

# Plumtree を適用した被災通知無線メッシュ網における 分散タイムスロット制御の検討

奥田 友希<sup>†</sup> 大西 真晶<sup>††</sup> 坂野 遼平<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 工学院大学大学院 工学研究科 〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1

<sup>††</sup> 能美防災（株）研究開発センター 〒341-0038 埼玉県三郷市中央 1-18-13

<sup>†††</sup> 一橋大学 大学院ソーシャル・データサイエンス研究科 〒186-8601 東京都国立市中 2-1

E-mail: <sup>†</sup>em24010@ns.kogakuin.ac.jp, <sup>††</sup>m.oonishi@nohmi.co.jp, <sup>†††</sup>r.banno@r.hit-u.ac.jp

**あらまし** 既存の通報システムは有線ネットワークに依存しており、巨大地震等の国難級災害時には、119 番通報などに大規模な通信障害が起こるとされている。そこで、平時から各種インフラから独立して動作する、耐障害性をもつ被災通知無線メッシュ網の構築を提案してきた。このメッシュ網は Plumtree アルゴリズムを用いることで、耐障害性の具備と効率的なブロードキャストを実現している。また、自身から根ノードに至るまでのノード ID の経路表を保持することで、根ノードへのユニキャストを可能とする。しかし、この手法ではツリー上のタイムスロット割り当てによって遅延性能への悪影響が考えられる。本研究では、タイムスロットの再割り当てを自律的に行って問題の解決を目指す。具体的には、各ノードがタイムスロット制御メッセージを送信し、条件に合致したノードのみとホップ数を指標としてタイムスロット番号を交換する。これにより、葉ノードから根ノードに向かってタイムスロット番号が昇順に並ぶことが期待でき、ユニキャストの遅延時間を抑えられると考えられる。シミュレーション実験によりタイムスロット番号の交換の収束を確認した結果、ホップ数とタイムスロット番号に負の相関が見られた。

**キーワード** Plumtree, スパニングツリー, タイムスロット

## Distributed Timeslot Control in a Disaster Notification Wireless Mesh Network Applying Plumtree

Tomoki OKUDA<sup>†</sup>, Masaaki OHNISHI<sup>††</sup>, and Ryohei BANNO<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Kogakuin University 2665-1 Nakano, Hachioji-city, Tokyo, 192-0015 Japan

<sup>††</sup> R&D Division, NOHMI BOSAI LTD. 1-18-13 chuo, Misato-shi, Saitama, 341-0038 Japan

<sup>†††</sup> Hitotsubashi University 2-1 naka, Kunitachi-shi, 186-8601 Japan

E-mail: <sup>†</sup>em24010@ns.kogakuin.ac.jp, <sup>††</sup>m.oonishi@nohmi.co.jp, <sup>†††</sup>r.banno@r.hit-u.ac.jp

**Abstract** The existing emergency notification system relies on wired networks, and it is believed that large-scale communication disruptions, such as those affecting 119 emergency calls, can occur during catastrophic disasters like massive earthquakes. To address this, we have proposed the construction of a disaster-resistant wireless mesh network that operates independently of various infrastructures during normal times. This mesh network uses the Plumtree algorithm to achieve fault tolerance and efficient broadcasting. Additionally, by maintaining a routing table of node IDs from itself to the root node, it enables unicast communication. However, this approach may have a negative impact on delay performance due to the allocation of timeslots on the tree. This research aims to solve this problem by autonomously reassigning timeslots. Specifically, each node sends a timeslot control message, and only nodes meeting certain conditions exchange timeslot numbers using hop count as an indicator. This is expected to result in timeslot numbers aligning sequentially from leaf nodes towards the root node, potentially reducing unicast delay times. After confirming the convergence of timeslot number exchanges, a negative correlation was observed between hop count and timeslot number.

