

IP Fast Reroute 法 SBR における リンク故障時の負荷分散手法の提案

井村和樹^{†1} 吉廣卓哉^{†2}

本研究では、IP ルーティングにおいて、リンクやノードの故障時に、予め計算された迂回路を用いて即時に通信を回復する IP Fast Reroute 法を対象として、故障時に迂回通信により発生する輻輳を緩和するための負荷分散手法を提案する。現在のインターネットで一般的に用いられるリンク状態型ルーティングプロトコルでは、ルータ同士の情報交換により同期のとれたトポロジ情報を基に経路表を計算する。このため、故障によりトポロジ情報の同期が崩れると、新たな経路が計算されるまでの間にユーザの通信が切断される恐れがある。IP Fast Reroute 法は、予め迂回路を計算しておき、故障時に即時に通信を回復する手法であり、複数の方法が提案されている。しかしこの技術では故障時に、迂回先のリンクにパケットが集中して輻輳が発生しやすいことが知られている。本研究では、IP Fast Reroute 法の 1 つである SBR-LP (Single Backup-table Rerouting-Link Protection) を拡張し、故障時に輻輳付近のパケットを迂回させる負荷分散手法を提案し、故障時のネットワークのスループット性能の維持を試みた。

Load Balancing in Failure State under IP Fast Reroute Scheme SBR

KAZUKI IMURA^{†1} TAKUYA YOSHIHIRO^{†2}

In this study, we propose a load balancing technique for an IP Fast Reroute scheme called SBR-LP to reduce congestion in the state of failure. In the current Internet, link-state routing schemes such as OSPF and IS-IS are used, in which all nodes share the network topology from which they compute routing tables. In the link-state routing schemes used in the current Internet, routing tables are calculated based on the shared topology obtained through information exchanges among routers. In case of failure, during the phase that the topology-change is propagated into the whole network, several routes between nodes can be cut due to inconsistency of topologies at each node, which should be avoided for the Internet to be a reliable network infrastructure. The technique called IP Fast Reroute enables us to recover communication immediately in case of failure by switching forwarding path to the pre-computed detour path. In this technique, however, it is well-known that the detour traffic causes congestion that degrades the communication quality. In this study, we extend SBR-LP (Single Backup-table Rerouting – Link Protection), which is one of the IP Fast Reroute techniques, to allow load balancing to reduce congestion in case of failure.

1. はじめに

インターネットは既に社会で必須のインフラストラクチャとして認知されている。インターネットを用いたアプリケーションの進歩により通信速度への要求は増加し続け、一方ではビジネスからの要求により、ネットワーク機器の故障や伝送線の切断時にもサービスが止まらない高度な信頼性が求められている。

インターネットで伝統的に用いられてきたリンク状態型ルーティングプロトコルでは、機器の故障やリンク切断時には、トポロジ変更情報を素早く広告し、最短経路を再計算することで新たな通信経路に切り替える。しかしこのためには、一般的に数秒程度の時間がかかり、この間にユーザの通信が切断されることは否めない。

この問題を改善するための技術として、IP Fast Reroute と呼ばれる技術が活発に研究されている[1][2][3][4][5][6]。この技術は、ルータが物理的信号等によって故障を検知した際に、パケットの転送先を最短路から予め計算しておいた

迂回路に即時に切り替えることで、故障から即時に通信を回復できる。しかしこれらの手法では、故障時にパケットの迂回経路の通信が急激に増加するため、負荷が集中し輻輳が発生するホットスポットが生じることが報告されており[7]、この通信性能の低下を抑える負荷分散手法が求められるが、その解決方法の提案はなされていない。

本研究では、IP Fast Reroute 法の 1 つである SBR-LP[2] を拡張し、リンク故障時に発生する輻輳を、IP Fast Reroute の迂回路を用いて緩和する負荷分散手法を提案する。提案手法は、リンク故障時に IP Fast Reroute の迂回路上で輻輳が発生した場合に、一部のパケットが輻輳箇所からの迂回路を用いてさらに迂回を行い、輻輳箇所の帯域を空けることで、輻輳を緩和する。つまり、迂回を連鎖的に行うことで、リンク故障時に発生する通信の集中を、周辺の通信路へと分散させることで、ネットワークの性能劣化を最小限に抑え、故障時にも通常の通信性能を維持することを目標とする。

本論文の構成を以下に示す。2 章では、本研究の関連研究を説明し、その問題点を明らかにする。3 章では提案手法を説明する。4 章では、提案手法の ns-2[8]への実装と評価実験について述べ、5 章で成果をまとめる。

^{†1} 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

^{†2} 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

2. 関連研究

2.1 IP Fast Reroute 法

IP Fast Reroute (以下、IPFRR と呼ぶ)は、主にリンク状態型ルーティングプロトコルを対象として、リンクやノード等の故障時に、予め計算された迂回路に即時にパケットを転送することで、ユーザ通信の切断を防ぐ手法である。リンク切断をメタルケーブルの電気信号等を用いて検出し、即時に迂回路に切り替えることで、概ね 50ms 以内の経路の復帰を実現できるため、ユーザに故障を気づかせない運用が可能である。

