

# 人口分布に基づく道路網状土台上の 頑健かつ効率的な成長型ネットワークモデル

松久保 潤<sup>1,a)</sup> 林 幸雄<sup>2,b)</sup>

受付日 2016年10月3日, 採録日 2017年3月3日

**概要:** 本論文では, 地理的な空間で, 高い頑健性および効率性を備えるように, 情報ネットワークを拡張する手法を提案する. そのために, 地理的な人口分布に従うノード配置上で成長しながら, 近い次数を持つノード間の接続頻度を高くするネットワーク構築法を導入する. 実際の人口分布データを用いた数値実験を行い, 提案モデルはノード数の増加にともなって頑健性および効率性を強化できることを示す. また, 隣接する2ノード間を接続するリンク距離を制限した場合の実験を行う. 制限がないときの最大リンク距離を基準としたとき, 同等の頑健性の実現に対し, 必要な最大リンク距離は, 約10%である. また, 同等の効率性の実現に対して, 40%弱である. リンク距離を制限しても, 制限なしのときと同等の性能を実現できることは, リンク構築の技術的・経済的な制約の観点から重要であると考えられる.

**キーワード:** 頑健性, スモールワールド性, 空間に埋め込まれたネットワーク, 人口分布, 自己組織化

## A Robust and Efficient Network Model which Grows on Substratum Like Road Network Based on Population Distribution

JUN MATSUKUBO<sup>1,a)</sup> YUKIO HAYASHI<sup>2,b)</sup>

Received: October 3, 2016, Accepted: March 3, 2017

**Abstract:** In this paper, we propose a method to extend an information network to possess high robustness and efficiency. For that purpose, we introduce a network construction method which increases degree correlation while growing, on node arrangement and link structure based on geographical population distribution. The result of our numerical experiments with actual population distribution data shows that our method enhances the robustness and efficiency as the number of nodes increases in our proposed method. We also conducted an experiment assuming a case where link distance connecting adjacent two nodes is limited in a space for constructing networks. As a result of the above experiments, the maximum link distance is about 10% when there is no restriction, in order to realize robustness equivalent to a case where link distance is not limited. Also, that is less than 40%, in order to realize efficiency. It is important from the viewpoint of technological and economic constraints of link construction that even if the link distance is limited, it is possible to realize the same performance as when there is no limit.

**Keywords:** robustness, small-world property, spatially-embedded network, population distribution, self-organization

<sup>1</sup> 北九州工業高等専門学校  
National Institute of Technology, Kitakyushu College, Kitakyushu, Fukuoka 802-0985, Japan

<sup>2</sup> 北陸先端科学技術大学院大学  
Japan Advanced Institute of Science and Technology, Nomi, Ishikawa 923-1292, Japan

a) jmatsu@kct.ac.jp

b) yhayashi@jaist.ac.jp

### 1. はじめに

情報ネットワークは現在, 社会に深く浸透し, 交通, 電力, 金融取引等の社会システムに欠かせない重要な社会基盤となってきた. そのため, 私たちの生活における情報伝達手段として, ネットワーク全体のカバー人口やノード間

の経路長に対する効率性、およびノードやリンクの故障に対する頑健性の確保が課題となっている。平成 27 年度情報通信白書 [1] によれば、2020 年のインターネット接続端末数の予測値は 530 億台を超える。そのため、将来の端末数の増加にともない、トラフィック量が急激に増加していくことが予想される。トラフィック量の増加に対応するには、ネットワーク全体での負荷分散と、任意のノード間を短い経路で接続することが効果的だと考えられる。加えて、平成 27 年度に起きた情報ネットワークの事故（障害）件数は、総務省への報告義務があるものだけでも約 47,000 件だった [2]。情報ネットワークが社会活動に深く浸透していることから、ネットワークの障害が他のシステムに影響し、甚大な被害が生じることを防ぐ必要がある。そのためには、ノードやリンクの故障に対し、接続性を維持する仕組みが求められる。