**Key words** Plumtree, Spanning tree, timeslot

# 1. はじめに

現在の通報網は有線電話網である 119 番通報が基本である。また、現状の家屋やビル等の物件からの通報は主に有線インフラに依存している [1]。しかし、東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）が発生した際には、断線や通信障害といった中継局の被災により、被災地の約 25% の消防本部で 119 番通報の途絶が発生した [2]。また、内閣府は南海トラフ巨大地震の被害想定を出しており、固定電話は最大 580 万回線の通話支障、及び基地局の停波により大規模な通信障害が予想されている [3]。これらのように大規模な災害では既存の有線網は途絶し、その上の携帯キャリア網やインターネット、119 番通報などにも通信障害を起こすとされる。そのため、災害通信専用の被災通知無線メッシュ網が求められる。そこで我々は、各種インフラから独立して動作する無線メッシュ網を構築しておき、災害時の通知に使用することができるネットワークを検討した [7]。また、この無線メッシュ網は Plumtree アルゴリズムをユニキャスト拡張し、メッシュ状のネットワークにスパニングツリーを形成することで、耐障害性の具備と効率的なブロードキャストを実現している。しかし、ツリー上のタイムスロット割り当てによって悪影響が考えられる。

本研究では、タイムスロットの再割り当てを各ノードが自律分散的におこなうことでこの問題の解決を目指す。具体的には、各ノードが各ノードに割り当てられたタイムスロット番号を、根ノードまでのホップ数を指標として、交換要求のメッセージを送信する。このメッセージに沿ってタイムスロット番号を隣接ノードと交換することで、葉ノード側となるタイムスロット番号が小さくなることを可能とする手法について提案する。

## 2. 関連技術

### 2.1 Plumtree

Plumtree はノード群がランダムにつながったメッシュ状の P2P ネットワークにおいて、効率的にブロードキャストをする為の手法である [4]。耐障害性を持つゴシッププロトコルと、ツリーを組み合わせることで、効率的かつ冗長性を確保する。各ノードは eagerPushPeers と lazyPushPeers という隣接ノードの集合を持つ。図 1 に Plumtree における 2 つの通信方式を示す。隣接ノードからブロードキャストメッセージを受信したノードは、送信元を除く eagerPushPeers に即座にメッセージを送信する。この通信方法を Eager Push という。初期状態では全隣接ノードが eagerPushPeers に格納されるため、ブロードキャストはフラディングとなる。もしメッセージが重複した場合は送信元を lazyPushPeers へと移す。送信元においても同様の処理をおこなう。結果、図 2 のように eagerPushPeers の接続関係がスパニングツリーを形成した状態になる。2 回目以降のブロードキャストでは、各ノードはスパニングツリーの隣接関係に沿ってメッセージを転送する。lazyPushPeers はスパニングツリーの修復に用いる。各ノードは一定間隔で lazyPushPeers に Ihave メッセージというメッセージ ID のみを転送する。メッセージ ID を受信したノードは該当するメッセージを保持しているかを確認

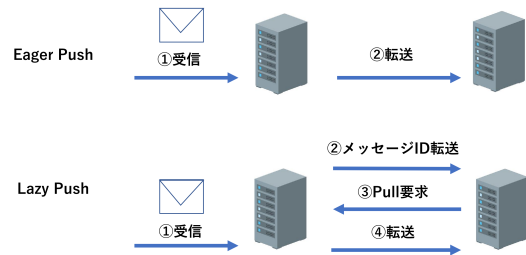


図 1 Plumtree の通信方式

Fig. 1 Communication ways in Plumtree

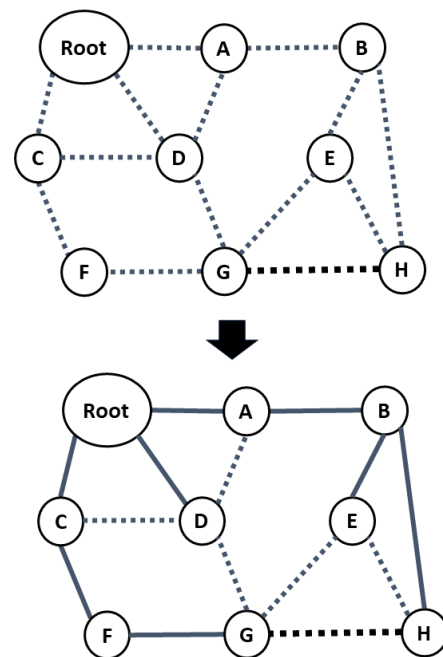


図 2 スパニングツリーの形成

Fig. 2 Forming a spanning tree

し、未受信の場合はメッセージ ID の送信元であるノードへ該当メッセージの要求をする。要求を受けたノードはメッセージを送信する。これらの lazyPushPeers を用いた通信を Lazy Push と呼ぶ。なお、Lazy Push によりメッセージを受信したノードは、送信元ノードを lazyPushPeers か eagerPushPeers へと移す。また、送信元においても同様の処理をおこなう。Plumtree はこれらの 2 つの通信方式を組み合わせることで耐障害性を持ち、効率的なブロードキャストを可能としている。

