

高速障害復旧が可能なMPLSラベル配布機構の提案及び実装と評価

越智 一敦[†] 森島 直人[†] 飯田 勝吉[†] 山口 英[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
〒630-0101 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †{kazuno-o,naoto-m,katsu,suguru}@is.aist-nara.ac.jp

あらまし 金融や医療の分野では、障害耐性の強い通信網が必要となるため、コストの高い専用網が利用されてきた。本研究では、低コストの公衆網を利用して仮想的に専用網を構築できる技術である Multiprotocol Label Switching (MPLS) を用いて障害耐性の強いネットワーク構築を試みる。MPLS では、リンク切断などのネットワーク障害が原因で通信が継続できなくなった場合、Label Switched Path (LSP) と呼ばれる仮想通信路を再構築する必要がある。これを本稿では障害復旧と呼ぶ。しかし、既存の障害復旧方式では、ホップ毎に障害を通知した後にホップ毎に LSP を再構築するため、復旧に時間がかかることが問題となる。そこで本稿では、MPLS 網に高速障害復旧を行うためのサーバを導入する。各ルータは障害通知をサーバに行い、サーバは復旧経路を一括して再構築する。そして、この提案手法の有効性をシミュレーションと実装により明らかにする。

キーワード MPLS, CR-LDP, 障害復旧, サーバ

A cost effective fault recovery system using Multiprotocol Label Switching

Kazunobu OCHI[†], Naoto MORISHIMA[†], Katsuyoshi IIDA[†], and Suguru YAMAGUCHI[†]

[†] Graduate School of Information Science,
Nara Institute of Science and Technology. 8916-5 Takayama, Ikoma, Nara 630-0101, Japan

E-mail: †{kazuno-o,naoto-m,katsu,suguru}@is.aist-nara.ac.jp

Abstract We need fault tolerant networks for communications among financial or medical organizations. For this purpose, a network of duplicated leased lines, which is the most expensive way, is used. In order to reduce the cost of fault tolerant networks, many communication carriers are now focusing on Multiprotocol Label Switching (MPLS), which uses inexpensive public networks and it establishes a virtual leased line, which is called virtual path. To restore fault of network elements, MPLS requires to reestablish alternative virtual path. However, there needs a long period to recover the fault because the current system notifies and restores the fault in a way of hop-by-hop. In this paper, for fast recovery, we propose a method that requires a server to handle faults of the entire network and to reestablish alternative virtual path for routers along the path simultaneously. Through simulations and implementations, we show that our method can reduce the restoration time.

Key words MPLS, CR-LDP, Path-Recovery, Server

1. はじめに

銀行、保険、証券などの金融ネットワークや病院などの医療ネットワークではサービスが停止することは許されない。従って、金融や医療の分野では、障害耐性の強い通信網が必要とされる。しかし、障害耐性を強くするために多重化した専用網を広域に敷設するのはコストがかかる。そのため、出来るだけ低いコストで障害耐性の強いネットワークを構築することが求められる。

仮想専用網を構築するために、従来は ATM やフレームリレーを利用してきた。しかし、これらの手法では網全体が同一の伝送媒体（データリンク）で構成されている必要があった。例えば、ATM 網で構築された仮想専用網とフレームリレーで構築された仮想専用網では相互接続性が得られなかった。そこで、最近では全ての伝送媒体を同様に扱える Internet Protocol (IP) ベースの仮想専用網が構築できる Multiprotocol Label Switching (MPLS) [1] の導入が急速に広まっている [2], [3]。

そこで、本研究では低コストの公衆網を利用して仮想的に専用網を構築できる技術である MPLS を用いて障害耐性の強いネットワーク構築を試みる。

ところで、MPLS ではリンク切断などのネットワーク障害が原因で通信が継続できなくなった場合、Label Switched Path (LSP) と呼ばれる仮想通信路を再構築する必要がある。このことを本稿では障害復旧と呼ぶ。

現在 MPLS で実現されている障害復旧技術 [7], [8] には、Reroute と Protection と呼ばれる方式がある。しかし、これら既存方式では、ホップ毎に障害を通知した後ホップ毎に LSP を再構築するために、復旧に時間がかかることが問題となる。

