

# ネットワーク負荷を削減する災害時論理ネットワーク再構築手法

島 泰三<sup>†</sup> 鈴木 優<sup>††</sup> 川越 恭二<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 立命館大学大学院 理工学研究科

<sup>††</sup> 立命館大学 情報理工学部

〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: †shima@coms.ics.ritsumeai.ac.jp, ††{suzuki,kawagoe}@is.ritsumeai.ac.jp

あらまし 本稿では、ノード間リンクの切断によりホップ数の増加した通信経路を削減することによって、ホップ数の増加した通信経路上の通信数の増加により発生したネットワーク負荷を削減する災害時論理ネットワーク再構築手法を提案する。我々は以前、災害時において各ノードが保持するデータに含まれるキーワードに応じた論理ネットワーク再構築手法を提案した。しかし、ホップ数の増加した通信経路が発生したことにより、問合せが論理ネットワーク上を伝達する期間が長くなり、論理ネットワークに負荷を与える問題点があった。これは、論理ネットワークの再構築においてノード間リンクの切断を行うことにより、ホップ数の増加した通信経路が発生し、その通信経路を多くの問合せやレスポンスが通過する場合を考慮しなかったためである。そこで、本稿ではノード間リンクの切断前後における通信数の変化を基に、ノード間リンクの切断によりホップ数の増加した通信経路を通過する通信数を算出する。そして、ホップ数の増加した通信経路を多くの問合せやレスポンスが通過していた場合、切断したノード間リンクを再構築する手法を提案する。評価実験の結果、提案手法を用いることにより我々の従来手法に比べ、平均最短ホップ数の増加が抑えられたことを確認した。

キーワード P2P, 論理ネットワーク, ネットワーク繋ぎ換え, 再構築, オーバレイネットワーク

## A Restructuring Method of Logical Network for Reducing Network Load in Disaster Situation

Taizo SHIMA<sup>†</sup>, Yu SUZUKI<sup>††</sup>, and Kyoji KAWAGOE<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University.

<sup>††</sup> College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University.

Nojihigashi 1-1-1, Kusatsu Shiga 525-8577 Japan

E-mail: †shima@coms.ics.ritsumeai.ac.jp, ††{suzuki,kawagoe}@is.ritsumeai.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose an overlay network reconstruction method, in order to reduce the network load after disasters. In our former method, network load sometimes increase, because some hop count on route are increased. In this paper, we focus on the change of the number of queries by the restructuring networks. In our proposed method, the nodes on the logical network store transferred records after disasters. When a node has the necessity of a link cutting, the node counts the number of queries which were transferred on the cut link using transferred records. After cutting the link, the node counts the number of queries to be transmitted on long hop routes. If the number of queries to be transmitted on long hop routes is more than the number of queries which were transferred on the cut link, the cut link is reconstructed by the node. From our experiments, the average of minimum hop is shown to be decreased, which means a higher average of cover rate is obtained.

**Key words** Peer-to-Peer, logical network, topology alteration, restructuring, overlay network

### 1. はじめに

近年、災害発生後の情報交換に用いるための P2P 通信を用い

た安否情報確認システム [1] [2] などの研究が盛んに行われている。災害発生後には、物理ネットワークに接続された計算機や

通信時の中継に用いられる機器であるノードに障害が発生する

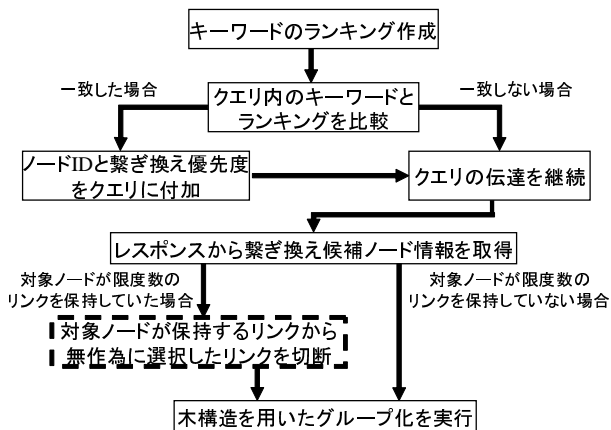


図 1 従来手法における処理手順  
Fig.1 Flow chart of the former method.

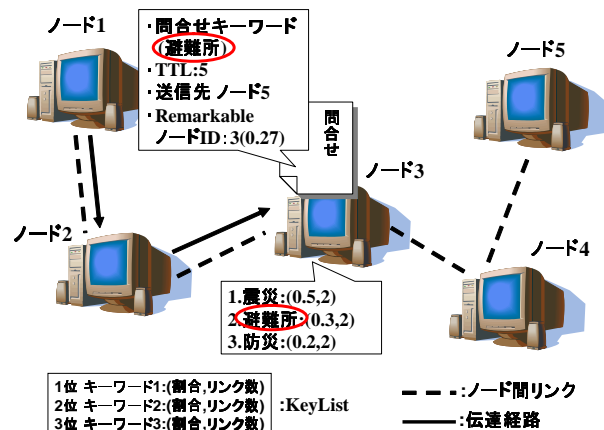


図 2 従来手法の概要図  
Fig.2 Abstract of the former method.

ことが考えられる。また物理ネットワークの状態が、論理ネットワーク上における通信に影響を与えることもある [3]。例えば、物理ネットワーク上における機器の故障に伴い、災害発生前には論理ネットワーク上で直接通信が可能であったノード同士が切断されてしまう状況が発生する。このような通信環境を改善する方法として、論理ネットワークを通信環境にあわせて動的に変更し、通信を行う方法が考えられている。

現在研究が行われている論理ネットワークの再構築手法では、頻繁に通信を行っているノード間を対象にノード間リンクを繋ぎ換えるため、全通信経路の中には、必ずしもホップ数が減少せず、逆にホップ数が増加する通信経路も存在する。なぜなら、ノード間リンクの繋ぎ換え時には、新たなノード間リンクの構築と共に、切断するノード間リンクが発生する可能性があるためである。ホップ数の増加した通信経路が多数発生した場合、データ検索の際に発行される問合せに含まれる TTL(Time-To-Live) を大きくしなければ必要なデータの取得が困難になる。また TTL を大きく設定することは、各問合せが論理ネットワーク上を伝達する時間を長くするため、論理ネットワークに負荷を与えることにつながる [4]。