### 2.2 TDMA

TDMA (Time Division Multiple Access) 方式は、時分割多重接続と呼ばれる、無線ネットワークにおける通信方式の一つである。通信に用いる周波数を一定時間毎に分割して共有する多重化方式のことである。TDMA では、通信時間全体をタイムスロットと呼ばれる一定の長さの時間枠に分割する。タイムス



図3 タイムスロットの例  
Fig.3 Example of timeslot

ロットとは、各ノードが電波を発出可能な専用の時間を示しており、各ノードはその時間内のみ電波を送信することができる。そして、各ノードがそれぞれ異なるタイムスロットを使用するため、同一周波数における複数の通信を可能とする。また、各ノードが電波を同時に出して衝突が起こるといった障害を防ぐことができる。図3は0番目から5番目までの6つのノードに割り振られたタイムスロットを表している。各ユーザは割り当てられたタイムスロット内でのみデータを送信することが可能である。例えば、タイムスロット番号として0が割り当てられたノードの場合、0のタイムスロットの時間がやってきた場合のみ通信が可能となる。

### 2.3 関連研究

木下らの研究では、ツリー型 LPWA ネットワークにおける経路制御をおこなっている [6]。この研究では、市役所等におかれたサーバを中心に、LPWA モジュールや計測器等を展開し、防災情報を解析・市民へ提供するネットワークを構築している。経路制御では、電波強度 RSSI を測定し、受け取った複数の上方向の経路情報を保持させ、経路候補表として冗長化させたツリー型のトポロジーを実現している。通報網の障害発生時において、復旧通信回数を約 96%、復旧経過時間を約 73% 削減しており、有効であるといえる。本研究では、無線メッシュ網にツリーネットワークを構築しており、経路制御の方法が異なる。また、一次対応者への通報に重きを置いており、タイムスロットを考慮したタイムスロット制御を目指す。

町田らの研究では、LPWA を利用した災害時における安否情報共有ネットワークの検討をおこなっている [5]。この研究は LPWA 通信方式の LoRa を利用して、在宅避難者の安否情報を発信する為のモジュールと、避難所で受信するためのゲートウェイをもちいたネットワークを構築した。この研究では、一対一の通信によって安否情報を取得しており、地域全体をカバーすることが困難という課題がある。本研究では、Plumtree を用いたマルチホップ型ネットワークであるため、地域全体をカバー可能なネットワークを構築できると考えられる。

## 3. 被災通知無線メッシュ網

本章では、我々が提案している被災通知無線メッシュ網 [7] について述べる。このネットワークは、各種インフラから独立して動作する無線メッシュ網であり、災害時の通知、通報に使用することを考える。独立した防災専用のインフラであれば、堅牢に作りこみやすく、障害発生リスクを小さくできる。通知内容は防災センサの異常事態の通知、通報のみを想定し、地域の任意の場所から一次対応者までの経路を構築しておく。例

えば、建物内での通知などであれば防災センター、建物間であれば地域の消防指令センター等の一次対応者への通知、通報を想定する。

また、提案する無線メッシュ網は、Low Power Wide Area (LPWA) [9] の利用を想定する。緊急通報や携帯キャリアの帯域を使用せず、低消費電力かつ広範囲の地域をカバーできるため、LPWA が適していると考えられる。また、被災通知は最低限の通報ができればよいため、小さなサイズのデータで足りると考えられる。そのため、被災通知のような小さなデータを取り扱う上で、LPWA を利用した無線メッシュ網の構築が考えられる。

提案した無線メッシュ網では、衝突回避のためにタイムスロット方式を想定する。確実な通報の為にはフラッディングが考えられるが、多数のメッセージが生じてしまい、LPWA の STD-T108 規格 [8] の電波送出時間制限やタイムスロット制御が遅延につながる。そのため、被災通知無線メッシュ網へ Plumtree を適用し、メッセージ数を抑える手法を提案した。