総務省の情報ネットワークの拡張計画では、従来の有線の通信技術に加え、無線通信技術の利用を検討している。有線技術による情報ネットワークの拡張では、主に、道路網の電柱を使うことが想定されている [4]。また、情報通信審議会 [3] によれば、無線技術は、有線での拡張が困難な地域への情報ネットワークの拡張に利用される。加えて、将来の実現が見込まれる、大容量かつ高速な無線通信技術による都市部の通信網の整備計画が検討されている。しかしながら、どこにノードを配置すべきか、またどのノード間を接続すべきか、についてはほとんど議論されていない。

空間に埋め込まれたネットワーク構築の従来法として、最適施設配置問題や空間統計に基づく手法が提案されている。最適施設配置問題は、ノードの総数やリンクの総延長等に基づく評価関数を最大化するようにノード配置およびリンク接続を決定する。そのため、ノード数が増減すれば、最適な配置を再計算する必要がある。空間統計に基づく手法は与えられた空間的な確率分布に従って生成された空間的なランダムパターンとしてノード配置を求める。しかしながら、得られたランダムパターンに配置場所の地理的制約やリンク距離の制約を反映させることは難しい。

一方、Hayashi らは人口分布メッシュデータに従ってノードとリンクを追加するネットワークモデルとして、Generalized Multi-Scale Quartered (GMSQ) を提案している [7], [8]。GMSQ は人口メッシュデータ全域を覆う長方形の面を初期状態として、人口の多い面を優先的に選択し、その面を面の人口重心を通る直線で小さな長方形に再帰的に分割していくモデルである。長方形の頂点と辺が、それぞれネットワークのノードとリンクに対応する。新規ノードは分割する長方形の辺上に配置され、既設ノードの位置は変更されない。各メッシュでは内部の人口に比例する通信要求が生じるものとする [8]。通信要求はメッシュからユークリッド距離で最も近いノードが処理する。GMSQ では、各ノードがカバーするメッシュの人口の総和を、そ

のノードのカバー人口とする。また、GMSQ の構造的特徴として、筆者らは GMSQ が道路網と同様の性質を持つことを数値実験により示している [9]。そこで、GMSQ のリンク構造を仮想的な道路網データとして、カバー人口が多いノードを優先的に接続する自己組織化ネットワークモデルを考える。

ネットワークの頑健性は、次数が近いノード間の接続が多いとき、高くなる傾向がある。この傾向は数値実験および理論の双方のパーコレーション解析によって示されている [10], [11], [12]。ネットワーク全体で、隣接ノード間の次数の関係が正となる傾向があることを、ネットワークが正の次数相関を持つという。正の次数相関を持つネットワークのノードを次数の降順に中心から周辺に同心円上に配置すると、同程度の次数を持つノードの結合により、玉葱状に可視化できる。上記の構造は玉葱状構造と呼ばれる。

玉葱状構造を利用した頑健なネットワーク構築法として、ネットワーク全体の次数相関を強化するリワイヤリング法 [20]、およびノード配置の殻を積み重ねながら玉葱状構造を生成する仕組みに基づく手法 [21] がある。しかしながら、成長しながら自己組織化する仕組みは含まれていない。それに対し、ノードの追加および局所的なリンクの複写に基づき、ネットワークを逐次成長させながら玉葱状構造を自己組織化する構築法が唯一提案されている [13]。次数相関のほかにも、頑健性に直接影響するネットワーク全体の構造的特徴として、次数分布および平均次数等がある。しかしながら、自己組織化ネットワークの成長は局所的なプロセスであるため、ネットワーク全体の構造的特徴をコントロールすることは難しい [13]。