そこで、本研究では Rapid-CR-LDP を提案する。これは、高速に障害復旧するためのサーバを MPLS 網に導入し、各ルータは障害通知をサーバに行い、サーバは復旧経路を一括して再構築する障害復旧手法である。また、提案手法の有効性をシミュレーションと実装を用いて評価する。

本稿では、第2節で MPLS の詳細を述べ、第3節で MPLS で行われている既存の障害復旧方式の詳細を述べてこれらが持つ問題点を明らかにする。第4節では、低コストで高速に障害復旧する手法である Rapid-CR-LDP を提案する。第5節と第6節で提案した手法について評価する。最後に第7節でまとめる。

2. Multiprotocol Label Switching

MPLS は、ネットワーク層の経路制御技術とデータリンク層の高速スイッチング技術を融合したパケット転送技術である。MPLS では、全てのパケットを宛先アドレスや使用アプリケーションなど任意の粒度で決定した一連のパケット集合（以降、“フロー”と呼ぶ）に分類し、ひとつのフローにつきひとつの Label Switched Path (LSP) を確立する。

パケットにはフローを識別する“ラベル”を挿入し、ラベルと LSP を対応付けることでフロー毎に異なる LSP に収容する。MPLS 網のルータである Label Switching Router (LSR) では、LSP に従ってパケットを転送することのみを行う。このため、第3層での経路制御技術を利用することなしに高速なパケット転送ができる。

パケットに挿入されているラベルと LSR が転送すべき次ホップとの対応付けは、ラベルを経路表として保持することで実現される。経路表にラベルを保持するために、Label Distribution Protocol (LDP) と呼ばれるラベル配布機構を用いて隣接 LSR 間でラベルを事前に共有する。

MPLS では、フローの設定次第で異なる粒度の LSP が確立できるため、サービス毎にパケット転送品質を変更する Quality of Services を実現したり、宛先ごとに仮想的な専用通信路を確保することが容易に行える。

図1に、Host B 宛のパケットを優先フローとベストエフォートフローに分類して、優先フロー用の LSP1 とベストエフォートフロー用の LSP2 を確立し、パケット転送している様子を示す。優先フローにラベル5を割り当て、ベストエフォートフローにラベル8を割り当ててそれぞれの LSP に対応付けている。LSR1 と LSR2 の間では LDP によってラベルが共有され、それぞれの経路表に書かれている。

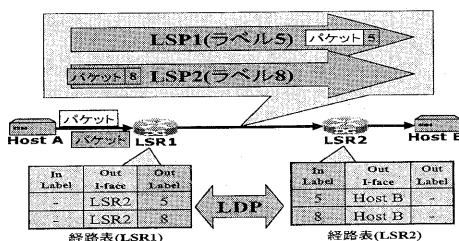


図1 MPLS の概念

2.1 Label Distribution - ラベル配布

ラベル配布は、LSP 上にある LSR が各々設定したラベルを、要求に応じて隣接 LSR に受け渡すことで実現される。

ラベル配布機構は様々な種類が提案されている。最も単純なラベル配布機構として、第3層の経路情報に従ってラベル配布する LDP [4] が挙げられる。他にも、LSP のリソースを確保する時に用いられる RSVP-TE [5] と呼ばれる方式もある。特に、パケット転送経路を明示的に指定してトラヒックエンジニアリングをする場合、Constraint-based Routing - Label Distribution Protocol (CR-LDP) [6] が利用される。

CR-LDP は、指定された経路に沿ってラベル要求を発行する。この要求に対してラベル配布が行われ、MPLS 網内に LSP が設定される。図2に、CR-LDP の動作概要を示す。通常の LDP では、最短経路である LSR0 ⇒ LSR1 ⇒ LSR4 ⇒ LSR5 に LSP が設定されるが、MPLS 網の入口にあたる LSR0 に対して通過 LSR を指定することで、図2の矢印で示すようにラベル要求とラベル配布が行われ LSP が設定される。

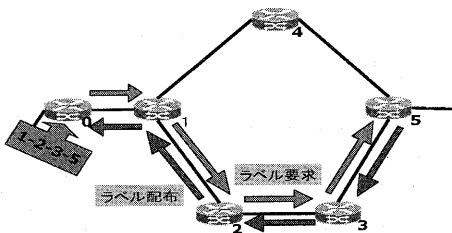


図2 ラベル配布機構 (CR-LDP)

