

## 特別研究報告

### 題目

スケールフリーネットワークにおける  
経路制御のためのフラッディング手法の提案と評価

### 指導教官

村田 正幸 教授

### 報告者

牧野 暢孝

2004 年 2 月 19 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

スケールフリーネットワークにおける経路制御のためのフラッディング手法の提案と評価

牧野 暢孝

内容梗概

インターネットに接続されるノード数の増大にともない、経路情報の交換によるトラヒックの増大が問題となっている。経路情報をネットワーク内の各ノードに配布する場合、その配布が経路に依存しないようフラッディングによる配布が行われる。例えば、OSPF (Open Shortest Path First) プロトコルでは、リンクの利用状況に変化が生じると隣接ノードにリンク利用状況を配布し、それぞれの隣接ノードでは再び同じ動作を繰り返すことでネットワークの各ノードに経路情報が配布される。BGP (Border Gateway Protocol) において経路情報の交換は、隣接した BGP ルータとコネクションを確立し、そのコネクション上で経路情報の交換を行う。フラッディングにより経路情報の配布もしくは交換を行う場合、ネットワークのノード数およびリンク数が増加するとともに経路制御情報交換のためのトラヒック (制御トラヒック) の量が増大し、通信トラヒックへの影響が大きくなる。また、ノード障害時には隣接する各ノードからフラッディングを行うため一時的な輻輳が生じる可能性がある。

その一方で、インターネットのトポロジー形状はべき乗則に従うことが近年明らかにされている。べき乗則に従うネットワークでは、一部のノードに多数のリンクと接続される一方で、多くのノードは少数のリンクと接続され、ノード間のホップ数が極めて小さくなるスケールフリーの特徴を持つ。そのため、このトポロジーの形状の特徴を利用することで、制御トラヒック量を大きく削減できる可能性がある。

本報告では、経路情報の交換に必要となるトラヒック量の削減を目的として、スケールフリーネットワークに適したフラッディング手法を提案する。提案手法では、フラッディング時にすべての隣接ノードに対して経路制御メッセージを送信するのではなく、確率に基づい

て経路制御メッセージの伝達を制限することで経路制御メッセージの重複を削減する．その上で経路制御メッセージの生存ホップ数を時刻毎に変化させてフラディングを行うことにより近隣のノードに対して経路制御メッセージが到達する確率を高めている．一方，ホップ数に関して離れたノードに到着する経路制御メッセージ量を削減している．さらに，提案手法でスケールフリーネットワークのトポロジー特性を利用して経路制御メッセージの重複数が多くならない生存ホップ数を導出することによって，近隣ノードに情報が伝わる時間を短縮している．計算機シミュレーションによって評価した結果，従来のリンクステート型の経路制御方式に比べて制御トラヒック量を最大で 95% 削減できることがわかった．また，制御メッセージの重複数が  $1/9$  に抑えられることが明らかとなった．

主な用語

フラディング, 経路制御, スケールフリー, ベキ乗則, 浸透理論

## 目次

1	はじめに	5
2	スケールフリーネットワーク	8
2.1	トポロジー生成モデル	8
2.2	スケールフリーネットワークの性質	10
3	従来のフラッディング手法	12
3.1	従来の経路制御方式におけるフラッディング手法	12
3.2	TTL 設定によるフラッディング手法	13
3.3	確率によるフラッディング手法	14
3.4	スケールフリーネットワークにおける従来のフラッディング手法の評価	16
3.4.1	シミュレーションモデル	16
3.4.2	評価指標	17
3.4.3	OSPF におけるリンク障害時の制御メッセージ数の評価	17
3.4.4	OSPF と TTL 設定によるフラッディング手法の比較	17
3.4.5	OSPF と確率による手法の比較	23
4	スケールフリーネットワークに適したフラッディング手法の提案	26
4.1	提案手法	26
4.2	確率に基づいたパラメータ設定	28
4.3	計算機シミュレーションによる提案手法の評価	29
4.3.1	単一ノードから 1 回フラッディングが発生する場合	29
4.3.2	単一ノードから複数回フラッディングが発生する場合	32
5	おわりに	36
	謝辞	37
	参考文献	38

## 目 次

1	BA モデルで生成されたトポロジー：ノード数 100 . . . . .	9
2	ER モデルおよび BA モデルにより生成されたトポロジーにおける出力リンク数の累積密度分布 . . . . .	11
3	リンクステート型経路制御方式におけるフラッディングの動作 . . . . .	13
4	FSLs における TTL 設定 . . . . .	14
5	OSPF におけるリンク障害時の制御メッセージ数 . . . . .	18
6	TTL 設定によるフラッディング手法と OSPF のフラッディング手法の比較：伝達率 . . . . .	19
7	TTL 設定によるフラッディング手法と OSPF のフラッディング手法の比較：制御トラヒック量 . . . . .	20
8	確率によるフラッディング手法と OSPF のフラッディング手法の比較：伝達率	21
9	確率によるフラッディング手法と OSPF のフラッディング手法の比較：制御トラヒック量 . . . . .	22
10	確率によるフラッディング手法：確率 $p$ と伝達率の関係 . . . . .	24
11	確率によるフラッディング手法：確率 $p$ と制御トラヒック量の関係 . . . . .	25
12	リンクステート型経路制御方式におけるフラッディングの動作 . . . . .	27
13	提案手法の制御メッセージ量の評価 . . . . .	31
14	提案手法の重複メッセージ数の評価 . . . . .	31
15	各フラッディング手法の比較評価：伝達率 . . . . .	33
16	各フラッディング手法の比較評価：制御トラヒック量 . . . . .	34
17	各フラッディング手法の比較評価：重複した制御メッセージ数 . . . . .	35

## 1 はじめに

インターネットに接続されるノード数の増大にともない、広告される経路情報のトラヒックの増大、および、経路収束までの時間が問題となっている [1]。経路情報をネットワーク内の各ノードに配布する場合、その配布が経路に依存しないようフラッディングによる配布が行われる。例えば、OSPF (Open Shortest Path First) プロトコル [2] では、リンクの利用状況に変化が生じると隣接ノードにリンク利用状況を伝え、それぞれの隣接ノードではその隣接ノードに向けて再びリンク利用状況を配布する。この動作を繰り返すことでネットワークの各ノードがネットワーク全体のリンク利用状況を把握し、それに基づいて経路選択を行う。また、現状のインターネットで AS 間の経路情報交換に用いられている BGP (Border Gateway Protocol) [3] においてもフラッディングが行われている。BGP では、隣接した BGP ルータと TCP コネクションを確立し、そのコネクション上で経路情報の交換を行う。このようにフラッディングにより経路情報の配布もしくは交換を行う場合、ネットワークのノード数およびリンク数が増加するとともに経路制御情報交換のためのトラヒック (以降、制御トラヒックと呼ぶ) の量が増大し、通信トラヒックへの影響が大きくなる。

その一方で、現状のインターネットのトポロジー形状はべき乗則に従うことが示されている [4]。べき乗則に従うネットワークとは、ノードに連結されるリンク数が  $k$  である確率  $P(k)$  が  $k^{-\gamma}$  ( $\gamma$  は定数) となるネットワークである。べき乗則に従うネットワークでは、一部のノードに多くのリンクが連結される一方で、多くのノードには少数のリンクが連結される特性を持つ [5, 6]。さらに、文献 [6] では、べき乗則に従うネットワークは、リンク数が大きいノード (ハブノード) とリンク数が小さいノード (非ハブノード) ノード間のホップ数が小さくなり、その結果、ネットワークのノード間が極めて小さいホップ数で接続されるスケールフリーの性質を持つことが示されている。

スケールフリーネットワークでは、経路制御のための情報の伝達という観点では、情報が各ノードに伝わる速度が早くなる利点がある [7]。しかし、ネットワークにおいて複数のノードが同時もしくは近い時刻にフラッディングを行うと、制御パケットがハブノードに集中し輻輳が生じる可能性がある。特にネットワークのノード数が増加するとともに、ハブノードに接続されるリンクが集中すること、および、非ハブノードの数が増大しフラッディングが

同時に行われる可能性が高まることから、この傾向は顕著に現れると考えられる。

フラッディング時の制御メッセージ数削減のための方法として、今まで様々な手法が考えられてきた [7-13]。文献 [13] では、フラッディング時に用いるパケット（制御パケット）の TTL（Time-To-Live）、すなわち生存ホップ数、に制限を加えることで制御パケットが転送される範囲を指定し、ホップ数に関して離れているノードに届く制御パケットの頻度を抑えている。TTL を設定する場合、ホップ数に関して離れたノードには経路情報が遅れて届くことになる。しかし、データを送信する際には、リンクステート情報が伝わっている近隣ノードにまでデータが届けば、最新の経路情報を反映した経路制御が可能となる。ただし、これらの文献ではランダムネットワークを対象とした性能評価が主として行われており、スケールフリーネットワークに適用した際の制御トラフィック量の特性は明らかになっていないのが現状である。一方、[7-11] では、P2P (Peer-to-Peer) ネットワークにおける情報検索を想定したフラッディング手法が提案されており、スケールフリーネットワークに適用した際の検索クエリー量の評価が行われている。情報検索は、あるノードから他のノードに向けて検索クエリーを送信することで行われるが、検索効率を高めるためにはより少数のクエリー数を減らしつつ、クエリーが到達するノード数を大きくする必要がある。このことから、経路制御のための情報を配布をする場合と非常に似た問題であると考えられる。しかし、情報検索は単一ノードからの発せられるものであるが、経路制御情報のフラッディングは単一のノードからのみ行われるのではなく、複数のノードから行われる。経路制御情報の配布は、1) 隣接リンクの利用状況に変更があったこと、2) リンク故障もしくはノード故障が生じたこと、をネットワークの各ノードに伝える、といった目的があり、リンク故障の場合は、そのリンクに連結していた二つのノードからフラッディングが行われる。そのため、上記フラッディング手法を経路制御情報へ適用するためには、複数のノードからのフラッディングが行われた際の制御パケット量の評価が不可欠である。

本報告では、まずスケールフリーネットワークにおいてフラッディングを行う際に、経路情報が各ノードに伝わるまでの時間および制御トラフィック量の特性を評価する。計算機シミュレーションによって評価を行った結果、従来のフラッディング手法では、ハブノードにおいて制御トラフィック量が増大し輻輳が生じることが明らかになった。また、制御トラヒッ

