実現するうえでは、接続する様々な機器の相互接続性の確認、IX 提供者と使用者に運用上必要となる技術的な事項を明確にすることが不可欠である。そこで、共同研究プロジェクトを立ち上げ、これらの課題を解決することとした。

その際、実際に機能の実装や運用する事業者と技術的な中立性を持ちながら研究を進める必要があることから、学術組織を含めた産学連携プロジェクトとした。本研究プロジェクトの産学連携モデルの特徴は「産学連携による研究テーマの選定」、「コンソーシアムによる実証実験の実施」、「通信事業者による実用化」の 3 つのフェーズで実施したことにある。

特に、コンソーシアムによる実証実験の実施にあたっては、81 の学術組織および民間企業が研究会に参加した。研究会の参加者は、MPLS-IX に関わる (1) ユーザ (IX 利用者)、(2) 提供者 (事業者)、および (3) 機器の実装者、の 3 種類に分類される。各参加者は、自身のメリットを享受するために、コンソーシアムに参加し、共同で実証実験および検証・評価を実施した。また、コンソーシアムによる実証実験の実施にあたっては、学術組織の役割も大きい。実証実験では、学術組織が技術的な方向性、およびビジョンを提示し、研究内容や実証実験の内容を決定した。さらに、学術組織の中立的な立場でのコーディネーションにより、多数の利益相反する民間組織が共同実験への参加が実現できたことも成功要因の 1 つである。

以上をふまえ、本論文では、MPLS-IX アーキテクチャに関する研究の内容と、産学連携モデルの共同研究の実施方法とその評価について述べる。2 章で MPLS-IX アーキテクチャが必要とされた背景や特徴など、MPLS-IX アーキテクチャの概要について述べる。3 章では、本研究プロジェクトにおける産学連携モデルの共同研究の実施方法について述べる。ここでは、本研究プロジェクトで主催した次世代 IX 研究会について述べ、同研究会のスキーム、および産学連携

の特徴と MPLS-IX の実用化について述べる。4 章では、本研究プロジェクトで実施した産学連携モデルについての考察を行う。特に、コンソーシアムに参加した民間企業の役割、および学術組織の役割について述べ、5 章では全体のまとめを行う。

## 2. MPLS-IX アーキテクチャの研究

本章では、MPLS-IX アーキテクチャの概要とその研究開発の内容について述べる。まず従来の IX 技術について述べ、次に MPLS-IX アーキテクチャの概要、および特徴について述べる。

### 2.1 従来の IX 技術

IX (Internet eXchange) は、インターネットにおいて、複数の ISP (Internet Service Provider) 間の相互接続環境を提供する<sup>1)</sup>。IX には多数の ISP が接続する。IX に接続する ISP は IX を介して他の ISP と相互接続を行うことによりトラフィック交換を実現する。

従来の IX は Ethernet や ATM などの Layer 2 のインタフェースを用いて ISP 間の相互接続環境を提供していた。本論文では、これらの IX を L2-IX と呼ぶ。

図 1 に Ethernet による IX の構成例を示す。Ethernet を用いて IX を構成する場合、ISP は Ethernet インタフェースに対応したルータを IX に接続し、同一の Ethernet セグメント上で隣接の ISP ルータと BGP4 による経路制御を行う。

従来の IX を構成する技術として、ほかに ATM を利用するものもあるが、いずれの場合も、データリンクメディアに依存しているため、性能、拡張性、などの点で、データリンクメディア特有の課題を持つ (表 1)。

### 2.2 MPLS-IX の概要

本研究プロジェクトでは、前述の問題を解決するため、MPLS (Multi-Protocol Label Switching)<sup>6),7)</sup> 技術を IX に応用した MPLS-IX アーキテクチャを提案する。

図 2 に MPLS-IX の概要を示す。MPLS-IX は、Core LSR (Label Switching Router) を MPLS で

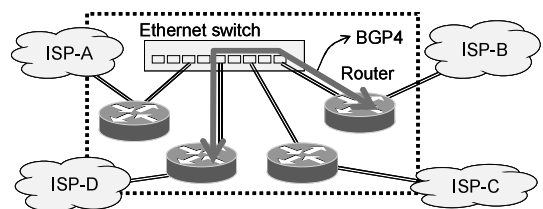


図 1 Ethernet による IX  
Fig. 1 Ethernet IX.

表 1 L2-IX の課題  
Table 1 Issues of L2-IXes.

	Ethernet-IX	ATM-IX
性能	1Gbps まで(1999 当時) (現在は 10Gbps)	622Mbps まで 15%のセル損失
運用性	STP による 冗長構成は困難	Peering 時の PVC 設定 が手動・半手動
セキュリティ	認められない第 3 者による パケット送信が可能 (Third-Party NextHop)	該当なし
拡張性	サブネットによる接続 数の制約	運用上のコスト大
広域分散化	技術的に困難	実現例はない
インタフェース	Ethernet のみ	ATM のみ

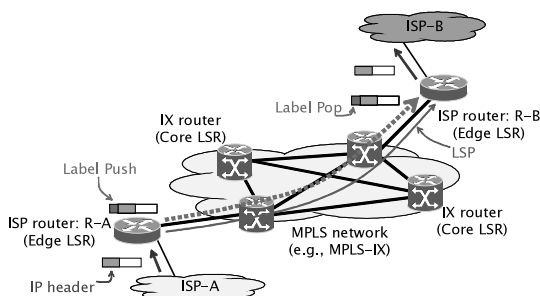


図 2 MPLS-IX の概念図  
Fig. 2 Outline of MPLS-IX.