我々は以前、災害発生後に P2P 環境下の論理ネットワークを再構築するために、問合せ内のキーワードと同一のキーワードを保持したノードを探索し、発見したノードと問合せの送信元ノードを論理ネットワーク上の近い位置に再配置する手法を提案した。しかし我々が提案した従来手法では、ノード間リンクの切断によりホップ数の増加する通信経路が多く発生する場合があります。同時にホップ数が増加した通信経路を多くの問合せや問合せに対するレスポンスが通過する状況も発生した。これらは、切断対象のノード間リンクを切断することにより、ホップ数の増加する通信経路を通過することになる問合せやレスポンスを考慮しなかったためである。

そこで本稿では、ノード間リンクの切断によりホップ数の増加した通信経路を削減することによって、ネットワーク負荷を削減する災害時論理ネットワーク再構築手法を提案する。提案手法では、ノード間リンクを切断した後、ホップ数の増加した通信経路を通過する問合せやレスポンスが増加した場合、切断したノード間リンクの再構築を行う。ノード間リンクの切断後

に、切断したノード間リンクの再構築に関する判断を行う理由は、ホップ数の増加した通信経路が発生しても、その通信経路を通過する問合せやレスポンスが少ない場合、論理ネットワークに与えられる負荷は小さいと考えたためである。そのため提案手法では、ノード間リンクの切断前後における問合せやレスポンスなどの通信数の変化を基に、切断したノード間リンクの代わりにホップ数の増加した通信経路にて伝達される通信数を算出する。そして、ノード間リンクの切断以前、切断したノード間リンクを通過していた通信数より、ホップ数の増加した通信経路にて伝達される通信数が多い場合、切断したノード間リンクを再構築する。その結果、ホップ数が増加する通信経路の発生数を抑え、ネットワーク負荷を削減した論理ネットワークの再構築を行うことが可能となる。なお、提案手法では、論理ネットワークへの新たなノードの参加や離脱は考慮しないものとする。

## 2. 従来手法

我々は以前、災害発生後に通信経路を通信環境に合わせて適切に変更するために、各ノードが保持するデータの内容を示すキーワードと問合せ内のキーワードの比較を用いた災害時論理ネットワーク再構築手法 [5] を提案した。従来手法では、災害発生直後から問合せの送信元ノードが必要とするデータを保持したノードを探索し、発見したノードを論理ネットワーク上の近い位置に配置する。そのため、災害発生後の短時間のうちに、論理ネットワークの繋ぎ換えに必要なノードの情報を収集することが可能である。なお、従来手法では、各ノードが保持可能な他のノードとのリンク数に制限を設けている。これは、ノードが保持するリンク数を大きく設定することによって、より多くのノードに対して問合せを伝達できる反面、問合せのトラフィック量が増加し、ネットワークに負荷を与えることが知られているためである。

図 1 に従来手法における処理手順を、図 2 に従来手法の概要図を示す。従来手法ではまず、各ノードが保持する各データからキーワードを抽出する。そして各キーワードごとのデータ数を求め、データ数が多い順に各キーワードの順位付けを行う。従来手法では、キーワードの順位付けを KeyList と定義してい

る。この処理は、各キーワードに関するデータがそのノード内の全データに対して占める割合を算出するために行う。図2のノード3は「震災」「避難所」「防災」をキーワードとするデータを保持していることを表している。

次に、災害時に送信される問合せを基に繋ぎ換え候補となるノードを探索する。従来手法における問合せは、送信先の指定の有無によって二種類が存在するものとする。そして繋ぎ換え候補ノードの探索は、送信先を指定した問合せによって行う。なお送信先の指定とは、送信先ノードのノードIDを指定することを示す。問合せの伝達では、問合せ内に含まれる問合せキーワードと同一のキーワードに関するデータを保持した中継ノードを探索する。中継ノードは、受信した問合せ内の問合せキーワードと自身が保持するKeyListの比較を行う。それらが一致した場合、その中継ノードを繋ぎ換え候補ノードと判断し、中継ノードの識別子であるノードID  $n_i$  および中継ノードの繋ぎ換えに関する優先度として繋ぎ換え優先度を問合せに付加する。繋ぎ換え優先度  $P(R_i(K), l(n_i))$  は、問合せキーワードを  $K$ 、ノード  $n_i$  が保持する全データのうちキーワード  $K$  に関するデータの占める割合を  $R_i(K)$ 、ノード  $n_i$  が保持する他のノードとのリンク数を  $l(n_i)$ 、各ノードが保持可能な最大リンク数を  $m$  とした場合、以下の(1)式により示される。

$$P(R_i(K), l(n_i)) = R_i(K) \frac{m - l(n_i) + 1}{m} \quad (1)$$

図2のノード3では、受信した問合せ内の「避難所」という問合せキーワードとノード3のKeyList内のキーワードが一致したため、問合せにノードの識別子であるノードIDとノード3における「避難所」に関する繋ぎ換え優先度0.27を付加する。

次に送信先ノードに問合せが伝達されると、送信先ノードは問合せに対するレスポンスを作成する。その際、レスポンスに対して問合せが伝達時に収集した繋ぎ換え候補ノードの情報を付加する。レスポンスは、問合せの伝達経路を逆にたどりながら、問合せの送信元ノードに伝達される。そして、問合せの送信元ノードは、受信したレスポンスから繋ぎ換え候補ノードの情報を取得し、論理ネットワークの再構築を実行する。なお従来手法では、論理ネットワークの再構築を実行するノードを、繋ぎ換え管理ノードと定義する。

