

研究ノート

ハブ回避ルーティングによる輻輳抑制

徳本文香*・森口一郎**

現実ネットワークでの輻輳抑制のため、隣接ノードのリンク数をコストとして組み込んだハブ回避ルーティングでIP通信を模した通信シミュレーションを行った。ネットワークには、インターネットに似た構造を持つスケールフリーネットワークの1つBarabási-Albertモデル (BA)、比較対象としてランダムネットワーク (RN)、無線アドホックネットワークの構造モデルであるランダムジオメトリックネットワーク (RGN) を使用した。その結果、最短経路と比べBA、RNに関してはリンク数をコストとするとハブ回避ルーティングの方が輻輳を抑制でき到達率も高くなることがわかった。特にBAに対してこの効果は顕著であった。一方、RGNでは輻輳抑制効果が全くなかった。これはRGNでの輻輳発生原因がリンク数の多いハブノードではなく、ネットワークとネットワークを繋ぐ間のノードで起きているためだと考えられる。

キーワード：ハブ回避、スケールフリーネットワーク、ルーティング、輻輳、IP

Congestion Control by Hub Avoidance Routing

Ayaka TOKUMOTO** and Ichirou MORIGUCHI*

To control congestion in information networks, we performed IP packet traffic simulations using the hub avoidance routing which incorporates the number of adjacent nodes as costs. In these simulations three sample networks were adopted: Barabási-Albert model (BA) which is one of Scale-Free networks having the similar structural properties to those of the Internet, Random Network (RN) (as a homogeneous structure network), and Random Geometric Networks (RGN) as a structural model for wireless ad-hoc network. In comparison with the case of the shortest path routing, the hub avoidance routing for BA and RN was found to be more effective on a traffic congestion control, and had higher packet reachability for destination nodes. Especially the result for BA was remarkable. In the case of RGN, however, this method had not any congestion suppression effect at all. This would be considered that the cause of congestion in RGN is not on hub nodes but on bridge nodes that connect small network islands.

Key words: hub avoidance, Scale-Free networks, routing, congestion, IP

*東京情報大学 総合情報学部
現 東京コンピュータサービス株式会社
Faculty of Informatics, Tokyo University of Information Sciences
TOKYO COMPUTER SERVICE CO., LTD.

**東京情報大学 総合情報学部
Faculty of Informatics, Tokyo University of Information Sciences

2016年10月10日受付
2017年1月12日受理

1. はじめに

現実ネットワークでは、通信中に輻輳が発生しやすいという問題があることが過去の研究からわかっている。その輻輳の起こる原因の一つとして、スケールフリー性のあるネットワークにはパケットを送受信しているノード間にリンク数を多く持つハブノードがあり、このハブにトラフィックが集中してパケットの処理ができず破棄や遅延が起こりやすくなるからである[1]。

輻輳抑制の研究として、平均リンク数を多くする手法[1]やバッファサイズを変更する手法[2]などが過去に研究されている。また、効果的な理論としてはハブノードを考慮した手法[3]があるが、現実的な通信シミュレーションではない上に、正しいルーティングができない問題点がある。

本研究ではその問題を解決するため、ハブノードの隣接ノードから見て、次にパケットを渡すノードを決めるコスト計算にハブノードを考慮した手法[3]を応用し、ルーティングテーブルを作成した。このルーティングでは各ノードにリンク数の多いノードほどコストがかかるようにコスト計算し、経路探索時にそのコストを加え、最終的にコストの低いノードにパケットを送信するルーティングを行う。

実際のネットワークは常に変化し、どのような構造をしているのか把握することができないため、本研究では仮想マシン上でIP通信を想定したネットワーク構造を擬似的に再現し、通信シミュレーションを行い、各モデルの輻輳がハブ回避ルーティングでどの程度輻輳を抑制できるか調べた。使用するネットワークとしては、生成の容易なバラバシ＝アルバートモデル(BA)[4]をハブノードが存在するスケールフリーネットワークとして使用し、ハブノードの影響比較用としてランダムネットワーク(RN)[5]を使用した。また、アクセスポイントを必要としない無線ネットワークであるアドホック

ネットワークの構造モデルとしてはランダムジオメトリックネットワーク(RGN)[1]を用いた。

その結果、スケールフリー性のあるBA、多少のハブノードを持つRNではリンク数の1乗をコストに組み込むと、輻輳閾値（輻輳が発生し始めるパケット発生率）と到達率の両方がともに向上したが、RGNではその変化がなかった。これはRGNの輻輳がBAやRNのようにハブノードではなく、ネットワーク同士を繋ぐ間のノードで輻輳が起こっているためだと考えられる。

