

## パワー則の性質を有する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

牧野 暢孝<sup>†</sup> 荒川 伸一<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 大阪大学 大学院経済学研究科 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-7

E-mail: <sup>†</sup>{n-makino,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>arakawa@econ.osaka-u.ac.jp

あらまし インターネットのトポロジー形状がべき乗則に従うことが近年明らかにされている。一方、現在のインターネットにおける経路情報の交換はフラッディングを用いておこなわれており、その結果、ネットワークのノード数の増大とともに経路情報の交換に必要なトラフィック量が増大する。本稿では、経路情報の交換に必要なトラフィック量を削減することでノード数に対するスケールラビリティを高めることを目的とし、べき乗則に従うトポロジー形状の性質を利用したフラッディング手法を提案する。提案手法では、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情報の交換に必要なメッセージ数を削減している。その上で、隣接ノードが定期的に経路情報を交換することにより、制御メッセージ削減のために情報が伝わらないノードにも経路情報を確実に伝える。シミュレーションによりネットワークに発生した制御メッセージ数を評価した結果、提案手法は従来のリンクステート型の経路制御方式に比べて制御メッセージ数を 50% 削減することがわかった。

キーワード フラッディング, 経路制御, パワー則, べき乗則, 浸透理論

## A Flooding Method for Routing Information Exchange in Power-Law Networks

Nobutaka MAKINO<sup>†</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University,  
1-5 Yamadagaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Economics, Osaka University, 1-7 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{n-makino,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>arakawa@econ.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In the Internet, a flooding method is used to exchange routing information. For example, in OSPF (Open Shortest Path First) protocol, each node distributes messages that include link state information to its neighbor nodes, when the link status changes. Each of the neighbor node that receives the link state information again distributes the information to the corresponding neighbor nodes. BGP (Border Gateway Protocol) also uses flooding mechanism to exchange routing information: each node establishes TCP connection to each neighbor node and then transfers the routing table. In either protocol, as the number of nodes increases, the amount of traffic for the routing information becomes large. Furthermore, if a node fails, the flooding starts from all of the neighbor nodes, which causes a sudden traffic congestion in the network. In this paper, we propose an efficient flooding method to reduce the traffic in power-law networks. Our method uses probabilistic flooding where each node relays routing information with a certain probability. Routing information is also exchanged periodically to prevent the information mismatch between nodes. The simulation results show that, compared to the traditional flooding approaches, our method reduces the amount of the traffic by 50 %.

**Key words** flooding, routing, scale-free, power-law, percolation theory

## 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、経路制御に用いる経路情報のトラヒックの増大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伝える場合、その情報伝達が経路に依存しないようフラッディングによる広告が行われる。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そのリンク利用情報を伝え、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情報を配布する。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。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、制御メッセージと呼ぶ）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 (Power-Law) に従うことが示されている [3]。べき乗則に従うネットワーク（以降、Power-Law 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 [4], [5]。文献 [5] 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性質を持つことが示されている。また、最近ではリンク数がべき乗則に従う性質を持つスケールフリーネットワークの研究が活発に行われており、トポロジー特性の理論的検討も行われている [4]。

Power-Law 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 [6]。しかし、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、制御メッセージ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。

本稿では、まず Power-Law ネットワークにおいて従来のフラッディング手法を適用した際の制御メッセージ数の特性を評価する。シミュレーションにより評価を行った結果、従来のフラッディング手法では、ハブノードに到着する制御メッセージ数が非ハブノードに到着する制御メッセージ数に比べて大幅に増大することを示す。次に、フラッディング時の制御メッセージ数を削減するために、Power-Law ネットワークのトポロジー特性を利用したフラッディング手法を提案する。提案手法では、隣接ノードに経路情報を中継する際には確率に基づいて中継を行うことでネットワーク全体に流れる制御メッセージ数を削減しつつ、隣接ノード間で定期的に情報交換を行うことにより全

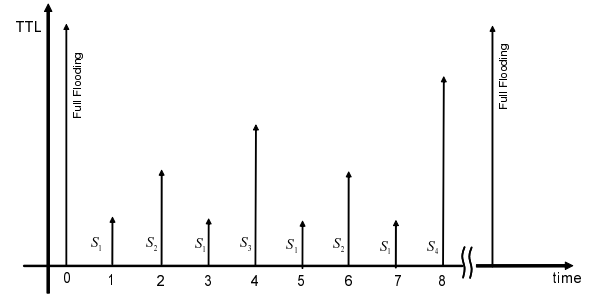


図 1 FLSL における TTL 設定

ノードに経路情報を伝えるフラッディング手法を提案する。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 章では、従来のフラッディング手法の概略を述べる。3 章では、OSPF のフラッディング手法を Power-Law ネットワークに適用した際の制御メッセージ数を評価し、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、Power-Law ネットワークのトポロジー特性に基づいたフラッディング手法を提案する。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 5 章で示し、最後にまとめと今後の課題を 6 章で述べる。