ノード間リンクの繋ぎ換え後のトポロジには様々なものが考えられるが、従来手法では、同一のキーワードに関するデータを保持したノード同士で木構造を構築する。木構造を用いた理由は、木構造による階層化がノード間の階層的な関係を表現するのに適しているためである。また、新たなノードが木構造に参加する場合、既存のアルゴリズムを用いることによって、木構造における適切な位置にノードを追加することが可能な点も木構造を選んだ理由の一つである。従来手法では、繋ぎ換え管理ノードが収集した繋ぎ換え候補ノードのうち、繋ぎ換え優先度が最も高い繋ぎ換え候補ノードを木構造における根とする。そして、繋ぎ換え優先度が高い繋ぎ換え候補ノードほど、木構造における上位に配置する。また、繋ぎ換え管理ノード自身は、根である繋ぎ換え候補ノードとのノード間リンクを保持する。これにより繋ぎ換え管理ノードは、自身が最初に問い合わせたキーワード  $K$  に関する問合せを、木構造の根である繋ぎ換え

候補ノードを経由して木構造に伝達することができる。その結果、繋ぎ換え管理ノードは、少ないホップ数にてキーワード  $K$  に関するデータを取得することが可能となる。

### 3. 関連研究

ノード間リンクの繋ぎ換えによるホップ数の増減に関する評価を行う手法として、ホップ数の増減数と過去の通信数を用いた評価値算出手法が片山ら[6]や中野ら[7]の研究で用いられている。想定環境として、各ノードにおいて自身を通過する問合せやレスポンスの転送元ノードおよび転送先ノードの情報を通信の転送履歴として保持しているものとする。また、この関連研究におけるノード間リンクの繋ぎ換えは、論理ネットワーク上で離れた位置にある二つのノード間で、新たにノード間リンクを構築することを意味する。ここで、新たにノード間リンクを構築する二つのノードを繋ぎ換え実行ノードとする。

片山らや中野らの手法では、繋ぎ換え実行ノード間の経路上に存在する各ノードから繋ぎ換え実行ノードに対する過去の通信数と、その通信元ノードと繋ぎ換え実行ノード間のホップ数の増減数の積を求め、それらの和を評価値とする。そして、評価値が負の値であればノード間リンクの繋ぎ換えを実行する。これは、各通信の通信元ノードと繋ぎ換え実行ノード間のホップ数が、ノード間リンクの繋ぎ換えにより削減された場合、評価値が負の値になるためである。

本研究では関連研究とは異なり、災害発生後における論理ネットワークの再構築を想定しており、災害発生直後から各ノードにて自身を通過する問合せやレスポンスの転送履歴の蓄積を行う。これにより日常の通信の転送履歴を用いる従来手法と比べ、災害発生後の問合せが頻繁に通過する通信経路の状況などを論理ネットワークの再構築に反映させることが可能である。また、ホップ数の増減数を評価値の算出に利用しない点において上記の関連研究とは異なる。

次に、オーバレイネットワーク上のマルチキャストツリーにおいて通信経路を変更する基準に用いる手法として、重複通信と通信遅延を考慮したノード間リンクに対する負荷算出手法が村上ら[8]の研究で用いられている。村上らの手法ではまず、マルチキャストツリー上の各ノードは、各ノード間リンクにおいて同一の通信が重複して伝達されていないかを監視する。もし、重複した通信が伝達されているノード間リンクを発見した場合、そのノード間リンクを対象に通信遅延を測定する。対象としたノード間リンクにおける通信遅延が小さい場合、重複した通信が多くとノード間リンクに与える負荷は小さいものとする。しかし、対象としたノード間リンクにおける通信遅延が大きい場合、重複した通信がノード間リンクに与える負荷は大きいものと判断する。本研究では、切断対象となるノード間リンクにおける切断前後の通信数だけを用い、重複した通信は考慮しない点で上記の関連研究とは異なる。

### 4. 提案手法

2章で述べたように我々の従来手法では、各ノードが保持可能なノード間リンク数に制限がある環境を想定していた。そのため、ノード間リンクの繋ぎ換え対象となるノードが、既に保

持可能なノード間リンク数を満たしていた場合、無作為に選択したノード間リンクを切断した後、新たなノード間リンクの構築を行っていた。

しかし従来手法では、論理ネットワークの再構築を行った結果、ホップ数の減少した通信経路が発生すると共に、ホップ数の増加した通信経路も多く発生した。その結果、ホップ数の増加した通信経路を多くの問合せやレスポンスが通過することにより、論理ネットワークに負荷を与える場合があった。これはノード間リンクの切断前後において、ノード間リンクの切断を実行することにより発生するホップ数の増加した通信経路を通過する問合せやレスポンスを考慮しなかったためである。

そこで本稿では、ノード間リンクの切断前後における通信数の変化を基に、ホップ数の増加した通信経路にて伝達される問合せやレスポンスなどの通信数を算出する。そして、ノード間リンクの切断以前に、切断したノード間リンクを通過していた通信数よりホップ数の増加した通信経路にて伝達される通信数が多い場合、切断したノード間リンクを再構築する手法を提案する。

#### 4.1 想定環境

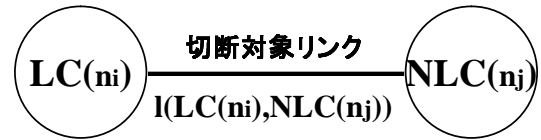
本研究における想定環境として、まず論理ネットワーク上には  $N$  個のノードが存在し、各ノードには個別の識別子であるノード ID  $n_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) が割り当てられているものとする。各ノード間の通信では、送信元や送信先のノード ID を問合せやレスポンスに付加する。そして各問合せやレスポンスは、自身に付加されたノード ID を基に論理ネットワーク上を伝達する。また、各ノードは自身が保持する各データ  $d_{ik}$  ( $k=1,2,\dots,D$ ) から各データを示すキーワード  $K(d_{ik})$  を一つ抽出可能であるものとする。

次に、災害情報などに関するデータ検索を行う際に発行される問合せは、送信先を指定した問合せと送信先を指定しない問合せの二種類が存在するものとする。送信先を指定しない問合せは、検索対象となるデータを示すキーワードと、TTL を含む問合せである。送信先を指定した問合せは、送信先を指定しない問合せに送信先のノード ID を付加した問合せである。送信先を指定した問合せは、災害発生前に通信が可能であった送信先ノードとのノード間リンクを保持した他のノードを探索し、新たな通信経路にて送信先ノードと通信を試みる際に用いられるものである。また本研究では、各ノードが他の各ノードに対して問合せを発行する割合は均等であるものとする。