このようにラベル配布にはラベル要求とラベル配布が網内を行き来するために LSP の確立に時間がかかることが問題である。

3. MPLS での障害復旧手法

MPLS 網内で、リンク切断やルータ故障に起因するネットワーク障害が発生すると、障害箇所を通過する LSP に収容されるフローの転送ができなくなる。通信を継続するために、障害箇所を回避する LSP (以降、「復旧 LSP」と呼ぶ) を新たに確立しなければならない。現在行われている障害復旧手法には、障害発生後に復旧 LSP を確立する Reroute と、事前に復旧 LSP を確立しておく Protection がある。

以下でこれらの手法について、復旧処理手順と概要及び問題点を論じる。

3.1 Reroute

Reroute の復旧処理手順を示す。

- (1) 障害発生
- (2) 障害検知
- (3) 障害通知
- (4) 復旧経路生成
- (5) LDP による LSP 確立
- (6) LSP 切り換え
- (7) 復旧完了

まず、障害箇所の最寄の LSR が障害検知をする。この方法は様々なものが考えられるが、何らかの方法で障害を検知するものとして本稿では特に限定しない。

次に障害検知した LSR が、LSP 上の LSR を経由して入口 LSR に障害通知をする。

通知を受けた入口 LSR は、障害箇所を回避する経路を生成し、その経路に対して LDP を用いて復旧 LSP を確立する。そして、復旧 LSP の確立後、フローをこの LSP に収容し復旧が完了する。

Reroute は、障害発生後に LSP を確立するために、障害復旧完了までに時間がかかる欠点を持つ。また、障害箇所により障害通知時の通過 LSR 数が変化するために通知時間が一定にならない。

しかし、復旧 LSP のためのネットワーク帯域を消費しないため、MPLS 網内のネットワーク資源を効率的に利用できる利点を持つ。

3.2 Protection

Protection は、最初に通信用 LSP を確立すると同時に、復旧 LSP も確立する方式である。一般的な Protection では、障害発生時に障害検知した LSR が LSP 上の LSR を経由して入口 LSR に障害通知をする。通知を受けた時点でフローを復旧 LSP に収容し復旧が完了する。

また、Protection は、復旧 LSP への切り換え方法で2通りに分類できる。ひとつは、復旧 LSP にも通信用 LSP と同様のパケットを常に収容しておく方法で“1+1”と呼ばれる。これは、復旧 LSP にもフローを収容し実リンクを消費するために、ネットワーク資源の利用効率が非常に悪い。網内の全ての通信に対してこの方式を用いることは、必要な実リンク容量が2倍となるためにコストがかかる。しかし、障害発生時には MPLS 網の出口 LSR で自動的にパケットを選択できるため、復旧時間が0になることが期待される。

実リンクへの投資コスト低くするために現在用いられている Protection は、“1:1”と呼ばれる方式で

ある。この方式は、復旧 LSP に通信用 LSP と同じフローは収容しない。復旧 LSP には優先度の低いフローを収容し、障害発生時にはこのフローを破棄して通信用 LSP に収容されるべきフローを収容して復旧 LSP として機能させる。使用しないかもしれない復旧 LSP のために、実リンクを消費することなく実際の通信のために割り当てることができるためネットワーク資源の利用効率は向上している。

しかし、1:1 の復旧手順は

- (1) 復旧経路生成
- (2) LDP による LSP 確立
- (3) 障害発生
- (4) 障害検知
- (5) 障害通知
- (6) LSP 切り換え
- (7) 復旧完了

であるために、障害検知した LSR から入口 LSR に障害通知する必要がある。このため、障害箇所によっては復旧時間が長くなる欠点をもつ。

本稿で対象としているのは、低コストで高い障害耐性を得る障害復旧手法である。そのため“1:1”を基本として、その復旧時間性能の改善を図る。

4. Rapid-CR-LDP

これまで、利用者の品質要求に見合った通信を実現するための MPLS 機構と障害復旧について述べてきた。現在行われている MPLS での障害復旧では、復旧時間を短くすると資源利用効率が悪化し、資源利用効率を求めると高速障害復旧ができないというトレードオフが見られた。また、障害通知時間に関して、高速復旧方式であるはずの Protection においても 1:1 を用いると障害箇所に依存して復旧時間に大きな差が生じることも述べた。