## 2. 関連研究

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 [6] ~ [11]。文献 [11] 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する FLSL (Fussy Sighted Link State) が提案されている。図 1 に各時刻に対して FLSL が設定する TTL 値を示す。FLSL では、フラッディングを行う間隔を定め（その間隔を  $t$  とする）、各  $S_i$  に対して時刻  $2^{(i-1)} \cdot t$  毎に TTL を  $S_i$  に設定する。このように TTL を設定することで、FLSL はリンク利用状況に更新のあったノードの近隣に対しては短い間隔で情報を伝達する一方で、ホップ数に関して離れたノードに対しては情報伝達の間隔を大きくする。リンク利用状況の更新が複数回発生すると、情報を集約してフラッディングを行うことで制御メッセージ数を削減している。FLSL では、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、文献 [11] 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、Power-Law ネットワークに適用した際の制御メッセージ数の特性は明らかになっていない。

一方 [7], [8], [10] 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、Power-Law 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似た問題である．P2P ネットワークを想定したフラディング手法では，求める情報が得られればすべてのノードにクエリーが届く必要はない．このような観点に基づき，浸透理論 [5] を利用してクエリーを確率的に中継することでメッセージの数を削減しつつ，多くのノードに伝える手法が提案されている [10]．しかし経路制御のための情報の配布を行う際には，最終的にすべてのノードへ情報を伝える必要がある．情報が伝わらないノードがあると，各ノード間で経路の不整合が生じる可能性があり，これにより経路が収束しないなどの問題が生じる．

### 3. Power-Law ネットワークにおける単純フラディング手法の評価

1章に述べたように，Power-Law 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 [4], [5]．本章では，このような特徴を持つ Power-Law ネットワークにおいてフラディングを行った際の制御メッセージ数の評価を行い，情報が送られてきたノードを除いた全ての隣接ノードに情報を伝達する単純フラディング手法の問題点を示す．

#### 3.1 シミュレーションモデル

ネットワークモデルとして，Power-Law ネットワークのトポロジモデルである BA モデル [4] に従い生成した 1000 ノードのトポロジーを用いる．BA モデルの初期ノード数  $m_0$ ，ノードあたりの追加リンク数  $m$  はそれぞれ 2 とした．各リンクの伝搬遅延時間は 1ms としている．また，制御パケット以外の通信トラヒックはないものとする．各ノードでは FIFO キューに基づいたパケット処理を行い，その処理能力は 1 Mpps としている．このモデルに対し，リンク障害およびノード障害を想定したフラディングを行い，ネットワークに生じた制御パケット数の評価を行う．

#### 3.2 単一ノードからのフラディング

図 2 に，ハブノードに隣接するリンクの一つでリンク障害が発生した時に，ネットワークの各ノードが受信した制御メッセージ数の累積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．

#### 3.3 複数ノードからのフラディング

次に，ハブノードに障害が発生した時にネットワークの各ノードが受信した制御メッセージの累積を時間に対して求めた結果を図 3 に示す．図 2 と同様に出線数の小さいノードでは制御メッセージ数は少ないものの，出線数が大きいノードでは図 2 と比較して更に多くの制御メッセージが流れていることがわかる．これは，ハブノードに障害が発生すると，ハブノードの各隣接ノードからフラディングが行われ，複数箇所でも同時にフラディングが行われるためである．ネットワークの規模が

