

# 無線マルチホップネットワークにおける MPLS 高信頼通信方式の提案

柳生 智彦<sup>†</sup> 地引 昌弘<sup>†</sup>

<sup>†</sup>NEC システムプラットフォーム研究所 〒211-8666 川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: <sup>†</sup>{yagyu@cp, jibiki@bx}.jp.nec.com

あらまし 無線マルチホップネットワークは従来の固定網に比べ、移動性、構築の柔軟性、コストなど多くの点で優れており、ユビキタス社会の実現のために不可欠な技術のひとつである。無線網は基本的に帯域が狭く、移動や障害物などによってリンクの接続性が頻繁に無くなるという特性を持っている。そのため、現在提案されている無線マルチホップネットワークルーティングプロトコルのみでは信頼性の高い通信を実現することができない。現状、固定網と同等の高信頼性通信を必要とするアプリケーションを無線マルチホップネットワーク上で利用することは非常に困難である。本論文では、無線マルチホップネットワーク上で制御トラフィックを抑えながら高信頼通信を実現する投機的パス冗長化による高信頼通信方式を提案する。また、提案方式のシミュレーションを行い、その効果を検証する。

キーワード 無線ネットワーク、アドホックネットワーク、高信頼通信、MPLS

## A Proposal of Strategy for MPLS-based Reliable Communication in Wireless Multi Hop Networks

Tomohiko YAGYU<sup>†</sup> Masahiro JIBIKI<sup>†</sup>

<sup>†</sup>NEC System Platforms Research Laboratories 1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, 211-8666 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{yagyu@cp, jibiki@bx}.jp.nec.com

**Abstract** Wireless multi-hop networks are superior to wired networks in terms of the mobility support, flexible configuration, and low investment cost efficiency. Wireless networks usually have less bandwidth and disconnect links more frequently than wired networks. Therefore, it is difficult to achieve the reliable communication with currently defined Manet routing protocols. To realize the reliable communication in the wireless multi-hop networks, we propose a speculative path redundancy strategy without increasing control traffic. We have simulated the proposed method and evaluated its effectiveness.

**Keyword** Wireless Multi-Hop Network, Ad Hoc Network, reliable communication, MPLS

### 1. はじめに

近年、災害時通信や ITS(高度道路交通システム)など固定的なインフラを構築せず、移動体間で自由に通信ができるようなシステムが求められている。有線バックボーンネットワークや、携帯電話ネットワークなどのインフラが存在せず、通信を行うノードが自律的に移動するような環境においては、無線によるマルチホップネットワーク(以下、WMH-NW)が非常に有効な通信環境構築手段である。

無線網には有線網と異なり帯域が細く通信が切れやすいという特徴があり、また、ノードが移動するためトポロジーが頻繁に変化することを考慮して経路制御を行わなければならない。そのため、通常の RIP や OSPF などによる IP ルーティングでは経路の収束が遅く適用が困難である。WMH-NW の特性に適応した様々なルーティング方式が提案されている[1][2][3][4]。これらの方式は非常に有効であるが、通常の IP ルーティングと同様、リンクが切れてから通信が復旧するまでに数秒～数十秒という時間が必要である。WMH-NW ではリンクの切れる頻度や確率が有線網に比べて非常に高

いため、通信障害の頻度はさらに高くなる。このような WMH-NW において、有線網と同様に中断のない高信頼な通信を行うためには、前述の WMH-NW ルーティング方式だけでは困難である。

本論文では、MPLS 技術をベースとして WMH-NW 上で高信頼通信を実現するための方式を提案する。本提案方式の要点は以下の2点である。

**投機的パス冗長化:**パスの冗長化数を“持続維持数+切断猶予数”として定義することで、多重リンク障害におけるパス回復処理の負荷を軽減する

**リンク瞬断状態の導入:**リンク状態として持続状態および切断状態に加え接続と切断を短時間に繰り返す瞬断状態を定義することでリンクの不安定化によるパス回復処理の負荷を軽減する。

第2章では従来の高信頼通信方式と WMH-NW に適用する場合の問題点、第3章では、提案する高信頼通信方式について述べる。第4章で提案方式のシミュレーションと実プロトコルによる評価を行う。最後に第5章で全体のまとめを行う。