この手法では、Plumtree を拡張して各ノードに経路表を持たせ、根ノードへのユニキャストを可能としている。しかし、ツリー上のタイムスロット割り当てによって悪影響が考えられる。Plumtree では先に届く経路がスパンニングツリーの枝となる。そのため、タイムスロットの順序が小さいノードとのリンクが根ノード方向の枝になりやすいと考えられる。しかし、ユニキャストをおこなう際は葉ノードとなるタイムスロットの割り当てが大きい方から根ノード側となる割り当てが小さい方向へ向かって順番に通信するため、タイムスロットの待ち時間によって遅延が増大すると考えられる。もし、被災通知が起こった際、送信ノードから他のノードを経由して根ノードまでタイムスロット順に並んでいる場合、各ノードは受信した次の瞬間に自身のタイムスロットになるため、即座に転送をおこなうことができる。このため、通報全体の転送時間は最短となる。被災通知は迅速に届くことが求められるため、このようなタイムスロット順が望ましいと考えられる。

本研究では、タイムスロットの再割り当てを自律的に行って問題の解決を目指す。各ノードは、根ノードまでのホップ数の情報に基づき、隣接ノードとのタイムスロット番号交換の必要性を判断し、交換要求のメッセージを送信する。このメッセージに沿ってタイムスロット番号を隣接ノードと交換することで、葉ノード側となるタイムスロット番号が小さくなることを可能とする手法について提案する。

## 4. 提案手法

本研究では、根ノードまでの迅速な通知、通報を実現するために、自律的にタイムスロットを交換する手法を提案する。前提として、各ノードは無線が届く範囲を隣接ノードとする。また、一次対応者を固定的な根ノードとし、すべてのノードは識別子をもつ。初回のブロードキャストでは、一次対応者がいる根ノードから Eager Push を行う。その到着順を利用して準最短経路木を作成する。各ノードは受信した Eager Push があった場合は隣接ノードすべてに送信する。このとき、Eager Push には

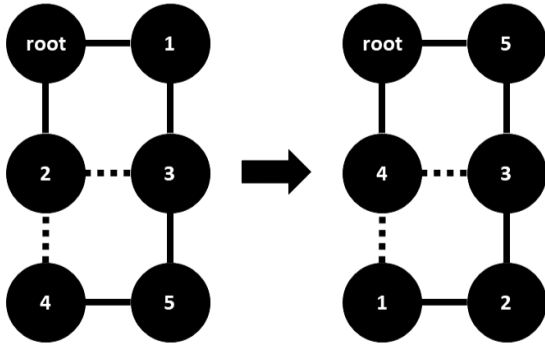


図4 タイムスロット交換  
Fig.4 Exchange of timeslot

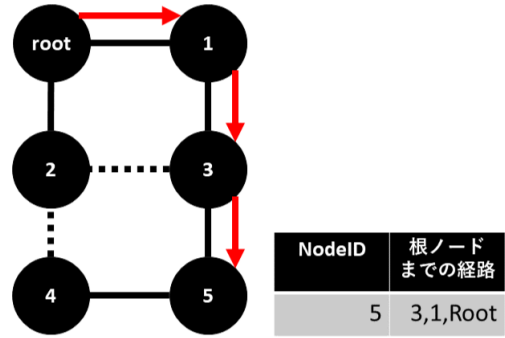


図5 ノードが保持する経路表例  
Fig.5 Example of a routing table maintained by node

経由したノードの ID を載せる。すなわち、各ノードは転送時に自身の ID をメッセージに追記する。Eager Push を受信したノードはその情報をもとに、図5のように自身から根ノードに至るまでのノード ID の経路表を保持する。このように各ノードが根ノード方向の隣接ノードを認識することで、スパニングツリーが構築される。二回目以降のブロードキャストでは、各ノードはスパニングツリー上の隣接関係に沿ってメッセージを転送する。