2. シミュレーション方法

通信シミュレーションを行うには、ネットワークの構造がどのようになっているのかを事前に把握しておくことが必要である。しかし、現実の情報ネットワークは常にネットワークの構造は変化しているため現実ネットワークと全く同一の構造でのシミュレーションは不可能である。そのため、本研究では仮想ネットワーク上で擬似的に通信シミュレーションを行った。

2.1 シミュレーションの概要

情報通信ネットワークの特徴を持つネットワークモデルを作成し、その上でルーティング、通信シミュレーションを行った。

本研究ではパケットがどのように移動し破棄されて輻輳が起こるかが重要なので再送のみを考慮し、パケットの情報としては発信ノード、宛先ノード、現在地ノード、再送要求可能回数を、そして各ノードには受信可能バッファ数とパケットのキュー処理能力数を必要な情報として持たせた。パケットの送受信では作成したルーティング情報を元に、1ノード1ターンあたりのパケット発生率を変化させながらパケットを発生、移動させた。これらのパケットの到達率からそれぞれのネットワークモデルで初めて輻輳の発生したパケット発生率を輻輳閾値として求める。

2.2 使用するネットワークモデル

現実のネットワークを使用しているシミュレーションは不可能なため、情報通信ネットワークの特徴を持つモデルを使用し擬似的にネットワークを作成した。着目すべきネットワークの性質としては、ごく一部のノードが多く他のノードとリンクを張るスケールフリー性、任意の2つのノードが数ホップで繋がっているスモールワールド性、繋がりが緊密で三角形のリンク構造を多く持つクラスター性がある。

本研究ではリンク数の多いノード（ハブノード）が存在しやすいスケールフリー性のあるネットワークにBAを使用した。また、スモールワールド性のあるRN、クラスター性のあるRGNを輻輳抑制の比較対象とした。それぞれのネットワークモデルの作成方法は過去の研究[1]を参考にした。

ここで、バラバシ＝アルバートモデル（BA）とはスケールフリー性を持ち、現実の通信ネットワークに近い構造をしている。BAでは新規ノードがすでにネットワークを構成しているノードとリンクする際、リンクを多く持つノードほどリンクを張る確率が高くなるためハブノードができやすくなる。そのためBAのあるノードがリンクを k 本持つ確率 $P(k)$ は以下の式のようにリンク数 k 本の -3 乗に比例する。

$$P(k) \propto k^{-3} \quad (1)$$

一方、ランダムネットワーク（RN）とはランダムにノードを2つ選び、1ノードあたりの平均リンク数分を満たすまでリンクを張って作成されるスモールワールド性のあるネットワークである。RNはランダムにリンクしているためBAほど極端にリンク数の多いノードはないが、平均リンク数 $\langle k \rangle$ よりリンク数を多く持つノードもある。また、あるノードがリンク数 k 本を持つ確率 $P(k)$ は以下の式のような二項分布になる。

$$P(k) = {}_{N-1}C_k p^k (1-p)^{N-1-k} \quad (2)$$

式(2)の N は全ノード数、 p はリンクを繋ぐ確率、 ${}_{N-1}C_k$ は自身のノードを除く全てのノードからリンクを張る k 個のノードを選択する組み合わせ式である。

最後に、ランダムジオメトリックネットワーク（RGN）はアドホックネットワークの構造モデルの1つで、アドホックネットワークはアクセスポイントを経由しないで2つのノードが通信可能な範囲半径 r 内に存在すればリンクを張る、クラスター性のある無線ネットワークである。また、指定したノード数と平均リンク数によって各ノードの電波到達範囲が決まる。RGNは正方形のフィールドの中にランダムにノードを配置し、1ノードあたりのリンク数を考慮した電波到達範囲を求め、2つのノードが通信可能な範囲半径 r 内に存在すればリンクを張る。

また、周期的境界条件を適用し、正方形のフィールドの端に配置されたノードの電波到達範囲によるリンク数の差がでないようにした。このRGNのあるノードがリンク数 k 本を持つ確率 $P(k)$ はRNと全く同じ二項分布(2)式で表せる。ただし、 p^k はあるノードの通信可能距離内に他のノードが k 個配置される確率を、 $(1-p)^{N-1-k}$ は配置されない確率を示し、 ${}_{N-1}C_k$ は着目したノード以外の全てのノードから k 個のノードを選択する組み合わせ式である。

全ノードのうち、ほとんどの任意の2ノードが他ノードを経由してリンクで繋がっている場合、その繋がったネットワークを「ジャイアントネットワーク」と呼ぶ。BAはもともと全てが繋がったネットワークであり、RNは平均リンクが1以上[6]、RGNは平均リンク数が4.52以上[7]であればほとんどのノードがリンクしている上述のジャイアントネットワークが発生することがわかっている。そのため、本研究ではネットワーク例として図示する場合を除き、全てのシミュレーションを平均リンク数6のネットワーク上で行った。