## 2. WMH-NW と高信頼化の制限

### 2.1. 従来の高信頼通信技術

有線 IP 網において高信頼通信を実現するために、MPLS を利用したさまざまな方式が提案されている [5][6][7][8]。大きくは以下の 3 方式に分類できる。

- ・通信冗長化方式
- ・パス端での回復方式
- ・障害端での迂回方式

通信冗長化方式は、通信経路が重ならないパスを 2 本設定し、2 本のパスに対して同時にデータを流す方式である。パスの一方に障害が発生しても、もう一方のパスでデータを送っているため通信が切れることがない(図 1)。

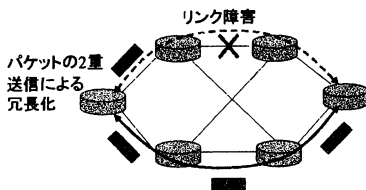


図 1 通信冗長化方式

パス端での回復方式では、通常 1 本のパスで通信を行い、そのパスに障害が発生した時点でパス端ノードにおいて代替パスを設定して切り替える。代替パスは事前に計算されている場合と、障害が発生してから計算される場合がある。障害が発生した後に切り替えを行うため、切り替え中はデータ喪失が発生する(図 2)。

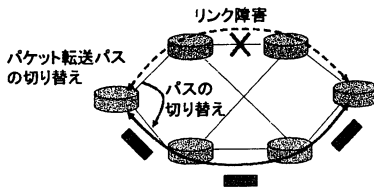


図 2 パス端での回復方式

障害端での迂回方式も、障害が発生してから代替パスを設定する方式である。パス端での回復方式との違いは、障害の発生したリンクまたはノードのみを迂回するように代替パスを設定する点である。そのためパス端での回復方式よりも短い時間で切り替えが可能であるが、多数の迂回パスを事前に計算しておく必要があるため管理負荷が高くなる(図 3)。

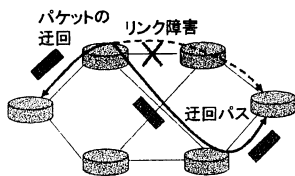


図 3 障害端での迂回方式

### 2.2. WMH-NW での制限

本節では、2.1 で述べた従来方式を WMH-NW に適用した場合に問題となる事象について述べる。

#### (a) リンク多重障害

従来方式は比較的信頼性の高いリンクで構成され、よく管理された有線網を前提としている。そのため、リンク多重障害には対応しておらず、また一度障害となったリンクは時間が経てば復旧すると仮定されている。いずれの方式においても、現用パスと迂回パスまたは代替パスの同時障害という状況に対応していない。しかし、WMH-NW では、障害物やノードの移動などによりリンク障害の発生頻度が有線網に比べ非常に高いため、同時多重リンク障害についても考慮する必要がある。また、WMH-NW では一度切れたリンクが復旧する保証は無く、障害となったパスをそのままにしておくことと次々とパスが切れて通信不能に陥る可能性が高い。そのため、WMH-NW では障害となったパスは張りなおして通信冗長性を保ち続ける必要がある。

#### (b) リンクの瞬断

無線リンクを使った WMH-NW では、障害物などによる一時的な通信不能状態(以下、瞬断と呼ぶ)が有線網に比べて頻繁に発生する。瞬断に対して過剰に反応しパス回復動作を行うことは、パス設定のためのシグナリング制御トラフィックを無駄に増加させ、帯域の浪費を招く。そのため、リンクの瞬断に対して過剰に反応せず、同時に通信の冗長性を保つことが可能であるようなパス回復制御方式が必要となる。

#### (c) 制御負荷

無線網では、一般的に有線網に比べ使用できる帯域が少ない。そのため有線網では問題とならないシグナリングやルーティングのための制御負荷が無線網では致命的な負荷となり得る。パスの張り替えは、同一リンク上に多数のパスが設定されている場合や、同時に複数のリンクが障害となる場合などに、複数同時に発生する。パス設定のためのシグナリング制御トラフィックが障害時に集中し、ネットワークの輻輳を引き起こすことによりパスの回復に失敗することが考えられる。そこで、リンク障害に対して回復動作のためのシグナリング制御メッセージが集中しない工夫が必要となる。