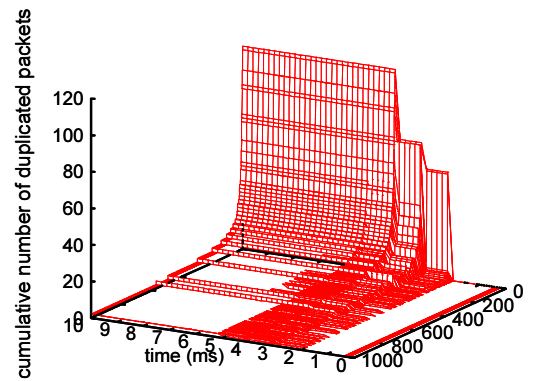


図 2 単一リンク障害時の重複メッセージ数: ノード数 1000, ハブノードの隣接リンクに障害が発生した場合

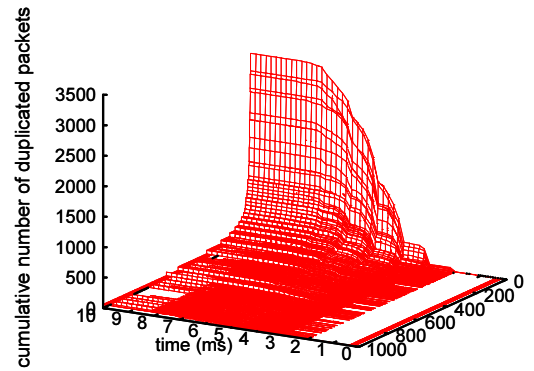


図 3 単一ノード障害時の重複メッセージ数: ノード数 1000, ハブノードに障害が発生した場合

大きくなるとともに，複数箇所でも同時にフラディングが行われる可能性が高くなることから，大規模なネットワークではハブノードにおいて輻輳が生じる可能性も高くなると言える．

## 4. 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，さらにリンクの利用状況が短時間で変動する場合には複数の情報を集約することで，ネットワーク全体に流れる制御メッセージ数を削減することができる．しかし，利用状況の更新が複数のノードで発生すると経路情報を集約することができない．また，非ハブノードからのフラディングに対しては，時間経過とともに TTL を大きくするため情報が伝わるまでの時間が長くなる問題がある．一方，確率によるフラディング手法は，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．

確率によるフラディング手法の問題点を解決するために，本稿では以下の三つの手法を組み合わせたフラディング手法

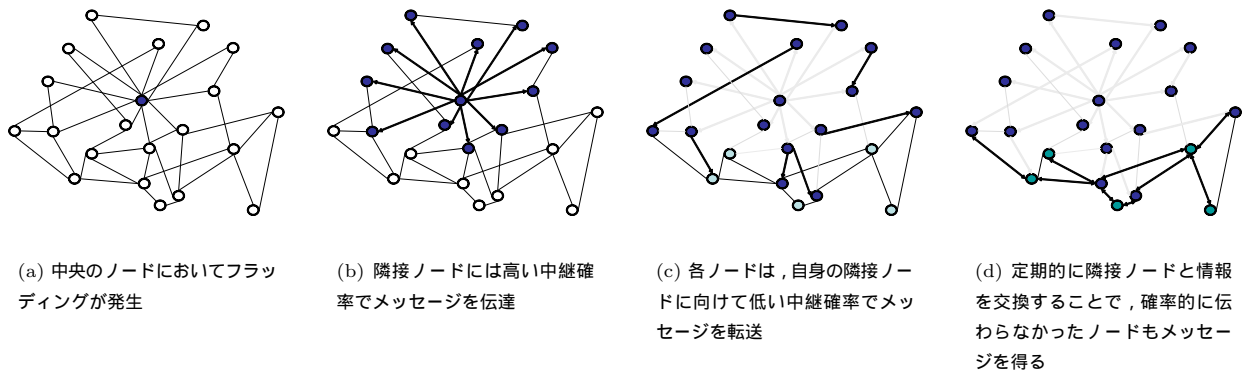


図 4 提案手法に基づくフラッディングの動作

を提案する．

- i) 確率によりネットワーク全体に流れる制御メッセージ数を削減する．
- ii) すべてのノードに経路情報が伝わることを保証するために、隣接ノード間が定期的に情報交換を行う．
- iii) さらに、隣接ノードへの中継確率を変動させることで出線数の小さいノードからの情報伝達率を高める．

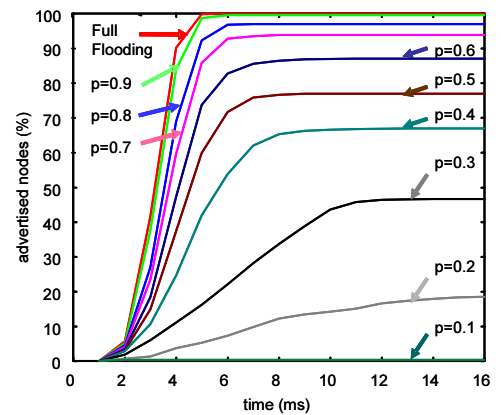
制御メッセージを確率的に中継する際に重要となるのは中継確率の決定方法であるが、これは次節で述べる．