相互に接続したネットワークである。図 2 では、4 つの Core LSR で MPLS-IX が構成されている。IX に接続する ISP は MPLS に対応したルータ (Edge LSR と呼ばれる) を準備 (R-A, R-B) し、任意の物理インタフェースを用いて、隣接の Core LSR に接続する。

ISP が MPLS-IX 上で相互接続を行う際には、ISP の Edge LSR 間 (R-A と R-B の間) で LSP (Label Switched Path) を確立し、BGP4 による経路情報を交換する。ISP が送出したパケット (IP Packet) は、Edge LSR (R-A) でラベルが付与され (Label Push)、Core LSR に送られる。Core LSR は、このラベル情報だけを用いて MPLS-IX 内を転送し、宛先の Edge LSR (R-B) に送る。Edge-LSR (R-B) は、付与されていたラベルを削除 (Label Pop) する。MPLS-IX ではこのようにして、相互接続が行われる。

2.3 MPLS-IX アーキテクチャの特徴

MPLS-IX は、次の 3 つの特徴を持つ新しい ISP 間の相互接続モデルを実現できる。

1. プロトコル非依存な IX アーキテクチャ
  2. 広域分散環境での IX 機能の提供
  3. 既存 IX を相互に接続する階層型 IX の実現
- 以下では、これら 3 つの特徴について述べる。

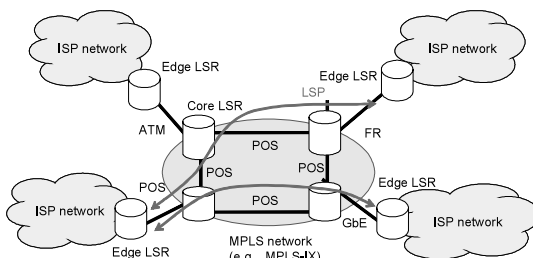


図 3 プロトコル非依存な IX アーキテクチャ  
Fig. 3 Protocol independent IX architecture.

2.3.1 プロトコル非依存な IX アーキテクチャ

MPLS-IX は、データリンクプロトコルに非依存な相互接続を可能にする。既存の IX の問題点の多くはデータリンク層の技術的な制約に起因している。MPLS-IX では MPLS 技術を用いることにより、ISP が IX と接続するための物理的なインタフェースと、ISP が他の ISP と相互接続を行うための論理的なインタフェースを分離し、ニーズにあわせたデータリンク技術を適切に利用することを可能にしている。

図 3 は、IX に接続する物理インタフェースに Ethernet (GbE) や ATM, Frame Relay, POS (Packet Over SONET) を用いたプロトコル非依存な例である。

2.3.2 広域分散環境での IX 機能の提供

MPLS-IX は、IX 内部を MPLS ネットワークとして構成する。そのため、容易に広域分散環境での相互接続環境を実現する。たとえば、1 つの MPLS-IX のコアルータが札幌と福岡にあれば、札幌と福岡の ISP は、最寄のコアルータにつなぐことにより、相互接続が可能となる。

インターネットでは、広域のコンテンツ配信を行う場合や、地域を越えてコンテンツ交換を行う場合など、広域分散環境において ISP 間のトラフィック制御を必要とすることがある。以下に、広域分散 IX 技術のメリットについてまとめる。

1. コンテンツ ISP と地域 ISP との直接接続が可能になる。ゲームや映像などのコンテンツを、広域分散 IX を通してエンドユーザに直接配信することで、高品質なコンテンツの配信を可能にする。
2. 映像伝送、ファイル共有など地域間の通信の実現が可能になる。これまで、地域間のコンテンツ交換の取り組みが行われているが、地域間でのコンテンツ交換は広域分散環境での ISP 間の通信が重要な役割を果たす。
3. 国内の回線を持たない ISP が地域 ISP 向けにトランジットサービスを提供することが可能になる。

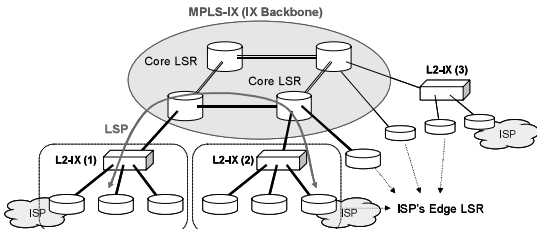


図4 階層型 IX の実現  
Fig. 4 Hierarchical IX architecture.

これまで、国内の回線を有していない ISP は、地域 ISP にトランジットサービスを提供することはできなかった。広域分散 IX は、たとえば、東京を拠点にする ISP が、東京のユーザと同等に近いサービスを国内全域に提供することを可能にする。

- 4. 商用 IX の地方展開が可能になる。現在も JPPIX, JPNAP, BBIX などの商用 IX が地方展開を進めている。これらの商用 IX はこれまで「点」の IX として、特定のビル内でのみサービスを提供してきたが、広域分散 IX を用いることにより容易に地方展開が可能になる。

**2.3.3 既存 IX を相互に接続する階層型 IX の実現**  
MPLS-IX は、既存 IX を相互に接続する階層型 IX の実現を可能にする。広域分散 IX を実現する際に、既存 IX を相互に接続することは、既存 IX に接続する ISP が容易に広域分散 IX を利用できるようなことを意味している。

図4に階層型 IX の概要について示す。MPLS-IX は、既存の IX を相互に接続する「メタ IX」として機能する。メタ IX は既存の IX を階層型に接続する。既存の IX に接続する ISP がメタ IX を経由して他の ISP と相互接続を行おうとする場合、MPLS-IX で提供される論理的な通信路を用いることで、既存の IX が提供する物理的な接続に依存せずに、容易に階層型 IX への相互接続が可能になる。

3. 産学連携による研究開発の実施

3.1 研究プロジェクトの開始

本研究プロジェクトは1999年に学術組織である東京大学と民間の研究組織であるインテックシステム研究所、および東芝との間の共同研究としてスタートした。同研究は民間の研究組織による市場ニーズ、すなわち IX のプロトコル依存性と閉域性に関する問題提起により研究テーマを選定した。その後、学術組織と民間の研究機関の共同で、解決案の提示として MPLS を IX に応用する手法に関する提案、すなわち MPLS-IX アーキテクチャの検討、設計、評価検証が行われた<sup>3)</sup>。

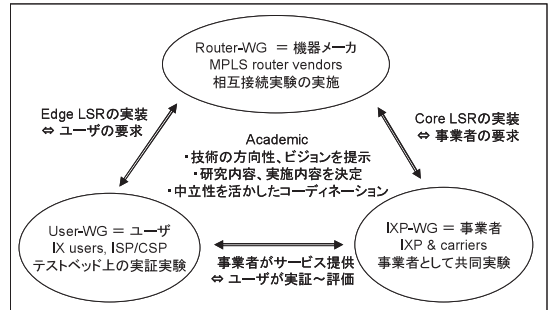


図5 次世代 IX 研究会の概要  
Fig. 5 Overview of Next Generation IX Consortium.

