

Title	マルチプロトコルラベルスイッチングを用いたマルチキャストに関する研究
Author(s)	小柏, 伸夫
Citation	
Issue Date	2001-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/1451">http://hdl.handle.net/10119/1451</a>
Rights	
Description	Supervisor:篠田 陽一, 情報科学研究科, 修士

# 修士論文

## マルチプロトコルラベルスイッチングを用いた マルチキャストに関する研究

指導教官 篠田陽一 助教授

審査委員主査 篠田陽一 助教授

審査委員 落水浩一郎 教授

審査委員 日比野靖 教授

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科情報システム学専攻

910021 小柏伸夫

平成13年2月15日

## 要旨

インターネットの爆発的な普及とインターネット上における情報流通形態の多様化に伴い、一対多、多対多の通信形態である「マルチキャスト型通信」への関心が高まりつつある。これまでもマルチキャスト型通信に関する様々な研究や開発が行われてきた。現在では、ネットワーク資源を効率的に利用できるマルチキャスト型通信技術として、IP層でマルチキャスト型通信を実現可能なIPマルチキャストが広く知られている。マルチキャストアプリケーション要求には、通信時の種々の信頼性、受信者群における通信の公平性、通信品質など様々なものがあり、現在では、IPマルチキャストのフレームワークに沿った様々なマルチキャスト技術が提案されている。しかしながら、IPマルチキャストのフレームワークは一枚岩の経路制御機構を前提としており、種々のマルチキャストアプリケーション要求を統括的に充足することは極めて困難であると言える。

一方、インターネットの基本要素であるルータにおけるパケット転送処理の負荷を軽減できる技術としてマルチプロトコラベルスイッチング技術が近年注目を浴びている。マルチプロトコラベルスイッチング技術は、ルータにおける処理の軽減という側面だけでなく、経路制御部とパケット配送部の明確な分離という側面も注目されつつある。本研究では、MPLSにおける経路制御部とパケット配送部の分離という側面が潜在的に持っている、新しいネットワークアーキテクチャの構築の可能性に注目した。

本研究は、マルチキャスト型配送における種々の要求を統括的に吸収できるマルチキャスト配送機構の実現を目的とする。本論文では、種々のアプリケーションの要求を統括的かつ容易に吸収できる多経路制御面型マルチキャストを提案し、マルチプロトコラベルスイッチングを用いた多経路制御面型マルチキャストの実現に論じる。

# 目次

1	はじめに	1
2	研究の背景	3
2.1	インターネットにおけるマルチキャスト配送	3
2.2	マルチキャスト配送技術	4
2.2.1	マルチキャスト経路制御プロトコル	6
2.2.2	マルチキャストトランスポートプロトコル	7
3	研究の目的	9
3.1	マルチキャスト配送の複数の要求の共存	9
3.1.1	マルチキャスト配送技術への要求事項	10
3.1.2	経路制御機構への依存性	11
4	多経路制御面型マルチキャスト (MRP-MC) モデルの提案	15
4.1	MRP-MC モデルの目的	15
4.2	MRP-MC モデルへの要求事項	16
4.3	MRP-MC モデルの詳細	17
4.3.1	経路制御面の定義	17
4.3.2	多経路制御面の導入	19
4.4	MRP-MC モデルの応用	20
4.5	MRP-MC モデルの実現に必要な技術的特性	21
5	マルチプロトコルラベルスイッチング (MPLS) 技術	23

5.1	MPLSの概要	24
5.1.1	同一転送クラス(FEC)の導入	25
5.1.2	入口ノードにおけるFEC分類動作の集約	26
5.2	MPLSの特徴	27
5.2.1	経路制御機構とパケット転送機構の分離	27
5.2.2	ラベルマッピング配布プロトコル	28
5.3	マルチキャスト配送対応の現状	29
<b>6</b>	<b>MRP-MCの設計と実現</b>	<b>33</b>
6.1	実現方法の概要	33
6.2	ラベルマッピング配布機構に関する設計	35
6.2.1	要求事項	36
6.2.2	設計	37
6.3	配送部分の設計	40
6.3.1	要求事項	40
6.3.2	設計	43
6.4	実現	45
6.4.1	MPLS実装	45
6.4.2	動作実験	47
<b>7</b>	<b>今後の課題</b>	<b>48</b>
7.1	モデルに関する再考察	48
7.1.1	MRP-MCの動作に関する考察	49
7.1.2	MRP-MCの制御に関する考察	49
7.1.3	プレーン管理手法	50
7.2	実装	51
7.2.1	AYAME実装のマルチキャスト対応化	51
7.2.2	ラベル配布プロトコルツールキット	51
	謝辞	52



# 目 次

2.1 ユニキャストを利用したマルチキャスト型通信	4
2.2 ネットワークにサポートされたマルチキャスト型通信	5
3.1 アプリケーション毎に異なる経路制御要求	14
4.1 経路制御機構とパケット転送機構の関係	18
4.2 伝統的なマルチキャストモデルとの比較	19
4.3 ドメインの内部機構の隠蔽と外部へ提供する機能	20
5.1 ホップバイホップのパケット転送	25
5.2 ラベルスイッチングによるパケット転送	26
5.3 MPLSにおけるラベルスワッピング動作	27
5.4 MPLSにおける経路制御部分と配送部分の分離	29
5.5 MPLSのマルチキャスト対応に関連するインターネットドラフトの分類	30
6.1 MPLSを用いたMRP-MCルータ	34
6.2 MPLSを用いたMRP-MCネットワーク	36
6.3 ユニキャスト転送	40
6.4 マルチキャスト配送	41
6.5 MPLSマルチキャスト出力パターン	43
6.6 拡張NHLFEを用いたマルチキャスト配送	45

# 表 目 次

3.1	マルチキャストアプリケーションの要求定義	13
5.1	FEC 要素	31
5.2	種々のラベル配布プロトコル	31
5.3	MPLS/Multicast 関連 I-D の記述範囲	32
6.1	MPLS の実装	46



# 第 1 章

## はじめに

インターネットにおける通信の形態は、一対一の通信形態である「ユニキャスト型通信」と、一対多あるいは多対多の通信形態である「マルチキャスト型通信」に大きく分けることができる。

近年におけるインターネットの爆発的な普及と情報流通形態の多様化に伴い、マルチキャスト型通信への関心が高まりつつある。これまでも、マルチキャスト技術に関する多くの研究、開発が進められてきた。現在では代表的なマルチキャスト技術として、IP 層において効率的なマルチキャスト型通信を実現可能な IP マルチキャストが広く知られている。IP マルチキャストは、マルチキャスト型通信におけるネットワーク資源の利用効率の向上を主目的としたフレームワークを提供しており、現在ではこのフレームワークに適合する種々のマルチキャスト技術が提案されている。しかしながら、マルチキャスト型通信を評価するための尺度は「ネットワーク資源の利用効率」だけでなく受信者間における通信の公平性、通信品質、通信の信頼性など様々なものが存在する。近年では個々のアプリケーションの要求に適した特徴を持ったマルチキャスト型通信の要求が高まりつつあり、これに伴い IP マルチキャストのフレームワークに適合したうえでさらに様々な要求に対応した種々のマルチキャスト技術が提案されている。ところが、IP マルチキャストのフレームワークは基盤となるパケット配送部が一枚岩の機構であり、これが種々の要求を単一のマルチキャスト配送機構で統括的に充足することを困難にしている。現在ではこれが、マルチキャスト配送を行ううえでの新たな問題として顕在化しつつある。

一方で、インターネットの爆発的な普及はインターネットにおける通信の性能に関する

要求も高めてきた。これまで、インターネットにおける通信の性能を向上させるための研究や開発が盛んに行われてきた。現在では、インターネットの通信性能を向上させる技術としてラベルスイッチング技術が注目を浴びている。中でも、ルータの処理の高速化だけでなくトラフィックエンジニアリングや、種々のQoS(Quarity of Service)要求への対応を可能にするマルチプロトコルラベルスイッチング (MPLS:MultiProtocol Label Switching) 技術が注目を集めている。MPLS技術はルータにおけるパケット転送処理の高速化の点で注目されてきたが、MPLS技術のもう一つの大きな特徴として、経路制御機構とパケット転送機構を明確に分離した点が挙げられる。

本研究では、マルチキャスト型配送への種々の要求を統括的に吸収できるマルチキャスト配送機構として多経路制御面型マルチキャスト (MRP-MC:Multi Routing Plane MultiCast) を提案する。さらにMPLS技術の経路制御機構とパケット転送機構の分離という点に着目し、MPLS技術を用いて多経路制御面型マルチキャストを実現していく。

## 第 2 章

### 研究の背景

本章では、本研究の背景について論じる。特に、現在実現されているインターネットにおけるマルチキャスト技術、マルチキャスト技術への要求事項等について議論する。

#### 2.1 インターネットにおけるマルチキャスト配送

インターネット上でマルチキャスト型通信を実現するための技術をマルチキャスト技術と呼ぶ。現在では様々なマルチキャスト技術の研究および開発が推進されている。

一般的に、一対一の通信をユニキャスト型の通信、一対多あるいは多対多の通信をマルチキャスト型の通信と呼ぶが、ユニキャスト型の通信と比較してマルチキャスト型の通信において最も考慮しなければならない点は、「ネットワーク資源の利用効率」である。ユニキャスト型通信が既に実現できていることを前提とした場合の、マルチキャスト型通信の最も簡単な実現方法は、送信者から各受信者へのユニキャスト型の集合としてマルチキャスト型通信を実現する方法である(図2.1)。しかしながらこの方法では、送信者は受信者の数と同じ数の情報を送信しなければならないので効率的ではない。理想的なマルチキャスト型の通信は、送信者が一度だけ送信した情報を各受信者が適切に受信できることである。

アプリケーション間の通信時に消費する具体的な資源としては、ネットワークの帯域幅や、送信元ホストのメモリ空間、ルータの計算能力など様々なものがある。実際に、メモリ空間や計算能力などといったアプリケーション層における資源の利用効率を向上させる

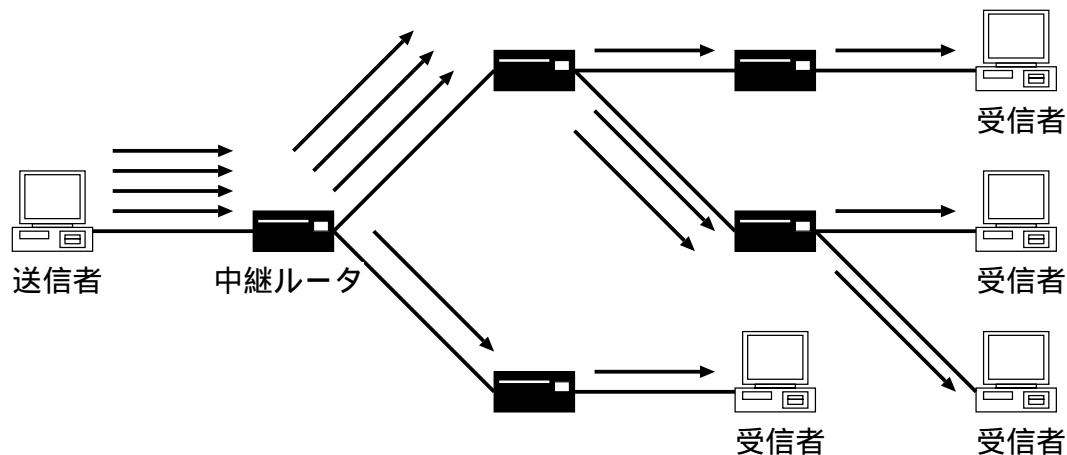


図 2.1: ユニキャストを利用したマルチキャスト型通信

ためのマルチキャスト型配送技術として、ユニキャスト型の通信を受信者と同じ数だけ用いる方法も利用されている。しかしながら、それらの技術はあくまで受信者側ホストのメモリ空間や計算能力等の資源の効率的利用を目的としているだけであり、帯域幅等のネットワーク資源の効率的利用を目的としているわけではない。

帯域幅などのネットワークに関する資源の利用効率を向上させるためには、ネットワークが持つ機能としてマルチキャスト型配送をサポートする必要がある。ネットワークが機能としてマルチキャスト型配送をサポートした場合のマルチキャスト型配送を図 2.2 に示す。インターネットにおけるマルチキャスト技術の主目的は、「ネットワーク資源の利用効率の向上」を、ネットワークが持つ機能としてサポートすることであると言える。

## 2.2 マルチキャスト 配送技術

マルチキャスト型配送の手法 現在、インターネット上でのマルチキャスト型の通信は、送信者主導型と受信者主導型の二つのタイプに分けて議論されることが多い。

### 1. 送信者主導型

送信者主導型のマルチキャスト配送とは、送信者が全受信者のネットワーク上で識別子(すなわち受信者のホストアドレス)を知り、送信者がマルチキャスト配送の

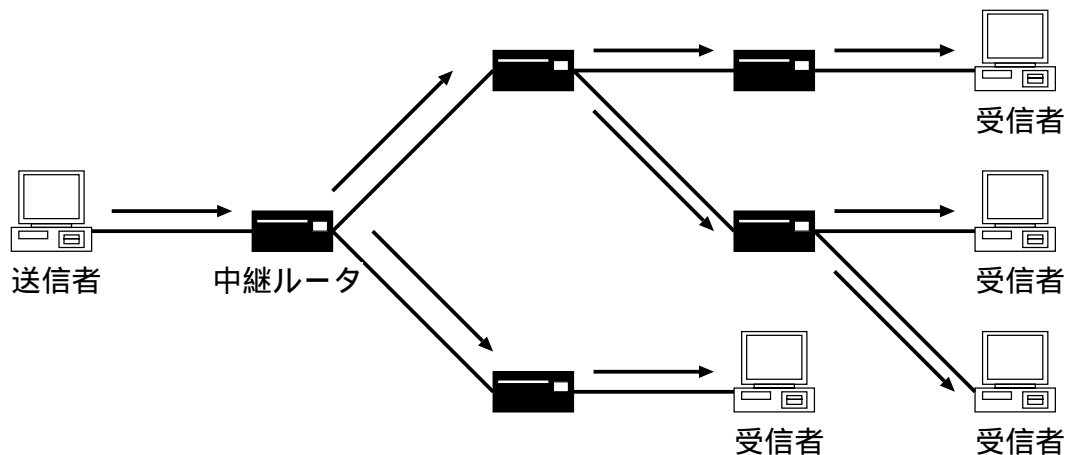


図 2.2: ネットワークにサポートされたマルチキャスト型通信

参加者を管理するという手法である。この方法は、送信者が全受信者の参加、離脱情報を管理しなければならないので、大規模なマルチキャスト配送には不向きであるという特徴がある。