## 3. 高信頼 WMH-NW 通信方式

### 3.1. 瞬断状態の導入

隣接ノードと通信不能になった場合、その障害が瞬断か永断かをその時点で区別することは基本的に不可能である。そこで本提案方式では、ノード内で瞬断を管理するための状態遷移を導入する。通信可能なリンクは UP 状態とする。ノードは MAC レイヤーの Ack 落ちなどにより隣接ノードと通信できなくなったと判断した場合、隣接ノードとの間のリンクを瞬断状態に遷移させる。瞬断状態になったリンクが一定時間以上不通のままであれば永断状態に遷移する。もし一定時間以内に通信可能状態に戻り、通信可能状態がさら

に一定時間以上継続した場合はリンク状態を UP に遷移する。瞬断状態が一定時間以上継続した場合、そのリンクの持続的使用は困難であると判断し、リンク状態を永断に遷移する。図4にリンクの状態遷移図を示す。このようなリンク状態管理を行い、3.2 で述べる冗長通信方式における回復制御のトリガーとして利用する。

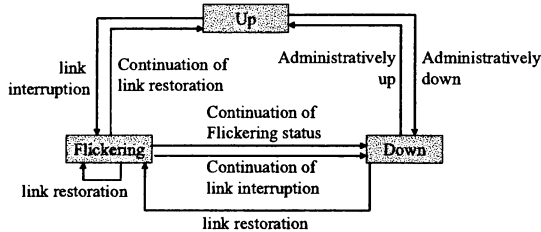


図4 リンク状態遷移図

### 3.2. 投機的 WMH-NW 高信頼通信方式

2.2 で述べた問題点を解決するため、通信冗長化方式に基づく新しい高信頼通信方式を提案する。通信冗長化方式を採用した理由は、障害時の切り替えが不要であり他の方式より高い高信頼通信が実現可能であること、同時リンク障害に対して拡張により容易に対応可能であること、障害端での迂回方式に比べシンプルでありノードの制御負荷が低いことの3点である。逆に冗長化通信方式では、パケットをコピーして送信するため帯域を余分に消費する欠点がある。しかし、高信頼通信を要求するアプリケーションの数や必要帯域は限られており、全体のトラフィックに対する割合は大きくないと想定されるため、冗長化通信方式による帯域コストは許容範囲であると考えられる。

本提案方式では、通信冗長化方式を以下の3点について改良する。

#### (1) 多重リンク障害への対応

多重リンク障害に対して対応するために、本提案方式では  $N$  本のパスによる通信冗長化を行う。通信開始時において  $N_{max}$  本のパスを設定し同時にデータを送信する。

#### (2) パス回復制御負荷の軽減

パス回復制御負荷の軽減のため、以下の条件を満たす場合はパス回復動作を行わないよう抑制する。ここで、 $N_{cur}$  は高信頼通信セッションが保持する通信可能なパスの本数、 $N_{min}$  は最低通信可能パス本数の閾値を表す。

$$N_{cur} \geq N_{min}$$

これにより瞬断によって一時的に不通となるパスの存在を許容し、回復動作を抑制することでシグナリング制御負荷を軽減する。

#### (3) 通信冗長性の継続確保

通信冗長性の継続確保のため、以下の条件を満たす場合、パス回復動作を開始する。

$$N_{cur} < N_{min}$$

回復動作は以下の条件を満たすまで継続される。

$$N_{cur} \geq N_{max}$$

実際の動作例を  $N_{max}=3, N_{min}=2$  で説明する。

#### (1) 初期パス設定

まず、通信開始時に互いに同じリンクやノードを通過しない  $N_{max}$  本のパスを設定する。 $N_{max}$  の値は平均障害リンク本数やその分布に依存し、ネットワークを構成する無線インターフェースの特性やノードの配置、利用環境など多様な要因によって異なる。

#### (2) リンク瞬断の検出

あるリンクが障害となった場合、3.1 で述べたようにリンクは瞬断状態に遷移する。障害リンクを経路として使用しているパスが存在する場合、障害リンクの上流ノードがパスの始点ノードに対してメッセージを送信し瞬断を通知する(図6)。