この結果、実用化に耐えうるアーキテクチャであることが明らかとなった。同時に、実用化には、実際に IX を運用する事業者や機能を実装するルータ開発者を含めた議論やテストベッドの構築が不可欠であった。

3.2 次世代 IX 研究会による研究開発の実施

MPLS-IX アーキテクチャの実用化に向けて実証実験を実施した。本研究プロジェクトでは、実証実験の実施にあたり、次世代 IX 研究会を設立した。次世代 IX 研究会は、産学連携によるコンソーシアムで、共同研究を実施した。

次世代 IX 研究会には 81 組織が参加した。参加組織は MPLS-IX に関する (1) ユーザ (IX 利用者), (2) 提供者 (事業者), (3) 機器の実装者, の 3 つの立場の民間企業の参加を受けてワーキンググループを開催、研究活動を推進した。このように多数の民間企業が参加できたのは、IX という相互接続形態が持つ課題が民間研究機関の活動によって共有されたこと、MPLS そのもののアーキテクチャを開発した研究者らによる中立的なリーダーシップがとられたことが大きい。

図5に次世代 IX の概要について示す。次世代 IX 研究会は、コアメンバによる幹事会と 3 つのワーキンググループ (WG) で構成される。以下は、ワーキンググループの概要である。カッコ内は参加組織数を示している (同一組織の複数 WG への参加も計上)。

1. User-WG (74) - ユーザ (IX 利用者) らによる MPLS-IX の実証実験を行った。ここでは、MPLS-IX への接続・利用に関する機能の検証と評価を行った。
2. IXP-WG (59) - 提供者 (通信事業者) らによる MPLS-IX の提供モデルの研究と MPLS-IX の運用に関する実証実験を行った。
3. Router-WG (59) - 機器の実装者 (ルータメーカ) による MPLS ルータの相互接続試験を実施した。相互接続試験では、MPLS-IX の基本機能、

拡張機能，および性能についての検証を行った．次世代 IX 研究会は学術 (Academic) が主体となつて会を運営し，継続的な研究成果の共有および議論を推進するため，定期的 (隔月) に研究会を開催した (2001 年 6 月から 2004 年 5 月までに計 18 回)．研究会への参加人数は毎回 70 名を超えた．研究会の開催にあたっては，学術による研究の側面を前面に打ち出し，各 WG の立場から MPLS-IX に関連する研究テーマ，課題，もしくは研究の成果について発表を行い，他の WG メンバも交えたディスカッションを行った．このことは次世代 IX 研究会における研究課題に関する意識の共有，研究成果に関する情報流通などに大きく貢献した．

図 5 のように，次世代 IX 研究会では，明確な役割を持ったそれぞれの WG を学術 (Academic) がその中立性と技術的なアドバンテージで支援する形となっている．本節では，研究活動を進めていくうえでいくつかの局面を例にあげ，それぞれの局面で次世代 IX 研究会の体制がどのように機能したかについて，具体的に述べる．

3.2.1 MPLS-IX の実証実験と評価

User-WG では ISP (Internet Service Provider) や CSP (Content Service Provider) など，IX ユーザによる実証実験の実施を推進した．IX ユーザは MPLS-IX を利用する組織である．

通常，IX に関する実証実験を行う場合，接続を行う組織間の利害関係が課題となる．次世代 IX 研究会では，User-WG の各組織が実証実験に参加することを促すために，テストベッド上で，学術の研究者らによる，MPLS-IX を用いたコンテンツ配信に関する実験を並行して実施した．テストベッド上の実証実験への参加は，コンテンツ配信に関する学術的な研究への参加を目的とすることで，実証実験の参加者が，ビジネス上の直接的な利害関係をを超えて，技術的な検討，検証を行うことができるよう配慮した．参加組織の呼びかけにあたっては，特に次の 2 点について留意した．

- (1) 人気のあるコンテンツプロバイダの誘致  
大手ゲーム会社ゲームサイトを実証実験網に先行して接続し，コンシューマをユーザとする ISP が実証実験に参加するメリットを打ち出した．
- (2) 多数のユーザを持つ大手 ISP を先行して接続することで，他 ISP が参加しやすい環境を作った．

User-WG では，サービスを利用する立場から必要になる機能の要求を整理し，MPLS-IX アーキテクチャを用いた IX の実用性を安定性や経路制御技術の点から検証するため，広域分散 IX のテストベッド“distix”を

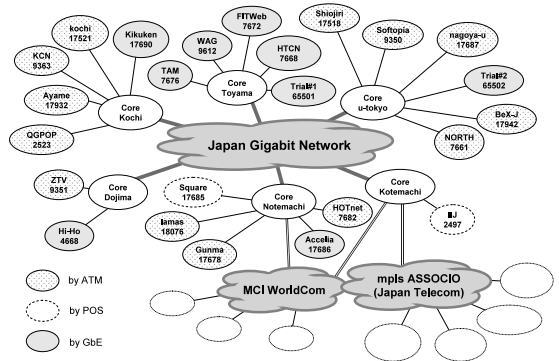


図 6 実証実験網 distix  
Fig. 6 distix — MPLS-IX test bed.

用いた実証実験を行った．distix は，研究開発用ネットワーク JGN (Japan Gigabit Network) 上に構築した．

図 6 に distix のトポロジを示す．distix は 6 つの Core LSR を持つ．Core LSR には Juniper 社製の M10 もしくは M20 を用いている．Core LSR は東京 (u-tokyo, notemachi, kotemachi)，大阪 (dojima)，富山 (toyama)，高知 (kochi) に分散配置され，その間を JGN 上の ATM PVC を用いて接続した．

他の楕円は distix に接続している組織の名前と AS (Autonomous System) 番号を示している．distix に接続しようとする ISP は，Edge LSR を準備し，Core LSR のどれか 1 つに直接，もしくは JGN 経由で接続を行う．

図中，破線の楕円型の組織は POS (Packet Over Sonet) による直接接続を，実線の楕円型の組織は Gigabit Ethernet による直接接続を，実線網かけの楕円型の組織は JGN を介して ATM による接続を行っている．このように，distix は，MPLS-IX の特徴の 1 つである，データリンクメディア非依存な IX として構築されている．

distix では，ISP は他組織との間で LSP を確立することにより，BGP4 による経路情報の交換とトラフィック交換を行うことができる．LSP 確立のためのシグナリングプロトコルとしては LDP<sup>8)</sup> および RSVP-TE<sup>9)</sup> が利用可能である．distix には大学や研究機関のほか，ISP，CSP などの民間企業も含め，計 20 組織が相互接続に参加してトラフィック交換を行った．

distix により MPLS-IX アーキテクチャが実用に耐えることを参加組織が判断するためには，運用実績が必要となる．具体的には，長期間にわたり，相当量のトラフィックを安定して処理できたか，である．図 7 に，2001 年 8 月～2002 年 2 月までの distix 上で交