なお、ノード間リンクは双方向であるものとし、各問合せに対するレスポンスは、各問合せが通過した通信経路を逆にたどり伝達されるものとする。そのため問合せやレスポンスには、伝達時に経由したノードのノード ID が付加されるものとする。また問合せの伝達は、問合せの送信元ノードにおいて各問合せに TTL を付加した後、P2P ネットワーク上における一般的な問合せの伝達方法であるフラッディングによって行われる。

さらに、ノード間リンクの切断を実行するノードをリンク切断実行ノード  $LC(n_i)$ 、 $LC(n_i)$  の隣接ノードのうち切断するノード間リンク先に存在するノードを  $NLC(n_j)$  ( $j=1,2,\dots,N$ )、 $LC(n_i)$  が切断するノード間リンクを  $l(LC(n_i), NLC(n_j))$  とする。 $LC(n_i)$  は、我々の従来手法において定義した繋ぎ換え

#### リンク切断実行ノード



災害発生時から  
リンク切断までの時間 :  $t(l(LC(n_i), NLC(n_j)))$

図 3 提案手法における定義

Fig. 3 Definition for proposed method.

管理ノードや繋ぎ換え候補ノードのうちノード間リンク切断を実行する必要が生じたノードのことである。また  $LC(n_i)$  が、災害発生時から  $l(LC(n_i), NLC(n_j))$  の切断を実行するまでの期間を  $t(l(LC(n_i), NLC(n_j)))$  と定義する。本稿におけるこれらの定義を図 3 に示す。なお以降の節では、簡単のために  $l(LC(n_i), NLC(n_j))$  を  $\tilde{l}$ 、 $t(l(LC(n_i), NLC(n_j)))$  を  $\tilde{t}$  として説明を行う。

#### 4.2 基本的な考え方

論理ネットワークの再構築では、ノード間リンクの繋ぎ換えの際にノード間リンクの切断を行う場合がある。我々の従来手法においても、各ノードが保持するノード間リンク数が限度数を満たしていた場合、無作為に選択したノード間リンクを切断した後、新たなノード間リンクの構築を行う。

しかし、ノード間リンクの切断によりホップ数の増加する通信経路が発生した場合、ホップ数が増加した通信経路を多くの問合せやレスポンスが通過することにより、ネットワーク負荷が発生する問題点があった。そのためノード間リンクの切断の実行前後において、ホップ数の増加した通信経路を通過する通信数をノード間リンクの切断に考慮する必要があると考える。

そこで提案手法では、ノード間リンクの切断後において、ホップ数が増加した通信経路を通過する通信数を基に、切断したノード間リンクの再構築を行う。これは、ノード間リンクの切断前に通信数の変化を予想するよりも、実際にノード間リンクの切断を実行した後における通信数の変化を用いることによって、災害時の通信状況をノード間リンクの切断および再構築に反映させることができると考えたためである。

具体的には、従来手法による論理ネットワークの再構築後、ホップ数が増加した通信経路を通過する通信数が増加した場合、その通信経路を構築するきっかけとなったノード間リンクを繋ぎ換え前の状態に再構築するという考え方で、新たに手法の提案を行う。また、提案手法にて災害発生後における通信の転送履歴を切断対象のノード間リンクの選択に用いない理由は、ノード間リンクの切断によりホップ数の増加した通信経路が発生した場合でも、ホップ数の増加した通信経路を通過する問合せなどの数が少ない場合、ネットワーク負荷は小さいものと考えたためである。すなわち、提案手法ではノード間リンクの切断時に切断するノード間リンクを選択せず、ノード間リンクの切断後における通信状況に合わせてノード間リンクの再構築を行う。

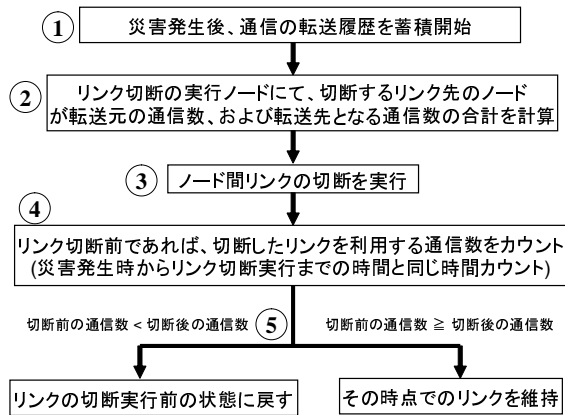


図 4 提案手法における処理手順  
Fig. 4 Flow chart of the proposed method.

提案手法における処理手順を図 4 に示す．なお，図 1 において点線で示した処理と図 4 における③が示す処理は対応している．提案手法では，以下の手順で処理を行う．

- ① 災害発生時を基点に，ネットワーク上の各ノードにて自身を通過する問合せやレスポンスの転送履歴の蓄積を開始する．
- ② ノード間リンクの切断を実行するノード  $LC(n_i)$  にて，切断するノード間リンク先に存在するノード  $NLC(n_j)$  から伝達された通信数，および  $NLC(n_j)$  に伝達した通信数の和を求める．
- ③  $LC(n_i)$  にて，切断対象のノード間リンクを切断する．
- ④  $LC(n_i)$  にて，ノード間リンク切断前の状態であれば，切断したノード間リンクを通過することになる通信数を算出する．通信数の算出は，災害発生時からノード間リンク切断までの期間と同じ期間実行する．
- ⑤ ④で算出した通信数が，災害発生時からノード間リンクを切断するまでの間に，切断対象となったノード間リンクを通過した通信数よりも多い場合，切断したノード間リンクを再構築する．

以降の節にて，処理手順の各項目に関する詳細を述べる．

#### 4.3 各ノードにおける転送履歴の蓄積

提案手法ではまず，災害発生時を基点に各ノードにて自身を通過する問合せやレスポンスの転送履歴の蓄積を開始する．災害発生後に転送履歴の蓄積を開始する理由として，災害時以外の日常における問合せやレスポンスの転送履歴を用いることによって，災害発生後における各通信経路を通過する通信数などの状況を，以降の節で述べるノード間リンクの切断および再構築に反映させることができると考えたためである．