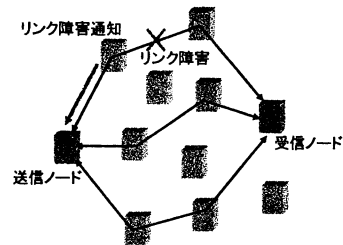


図6 リンク瞬断の通知

#### (3) 回復開始の判定

リンク瞬断通知を受信した始点ノードは、以下の条件判定を行い、条件を満たす場合は何もしない。

$$N_{cur} \geq N_{min}$$

リンク障害が短時間の瞬断である可能性があるため、始点ノードは障害となったパスをすぐには削除せず維持する。

#### (4) リンク回復の通知

瞬断が回復しリンクが再び UP 状態になった場合、そのリンクの上流ノードはパスの始点ノードに対してメッセージを送信しリンク復旧を通知する。リンク復旧通知を受信した始点ノードは、またそのパスを使って通信を続けることができる。

#### (5) リンク永断の検出

リンクが回復せず永断状態になった場合、それを検出した上流ノードはパスの始点ノードに対してメッセージを送信しリンク永断を通知する。メッセージがなんらかの原因により始点ノードに届かなかった場合でも、シグナリングプロトコルのステート管理などによりパスの削除が始点ノードに通知されるため、始点ノードはパスの障害を検知することができる。

#### (6) パス回復の開始

多重リンク障害により複数のリンク障害通知を受信した始点ノードは、以下の条件を満たす場合に回復動作を開始する。

$$N_{cur} < N_{min}$$

(7)代替経路の計算

始点ノードは障害となったリンクを除いたトポロジーで代替パスの計算を行う(図7)。障害リンク情報はリンク障害通知メッセージに含まれており、始点ノードはこの情報を瞬断通知を受信してから永断通知を受信するまでの間保持している。パスの経路計算においては、通信可能なパスとは同じリンクおよびノードを通らないように計算される。

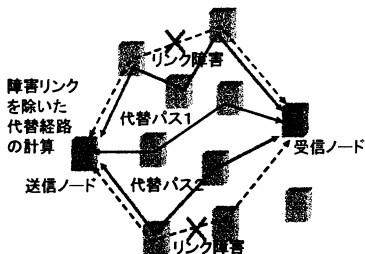


図7 代替パス経路の計算

(8) 代替パスの設定

計算が終わると、障害中のパスを削除し代替パスの設定を行い  $N_{max}$  本までパスを回復する。

以上の処理の流れを図8に示す。実線は処理の流れ、点線はDBへの登録およびDBからの読み出しを表す。パス設定失敗の場合の処理などは図では省略している。

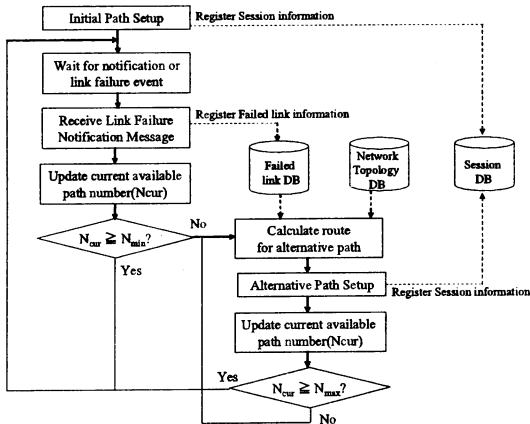


図8 投機的パス冗長化方式処理フロー

3.3. 実装

3.2の提案方式を実現するため、MPLS-TEシステムをベースとして実装を行った。パス設定のためのシグナリングプロトコルとしてRSVP-TE[9]を、ルーティングプロトコルとしてOSPF-TE[10]を利用した。本提案では、これらのプロトコルの基本仕様には極力手を加えず、高信頼通信セッション管理モジュールを追加することが可能である。実装したシステムの構成概要を図9に示す。高信頼通信セッション管理モジュールは約4.6KLine、RSVP-TEの改造(リンク障害通知