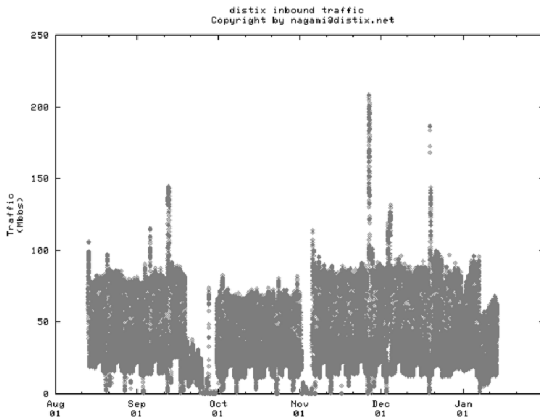


図7 distix 上の実証実験トラフィック  
Fig. 7 Trial traffic over distix.

換されたトラフィックの様子を示す。実験網でありながらも最大 200 Mbps のトラフィックを安定して処理できている。約半年間のこの期間には、前述した遅延やパケットロスに敏感なコンテンツのトラフィックも含まれていたが、参加組織からはコンテンツの品質にまったく問題ないと報告され、実用性を検証することができた。

### 3.2.2 通信事業者による提供モデルの研究

通信事業者は MPLS-IX の実用化におけるサービス提供者に位置づけられる。IXP-WG では、MPLS-IX の実用化に際して、サービス提供者側の立場から必要な機能や運用技術に関する研究を行った。

次世代 IX 研究会は、通信事業者と共同で MPLS-IX テストベッドを運用し、図 6 のように MCI WorldCom による MPLS-IX、および日本テレコム（現ソフトバンクテレコム、以降旧称にて表記）による mpls ASSOCIO の 2 つの MPLS-IX 網が distix と相互接続を行い、サービス提供者の要求事項を明らかにした。

IXP-WG での研究、検討結果はホワイトペーパーとしてまとめ、ウェブ上で公開した<sup>13)</sup>。本結果はルータメカが MPLS-IX に関する実装を行う際にも引用・参照されており、MPLS-IX の実用化に貢献したといえる。

### 3.2.3 ルータメカによる相互接続試験の実施

Router-WG では通信機器メカ（以下、ルータメカ）の参加をうけて、MPLS ルータの相互接続試験と IX に必要な機能の実装を実施した<sup>4),5)</sup>。IX では機器の相互接続性が特に重要であり、異機種間であっても機能的に問題がないことを相互接続試験により事前に確認しておく必要がある。また、IX での利用に必要な追加機能を実装する必要がある。

本研究プロジェクトでは、Router-WG の取り組み

として 2001 年～2005 年の間に 12 回の相互接続試験を実施し、MPLS-IX の実用化に必要な基本機能、拡張機能、および性能に関する相互接続試験を実施し、実用化に不可欠な異機種間の接続性の保証と IX 事業者が MPLS-IX を提供するうえで必要な課金機能などの拡張機能を実装し、製品の機能充実をはかった。

Router-WG には、User-WG や IXP-WG からの要望が届くが、それぞれのルータメカにより実装が異なるため、次世代 IX 研究会の研究者らは、汎用的で合理的な実装方法を提案するなどして支援し、相互接続性確保や機能の充実を実現した。

なお、Router-WG における相互接続試験の結果は原則公開とし、ウェブ上で公開することで、試験結果に関する情報流通を促した。なお、本試験結果は、ある商用 IX プロバイダの機器購入時の選定条件として利用されるなど、研究会活動の結果が産業界でも活用されていることが分かっている。

## 3.3 MPLS-IX アーキテクチャの実用化

学術組織を中心とする次世代 IX 研究会で MPLS-IX の基本的な機能の研究と実証実験は行われていたが、サービス化には、さらに多くの課題解決が必要になる。民間の通信事業者である日本テレコムはビジネスモデルの検討や新サービスの運用、課金に必要な技術やセキュリティについて検討、開発といった、商用化に必要な作業を行った。

### 3.3.1 広域分散 IX のビジネスモデル

商用サービスとして MPLS-IX を提供するためにはビジネスモデルが重要になる。日本テレコムでは、MPLS-IX を商用化するにあたり、次世代 IX 研究会参加者および後述のトライアルサービス参加者の意見を集め、公平な費用負担とパス設定に依存する費用の排除の 2 つの特徴を持つビジネスモデルを考案した。

#### 1) 相互接続のための公平な費用負担

従来の通信サービスでは、2 点を接続する回線やパスは 1 つの契約者のプライベートなものであることが前提であったため、異なる組織や団体で費用分担するには調整が必要であり、円滑な相互接続を阻害する要因となっていた。mpls ASSOCIO では、相互接続の際、どちらかが一方的に費用負担するのではなく、このサービスを使うだけで、相互接続に関わる費用を分担できるようにした。

#### 2) パス設定に依存する費用の排除

従来の通信サービスは、2 点を接続する回線やパスごとに費用が発生していた。これは、回線やパスごとに距離や帯域などの費用根拠を個別に算出するためであるが、この考え方は広域分散環境での相互接続を

表 2 プロトコルの違いによる課題  
Table 2 Issues of protocol differentiation.