転送履歴は，各問合せやレスポンスの転送元ノードおよび転送先ノードのノード ID により構成される．本稿における転送元ノードは，転送履歴を蓄積するノードに対して問合せやレスポンスを転送してきた隣接ノードのことである．また，転送先ノードは転送履歴を蓄積するノードから問合せやレスポンスを転送する隣接ノードのことである．なお転送履歴は，以降の節で説明するノード間リンク切断前後における通信数の算出において用いる．

転送履歴の蓄積に関する概要を図 5 に示す．図 5 では，ノ

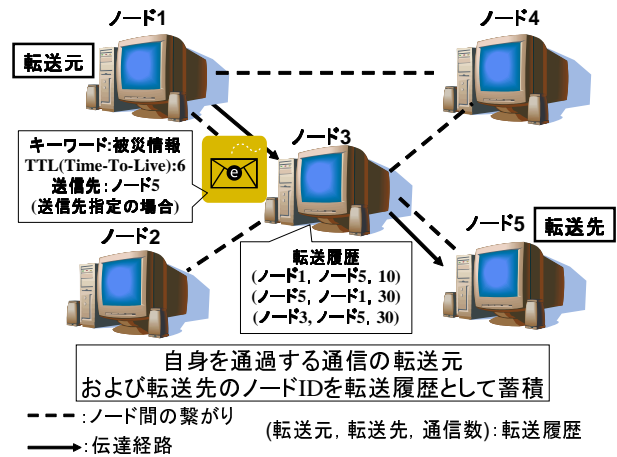


図 5 転送履歴の蓄積

Fig. 5 Storage of transferred record.

ド 1, 3, 5 の順に各ノードを通過する問合せやレスポンスにおいて，ノード 3 が転送履歴を蓄積する状況を表している．ノード 3 では，まず問合せやレスポンスを転送してきた隣接ノードであるノード 1 をその問合せやレスポンスの転送元ノードと判断する．次に経路情報を基に適切な隣接ノードに対して，受信した問合せやレスポンスを転送する．図 5 では，ノード 5 に問合せやレスポンスを転送するものとし，ノード 5 を転送先ノードとする．

#### 4.4 ノード間リンク切断前における通信数の算出

ノード間リンクの切断を行う必要が発生した場合，災害発生時からノード間リンクの切断を実行するまでの期間に切断対象のノード間リンクを通過した通信数の算出を行う．通信数の算出はノード間リンクの切断を実行するノード  $LC(n_i)$  にて行う． $LC(n_i)$  にてノード間リンクの切断を実行する場合， $LC(n_i)$  は災害発生時からノード間リンク切断を実行するまでの期間である  $\tilde{t}$  間に切断対象のノード間リンク  $\tilde{l}$  を通過した通信数  $C(\tilde{l})$  を算出する． $LC(n_i)$  が保持する問合せやレスポンスの転送履歴のうち， $\tilde{l}$  先に存在する  $NLC(n_j)$  を転送先ノードとした通信数を  $S(\tilde{l})$ ， $NLC(n_j)$  を転送元とした通信数を  $R(\tilde{l})$  とすると， $C(\tilde{l})$  は以下の (2) 式により算出する．

$$C(\tilde{l}) = S(\tilde{l}) + R(\tilde{l}) \quad (2)$$

図 5 においてノード 3 がノード 1，ノード 3 間のノード間リンクを切断する場合を例に挙げる．なお以下の具体例および以降の節における具体例では， $l(LC(n_i), NLC(n_j))$  を  $\tilde{l}(n_i, n_j)$ ， $t(LC(n_i), NLC(n_j))$  を  $\tilde{t}(n_i, n_j)$  とする．

この場合，ノード 3 がリンク切断実行ノード  $LC(3)$ ，ノード 1 が  $NLC(1)$ ，ノード 1，ノード 3 間のノード間リンクが  $\tilde{l}(3, 1)$  となる．なお，図 5 においてノード 3 が保持する転送履歴は，災害発生時から  $\tilde{t}(3, 1)$  間に蓄積したものとする． $LC(3)$  が保持する転送履歴のうち，ノード 1 を転送元とした通信数 10 とノード 1 を転送先とした通信数 30 の和より  $C(\tilde{l}(3, 1))$  は 40 となる．

#### 4.5 ノード間リンクの切断

リンク切断実行ノード  $LC(n_i)$  は，4.4 節で述べたノード間

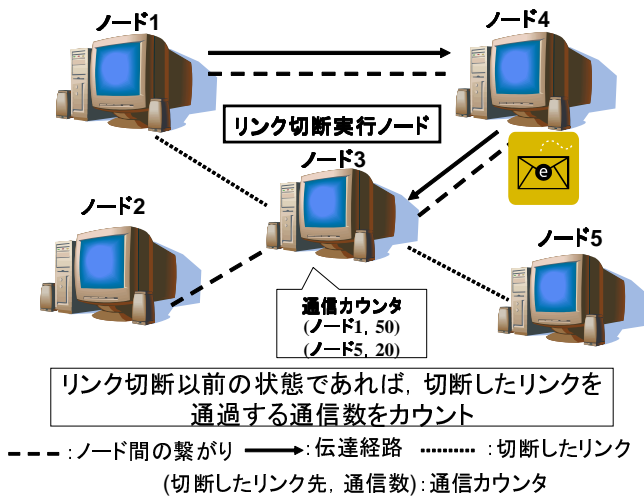


図6 リンク切断後の通信数の蓄積

Fig. 6 Storage of the number of communications after cutting the link.