IPFRR[1][2][3][4][5][6]は世界中で多くの研究者の興味を集め、盛んに研究されている技術である。IPFRR の実現方式はいくつかに分類できる。最も既存技術への変更が少ない方法として、LFA (Loop-Free Alternate)が提案され、IETF において標準化された。LFA は各ノードが第2の経路表を持ち、第1の経路表の次ホップが故障により利用できないときに第2の経路表を用いる手法である。しかし、1ホップのみの代替経路しか利用できないため、任意の1リンク故障や1ノード故障に対して、必ずしも宛先に到達できる保証がない。

FIFR (Failure Inferencing-based Fast Rerouting)はこれを拡張し、全ての1リンク故障及び1ノード故障に対応できる手法である。FIFR でも第2の経路表を持つが、パケットを受信したインタフェースを識別することにより故障を推測する。具体的には、パケットが第一経路表の次ホップから逆流してきた場合にはそのパケットを第2の経路表に転送する。FIFR はパケットフォーマットを変更することなく任意の1リンク/1ノード故障に対応できる手法であり、FIFR の提案後にもこれを改良した手法が提案されている[9][10]。

NotVia[3]は IP パケットのカプセル化を用いて故障に対応する手法である。各ノードは、隣接ノード/リンクが故障した場合に備えて、最短経路上でその故障ノード/リンクの次のノードに至る迂回路を計算し、その迂回路を通るようにパケットをカプセル化して転送する。迂回路計算のために、迂回路の終端ノードに対して NotVia アドレスと呼ばれるアドレスを設定し、ネットワーク上に広告する。NotVia アドレスに対しては、故障を想定したノード/リンクを避ける経路が計算される。本手法では、新たに発行する NotVia アドレスを設定する管理コストと、新たなアドレスがネットワーク上に広告される制御コストが問題であり、これを改善する手法が提案されている[11]。

我々の研究グループでは、第2の経路表に加えてパケット上の2ビットの領域を用いることで任意の1リンク故障に対応する SBR-LP (Single Backup-table Rerouting - Link Protection)を提案した[2]。さらに、これをノード故障に対応するように拡張し、SBR-NP (Single Backup-table Rerouting

- Node Protection)を提案した[6]。パケット上の領域を利用することは無視できないオーバーヘッドではあるが、これによって、複数のノードやリンクが故障した時にもパケットのループを防げる利点がある。本研究では、SBR-LP を拡張して負荷分散を実現するが、これは、効果的な負荷分散のためにパケットの状態を管理するためであり、もともとパケット上の領域を用いる SBR-LP との親和性が高いからである。

2.2 IP Fast Reroute 法 SBR-LP[2]

IPFRR 法の1つである SBR-LP(Single Backup-table Rerouting-Link Protection)は、リンク状態型ルーティングプロトコルを対象にした、任意の1リンクの故障への対応を可能にする手法である。この手法では、リンク状態型ルーティングプロトコルがトポロジ情報から経路表を計算する際に、通常の最短路ルーティング用の経路表に加えて迂回用の経路表をもう1枚作成し、これら2枚の経路表を用いることでパケットの迂回を実現する。

SBR-LP では、最短路用の経路表を**プライマリテーブル (PT)**、迂回路用の予備の経路表を**バックアップテーブル (BT)**と呼ぶ。BT の各エントリには1ビットの領域を用意し、s ラベルが付与されているかどうかを判別する。また、パケットヘッダには2ビットのフラグ(b, r)が設けられ、これらのフラグの状態により転送される経路表が選択される。パケットは通常、b と r の両方のフラグが0である通常状態(これを(0, 0)と表す)である。パケットが故障リンクに会うと、PT が故障して使えないので、b フラグを1にして BT に転送する(迂回状態)。b フラグは使用する経路表を表し、b フラグが1の間は、BT を用いて転送される。s ラベルが付与されている BT のエントリに転送される際に、b フラグは0になり、その後は PT の示す経路を通って宛先に到達する(迂回終了)。ここで r フラグは、迂回路から最短路に戻った(=b フラグがリセットされた)時に1になり、パケットが迂回済みであるということを示す。r フラグが1であれば、以後は故障に出会っても迂回されることはない。これにより、複数個所にリンク故障が発生した際にパケットが何度も迂回してループすることを防いでいる。

以上に述べたように、この SBR-LP は、「予備の経路表1枚の追加」と「パケットヘッダ上の2ビットのフラグを使用」という低いコストで任意の1リンクの故障への対応を可能にするという点が特徴である。

SBR-LP の動作を、図 2.1 を用いて説明する。この図では、ノード 8 への最短路の1つを実線矢印で、SBR-LP で計算した迂回路を破線矢印で示している。図 2.1(a)において、ノード 1 からノード 8 に通信を行う場合、リンク故障が無ければ PT を用いて 1→3→6→8 という経路でパケットが転送される。しかし、ノード 3 とノード 6 の間でリンク故障が発生した場合(図 2.1(b))には、1→3 と転送された後、