プロトコル	課題の種類	
	LSP 経路制御	ラベル情報配布
LDP	課題なし	課題あり
RSVP-TE	課題あり	課題なし

障害する要因になる。このため、回線やバス個別の費用ではなく、MPLS-IX のユーザあたりが使用したりソースに対して費用を計算し、相互接続数や個々の相互接続先の地理的環境や帯域に依存しないことで、より相互接続を推進できるようにした。

3.3.2 MPLS-IX 実用化の技術課題

商用化にむけて日本テレコムは distix への参加とともに、自ら MPLS-IX の実験ネットワーク（以降、JT-MPLS-IX）を構築、トライアルサービスを実施し、以下の 3 つの技術課題を明らかにした。

- 課題 1. 使用するプロトコルによる課題
- 課題 2. セキュリティに関する課題
- 課題 3. アカウンティングに関わる課題

これらの課題は MPLS-IX アーキテクチャ<sup>2),3)</sup>では明らかにされていない、これらの課題について、以下に述べる。

- 課題 1. 使用するプロトコルによる課題

JT-MPLS-IX では、distix と同様、LSP 確立のためのプロトコルとして LDP と RSVP-TE を利用可能とした。両者の違いによる課題と、それに対するそれぞれのプロトコル特性を表 2 にまとめる。

表 2 に基づいて説明する。まず、LSP 経路制御に関する課題は RSVP-TE にある。LDP の場合、JT-MPLS-IX 内の経路制御に LSP の経路も従った。しかし、RSVP-TE では、いったん LSP を確立した後は JT-MPLS-IX 内の制御で迂回できず、LSP の始点となるユーザ Edge LSR から LSP の再設定または経路変更する必要があった。

ラベル情報の配布に関する課題は LDP にある。LDP はあるユーザに他ユーザ向け LSP のラベル情報を自動的に配布するため、JT-MPLS-IX 側から配布するラベル情報を制御する必要があった。許容しない宛先へ通信がなされるからである。RSVP-TE は、LSP の始点となるユーザ Edge LSR が LSP ごとにシグナリングを行う。LSP の終点となるユーザ Edge LSR がシグナリングを選別でき、JT-MPLS-IX 側が意図しないラベルを自動的に配布することを考慮する必要はなかった。

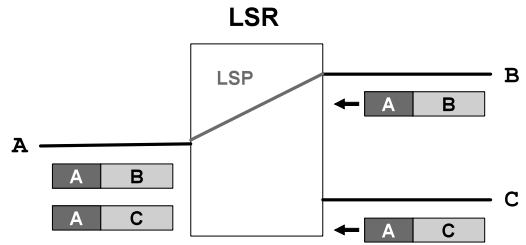


図 8 ラベルスプーフィング  
Fig. 8 Label spoofing issue.

- 課題 2. セキュリティに関する課題

前述したラベル情報の配布制御を行ったにもかかわらず、JT-MPLS-IX で用いたすべての MPLS ルータは、ユーザ Edge LSR へ配布しないラベルが付加されたパケットをそのユーザから受信しても廃棄せず転送した。この様子を図 8 に示す。図 8 では、ある LSR に設定された LSP は、A-B 間だけであるにもかかわらず、C が何らかの手段で A-B 間 LSP に使用するラベルを知り、C はそのラベルを用いて、LSP が設定されていない A へパケットを不正に送信できてしまうことを表している。つまり、単純に配布ラベルを制御するだけではセキュリティは確保できないことが分かった。この問題は Label Spoofing と呼ばれ、Ethernet-IX で問題となる Third Party Next Hop と同様の問題を引き起こす。

- 課題 3. アカウンティングに関する課題

ISP 間の相互接続では交換したトラフィックに関する情報が重要な意味を持つ。ISP が相互接続先ごとにトラフィックを確認するためには、MPLS-IX では LSP ごとにアカウンティングを行う必要がある。しかし、LSP の始点、終点となるユーザ Edge LSR では LSP ごとにアカウンティングを行うことができなかった。特に LDP を用いた場合、LSP は、宛先、すなわち LSP の終点を根（ルート）とするツリー型の LSP となる。したがって、LSP が通過する任意の点において、パケットがどの LSR から到達しているか知ることができず、受信トラフィックを相互接続先ごとに収集することができない。

3.3.3 技術課題の解決

これら 3 つの課題は、解決するための新たな技術が必要とされた。このために日本テレコムで行った課題解決について、以下に述べる。

- 課題解決 1. 使用するプロトコルによる課題

前述した使用するプロトコル特性により発生する課題のうち、RSVP-TE による LSP 経路制御の課題は、短期的な解決が困難であると判断し、LDP を使用することとした。配布ラベルの制御は、使用するルータ

に実装され、動作することが確認できたため、運用において対応が可能となった。

このため、残る課題に対しては、LDP に対して適用可能となる解決手法を検討した。日本テレコムでは、LDP を用いて課題 2, 3 を解決する技術として、Carrier's Carriers (CsC)<sup>10)</sup> を適用することを考案し、ネットワークに実装した。CsC は元々、ある MPLS ネットワーク上に他キャリアの MPLS ネットワークを VPN として実現するものであり、MPLS-IX のように異なるキャリアや ISP が相互接続するためのものではなかった。日本テレコムは、相互接続に用いる 1 つ 1 つの LSP を VPN と見なすことで、CsC を MPLS-IX アーキテクチャにおける課題解決手法として適用することに成功した。

● 課題解決 2. セキュリティに関する課題

CsC により、前述した Label Spoofing を解決することができた。CsC は VPN を実現するために、ある VPN に属するルータが他 VPN に配布されたラベルを何らかの手段で知り、そのラベルを用いてパケットを CsC ネットワークに送信しても、そのパケットを廃棄することができる。

● 課題解決 3. アカウンティングに関する課題

この課題も CsC を用いて解決することができる。LDP では、前述のとおり LSP の任意の通過点でアカウンティングすることは困難となる。しかし、CsC ルータは、LSP の宛先が同じであっても、異なるユーザ Edge LSR には、それぞれ違うラベルを配布する。CsC の実現には、配布、受信するべきラベル値を VPN ごとに管理する必要があるからである。受信するラベルがユーザごとに異なることで、LSR-MIB<sup>12)</sup> を計測に用いることができるようになる。LSR-MIB は、受信するパケットをラベルごとに計測するカウンタを定義している。このため、LDP による LSP であっても、隣接 LSR となるユーザ Edge LSR からのラベル付きパケットは、個々の LSP ごとに計測できる。これにより、ユーザと接続する CsC ルータにおいてアカウンティングを行うことができる。

図 9 では、CsC あり・なしの場合の LSR-MIB によるアカウンティングの様子を示している。図 9(a) では、あるルータのインタフェース Ia, および Ib に、接続したユーザ A, B から、それぞれ宛先 A に対するラベル La が付与されたパケットを 1 つずつ受信すると、カウンタ <La> に 2 をカウントする。つまり、パケット送信ユーザを識別できない。しかし、CsC を実装した場合、1 つの宛先に対するラベルを VPN ごとに変えることができるため、パケット送信ユーザを