## 2. 受信者主導型

受信者主導型のマルチキャスト配送とは、グループの概念を導入し、送信者はグループに向けて送信、各受信者は自律的にグループに参加、グループから離脱するという手法である。送信者は、受信者のアドレスを知る必要はなく、受信者の参加や離脱も管理しない。この手法ではグループの識別子はどのようなものであっても構わない。現在、このようなタイプのマルチキャスト型配送を IP 層でサポートするために、IP のアドレス空間の一部がマルチキャストグループアドレスと名付けられマルチキャストグループの識別子として割り当てられている。

**配送木の利用** ネットワークの機能として効率的なマルチキャスト型配送をサポートする配送手法としては、送信者をルート、受信者をリーフ、中継ルータをノードとする配送木を用いて送信する方法が一般的である。ネットワーク上で配送木を構築するためのアルゴリズムは様々なものが提案されているが、ここではその詳細には触れない。

何らかのアルゴリズムに基づいてあらかじめ構築された配送木を用いて受信者主導型のマルチキャスト型通信を実現する技術として最も広く知られているのが IP マルチキャ

スト [6] である。IP マルチキャストは、IP 層におけるマルチキャスト型配送を実現するためのフレームワークを提供しており、その構造は

- 配送木制御部
- パケット転送制御部

に大きく分けることができる。

配送木制御部の目的は、送信者をルート、受信者群をリーフとする配送木を確立することである。配送木の確立にはマルチキャスト経路制御プロトコルが用いられる。

一方、パケット転送制御部の目的は、マルチキャストトランスポートプロトコルを用いて、あらかじめ確立された配送木に沿ってデータのマルチキャスト配送を行うことである。一部のマルチキャスト技術には、配送木制御部とパケット転送制御部を統括的に扱っているものもあるが、IP マルチキャストの技術群に属する多くのマルチキャスト技術は上記の枠組みにおおよそしたがっている。

### 2.2.1 マルチキャスト経路制御プロトコル

現在、種々のアルゴリズムに基づいたマルチキャスト経路制御プロトコルが実現されている。代表的なマルチキャスト経路制御プロトコルを以下にまとめる。

- DVMRP (Distance-Vector Multicast Routing Protocol) [19]

リバースパスマルチキャストアルゴリズムを用いたマルチキャスト経路制御プロトコル。距離ベクトルルーティングを必要とする。

- MOSPF (Multicast Open Shortest Path First) [14] [13]

ユニキャスト用の経路制御プロトコルである OSPF (Open Shortest Path First) をマルチキャスト対応拡張したもの。

- PIM (Protocol-Independent Multicast) [7]

ユニキャスト用の経路制御プロトコルに非依存なマルチキャスト経路制御プロトコル。疎に分散した受信者群用の PIM-SM (PIM Sparse Mode) と、密に分散した受信者群用の PIM-DM (PIM Dense Mode) がある。

- CBT (Core-Based Trees) [4]

対規模性を重視したマルチキャスト経路制御プロトコル。PIM-SM と似た機能を提供するが、PIM-SM と比較して、機能を削減することでルータにかかる負荷を軽減している。

## 2.2.2 マルチキャストトランスポートプロトコル

現在、様々なマルチキャストトランスポートプロトコルが実現されている。特に高信頼マルチキャスト技術群においては、非常に多くのマルチキャストトランスポートプロトコルが提案されているが、ここでは一つ一つの技術の解説は割愛する。代表的なマルチキャストトランスポートプロトコルを以下にまとめる。

- RTP (Real-Time Transport Protocol)

到着順序保証、タイムスタンプ機能、ストリーム型配信機能を提供する汎用性のあるマルチキャストトランスポートプロトコル。必要に応じてペイロード形式を定義することで、様々な形式のデータを配送できる。

- RTCP (Real-Time Control Protocol)

RTP のデータ伝送を制御するためのマルチキャストトランスポートプロトコル。

- RTSP (Real-Time Streaming Protocol)

ストリーミングに特化した、アプリケーションレベルのマルチキャストトランスポートプロトコル。

- 高信頼マルチキャストプロトコル

種々の評価尺度に関する信頼性の高さを維持したマルチキャスト配送を実現するためのマルチキャストトランスポートプロトコル群。具体的なプロトコルを以下に示す。

- AFDP (Adaptive File Distribution Protocol)
- LBRM (Log-Based Receiver-Reliable Multicast)
- LGMP (Local Group Multicast Protocol)

- MFTP (Multicast File Transfer Protocol)
- MTP-2 (Multicast Transfer Protocol Version 2)
- RAMP (Reliable Adaptive Multicast Protocol)
- RBP (Reliable Broadcast Protocol)
- RMP (Reliable Multicast Protocol)
- RMTP (Reliable Multicast Transport Protocol)
- RMTP (Reliable Multicast Transport Protocol) <sup>1</sup>
- SCE (Single Connector Emulation)
- SRM (Scalable Reliable Multicast)
- TMTP (Tree-Based Multicast Transport Protocol)
- XTP (Express Transport Protocol)
- RMF (Reliable Multicast Framework)
- RMFP (Reliable Multicast Framing Protocol)

---

<sup>1</sup>同名のマルチキャストトランスポートプロトコルが存在するが、異なるものである。



## 第 3 章

### 研究の目的

本章では本研究の目的について論じる。特に、インターネット上でのマルチキャスト配送に関して、近年顕在化しつつある問題とその解決策に焦点をあてて議論する。

#### 3.1 マルチキャスト 配送の複数の要求の共存

近年におけるインターネットの爆発的な普及は、

1. ストリーミングコンテンツ、アプリケーションレベルのプッシュ型情報取得技術、リアルタイム音声通信などの出現によるインターネットにおける情報流通形態の多様化
2. 広帯域幅の伝送媒体、低遅延の伝送媒体などの出現に起因する伝送技術および伝送媒体の多様化

を招いた。

これはアプリケーションからの新しい要求と伝送技術および伝送媒体の発展、すなわち上位層からの要求と下位層の技術の発展と言える。これらは必然的に、それらの中間に位置するミドルウェアとなる技術群への新しい要求を産み出してきた。その要求とは

- 情報配送方法の多様化

である。本研究の目的も、広い意味では、多種多様な情報配送技術に柔軟に対応できるパケット配送機構の実現とも言える。

### 3.1.1 マルチキャスト 配送技術への要求事項

インターネットは当初、「届くこと」すなわち到達性を重視していた。しかしながら、近年においては、届くことだけでなく「ある条件を満たして届くこと」が重視されつつある。

ユニキャスト型の配送においては、到着順序保証、流量制御など通信の信頼性や品質に関する様々な研究が古くから行われてきた。しかしながら、マルチキャスト型の配送には「受信者が多数」というユニキャスト型配送にはない大きな特徴が存在する。そのため、「マルチキャスト配送においてある条件を満たして届くこと」は極めて複雑な問題として位置付けられてきた。

マルチキャスト配送において、ある条件を満たした配送を実現するための努力としては、既存のマルチキャスト技術、すなわちIP マルチキャスト技術の拡張などの研究が試みられてきた。これらの研究成果による代表的な技術群として「高信頼マルチキャスト技術」が広く知られている。しかしながら、高信頼マルチキャスト技術は、ある条件を満たしたマルチキャスト配送を行うための技術群であり、個々の高信頼マルチキャスト技術はそれぞれある評価尺度に特化したものである。つまり、汎用的な高信頼マルチキャスト技術というものは存在せず、個々の高信頼マルチキャスト技術はそれぞれ特定の評価尺度に特化した信頼性をマルチキャスト型配送に提供するための技術であるという理解が一般には正しい。

インターネットを介してマルチキャスト配送を行うアプリケーションをマルチキャストアプリケーションと呼ぶ。現在では多数のマルチキャストアプリケーションが存在する。それらのアプリケーションは理想的には配送経路の制御からデータの転送手法までアプリケーション毎に独自の制御を行いたい、というのが本音であると言っても過言ではない。

マルチキャストアプリケーションからの要求は極めて多種多様である。[9]は、マルチキャストアプリケーションの構築における留意点を示している。以下に[9]で示されているマルチキャストアプリケーションにおける留意点をまとめる。

- アプリケーションは全ての受信者を知らなければならないか
- アプリケーションは特定の受信者を区別をしなければならないか
- アプリケーションは受信者が多数でも対応できなければならないか

- アプリケーションは全受信者に信頼性を保証しなければならないか
- アプリケーションはデータの到着順序を保証しなければならないか
- アプリケーションは低遅延でデータを伝送しなければならないか
- アプリケーションは特定の時間制約を守ってデータを伝送しなければならないか
- アプリケーションは各受信者と折衝しなければならないか
- アプリケーションデータフローがときどき途切れることが許されるか
- アプリケーションは”The Internet”上で動作できなければならないか
- アプリケーションは単方向伝送媒体上(例えば衛星を用いた伝送)でも動作できなければならないか
- アプリケーションはセキュアな配送をサポートしなければならないか

また [3] では一般的なマルチキャストアプリケーションではなく、高信頼マルチキャスト技術に焦点を絞った要求事項を定性的に定義している。[3] で示されている要求事項を 3.1 にまとめる。

これらの要求事項は、近年のインターネットにおいて重要な点である「ある条件を満たして届くこと」における「ある条件」にあたるものである。

### 3.1.2 経路制御機構への依存性

これまでに挙げたマルチキャストアプリケーション要求を IP マルチキャストのフレームワークと照らし合わせて見ると、IP マルチキャストのトランスポート部だけでなく、経路制御部で解決する方法も考えられる。

経路制御という点に着目した一例として、

- 遅延の低さを要求するアプリケーションは、できる限り遅延の低い伝送経路、伝送媒体を利用したい
- 巨大なデータを転送するアプリケーションはできる限り帯域幅の広い伝送経路、伝送媒体を利用したい

といった例が挙げられる(図 3.1)。

ところが、従来のインターネットにおいてはこれまでに挙げた種々の評価基準はパケットの到達性よりも低い優先順位として考えられてきた。また、IP マルチキャストのフレームワークにおいては、経路制御部は一枚岩の構造となっており、これが経路制御でマルチキャストアプリケーション要求に対応することの足枷となっているのが現状であった。種々の情報流通形態、種々の伝送媒体が実現されつつある現在では、マルチキャスト配送において上記の評価基準を考慮することは到達性を考慮することと同様、重要な評価基準となりつつある。

そこで本研究では、マルチキャスト配送において経路制御機構の選択に自由度を与え、マルチキャスト配送に関する種々の要求を統括的に吸収できるマルチキャスト配送機構の実現を目的とする。

要求項目	具体的な意味
パケット損失に関する信頼性	一回のトランザクションにおいて一つのパケットも失われてはいけないか否か、成功するまで再送信するか、許容される最大損失率など
構成要素に関する信頼性	通信の開始処理として許容される時間、故障から復帰までの平均時間、回線が切断されたと判断される時間
順序保証	タイムスタンプで保証、生起順序で保証、因果関係で保証
実時間性	アプリケーションが動作可能な最低帯域幅、許容される遅延時間、帯域幅の変動率、複数ストリーム間の同期など
セッション管理	途中参加、途中離脱を許容するか否か、データ送信の開始、終了時間など
セッショントポロジー	許容される最大送信者数、最大受信者数
ディレクトリ	ディレクトリ要素の書き換えタイミングの制約の定義
セキュリティ	認証の堅牢性、サービス妨害にかかるコスト、通信の秘匿性、通信の公平性など
セキュリティ力学	システムが危機状態に陥る平均時間、危機状態を検知するために要する平均時間、危機状態から復帰するために要する平均時間
支払いと課金	通信にかかるコストの上限、単位時間あたりに課金されるコストの上限、通信で課金されるデータサイズ毎のコストの上限