用Notifyメッセージ送信)は約570Lineである。OSPF-TEには改造を加えていない。

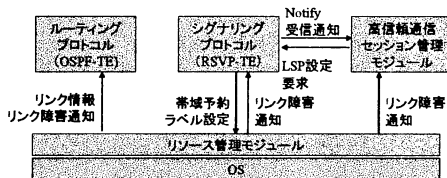


図9 システム構成

4. 性能評価

本提案方式の有効性を検証するためシミュレーション及び実プロトコルで、以下の項目に対して評価を行った。

- ・ダウンセッション数
- ・回復パス本数

ダウンセッション数は、セッションが通信不能になる頻度を表し、高信頼通信の有効性を判断する上で最も重要な指標である。回復パス本数は、高信頼通信を維持するためにネットワークへかかるコストを意味し、シグナリング制御トラフィックの負荷に相当する。ダウンセッション数を低く保ちながら回復パス本数を抑えることができれば、効率の良い高信頼通信方式であるといえる。

4.1. 評価モデル

評価環境として中規模のWMH-NWを想定した。評価環境で使用したネットワークパラメータを表1に示す。単位時間あたり障害となるリンク本数はポアソン分布に従うとした。

パラメータ	値
ノード数 ( $N_t$ )	25
1ノードあたりの平均隣接ノード数 ( $N_b$ )	4
全リンク数 ( $N_l$ )	50
パス平均ホップ数 ( $N_h$ )	4
単位時間あたりの平均リンク障害発生数	2
リンク障害における瞬断回復率	0.2

一回のリンク障害においてパスが障害となる平均確率  $P_d$  は、以下の式で表すことができる。

$$P_d = N_h / N_l$$

一つのセッションを構成する複数のパス間で同じリンクを使用しないことから、一回のリンク障害でセッションを構成するパスのいずれかが障害となる確率  $P_s$  は、以下の様に表すことができる。

$$P_s = N_{cur} * N_h / N_l$$

本シミュレーションではパスの回復は失敗せず、かつリンク障害の発生間隔に比べ十分小さい時間で完了すると仮定する。そのため、以下の式が成り立つ。

$$N_{max} \geq N_{cur} \geq N_{min}$$

この環境において、25本の高信頼通信セッションを設定し、リンク障害をシミュレートしてダウンセッション数、リカバリ

パス本数について本提案方式の評価を行った。パス本数は実環境で使用される頻度が高いと考えられる2本から4本とし、以下の4パターンで比較した。(1)と(4)は1本でもパスが切れた時点ですぐに回復を行う従来方式であり、(2)と(3)は投機的パス冗長化による回復を行う本提案方式である。

- (1) 2:2 方式 ( $N_{max} = 2, N_{min} = 2$ )
- (2) 3:2 方式 ( $N_{max} = 3, N_{min} = 2$ )
- (3) 4:2 方式 ( $N_{max} = 4, N_{min} = 2$ )
- (4) 3:3 方式 ( $N_{max} = 3, N_{min} = 3$ )

セッション平均通信時間を変化させ、100単位時間のシミュレーションを100回行った。セッション生存時間はポアソン分布に従うと仮定した。

#### 4.2. セッション信頼性

セッションの信頼性に対する指標として単位時間あたりの通信不能となったセッション数の平均値、最大値を図10、図11に示す。平均値、最大値とも以下のことが言える。

- ・セッション平均通信時間が短い間は、3:2方式および4:2方式と3:3方式の差は小さい
- ・セッション平均通信時間が長くなるにしたがいダウン率の差は大きくなる傾向がある。

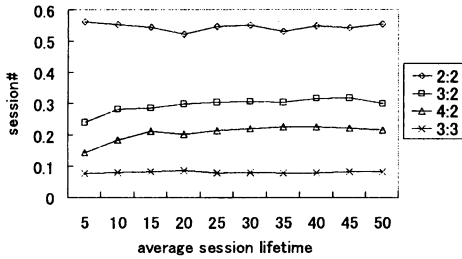


図10 平均ダウンセッション数

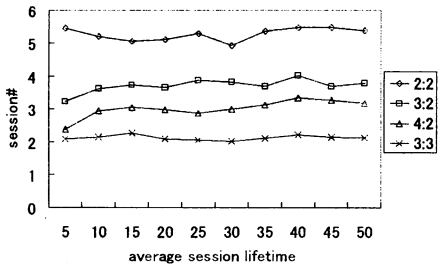


図11 最大ダウンセッション数

2:2方式を基準にした4:2方式と3:3方式の比較を表2、表3に示す。表2はセッション平均通信時間が5単位時間の場合、表3は20単位時間の場合である。平均通信時間が5単位時間の場合では、若干3:3方式のほうが良いことがわかる。20単位時間の場合では、5単位時間に比べ差が開く傾向にある。