2.3 ルーティング方法

本研究では途中で構造が変化しないネットワークを使用し、最短経路とハブ回避ルートを取得したあとに通信シミュレーションを行った。

まず作成したネットワークモデルから最短経路の情報を取得するのにノード間のホップ数を調べる必要があるため、ブロードキャストサーチを使用した。このブロードキャストサーチとは、ある1つのノードを始点ノードとしてその始点ノードからリンクする全てのノードにむけてリンクを辿り、各ノードに対する最短ホップ数を調べる手法である。

ハブ回避ルーティングは、あるノードにパケットがあるとき、そのノードの隣接ノードへのコストを考慮し、ブロードキャストするとき加算してリンク数の多いノードを避けるルーティング手法である。

コスト計算する際、どのようにリンク数を考慮すればいいか調べるため、各ノードのリンク数 k_i を α 乗した値と、ホップ数を考慮するために、あるノードから隣接ノード分の1ホップを加え、より値の低い方が次のノードにパケットを送る。よって、現在パケットが存在しているノードから、その隣接ノード i へのコストは以下の式のように書ける。

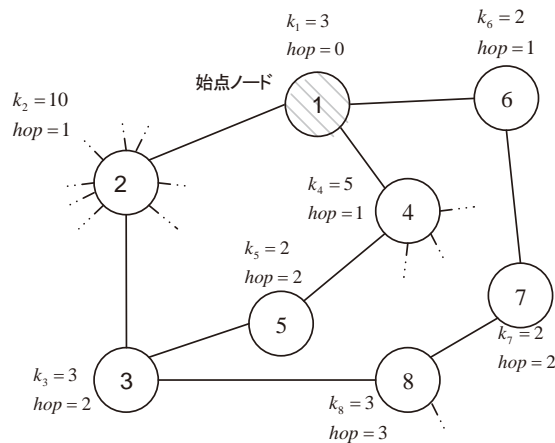


図1 ハブ回避ルーティング説明用ネットワーク

丸：ノード番号 線：リンク k_i = 各ノードのリンク数
hop = 始点ノードからのホップ数

$$C_i = 1 + k_i^\alpha \quad (3)$$

ここで α の値が-1, 0, 1, 2...と変化すると、リンク数の多いノードほどコストが高くなり、ルートに選ばれにくくなる。例えば、図1のネットワークで始点ノード1から目的ノード3への最短経路はホップ数より、 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ となるが、 α を考慮すると経路が変更される。コス

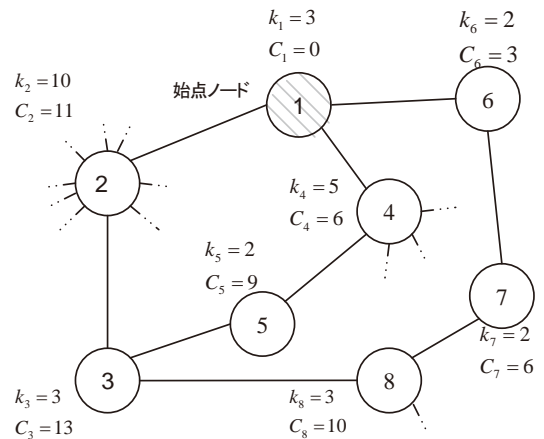


図2 ノード1から各ノードへのコスト計算結果 ($\alpha=1$)

丸：ノード番号 線：リンク

k_i = 各ノードのリンク数 C_i = コスト計算結果

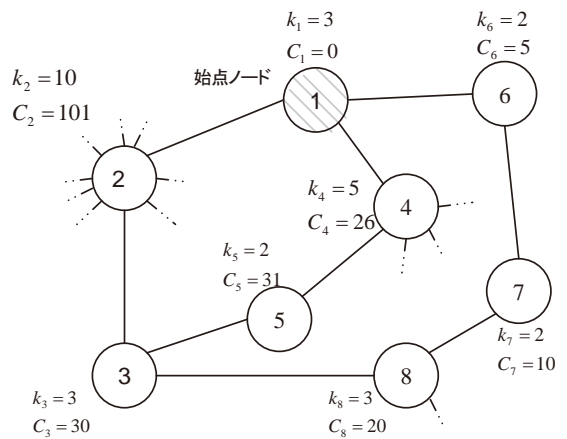


図3 ノード1から各ノードへのコスト計算結果 ($\alpha=2$)

丸：ノード番号 線：リンク

k_i = 各ノードのリンク数 C_i = コスト計算結果

トの取得方法は、まず隣接ノードにコスト計算式から求めた結果をノードの情報とする。そのノードから更に隣接ノードのコストを加え、ノードの情報に入っているコストと比較し値の低いほうを新しいコストとする。もし、コスト計算の結果、同コストの経路が複数存在した場合、最短経路と同じくランダムに1つを選択する。