ク量削減を目指したフラディング手法を評価した結果、ハブノードからのフラディングと非ハブノードからのフラディングに依存して、情報が伝わるノード数およびネットワークに流れる制御トラフィック量の特性が大きく変わることが明らかとなった。

本報告では、これらの問題点を解決するスケールフリーネットワークに適したフラディング手法を提案する。具体的には、非ハブノードからのフラディングは、制御パケットの重複がほとんど生じない範囲を数学的に導出し、それに基づいて TTL を設定する。その一方で、フラディング時にすべての隣接ノードに対して経路制御メッセージを送信するのではなく、経路制御メッセージが伝達する確率を定めることによって、経路制御メッセージの重複を削減する。さらに、経路制御メッセージの生存ホップ数を時刻毎に変化させてフラディングを行うことによって近隣のノードに対して経路制御メッセージが到達する確率を高めつつ、ホップ数に関して離れたノードに到着する経路制御メッセージ量を削減している。

本報告の内容は以下の通りである。まず 2 章において現在のインターネットに現れるべき乗則の説明と、べき乗則によるスケールネットワークのトポロジーの性質を述べる。3 章では、OSPF のフラディング手法、および、フラディング手法の削減を目指した従来手法を述べ、問題点を明らかにする。4 章では、3 章において明らかとなる問題点を解決するために、スケールフリーの特性に基づいたフラディング手法を提案、計算機シミュレーションを用いた比較評価により提案手法の有効性を示す最後に本報告のまとめと今後の課題を 5 章で述べる。



## 2 スケールフリーネットワーク

本章では、現在のインターネットと同じ性質を持つと言われているスケールフリーネットワークについて簡単に述べる。まず、2.1 節ではスケールフリーネットワークの生成モデルである BA モデルの特徴と生成方法を紹介する。2.2 節では、その生成モデルを用いてスケールフリーネットワークの性質を述べる。

### 2.1 トポロジー生成モデル

スケールフリーネットワークのトポロジー生成モデルの一つに、BA (Barabási–Albert) モデルがある [5]。BA モデルでは、ネットワークの成長過程が表現されている (*Incremental Growth*)。また、出力リンク数  $k_i$  が大きい程、ノード  $i$  へリンクが接続される確率  $\Pi(k_i)$  が高くなるように接続確率を与えている (*Preferential Attachment*)。BA モデルでは、これら 2 つの特徴に基づいてネットワークトポロジーが生成される (図 1 参照)。

Step 1: 初期ノードとして  $m_0$  個のノードを配置する。

Step 2: ネットワークのノード数が  $N$  未満である場合、Step 3 へ。ノード数が  $N$  であればトポロジー生成を終了する。

Step 3: ノードを 1 個追加する (*Incremental Growth*)。

Step 4: 追加したノードから式 (1) の確率に従い、他の  $m(\leq m_0)$  個の相異なるノードへリンクを接続する (*Preferential Attachment*)。Step 2 へ。

$$\Pi(k_i) = k_i / \sum_j k_j \quad (1)$$

次節においてスケールフリーネットワークのトポロジー特性を明確にするため、比較のトポロジー生成モデルとして ER (Erdős–Rényi) モデルを述べる。

**ER モデル** ER モデルはランダムネットワークを生成するモデルの一つである。ネットワークの規模 (ノード数) が固定であること、各ノードペア間のリンク接続確率が一定であ

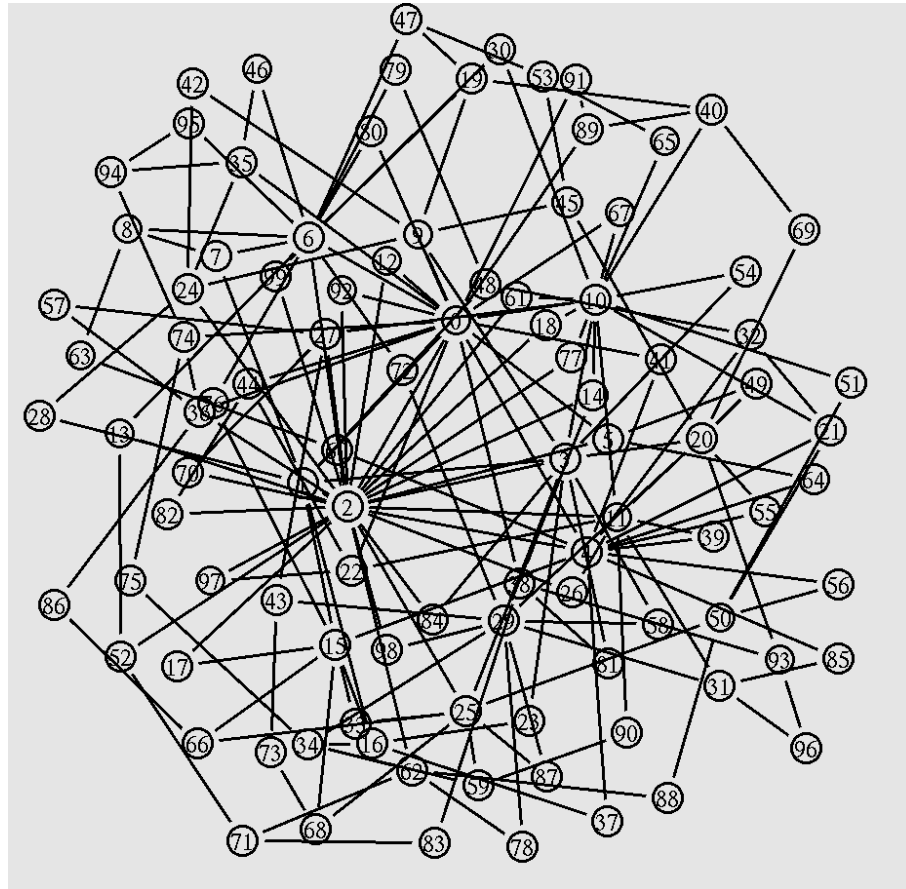


図 1: BA モデルで生成されたトポロジー：ノード数 100

ることが特徴である。ER モデルでは、ネットワークのトポロジー生成に以下の 2 つのパラメータを用いる。

$N$ : ノード数 ( $N > 0$ )。

$p$ : ノード間を接続する確率 ( $0 < p < 1$ )。

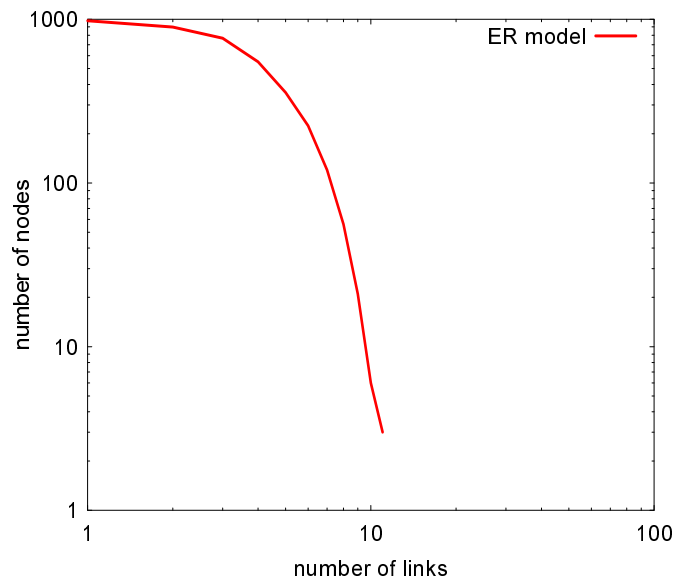
上記の 2 つのパラメータを用い、次の 2 つのステップによりトポロジーを生成する。

Step 1:  $N$  個のノードを配置する。

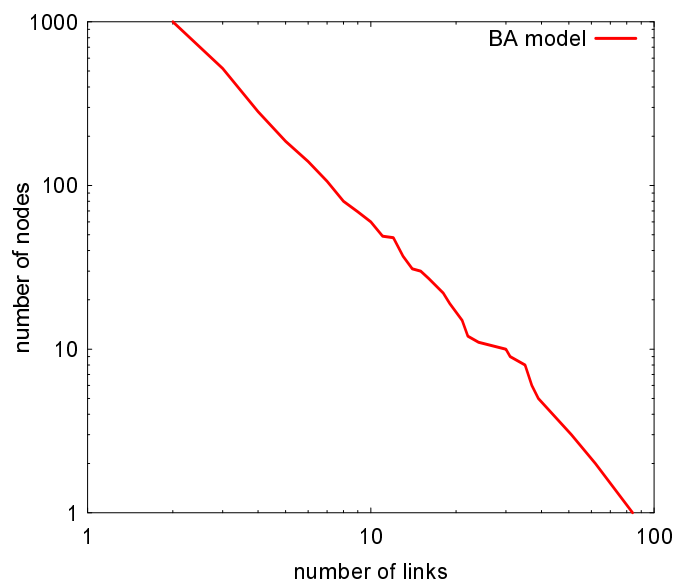
Step 2: 全てのノードペア間に確率  $p$  でリンクを張る。

## 2.2 スケールフリーネットワークの性質

ER モデルおよび BA モデルに従い生成した物理トポロジーの各ノードの出力リンク数の累積密度分布を図 2 に示す．共にノード数は 1000 であり，ER モデルではノードペア間の接続確率は 0.002 を与え，BA モデルでは初期配置ノード 2 かつノード追加時の追加リンク数は 2 とすることで，ネットワークにおけるリンク数をほぼ同一にしている．図 2 を見ると，ER モデルは，曲線が上に凸の弧を描き，急な上昇していることから，各ノードの outdegree の分散は小さく，指数分布に従うことが分かる．一方，BA モデルによって生成されたトポロジーでは，両対数グラフにおいて直線を描き，べき乗則の特徴がみられる．BA モデルにより生成されるトポロジーでは直線の傾きが  $-1.9$  となっている．