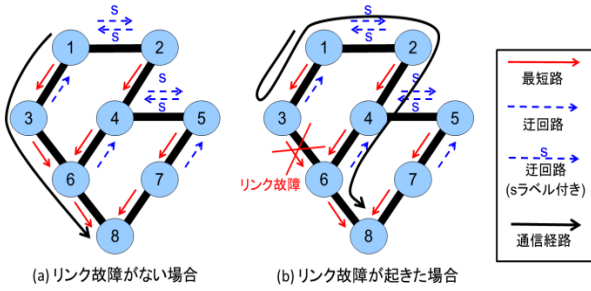


図 2.1 : SBR-LP のルーティング

リンク故障に気付いたノード 3 がパケットの **b** フラグを 1 にする。b フラグが 1 なので、そこからは BT を用いて 3 → 1 → 2 と転送される。1 → 2 のエントリには *s* ラベルが付いているので、b フラグを 0 にリセットし、r フラグを 1 にすることで迂回を終了する。そして、再び PT を用いて 2 → 4 → 6 → 8 と転送を行う。なお、この図ではどのリンクが故障した場合においても同様に、宛先への迂回が可能となっている。

SBR-LP における正式なパケット処理の規則を表 2.2 に示す。「フラグの状態」は、パケットヘッダのフラグ (b, r) の状態を表しており、「リンク故障」はそのルータの PT にあたるリンクの故障の有無である。ルータがパケットに対して行う処理はこの組み合わせによって決まり、その動作は「パケットの処理」の項目に記されている。また、パケット処理がフラグの変化を含む場合には、「フラグの状態変化」にその内容を記載している。

2.3 SBR-LP を用いた負荷分散手法[12]

原ら[12]は、リンク故障がない通常状態において、SBR-LP の迂回路を利用して負荷分散を行う手法を提案した。この手法ではリンク故障時の輻輳に対応することはできないが、本提案手法の基礎となる技術であるため、本節で紹介しておく。

原らの提案した負荷分散法の仕組みを説明する。この手法は、PT と BT の 2 枚の経路表と *s* ラベルにより迂回路を用意する点と、パケットヘッダ上の 2 ビットのフラグ (b, r) をパケットの転送先の切り替えに使用する点については SBR-LP と同様である。SBR-LP ではリンク故障に対応するために、リンク故障をルータが検知した時のみ、

フラグの状態 (b, r)	リンク故障	パケットの処理	フラグの状態変化
通常 (0, 0)	なし	PTを用いて最短路に転送	
	あり	BTを用いて迂回路に転送	(b, r) = (1, 0)に変化
迂回 (1, 0)	なし	BTを用いて迂回路に転送	エントリが <i>s</i> ラベル付きなら (b, r) = (1, 0)に変化
	あり	破棄	
迂回終了 (0, 1)	なし	PTを用いて最短路に転送	
	あり	破棄	

表 2.2 : SBR-LP におけるパケット処理のルール

パケットの転送先を切り替える処理を行う。これに対して原らの方法では、リンクに輻輳が起きた場合にパケットを迂回させるために、ルータ内の送信キューにパケットが一定量以上溜まっている時にもパケットの転送先を切り替える処理を行う。これにより、特定のリンクに通信が集中した際に、受信速度と送信速度の差によりリンクの送信キューに溜まっていくパケットが迂回されることで、集中していた通信を分散し、ネットワークのスループットを向上できる。しかし、パケットが迂回されることで、迂回路として使用されたリンクの負荷が高まり、新たな輻輳が起こる可能性がある。この輻輳によりさらに迂回が起こり、これが連鎖的に起こると、ネットワーク全体が混乱し、他の通信に悪影響が出てしまう。原らの提案した手法では、この問題を解決するために、送信キューが少し溜まり始めた段階で、迂回中のパケットと迂回を終了したパケットを破棄し、そのリンクを最短路として使う通常のパケットを保護する。つまり、輻輳時には迂回パケットと迂回終了パケットが優先的に破棄されることで、二次的な輻輳を防ぐことができる。

2.4 未解決の問題

2.1 節で述べた IP Fast Reroute 法 SBR-LP では、リンク故障時に、迂回パケットが原因で迂回路上に輻輳を発生させ、故障リンク周辺の通信効率を低下させる危険性がある。一方、2.2 節で述べた原らの負荷分散法[12]では、リンク故障を迂回したパケットのみが優先的に破棄されるため、リンク故障を迂回したフローのみの通信効率が大幅に低下することが懸念される。リンク故障時には、故障による通信性能への悪影響は、できるだけネットワーク上の通信全てが平均的に請け負うことが理想であり、たまたま故障リンクを使っていたフローのみが引き受けるべきではない。本研究では、SBR-LP においてリンク故障時に発生する輻輳を、二次的な迂回をさせることにより緩和し、リンク故障による悪影響を輻輳にかかわる全てのフローに分散させることで、リンク故障の悪影響を最小限に抑えるような負荷分散手法を提案する。

3. 二段階の迂回連鎖による負荷分散手法

3.1 提案手法の概要

本研究で提案する二段階の迂回連鎖による負荷分散法の仕組みについて説明する。この手法は、SBR-LP と同様に、リンク故障時に予備の経路表を使用することでパケットを迂回させる。提案手法では、それに加えて、迂回先のリンクで通信の集中による輻輳が起きた場合に、必要に応じて二段階目の迂回を行う。これにより、リンク故障を迂回したパケットのみがリンク故障の悪影響を引き受けることを避け、輻輳に関わるパケットを周辺の経路に分散する