例えば $\alpha = 1$ の場合、始点ノードを1とした各ノードのコスト計算方法は、始点ノードをコスト0として、ノード1の隣接ノード2は10本リンクを持っているため $1 + 10^1$ となりコストは11となる。ノード4は5本リンクを持っているためコスト6、ノード6は2本リンクを持っているためコスト3となる。次にノード2から隣接ノードにブロードキャストすると、ノード1はコスト4となるが既にコスト0が入っているため処理は行わず、ノード3はノード2のコスト11とノード3のコスト4を足してコストは15となる。同様にノード4、6でも各ノードのコストを求め繰り返すとノード5の隣接ノードのコストを求めた際、コストが9なのでノード3のコストが13になる。これは、ノード2からのブロードキャストしたコストよりも低いため、ノード3のコストは新しく13となる。つまり、ノード3へはノード2、5、8からルーティングできるが、ホップ数にかかわらずコストの値が低いノード5が選択される。

ブロードキャストで始点ノードからリンクする全てのノードにコストを求め、経路の取得のため目的ノードから始点ノードまでより値の低い方へ二次元配列にノードを格納すると、 $\alpha = 1$ ではノード $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ という経路になり、 $\alpha = 2$ では $1 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3$ という経路になる (図2、3)。これを最短経路の時と同じように始点ノードを変えて繰り返し、経路表を作成し、各ネットワークモデルで到達率を求めた。

また、最短経路手法 ($\alpha = 0$) よりも輻輳抑制できる α の値を求めた後、 k_i^α に重み β をか

け、同様にルーティングテーブルを作成し、更に詳しいリンクコストを求める。

$$C_i = 1 + \beta k_i^\alpha \quad (4)$$

(4) 式より α がどんな値であっても $\beta = 0$ の場合はホップ数のみ考慮されコストは最短経路になる。そのため β の範囲は $0 < \beta$ とし、最も輻輳を抑制できる α と β の最適値を求める。ここで、(4) 式で $\alpha = 0$ の場合は全ての1ホップのコストを $1 + \beta$ に固定されるため、結果として得られる経路やシミュレーション結果は最短経路手法の場合と一致する。

2.4 通信シミュレーション

通信シミュレーションはターン制で行い、パケット発生処理、パケット移動処理、パケット破棄処理、パケット再送要求処理を1ターンとした。十分にパケットを移動させるため、これを10,000ターン繰り返し時間発展させた。また、比較のため過去の研究と同じように、各ノードの1ターンに受信可能な受信バッファ数を5、キュー処理能力数を2とした[1]。1ターン1ノードあたりのパケット発生率は0.001から1.000まで0.001ずつ増加させ、初めて到達率が1未満になったとき輻輳が発生したと判断し、その発生率を輻輳閾値とした。

2.4.1 パケットの発生処理

各ターンのはじめに、パケット発生数を満たすまでランダムに発信ノードと宛先ノードを選択する。このとき発信ノードと宛先ノードが同一ノードではなく、両ノードがジャイアントネットワークに属している場合に発信ノードにパケットを発生させる (図4)。

1ターンでのパケット発生数は、1ノード1ターンあたりの [パケット発生率] \times [ノード数] とする。しかし、パケット発生率が高くなると発生したノードのバッファに空きが少なく格納できない場合がある。その場合は処理の順番によって偏りが出ないようにランダムにパケットを選び格納する。もし、バッファから溢れてしまったパケットがあった場合、そのパ