図 4 に提案手法の動作例を示す．中央のノードにおいてフラッディングが発生した時に (図 4(a)), まず高い中継確率で隣接ノードにメッセージを送信する (図 4(b))．その後図 4(c) のように、情報を受け取ったノードは自身の隣接ノードに向けて中継確率を下げメッセージを転送する．確率によるフラッディングではすべてのノードに伝わる事が保証できないため、例えば図 4(c) のようにいくつかのノードに情報が伝わらないことがある．そこで図 4(d) のようにノード同士が隣接ノードとメッセージを交換することで、確率に基づいたフラッディングでは伝わらなかったノードに情報を伝達する．

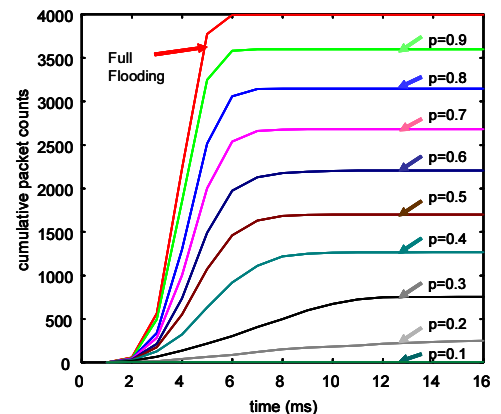
#### 4.1 中継確率の設定方法

文献 [5] では浸透理論に基づいてほぼ全てのノードに伝えるための中継確率を与えている．ここで、3 章におけるネットワークモデルに対して、中継確率  $p$  を与えた時の情報が伝わる割合 (情報伝達率) と制御メッセージ数の関係を図 5 に示す．シミュレーションに用いたトポロジーの  $\gamma$  は 2.39, 最大出線数  $K$  は 53 であることから、文献 [5] の浸透理論により導出される確率  $p_c$  は 0.9 となる．この結果と図 5 を見比べると、中継確率を 0.9 に設定することでほぼ全てのノードに伝わっていることがわかる．その一方で、制御メッセージの削減量はおよそ 10% から 15% 程度である．

しかしながら、確実に全てのノードに情報を伝えるためには、隣接ノードによる定期的な情報交換が必要不可欠であることを考えると、中継確率として  $p_c$  を与える必要はない．中継確率を  $p_c$  より低く抑えることで制御メッセージの削減が期待できる．そこで提案手法において、確率によるフラッディングでは



(a) 中継確率と伝達率の関係



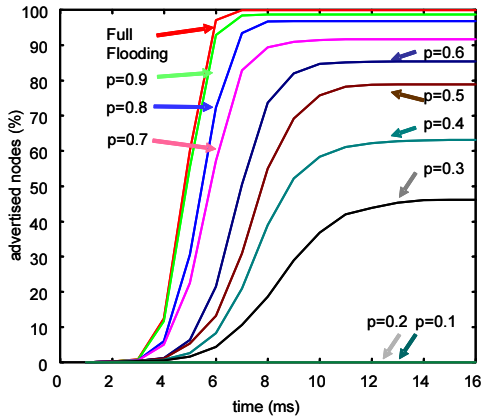
(b) 中継確率と制御メッセージ数の関係

図 5 確率によるフラッディング手法：ハブノードからのフラッディング

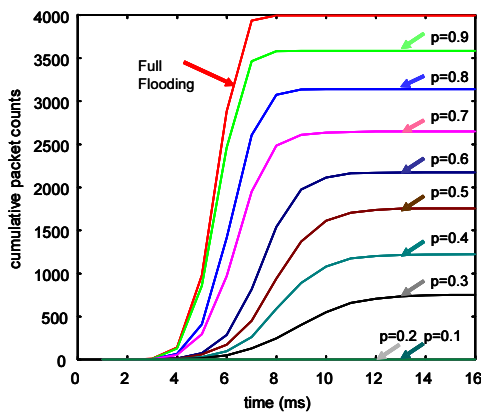
85~90%のノードに伝達することを想定し、中継確率は 0.6 としている．

#### 4.2 非ハブノードからのフラッディング

前節のように中継確率を低く与えた時に問題となるのが、非ハブノードを起点とするフラッディングである．図 6(a) に非ハブノードを起点とするフラッディングを行った時の情報伝達