ここで、MPLS 網にラベル配布サーバを導入することによって障害通知時間を一定にし復旧時間を短縮すると同時に、資源の利用効率を向上する Rapid-CR-LDP を提案する。

Rapid-CR-LDP は、従来の LSR から構成される MPLS 網とその網を管理するサーバから構成される。障害通知とラベル配布はサーバを介して行われる。図 3 は、Rapid-CR-LDP の構成とサーバから LSR にラベルを配布する概念を示した図である。

本節では、Rapid-CR-LDP の概要及び動作手順と特徴について述べる。

4.1 Rapid-CR-LDP 概要

Rapid-CR-LDP は、ラベル配布機構である CR-

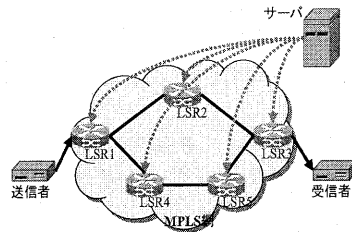


図 3 Rapid-CR-LDP の構成

LDP を拡張し高速障害復旧を実現している。従来、ホップ毎に自律分散して行われてきたラベル配布を、サーバから一括して行うことで配布時間を短縮する。また、サーバに障害通知することで、障害箇所によらない通知時間を得る。これらの結果として障害復旧時間を短縮する。

Rapid-CR-LDP の障害復旧手順を示す。

- (1) 復旧経路生成
- (2) サーバが LSP 情報を保持
- (3) 障害発生
- (4) 障害検知
- (5) サーバに障害通知
- (6) サーバがラベルを一括配布
- (7) LSP 切り換え
- (8) 復旧完了

4.2 Pre-Computation

MPLS 網を管理するサーバは、復旧経路を事前に計算する。ただし、Protection とは異なり LSR がラベルを持つことはない。Rapid-CR-LDP では、サーバが復旧 LSP 情報としてサーバ内に、障害検知 LSR、LSP の識別子、復旧 LSP 上の LSR の組と配布ラベルで構成される復旧 LSP リストを保持する。MPLS 網内の実リンクには復旧 LSP としてのネットワーク資源を確保しないために、他の通信に資源を割り当てることができ資源利用効率が向上する。

4.3 障害通知

障害が発生し LSR が障害検知すると、LSR はサーバに対して障害通知をする。従来の障害復旧では入口 LSR に障害を通知するため、障害箇所が入口から離れている場合、障害復旧時間も長くなる。Rapid-CR-LDP ではサーバに対して障害を通知するため、MPLS 網内の適切な場所にサーバを設置することで障害箇所によらずに通知時間がほぼ一定になる。従って、復旧時間の大幅な短縮が可能となる。

4.4 ラベル配布

サーバが障害通知を受け取ると、Pre-Computation

によって事前に用意しておいた復旧 LSP リストにある LSR に対してラベルを一斉に配布する。ラベルが配布されると LSP が確立するので、フローを復旧 LSP に収容し復旧が完了する。

4.5 障害復旧方式の定性的評価

提案手法と従来の障害復旧手法の比較を表 1 に示す。Rapid-CR-LDP では、Protection(1:1) の欠点であった障害箇所起因する復旧速度の遅さを改善し、MPLS 網に復旧 LSP を確立しないことで資源利用効率を高めることを目的とする。

表 1 障害復旧方式の比較

	復旧速度	資源利用効率
Reroute	×	○
Protection(1+1)	◎	×
Protection(1:1)	△	○
Rapid-CR-LDP	○	○

5. シミュレーションによる評価

本稿で提案する Rapid-CR-LDP と、従来手法である Reroute、Protection(1:1) の 3 手法をシミュレーションによって比較評価する。Protection(1+1) は明らかに高速であるが、本稿のもうひとつの目的である低コストを実現できないため、今回は評価対象としない。シミュレータに ns-2 [9] を使い、MPLS 拡張モジュール MNS2.0 [10] を追加した。さらに、Rapid-CR-LDP シミュレートモジュールを作成し、上記シミュレータに組み込んだ。

5.1 シミュレーション環境

シミュレータ上に図 4 の MPLS 網を構築した。送信ノードと受信ノード及び 5 台の LSR を図のように接続し、Rapid-CR-LDP のシミュレーション用に全ての LSR とサーバを管理専用線 (M-Link) で結んだ。全てのリンク遅延は 10msec とし、リンク帯域は 1Mbps とした。