表2 ダウンセッション数比較(平均通信時間=5)

	2:2	4:2	3:3
平均	0.560	0.145 (-74%)	0.076 (-86%)
最大	5.46	2.39 (-56%)	2.09 (-62%)

表3 ダウンセッション数比較(平均通信時間=20)

	2:2	4:2	3:3
平均	0.522	0.298 (-43%)	0.086 (-84%)
最大	5.11	2.98 (-42%)	2.10 (-59%)

ダウンセッション数の最大値と平均値の100回の試行の分布を図12、図13に示す。図12はセッション平均通信時間が5単位時間の場合、図13は100の場合である。両図を比較すると、以下のことがわかる。

- ・従来方式(2:2方式および3:3方式)はセッション平均通信時間に影響を受けない
- ・提案方式(3:2方式および4:2方式)では、セッション平均通信時間が長くなるとダウンが多くなる方向に分布が広がる

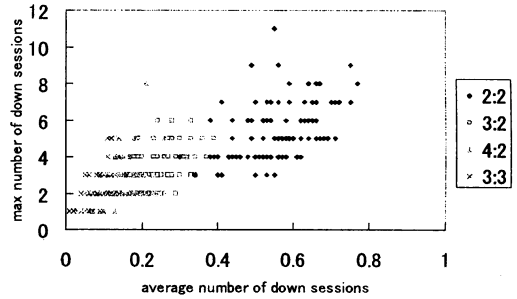


図12 ダウンセッション数の分布(セッション平均通信時間=5)

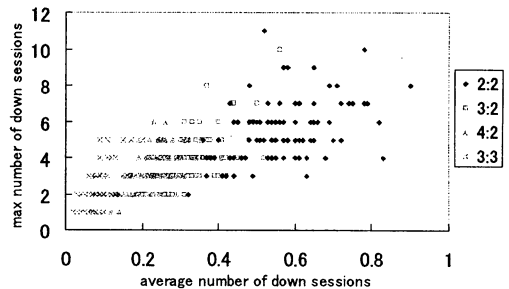


図13 ダウンセッション数の分布  
(セッション平均通信時間=100)

#### 4.3. セッション継続のための回復コスト

セッションの信頼性を維持するためのコストの指標として、単位時間あたりに回復したパス本数の平均値と最大値を図14、図15に示す。回復パス本数の平均値は単位時間あたりにかかる回復のためのシグナリング制御トラフィックの平均