ことができる。輻輳を迂回したパケット（二段階目の迂回パケット）は、原らの手法[12]と同様に優先的に破棄されるため、三段階目以降の迂回の連鎖は発生しない。このため、迂回の連鎖によるネットワーク全体の混乱を避けることができる。また、提案手法では、リンク故障を迂回したパケットが通るリンクでしか輻輳迂回を許さない。つまり、リンク故障時のみ、その周辺の負荷分散を行う。これにより、通常状態では負荷分散を行わない一般的なネットワークの運用を行い、リンク故障時のみ性能低下を補うために負荷分散を行うこととする。

提案手法では、SBR-LPと同様に、2枚の経路表、及び経路表の宛先毎に用いられる1ビットのsラベルを用いてパケットを迂回するが、パケットの状態変化の方法を変える。SBR-LPでは、パケットヘッダ上の(s,b)の2ビットの領域を用いてパケットを迂回する。これにより、「通常」「迂回」「迂回終了」の3状態を管理して故障時のパケット迂回を実現していると考えてよい。これに対して提案手法では、故障が原因であるパケット迂回（一段階目の迂回）と輻輳が原因であるパケット迂回（二段階目の迂回）を区別するために、パケットヘッダ上の3ビット領域を用いて、「通常」「故障迂回」「故障迂回終了」「輻輳迂回」「輻輳迂回終了」の5状態に拡張して管理する。

図3.1に提案手法の概要を示す。リンク(1,2)が故障し、通信Aが迂回する状況を考える。リンク故障時には、SBR-LPの迂回路(1→3→4→2)を用いて通信Aを迂回させることで、通信Aが切断されることを防ぐ。ここで、迂回路中のリンク(3,4)は通信Bも使用しており、リンク(3,4)は両方を許容する容量がない場合を考える。SBR-LPでは、許容量を超えるパケットは破棄され、AのパケットもBのパケットも平等に破棄される。本研究では、SBR-LPの場合には破棄される通信Bのパケットを、破棄する代わりに迂回させることで、宛先に到達するパケットを増加させ、リンク故障による性能劣化を補う。

ここで、通信Bの迂回パケットがさらに輻輳に遭遇した場合には、第三段階の迂回は行わず、リンク許容量を超えた分だけ、通信Bのパケットが破棄されるようにする。この処理は原らの手法[12]と同じであるが、これによって、迂回の連鎖によってネットワーク全体に悪影響が及ぶことを避けると同時に、迂回パケットが迂回路上にもともとあった通信に悪影響を与えることを避けることができる。図3.1の例では、SBR-LPの迂回路(3→5→6→4)を用いて輻輳を迂回した通信Bのパケットがリンク(5,6)を通ろうとするが、このリンクは通信Cが使用しており、両方の通信を許容する容量がないため、通信Cに影響を与えることなく通信Bが優先的に破棄されている。

3.2 提案手法の詳細

パケットの状態変化も含めた各ルータでの処理の詳細

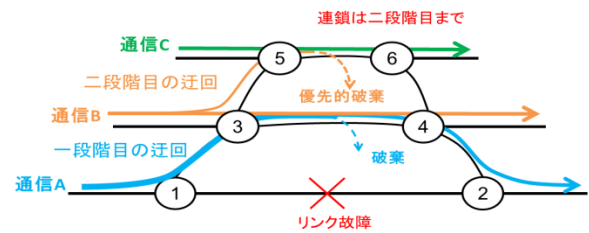


図3.1: 二段階の迂回連鎖による負荷分散法におけるルーティング

について述べる。通常状態のパケットとは、PTを用いて転送されるパケットであり、故障が発生していない通常時のパケットの状態である。通常状態のパケットがリンク故障に会った場合には、そのパケットは「故障迂回」状態となり、図3.2(a)のようにBTに転送される。故障迂回状態のパケットは、その後sラベル付きのリンクを通ると「故障迂回終了」状態になり、宛先に到達する。これら「故障迂回」「故障迂回終了」状態のパケットは、宛先に到達するまでの間に輻輳に遭遇すると、破棄される。その理由は、故障迂回状態のパケットは既にBTを用いて転送されているのでそれ以上迂回できず、また、故障迂回終了状態のパケットを再度迂回させることは、複数箇所に輻輳がある場合にパケットがループする可能性があるからである。「故障迂回」状態のパケットが輻輳により破棄される様子を図3.2(b)に示す。輻輳は、転送される次ホップに対応する送信キューの長さ(送信キューに溜まっているパケットの量)により判定される。送信キュー長がしきい値 T_1 を超えたときに輻輳が発生したと判断し、そのようなリンクではこれらの2状態のパケットは破棄される。