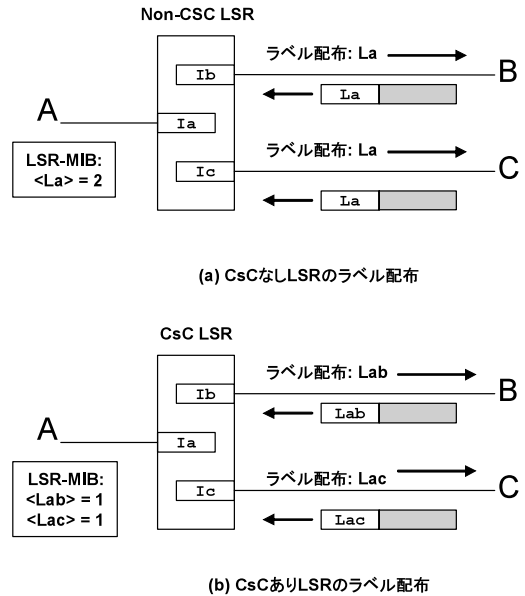


図 9 CsC 有無のアカウンティング  
Fig.9 Accounting with and without CsC.

識別できる。図 9(b) では、ユーザ B, C に配布する宛先 A に対するラベルを、それぞれ Lab, Lac とすることで、カウンタ <Lab> および <Lac> を異なるパケット送信ユーザのカウンタとして利用できる。

3.3.4 課題解決手法の評価

MPLS-IX アーキテクチャにおけるセキュリティとアカウンティングの課題に対する CsC による解決手法を評価するため、図 9 に示す構成を組み、評価した。まず、セキュリティに関して評価を行った。ユーザ LSR, A-B 間のみ LSP を設定し、この LSP と同じラベルをパケットに付加して C より送信しても A, B に到達できないことを確認した。その後、C から 1 Gbps で A に対して A-B 間 LSP のラベルを付加したパケットを送信しても、MPLS-IX ルータの動作に悪影響を与えないことを確認した。これらより、Label Spoofing によるセキュリティの問題は CsC により解決できていることが確認できた。

次に、LSP ごとのアカウンティングに関して評価を行った。MPLS-IX ルータの CsC 動作がない状態で、A-B 間および A-C 間に LSP を設定、B および C から同時にパケットを送信し、MPLS-IX ルータの LSR-MIB 上で、A 宛ラベルのカウンタが B, C 両者を合わせたパケット数とバイト数であることを確認した。その後、MPLS-IX ルータで CsC を動作させ、A-C 間、A-B 間 LSP にそれぞれ異なるラベルが配布された後、再び B および C から同時にパケットを送信し、MPLS-IX ルータの LSR-MIB 上で、それぞれ



のラベルカウンタが B, C それぞれから送信したバイト数であることを確認できた。

商用サービスとして運用される mpls ASSOCIO では、CsC を実装した Core LSR がこの仕組みによってアカウントングを行い、取得した情報を後述する Web インタフェースを用いて、実際にユーザへ提供している。

このように、MPLS-IX における相互接続に CsC を適用することにより、セキュリティ機能と LSR-MIB によるアカウントング機能を十分に活用し、MPLS-IX の課題を解決することができた。

なお、mpls ASSOCIO で明らかになった LSP ごとに LSP の任意の点でアカウントングする際の問題は、次世代 IX 研究会とともに IETF ヘフィードバックを行い、RFC4377<sup>11)</sup> に盛り込まれた。

### 3.3.5 MPLS-IX のサービス化と運用

MPLS-IX の実用化に向けて、運用やユーザの利便性についての課題解決も行われた。

従来の IX, 特に Ethernet による IX では、ユーザ同士が相互接続を行うために IX 側で特別な設定は必要ない。しかし、mpls ASSOCIO はラベル配布制御や Label Spoofing 防止のための機構を持つため、ユーザ間の相互接続に際して、IX 側でこれらの設定を行う必要がある。mpls ASSOCIO では、ユーザの利便性を損なうことなく、ユーザ同士の相互接続を円滑に行うことができるよう、新たなシステムを開発した。

図 10 に今回開発したシステムの Web インタフェースの例を示す。

mpls ASSOCIO では、ユーザの相互接続交渉から合意に至るまでのプロセスは、広域分散 IX サービスのプロビジョニングプロセスに含まれると考え、mpls ASSOCIO の機能の一部として、ユーザを支援するシステムを実現した。同システムでは、ユーザは相互接続したい他のユーザを選択し、LSP を申請する。ユーザは自身の情報を他のユーザに公開する、しないを選択することができる。申請を受けたユーザは相互接続の是非を判断し、許可、または拒否することができる。LSP 申請が許可されれば、その情報は LSP 設定を生成し MPLS-IX ルータに投入する社内プロビジョニングシステムを介して LSP が設定される。LSP は許可されてから 2 営業日以内に設定される。

また、上記の仕組みにより生成、設定された LSP 情報は、運用中の LSP として管理され、前述のアカウントングの仕組みを用いることにより、ユーザは LSP の状態やトラフィックなどの統計情報を確認することができる。図 11 に LSP ごとのトラフィックを



図 10 mpls ASSOCIO システム  
Fig. 10 The mpls ASSOCIO System.

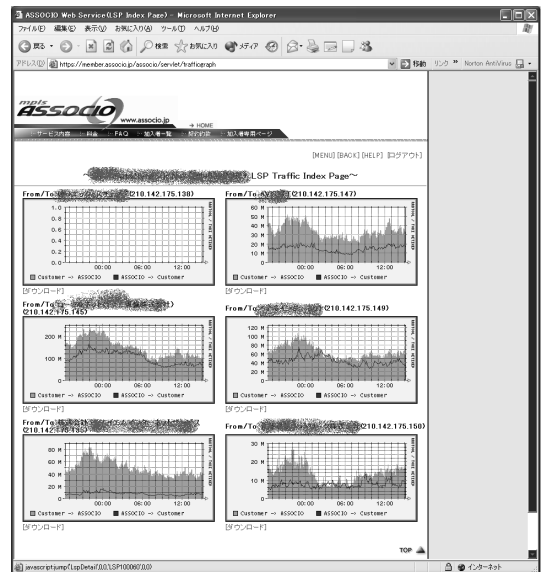


図 11 LSP ごとのトラフィックグラフ  
Fig. 11 A view of traffic graph in per LSP basis.