(a) 中継確率と伝達率の関係



(b) 中継確率と制御メッセージ数の関係

図 6 確率によるフラッディング手法：非ハブノードからのフラッディング

率と制御メッセージ数を示す．図に示されるように，中継確率を  $p_c (= 0.9)$  で与えた場合でもネットワーク全体に情報が伝わらないことがある．そこで提案手法では，中継確率を段階的に設定する．中継確率を  $p_1$  と  $p_2$  の二つ設定し， $p_1$  はフラッディングを開始するノードから隣接ノードへの中継確率とし， $p_2$  はフラッディングの起点となるノードから隣接ノードに伝わった後，それらの隣接ノードが次の隣接ノードへ中継する確率とし，前節で述べたように  $0.6$  とする．本稿では，非ハブノードを起点とするフラッディングにおいても情報が広く伝わるように  $p_1$  を  $1.0$  と設定し，隣接リンクの利用状況に変化があったノードの隣接ノードには必ずその情報を伝えるものとしている．

## 5. 提案手法の評価

4章では，確率を用いることで制御メッセージ数を削減しつつ，各ノードが定期的に隣接ノードと情報交換を行うことで，すべてのノードに情報が伝わることを保証したフラッディング手法を提案した．本章では，提案手法を Power-Law ネットワークに適用した際の有効性をシミュレーションにより評価する．

ネットワークモデルは，3章で用いた BA モデルで生成した

1000 ノードを用いる．また比較する従来手法として，すべての隣接ノードに情報を伝播する単純フラッディング手法，浸透理論に基づいて確率を定める確率フラッディング手法，および，FSLs に基づくフラッディング手法を用いた．確率フラッディング手法では，4章に述べたように，シミュレーションに用いたトポロジーの  $\gamma$  は  $2.39$ ，カットオフ  $K$  は  $53$  であることから中継確率  $p_c$  を  $0.9$  としている．また，FSLs では  $S_i = i$  ( $1 \leq i \leq 7$ )，TTL を変更する間隔を  $1$  秒としている．

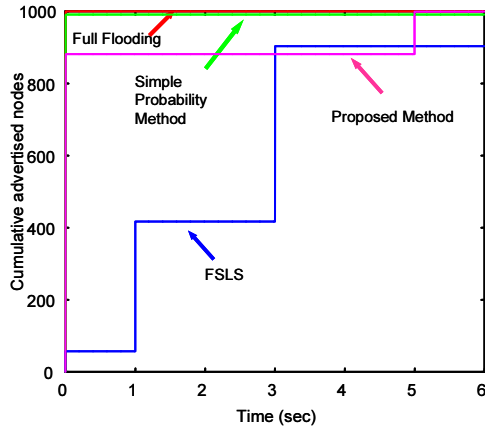
図 7(a) は，ハブノードからフラッディングを行った時の情報が伝わったノード数を，各フラッディング手法に対して求めた結果である．また，図 7(b) には制御メッセージ数の累積を示している．これらの図を見ると，単純フラッディングと確率フラッディングでは，情報がネットワークの各ノードに伝わるまでの時間は短いものの，制御メッセージの数がほとんど削減できていないことがわかる．一方，提案手法では，確率によるフラッディングでは伝わるノード数が  $80\%$  程度であるものの，制御メッセージを約  $60\%$  削減している．提案手法において確率によるフラッディングで情報が伝わらなかったノードに対しては，一定時間（ここでは  $5$  秒）後に隣接ノード間で情報交換を行うことによって全てのノードに情報が伝わっている．FSLs では，初期 TTL が小さいため情報の伝達が遅れ，かつ，繰り返しフラッディングを行うことから制御メッセージ数の累積は提案手法よりも大きくなっている．

次に，複数のノードがランダムにフラッディングを行う場合の情報伝達率とネットワークに生じる制御メッセージ数の結果を図 8 に示す．ここでは，ネットワークに対して平均  $1$  秒間に  $1$  回のポアソン到着でフラッディングが発生するものとしている．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，ネットワーク全体の制御メッセージ数は，単純フラッディングと比較して  $50\%$  削減している．また，確率フラッディングと比較すると  $40\%$  削減していることがわかる．