表 3.1: マルチキャストアプリケーションの要求定義

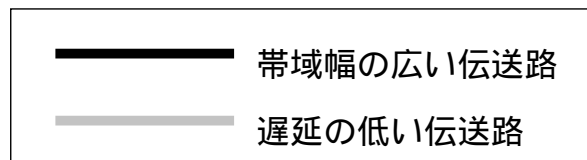
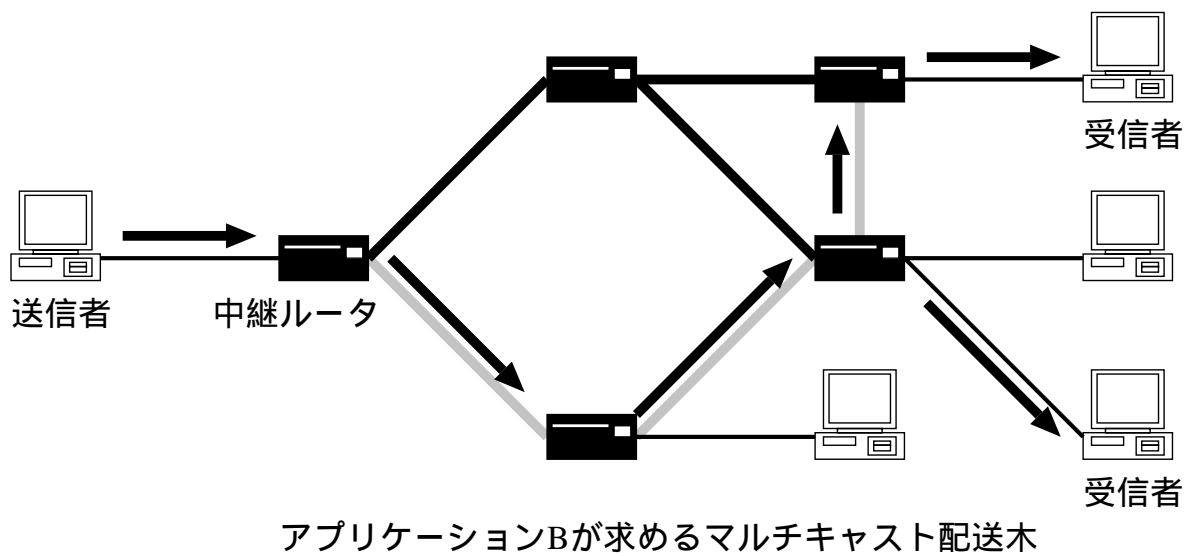
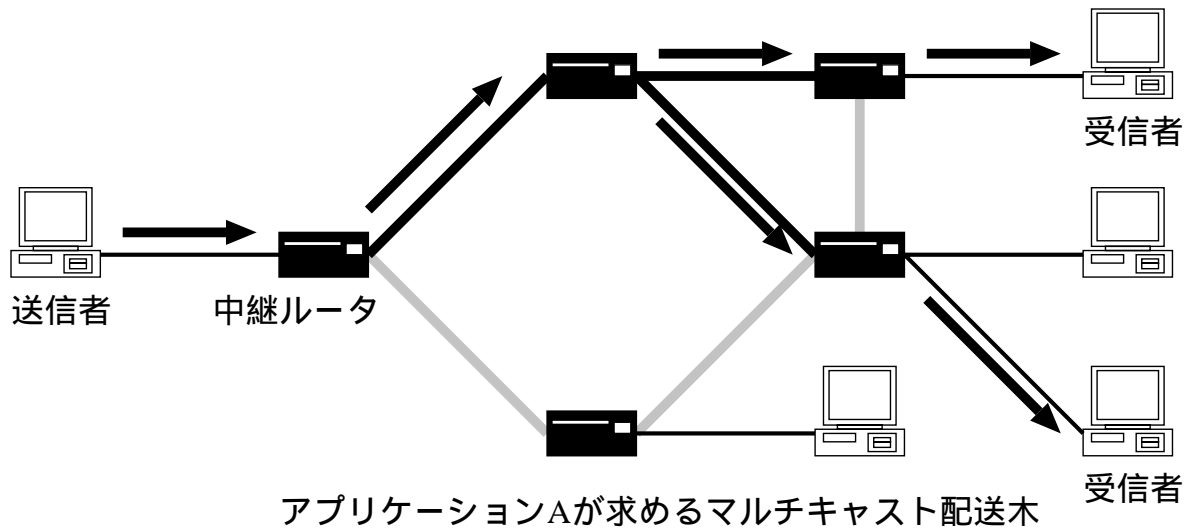


図 3.1: アプリケーション毎に異なる経路制御要求

## 第 4 章

# 多経路制御面型マルチキャスト (MRP-MC) モデルの提案

本研究では、マルチキャスト技術に対する種々の要求を統括的に吸収できるマルチキャスト配送機構として多経路制御面型マルチキャスト (MRP-MC:Multi Routing Plane MultiCast) モデルを提案する。本章では、MRP-MC モデルの目的、概要、詳細について議論していく。

### 4.1 MRP-MC モデルの目的

MRP-MC モデルの目的は、

- マルチキャスト配送に対する複数の要求を統括的かつ容易に充足すること

である。

上記の目的を遂行するために、本研究では経路制御面の概念を導入し、経路制御面の集合である多経路制御面を扱うマルチキャスト配送機構としてMRP-MCを提案する。

経路制御面とは、同一の規則でパケットの転送を制御する複数のルータによって構成される仮想的な面である。MRP-MC モデルでは複数の経路制御面を統括的に制御する。この複数の経路制御面を多経路制御面と呼ぶ。多経路制御面における各経路制御面をそれぞれ異なるマルチキャスト配送要求に対して適用することで、MRP-MC モデルは「複数のマルチキャスト配送要求の統括的な扱い」を実現している。

インターネットにおける任意の経路制御プレーンの形式的記述、および同形式記述によって表現される任意の経路制御プレーンのMPLSによる実現は[26] および[25]で論じられている。本稿で提案するMRP-MCは、[26]において論じられている機構のマルチキャスト実装として位置付けられる[23]。

MRP-MCモデルでは、その機構は外部観測的には従来のマルチキャスト配送機構と同様、「送信元ホストからのパケットをある規則に従って受信者群へ配送する」という機能を提供する。

MRP-MCモデルと従来のマルチキャスト配送モデルの差は、パケットの転送を高い視点から見渡したときに明確になる。従来のIPマルチキャストではパケットは基本的に単一の配送木上で転送されるのに対して、MRP-MCではパケットはそれぞれのパケットの特徴に応じて異なる配送木/配送経路上で転送される。

## 4.2 MRP-MCモデルへの要求事項

MRP-MCモデルの要求事項を以下にまとめる。

1. 単一のネットワークドメイン内部において複数の経路制御機構を動作させることができ、複数の経路制御機構によって生成された経路制御情報の整合性を、各ルータにおいて維持すること
2. 各経路制御機構は、同一のネットワークドメイン内で動作する他の経路制御機構に依存しないこと
3. パケットの種類や特徴毎に経路制御面を使い分けられること
4. ネットワークドメイン内部の機構はドメイン外部からは隠蔽されていること
5. ネットワークドメイン外部から入力された、マルチキャスト配送すべきパケットに対して、ネットワークドメイン内部では内部のポリシーに基づき、適切にネットワークドメイン外部にマルチキャスト配送できること



## 4.3 MRP-MC モデルの詳細

本節では、MRP-MC モデルの詳細について議論する。まず、本研究で導入する経路制御面を詳細に定義する。次に経路制御面を複数用いた多経路制御面について解説し、従来のマルチキャスト配送モデルと多経路制御面型マルチキャストモデルを比較し、多経路制御面型マルチキャストの応用について解説する。最後に、多経路制御面型マルチキャストの実現に必要な技術的特性について議論する。

### 4.3.1 経路制御面の定義

通常ルータは、パケットが入力された際、そのパケットに付随する情報を検査しルータ自身が持っている経路制御情報と照合することによってそのパケットに対する転送挙動を決定する。経路制御情報とは、各ルータがパケットを転送する際に、そのパケットに対してどのような処理を施すべきかを決定するための情報群である。具体的な転送挙動としては、

- あるパケットを次にどの隣接ルータに転送すべきか、
- あるパケットをどのインターフェースに出力すべきか、
- あるいは破棄すべきか、

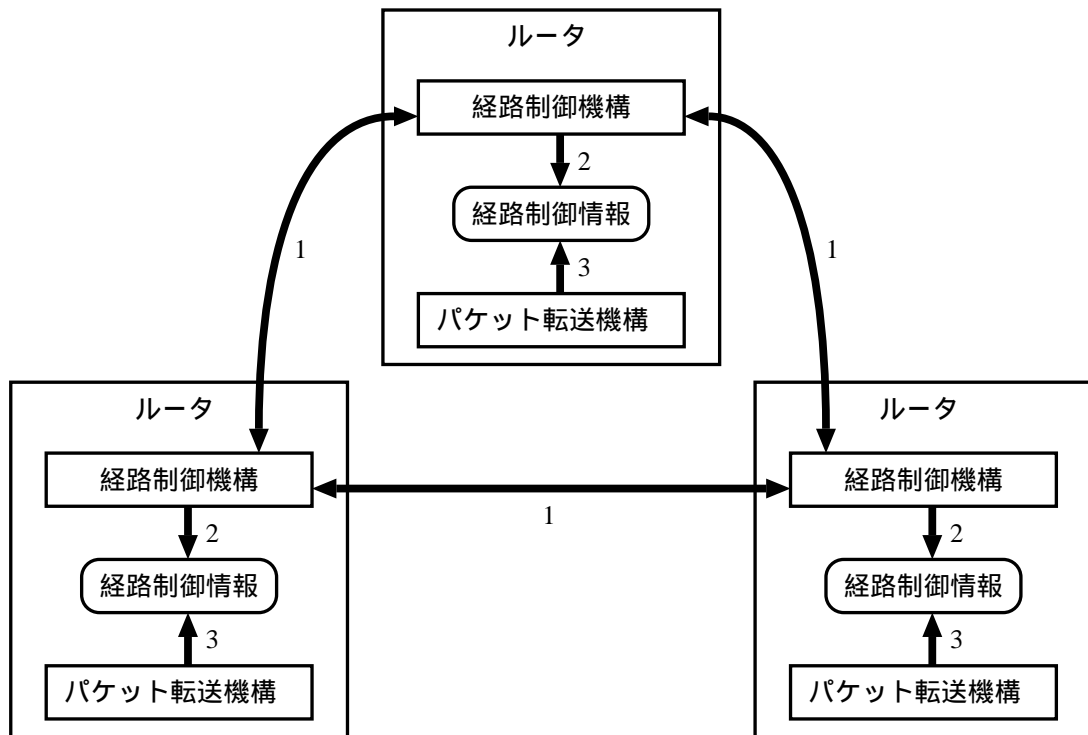
などが挙げられる。

一般に、経路制御情報は、そのルータ上で動作する経路制御機構と、ネットワーク的に同一のドメイン内の他のルータ上で動作する経路制御機構の協調動作によって各ルータ上で生成される。

経路制御機構による経路制御情報の生成と、パケット配送機構による経路制御情報の利用を図4.1に示す。

経路制御面とは、ネットワーク上の特定の領域における複数のルータ間で協調動作する単一の経路制御機構を、仮想的に一つの面として見なしたものである。

この経路制御面上では、複数のルータ上で経路制御機構が協調動作する。各ルータでは、複数のルータ間であるアルゴリズムに基づいて必要な情報を交換し合い、それぞれのルータで何らかの計算を行った結果、その経路制御機構の経路制御アルゴリズムに基づい



1. 経路制御に必要な情報の交換
2. 経路制御情報の生成および修正
3. 経路制御情報を利用したパケット転送

図 4.1: 経路制御機構とパケット転送機構の関係

た経路制御情報が生成される。経路制御情報は、経路制御機構の協調動作に伴って、必要に応じて各ルータ間で配布され共有される。

本研究で導入する経路制御面の概念においては、単一の経路制御面上では基本的には単一の経路制御機構が動作していることとする。単一の経路制御面について、各ルータにおいては単一の経路制御情報を保持することとする。

現在研究、開発されている多くの経路制御機構では、パケットの転送挙動の決定用の情報と、経路制御機構によって生成された経路制御情報が明確に分離されておらず、結果として、ネットワーク上の特定のドメインにおける経路制御面はその領域において動作している経路制御機構に依存する単一のものしか存在し得ないと言える。

### 4.3.2 多経路制御面の導入

本研究では、単一のネットワークドメイン内部で経路制御面を複数導入することで、種々の経路制御要求を統括的に扱う手法を提案する。この複数の経路制御面を、本研究では多経路制御面と呼ぶ。

本研究では、多経路制御面を用いたマルチキャスト配送モデルを多経路制御面型マルチキャスト (MRP-MC: Multi Routing Plane MultiCast) モデルと呼ぶ。図 4.2 に伝統的なマルチキャストモデルと MRP-MC モデルの比較を示す。

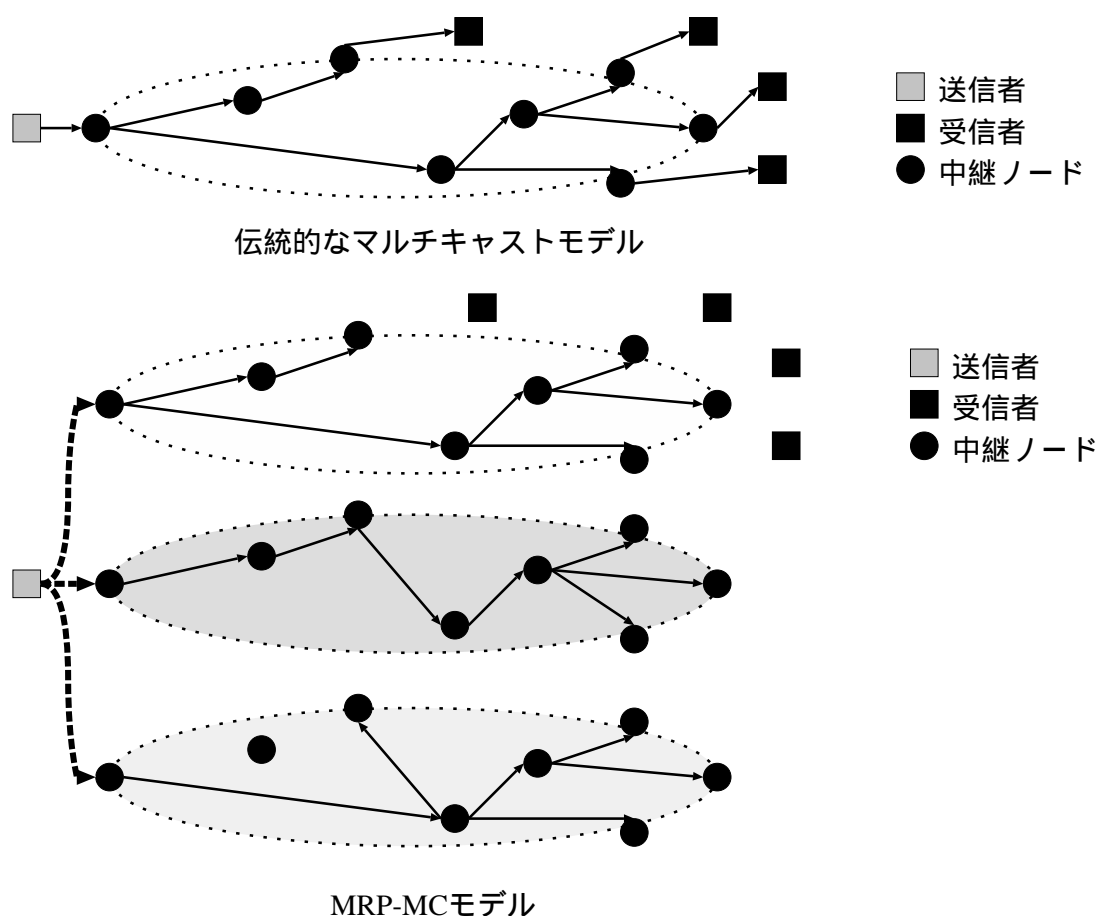


図 4.2: 伝統的なマルチキャストモデルとの比較

多経路制御面は複数の経路制御面を内包しているが、各経路制御面上では、それぞれ独立して経路制御機構が動作するものとする。また、各経路制御機構は他の経路制御機構に依存しないものとする。