表示した例を示す。

### 3.4 商用サービス開始後の産学連携

前述のとおり、本研究プロジェクトの成果を受けて、日本テレコムは MPLS-IX を実用化、すでに商用サービスとして運用を行っている。その一方で MPLS-IX アーキテクチャでは実用化までの研究や実証実験が必要な機能が多数残されており、現在も商用化を行った通信事業者と学術系の共同研究が行われている。

階層型 IX の技術は商用化後も継続的に行われている共同研究の 1 つである。日本テレコムは、次世代 IX 研究会で共同研究を行うとともに、学術系の WIDE プロジェクトが構築・運営する DIX-IE とも接続、複数の IX が接続される階層型 IX の実証実験を共同で進めている。

#### 4. 考 察

本章では、本研究プロジェクトで実施した産学連携モデルによる共同研究のスキームについての考察を行う。本研究プロジェクトは、1999 年に従来の IX が持つ技術的な課題に着目し、新しい IX のアーキテクチャを提案する研究として開始した。その後、設計、実証実験を経て、2002 年に通信事業者が実用化を行うなど、一定の成果が得られたと評価できる。以下では、本研究プロジェクトの成功要因について考察する。

##### 4.1 産学連携による研究テーマの選定

本研究プロジェクトの成功要因の 1 つは、研究テーマが適切であったことである。これまで、IX がかかえる問題点について整理し、あらたな技術が求められていたこと、および新しい技術を用いてその解決策を提示したことが成功要因であると考えられる。

産学連携の面からは、研究テーマの選定時に民間企業によるニーズの掘り起こし、および学術組織によるその解決策の検討と提案が行われたことが大きい。

##### 4.2 コンソーシアムによる実証実験の実施

本研究プロジェクトでは、実用化に向けた実証実験を実施するにあたり、産学連携型のコンソーシアムを設立、MPLS-IX に関する (1) ユーザ (利用者)、(2) 提供者 (事業者)、(3) 機器の実装者 (ルータメカ) が参加した。ここで、ユーザは MPLS-IX の実現により広域分散 IX が利用できるようになること、提供者は新たな通信サービスの創出ができること、実装者は新サービスにあたって新たな市場が期待できること、などから多数の適切なプレーヤ (参加者) がそれぞれに利益が期待できる Win-Win (Win-Win-Win) の関係を保って実証実験を実施できたことが重要な成功要因であるといえる。

産学連携の面から考えると、学術組織が提案した技術および研究内容に対して、参加する民間企業それぞれが自らの目標を持って共同で研究を行ったことが成功要因の 1 つである。

次世代 IX 研究会では学術組織の役割も重要である。研究会および各ワーキンググループは、学術組織のコーディネーションにより運営されている。研究会の中で、学術組織は次のような役割を担い、有効に機能

した。

1. ビジョンと研究内容の提示
2. 研究活動の中立的なコーディネーション

たとえば、IX に適用する技術として MPLS はどうあるべきかというビジョンと、現在の MPLS に必要な具体的な技術開発を研究内容として提示するなど、学術組織が中心となって方向性を示した。この内容に基づく技術的視点での実証実験の実現は評価できる。

学術組織による中立的な立場からのコーディネーションも重要であった。コンソーシアムでは、各プレーヤとして民間企業が多数参加した。一般的に同業他社との間では利害の相反や秘密保持のため、共同での研究、実証実験の実施は難しいとされるが、本研究プロジェクトでは、学術組織が中立的な立場から推進役を担ったため、ビジネス的な利害関係から離れ、技術的な視点から、多数の民間企業が実証実験に参加することができた。たとえば、複数のルータメカが存在し、目的機能の実現可否がそれぞれの実装に左右される時、各メカの実装方法を理解したうえで、ユーザ、提供者の双方の要望事項に対する、より汎用的で合理的な実装方法を提案するなど、中立的かつ技術的な立場から機器の実装につなげ、新しいネットワークモデルの検証と評価をバランス良く実施できた。産学連携の面では、学術組織によるこのような中立的な立場からのコーディネーションが注目される。

##### 4.3 通信事業者による実用化

通信事業者による実用化に向けた研究活動でも産学の役割分担が行われた。

次世代 IX 研究会は学術組織が技術的な研究、実証実験の内容を決定し、機能面や性能面などを中心に研究活動を行った。そのため、たとえば、コンソーシアムによる研究活動の結果として MPLS-IX アーキテクチャによる LSP を用いたトラフィック交換や MPLS ルータの相互接続性などの機能面での成果が得られた。

通信事業者は本研究プロジェクトの中で MPLS-IX の実用化、商用化を進めた。ここでは、通信事業者として MPLS-IX をサービス化するための仕組み、たとえば、MPLS プロトコルに必要なユーザインタフェース技術やセキュリティの確保、運用性・安定性の向上、課金など、サービス上必要になる機能に関する研究や開発を行った。また、実用化に際して明らかになった技術的な課題について次世代 IX 研究会に対してフィードバックを行い、さらなる研究活動の推進に寄与した。産学連携の面から考えると、ここでは、学術組織が特に技術面から基本機能についての研究活動を実施、民間企業が運用、ビジネス面を考慮した研

究を実施したことが注目される。

## 5. おわりに

本論文では、MPLS-IX アーキテクチャの研究および実用化に関わる産学連携の研究開発プロジェクト（以下、本研究プロジェクトと呼ぶ）について、研究開発の内容および産学連携による共同研究の実施方法とその評価について述べた。

本研究プロジェクトでは、産学連携モデルによる共同研究を通して、MPLS-IX アーキテクチャの提案、設計、および実証実験による検証と評価を経て、MPLS-IXの実用化までを実施した。

本研究プロジェクトの産学連携モデルの特徴は「産学連携による研究テーマの選定」、「コンソーシアムによる実証実験の実施」、「通信事業者による実用化」の3つのフェーズで実施したことにある。

特に、コンソーシアムによる実証実験の実施にあたっては、多数の民間企業がコンソーシアムに参加した。コンソーシアムの参加者は、MPLS-IXに関わる(1)ユーザ（IX利用者）、(2)提供者（事業者）、および(3)機器の実装者、の3種類に分類される。各参加者は、自身のメリットを享受するために、コンソーシアムに参加し、共同で実証実験および検証・評価を実施した。また、コンソーシアムによる実証実験の実施にあたっては、学術組織の役割も大きい。実証実験では、学術組織が技術的な方向性、およびビジョンを提示し、研究内容や実証実験の内容を決定した。さらに、学術組織の中立的な立場でのコーディネーションにより、多数の利益相反する民間組織の共同実験への参加が実現したことも重要な意味を持つ。