このような輻輳リンクに迂回されていない通常状態パケットが到達したときには、輻輳迂回が発生する。まず図3.3(a)に、輻輳が発生していないリンクにおける、通常状態パケットの動作を示す。ルータに到達したパケットは受信キューに蓄積され、受信キューから取り出されたパケットは経路表により次ホップが決まると、その次ホップに対応する送信キューに格納される。図の出力キューの下段はPTを表し、上段はBTを表す。通常状態のパケットはPTの送信キューに格納され、順番に転送処理がなされる。一方、輻輳時、つまりPTの送信キュー長が T_1 を超えている場合には、図3.3(b)のように、パケットは「輻輳迂回」状態になり、BTの送信キューにパケットが格納される。輻輳迂回パケットは、その後sラベル付きのリンクを通ると「輻輳迂回終了」状態になり、宛先に到達する。なお、このPTには故障迂回パケット(または、故障迂回終了パケット)も到達しているが、前述のとおり、これらのパケットは送信キュー長が T_1 以上であれば破棄されることになる。しかし、輻輳迂回を行うことでPTへの負荷が低減され、キュー長が T_1 以上長くはならなくなっており、SBR-LPに比べて故障迂回パケット及び故障迂回終了パケットは破棄さ

れにくくなる。

輻輳迂回パケット、及び輻輳迂回終了パケットが再び輻輳に遭遇した場合には、このパケットが他の通信に悪影響を及ぼさないように、優先的に破棄される。図 3.4 にその様子を示す。ここでは、新たにしきい値 T_2 ($<T_1$)を設け、送信キュー長がこれを超えた場合に、輻輳の予兆であると判断し、迂回路を通行中の輻輳迂回パケット（または、最短路を通行中の輻輳迂回終了パケット）を破棄する。 T_2 はかなり小さい値に設定して良い。この処理により、輻輳迂回パケットを、他の通信に悪影響を及ぼす前に優先的に破棄することができる。

ところで、著者らは、故障発生時にのみ提案する輻輳迂回を発生させることが望ましいと考えており、その仕組みが必要である。(もちろん、この仕組みを実装しなければ、通常状態でも輻輳時の迂回が可能である。)これは、故障迂回パケットが通ったリンクに対して、一定時間に限って輻輳迂回を許すことで実現できる。輻輳迂回を許すかどうかを表すフラグを、各インタフェースに持たせればよい。

以上が提案手法の packets 転送処理である。上記の処理を実現する packets 転送規則を表 3.1 に示す。packets は 5つの状態をとり、それぞれの状態で packets がどのように転送されるかが網羅されている。

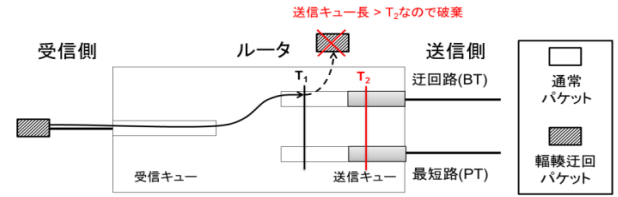


図 3.4: 閾値 T_2 による輻輳迂回パケットの優先的破棄

パケットの状態	リンク故障	送信キュー長と閾値の比較	リンクの故障フラグ	パケットの処理	パケットの状態変化	故障フラグの状態変化
通常	なし	送信キュー長 < 閾値 T_1		PTを用いて最短路に転送		
		送信キュー長 > 閾値 T_1	フラグが立っている	BTを用いて迂回路に転送	輻輳迂回状態に変化	
故障迂回	あり	送信キュー長 < 閾値 T_1	フラグが立っていない	PTを用いて最短路に転送		
		送信キュー長 > 閾値 T_1		BTを用いて迂回路に転送	故障迂回状態に変化	
故障迂回終了	なし	送信キュー長 < 閾値 T_1		PTを用いて最短路に転送	エントリがラベル付きなら故障迂回終了状態に変化	BTの系リンクの故障フラグを立てる
		送信キュー長 > 閾値 T_1		破棄		
輻輳迂回	なし	送信キュー長 < 閾値 T_2		BTを用いて迂回路に転送		
		送信キュー長 > 閾値 T_2		破棄		
輻輳迂回終了	あり	送信キュー長 < 閾値 T_2		PTを用いて最短路に転送	エントリがラベル付きなら輻輳迂回終了状態に変化	
		送信キュー長 > 閾値 T_2		破棄		

表 3.1: 提案手法における packets 転送規則

4. 提案手法の評価

4.1 評価実験

提案手法の負荷分散性能を評価するために、シミュレーション実験を行った。ネットワークシミュレータとして ns-2[8]を用いた。比較対象として用いる SBR-LP と提案手法を ns-2 上に実装した。

シミュレーションシナリオとして、ランダムネットワーク上でランダムに通信が発生させる状況を選んだ。トポロジ生成ソフトウェア BRUTE[13]を用いて、ノード数 30、リンク数 60 の waxman モデル[14]に基づいたランダムトポロジを発生させた。リンク帯域は 1.0Mbps、遅延は 1ms とした。通信フローとして 200kbps の CBR (Constant Bit Rate) 通信を、シミュレーション開始後 1 秒後に一斉に発生させた。提案手法における 2つのしきい値 T_1 と T_2 はそれぞれ最大キュー長の 50%と 5%に設定した。通信フローの発生から 5 秒が経過したときに無作為に選んだリンクを一本故障させた。実験は、通信フローの本数を 20 本から 150 本まで 5 本ずつ変化させ、それぞれの場合に対して 5つのトポロジと 6つの乱数のシード値を組み合わせた 30 パターンの実験を行うことで、計 810 パターンの実験を行った。