MRP-MC モデルでは、MRP-MC ドメイン内部の経路制御はMRP-MC ドメイン外部からは隠蔽され、外部に対してはマルチキャスト配送の機能を提供するネットワークドメインとして振る舞うものとする (図 4.3)。

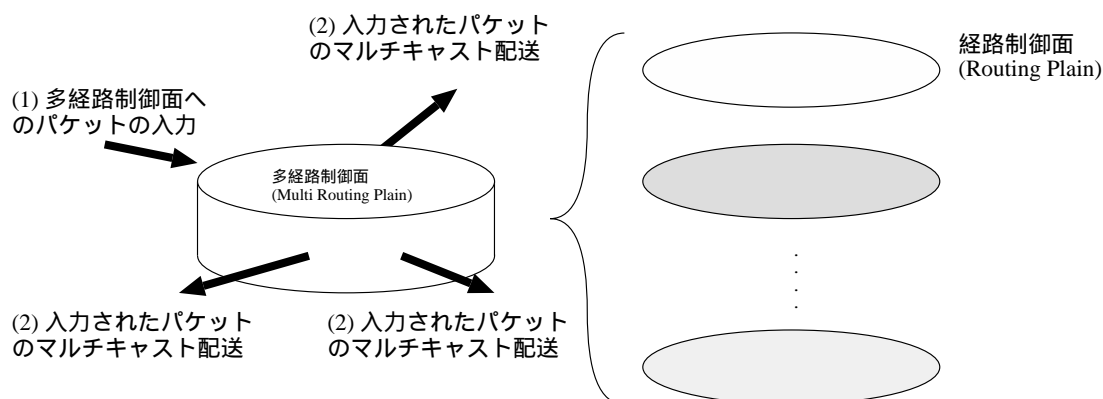


図 4.3: ドメインの内部機構の隠蔽と外部へ提供する機能

## 4.4 MRP-MC モデルの応用

これまで一つのMRP-MCモデルの基本的な部分について説明してきた。ここではMRP-MCモデルの応用について考察する。

**入れ子構造** MRP-MCモデルの内部は外部から隠蔽されていることを要求事項として挙げたが、これは、MRP-MCモデルにおいて入れ子構造を許容するためである。MRP-MCモデルは、ドメイン外部から入力されたパケットをドメイン内部の運用ポリシーに基づいて適切に、ドメイン外部へマルチキャスト配送する。つまり、MRP-MCドメイン内部のあるノードにおいて、そのノードに入力されたパケットがさらに隠蔽されたドメインに入力されたとしても適切にマルチキャスト配送される限り問題はないはずである。これによりMRP-MCモデルでは入れ子構造を定義できることになる。

このような入れ子構造を許容することで、MRP-MCドメインを柔軟に切り分け各MRP-MCドメインの管理者はそのドメイン内部の管理に注力でき、管理責任の範囲の分散が可能になると予想される。

パケットのドメイン間遷移 MRP-MCモデルを実際のネットワーク上で動作させる場合には、なんらかの理由である経路制御面が不要になった際、その経路制御面の維持に利用していたネットワーク資源を解放するべきである。このような要求に応じるためには、経路制御面は動的に生成され、動的に破棄されるというモデルについても考察しなければならない。

経路制御面が動的に破棄されることを考えると、経路制御面が破棄された際に存在したパケットの処理として、

- そのまま破棄される
- なんらかの計算に基づいて別の経路制御面に遷移する

という選択が考えられる。

これらの処理は、経路制御面が破棄された場合だけでなく、経路制御面が新しく生成された場合、無効になっていた経路制御面が有効化された場合、その他のなんらかの理由でパケットを経路制御面間で移動させたい場合などでも有用である。

## 4.5 MRP-MCモデルの実現に必要な技術的特性

MRP-MCモデルでは、複数の経路制御機構を独立かつ同時に扱う。このため、各経路制御機構によって生成された経路制御情報をなんらかの方法で矛盾無く保持し、これをパケット転送に用いることができなければならない。そのためにも、経路制御部とパケット転送部が明確に分離されており、且つ、複数の経路制御機構の動作を許容できるパケット転送部が必要となる。

本研究では、このような技術的特性を持つマルチプロトコルラベルスイッチング (MPLS: Multi Protocol Label Switching) 技術を、MRP-MCの基盤技術として選択した。

MPLS技術は、以下の点についてMRP-MCとの親和性が非常に高い。

- ラベルマッピング配布部という中間層による経路制御部とパケット配送部の明確な分離
- 経路制御機構独自の経路制御情報から独立したパケット転送制御情報の導入による、複数の経路制御機構の導入を許容しやすいパケット配送部

MPLS 技術については次章で解説する。

## 第 5 章

# マルチプロトコルラベルスイッチング (MPLS) 技術

インターネットの爆発的な普及に伴い、その規模は加速的に拡大し、その用途も多様化する傾向にある。規模の拡大はインターネット内で流通する情報量を全般的に増加させ、用途の拡大によって画像や音声といった従来のインターネットの用途とは異なる性質を持った情報の流通が増加しつつある。このような現状に対応するために、インターネットの性能に関する要求が増大しつつある。

インターネットの性能を向上させるための技術は様々なものが検討、開発されている。その中でも、インターネットを構成する基本要素であるルータの処理を軽減し、2層、3層における高機能化を実現するための技術として、ラベルスイッチング技術が注目を集めている。

各ルータ毎に自律的に経路選択処理を行う『点』としての要素が強い既存のインターネットと比べ、ラベルスイッチ技術では始点から終点をより意識した『線』としての操作を行う。そのため始点において経路選択処理の大部分を処理することで途中ルータの処理を軽減させるだけでなく、QoS(Quality of Service)、CoS(Class of Service)、トラフィックエンジニアリングを実現するための要素技術としても利用されようとしている。

インターネットの様々な技術はIETF(Internet Engineering Task Force)<sup>1</sup>による標準化過程を通じて全域における標準仕様となる。現在IETFにおいてラベルスイッチ技術を標

---

<sup>1</sup><http://www.ietf.org/>

準仕様として規定するための議論が行われている。IETF では様々な既存のラベルスイッチ技術で得られた経験を集約し、新たにマルチプロトコルラベルスイッチング (MPLS:Multi Protocol Label Switching) という汎用的な技術仕様を策定し、2001年1月にRFC(Request For Comment)<sup>2</sup> として公開した[17]。

本章ではMPLSについて解説していく。

## 5.1 MPLS の概要

MPLSはラベルスイッチ技術の一種で、上位プロトコルに非依存なラベルスイッチングができるという特徴を持っている。

インターネットはIP(Internet Protocol)によるノード間のパケット伝送を基本としたネットワークである。それぞれのノード(ルータなど)が受け取ったパケットを次中継点へ中継することで端点間(end-to-end)の接続が実現される。このようなホップバイホップのパケット転送を図5.1に示す。IPはインターネットのレイヤ構造的には第3層に位置しており、IPパケットを始点から終点へ到達させるための経路を解決する経路制御機構も第3層に置かれている。経路制御機構による次中継点の解決は各中継点が自律的に行うため、中継点毎で

- 第3層でのパケット解析
- 次中継点決定のための経路検索処理

が必要である。

MPLSは、中継点毎に行われているこれらの処理を入口ノード(ingress node)で集約する。入口ノードで、パケットの第3層情報を解析し、その解析結果を短い固定長のラベルに割り当てる。このラベルと第3層情報の対応関係をMPLSドメイン内に伝播させることで、中間ノードでの第3層情報を解析を省略できる。ラベルスイッチングによるパケット転送を図5.2に示す。MPLSはルータでの処理を軽減するための高速化技術として注目されてきた。

また、ラベルという別の情報での経路制御を行うため、第3層での経路制御とは別の形態の経路制御を実現できる可能性が高い。そのため、ネットワーク内のトラフィックを高

---

<sup>2</sup><http://www.ietf.org/rfc.html>



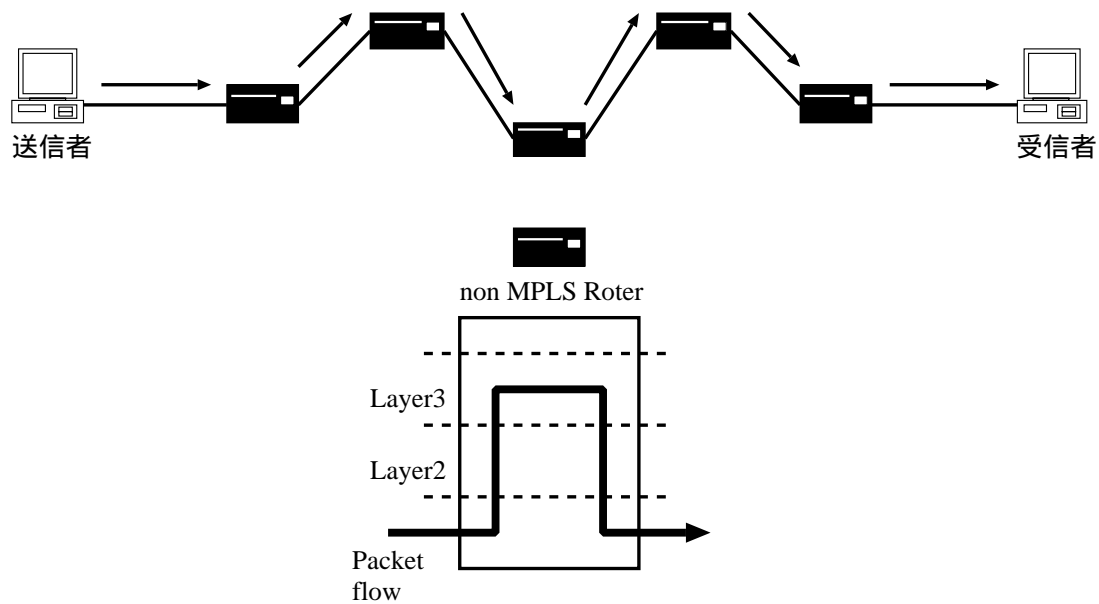


図 5.1: ホップバイホップの packets 転送

度に制御するためのトラフィックエンジニアリング技術やポリシー経路制御などを実現するための要素技術としての位置づけを確保しつつある。

### 5.1.1 同一転送クラス (FEC) の導入

MPLS の特徴の一つとして、同一転送クラス (FEC: Forwarding Equivalence Class) の概念を導入していることが挙げられる。FEC とは、パケットを転送する際にルータが同一の転送挙動を示すパケットの集合を意味する。

従来の IP 層における転送では、一般にパケットの終点アドレス情報が FEC として利用し、パケットの終点アドレスによってルータの転送挙動が決定されていた。MPLS では、ルータの転送挙動を決定するためのパケットの集合を FEC として抽象化することでルータの転送挙動の決定と、その制御を分離している。

FEC はパケットの種類や特徴によって定義される集合であり、その集合を記述するための要素が必要である。現在では、FEC を定義するための記述要素として図 5.1 の FEC 要素が提案されている。

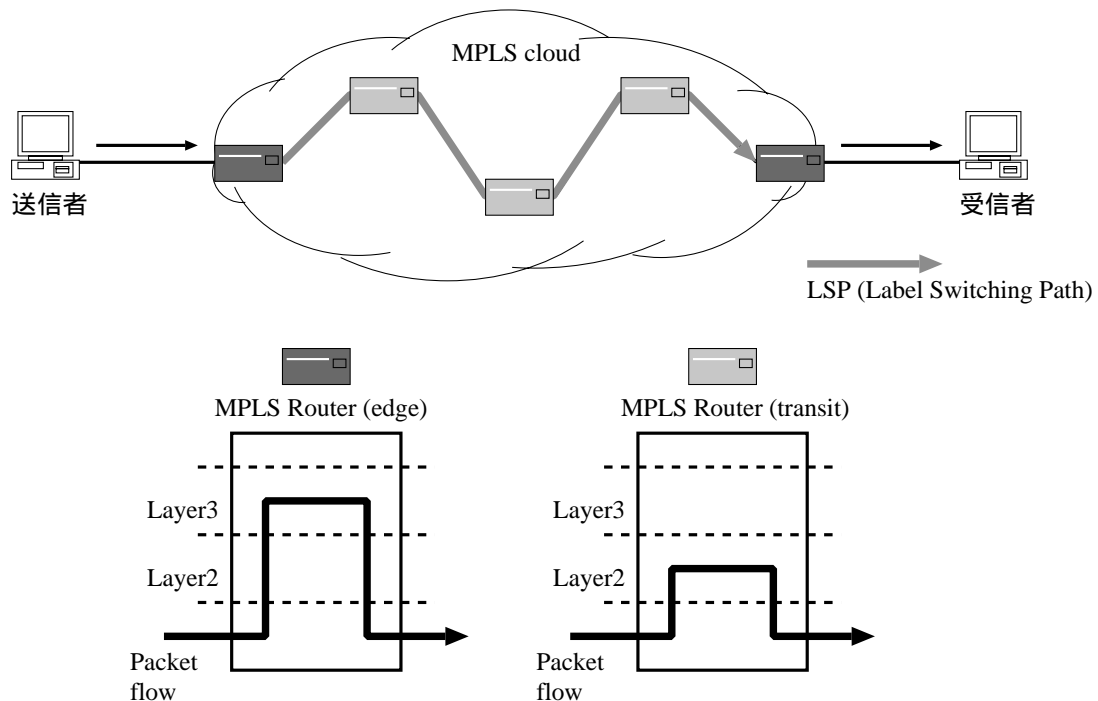


図 5.2: ラベルスイッチングによるパケット転送

### 5.1.2 入口ノードにおける FEC 分類動作の集約

MPLSでは、FECの判断を入口ノードに集約し、ドメイン内部のルータでは、ラベルスワッピング動作だけでパケットを転送していく(図5.3)。

ホップバイホップ転送ではパケットに付加された情報の解析作業を全てのルータで行わなければならない。一般に、パケットに付加された情報の解析作業は、ルータにとって負荷となりやすい。