(a) ER モデル



(b) BA モデル

図 2: ER モデルおよび BA モデルにより生成されたトポロジーにおける出力リンク数の累積密度分布

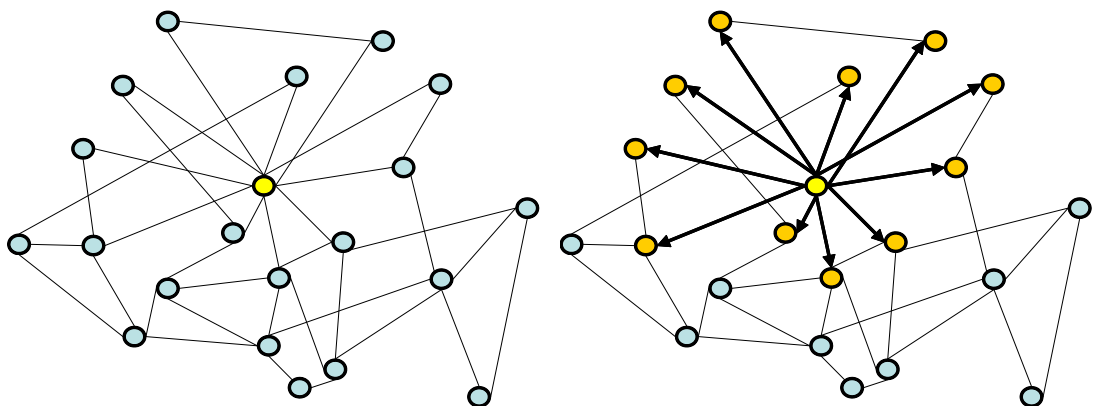
### 3 従来のフラッディング手法

この章では、経路制御情報をフラッディングするための手法を述べる。まず現在のリンクステート型経路制御方式に用いられているフラッディング手法を紹介する(3.1節)。次に、3.2, 3.3の各節で、フラッディング時の制御パケット量の削減を目的とした二つのフラッディング手法を述べ、それらの問題点を指摘する。

#### 3.1 従来の経路制御方式におけるフラッディング手法

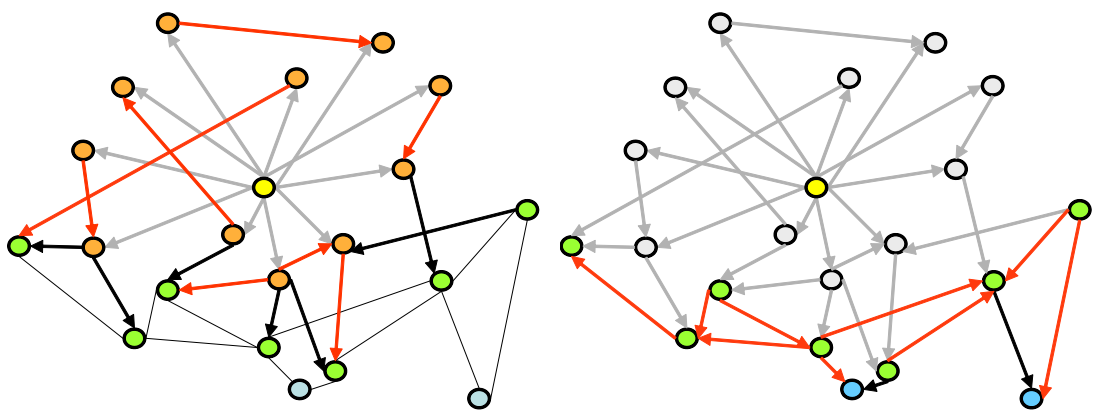
リンクステート型の経路制御方式で、現在のインターネットにおいても利用されている OSPF は、リンクの利用状況に変動があると Link State Update (LSU) メッセージの広告を行う。LSU メッセージの広告は、経路制御に依存しないようにすべての隣接ノードに対して行われる。すなわち、あるノードが LSU メッセージを受け取ると、過去に受け取ったことがあるかどうかを判定し、もし新しい情報であれば再びすべての隣接ノードに転送する。ただし、LSU メッセージが送られてきたノードに対しては転送しない。以降では、リンクステート型の経路制御方式のフラッディングを対象とする。なお、パケット型の経路制御方式である BGP においても同様の情報の伝達が行われる。

図 3 に、リンクステート型経路制御方式におけるフラッディングの動作を示す。中央のノードにおいて LSU メッセージの広告イベントが発生すると(図 3(a))、まず隣接ノードに LSU メッセージを送信する(図 3(b))。次に、図 3(c) のように、各隣接ノードは自身の隣接ノードに向けて LSU メッセージを転送する。この時、既に LSU メッセージが送付されたノードに対して再度 LSU メッセージに送られることがある。図 3(c) における波線の矢印が重複となる LSU メッセージの送信である。LSU メッセージの重複があると各ノードではそれを破棄し、それ以上の転送を行わない(図 3(d))。本報告では、このようなフラッディング手法を単純フラッディング (simple flooding) と呼び、次節以降のフラッディング手法との比較評価に用いる。



(a) 中央のノードにおいて LSU メッセージの広告イベントが発生

(b) 隣接ノードに LSU メッセージの送信



(c) 各隣接ノードは、自身の隣接ノードに向けて LSU メッセージを転送

(d) 繰り返し転送することでネットワークのすべてのノードに LSU メッセージが転送される

図 3: リンクステート型経路制御方式におけるフラッディングの動作

### 3.2 TTL 設定によるフラッディング手法

文献 [13] では、TTL を設定することでフラッディングの量を抑える手法である FSLS (Fuzzy Sighted Link State) アルゴリズムが提案されている。FSLS は、リンク利用状況が発生したノードの近隣に対しては頻繁に更新メッセージを伝達する一方で、ホップ数に関して離れたノードへ更新メッセージの到着間隔を大きくすることでフラッディング時のメッセージ量を削減する手法である。図 4 に各時刻に対して FSLS が設定する TTL 値を示す。FSLS

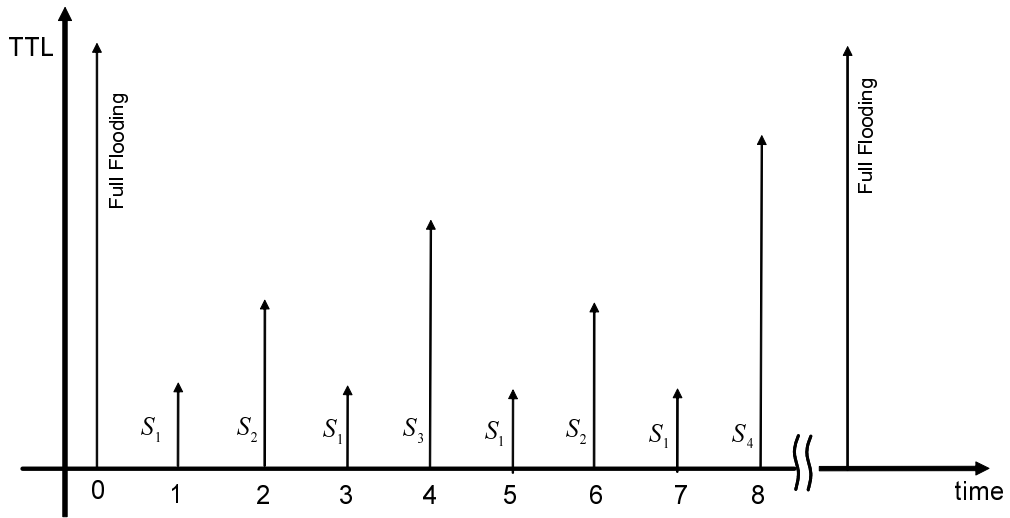


図 4: FSLS における TTL 設定

では、経路情報を広告する間隔を定め（その間隔を  $t$  とする）、時刻  $2^{(i-1)} \cdot t$  毎に TTL を  $S_i$  に設定する。この時、 $i$  ホップ離れたノードに経路情報が伝わるまでの時間は、 $t \cdot \sum_{i=2}^H 2^{(i-1)} = t \cdot 2^i$  となる。

このように  $TTL$  を定めることで、1) 情報が伝達するまでの時間が保証される、2) ホップ数に関して離れたノードに到着する制御メッセージ数が削減できる、といった利点がある。その一方で、ネットワークに応じて  $S_i$  を設定する必要がある、この設定により性能が大きく変わる可能性がある。例えば、 $S_i = i$  と設定し、スケールフリーネットワークに適用すると、非ハブノードから経路情報を広告する場合には、経路情報がネットワーク全体に伝わるまでの時間が極めて大きくなる可能性がある。また、間隔  $t$  の設定に依存し、一度に配布するメッセージ量が増大する問題も考えられる。文献 [13] では、アドホックネットワークを対象にこれらのパラメータ導出を行っており、 $S_i = 2^i$  とする手法である HSLS (Hazy Sighted Link State) を提案している。

### 3.3 確率によるフラッディング手法

文献 [11] では、P2P ネットワークにおいて情報探索を対象とした浸透理論 (Percolation Theory) に基づいたフラッディング手法が提案されている。浸透理論は、多孔性の石の一つ

の穴から水を入れた時に、水が浸透する様子をモデルとした理論である [14]。例えば、石全体に水が浸透する確率を求めることができる。具体的には、石を格子状に分割し、各頂点が開いている（水を通す）確率を  $P$  で与えた時に、石全体に水が浸透するための浸透確率  $P = P_c$  を導出することができる。

文献 [11] では、P2P ネットワークを対象として、すべてのノードに検索クエリーを届けるための浸透理論に基づいたフラッディング手法が提案されている。具体的には以下の通りである。あるノードから隣接ノードへクエリーを転送する確率  $p$  を与える。クエリーを受け取ったノードは、各隣接ノードに対して確率  $p$  でクエリーを転送する。このような各ノードの動作を前提にして、すべてのノードにクエリーが到着する確率  $p$  の下限値を浸透理論を用いて導出し、浸透確率  $p_c$  として与える手法である。つまり、確率  $p < p_c$  であればすべてのノードにはクエリーは届かず、確率  $p \geq p_c$  であれば、すべてのノードにクエリーが到着する。また、 $p - p_c$  が大きければ大きいほど冗長に届くことになる。

#### 浸透理論にもとづく浸透確率導出

浸透確率  $p_c$  の導出過程を以下に簡単に述べる（詳細は [11] 参照）。

ネットワークにおける出力リンク数の分布を  $P(k)$  とする。この時、ネットワークの各リンクを確率  $p$  で取り除いた後の出力リンク数の分布  $P'(K)$  は、

$$P'(k) = \sum_{n=k}^{\infty} \binom{n}{k} p^k (1-p)^{(n-k)} \cdot P(n) \quad (2)$$

で与えられる。一方、浸透確率  $p_c$  以下の式が成り立つことが知られている [6]。

$$\frac{\langle k'^2 \rangle}{\langle k' \rangle} = 2 \quad (3)$$

ここで、 $\langle k' \rangle$  は、

$$\langle k' \rangle = \sum_{k=0}^{\infty} k P'(k) = (1-p) \cdot \langle k \rangle, \quad (4)$$