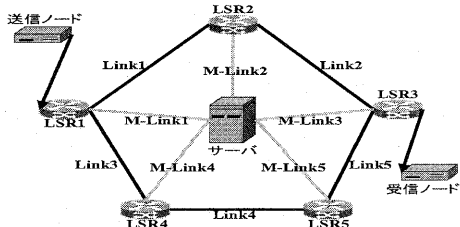


図 4 評価トポロジ

シミュレーションでは、送信ノードから受信ノードに対して、トラフィックを発生させる。トラフィックは、

LSR1 ⇒ Link3 ⇒ LSR4 ⇒ Link4 ⇒ LSR5 ⇒ Link5 ⇒ LSR3 を流れる。そして、ある時点で Link4 に障害を起こし、障害復旧経路として LSR1 ⇒ Link1 ⇒ LSR2 ⇒ Link2 ⇒ LSR3 を選択して復旧するシミュレーションを行った。今後すべてのシミュレーションはこのトポロジを基本とし、これを標準トポロジと呼ぶ。

MPLS での障害復旧のうち障害復旧時間に大きく影響する部分は

- 障害通知時
- ラベル配布時

と考える。そこで、これらの時間に対して LSR 数が与える影響をシミュレーションする。

障害通知時とラベル配布時の影響を分離するために 2 通りのシミュレーションを行った。

一つ目は、障害通知時のシミュレーションである。障害通知時に通過する LSR 数が復旧時間に及ぼす影響を明らかにするために、標準トポロジの LSR1 と LSR4 の間に LSR を直列に追加して通過 LSR 数毎の復旧時間を調査した (図 5)。

二つ目は、ラベル配布時のシミュレーションである。復旧 LSP 確立の際にラベル配布が行われる LSR 数が復旧時間に及ぼす影響を明らかにするために、標準トポロジの LSR1 と LSR2 の間に LSR を直列に追加して配布 LSR 数毎の復旧時間を調査した (図 6)。

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 障害通知時

図 5 の横軸は、Link3 上の LSR 数を示す。標準トポロジでは 0 となる。縦軸は、障害が発生した時間から復旧 LSP の確立が完了するまでに要した復旧時間である。

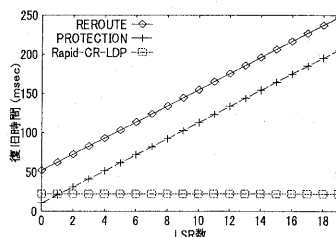


図 5 障害通知時の通過 LSR 数による復旧時間の変化

Reroute と Protection では、障害を検知した LSR4 から入口 LSR である LSR1 に障害を通知するために、LSR が増えるにつれて復旧時間も増加する。障害箇所により復旧時間に大きな差が生じることがわかる。

一方、提案手法である Rapid-CR-LDP の障害通知経路は常に“LSR4 ⇒ M-Link4 ⇒ サーバ”であるために復旧時間も LSR 数によらず一定となる。すなわち、復旧時間が MPLS 網の規模に関わらず一定となる。

また、通過 LSR 数が 2 以上である時 Protection より Rapid-CR-LDP の復旧時間が短くなる。よって、非常に小規模なネットワークを除き Protection よりも、Rapid-CR-LDP を適用するほうが高速復旧できることがわかる。

5.2.2 ラベル配布時

障害通知時同様、図 6 の横軸は、Link1 上の LSR 数を示す。標準トポロジでは 0 となる。縦軸は、障害が発生した時間から復旧 LSP の確立が完了するまでに要した復旧時間である。

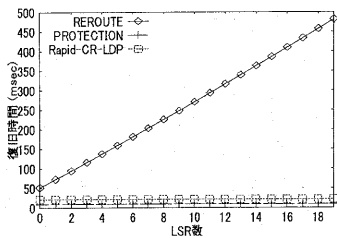


図 6 ラベル配布時の通過 LSR 数による復旧時間の変化

Reroute では、LSP の確立を行うためにラベルを配布する LSR 数の増加に比例して復旧時間が増加する。

Protection では、ラベル配布がすでに完了し LSP も確立されているために、障害通知にかかるリンク遅延時間のみで復旧できる。

Rapid-CR-LDP は、ラベル配布する LSR 数が増加しても一斉にラベル配布するためにリンク遅延時間だけに依存する。そのため、障害通知にかかるリンク遅延とラベル配布にかかるリンク遅延を合計した一定時間での復旧が可能である。