MPLSでは、パケットに付加された情報の解析作業をドメインの入口ルータに集約することでドメイン内部のルータの転送処理を軽減している。これによりドメイン内部のルータにおける転送効率が向上される。

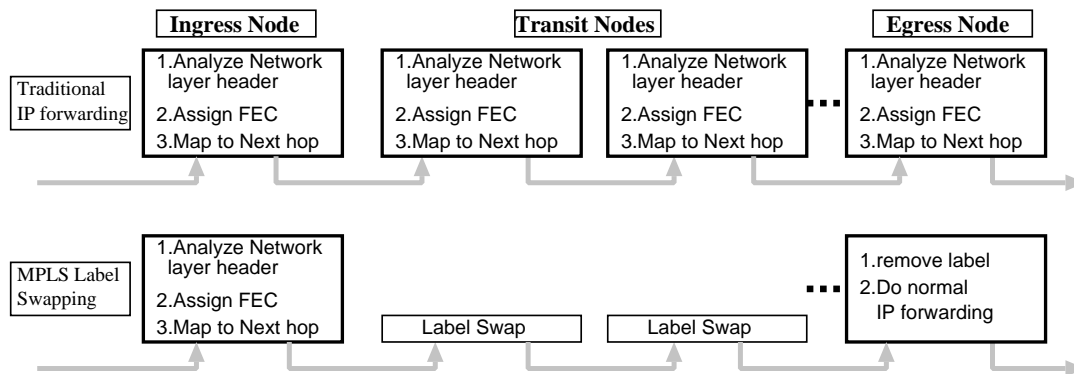


図 5.3: MPLS におけるラベルスワッピング動作

## 5.2 MPLS の特徴

MPLS は、ルータの負荷となる「パケットに付随する情報の解析処理」を MPLS ドメインの入口ノードに集約することで MPLS ドメイン内部におけるパケット転送処理の効率化を図り、高速パケット転送技術として注目されているということについては既に述べた通りである。

しかし本研究では、これと異なる MPLS の一側面に注目し、MRP-MC モデルの実現に MPLS を選択した。ここでは、本研究で注目している MPLS の特徴について議論していく。

### 5.2.1 経路制御機構とパケット転送機構の分離

一般にパケットの転送処理は、そのパケットの転送特性である FEC に基づいて行われる。MPLS では、FEC の認識は MPLS ドメインの入口 LSR のみで行われ、その情報はラベルとしてパケットに付加される。ラベルと FEC の束縛情報 (FEC/ラベルマッピング情報) は、ラベル配布プロトコルによって生成/広告される。各中継 LSR はラベルのみを用いて、単純な『ラベル置換 (label swapping) 動作』のみを繰り返すだけである。パケットは、最終点に到達するか MPLS ドメインの出口から非 MPLS ドメインへ転送されるまでラベル置換操作のみによって転送される。

この特性はすなわち、

- 転送は本質的に第 3 層経路ドメインとは無関係である

ということを意味する。つまり、MPLSドメインの経路制御技術は既存のインターネットのように第3層経路制御技術の束縛を受けないことを意味する。ただしこれは、MPLSと第3層経路制御が一致しないということではない。第3層経路制御ドメインとMPLSによる経路制御ドメインがお互い独立して生成しているだけで、第3層経路制御ドメインと同一のMPLS経路制御ドメインを構成することは技術的に可能である。実際に第3層の経路制御に追従したラベル配布を目的としてラベル配布プロトコルも提案されている。

したがって、MPLSにおいては、

- 経路ドメインを生成する機構
- 経路ドメインに応じた転送を実現する機構

を完全に独立したものとして扱うことが可能である。ここでの『経路ドメインを生成する機構』とは、ラベル配布プロトコルと中心としたFEC/ラベルマッピングの生成系であり、『経路ドメインに応じた転送を実現する機構』とはLSRを中心としたMPLSの転送アーキテクチャを指す。

この特性は、転送がユニキャストであるかマルチキャストであるかに無関係で成立する。MPLSでは転送の特性に応じた経路ドメインの構成および、その実現を行うことで、任意の転送特性が実現可能である。

MPLSにおける経路制御部分とパケット転送部分の分離を図5.4に示す。

## 5.2.2 ラベルマッピング配布プロトコル

MPLSでは、経路制御機構で生成された経路制御情報をパケット転送機構で用いるラベルにマッピングし、そのマッピングを各ルータに適切に配布し、ラベルマッピングを共有する必要がある。このマッピングの配布を行うプロトコルとして、ラベル配布プロトコルが提案されている。

現在のMPLSの仕様では、パケット転送機構におけるラベル空間、および各ラベル空間におけるラベル値の整合性が維持されていれば、どのようなラベルマッピングでも配布できることになっている。

現在提案されているラベル配布プロトコルを表5.2にまとめる。

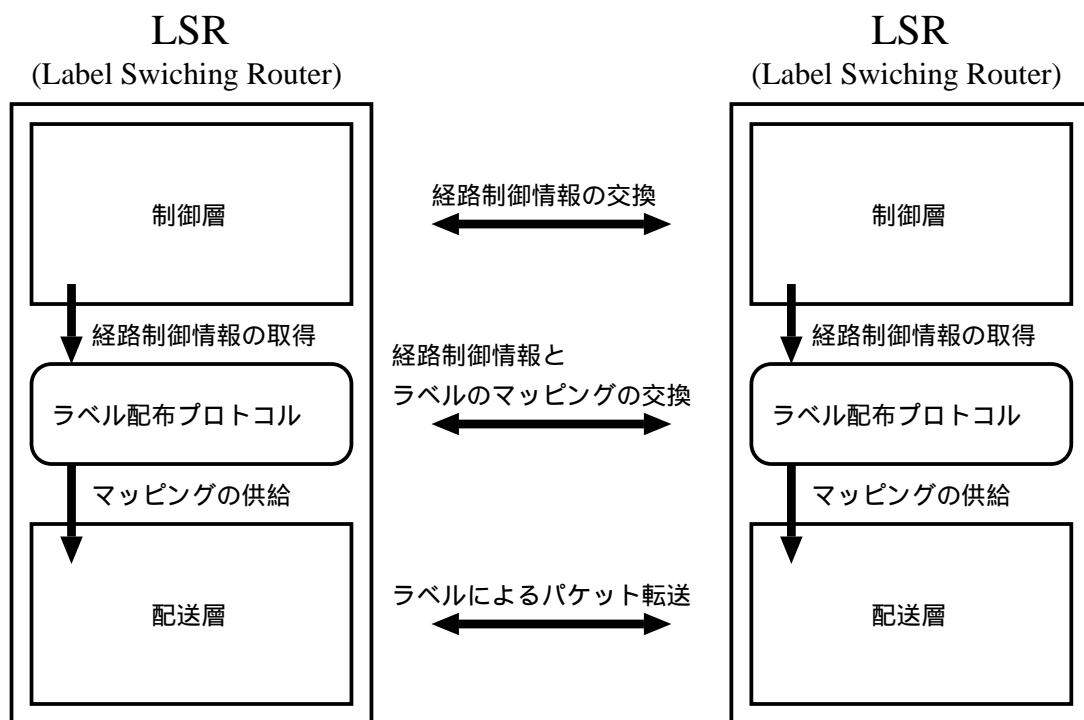


図 5.4: MPLS における経路制御部分と配送部分の分離

### 5.3 マルチキャスト 配送対応の現状

MPLS の仕様策定に関する議論が主に IETF を中心として行われていることは既に述べたが、現時点では主に MPLS のユニキャスト通信に関する仕様が議論の中心であり、MPLS のマルチキャスト通信に関する詳細な議論は将来的な課題とされている。これらの議論は主に Internet-Draft<sup>3</sup> を通じて追うことができる。

MPLS および IP マルチキャストはそれぞれ第 3 層に深く依存しているうえ、多くの要素技術によって複雑に構成されている。さらにマルチキャストはユニキャストとは本質的に異なる技術であり、現在の MPLS の仕様をマルチキャストに対応させるためには現在の MPLS に対する多くの拡張が必要になる。そのため MPLS の IP マルチキャストへの対応化に関する議論や提案は非常に多岐にわたり、議論や提案の全体像を把握することが困難な状況となっている。筆者は MPLS の IP マルチキャスト対応に関する議論を [22] にま

<sup>3</sup><http://www.ietf.org/ID.html>

とめた。図 5.5 および表 5.3 に、MPLS のマルチキャスト対応に関する議論が行われているインターネットドラフトの位置付けを示す。

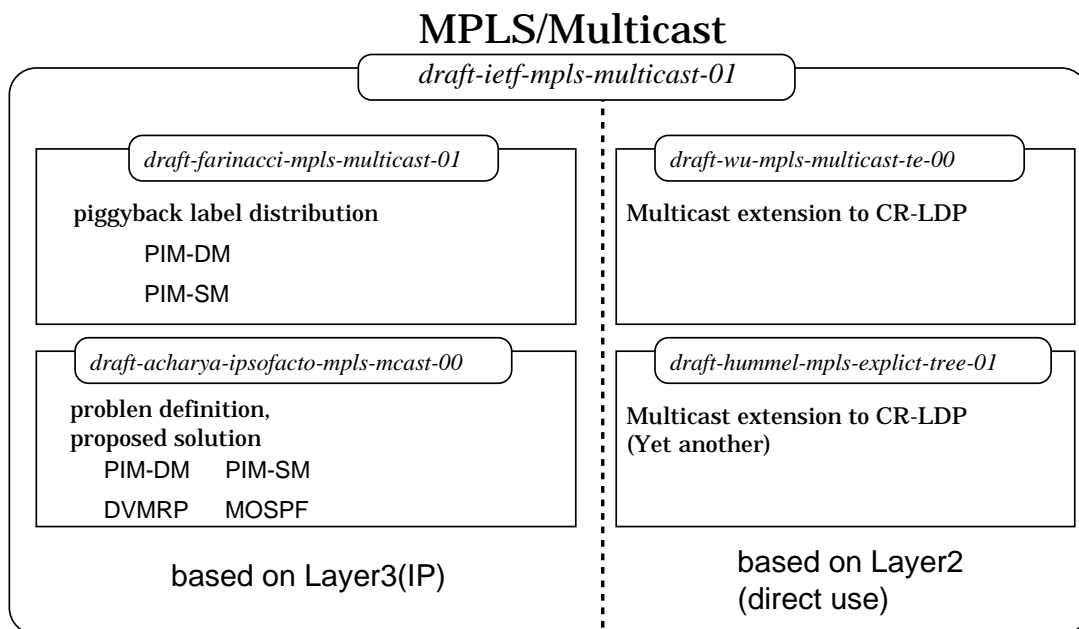


図 5.5: MPLS のマルチキャスト対応に関連するインターネットドラフトの分類

名称	説明
Wildcard FEC element	パケットの全集合
Prefix FEC element	パケットの終点アドレスのアドレスプレフィクス
Host addr FEC element	パケットの終点アドレス

表 5.1: FEC 要素

名称	機能および特徴
Label Distribution Protocol (LDP)[2]	IP 層の経路制御に追従したラベルマッピングを配布するためのラベル配布プロトコル。
Constraint-based Routing Label Distribution Protocol (CR-LDP) [11]	特定の制約に基づいたラベルマッピングを配布するためのラベル配布プロトコル。
RSVP piggy-back LDP	帯域幅等のネットワーク資源の予約のためのプロトコルである RSVP(Resource Reservation Protocol)[5] を拡張したラベル配布プロトコル。資源予約動作と同時にラベルを配布する。
BGP piggy-back LDP [16]	経路制御プロトコルである BGP(Border Gateway Protocol)[12] を拡張したラベル配布プロトコル。経路制御動作と同時にラベルを配布する。
PIM piggy-back LDP	マルチキャスト経路制御プロトコルである PIM(Protocol Independent Multicast) を拡張したラベル配布プロトコル。マルチキャスト経路制御動作と同時にラベルを配布する。

表 5.2: 種々のラベル配布プロトコル

I-D 名	経路ドメインの生成機構	マルチキャスト配送機構
draft-ietf-mpls-multicast[15]	フレームワーク	LSR 拡張機構
draft-farinacci-mpls-multicast[8]	第3層準拠	無し
draft-hummel-mpls-explicit-tree[10]	第2層独自	無し
draft-wu-mpls-multicast-te[20]	第2層独自	無し
draft-acharya-ipsofacto-mpls-mcast[1]	第3層準拠	無し

表 5.3: MPLS/Multicast 関連 I-D の記述範囲



## 第 6 章

# MRP-MC の設計と実現

本研究では MPLS 技術を基盤技術として利用し MRP-MC モデルを実現していく。前章では MPLS の機構と特徴について解説した。本章では、前章で議論した MPLS の特徴を利用した MRP-MC の実現方法について議論していく。