と導出され、また、

$$\langle k'^2 \rangle = \sum_{k=0}^{\infty} k^2 P'(k) = (1-p)^2 \langle k^2 \rangle + p(1-p) \langle k \rangle, \quad (5)$$



となる．式 (4) と (5) を式 (3) に代入すると，

$$\frac{(1 - p_c)^2 \langle k^2 \rangle + p_c(1 - p_c) \langle k \rangle}{(1 - p_c) \cdot \langle k \rangle} = 2 \quad (6)$$

となる．浸透確率  $p_c$  は，式 (6) を  $p_c$  について解くことで求まり，

$$p_c = 1 - \frac{1}{\frac{\langle k^2 \rangle}{\langle k \rangle} - 1} \quad (7)$$

で与えられる．スケールフリーネットワークでは，ネットワークの出力リンク数の最大値  $K$  に対し，

$$\frac{\langle k^2 \rangle}{\langle k \rangle} = \left( \frac{2 - \gamma}{3 - \gamma} \right) \cdot \left( \frac{K^{3-\gamma} - m^{3-\gamma}}{K^{2-\gamma} - m^{2-\gamma}} \right) \quad (8)$$

で与えられる．ただし， $K$  は

$$\int_K^\infty P(k) dk = \frac{1}{N} \quad (9)$$

により求まる．

上記の浸透確率を導出し，その浸透確率に基づいたフラッディングを行うことで，すべてのノードに検索クエリーを伝達しつつ，検索クエリー量を減らすことが可能である [11]．なお，このフラッディング手法は，情報検索クエリーのフラッディングだけではなく経路制御情報の配布にも適用できる．

### 3.4 スケールフリーネットワークにおける従来のフラッディング手法の評価

本節では，前節までに述べた三つのフラッディング手法をスケールフリーネットワークで用いた際の評価を行う．

#### 3.4.1 シミュレーションモデル

ネットワークモデルとして，2章で述べた BA モデルに従い生成した 1000 ノードのトポロジーを用いる．各リンクの伝搬遅延時間は 1ms とする．このトポロジーに対し，フラッディングを行うイベントを発生させる．そのイベントは，リンク利用状況の変化であるとし，ネットワーク全体に対して平均 100ms のポアソン到着モデルに従って発生させる．ま

た、各ノードは制御メッセージを格納するための待ち行列を保持し、待ち行列の先頭のメッセージから各フラッディング手法に基づいた処理を行う。待ち行列は M/M/1 ( $/\infty$ ) であるとし、その処理能力は 1Mpps としている。

### 3.4.2 評価指標

各フラッディング手法の性能指標として、経過時間に対する制御情報の伝達率、経過時間に対する制御メッセージ数を用いた。前者は制御メッセージがどれだけのノードに届いたかを示すものであり、後者はフラッディングによって複製されたパケットの総数を表すものである。

### 3.4.3 OSPF におけるリンク障害時の制御メッセージ数の評価

図 5 に、1000 ノードにおいて単一のリンク障害が発生した時に、フラッディングによって各ノードが受信した制御メッセージ数を時間に対して求めた結果を示す。Y 軸はノードを出線数の昇順に並べている。この図を見ると、ネットワークにおいて出線数が小さいノードでは制御メッセージの重複はほとんど発生していないことがわかる。しかし、出線数が大きいノードでは制御パケットの重複数が極めて大きくなっていることがわかる。この図は、単一のリンク障害を発生させた結果であるが、ネットワークの規模が大きくなるにつれて複数箇所と同時にフラッディングが行われる可能性が高い。そのような状況では、ハブノードにおいて輻輳が生じる可能性は高いと言える。

### 3.4.4 OSPF と TTL 設定によるフラッディング手法の比較

TTL 設定を行う FSLs について、その伝達率と制御トラフィック量の比較評価を行う。ただし、FSLs は初期 TTL を 1 として開始している。図 6 は、ハブノードおよび非ハブノードからのフラッディングそれぞれに対し、単純フラッディングと FSLs を用いた時の経過時間に対する伝達率の変化を示している。ここでは、フラッディングは複数回数行われており、その結果伝達率の最大が時間の経過とともに大きくなっている。FSLs の結果を見ると、フ

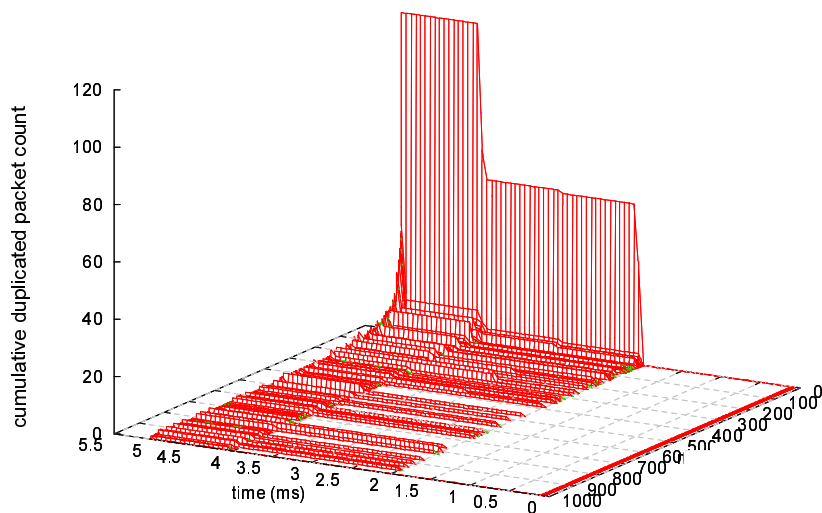
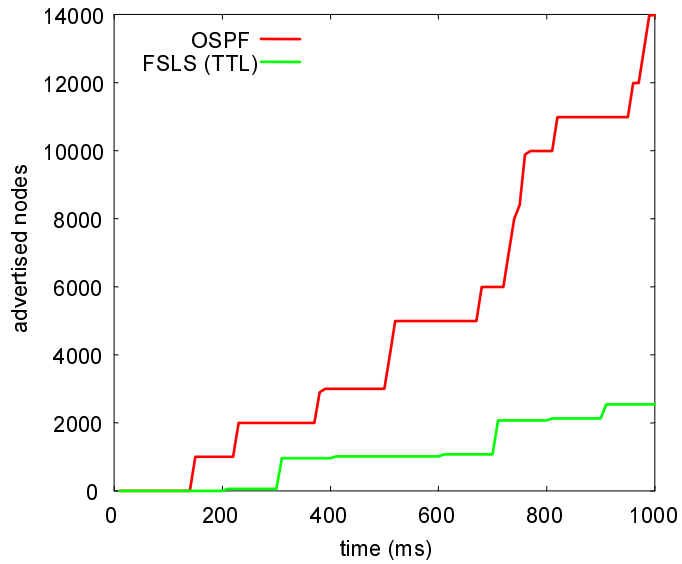
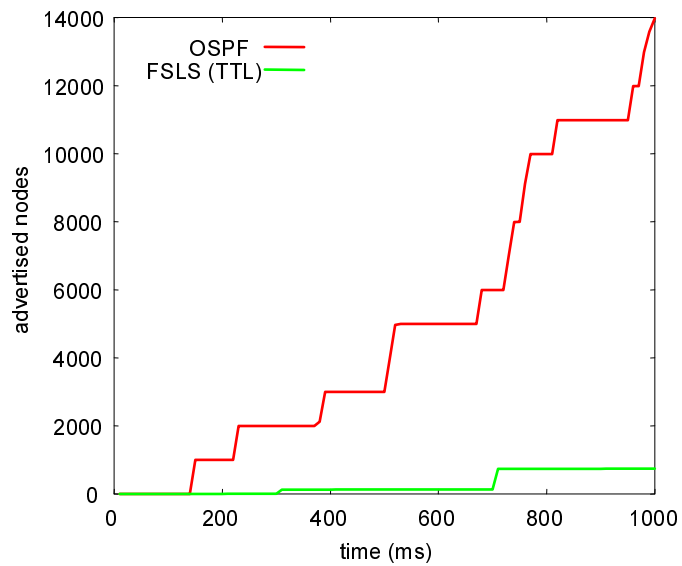


図 5: OSPF におけるリンク障害時の制御メッセージ数

ラッディングを行う度に TTL が変化しており，その結果時間の経過とともに伝達率が増加している．また，ハブノードの結果と比較して，非ハブノードからフラッディングを行う場合には，TTL が十分に大きくなるまでの時間が長くなることから，伝達率が少なくなっていることがわかる．このことを明確にするために，図 7 にネットワークに生じた制御トラフィック数を示す．この図においても非ハブノードからのフラッディングは制御トラフィック数が少なくなっており，経路情報の伝達が遅いことがわかる．FSLS では，トポロジーが持つスケールフリーの性質を考慮しておらず，ハブノードも非ハブノードも同様のフラッディングを行っている．このため，ハブノードからのフラッディングが広く伝わるのに対し，非ハブノードからのフラッディングはほとんど伝わらない．また，ハブノードからのフラッディングでは制御トラフィック量が増大する一方で，非ハブノードからのフラッディングではメッセージがほとんど生じていないことがわかる．