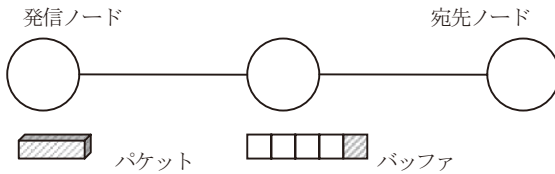


図4 パケットの発生処理の図

丸：ノード 線：リンク

各ノード、バッファ数：5 キュー処理能力数：2

灰色：各ノードバッファに格納されているパケット

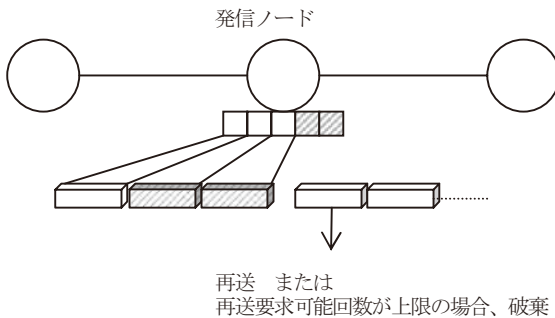


図5 空きバッファ3に対してそれ以上のパケットが発生した場合の処理（ノードに格納するパケットはランダムに選ぶ）

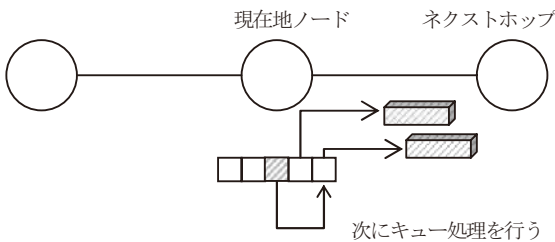


図6 あるノードのパケット移動処理

キュー処理2、バッファには3溜まっている

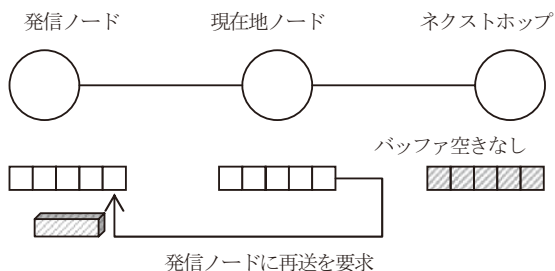


図7 再送要求処理の例

ケットは再送される。しかし、パケットの再送要求可能回数が上限に達していた場合、そのパケットは破棄される（図5）。

2.4.2 パケットの移動処理

処理を行うパケットが存在するノードの番号を現在地ノードとして、キュー処理能力数分だけ目的ノードまでのルーティングテーブルを参照しパケットを移動させ、移動先ノードを改めて現在地ノードとする。例えば図6より発信ノードにパケットが3つ入っていた場合、キュー処理数2つ分のパケットをネクストホップに送り、そのネクストホップを新しい現在地ノードとして上書きするが、もしそのネクストホップが宛先ノードならば到達パケットとしてカウントする。また、現在地ノードに残ったバッファは先入先出しなので空いた分バッファをつめる。

もし、ネクストホップのバッファに入りきらなかった場合は、現在地ノードにあるパケットを破棄し発信ノードに再送を要求する（図7）。図7で現在地ノードからパケットを送り、ネクストホップのバッファがいっぱいなら、候補パケットから空きバッファ数分ランダムに選び、選ばれなかったパケットは現在地ノードを発信ノードに戻してもバッファがいっぱいだった場合は、パケットの発生の際に再送要求を行う。また、各パケットの再送要求可能回数は5回なので、この回数を超えた場合はそのパケットは破棄され、破棄パケット数にカウントし、到達や破棄されたパケットに関してはその後処理は行わない。

これらのパケット発生移動処理を既定ターン数繰り返す。

2.4.3 輻輳判定方法

各ネットワークで輻輳が発生したかどうかを判断するため、既定ターン終了時に、宛先ノードへの到達率を調べた。パケットの発生率を変化させ、到達パケット A 数と破棄パケット L 数からパケット到達 R 率を求める。到達率を求めるとき、シミュレーション中移動するパケット

は、必ずリンクしているノード間にあるので到達するか破棄されるかのどちらかになるが、ターン終了時にネットワークに存在するパケットは含まない。パケット到達率は以下の式 (5) で求める。

$$R = \frac{A}{A+L} \quad (5)$$

この式より、破棄パケットが一つもないとき ($R = 1$) は輻輳が発生していないと判断させる。もし、破棄パケットが一つでも存在し、到達率が1より小さくなった場合、輻輳が発生したとみなしそのときのパケット発生率を輻輳閾値とした。

3. シミュレーション結果

シミュレーションに使用したネットワークは、BA、RN、RGNだが、RGNでジャイアントネットワークを作るためそれぞれのネットワークで平均リンク数6とした。また、シミュレーションはノード数が多くなるにつれて計算時間が長くなるので、ノード数は1,000とし、同一条件のネットワークを5個生成し、それぞれのネットワークでシミュレーションを行って結果の平均をとった。

その結果、最短経路 ($\alpha = 0$) のみの場合はRNが発生率0.05で輻輳が発生し、RGNは発生率0.011のとき輻輳が発生した (図8)。また、BAは発生率0.008のときに輻輳が発生し3つのモデルの中で一番閾値が低かったが、発生率0.023以上ではBAのほうがRGNより到達率が高くなった (図9)。この図9で、たとえばRNで到達率が1.0未満になるパケット発生率 (輻輳閾値) は0.1付近のように見えるが、本研究ではパケット1つでも再送が発生すると輻輳発生とみなしているため、実際に到達率が1.0未満になっている発生率は0.05である。高パケット発生率でRGNの到達率がBAを上回るのは、RGNではパケット発生率が高くなるとトラフィックの集中するノードが急激に増え、