### 6.1 実現方法の概要

ここでは MPLS を用いた MRP-MC の実現方法の概要について説明する。

**ルータの機構** まず、MPLS の LSR の機構を前提とした MRP-MC 対応ルータの実現について着目する。

MRP-MC モデルの最大の特徴は、複数の経路制御面の存在、すなわち多経路制御面である。本研究では MPLS における経路制御部で動作する経路制御機構を、MRP-MC における各経路制御面上で動作する経路制御機構と対応させることで MRP-MC モデルを実現していく。

具体的には、経路制御部で経路制御面に対応する複数の経路制御機構を動作させ、ラベル配布部あるいはパケット転送部のインターフェース部分でラベルの整合性を維持することによって MRP-MC モデルを実現していくということである。つまり、MRP-MC モデルにおけるそれぞれの経路制御面は MPLS におけるそれぞれの経路制御機構に対応することになる。

図 6.1 に、MPLS を用いた MRP-MC の概要を示す。

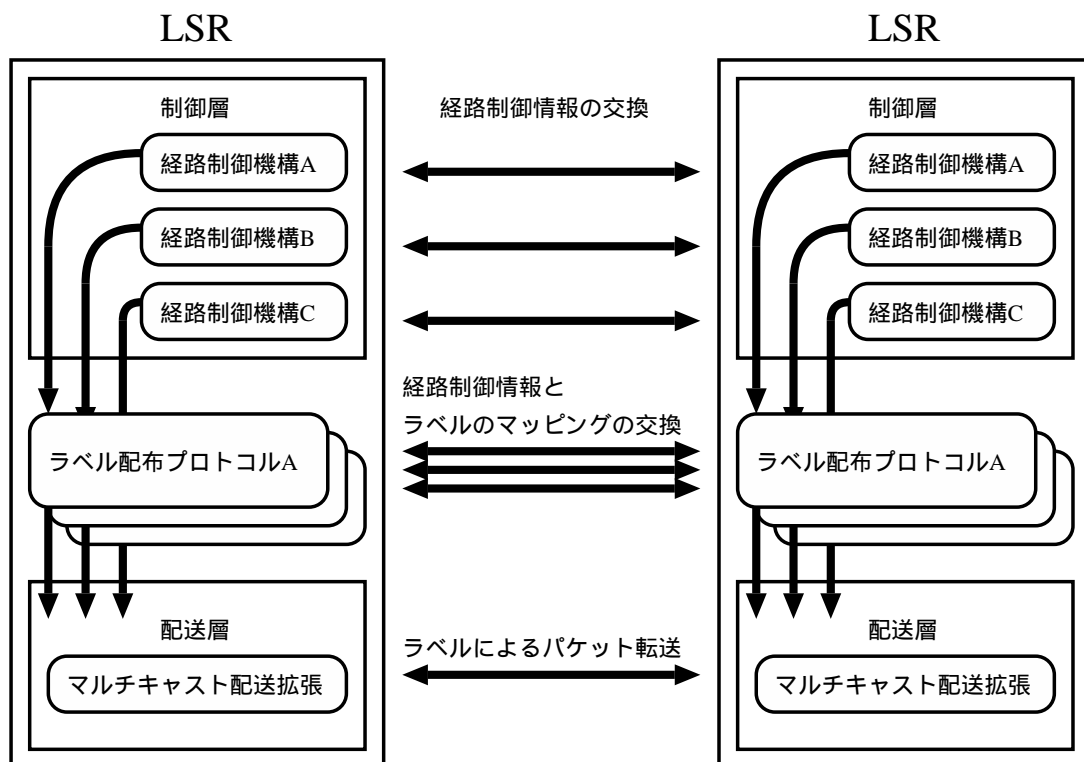


図 6.1: MPLS を用いた MRP-MC ルータ

MRP-MC を実現するうえでのルータへの要求事項は、複数の経路制御機構の存在と、複数の経路制御機構の存在を許容できるパケット転送機構である [21]。当然ながら、このパケット転送機構はマルチキャスト配送できなければならない。また、上記の議論の前提として、経路制御部とパケット転送部の分離も必要不可欠である。

複数のラベル配布プロトコルを同時に動作させるためには、複数のラベル配布プロトコル間で、単一のパケット転送機構用のラベル空間を共有しなければならず、パケット転送機構のラベルの整合性、一意性を管理する機構が必要となる。実装上、このような機構をパケット転送機構内部に持つことは可能であるが、機能毎に分割したモデルにおいては、必ずラベルの一意性保証機構が必要となる。現在の MPLS の仕様は、このようなラベルの一意性の保証については何も規定していない。

ここまでの議論で挙げた、MRP-MC を実現するうえでのルータへの要求事項を以下にまとめる。

1. 経路制御部とパケット転送部の分離
2. 各経路制御機構用のラベル配布プロトコル
3. 複数の経路制御機構の動作を許容できるマルチキャスト配送可能なパケット転送機構
4. ラベルの一意性保証機構

上記の1は、MPLSにおいて実現されている。2については6.2節、3については6.3節でそれぞれ議論していく。4はMRP-MCを実現するうえで欠かせない項目であるが、基本的にはモデルよりも実装上の問題としての要素が強い。4については6.4で触れる。

網の機構 次に、MPLSネットワークの網の機構を前提としたMRP-MCネットワークの実現について着目する。

MRP-MCでは、パケットに付随するなんらかの情報を用いて、経路制御面への分類を行う。この作業はMRP-MCドメインの入口ノードで行われる(図6.2)。

これはMPLSにおけるパケット分類器によって

- このFECはどの経路制御面上で配送されるか

という分類を行うことで実現する。

つまりMPLSのパケット分類器に以下の機能を持たせることで入口ノードにおけるパケットの分類処理を行う。

- パケットがどの経路制御面を通るかという決定(MRP-MCにおける追加機能)
- その経路制御面を通るパケットのクラスをさらに決定

## 6.2 ラベルマッピング配布機構に関する設計

経路制御機構自体については、本質的にはMRP-MCモデルおよびMPLSの議論の対象外である。なぜならば、様々な経路制御機構が存在するが、それぞれの経路制御機構はそれぞれなんらかの方法で同一ネットワークドメインに存在する他のLSRとラベルマッピング配布の協調動作を行い、各LSRにおいてラベルの一意性を保ちつつラベルマッピ

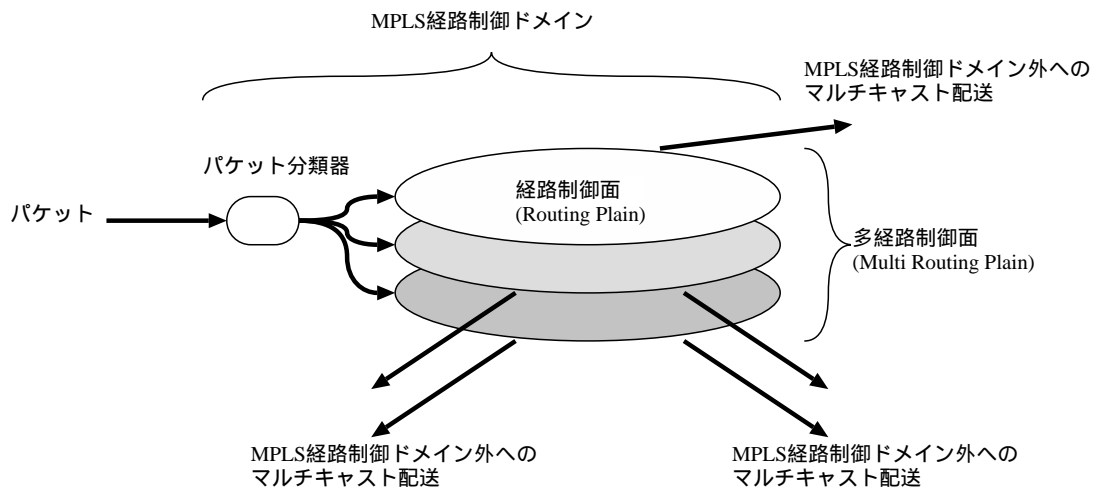


図 6.2: MPLS を用いた MRP-MC ネットワーク

グ情報をパケット配送機構に供給すれば良いだけであるからである。ただし、各経路制御機構とラベル配布部のインターフェースについては、MRP-MC を実現するうえで重要な点である。本論文では、ラベル配布プロトコルツールキット、および、経路制御機構とラベル配布部の結合の一つの実現の例の提示という二つのアプローチで議論を進めていく。

MRP-MC のモデルにおいては、具体的な経路制御機構については問う必要性はない。しかしながら、MRP-MC を実現するうえでは、ラベルマッピング配布機構と経路制御機構の結合部分については議論する必要がある。

ここでは、ラベル配布機構と経路制御機構の結合という点に焦点をあて議論していく。

### 6.2.1 要求事項

ラベル配布プロトコルツールキット 今後、様々な経路制御機構に対応したラベル配布プロトコルの実現が必要になる可能性がある。そのような種々のラベル配布プロトコルには共通の動作をする部品が多数存在する可能性がある。本研究では、このような部品群を抽出し、これをラベル配布プロトコルツールキットとして提供していく。

ラベル配布プロトコルツールキットの構築には、まず種々のラベル配布プロトコルにおいて

- 必須の部品

- 必須ではないが有用な部品

を抽出する必要がある。本論文では、これは今後の課題とする。

ラベル配布プロトコルの拡張によるMRP-MC制御の可能性 MPLSにおけるラベル配布プロトコルの役割は、FEC/ラベルマッピングの配布である。これはすなわちパケットのセマンティクスに応じたLSRの挙動の制御であると言える。このようなラベル配布プロトコルの意味を考慮すると、ラベル配布プロトコルによって、ラベルと経路制御情報のマッピングだけでなく、「各経路制御面上のマルチキャスト経路制御」および「多経路制御面そのものの制御」を行える可能性がある。この場合ラベル配布プロトコルは、以下の二つの機能を提供することになる。

1. FECと経路制御面のマッピング情報を経路制御ドメイン内の全LSRで同期させる機能
2. 各経路制御面上でマルチキャスト経路制御を実現する機能

## 6.2.2 設計

ここでは既存のラベル配布プロトコルの拡張によるMRP-MCの制御方法と、その設計について議論していく。

現在、ラベル配布プロトコルとしては、MPLS層においてIP層の経路制御に追従した経路制御をおこなうためのLDP(Label Distribution Protocol)をはじめとして、幾つかのラベル配布プロトコルが存在する。このことは既に述べた通りである。本論文では、ラベル配布プロトコルの一種であるLDPを拡張することで前節で挙げた機能を満たしたラベル配布プロトコルを実現していく。本論文では、このラベル配布プロトコルをMRP-MC-LDPと呼ぶ。

LDPの機能は、IP層で生成された経路表を取得し、その経路表に追従してラベルマッピングを配布するというものである。本論文では以下の2点についてLDPを拡張するというアプローチでMRP-MC-LDPを実現する。

1. 独立かつ同時に複数の経路表の経路制御情報のラベルマッピングを配布する

## 2. パケットの種類あるいは特徴と経路制御面のマッピングを配布する

このアプローチによる MRP-MC-LDP では、各経路制御面における経路表はそれぞれなんらかの経路制御機構によって確立されている必要がある。本論文では、各経路制御面に対応する経路表はあらかじめ何らかのマルチキャスト経路制御手法によって確立されたものとして議論を進める。

一方、マルチキャスト経路制御の流儀によってはラベル配布プロトコルに制約が課せられることが指摘されている [15] が、これは各経路制御手法に特化した問題である。本論文ではこれは対象外として議論を進める。

MRP-MC における「各経路制御面上のマルチキャスト経路制御」および「多経路制御面そのものの制御」は、ラベル配布プロトコルとは独立させることも可能である。しかしながら、BGP を用いたラベル配布プロトコル [16] のように経路制御情報とラベルマッピングを同時に配布するプロトコルも存在する。このようなプロトコルの利点は、独自プロトコルを構築する作業の軽減、ネットワーク資源の節約などが挙げられる。本論文では、このような利点を重視し、これらのプロトコルと同様、ラベル配布と同時に「各経路制御面上のマルチキャスト経路制御」および「多経路制御面そのものの制御」を行うという手法について考察していく。

**経路制御面識別子** MRP-MC のモデルでは、経路制御面の概念を導入した。従来のマルチキャストのモデルでは、経路制御面は一つしか存在していないと考えられていたため、複数の経路制御面を識別する必要はなかった。MRP-MC のモデルでは経路制御面は複数存在するためなんらかの方法で経路制御面を一意に特定/識別する方法が必要であると考えられる。

本論文では、各経路制御面を識別するための識別子として経路制御面識別子を導入する。経路制御面識別子によって、MRP-MC 経路制御ドメイン内部で経路制御面は一意に特定できる。各 LSR においても、各経路制御面と経路制御面識別子は完全に一意にマッピングされる。

また、ここでは、MRP-MC モデルにおけるある経路制御面上の経路表は唯一であると仮定する。この場合、各経路制御面とその経路制御面上の経路表は一対一に対応するので、経路制御面識別子によって特定の経路制御面上の経路表を一意に特定することも可能

である。

**LDPのマルチキャスト対応拡張** LDPではパケットの終点アドレスをFECとし、FEC/ラベルマッピングを配布することでMPLS層における経路制御を実現している。

本論文では、MRP-MC-LDPにパケットの<始点アドレス、グループアドレス>の対による新しいFECを導入する。本論文ではこれをマルチキャストアドレスFECと呼ぶ。MRP-MC-LDPにおけるマルチキャストアドレスFECは、LDPにおけるホストアドレスFECに対応する。

**パケットと経路制御面のマッピング** MRP-MCでは、対象となる経路制御ドメイン内のMRP-LSR同士の間でパケットの種類あるいは特徴すなわちFECと経路制御面識別子のマッピングの整合性を保たなければならない。

ここで議論の対象とするFECは、パケットの種類あるいは特徴を示すものであるが、前述のマルチキャストアドレスFECとは異なるものである。

MRP-MCではこのマッピングによって、複数のMRP-LSR間における経路制御面の認識が行われる。すなわち、MRP-LDPでは<パケットの種類あるいは特徴すなわちFEC、経路制御面識別子>の配布あるいは折衝ができる必要がある。本論文では、上記の対の配布あるいは折衝に用いられるFECをMRP-MC-FECと呼ぶ。