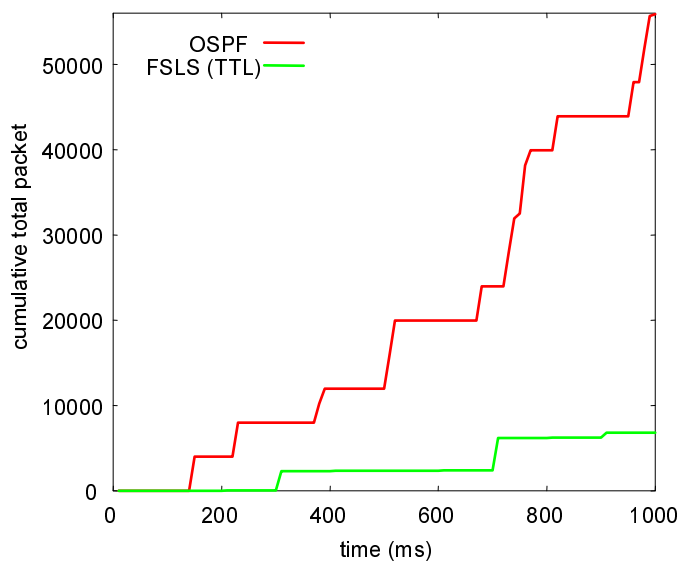


(a) ハブノードからのフラッディング

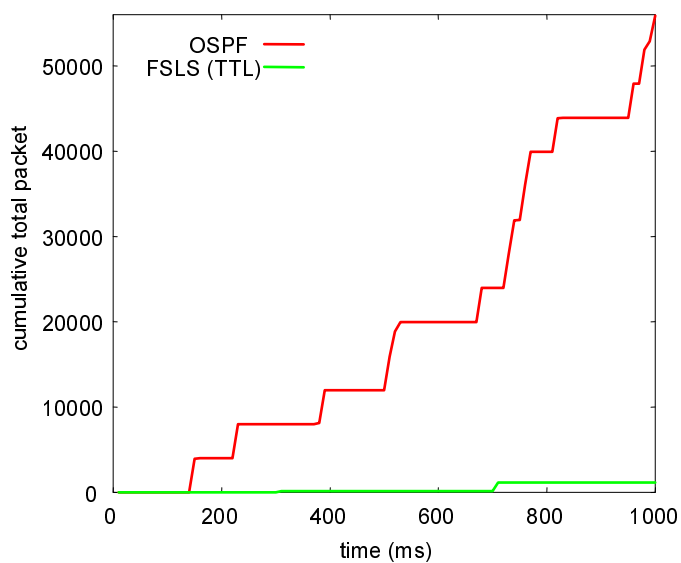


(b) 非ハブノードからのフラッディング

図 6: TTL 設定によるフラッディング手法と OSPF のフラッディング手法の比較：伝達率

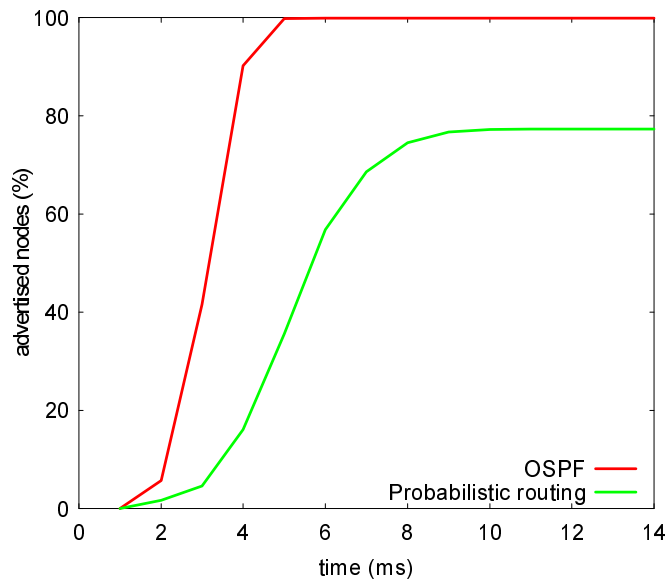


(a) ハブノードからのフラッディング

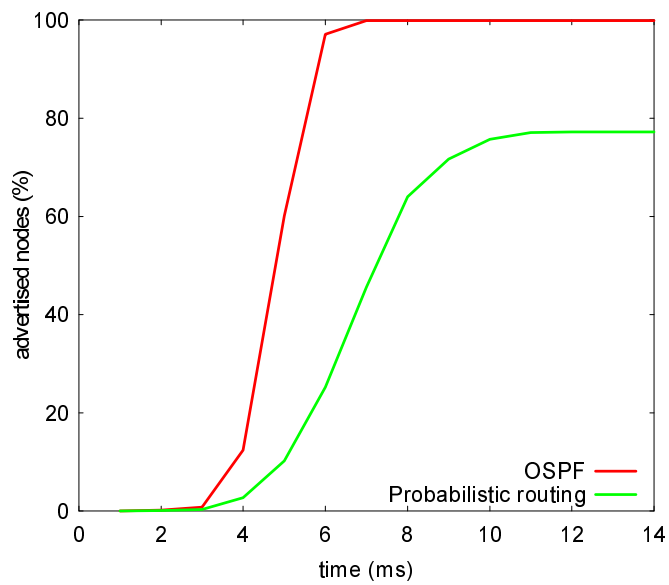


(b) 非ハブノードからのフラッディング

図 7: TTL 設定によるフラッディング手法と OSPF のフラッディング手法の比較 : 制御トラヒック量

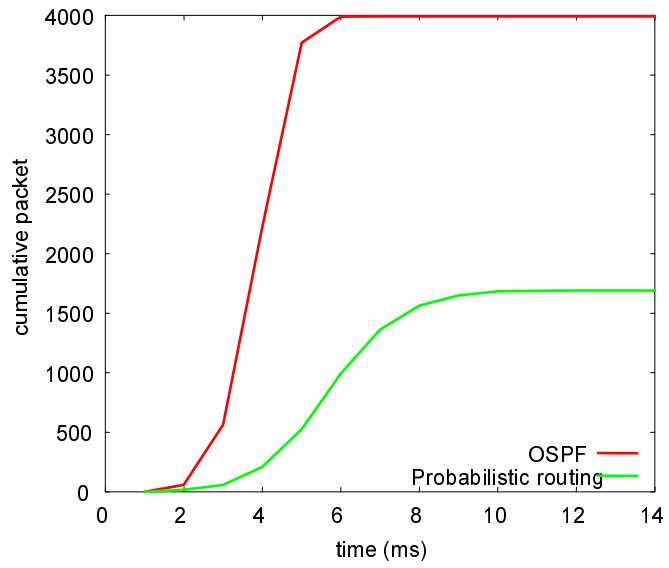


(a) ハブノードからのフラッディング

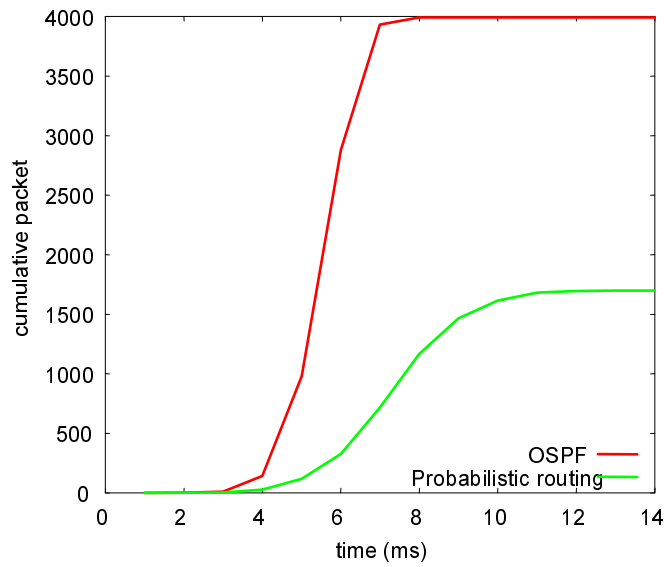


(b) 非ハブノードからのフラッディング

図 8: 確率によるフラッディング手法と OSPF のフラッディング手法の比較 : 伝達率



(a) ハブノードからのフラッディング



(b) 非ハブノードからのフラッディング

図 9: 確率によるフラッディング手法と OSPF のフラッディング手法の比較：制御トラヒック量

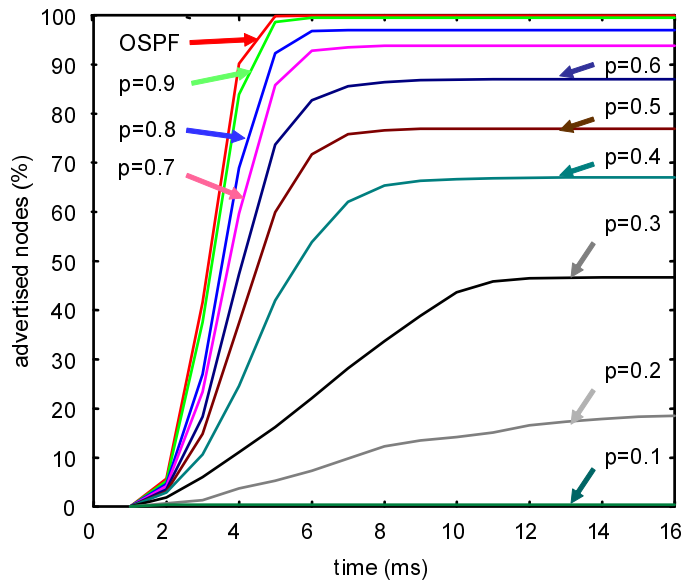
### 3.4.5 OSPF と確率による手法の比較

次に、単純フラディングと確率によるフラディング手法の比較評価を行う。なお、ここでは、フラディングの回数を1回に限定している。まず、確率による手法の特性を詳細に調べるために、制御メッセージの中継確率  $p$  の値を 0.1 から 0.9 まで 0.1 きざみで変化させ、伝達率および制御トラヒック量を求めた結果を図 10 および図 11 に示す。用いているトポロジーの  $\gamma$  は 2.39033、カットオフ  $K$  は 53 であることを用いて浸透理論により導出した確率  $p_c$  は、0.902 である。転送確率を 0.9 とした時の結果を見ると、ほぼすべてのノードに制御メッセージが伝達していることがわかる。また、制御トラヒック量の結果を見ると、単純フラディングによる結果と比較して制御メッセージ数を 1 割程度削減することができる。ただし、1 章にも述べたように、制御メッセージの伝達率を抑えることで、更なる制御メッセージ数の削減が可能である。