リンク切断前における通信数の算出を行った後、切断対象となるノード間リンクの切断を行う。なお、ノード間リンク切断後における論理ネットワークの再構築に関する処理は、我々が以前提案した手法に沿って実行されるものとする。

#### 4.6 ノード間リンク切断後における通信数の算出

切断対象であるノード間リンク  $\tilde{l}$  を切断した後、リンク切断実行ノード  $LC(n_i)$  は、自身を通過する問合せやレスポンスの転送履歴の蓄積を継続する。また  $LC(n_i)$  は、自身を通過する問合せやレスポンスのうち  $\tilde{l}$  を切断する以前であれば、 $\tilde{l}$  を通過する通信数  $C'(\tilde{l})$  を算出する。以降、 $C'(\tilde{l})$  を切断対象リンクを通過するべき通信とする。

まず  $LC(n_i)$  に転送されてきた問合せやレスポンスの内  $\tilde{l}$  の切断以前であれば、 $\tilde{l}$  の先にあった  $NLC(n_j)$  に転送する通信数  $S'(\tilde{l})$  を数える。同様に、 $LC(n_i)$  に転送されてきた問合せやレスポンスのうち  $NLC(n_j)$  を経由してきた通信数  $R'(\tilde{l})$  も数える。 $NLC(n_j)$  を通過してきた問合せやレスポンスであるかの判断は、各問合せやレスポンスに付加されている経由ノードのノードIDを基に行うことができる。 $C'(\tilde{l})$  は、以下の(3)式により示す。

$$C'(\tilde{l}) = S'(\tilde{l}) + R'(\tilde{l}) \quad (3)$$

なお  $LC(n_i)$  は、 $\tilde{l}$  が切断されてから  $\tilde{t}$  間、 $C'(\tilde{l})$  を数える。

図6にノード間リンク切断後における通信数の算出に関する概要図を示す。図6におけるノード3の通信カウンタは、 $\tilde{l}(3,1)$  の切断後、ノード1を経由した後ノード3を通過した問合せやレスポンスなどの通信数と、ノード3を通過した問合せやレスポンスのうち  $\tilde{l}(3,1)$  の切断前であれば、ノード1に転送する通信数の合計  $C'(\tilde{l}(3,1))$  が50であることを表している。

#### 4.7 ノード間リンク再構築に関する判定

4.4節で述べた災害発生時からノード間リンク切断を実行するまでの期間である  $\tilde{t}$  間に切断対象のノード間リンク  $\tilde{l}$  を通過した通信数  $C(\tilde{l})$ 、および4.6節で述べた  $\tilde{l}$  の切断後  $\tilde{t}$  間に生じた  $\tilde{l}$  を通過するべき通信数  $C'(\tilde{l})$  を用いて  $\tilde{l}$  の再構築に関する

判定を行う。なお、 $\tilde{l}$  の再構築に関する判定はリンク切断実行ノード  $LC(n_i)$  にて行う。

また4.1節で述べたように本研究では、各ノードが他の各ノードに対して問合せを送信する割合は均等であるものとしている。しかし災害発生後には、時間の経過に伴い被災情報や避難所などに関する問合せの発行割合に変化が生じる場合がある。そのためノード間リンクの切断後、切断したノード間リンクの両端に存在したノードに対する問合せが急増した場合、切断したノード間リンクを再構築することによって、ホップ数の増加した通信経路を通過する通信数を削減することが可能であると考える。そこで、 $\tilde{l}$  の再構築に関する判定は、 $C(\tilde{l})$  と  $C'(\tilde{l})$  の大小関係を基に行う。

まず  $C(\tilde{l})$  より  $C'(\tilde{l})$  のほうが大きい場合、同一期間において切断対象のノード間リンクに関する通信数は、ノード間リンク切断後のほうが多いことになる。 $C'(\tilde{l})$  分の問合せやレスポンスは、リンク切断前であれば切断対象のノード間リンクを通過していたはずである。しかしノード間リンク切断後は、切断したノード間リンク以外の通信経路を迂回して伝達されるため、ホップ数が増加したことになる。そのため、 $C(\tilde{l})$  よりも  $C'(\tilde{l})$  のほうが大きい場合、ホップ数が増加した通信経路を通過する通信数が増加したことになる。したがって、ノード間リンクの切断によりホップ数の増加した通信経路を通過する通信数が増加したことによって、ネットワーク負荷が発生すると考え、切断したノード間リンクを切断前の状態に再構築する。

一方、 $C(\tilde{l})$  より  $C'(\tilde{l})$  のほうが小さい場合、切断対象のノード間リンクの切断によりホップ数が増加した通信経路を通過する通信数が増加したとは断定できない。そのため、切断したノード間リンクの再構築は行わず、その時点でのノード間リンクを維持させる。

図5および図6におけるノード3を例に挙げる。まず災害発生時から  $\tilde{t}(3,1)$  間に  $\tilde{l}(3,1)$  を通過した通信数  $C(\tilde{l}(3,1))$  は、図5より40となる。次に  $\tilde{l}(3,1)$  切断から  $\tilde{t}(3,1)$  後までに切断した  $\tilde{l}(3,1)$  を通過するべき通信数  $C'(\tilde{l}(3,1))$  は、図6より50となる。この場合、 $C(\tilde{l}(3,1))$  よりも  $C'(\tilde{l}(3,1))$  のほうが大きいため、切断した  $\tilde{l}(3,1)$  を再構築する。

また、 $\tilde{l}(3,5)$  を対象とした場合、まずノード間リンク切断前に  $\tilde{l}(3,5)$  を通過した通信数  $C(\tilde{l}(3,5))$  は図5より30となる。次に  $\tilde{l}(3,5)$  切断後において、 $\tilde{l}(3,5)$  を通過するべき通信数  $C'(\tilde{l}(3,5))$  は、図6より20となる。この場合、 $C(\tilde{l}(3,5))$  よりも  $C'(\tilde{l}(3,5))$  のほうが小さいため、切断した  $\tilde{l}(3,5)$  の再構築は行わない。

## 5. 評価実験

本章では、4章で提案した手法のシミュレーション実験および評価について述べる。

### 5.1 評価対象

評価実験は、以下の三つの手法を対象に行った。

手法1 論理ネットワークの再構築を行わない場合

手法2 我々が過去に提案した手法を用いた場合

手法3 評価対象2に本稿で提案した手法を加えた場合

表 1 パラメータ

Table 1 Parameters

ノード数	5000
キーワードの種類	50
災害時を想定した特定のキーワード	5
各ノードが保持しているキーワードの種類	10
TTL	6
各ノードが保持可能な最大リンク数	5
初期リンク数	4~5
問合せの発行回数	1000
送信先を指定した問合せの発行割合	0.2
特定のキーワードを用いた問合せの発行割合	0.7