輻輳が発生しやすくなったことが原因と考えられる。

次に、ハブ回避ルーティングで最適な α を求めるため、同じように通信シミュレーションを行った結果、図8より $\alpha < 0$ の場合、最短経路のときと比べ輻輳閾値は変化なし、もしくは低下している。この場合、最短経路とホップ数は変わらず、よりリンク数の多いノードを選んでいるため輻輳が発生しやすくなっていると考えられる。 $\alpha > 0$ はBA、RNで輻輳閾値が上がり、

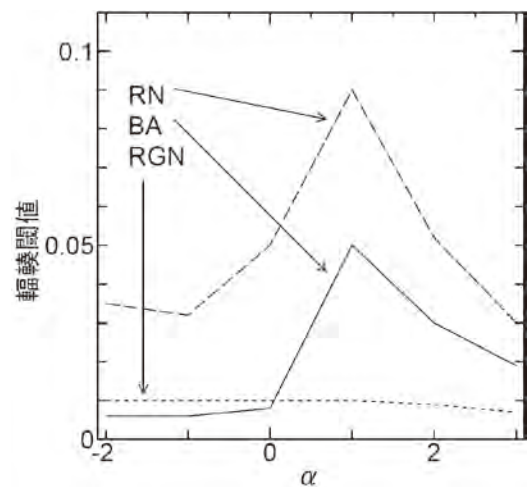


図8 各ネットワークモデルの輻輳閾値の α 依存性 ($N=1,000$)

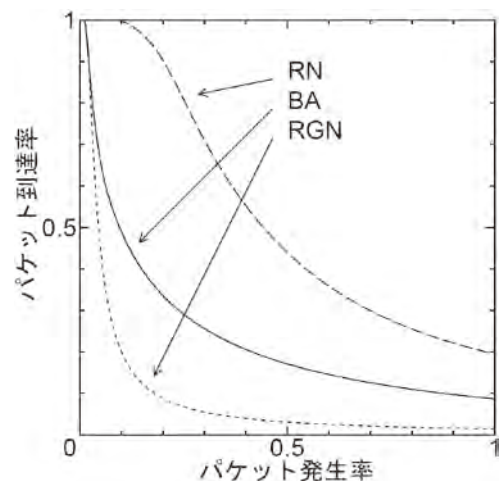


図9 最短経路ルーティングによる、各ネットワークのモデルのパケット到達率 ($N=1,000$)

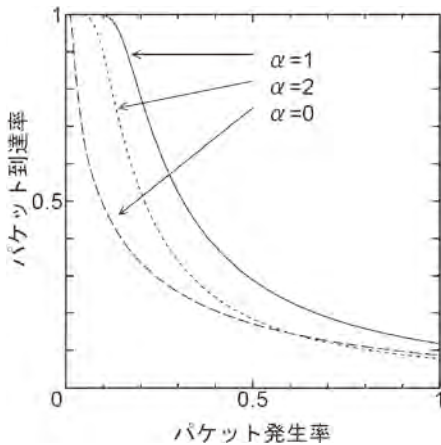
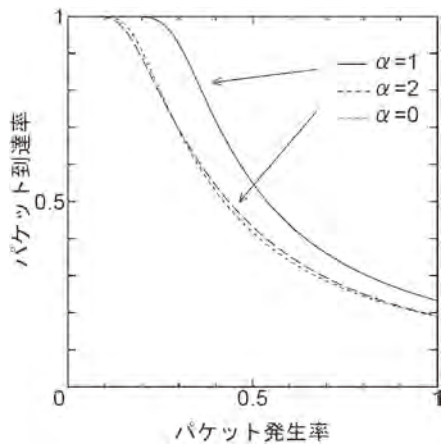
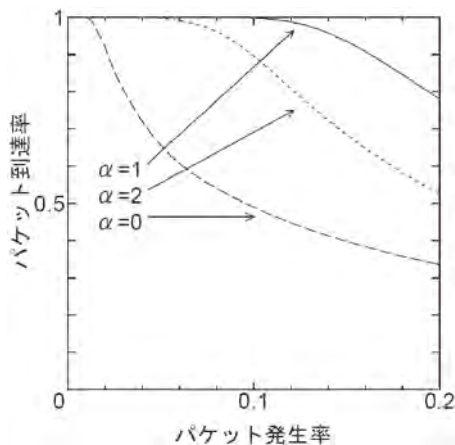
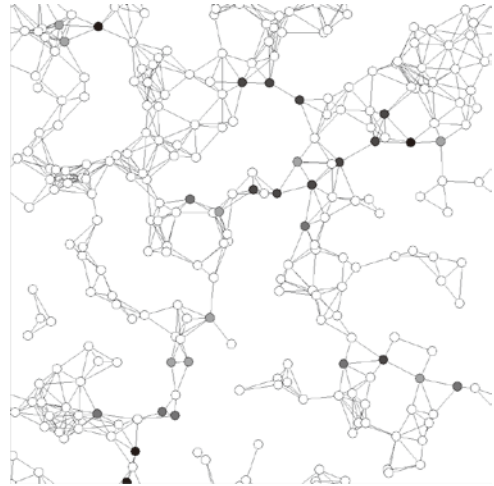
図10 α の値によるBAのパケット到達率図11 α の値によるRNのパケット到達率