図 7 は、ラベル配布される LSR のうちあるひとつの管理専用線において、他の管理専用線より遅延時間が大きい場合を調査した結果である。この状況は、サーバと LSR を直接結ぶ管理専用線が全ての LSR との間に存在せず、サーバのメッセージがある LSR には迂回して到達するような場合に生じる。この場合、障害復旧時間はサーバと LSR の間にある最大遅延時間が復旧時間に影響を与える最大の要因となることがわかった。

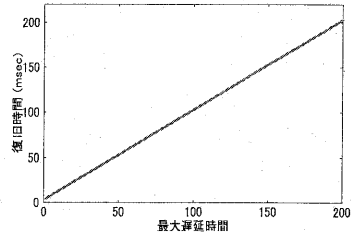


図 7 遅延時間の違いによる復旧時間の差

6. 実装による評価

シミュレーションでは、サーバでの処理時間、処理負荷を考慮しないものであった。しかし、実際にラベル配布を行う際にはサーバが複数個の packets を生成し一斉配布するため、サーバにかかる負荷が復旧時間に悪影響を与える可能性が高い。

そこで、シミュレーションで得られた復旧時間の正当性を検証するために提案手法の参照実装を行った。

実装は NetBSD 上で開発されている、MPLS スタックである AYAME [11] を基にサーバとのプロトコルを追加実装した。

6.1 設計

Rapid-CR-LDP の参照実装を図 8 のように行った。

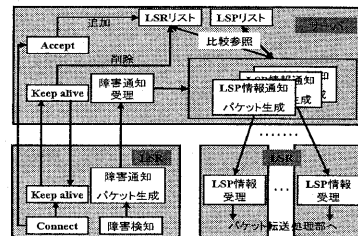


図 8 復旧処理の流れ

LSR とサーバの通信は全て TCP を用いる。LSR がサーバに接続すると、サーバは接続されている LSR を図中の LSR リストに登録する。サーバと LSR の Keep alive が途切れると、リストから削除する。

サーバ-LSR 間でのメッセージを、

- Keep alive パケット
- 障害通知パケット
- LSP 情報配布パケット

とした。これらのパケットフォーマットを図 9 に示す。

復旧手続きは、障害の検知から始まる。障害を検知した LSR は、どの LSP に障害が起きたかをサーバに通知する。

サーバは、Pre-Computation により障害検知 LSR、

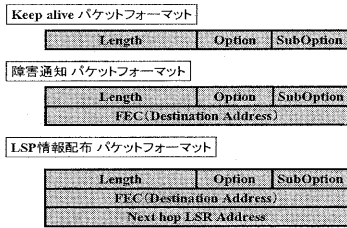


図9 パケットフォーマット

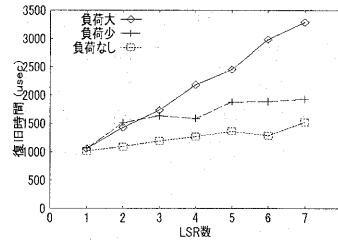


図10 RecoverTime

LSPの識別子、復旧先LSRの組をLSPリストとして保持する。

障害通知パケットに含まれるLSPの識別子及びIPアドレスよりリストを比較検索し、復旧LSP上のLSRのIPアドレスを得る。

これらを基にLSP情報配布パケットを生成し、送信する。

6.2 実験環境

実験は3台のPCをスイッチでフラットに接続して行った。マシンスペックは表2に示す。

表2 実験用マシンスペック

CPU	Intel Pentium III 866MHz
メモリ	512MB
ネットワークカード	Intel i82557 Ethernet 100baseT
OS	NetBSD 1.5.2 (MPLS対応カーネル)

6.3 実験結果

実験は、LSR側で障害通知パケットを生成し始めてからLSP情報配布パケットを受信するまでの時間(復旧時間)を計測した。計測はサーバにかかる負荷を変更して3通り行った。計測回数は各々100回とし、その最大値を結果として採用した。これにより、サーバでの処理時間・処理負荷を明らかにする。