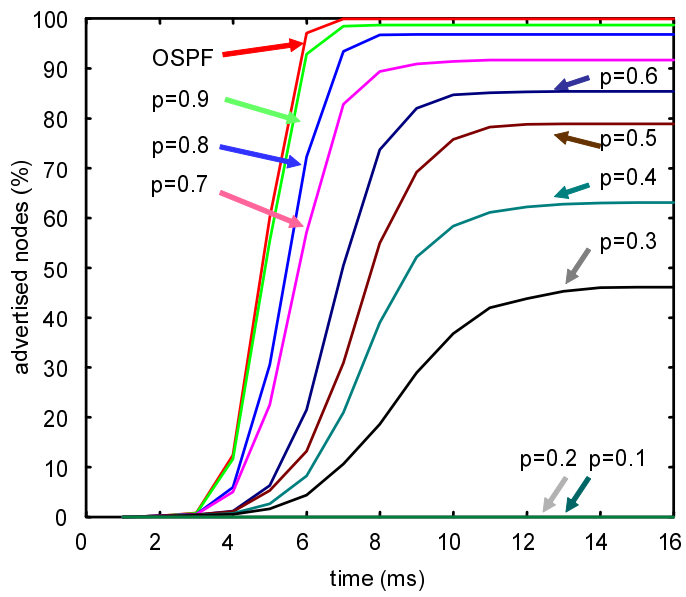
図 8 は、確率による手法において  $p$  を 0.5 とし、リンク利用状況に変化が起きた時に、その情報の伝達率を時系列に示した結果である。スケールフリーネットワークにおけるシミュレーションでは 80% のノードにのみ伝わるのが明らかとなった。これは、リンク数の少ない非ハブノードにおいて、制御メッセージが全く中継されない状況が多く発生しているためである。確率  $p$  が 0.5 である場合には、リンク数 2 の非ハブノードに制御メッセージが到着すると、メッセージが転送されてきたリンクを除くため転送を行うリンクは 1 つになるためである。特に、非ハブノードからのフラディングにおいては、上述の理由により、全く伝わらない状況が多く発生することが明らかとなった。次に、制御トラヒック量の推移を図 9 に示す。確率による手法では、非ハブノードでの伝搬が制限されるため制御メッセージの総量は大きく削減されており、確率による手法は制御トラヒック量の削減に効果があることがわかる。なお、非ハブノードからのフラディング (図 10(b)) では、初期の伝達課程で、非ハブノードが中継を行わず、結果としてまったく中継されない状況が、確率  $p$  が 0.5 以下の場合に多く見られることが確認できた。

以上より、確率による手法ではハブノードからのフラディングの制御トラヒック量の削減に効果が見られるものの、非ハブノードからの制御トラヒック量の削減には大きな効果が見られず、また、伝達率が少なくなることがわかった。



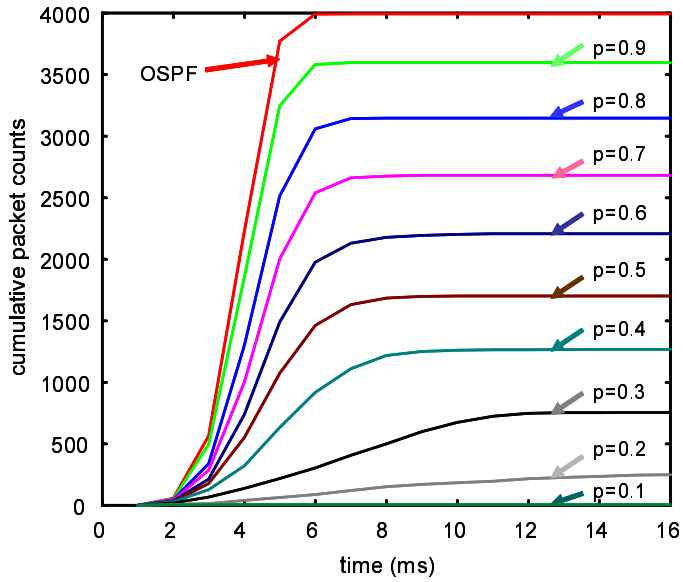


(a) ハブノードからのフラッディング

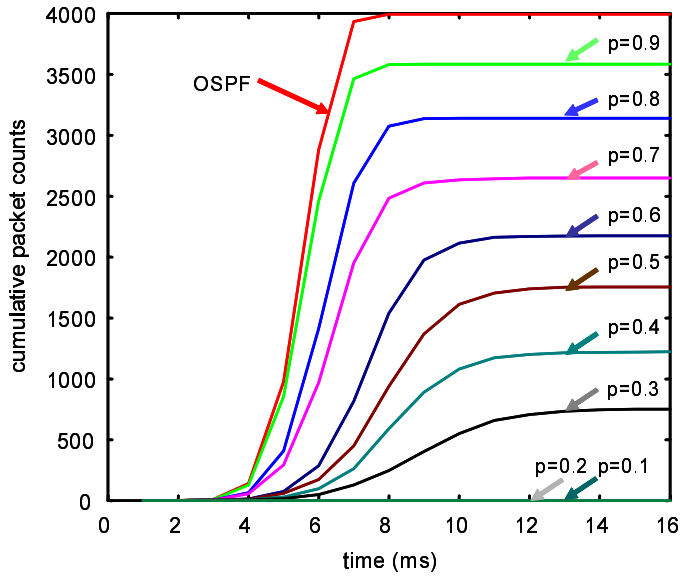


(b) 非ハブノードからのフラッディング

図 10: 確率によるフラッディング手法 : 確率  $p$  と伝達率の関係



(a) ハブノードからのフラッディング



(b) 非ハブノードからのフラッディング

図 11: 確率によるフラッディング手法：確率  $p$  と制御トラフィック量の関係

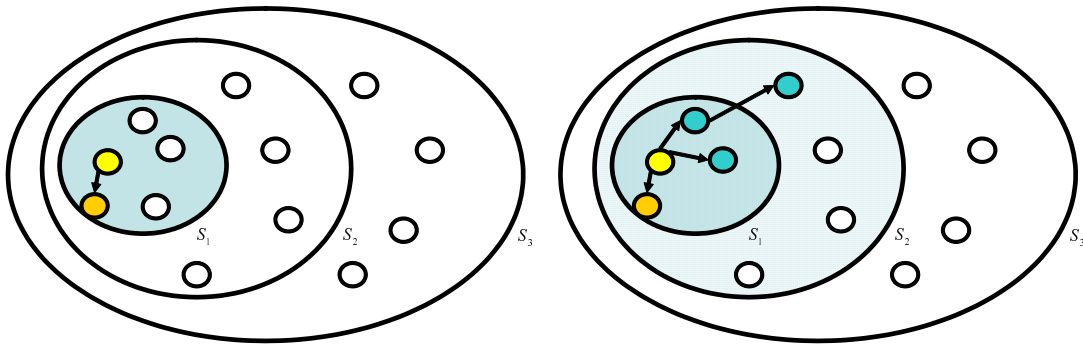
## 4 スケールフリーネットワークに適したフラッディング手法の提案

### 4.1 提案手法

FSLs では、ホップ数に関して離れたノードに対しては、経路制御情報を集約し伝達する機会を少なくすることによってネットワーク全体に流れる制御トラフィック量を削減することができる。しかし、TTL が大きい場合に発生する経路制御メッセージの重複を防ぐことはできない。また、非ハブノードからのフラッディングに対しては、TTL を小さく設定するとほとんどのノードに伝わらず、時間経過とともに TTL を増やしたとしても情報が伝わるまでの時間が長くなる。一方、確率によるフラッディング手法は、経路制御メッセージの重複数を削減することは可能であるものの、その性質上ネットワーク全体に広まらないことがある。そこで、本報告では、これらの手法を組み合わせることによって、上記の問題点を解決する。具体的には、TTL 制御によりネットワーク全体に流れる制御トラフィック量を削減しつつ、ホップ数に関して近いノードには経路情報メッセージが届く確率を高め、かつ、制御メッセージ量の削減を行う手法を提案する。

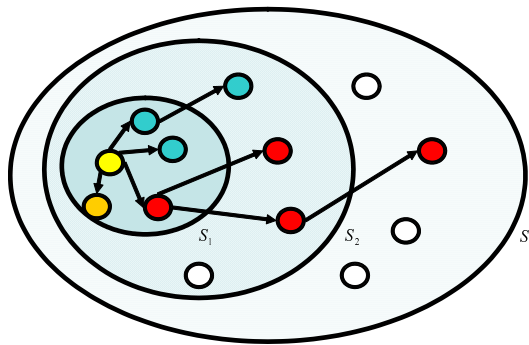
確率によるフラッディング手法は、1 回のフラッディングではネットワーク全体に経路制御情報が伝わらない可能性があるが、複数回フラッディングを行うことによって、伝わる可能性を高めることができる。例えば、あるノードに伝わる確率が 0.5 であったとしても、10 回繰り返すことで  $1 - 0.5^{10} = 0.9991$  となり、99.9% の確率で情報が伝わる。FSLs のようにホップ数に関して近いノードに対しては、同じ経路情報メッセージが複数回到着していることに着目すれば、各ノードにおいて確率的にメッセージの転送を行ったとしても、近隣のノードに対しては経路制御メッセージがほぼ確実に到着する。さらに、FSLs では TTL が大きくなった時の経路制御メッセージの重複を減らすことはできないが、確率的に転送されるのであれば、経路制御メッセージを削除することができると考えられる。

図 12 に、提案手法の動作例を示す。図中において、 $S_1, S_2, S_3$  とラベル付けしている楕円は、TTL を  $S_1, S_2, S_3$  とした時に経路制御情報が伝わる範囲である。図 12(a) は、TTL を  $S_1$  にした時に経路制御メッセージが伝わる様子を示している。FSLs に確率による転送を取り入れた場合、 $S_1$  のすべてのノードに伝わることは保証できないため、 $S_1$  中の残りの



(a) TTL 値  $S_1$  でのフラッディング

(b) TTL 値  $S_2$  でのフラッディング



(c) TTL 値  $S_3$  でのフラッディング

図 12: リンクステート型経路制御方式におけるフラッディングの動作

三ノードに対しては制御メッセージが伝わっていない。図 12(b) は、図 12(a) から一定時間経過し、TTL を  $S_2$  と設定してフラッディングを行っている。この時、図 12(a) で送信した経路制御情報を含めて再度送られるため、 $S_2$  の範囲のノードに伝わる一方で  $S_1$  内のノードに対しても経路制御情報が伝わっている。図 12(c) は TTL を  $S_3$  としてフラッディングを行った時の結果であるが、 $S_1$  および  $S_2$  の範囲のノードの一部に対して新たに情報が伝わっている。このように、フラッディングを行うノードに対して、ホップ数に関して近いノードには高い確率で経路制御情報が伝わりつつ、ホップ数に関して離れたノードに対しても経路制御情報が伝わり、かつ、確率によるフラッディング手法と同様に経路制御メッセージの重複を削減することが期待できる。

このように制御メッセージを確率的に転送する上で重要となるのは  $S_i$  の設定である。TTL

が  $S_1$  で設定される回数が多くなることから,  $S_1$  を大きくすると制御メッセージの重複が頻繁に生じ, その結果制御メッセージの重複数は増加する. 逆に,  $S_1$  を小さくすると, 制御メッセージが伝わる時間が長くなる. 本報告では, 適切な  $S_i$  を設定するために, スケールフリーネットワークのトポロジー特性を利用して TTL を定める. 具体的にはネットワークの出力リンク数の分布を利用し, 次節で述べる導出式を利用して各 TTL 値に対する制御メッセージの重複数を求め, 重複数が急激に増加する直前の TTL 値, すなわち, 重複数が少ない範囲を  $S_1$  に設定する. また, 各 TTL に対する伝達するノード数の導出も行い, 経路制御情報がネットワークの所望の範囲に広がるために必要な TTL を算出し, それに基づいて TTL 系列を定める.