図12 図11の閾値付近の拡大図

図13 RGNで輻輳の起きたノード $\beta = 0$

黒丸：再送回数が3,000回以上あったノード
再送回数が多いノードほど濃い色で表示

特に $\alpha = 1$ のときにBAで0.05、RNは0.09と最短経路と比べてリンク数の少ないノードが選ばれ輻輳閾値が高くなっている（図10、11、12）。

しかし、RGNではリンクで緊密に結びついたノード群の間を繋ぐ「橋渡しノード」で輻輳が発生し（図13）、ハブが主な輻輳原因ではないため、 α を変動させても図9のRGNの場合と同様であったため、ハブ回避ルーティングの効果はなかった。また、BA、RNで $\alpha = 2$ のとき閾値が下がるのはリンク数の多いノードがほとんど選ばれなくなる一方、リンク数の少ないノードにパケットが集中し、かえって輻輳が発生してしまうからだと考えられる。

また、ルーティング方法が違うだけで同じ通信シミュレーションを行っているにもかかわらず、発生率が高くなるにつれて α を考慮した方が輻輳発生し始めると同時（パケット発生率0.05）に平均ホップ数が下がっている（図14）。このことからパケットの移動は、ホップ数が多くなるほどパケットがネットワーク上に存在しやすくなるため、各ノードの空きバッファに入りきらず輻輳が起こりやすくなると考えられる。特にRGNでは発生率が上がるにつれて急激に平均ホップ数が下がり、発生率1.000のと

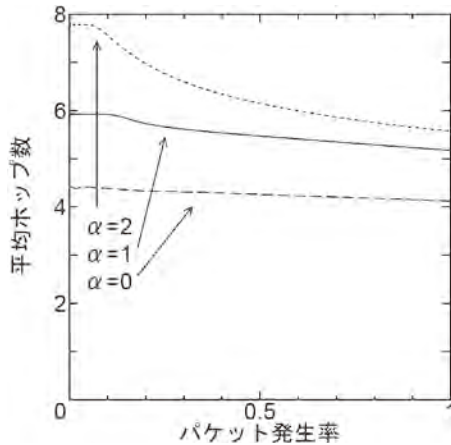


図14 到達パケットの平均ホップ数 (BA)

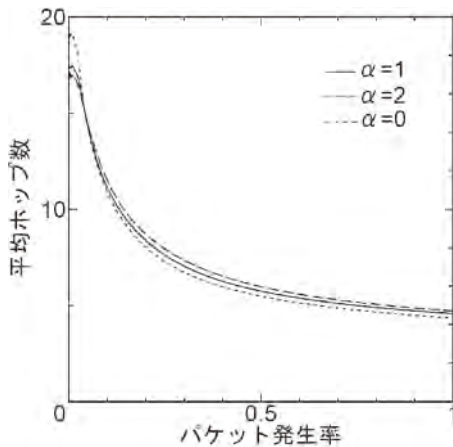
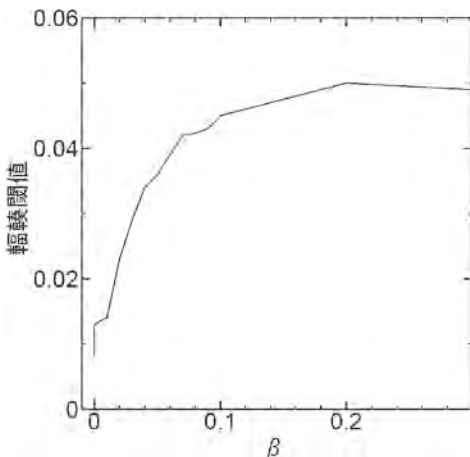
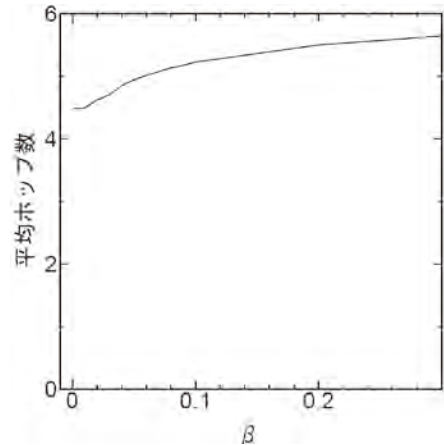