評価指標として、ネットワーク全体の総スループットと、フロー毎のリンク故障後の 5 秒間の平均ドロップパケット数を測定した。これは、リンク故障時における、提案手法の二段階迂回による packets 救出効果と、各フローへの故障の影響の程度を測るためである。また、実験結果を用いて、810 回の実験のそれぞれを、「迂回が起らなかったもの」「故障迂回(一段階目の迂回)のみが起こったもの」「輻輳迂回(二段階目の迂回)まで起こったもの」の 3 種類に分

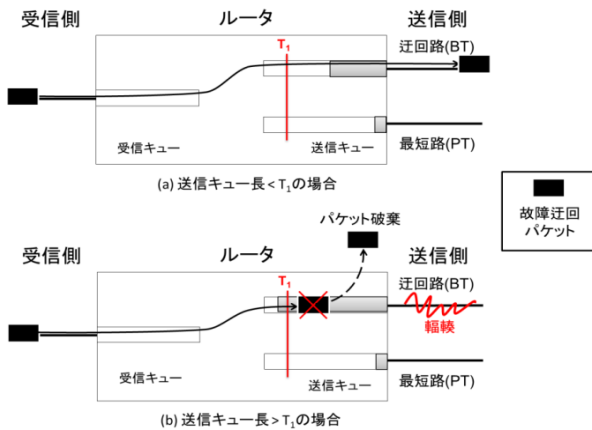


図 3.2: 閾値 T_1 による故障迂回パケットの破棄

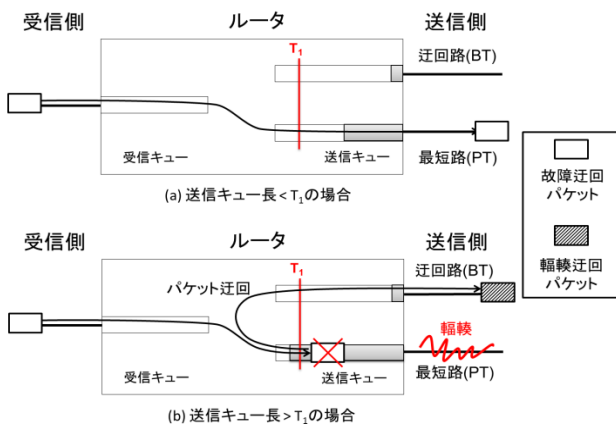


図 3.3: 閾値 T_1 による通常 packets の輻輳迂回

類し、その割合を調査した。さらに「輻輳迂回(二段階目の迂回)が起こったもの」については、「ネットワーク全体のリンク利用率の平均」と「リンク故障発生前後のスループットの変動率」の相関関係を、提案手法と SBR-LP の両方の結果について見ることで、リンク利用率がどのような値をとる場合に提案手法が効果的なのかを確認した。

4.2 評価結果

図 4.1 にネットワーク全体の総スループットの時間推移を示す。この結果は、フロー本数 70 本の実験一回に関するデータである。横軸はシミュレーション時間、縦軸は総スループットを示している。リンク故障発生前の 5 秒間はどちらの手法も動作に違いが無いため変化は見られないが、リンク故障発生後の 5 秒間の総スループットを見ると、迂回路での輻輳に対する負荷分散を行わない SBR-LP と比べ、提案手法は約 7%の総スループットの向上が見られた。また、このスループットの向上により、故障後も故障前と同等のスループットを維持することができ、スループット上は故障の影響を抑えることができた。本結果は、フロー本数 70 本の実験一回の結果であるが、他の結果に関しても、概ね故障前のスループットを維持できた。

図 4.2 にリンク故障後の 5 秒間の平均ドロップパケット数をフロー毎に出力したデータを示す。この結果も、図 4.1 と同じフロー本数 70 本の実験一回に関するデータである。横軸はフロー番号、縦軸はリンク故障発生後の平均ドロップパケット数をフロー毎に示している。よって、縦軸の値が低ければ低いほどリンク故障発生後にパケットの破棄が起きていないため良い結果だと捉えることができる。リンク故障発生後、一部のフローは SBR-LP に比べてドロップパケット数が増加している。これは、そのフローのパケットの一部に対して二段階目の輻輳迂回がなされ、そのパケットが再び遭遇した輻輳により破棄された結果である。しかしそれ以外のほとんどのフローについては、ドロップパケット数は大幅に減少している。これは、輻輳迂回を行うことで、故障迂回パケットが破棄されにくくなった結果である。つまり、輻輳迂回によってリンク故障の悪影響をより多くのフローに分散した結果、リンク故障箇所からより遠いリンクの帯域を使うことができようになり、全体としてパケットの損失が大きく減少したと考えられる。1 リンク故障時のドロップパケット数が特定のフローに偏ることはあまりなく、全体として良好な通信性能の向上が見られた。