#### 4.2 確率に基づいたパラメータ設定

ネットワークの所望の範囲に経路制御メッセージを広げるために, 本節では, TTL に対する到達ノード数の導出を行う. 導出のために, 以下の表記を導入する.

$V_i$ : 隣接ノードへの制御メッセージの転送が  $i$  回繰り返された時に, 新たに制御メッセージが到着するノード数

$\bar{N}_i$ : 隣接ノードへの制御メッセージの転送が  $i$  回繰り返されるまでに, 制御メッセージが到着したノード数

あるノードから制御メッセージが転送されるリンク数の期待値は, 制御メッセージが送られてきたリンク以外に転送されることから,  $\int (k-1)P(k) dk$  となる. そのため,  $i$  回目の制御メッセージの転送によって新たに制御メッセージが到着するノード数  $V_i$  は,

$$V_i = V_{i-1} \cdot \int (k-1)P(k) dk - \frac{\bar{N}_{i-1}}{N-1} V_{i-1} \int (k-1)P(k) dk \quad (10)$$

ただし,

$$\bar{N}_{i-1} = \sum_{s=0}^{i-1} V_s \quad (11)$$

で与えられる．式 (10) における第一項は， $i$  回目の転送によって制御メッセージが到着するノード数を表す．制御メッセージが転送されるのは，新規に訪問されたノードに対してのみであるリンク数の期待値に  $V_{i-1}$  を乗じている．第二項は， $i$  回目の転送により制御メッセージが到着するノードのうち，既にその制御メッセージが到着しているノード数である．ただし，初期値  $V_0$  は，フラッディングを行う各ノード自身の出力リンク数で与える．初期値が異なるため，ハブノードと非ハブノードでは異なった TTL 値が設定されることになる．なお， $N_0$  には 1 を与える．

### 4.3 計算機シミュレーションによる提案手法の評価

4.1 節では従来の TTL を変更する手法を拡張し，トポロジーの形状を反映した TTL 設定を行う手法を提案した．本節では，スケールフリーネットワークにおいて提案手法を用いた場合の性能をシミュレーションにより明らかにする．まず，単一ノードからの 1 回のフラッディングについて評価を行い，提案手法の振る舞いを確認し，次に単一ノードからの複数回のフラッディング時の各評価指標の結果を示し，提案手法の有効性を評価する．

#### 4.3.1 単一ノードから 1 回フラッディングが発生する場合

図 13 は，ハブノードからフラッディングを行った時の制御メッセージ数の累積を，各フラッディング手法で比較した結果である．また，制御メッセージ数の累積のうち，重複した制御メッセージ数を図 14 に示す．単純フラッディングと確率によるフラッディング手法は，経路制御情報を即時フラッディングするため制御メッセージの伝達が早いことがわかる．提案手法および従来の TTL 設定を行う手法では，一定期間毎に TTL を定めてフラッディングを繰り返すため，時間経過とともに累積制御メッセージ数が増加している．特に，従来の TTL 設定を行う手法を単純フラッディングと比較して制御メッセージ数が増加していることがわかる．これは，従来の TTL 設定を行うフラッディング手法では，近隣のノードに対しては繰り返し同じ制御情報が送られるためである．従来の TTL 設定を行うフラッディング手法は，経路制御情報の更新が頻繁に行われない状況では経路制御情報の集約の利点が少

なくなり単純フラディングよりも制御メッセージ数が増大する。提案手法では、確率的に制御メッセージを転送するため、経路制御情報の集約が行われない場合においても、OSPFと比較して制御メッセージ数が少なくなっている。この傾向は図 14 においても成立し、提案手法では制御メッセージ数を少なく抑えられることがわかる。

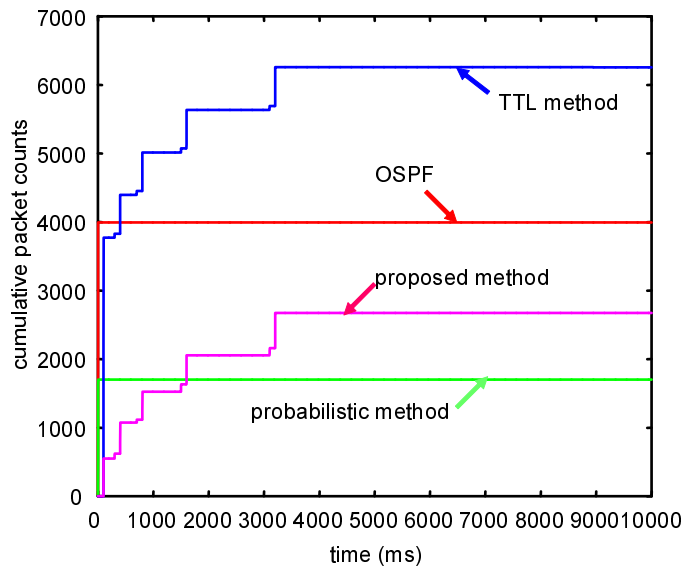


図 13: 提案手法の制御メッセージ量の評価

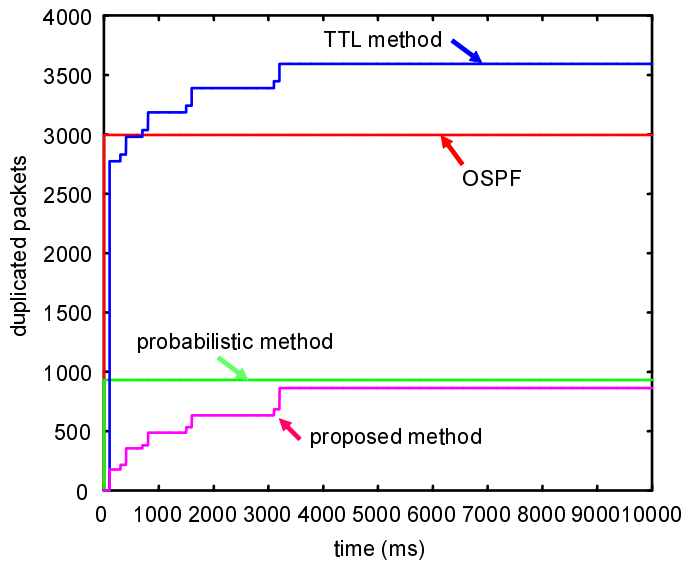


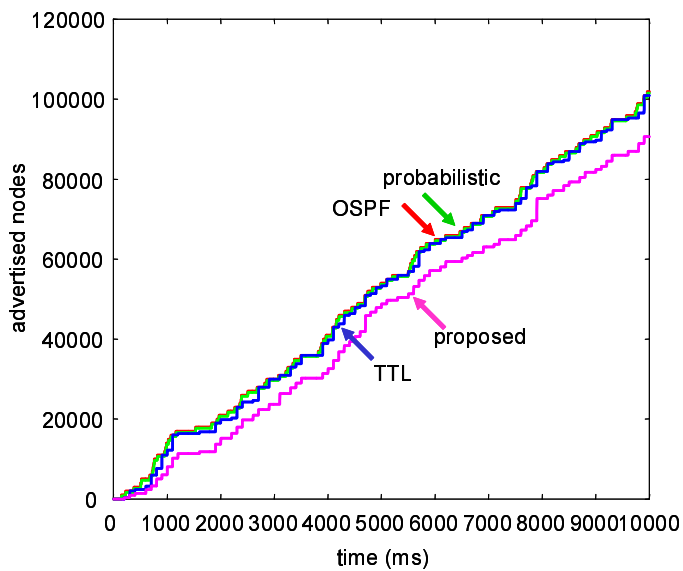
図 14: 提案手法の重複メッセージ数の評価



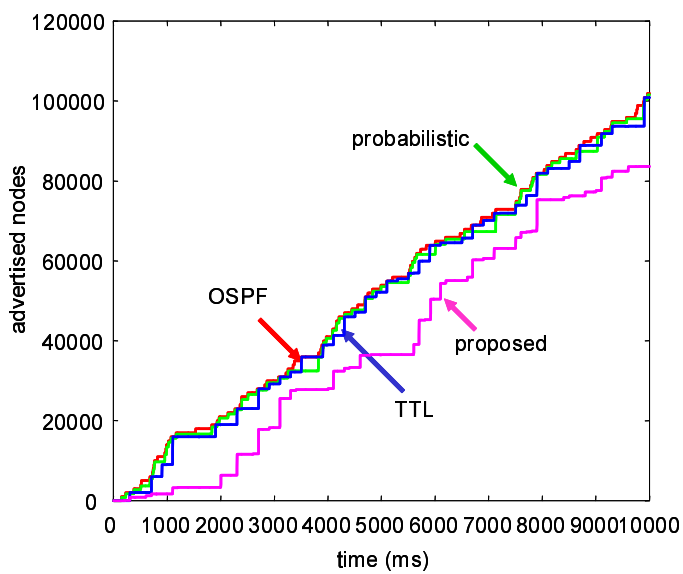
#### 4.3.2 単一ノードから複数回フラッディングが発生する場合

提案手法では時間の経過に伴い制御メッセージの TTL の値を変化させ、また一定期間内に到達した複数個のネットワーク状況変化を集約するなどの処理を行うため、1 回のフラッディングでは全体の性能を評価することができない。この節では提案手法を用いて、単一ノードが複数回のフラッディングを行った場合の伝達率、制御トラフィック量の評価を行った。また、これらの指標に加え、重複メッセージ数の評価結果も示している。

単純フラッディング、確率によるフラッディング手法、FSLs、および、提案手法の 4 つのフラッディング手法に対し、伝達率・制御トラフィック量を求めた結果を図 15 および図 16 に示す。図 16 より、単純フラッディングと提案手法を比較すると、提案手法を用いることによってハブノードにおける制御トラフィック量を 90%削減できる。また、確率による手法および FSLs と比較して、40%削減できていることがわかる。一方、非ハブノードでは、単純フラッディングに比べて 95%削減し、確率による手法および FSLs と比較して 80%削減している。ただし、経路情報が各ノードに伝わる時間は 1sec 程度遅れている (図 15)。次に、重複した制御メッセージ数を図 17 に示す。確率による手法と比較して制御メッセージ数は、ハブノード・非ハブノードともに 1/9 となっている。