負荷に相当し、最大値はピーク負荷に相当する。

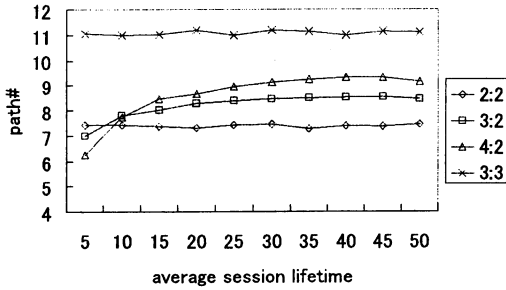


図 14 平均回復パス本数

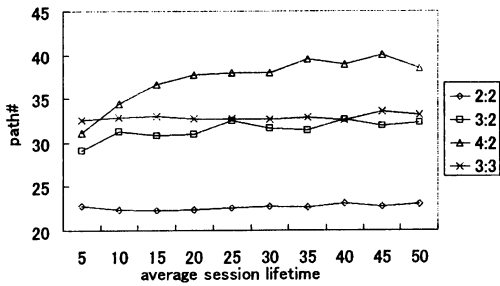


図 15 最大回復パス本数

2:2 方式を基準にした 4:2 方式と 3:3 方式の比較を表 4、表 5 に示す。生存時間が 5 単位時間の場合 4:2 方式のほうが負荷が低い。生存時間が 20 単位時間の場合では最大パス本数は 4:2 方式のほうが多くなっていることがわかる。これは、セッション通信時間が長くなることでセッションの通信可能パス本数  $N_{cur}$  が  $N_{min}$  を下回る頻度が多くなり、多くのセッションで回復動作が行われるためである。生存時間が短い場合は、通信可能パス本数が  $N_{min}$  未満になる前にセッションが終了することが多く、回復動作が抑制され、結果としてピーク、平均ともに回復のための制御負荷を抑えることができる。

表 4 回復パス本数比較 (平均通信時間=5)

	2:2	4:2	3:3
平均	7.41	6.23 (-16%)	11.04 (+49%)
最大	22.84	31.09 (+36%)	32.59 (+43%)

表 5 回復パス本数比較 (平均通信時間=20)

	2:2	4:2	3:3
平均	7.32	8.66 (+18%)	11.18 (+53%)
最大	22.38	37.72 (+69%)	32.72 (+46%)

図 16、図 17 に回復パス本数の最大値と平均値の 100 回の試行の分布を示す。図 16 はセッション平均通信時間が 5 単位時間の場合、図 17 は 100 単位時間の場合である。両図の比較から以下のことがわかる。

- ・セッション平均通信時間が短い場合、平均値は  $N_{min}$  と相関が高く、最大値は  $N_{max}$  と相関が高い
- ・従来方式 (2:2 方式および 3:3 方式) ではセッション平均通信時間に分布が依存していない
- ・提案方式 (2:2 方式および 4:2 方式) においてセッション平均通信時間が短い場合は平均値は 2:2 方式とほぼ同じであり、最大値は 3:3 方式とほぼ同じ分布を示す
- ・提案方式 (2:2 方式および 4:2 方式) においてセッション平均通信時間が長くなるにつれ、平均値、最大値とも大きくなる方向へ分布が移動する。

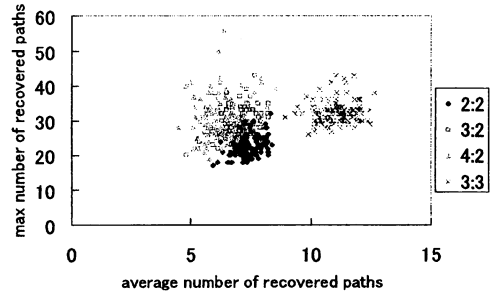


図 16 回復パス本数の分布 (セッション平均通信時間=5)

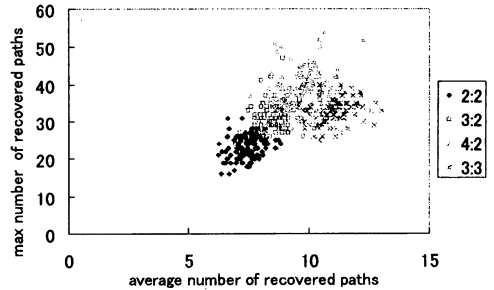


図 17 回復パス本数の分布  
(セッション平均通信時間=100)

セッション平均通信時間が 5 単位時間の場合のパス回復本数の時間経過を図 18、図 19 に示す。図 18 は 4:2 方式、図 19 は 3:3 方式の場合である。4:2 方式の方が全体的に回復パス本数が少なく、冗長性を保つために必要な制御負荷を抑えられていることが確認できる。