さらに、フロー本数を変動させて行った実験の結果を分類し、その割合をフロー本数ごとに示した結果を図 4.3 に示す。横軸は発生させたフローの本数、実験を 3 種類に分類したときの、各種類の割合を示している。この図では、通信量と実験結果の関係を調べている。フローの本数が 40 本より少なくネットワークの通信量が低い場合には、迂回

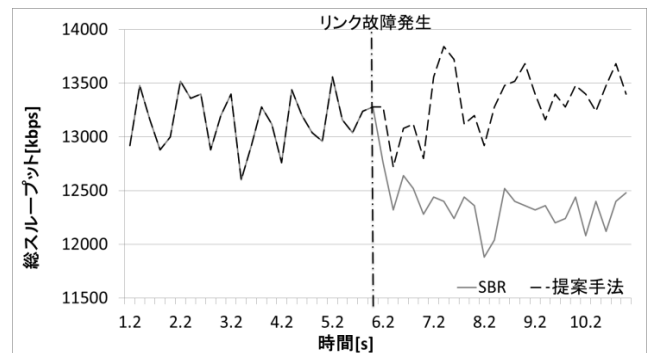


図 4.1: 総スループットの時間推移

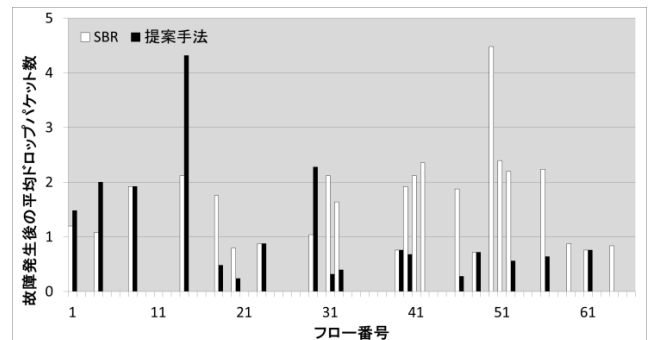


図 4.2: 故障発生後のフロー毎の平均ドロップパケット数

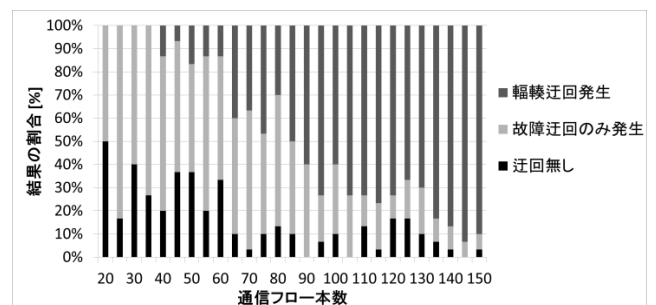


図 4.3: フロー本数毎の実験結果の分類の割合

が起こらないか、または故障迂回のみが発生し輻輳迂回が発生しない結果のみであった。しかし、フロー本数が 40 本以上になると輻輳迂回が起きた結果が表れはじめ、さらに発生フロー本数が増えるに伴って輻輳迂回が起きた実験の割合が増加した。この結果から、通信量が増加するとともに提案手法が有効に働くことがわかる。

最後に、輻輳迂回が起きた実験において、提案手法を適用した場合のリンク利用率と故障発生前後のスループットの変動率の相関関係を散布図に表した結果を図 4.4 に、同様に SBR-LP を適用した場合のリンク利用率と故障発生前後のスループットの変動率の相関関係を散布図に表した結果を図 4.5 に示す。どちらの図も横軸はネットワーク全体のリンクの平均利用率、縦軸は故障発生前のネットワーク全体の総スループットを 100%とした時の故障発生後のスループットの変動率を示している。ここでリンク利用率とは、リンクの最大帯域に対する利用帯域の割合を、全リンクに対して平均した値である。どちらの図を見ても、リンク利用率と総スループットの間には特に相関が見られな