図15 到達パケットの平均ホップ数 (RGN)

図16 輻輳閾値のリンクコスト係数 β 依存性 ($\alpha=1$) (BA)図17 到達パケットの平均ホップ数のリンクコスト依存性 ($\alpha=1$ 、パケット発生率0.001) (BA)

きはBAの最短経路の平均ホップ数とはほぼ変わらなかった (図15)。

以上より、ハブ回避ではコストがリンク数の1乗のときに閾値が高くなることから、次にリンクコストの重み β を考慮したハブ回避ルーティングを行い、最適な値 β を求めた。図16のグラフから $\beta > 0$ のとき、つまり最短経路からリンク数を少しでも考慮すると閾値は0.008から0.013に上がることが分かった。 β の値を考慮すると輻輳閾値が一気に上がるのは、元々リンクを多く持つノードは経路に選ばれる確率が高いが、ハブ回避では各ノードの持つリンク数がコストとして計算されるため、リンク数の一番少ないノードが選ばれるようになるからだと考えられる。

しかし、 β の値が0.005までは閾値の変化がなく、0.005~0.3の間で大きく輻輳閾値が高くなっている。このときの平均ホップ数をみると最短経路と比べ、経路が変更されたため平均ホップ数が増えており、よりハブノードの回避ができていたからだと考えられる。(図17)。その後、 $\beta > 0.2$ では、 $\beta=1$ 、 $\alpha=1$ のときとほぼ同じ閾値になり β の値が1、5、10と増えても数値の変動は見られなかったため、 β の値は0.2が最適であることがわかった。

さらに、各ネットワークのノード数のみを変えて輻輳閾値のノード数依存性を調べたところ、どのノード数でも傾向は図10と同じく $\alpha = 1$ 、 $\beta = 0.2$ のときが最適であり、これらの数値にはノード数依存性はなかった。

4. まとめ

パケットの到達率向上のため、本研究では輻輳の原因のひとつであるハブノードを回避するルーティングをBA、RN、RGNで通信シミュレーションを $C_i = 1 + \beta k_i^\alpha$ 行い、輻輳閾値を比較した。

このハブ回避ルーティングは隣接ノードへのコストをとし、ブロードキャストする際このコストを加え、よりコストの低い方へルーティングした。その結果、少しでもリンク数を考慮すると輻輳閾値は向上したが、ハブノードを回避しすぎると、リンク数の少ないノードにパケットが集中しすぎて十分に輻輳抑制でできなかった。このことからBAではハブ回避ルーティングのコストはリンク数の1乗に比例させることが適切であり、そのコストの重みは0.2が最適であることがわかった。

このようにこのハブ回避ルーティングはBAのようなハブノードが原因で輻輳が起こるネットワークでは輻輳を抑制することができた。しかし、本研究では全ノードの処理能力を同一としたが、現実の情報ネットワークではリンク数の多いノードは一般に処理能力が高いことが多い。よって、このリンク数に依存した処理能力の輻輳への影響を考慮した研究が必要と考えられる。

また、RGNに関してはハブノードが原因ではなくネットワークとネットワークを繋ぐ間のリンク数の少ないノードが輻輳の原因であり、RGNではハブ回避ルーティングは有効ではない。今後、RGNの構造を持つアドホックネットワークは普及が見込まれているため、RGNでの効果的な輻輳抑制手法の研究が必要である。

【引用文献】

- [1] 花澤諒一, 森口一郎:「アドホックネットワークの輻輳閾値」, 東京情報大学研究論集, 17(1), 1 (2013).
- [2] Barrat, A. Barthelemy, M. and Vespignani, A. *Dynamical Processes on Complex Networks*, pp. 246-255, Cambridge University Press (2008).
- [3] Yan, G. Zhou, T. Hu, B. Fu, Z.-Q. Wang, B.-H. "Efficient routing on complex networks", *Physical Review E*, 73, 046108 (2006).
- [4] Barabási, A.-L. and Albert, R., "Emergence of scaling in random networks", *Science*, 286, 509 (1999).
- [5] Pastor-Satorras, R. and Vespignani, A. *Evolution and Structure of the Internet*, pp. 125-128, Cambridge University Press (2004).
- [6] Molloy, M. and Reed, B. "The size of the giant component of a random graph with a given degree sequence", *Combinatorics Probability and Computing*, 7, 295 (1998).
- [7] Dall, J. and Christensen, M., "Random geometric graphs", *Physical Review E*, 66, 016121 (2002).