実験結果を図10に示す。“負荷なし”は、提案手法において管理専用線がある場合を想定している。サーバ専用マシンが用意されサーバに送信される障害通知パケットは同時に1つの場合である。管理専用線がなく、MPLS網上にサーバも存在する場合、すなわち、1台のマシンでLSRとサーバを兼用する場合を考慮して2通りの実験を行った。“負荷少”は、サーバが動いているマシン上でサーバとLSRが動いている場合で、送信される障害通知パケットは1つである。この状態が最も一般的な運用形態と考える。“負荷大”は、サーバとLSRを動かした上で、全てのLSRからの障害通知パケットを同時に受信した場合である。この状態は頻りにMPLS網で障害が発生している状態と考える。

すべてにおいて、サーバに接続されるLSR数が増加すると、障害復旧時間も増加していることがわかる。しかし、サーバとLSRの機能を分離している“負荷なし”の場合の増加は少ない。また、サーバとLSRを同時に動かす場合と、同時に発生する障害通知が増加する場合に大きく負荷がかかる。

この結果から、サーバとLSRの機能を分離し管理専用線を構築することにより復旧時間を最小にすることができると言える。仮に管理専用線を用意しなかった場合、障害通知及び復旧LSP情報は図7に従って最大遅延によって復旧時間が決定されることが判っている。

実験で行った“負荷大”のように障害が多量に、かつ同時発生することは、MPLS網が通常インターネットバックボーンとして運用されていることを考えても起こりえない。最も一般的な運用形態であると考えられる“負荷少”の場合でも復旧時間は2msec程度である。これにリンク遅延を加えたものが実ネットワーク上での障害復旧時間となるため、シミュレーションで設定した10msecの遅延は、現実に近いものと見ることができる。従って、シミュレーション結果は妥当であると考えられる。

7. まとめ

本稿では、金融や医療の分野で必要となる障害耐性の強いネットワークを低コストで実現するために、MPLS網にサーバを導入しサーバを利用して障害通知およびラベル配布する機構を提案した。また、この提案手法の有効性をシミュレーションおよび参照実装による実験で示した。

現在インターネットバックボーンにおいて利用されているMPLSのラベル配布機構であるLDPは、ホップ毎にラベルを隣接LSRに通知することを繰り返すためにラベル配布が遅いことを指摘した。また、MPLSでの障害復旧においても、LDPのラベル配布に時間がかかるために全体として復旧時間がかかる

ことと、障害を入口 LSR に通知するために障害箇所によって復旧時間が大きく変動してしまうことを指摘した。この問題に対して、本提案手法を用いることで一定時間での障害復旧の保証が可能となる。

今後は、解析的に復旧時間の上限を見積もることが必要である。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金、奨励研究 (A) (課題番号 13750353、平成 14 年度) によっています。ここに記して謝意を表します。

文 献

- [1] E. Rosen, A. Viswanathan and R. Callon, "Multi-protocol Label Switching Architecture", January 2001. RFC 3031.
- [2] "日本テレコム SOLTERIA", <http://www.solteria.net/>.
- [3] "NTT コミュニケーションズ VPN", <http://www.ntt.com/NEWS.RELEASE/2000NEWS/0006/0629.html>.
- [4] L. Andersson, P. Doolan, N. Feldman, A. Fredette and B. Thomas, "LDP Specification", January 2001. RFC 3036.
- [5] D. Awduche, et al., "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels", Internet Draft, February 2002. draft-ietf-mpls-rsvp-lsp-tunnel-09.
- [6] O. Aboul-Magd, R. Callon, R. Dantu, and others "Constraint-Based LSP Setup using LDP", November 2001. draft-ietf-mpls-cr-ldp-06.
- [7] V. Sharma, B. Crane, K. Owens, C. Huang, F. Hellstrand, B. Cain, S. Civanlar and A. Chiu, "Framework for MPLS-based Recovery", July 2001. draft-ietf-mpls-recovery-frmwrk-03.
- [8] E. Harrison, "Protection and Restoration in MM-PLS Networks", October 2001.
- [9] LBL, Xerox PARC, UCB, and USC/ISI, "VINT project", <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [10] Gaeil Ahn, "The MPLS network simulator (MNS)", <http://www.raonet.com/>.
- [11] Y. Uo, Z. Uda, N. Ogashiwa, "AYAME project", <http://www.ayame.org/>.