本論文では、<MRP-MC-FEC、経路制御面識別子>を行うメッセージとして経路制御面識別子配布メッセージをMRP-MC-LDPに導入する。

**ラベル要求メッセージ** LDPでは特定のFECにマッピングされるラベルを隣接LSRに要求するために、ラベル要求メッセージを用いる。ラベル要求メッセージには特定のFECが記述され、これを受け取ったLSRはそのFECに対応するラベルをラベルマッピングメッセージを用いて通知する。

MRP-MC-LDPでは、特定のFECにマッピングされるラベルを隣接MRP-MC-LSRに要求するために、LDPにおけるホストアドレスFECに対応する前述のマルチキャストアドレスFECおよびMRP-MC-FECをラベル要求メッセージに記述する必要がある。また、ラベル要求メッセージに類する各種メッセージについても同様に記述する必要がある。

本論文では、MRP-MC-LDP のラベル要求メッセージおよびそれに類する各種メッセージに、<マルチキャストアドレス FEC, MRP-MC-FEC> の記述を導入してこれを解決する。

## 6.3 配送部分の設計

パケット転送機構については、複数の経路制御機構の許容という問題と、マルチキャスト配送対応という問題に分割できるが、前者はMPLSの基本的な枠組みによって既に実現されていると言える。後者は現在提案されているMPLSの仕様上では対応できていない。本論文では、パケット転送機構については、MPLSのパケット転送機構のマルチキャスト配送対応という点について焦点をあて議論を進めていく。

本論文では、NHLFEに拡張を施し、仮想的な出力インターフェースを導入することでLSRの配送部分におけるマルチキャスト配送を実現する。以降、本論文では、この拡張されたNHLFEを「MRP-MC拡張NHLFE」、仮想的な出力インターフェースを「MRP-MC仮想インターフェース」、MRP-MCにおけるマルチキャスト配送拡張LSRを「MRP-MC-LSR」と呼ぶ。

### 6.3.1 要求事項

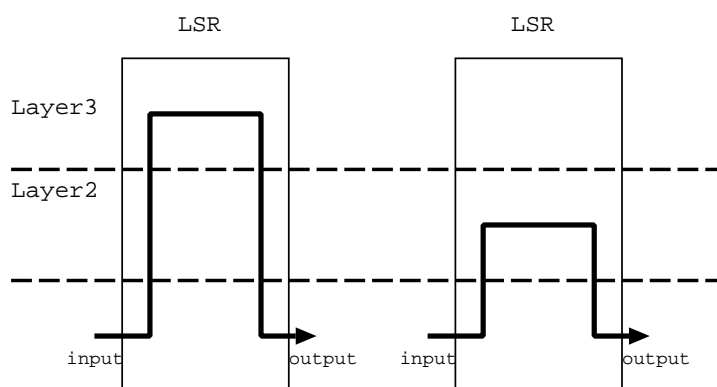


図 6.3: ユニキャスト転送

転送処理 ルータに入力されたパケットの転送処理を2層および3層で行える場合、通常ユニキャストのパケットは単一の入力に対して単一の出力しか考えられないので、パケッ



トの転送処理は

- 2層で処理する
- 3層で処理する

という二つのケースしか考えられない(図6.3)。しかしながら、マルチキャストのパケットは単一の入力に対して複数の出力が考えられるので、

- 2層だけで処理する
- 3層だけで処理する
- 2層および3層の両方で処理する

という3つのケースが考えられる(図6.4)。

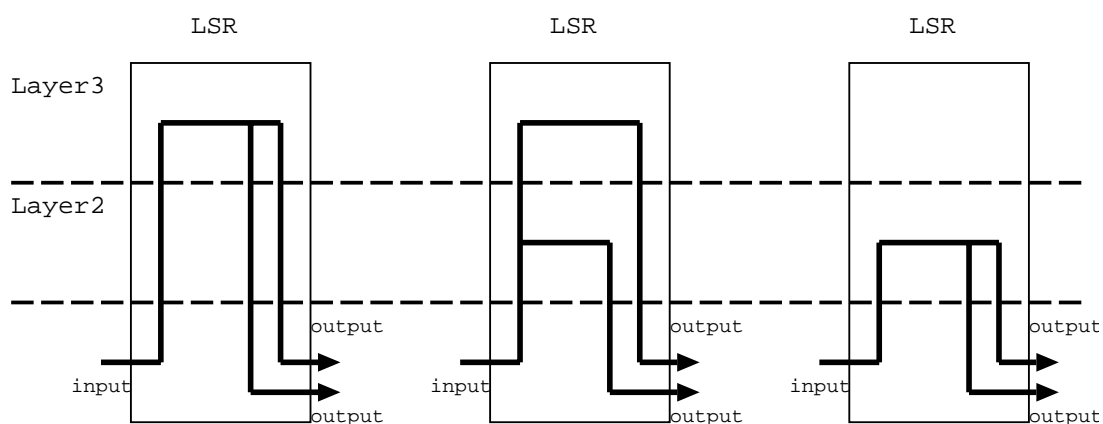


図 6.4: マルチキャスト配送

MPLS は、ユニキャストパケットについては第2層でのラベルスワッピングによって転送処理を行っている。本研究では、マルチキャストの転送処理に関しても、ユニキャストと同様に、基本的に第2層で行う。

マルチキャスト配送処理は、

1. パケットの複製

## 2. 複製されたパケットの転送処理

という2段階を必要とする。以下にマルチキャスト対応LSRにおいて必要となる配送処理を、配送処理の動きと共に示す。

1. マルチキャスト対応LSRにパケットが入力される
2. パケットを必要な数に複製する
3. パケットを必要に応じて2層および3層に振り分ける
4. それぞれの層で転送処理を行う
  - 2層の場合、ラベルスワッピング動作
  - 3層の場合、各パケットの次ホップ、出力インターフェースの決定する

出力方式 一方、MPLSにおけるマルチキャスト配送をマルチキャスト出力という視点から見ると、

- 全ての出力パケットがMPLSドメイン内部のケース
- 全ての出力パケットがMPLSドメイン外部のケース
- 出力パケットがMPLSドメイン内部および外部のケース

という3つのケースが考えられる(図6.5)。

これらの三つのケースを、2層および3層への出力という視点から考えると、MPLSマルチキャストにおいて考えられるパケット出力のパターンは以下の3つに分類される。

- 第3層への配送
- 第2層への配送
- 第2層および第3層への同時配送

MPLSマルチキャストでは、上記の三つの出力形式をサポートしなければならない。

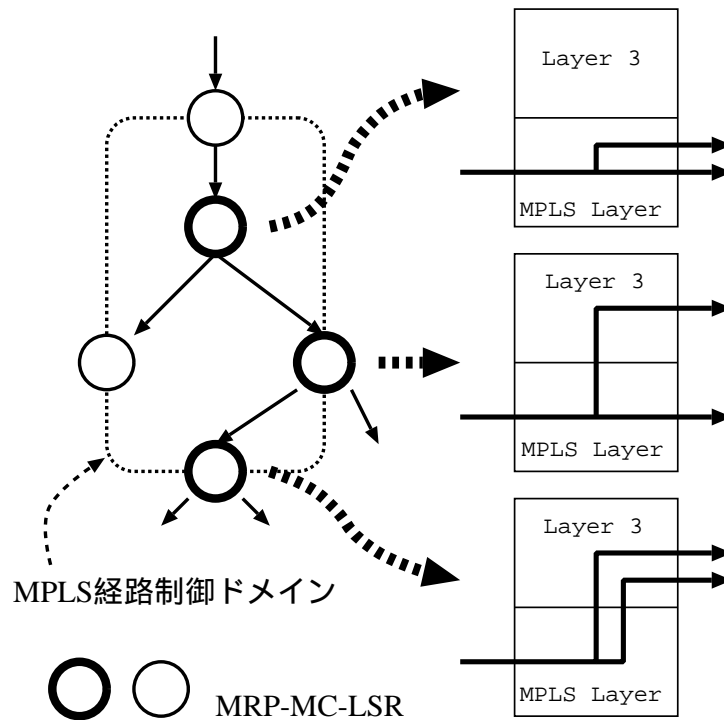


図 6.5: MPLS マルチキャスト出力パターン

### 6.3.2 設計

本論文では、NHLFE に拡張を施し、仮想的な出力インターフェースを導入することで LSR の配送部分におけるマルチキャスト配送を実現する。以降、本論文では、この拡張された NHLFE を「MRP-MC 拡張 NHLFE」、仮想的な出力インターフェースを「MRP-MC 仮想インターフェース」、MRP-MC におけるマルチキャスト配送拡張 LSR を「MRP-MC-LSR」と呼ぶ。

#### MRP 仮想インターフェース

MRP-MC 仮想インターフェースの主な機能は、LSR においてパケットの入出力を行う通常のインターフェースと同様、パケットの入力およびパケットの出力である。ただし、MRP-MC 仮想インターフェースでは、MRP-MC-LSR から MRP-MC 仮想インターフェースを通して出力されたパケットは MRP-MC 仮想インターフェースを通して LSR に再入力される。この点が LSR における通常のインターフェースとの違いである。

## MRP 拡張 NHLFE

本論文では NHLFE に記述される操作のリストの要素に、新規操作として「パケットを  $n$  個に複製し、複製されたそれぞれのパケットにラベル  $L_1 \sim L_n$  を push する。」という操作を追加する。この新規操作が NHLFE に記述されている場合、同一の NHLFE に記述された「パケットの次ホップ」部分には前述の MRP-MC 仮想インターフェースが記述される。

### 動作

LSR に入力されたパケットに対してマルチキャスト配送を意味するラベルが付加されていた場合、本論文で提案する MRP-MC-LSR は以下の手順でマルチキャスト配送を行う。

1. MRP-MC 拡張 NHLFE の操作に従ってパケットを必要な数に複製
2. あらかじめ指定された異なるラベルをそれぞれのパケットに付加
3. 複製され新しいラベルが付加されたパケットを全て MRP-MC 仮想インターフェースに出力
4. MRP-MC 仮想インターフェースを介して LSR 自身に再入力
5. LSR は、再入力されたパケットのラベルのセマンティクスに基づいてユニキャストのパケットと同等の処理を施す
6. 適切なインターフェースへそれぞれのパケットを出力

図 6.6 に、拡張 NHLFE を用いたマルチキャスト配送配送機構の動作を示す。

本論文で提案する MRP-MC-LSR は、パケットに付加されたラベルの処理を最終的にユニキャストのパケットの処理に帰着させるので、既に示した三つのマルチキャスト出力形態に対して柔軟に対応することができる。

MRP-MC 仮想インターフェースおよび MRP-MC 拡張 NHLFE を導入することによる MRP-MC-LSR の実現方法の利点としては、既存の MPLS の機構への変更点の少なさ、および内部的に MPLS のユニキャスト転送の処理を流用することによる MPLS 層での配送の柔軟性の 2 点が挙げられる。

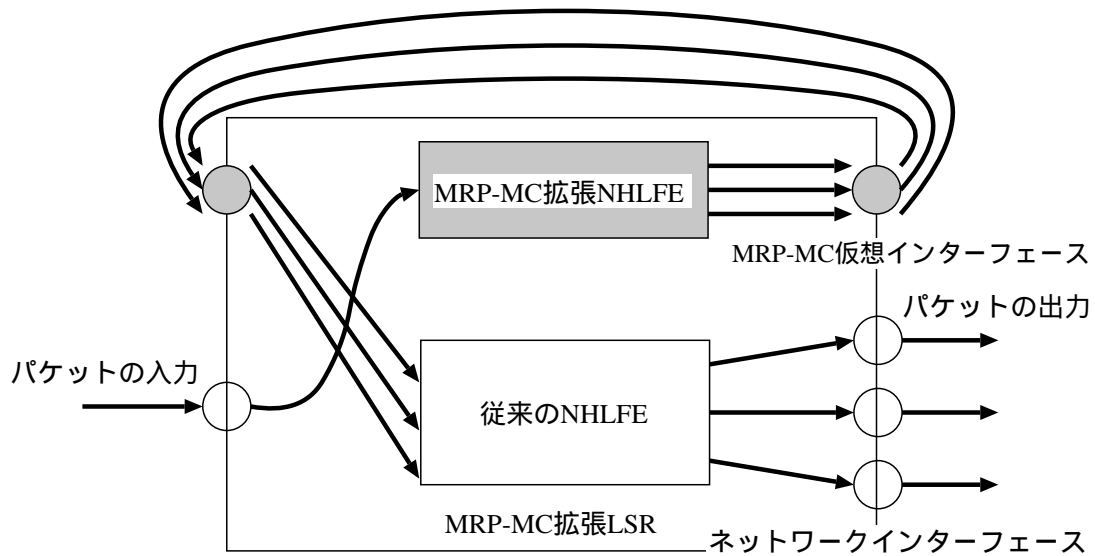


図 6.6: 拡張 NHLFE を用いたマルチキャスト配送

## 6.4 実現

本論文では、これまで MPLS を用いた MRP-MC の実現について議論してきた。ここでは、MRP-MC の具体的な実現方法について議論していく。

### 6.4.1 MPLS 実装

MPLS の仕様は 2001 年 1 月に RFC として公開された。しかし、RFC の公開の仕組み上 MPLS の仕様は数年前からインターネットドラフトとして公開されており、MPLS の仕様はインターネットドラフトの段階から長らく議論され続けてきた。現在では、ハードウェアおよびソフトウェアによる MPLS 実装が複数存在する。現時点で存在する主なソフトウェア MPLS 実装を表 6.1 に示す。