各ノードがおこなうタイムスロット制御について説明する。図4に提案手法の概要を示す。また、図6に提案手法の交換手順を示す。あるノード a がある隣接ノード b に Ihave メッセージを送信する際、メッセージに根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号を追記して送信する。Ihave メッセージを受信したノード b は通常の Lazy Push の動きの他に、受信した根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号を確認する。ここで、あるノード x のホップ数を  $h(x)$ 、タイムスロット番号を  $t(x)$  と表すこととする。Ihave の送信元ノード A と受信ノード B について、次式が満たされる場合、ノード B はノード A にタイムスロット交換要求メッセージを送信する。

$$h(A) < h(B) \wedge t(A) < t(B) \quad (1)$$

その際、交換要求メッセージには、自身のノード ID とタイムスロット番号を含める。

同時に、このタイムスロット交換が終了するまで他のノードからの交換メッセージを無視することで排他制御（ロック）をおこなう。この交換要求は、最初に届いたノードを受理する。もし、他の交換要求を受け付けない状態であれば、交換拒否メッセージを送信する。次に、交換要求を受け取ったノード A は、受信したノード B のタイムスロット番号と自身の持つノード A のタイムスロット番号を交換する。タイムスロット番号交換後に、ノード A 自身の元のタイムスロット番号を交換承諾メッセージとして送信する。また、他のノードからの交換関連のメッセージを無視するモードを解除する。各ノードは Ihave メッセージを定期的に隣接ノードに送信するため、タイムスロットの入れ替えが自立的に起こり、葉ノード側のタイムスロットが小さくなるようにタイムスロットが整理される。

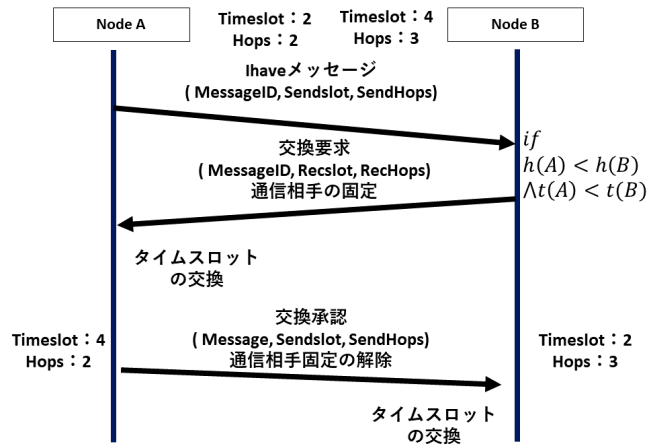


図6 タイムスロット交換手順  
Fig.6 Procedure for exchanging a timeslot

## 5. 評価実験

### 5.1 ノード密度のタイムスロット交換への影響検証

ノードが十分な密度で存在していない場合、Lazy Push が届かずにタイムスロットの交換が満遍なくおこなわれない可能性が考えられる。そこで、同サイズのエリアにてノード数を変化させた場合のタイムスロット交換の効果を確認するため、Java 言語で実装したイベント駆動のシミュレータを用いた実験をおこなった。実験では、シミュレータのノード数を 50, 100, 200 と変化させ、500000 ミリ秒経過時のノードのホップ数とタイムスロット番号の相関係数を確認する。前提として、各ノードの配置はランダムなものとし、実験でのノードの位置は不変とする。また、初期のタイムスロットは、ノード ID と同じとする。実験時のパラメータを表1に示す。Side\_Length はシミュレータ内の四方の広さを表しており、Com\_Range は無線の届く範囲を表している。ランダムに決定したノードを根ノードとして、スパニングツリーを形成する。

各ノード数における相関係数のシミュレーション結果が表2である。また、各ノード数における根ノードからのホップ数と

表1 実験のパラメータ

Table 1 Parameters of the experiment

パラメータ	値
ノード数	50, 100, 200
Lazy Push 間隔	500ms
エリアサイズ	10km
無線到達範囲	2km
通信終了時間	500000ms

表2 各ノード数における相関係数

Table 2 Correlation coefficient for each number of nodes

ノード数	相関係数
50	-0.15757
100	-0.56196
200	-0.64777

タイムスロット番号の対応関係をプロットしたものを図7, 8, 9に示す。50ノードの場合の根ノードのノードIDは6, 100ノードの場合のノードIDは80, 200ノードの場合のノードIDは97である。