MPLS-IX アーキテクチャに関する研究は現在も継続的に行われているが、今後も産学連携による研究活動の実施、および民間の通信事業者による実用化、およびそこで明らかになった課題のフィードバックを通して、さらなる技術開発を推進していくことを目指している。

謝辞 本研究プロジェクトの実施にあたり、多くの方や組織の多大なる協力をいただいた。ここに記して深い感謝の意を伝えたい。以下、敬称は略させていただく。

次世代IX研究会の参加者、および参加組織には、実証実験のご参加いただくとともに貴重なご意見をいただいた。三菱総合研究所には事務局としてご支援をいただいている。このほか、本研究プロジェクトにあたり貴重なご意見、ご支援をいただいた皆様に感謝する。

本活動は TAO I121-401 の支援を受けた。

## 参考文献

- 1) Nakagawa, I. Hayashi, E. and Takahashi, T.: Direction of Next Generation Internet eXchanges, *Trans. Communications Special Issue on Internet Technology, IEICE Trans. Communications*, Vol.E84-B, No.8 (Aug.2001).
- 2) 中川郁夫, 江崎 浩, 菊池 豊, 永見健一: MPLS を用いた広域分散 IX の実現, *IP SJ Journal*, Vol.43, No.11 (2002).
- 3) Nakagawa, I., Esaki, H., Kikuchi, Y. and Nagami, K.: Design of Next Generation IX Using MPLS Technology, *IP SJ Journal*, Vol.43, No.11 (2002).
- 4) 菊池 豊: 次世代 IX 研究会 (distix) における相互接続試験, MPLS Japan 2002 発表資料 (2002).
- 5) 菊池 豊ほか: 異機種ルータの相互接続試験活動, 信学技報 SS2006-4, Vol.106, No.15, pp.19-25 (2006). ISSN0913-5685.
- 6) Rosen, E., et al.: Multiprotocol Label Switching Architecture, RFC3031 (Jan. 2001).
- 7) Rosen, E., et al.: MPLS Label Stack Encoding, RFC3032 (Jan. 2001).
- 8) Andersson, L., Doolan, P., Feldman, N., Fredette, A. and Thomas, B.: LDP Specification, RFC3036 (Jan. 2001).
- 9) Awduche, D., et al.: RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels, RFC3209 (Dec. 2001).
- 10) Rosen, E. and Rekhter, Y.: BGP/MPLS IP Virtual Private Networks (VPNs), RFC4364 (Feb. 2006).
- 11) Nadeau, T., et al.: Operations and Management (OAM) Requirements for Multi-Protocol Label Switched (MPLS) Networks, RFC4377 (Feb. 2006).
- 12) Srinivasan, C., et al.: Mutiprotocol Label Switching (MPLS) Router (LSR) Management Information Base (MIB), RFC3813 (June 2004).
- 13) 永見健一, 中川郁夫, 菊池 豊, 江崎 浩: White Paper: MPLS-IX—MPLS を用いた新しい IX アーキテクチャ. <http://www.distix.net/mpls-ix/doc/whitepaper-0.01.pdf>

(平成 18 年 5 月 22 日受付)

(平成 18 年 11 月 2 日採録)



松嶋 聡

ソフトバンクテレコム．1991年  
 間電波工業高等専門学校電子工学科  
 卒業．同年日本テレコム株式会社入  
 社．伝送・交換・専用回線運用などキャ  
 リア業務全般を経たのち，2000年よ

り MPLS に関わる技術検証・評価から IP-VPN サービスの設計・開発，2002年には広域分散 IX 機能を兼ね備えた mpls ASSOCIO の開発に携わる．現在は MPLS を用いたサービス設計・開発・運用支援に従事．



菊池 豊

高知工科大学．1992年東京工業大  
 学大学院博士課程単位取得退学．同  
 年同大学情報工学科助手．1997年  
 高知工科大学情報システム工学科助  
 教授．2004年より高知工科大学総

合研究所助教授，同時に（有）ナインレイヤーズを設立，同社取締役役に就任．地域指向型のインターネット技術の研究を行うと同時に，地域情報化を支援する活動に従事．博士（工学，東京工業大学，1994）．



中川 郁夫（正会員）

インテック・ネットコア．1993年  
 東京工業大学大学院総合理工学研  
 究科システム科学専攻修了．同年株  
 式会社インテック入社．同社研究所  
 でインターネットの経路制御および

MPLS に関する研究に従事．2002年株式会社インテック・ネットコアを設立，同社取締役役に就任．次世代インターネットに関する研究に従事．博士（情報理工学，東京大学，2005）



江崎 浩

東京大学大学院情報理工学系研究  
 科．1987年九州大学大学院電子工学  
 専攻修士課程修了．同年4月（株）  
 東芝入社．総合研究所にて ATM  
 ネットワーク制御技術の研究に従事．

1990年より2年間米国ニュージャージー州ベルコア社，1994年より2年間米国ニューヨーク市コロンビア大学 CTR（Centre for Telecommunications Research）にて客員研究員．高速インターネットアーキテクチャの研究に従事．1994年ラベルスイッチ技術のもととなるセルスイッチルータ技術を IETF に提案し，その後，セルスイッチルータの研究・開発・マーケティングに従事．IETF の MPLS 分科会，IPv6 分科会では，積極的に標準化活動に貢献している．1998年10月東京大学大型計算機センター助教授，2001年4月東京大学大学院情報理工学系研究科助教授．2005年4月より現職（東京大学大学院情報理工学系研究科教授），WIDE プロジェクトボードメンバー．MPLS-JAPAN 代表，IPv6 普及・高度化推進協議会専務理事，JPNIC 理事．工学博士（東京大学）．



永見 健一

インテック・ネットコア．1992年  
 東京工業大学大学院理工学研究科修  
 士課程修了．同年株式会社東芝入社．  
 IETF MPLS WG で標準化活動を行  
 い，CSR および MPLS に関する

RFC を提出．2002年株式会社インテック・ネットコア 主席研究員．現在，同社で MPLS および次世代ネットワーク研究に従事．博士（工学，東京工業大学，2001）．