## 5.2 実験環境

シミュレーション実験における実験環境を表 1 に示す。まず、本実験における論理ネットワーク上のノード数は 5000 とし、0 から 4999 のノード ID を割り当てる。各データから抽出されるキーワードの種類は 50 とし、うち災害時を想定とした特定のキーワードは 5 種類とした。次に各ノードは、10 種類のキーワードに関するデータ保持し、各キーワードの割合はランダムに決定される。また、各ノードが保持可能な最大リンク数を 5 とする。実験前の段階では、各ノードのノード間リンク数は 4 もしくは 5 とする。さらに、実験における問合せの発行回数は 1000 回とし、5 回に 1 回の割合で送信先を指定する問合せを発行する。つまり、1000 回の問合せ発行のうち、200 回論理ネットワークの再構築が行われる可能性のある問合せが発行される。次に災害時を想定とした特定のキーワードに関する通信は、1000 回の通信中 700 回とした。なお、伝達開始時における問合せの初期 TTL は、各ノードが保持するノード間リンク数を  $L$ 、ノード数を  $N$ 、初期 TTL を  $T$  とした以下の (4) 式を満たす最小の TTL とする。

$$N \leq \sum_{i=0}^T L^i \quad (4)$$

初期リンク数のうち最小のリンク数から  $L$  の値を 4 とした場合、(4) 式を満たす最小の TTL は 6 となるため、初期 TTL を 6 とした。最後に本実験では、一つの問合せが発行され、問合せの送信元ノードに対して全てのレスポンスが送信されてくるまでを時間の単位とする。

## 5.3 評価

本実験における評価は、以下の二つの指標を用いて行った。

### 5.3.1 被覆率によるレスポンス数の変化に関する評価

被覆率は、一度の問合せで取得したレスポンス数と、問合せ対象となるデータを保持したノード数の商により得ることができる。被覆率を用いることにより、各評価対象におけるレスポンス数の変化を評価した。なお評価対象 2 および評価対象 3 では、送信先を指定した問合せを含む 1000 回の問合せ発行のうち、送信先を指定しない問合せ 800 回分を評価に用いる。また評価対象 1 では、送信先を指定しない問合せだけを 800 回発行した場合を評価に用いる。

図 7 に実験結果を示す。図 7 は、送信先を指定しない問合せ 10 回ごとの被覆率の平均である平均被覆率を表している。図 7

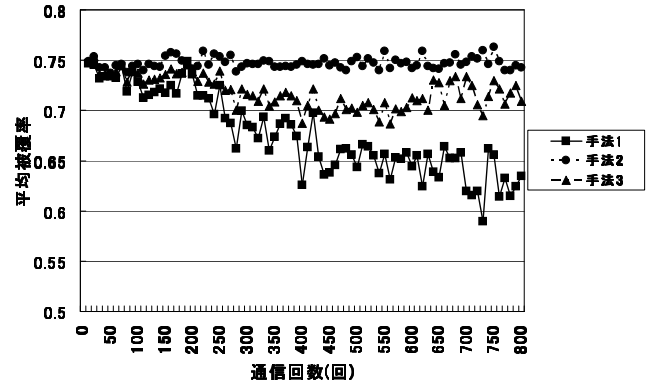


図 7 10 回の問合せ発行ごとの平均被覆率

Fig. 7 Average cover rate.

より問合せの発行回数が増加するにつれて、論理ネットワークの再構築を実行しない評価対象 1 に比べ、本稿で提案した手法を用いた評価対象 3 のほうが平均被覆率が向上していることがわかる。これは、論理ネットワークの再構築が実行されたことにより、問合せ対象となるデータを保持したノードが論理ネットワーク上で密集したためである。しかし、我々が以前提案した手法を用いた評価対象 2 と評価対象 3 を比較した場合、評価対象 3 のほうが平均被覆率が低いことがわかる。これは、評価対象 3 において、論理ネットワークの再構築時にノード間リンクの切断が行われた後、論理ネットワーク上において一部のノード間リンクが再構築され、問合せ対象となるデータを保持したノードが、論理ネットワーク上で散在したためであると考ええる。また、800 回の問合せ発行における平均被覆率は、評価対象 1 が 0.68、評価対象 2 が 0.75、評価対象 3 が 0.71 となった。これらからも評価対象 3 は、評価対象 1 に比べ平均被覆率が増加するが、評価対象 2 に比べると平均被覆率が低下したことがわかる。

なお、各評価対象にて通信回数の増加に伴い、平均被覆率が増減している。これは、各通信時に問合せを発行するノードおよび問合せキーワードをそれぞれ無作為に選択し、実験を行ったためであると考えられる。

### 5.3.2 平均最短ホップ数によるネットワーク全体のホップ数の変化に関する評価

平均最短ホップ数 [9] は、あるノードから他のノードに対するホップ数をネットワークに存在する全ノード間において計算し、平均したものである。ネットワーク上の全ノード数を  $N$ 、ノード  $\alpha$  からノード  $\beta$  までの最短ホップ数を  $P_{\alpha\beta}$  とすると、平均最短ホップ数  $P$  は以下の (5) 式で示される。

$$P = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N (P_{\alpha\beta}) \quad (5)$$

平均最短ホップ数を用いることにより、論理ネットワークの再構築前後におけるノード間のホップ数の変化を評価した。なお、評価対象 2 および評価対象 3 では、送信先を指定した問合せ 200 回を含む 1000 回の問合せを発行した場合を評価に用いる。また評価対象 1 では、送信先を指定しない問合せを 1000 回発行した場合を評価に用いる。

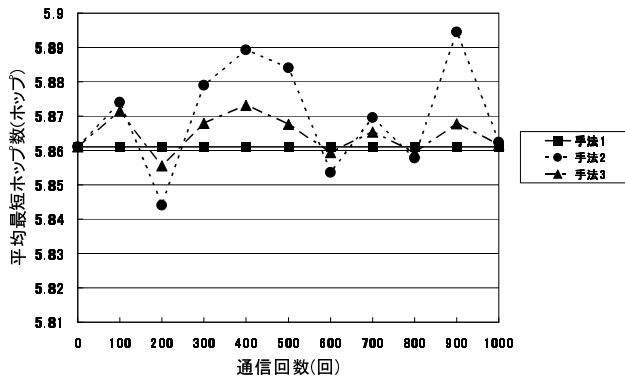


図 8 100 回の問合せ発行ごとの平均最短ホップ数

Fig. 8 Average minimum hop count.