グラフと表より、ノードの密度が高くなるほど負の相関が強くなることが見られることがわかる。ノード数が増える、つまりノードの密度が増えたことによって、負の相関が増加した。これは、根ノードまでのホップ数が多いノードとなる葉ノードのタイムスロット番号が小さくなっていることが考えられる。各ノードのタイムスロット交換が有効に働き、通報までのタイムスロットが原因となる遅延を減らすことが期待できる。また、ノードの密度が少ない状態であると、Lazy Pushが届く相手が少ないことが挙げられる。よって、初期のノード配置によってタイムスロット番号の交換相手に偏りが発生してしまい、弱い負の相関となることが挙げられる。

また、根ノードのタイムスロット番号は変化していないことが挙げられる。これは提案手法がIhaveメッセージを契機としてタイムスロット番号の交換を行っていることに起因する。根ノードにおいては全隣接ノードがeagerPushpeersに含まれることから、Ihaveメッセージの受信がおこなわれず、タイムスロット番号の交換が発生していないものと考えられる。根ノードについても隣接ノードとのタイムスロット番号交換がおこなわれることが望ましい状況も考えられるため、今後は現状シミュレータ内で受け取らないIhaveメッセージを受信するよう検討する。

### 5.2 タイムスロット交換の収束

次に、タイムスロット交換の収束を確認する。シミュレータ内において1000ミリ秒ごとに500000ミリ秒までの間、5.1節の実験と同様に相関係数を確認する。時間毎の相関係数を確認することで、タイムスロット交換の収束を確認する。実験のパラメータは表1と同様である。

実験結果を図10に示す。グラフより、50ノードの場合は時間が40000ミリ秒付近のときにタイムスロット交換が収束した。また、100ノードの場合は時間が250000ミリ秒付近、200

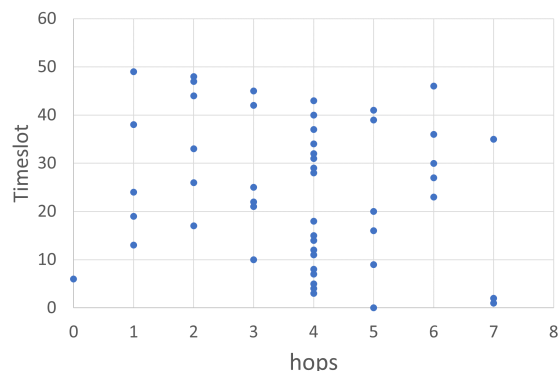


図7 500000ミリ秒経過時のホップ数とタイムスロット番号の関係(50ノード)

Fig.7 Relationship between the number of hops and time slot number at 500000 milliseconds passed (50nodes)

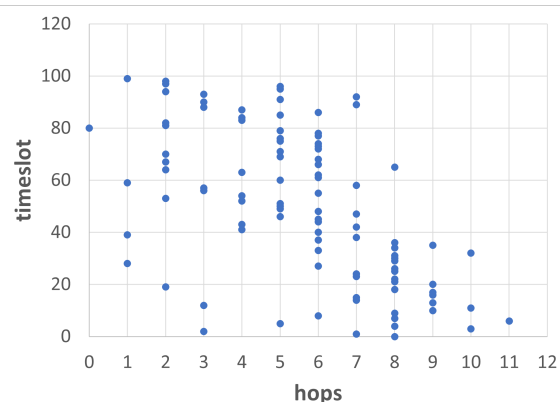


図8 500000ミリ秒経過時のホップ数とタイムスロット番号の関係(100ノード)

Fig.8 Relationship between the number of hops and time slot number at 500000 milliseconds passed (100nodes)

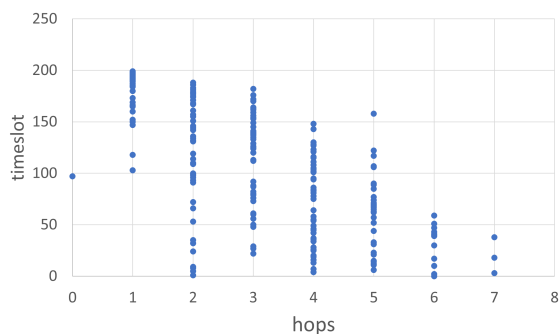


図9 500000ミリ秒経過時のホップ数とタイムスロット番号の関係(200ノード)

Fig.9 Relationship between the number of hops and time slot number at 500000 milliseconds passed (200nodes)