筆者は共同研究というかたちで AYAME の開発に関わっている。AYAME は、BSD ネットワークスタック用の MPLS 実装であり、主に研究目的の用途を前提として作られたもので、拡張性を重視した設計となっている。本研究では、MPLS 研究環境実装 AYAME を用いて MRP-MC の実装を進めていく。

名称	特徴	動作環境
NIST Switch <sup>1</sup>	RSVP やキューイング技術に特化した実装	Linux
Wisconsin MPLS Implementation <sup>2</sup>	ラベル配布プロトコルの実験に特化した実装	Linux/FreeBSD <sup>3</sup>
AYAME	MPLS を用いた応用研究、MPLS 自体の基礎研究など、実験や研究用途を目指した実装	NetBSD <sup>4</sup>

表 6.1: MPLS の実装

## 特徴

MPLS 実験環境実装 AYAME[18]<sup>5</sup> は実験および研究用途を目的としたソフトウェア MPLS 実装である。

AYAME の構成は

- パケット転送機構
- ラベル配布プロトコル(LDP)

となっており、AYAME は NetBSD 上で動作する。

AYAME の特徴として、

- パケット転送機構 LSE(Label Switching Engine) の導入
- 複数のラベル配布プロトコルを許容できるパケット配送機構

という二点が挙げられる。

LSE はパケット転送機構のインプリメントであり、「ラベルを交換する」という最も基本的な機能を提供する部分である [24]。AYAME は拡張性を重視し、各種モジュールを追加することでさまざまな動作をサポートできる構造になっている。LSE もその方針を継承しており、本研究が提案した、MRP-MC 拡張 NHLFE および MRP-MC 拡張インターフェースとの親和性が高い。

---

<sup>5</sup><http://www.ayame.org/>

また、AYAMEは現在はラベル配布プロトコルとしてLDPを提供しているが、種々のラベル配布プロトコルが同時に動作する可能性を考慮した設計になっているので、この点についてもMRP-MCとの親和性が高い。

## 6.4.2 動作実験

他実装との接続実験 MPLSは、ラベル配布プロトコルによるラベルの折衝、ラベルを用いたパケットの転送動作、という二つの段階で隣接ルータとの協調動作を必要とする。これまでに、AYAME実装をwisconsin実装と接続する実験を行った。この実験で

- ラベル配布プロトコルの接続実験

LDPによる、第3層の経路制御に追従したラベルマッピングの配布動作の検証

- パケットの転送実験

ラベルが付加されたパケットの転送動作の検証

を行い、AYAME実装の動作を検証した。

今後も、wisconsin以外のソフトウェア実装、その他のハードウェア実装などとの接続実験を行う予定である。

運用実験 我々は、2000年9月に長野県茅野市で行われたWIDE合宿でAYAME実装を実際に動作させ、AYAME実装の実証実験を行った。合宿では、200人を越えるユーザを収容するネットワークのバックボーンとしてAYAME実装を4日間動作させた。この間、AYAME実装は問題なく動作した。合宿では、第3層の経路制御としてOSPFを用い、この経路制御に追従したラベルマッピングの配布を行った。今後、AYAME実装の実験の予定として、ラベルマッピングにCR-LDPを用い、その制御系としてCOPSを用いた実験を予定している。

## 第 7 章

### 今後の課題

本章では、本研究における今後の課題についてまとめる。

本研究では、種々の経路制御要求を統括的に吸収できるマルチキャスト配送機構の実現を最終目的として定義した。これまで、MRP-MC モデルの提案、MPLS 技術による MRP-MC の実現など、主に基礎研究にあたる部分に焦点をあてて議論してきたが、今後は MPLS 実装を元にした MRP-MC 実装の作成、MRP-MC を実ネットワーク上で定常的に運用し日常的に管理するために必要な機構あるいは機能など、言わば実現と実用化に関する部分に焦点をあて研究を進めていく。

#### 7.1 モデルに関する再考察

本論文では MRP-MC の経路制御面をどのようにして実現するかなど、定常状態にある MRP-MC モデルを前提として議論してきたが、各経路制御面がどのようにして生成、破棄されるかなど定常状態に至る過程については触れてこなかった。今後は、経路制御面の生成、破棄、経路制御面と経路制御機構のマッピング、FEC と経路制御面のマッピング、すなわち MRP-MC の管理方法など動的な側面を含めて MRP-MC モデルを再考察していく。



### 7.1.1 MRP-MCの動作に関する考察

MRP-MCによるパケット転送は、複数の経路制御面、各経路制御面上の経路制御機構、FECと経路制御面のマッピング、これらが揃って初めて定常状態となる。以下に定常状態までの動作を列挙する。

- 経路制御面の確定
- FECと経路制御面のマッピング
- 各経路制御面上での経路制御
- 定常状態(パケット転送)
  - まず ingress node でFEC分け、すなわち、そのパケットはどの経路制御面上を通るか決定
  - あらかじめ配布されたラベルを用いて、ラベルスワッピング転送

本論文では、定常状態のMRP-MCに焦点をあてて議論してきた。今後は定常状態になるまでのMRP-MCの動作や、MRP-MCの各機構について考察していく。

### 7.1.2 MRP-MCの制御に関する考察

本論文では、MRP-MCモデルの経路制御面、多経路制御面のモデルについて言及してきたが、多経路制御面全体の取まとめ、各経路制御面間における不整合などについては言及してこなかった。

- 経路制御面の識別方法
- 例外処理

経路制御面の識別方法は、既存のラベル空間の一部を経路制御面識別子として割り当てる方法、MPLSにおけるラベルスタック技術を用いる方法などが考えられる。ラベル空間の一部を経路制御面識別子として割り当てる場合、既存のラベル長で経路制御面とその経路制御面上でのラベル値を統括して扱うことができる反面、既存の20ビットのラベル空

間を狭めてしまうという欠点がある。一方、ラベルスタックを用いる方法では、ラベル空間の広さを維持できる反面、各ルータにおける処理の増加を招くという欠点がある。本研究では、今後も経路制御面の識別方法を含む、MRP-MCの制御という点について考察していく。

### 7.1.3 プレーン管理手法

設定の自動化 実際にはMRP-MCをネットワーク上で動作させる場合、まず対象となるネットワークドメインの管理者はそのドメインにおいて動作させるべき経路制御機構とその機構の経路制御を利用するFECの定義を行わなければならない。

次に管理者は、何らかの方法で対象ドメイン内のルータに対して決定した経路制御面の情報、FEC定義、FECと経路制御面のマッピングを設定しなければならない。

この設定作業は、対象ドメインの規模が小さい場合には、管理者自身が一つ一つ設定を行うことができるかもしれないが、対象ドメインの規模が大きくなった場合、設定の作業量の多さ、設定の整合性の維持、設定ミスなどの回避など新たな問題が発生する可能性がある。

動的な経路メトリック また、ある時点では特定の経路制御機構による経路制御が特定のFECに対して最適なものだとしても、複数の経路制御面が同時に動作することを考えると、単一の経路制御機構では最適な対応も複数の経路制御機構が存在する場合には最適な対応とは言えない可能性もある。これは、ある経路制御面が他の経路制御面における経路メトリックに影響を及ぼす可能性があるからである。

このようなケースを考えると、ある経路制御面における経路メトリックの動的な変更を考慮しなければならなくなる。

本研究では今後、ある経路制御面におけるトラフィックが他の経路制御面に与える影響についても考察していく。

## 7.2 実装

本論文では、AYAME実装を用いたMRP-MC実装の実現について議論した。本研究では今後、AYAME実装を用いたMRP-MCの実装を進めていく。

### 7.2.1 AYAME実装のマルチキャスト対応化

本論文ではMPLSの packets 配送機構のマルチキャスト対応化の一手法を提案した。また、その手法がAYAME実装の設計と親和性が高いことについて論じた。

今後は、AYAME実装の packets 配送機構のマルチキャスト対応化実装を進めていく。

### 7.2.2 ラベル配布プロトコルツールキット

現在、種々の経路制御機構が存在し、今後も新たな経路制御機構が提案される可能性がある。MRP-MCでは、基本的には経路制御機構毎にラベル配布プロトコルが必要となるが、それらのラベル配布プロトコルは必要に応じてそれぞれ実現していかざるを得ない。また、種々の経路制御機構のそれぞれに対して独自のラベル配布プロトコルが必要となったり、あるいは、経路制御機構の拡張してラベルマッピングを配布する機能を実現する可能性もある。

このような新たなラベル配布プロトコルの実装や、経路制御機構の拡張時には、同様の機能を持つ部品が存在する可能性がある。今後本研究では、種々のラベル配布プロトコルにおいて利用頻度の高い部品を見つけ出し、それらをラベル配布プロトコル用ツールキットとして提供していく。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり指導教官である篠田陽一助教授には、機を見てその折に多くの適切な助言を頂いた。また、WIDEプロジェクトおよび所属研究室の方々からも様々な有益な意見を頂いた。記して、ここに感謝の意をしたい。

最後に、本研究を進めるにあたりあらゆる面で私を支えてくれた妻と娘に心から感謝の気持ちを贈りたい。

## 参考文献

- [1] Arup Acharya, et al. IP multicast support in MPLS networks. Internet-Draft, Internet Engineering Task Force, Feb 1999. (draft-acharya-ipsofacto-mpls-mcast-00.txt) work in progress.
- [2] L. Andersson, et al. LDP specification. RFC3036, Internet Engineering Task Force, Jan 2001.
- [3] P. Bagnall, et al. Taxonomy of communication requirements for large-scale multicast applications. RFC2729, Internet Engineering Task Force, Dec 1999.
- [4] A. Ballardie. Core based trees (cvt version 2) multicast routing. RFC2189, Internet Engineering Task Force, Sep 1997.
- [5] E. Crawley. A framework for integrated services and RSVP over ATM. RFC2382, Internet Engineering Task Force, Aug 1998.
- [6] S. Deering. Host extensions for IP multicasting. RFC1112, Internet Engineering Task Force, Aug 1989.
- [7] D. Estrin, et al. Protocol independent multicast-sparse mode (PIM-SM): Protocol specification. RFC2117, Internet Engineering Task Force, Jun 1997.
- [8] Dino Farinacci, et al. Using PIM to distribute MPLS labels for multicast routes. Internet-Draft, Internet Engineering Task Force, Jun 2000. (draft-farinacci-mpls-multicast-01.txt) work in progress.

- [9] M. Handley, et al. The reliable multicast design space for bulk data transfer. RFC2887, Internet Engineering Task Force, Aug 2000.
- [10] Heinrich Hummel, et al. Explicit tree routing. Internet-Draft, Internet Engineering Task Force, Jun 1999. (draft-hummel-mpls-explicit-tree-01.txt) work in progress.
- [11] Bilel Jamoussi. Constraint-based LSP setup using LDP. Internet-Draft, Internet Engineering Task Force, Jan 2001. (draft-ietf-mpls-cr-ldp-03.txt) work in progress.
- [12] K. Lougheed, et al. A border gateway protocol 4 (BGP-4). RFC1771, Internet Engineering Task Force, Mar 1995.
- [13] J. Moy. MOSPF: analysis and experience. RFC1585, Internet Engineering Task Force, Mar 1994.
- [14] J. Moy. Multicast extensions to OSPF. RFC1584, Internet Engineering Task Force, Mar 1994.
- [15] D. Ooms, et al. Framework for ip multicast in MPLS. Internet-Draft, Internet Engineering Task Force, Jan 2001. (draft-ietf-mpls-multicast-01.txt) work in progress.
- [16] Yakov Rekhter, et al. Carrying label information in BGP-4. Internet-Draft, Internet Engineering Task Force, Jan 2001. (draft-ietf-mpls-bgp4-mpls-04.txt) work in progress.
- [17] E. Rosen, et al. Multiprotocol labelswitching architecture. RFC3031, Internet Engineering Task Force, Jan 2001.
- [18] Yojiro UO, Satoshi Uda, Nobuo Ogashiwa, Satoshi Ohta, and Yoichi Shinoda. AYAME: A design and implementation of the CoS capable MPLS layer for BSD network stack. INET2000, Internet Society, Jul 2000.
- [19] D. Waitzman, et al. Distance vector multicast routing protocol. RFC1075, Internet Engineering Task Force, Nov 1988.

- [20] Liwen Wu, et al. MPLS multicast traffic engineering. Internet-Draft, Internet Engineering Task Force, Jun 1999. (draft-wu-mpls-multicast-te-00.txt) work in progress.
- [21] 小柏伸夫, 宇夫陽次郎, 宇多仁, 篠田陽一. 多経路制御面型マルチキャストの設計と実装に関する考察. DPS2000, 情報処理学会 マルチメディアと分散処理研究会, Dec 2000.
- [22] 小柏伸夫, 宇夫陽次郎, 篠田陽一. マルチプロトコルラベルスイッチング技術を用いたマルチキャストに関する調査. 北陸先端科学技術大学院大学 JAIST Research Report IS-RR-2000-11, ISSN 0918-7553, Apr 2000.
- [23] 小柏伸夫, 宇夫陽次郎, 篠田陽一. 多層経路制御層型マルチキャスト配送のMPLSによる実現. WIT2000, 日本ソフトウェア科学会第3回インターネットテクノロジーワークショップ, Sep 2000.
- [24] 宇多仁, 宇夫陽次郎, 篠田陽一. MPLS実装 AYAMEにおけるパケット転送機構の設計および実装. DPS2000, 情報処理学会 マルチメディアと分散処理研究会, Dec 2000.
- [25] 宇夫陽次郎, 小柏伸夫, 宇多仁, 篠田陽一. 多配送層フレームワークにおけるパケット品質制御可能ネットワークモデルと mpls を用いた実現. DPS2000, 情報処理学会 マルチメディアと分散処理研究会, Dec 2000.
- [26] 宇夫陽次郎, 宇多仁, 小柏伸夫, 篠田陽一. 配送機構の形式的記述スキーマの設計と多層経路制御層型アーキテクチャを用いた配送層の実現. WIT2000, 日本ソフトウェア科学会第3回インターネットテクノロジーワークショップ, Sep 2000.