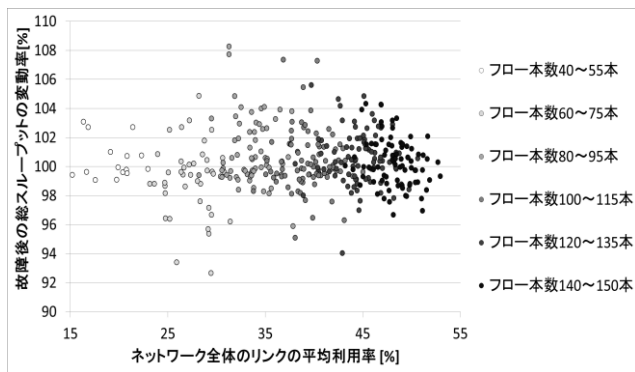


図 4.4：提案手法を適用した場合の相関関係

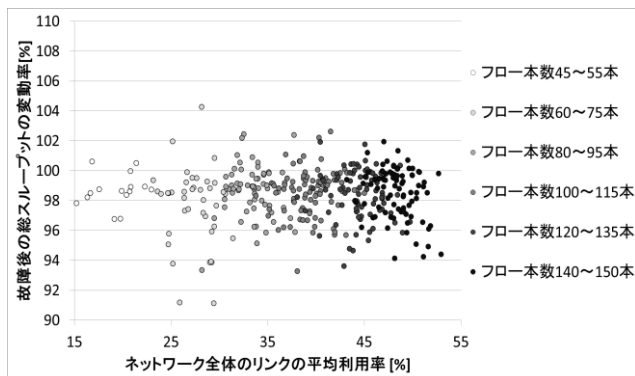


図 4.5：SBR-LP を適用した場合の相関関係

ったが、図 4.4 を見るとほとんどのケースにおいて総スループット変動率が 100%に近いかそれ以上の値を示しており、提案手法がリンク利用率の値に関わらず故障前のスループットを維持できることが分かる。また、図 4.5 の SBR-LP を適用した場合の結果と比較しても、提案手法を適用した場合の結果の方が平均して 2%ほど高い値を示していることから、提案手法はリンク利用率の値に関わらず SBR-LP に比べて高い性能を発揮することが分かった。しかし、提案手法を適用した場合でも、輻輳が最短経路付近で複数発生したケースについては故障発生後に起きるスループットの低下を防ぐことはできなかった。

4.3 今後の課題

評価結果から提案手法が 1 リンクの故障に対して通信量に関わらずほとんどの場合において故障前のスループットを維持することが分かったが、提案手法を適用してもスループットの低下を防ぐことのできないケースがあるため、このようなケースにも対処できるように提案手法を改良することが望ましい。また、提案手法は SBR-LP と比較するとスループットを 2%ほど向上させるということが今回の実験により確認できたが、このことから三段階目以降の迂回の効果は 2%より小さいと思われ、迂回を二段階以上行う必要性は薄いといえる。さらに、提案手法では迂回によって宛先に到達するパケットの到達順序の入れ替わりが発生し得る。到達順序の入れ替わりは、特に TCP の通信性能

に影響するため、1 リンク故障時に本当にネットワークの通信性能を維持できることを保証するためには、この影響の大きさを評価する必要があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、リンク故障を迂回したパケットにより迂回先のリンクに通信が集中した場合に、二段階の迂回を連鎖的に行うことで通信を分散させ、通信効率の低下を防ぐ負荷分散手法を提案した。ネットワークシミュレータ ns-2 を用いたシミュレーション実験により提案手法の性能評価を行い、提案手法は、リンク故障発生前と同等のスループットを維持することができ、リンク故障に対する迂回のみを行う SBR-LP に比べると、ネットワーク全体の総スループットを平均して 2%ほど高めることを確認した。また、通信がリンク故障により受ける悪影響を周辺のフローに分配し、全体として減少させられることを明らかにした。

参考文献

- 1) M. Shand, S. Bryant, "IP Fast Reroute Framework," IETF RFC7714, 2010.
- 2) T. Yoshihiro, "A Single Backup-Table Rerouting Scheme for Fast Failure Protection in OSPF," IEICE Transactions on Communications, Vol. E91-B, No. 9, pp.2838-2847, 2008.
- 3) M. Shand, S. Bryant, and S. Previdi, "IP Fast Reroute Using Not-via Addresses," IETF, Internet-draft, 2011.
- 4) Z. Zhong, S. Nelakuditi, Y. Yu, S. Lee, J. Wang, and C.N. Chuah, "Failure Inferencing Based Fast Rerouting for Handling Transient Link and Node Failures," in Proceedings of IEEE Global Internet, 2005.
- 5) A. Atlas and A. Zinin, "Basic Specification for IP Fast Reroute: Loop-free Alternate," IETF RFC5286, 2008.
- 6) T. Yoshihiro and M. Jibiki, "Single Node Protection without Bouncing in IP Networks," In proc. IEEE HPSR2012, pp.88-95, 2012.
- 7) S. Dasgupta, J.C. de Oliveira, and J.P. Vasseur, "A Performance Study of IP and MPLS Traffic Engineering Techniques under Traffic Variations," IEEE Globecom2007, pp.2757-2762, 2007.
- 8) The Network Simulator - ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- 9) K. Xi and H.J. Chao, "IP Fast Rerouting for Single-link/node Failure Recovery," In proc. IEEE BroadNets, 2007.
- 10) S. Antonakopoulos, Y. Bejerano, and P. Koppol, "A Simple IP Fast Reroute Scheme for Full Coverage," In Proc. IEEE HPSR2012, pp.15-22, 2012.
- 11) A. Li, P. Francois, and X. Yang, "On Improving the Efficiency and Manageability of NotVia," In proc. Of ACM CoNext2007, 2007.
- 12) M. Hara, T. Yoshihiro, "Adaptive Load Balancing Based on IP Fast Reroute to Avoid Congestion Hot-Spots," ICC 2011, pp.1-5, 2011.
- 13) A. Mwdina, A. Lakhina, I. Matta and J. Byers, "BRIT: An approach to universal topology generation," in Proceedings of IEEE MASCOTS, pp.346-352, 2001.
- 14) B.Waxman, "Routing of Multipoint Connections," IEEE J. Select. Areas Commun., pp.1617-1622, 1988.