ノードの場合は380000ミリ秒付近にタイムスロット交換が収束したことがわかる。

ノード数が増えることによって、タイムスロットの交換の収束までの時間が増加した。これは、ノードの密度が増えたことによってタイムスロット交換の回数が増えたことが原因である

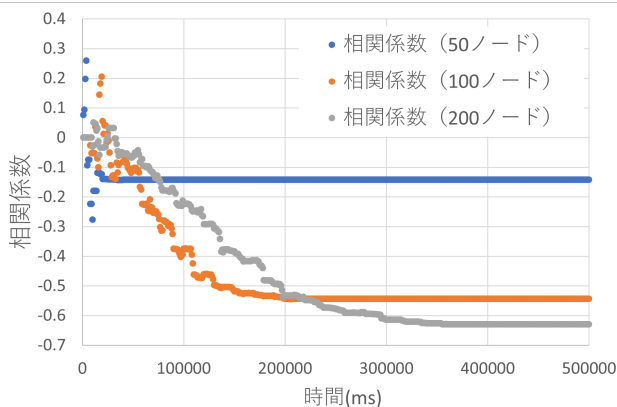


図 10 タイムスロット交換の収束  
Fig. 10 Convergence of time slot exchange

と考えられる。Lazy Push は、無線の届く範囲に対してすべてに送信される。よって、各ノードがタイムスロットを交換するノードが増加し、収束までの時間が増加した。このネットワークは防災用のネットワークを想定しており、通常時は使うことは想定していないため、収束まで大きな時間がかかることは問題ないといえる。

## 6. おわりに

本研究では、Plumtree を適用した被災通知無線メッシュ網において、通報時のタイムスロットによる遅延を少なくするために、葉ノード側のタイムスロットが大きくなるようなタイムスロット交換手法を提案した。この有効性の検証として、ノードの密度ごとに、根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号の相関係数、およびタイムスロット交換の収束に要する時間の評価をおこなった。結果として、根ノードまでのホップ数が多いノードとなる葉ノードのタイムスロット番号が小さくなり、提案手法の有効性を示せた。

今回の実験では、根ノードまでのホップ数が多いノードを葉ノードとしている。しかし、ネットワークのトポロジによっては、根ノードまでのホップ数が多いことが根ノードからの物理的に遠い距離にあるとはいえない。そのため、新たな指標を試す必要性が考えられる。また、今回の実験では、災害時等のリンクの再接続等は考慮していないため、ノードの断線といった障害時のホップ数とタイムスロット番号の相関関係を測定し、どのような影響を与えるかを確認することを考えている。

**謝辞** 本研究の一部は JST さきがけ JPMJPR21P8 の支援を受けたものです。本研究の一部は JSPS 科研費 24K14935 の支援を受けたものです。

## 文 献

- [1] 総務省, “公共安全 LTE”, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nd243420.html> (accessed Sep. 10, 2024).
- [2] 総務省, “東日本大震災における被害情報”, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n0010000.pdf> (accessed Sep. 10, 2024).
- [3] 内閣府, “南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ”, [https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough\\_info.html](https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html) (accessed Sep. 10, 2024).

- [4] Joao Leitao, Jose Pereira and Luis Rodrigus, “Epidemic Broadcast Trees”, IEEE SRDS, 2007.
- [5] 町田皓惟, 中川泰宏, “LPWA を利用した災害時における安否情報共有ネットワークの検討”, FIT2023, 第 22 回情報科学技術フォーラム, 2023.
- [6] 木下誠也, 田中和明, “ツリー型 LPWA ネットワークにおける経路制御のシミュレーション評価”, 情報処理学会第 86 年全国大会論文集, pp.239-240, 2024.
- [7] 奥田友希, 大西真晶, 坂野遼平, “被災通知無線メッシュ網への Plumtree 適用における最短経路木との比較検証”, SITE2023-69, IA2023-75, vol.123, SITE-421,IA-422, pp.7-11, 2024.
- [8] 一般社団法人電波産業界, “920MHz 帯テレメータ用, テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備 標準規格 ARIB STD-T108”, 1. 5 版, 3 月 3 日, 2024.
- [9] GSM, “3GPP Low Power Wide Area Technologies White Paper”, Oct 7, 2016