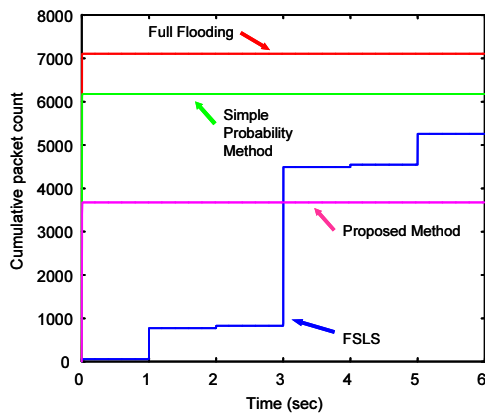
## 6. まとめ

本稿では，Power-Law ネットワークを対象として，経路情報交換時の制御メッセージを削減するフラッディング手法を提案した．提案手法では，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，各ノードが定期的に隣接ノードと経路情報を交換することでネットワークの全てのノードにも情報が伝わることを保証している．また，定期的に隣接ノードと経路情報を交換することを利用し，従来の浸透理論を用いて導出した中継確率よりも低い中継確率を用いている．シミュレーションの結果，提案手法の制御メッセージ数は，単純フラッディング手法と比較して  $50\%$ ，浸透理論に基づく手法と比較して  $40\%$  削減されることが明らかとなった．

今後の課題としては，提案手法の中継確率は，シミュレーションの結果に基づいて決定しているが，この確率を理論的に導出することが挙げられる．また，本稿で提案した手法では，時間が経過することでネットワークのすべてのノードに伝えることはできるが，情報がネットワークを伝播中に経路の不整合が生じる可能性があり，不整合により生じる通信トラヒックへ



(a) 情報が伝わったノード数



(b) 制御メッセージ数の累積

図 7 提案手法の制御メッセージ数の評価

の影響を明らかにする必要がある。さらに近年は、本稿で用いた BA モデル以外の Power-Law ネットワークの生成モデルも提案されており、BA モデルによるトポロジーはインターネットのトポロジー特性を反映していないという指摘もある [12]。今後、異なるネットワークモデルに対しても評価を行うなど、評価対象を広げていく予定である。

#### 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.

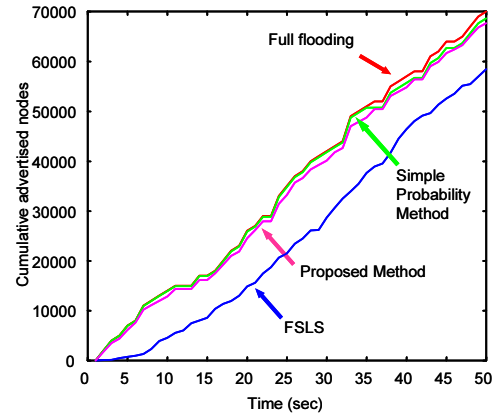
[2] A. Shaikh, C. Isett, A. Greenberg, M. Roughan, and J. Gottlieb, “A case study of OSPF behavior in a large enterprise network,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop (IMW)*, pp. 217–230, November 2002.

[3] 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.

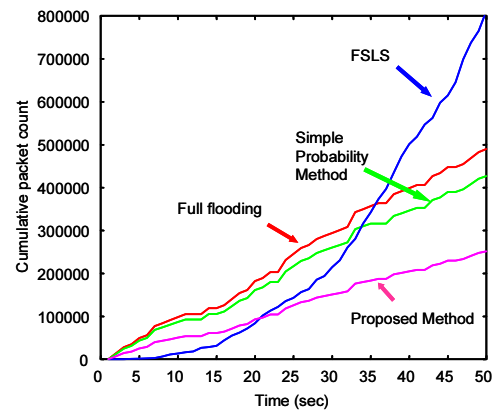
[4] A. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.

[5] R. Cohen, S. Havlin, and D. Avraham, *Handbook of Graphs and Networks – From the Genome to the Internet*. WILEY-VCH GmbH & Co., 2003. Structural Properties of scale-free networks.

[6] L. A. Adamic, R. M. Lukose, and B. A. Huberman, “Local



(a) 情報が伝わったノード数



(b) 制御メッセージ数の累積

図 8 提案手法を用いたフラッディングを複数のノードが行った場合の評価

search in unstructured networks.” unpublished work, June 2002.

[7] R. Guimerà, A. Díaz-Guilera, F. Vega-Redondo, A. Cabrales, and A. Arenas, “Optimal network topologies for local search with congestion,” *Physical Review Letters*, vol. 89, 248701, Dec. 2002.

[8] 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.

[9] X.-H. Wang, “Directed random walks on directed percolation clusters,” *Physical Review E*, vol. 67, 050101, May 2003.

[10] 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.

[11] C. Santivañez, 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.

[12] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, “A first-principles approach to understanding the internet’s router-level topology,” in *Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pp. 3–14, ACM Press, 2004.