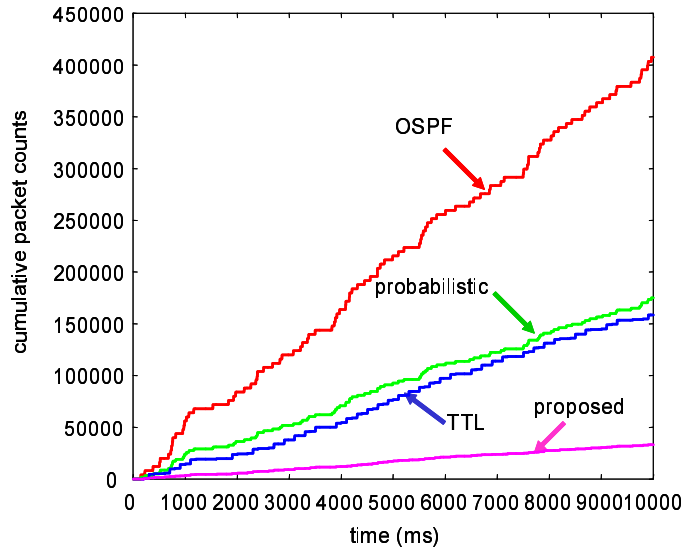


(a) ハブノードからのフラッディング

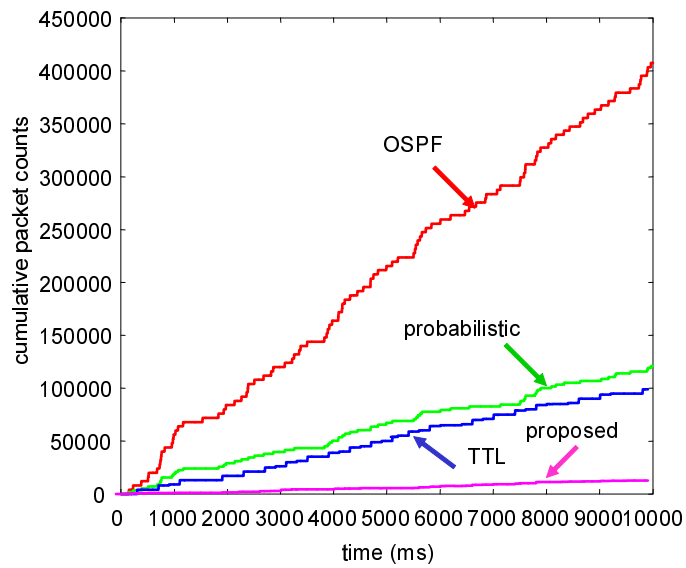


(b) 非ハブノードからのフラッディング

図 15: 各フラッディング手法の比較評価：伝達率

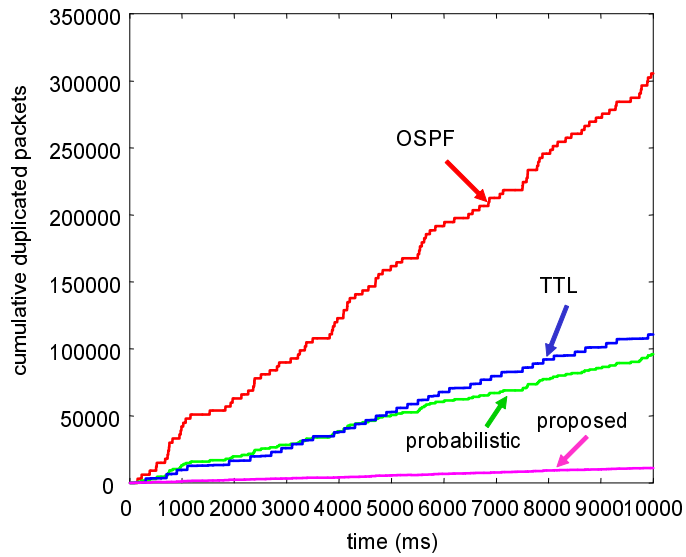


(a) ハブノードからのフラッディング

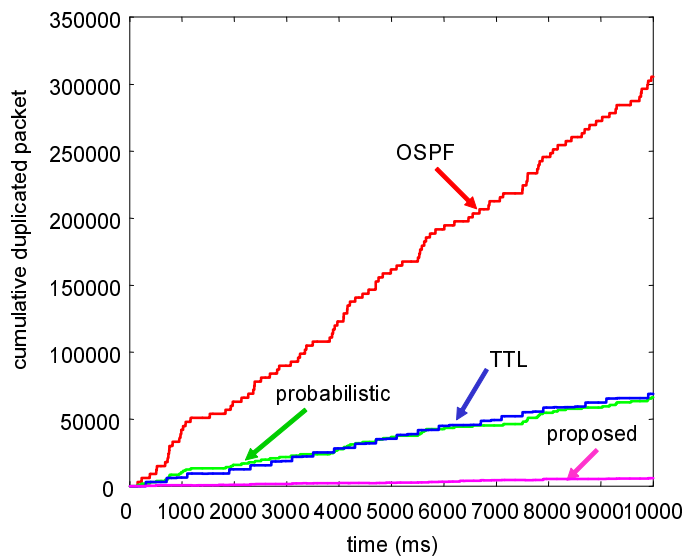


(b) 非ハブノードからのフラッディング

図 16: 各フラッディング手法の比較評価：制御トラフィック量



(a) ハブノードからのフラッディング



(b) 非ハブノードからのフラッディング

図 17: 各フラッディング手法の比較評価：重複した制御メッセージ数

## 5 おわりに

本報告では、まず従来のフラッディング手法をスケールフリーネットワークに適用した時の評価を行った。単純フラッディングの場合、非ハブノードにはほとんど制御メッセージが到着しないものの、ハブノードに多くの制御メッセージが到着することが明らかとなった。また、確率によるフラッディング手法では、浸透理論を用いて導出した転送確率を用いることで制御メッセージの重複が1割改善されることがわかった。本報告では、これらの結果を踏まえ、制御メッセージ数の更なる改善を目指し、新たなフラッディング手法の提案を行った。提案手法では、浸透理論を用いて導出した転送確率よりも低い確率を用いて制御メッセージを転送することで重複を抑えつつ、TTLの設定を変更し近隣のノードに対して複数回フラッディングを行っている。このことにより、近隣ノードには高確率で経路制御情報を伝達し、その一方でホップ数に関して離れたノードに制御メッセージが届く頻度を抑えることが可能となる。シミュレーションによる結果、制御メッセージの重複を95%抑えられることが明らかとなった。

本報告で提案した手法では、ネットワークのすべてのノードに伝える保証はない。その結果、各ノード間で経路の不整合が生じる可能性があり、不整合にともなう影響を明らかにする必要がある。また、本報告では、経路制御情報のフラッディング時の制御メッセージの削減を行っているが、スケーラブルなネットワークを構築するためには、フラッディングによる制御メッセージ量の評価だけでなく最短経路計算量の評価が必要不可欠であり、今後の課題として挙げられる。

## 謝辞

本報告の作成にあたり，ご指導，ご教授いただきました大阪大学サイバーメディアセンターの村田正幸教授に心より感謝を申し上げます．

また，本報告において終始ご指導頂きました大阪大学経済学研究科の荒川伸一助手に深く感謝いたします．

ならびに，日頃からの的確な助言をいただきました大阪大学の宮原秀夫総長，大阪府立看護大学の菅野正嗣助教授，大阪大学サイバーメディアセンターの馬場健一助教授，大阪大学情報科学研究科の若宮直紀助教授，大阪大学情報科学研究科の大崎博之助教授，大阪大学サイバーメディアセンターの長谷川剛助教授，大阪市立大学の阿多信吾講師，通信総合研究所の原井洋明氏に心から感謝いたします．

最後に，日頃から様々な相談に応じていただきました福島行信氏，石田晋也氏，徳隆宏氏をはじめとする村田研究室および宮原研究室の皆様方に心より御礼申し上げます．

## 参考文献

- [1] L. Gao and J. Rexford, “Stable Internet routing without global coordination,” in *Proceedings of ACM SIGMETRICS 2000*, pp. 307–317, June 2000.
- [2] A. Shaikh, C. Isett, A. Greenberg, M. Roughan, and J. Gottlieb, “A case study of OSPF behavior in a large enterprise network,” in *Proceedings of ACM Internet Measurement Workshop*, 2002.
- [3] Y. Rekhter and T. Li, “A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4),” *IETF RFC 1771*, Mar. 1995.
- [4] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the Internet topology,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM '99*, pp. 251–262, Oct. 1999.
- [5] A. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [6] R. Cohen, S. Havlin, and D. Avraham, *Handbook of Graphs and Networks – From the Genome to the Internet*, ch. 4. WILEY-VCH GmbH & Co., 2003. Structural Properties of scale-free networks.
- [7] L. A. Adamic, R. M. Lukose, and B. A. Huberman, “Local search in unstructured networks.” unpublished work, June 2002.
- [8] J. Kleinberg, *Small-World Phenomena and the Dynamics of Information*, ch. 14. MIT Press, 2002.
- [9] R. Guimera, A. Diaz-Guilera, F. Vega-Redondo, A. Cabrales, and A. Arenas, “Optimal network topologies for local search with congestion.” preprint: arXiv: cond-mat/0206410 v2, Oct. 2002.

- [10] G. M. Viswanathan, S. V. Buldyrev, S. Havlln, M. G. E. da Luz, E. P. Raposo, and H. E. Stanley, “Optimizing the success of random searches,” *Nature*, vol. 401, pp. 911–914, Oct. 1999.
- [11] F. Banaei-Kashani and C. Shahabi, “Criticality–based analysis and design of unstructured peer-to-peer networks as ‘complex systems’,” in *Proceedings of Third International Workshop on Global and Peer-to-Peer Computing (GP2PC)*, pp. 22–32, May 2003.
- [12] X.-H. Wang, “Directed random walks on directed percolation clusters,” *Physical Review E*, vol. 67, May 2003.
- [13] C. Santivañz, R. Ramanathan, and I. StavrakakisPablo, “Making link-state routing scale for ad hoc networks,” in *Proceedings of ACM Mobihoc 2001*, pp. 22–32, Oct. 2001.
- [14] D. Stauffer and A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory*. Taylor & Francis Inc., 1994.