図 8 に実験結果を示す。図 8 は、100 回の問合せ発行ごとの平均最短ホップ数の変化を示している。図 8 より論理ネットワークの再構築を行わない評価対象 1 と比較すると、評価対象 2、評価対象 3 は、平均最短ホップ数が増加する場合と減少する場合がある。これは、論理ネットワークの再構築が実行されたことにより、ホップ数が短縮される通信経路が増加すると共に、ホップ数が増加する通信経路も発生したためである。

しかし、比較対象 2 に比べ、評価対象 3 では、論理ネットワークの再構築による平均最短ホップ数の変化に関する増減幅が小さくなっている。これは評価対象 3 にて、提案手法によりホップ数が増加する通信経路を発生させたノード間リンク切断のうち、4.7 節で述べた条件を満たしたノード間リンクを再構築したためである。その結果、ホップ数が増加した通信経路が減少し、論理ネットワーク全体での平均最短ホップ数も減少したと考える。

また、評価対象 2 と比較した評価対象 3 の改善率は 1% 未満となっている。平均最短ホップ数は、ネットワーク上のノード数および各ノードが保持するノード間リンク数に影響を受ける。そのため、ノード数を実験に用いた 5000 ではなく、実環境におけるノード数のように増加させた場合、評価対象 2 と比較した評価対象 3 の改善率はより増加すると考える。

## 6. おわりに

本稿では、ノード間リンクの切断によりホップ数の増加した通信経路を削減することによって、ネットワーク負荷を削減する災害時論理ネットワーク再構築手法を提案した。評価実験の結果、以前我々が提案した手法と比較すると、論理ネットワークの再構築による平均最短ホップ数の変化に関する増減幅が小さくなった。これにより、ホップ数の増加した通信経路が減少し、小さい TTL による問合せを行うことが可能になった。その結果、論理ネットワークに対する負荷も軽減することができた。以下に今後の課題を示す。

### • 切断リンクに対する再構築基準

本稿では、ノード間リンク切断前後における通信数の変化を基に、切断したノード間リンクによりホップ数が増加した通信経路を通過する通信数の算出を行った。そして、算出した通信

数を切断したノード間リンクの再構築の基準に用いた。しかし、災害発生後には安否確認などの情報交換が急激に増加することが考えられるため、ノード間リンクの切断の有無に関わらず、特定の通信経路を通過する通信数が増加する場合もある。そのため、今後はノード間リンク切断前後の通信数の変化以外の基準を用いたノード間リンク復元手法を考案する予定である。

### • 論理ネットワークに対するノードの参加・離脱

本稿における提案手法では、論理ネットワークに対するノードの参加・離脱は考慮しなかった。しかし災害発生後、時間の経過と共に新たに障害が発生し、論理ネットワークから離脱するノードが発生することが考えられる。同様に障害から復旧し、再び論理ネットワークに参加するノードも発生すると考えられる。そのため、今後は時間の経過に伴う論理ネットワークへのノードの参加・離脱も考慮する予定である。

### • 実環境への適用を考慮した評価実験

本稿における提案手法の評価実験では、論理ネットワーク上のノード数を 5000 としていたため、実環境のネットワーク上におけるノード数と比較すると少ないノード数による評価実験であった。そのため、今後は実環境における災害規模を想定し、実際に故障などの障害が発生するノード数を考慮した評価実験を行う予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は、ハイテク・リサーチ・センター整備事業「防災と安全のための複合大規模センサシステムおよびロバストネットワークの構築」によるものである。ここに記して謝意を表します。

## 文 献

- [1] 中山淳也, 太田学, 片山薫, 石川博. 負荷低減型 p2p ネットワークの提案-安否情報検索への応用-. *DBSJ Letters*, Vol. 1, No. 1, pp. 51-54, 2002.
- [2] 中山淳也, 太田学, 片山薫, 石川博. 改良型 P2P ネットワークを利用した安否確認システムの提案. *DEWS2003, 8-C-02*, pp. 1-8, 2003.
- [3] Mark Coates, Michael Rabbat, and Robert Nowak. Discovering General Logical Network Topologies. *Technical Report TREE-0202*, 2002.
- [4] 後藤嘉宏, 阿多信吾, 村田正幸. P2P サービスにおける物理ネットワークを考慮した論理トポロジー構築手法. *CQ2001-101*, pp. 43-48, 2002.
- [5] 島泰三, 鈴木優, 川越恭二. 災害時における論理ネットワーク再構築手法. *信学技報 DE2006-124*, Vol. 106, No. 290, pp. 31-36, 2006.
- [6] 片山肇, 中野宏一, 金子雄, 春本要, 西尾章治郎. 応答転送状況を用いた P2P ネットワークの繋ぎ換えアルゴリズムの評価. *DBSJ Letters*, Vol. 4, No. 1, pp. 69-72, 2005.
- [7] 中野宏一, 片山肇, 春本要, 西尾章治郎. 応答転送状況をに基いた P2P ネットワークのトポロジー再構築アルゴリズムの評価. *DEWS2006, 2B-o3*, pp. 1-7, 2006.
- [8] 村上慶司, 佐藤文明. リンクの負荷と木の深さを考慮したアプリケーションレベルマルチキャストツリーの動的構築方法. *情報処理学会研究報告*, Vol. 2004, No. 107, pp. 1-6, 2004.
- [9] William S.Lovejoy and Christoph H.Loch. Minimal and maximal characteristic path length in connected sociomatrixes. *Social Networks*, Vol. 25, pp. 333-347, 2003.