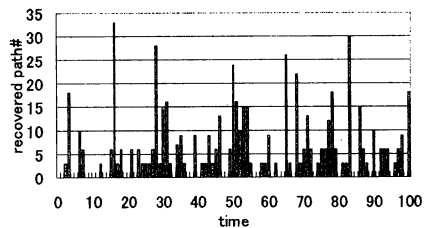


図 18 4:2 方式におけるパス回復本数の時間経緯

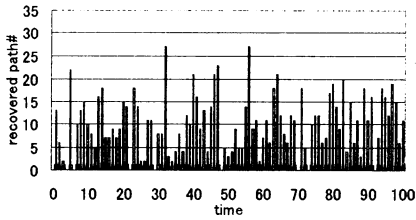


図 19 3:3方式におけるパス回復本数の時間経緯

#### 4.4. 実プロトコルによる評価

4.1の評価環境をPCで模擬した環境を構築し、実プロトコルを用いた実験を行った。セッション通信時間は無限であり、実験中にセッションの開始、終了は行わない。4パターンに対してそれぞれ3回試行を行った。図20にシグナリング制御負荷の分布を示す。図17のセッション平均通信時間が100単位時間の場合の傾向とほぼ一致している。

図21に方式毎のダウンしたセッション数を示す。ここでのダウンセッション数の定義は4.2と異なり、通信可能パスが0本になった後パスの回復に全く成功しなかったセッションのことを指す。3:3方式でダウンセッションが多くなっているのは、全体的なパス本数が多いため、リンクやノードが重複しない経路の計算に失敗する可能性が高いためであると考えられる。

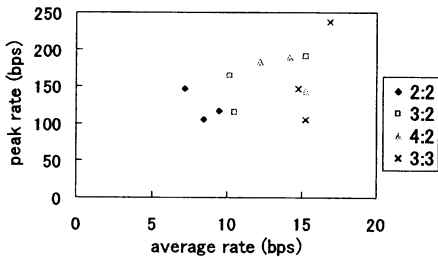


図 20 シグナリング制御負荷の分布

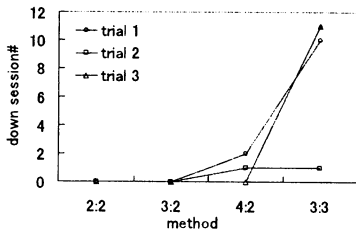


図 21 ダウンセッション数

以上より、セッション通信時間の短い環境では投機的冗長化通信方式により平均制御負荷を抑えながら高信頼通信を行えることが判明した。実際のWMH-NWでは、通信ノードはアドホックな通信を行うことが多く、通信時間は有線網に比べ短いと考えられる。そのため、投機的冗長化通信

方式はWMH-NWで高信頼通信を実現する手段として有効であると考えられる。

#### 5. まとめ

無線マルチホップネットワーク(WMH-NW)において高信頼通信を実現するための冗長化通信方式を提案した。また、シミュレーションと実プロトコルでの実験により、セッション通信時間の短い環境において、従来方式と比べ制御負荷を抑えながら高信頼通信を実現できることが確認できた。今回はシグナリング負荷に注目してその抑制可能な方式の提案を行ったが、今後、ルーティング制御負荷についても同様に検討し、さらにWMH-NWに適応した方式に改良してゆく方針である。

#### 文 献

- [1] C.Perkins, E.Belding-Royer, and S.Das. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF RFC3561. July 2003
- [2] T.Clausen et al. Optimized Link State Routing (OLSR). IETF RFC3626, October 2003.
- [3] David B.Jhonson, David A.Maltz, and Yih-Chun Hu. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks (DSR). IETF draft-ietf-manet-dsr-09.txt. April 2003.
- [4] R.Ogier, F. Templin, and M Lewis. Topology Dissemination based on Reverse Path Forwarding (TBRPF). IETF RFC3684. February 2004.
- [5] Ayan Banerjee, et al, "Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Signaling Enhancements and Recovery Techniques" IEEE Communications Magazine - July 2001
- [6] CCAMP Working Group IETF, "RSVP-TE Extensions in support of End-to-End GMPLS-based Recovery" draft-ietf-ccamp-gmpls-recovery-e2e-signaling-01.txt May 2004
- [7] IETF, "Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels" draft-ietf-mpls-rsvp-lsp-fastreroute-06.txt May 2004.
- [8] Yehuda Afrek et al, "Restoration by Path Concatenation: Fast Recovery of MPLS Paths" Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems Proceedings of the 2001 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems
- [9] D.Awduch et al. "RSVP-TE:Extensions to RSVP for LSP tunnels" IETF RFC3209 December 2001
- [10] D.Katz et al. "Traffic Engineering Extensions to OSPF Version 2" IETF RFC3630 September 2003