以上のことをふまえ、将来の情報ネットワークで次にあがる課題の解決策を探るためのシミュレータとして、自己組織化ネットワークモデルを提案する；(a) 人口分布を考慮したとき、高い効率性を実現するために、新規ノードをどこに配置すべきか、(b) ネットワークが成長しながら高い頑健性を実現するために、リンクをどのように構築すべきか。上記の課題に対し、提案モデルを次のような新規ノードの接続法およびリンクの追加法で構成する；(1) 新規ノードの接続法：GMSQ モデルを道路網状土台と見なし、GMSQ のノード配置およびリンク構造に沿って新規ノードをネットワークに接続する、(2) リンクの追加法：文献 [13] と同様に、次数相関を強化するように局所的なリンクの複写およびショートカットリンクの接続を行う。加えて、実際の人口分布のデータを用いた数値実験で、提案モデルの構造的特徴を解析する。また、実際のリンク構築での制約も考慮し、最大リンク距離を制限したときの頑健性および効率性を解析する。

本章以降の本論文の構成は以下のとおりである：2 章で GMSQ によって人口分布に従う道路網状土台の構築法を説明し、3 章では、成長しながら玉葱状構造を構築する自

己組織化ネットワークモデルを説明する。4章では、道路網状土台の上で成長しながら玉葱状構造を構築するネットワークモデルを提案する。5章では、実際の人口分布メッシュデータを用いた数値実験により、提案モデルの構造的特徴を解析する。最後に、6章では、本論文で得られた結果をまとめる。

## 2. 人口分布に従う道路網状土台

情報ネットワークでは、多くの人口をカバーし、かつ各ノードの通信負荷を分散できることが求められる。本章では、そのようなノード配置法として、Generalized Multi-Scale Quartered モデル (GMSQ) [7], [8] に着目する。

GMSQ は人口分布のメッシュデータに従って、再帰的に面を分割することで成長する。手順を以下に示す：

- (1) 初期状態として、人口分布のメッシュデータ全体を囲む長方形の面を作る。面の頂点および辺をそれぞれネットワークのノードとリンクに対応させる。
- (2) 面内の人口が最も多い面を選択する。
- (3) 面の人口重心を基準に4つの小さな長方形を作る。新規ノードは分割される面の4つの各辺の上および人口重心に配置される。
- (4) 各人口分布メッシュはユークリッド距離で最も近いノードにカバーされる。各ノードは、カバーする全メッシュの総人口を、そのノードのカバー人口とする。
- (5) あらかじめ定めたノード数となるまで、(2)以降の処理を繰り返す。

GMSQ は拡張および通信負荷の分散について以下の利点を持つ。まず、新規ノードを追加するとき、分割してきた長方形の頂点に配置する。そのため、既設ノードの配置を変更せずにノードを増やせる。また、人口が多い面を優先的に選択することで、人口が多い地域を多くのノードでカバーすることになる。そのため、各ノードの通信負荷を分散させることができる。

加えて、GMSQ のリンク構造は道路網に近い性質を持つため、人口分布を反映した道路網のモデルと見なせる。交差点をノード配置場所としたとき、道路網を精度良く再現するモデルとして、Relative Neighborhood Graph (RNG) が知られている [5]。筆者らは GMSQ および GMSQ の頂点配置を用いて構築した RNG の両者のリンク構造が類似することを示した [9]。そのため、GMSQ も道路網に類似するものと考えられる。本論文では、GMSQ を成長の土台として、頑健なネットワークを構築する手法を提案する。

## 3. 頑健な自己組織化ネットワークモデル

情報ネットワークでは、高い効率性だけでなく、高い頑健性が求められる。本章では、逐次成長および高い頑健性を両立させる手法として、Hayashi [13] のモデルに着目する。

Hayashi [13] のモデルは、玉葱状構造を自己組織化する

ことで、頑健性を強化する。リンクの生成は、新規ノードの追加にともなう行われる。また、一定のノード追加数ごとにショートカットリンクを追加する。どちらのときも、近い次数を持つノード間を高い確率でリンク接続し、次数相関を高める。

このモデルの生成手順は次のとおりである：

- (1) いくつかのノードを連結したネットワークを初期状態とする。
- (2) 一様ランダムにノードを1つ選び、 $r$ とする。
- (3) ノード  $r$  に新規ノード  $i$  を接続する。
- (4)  $i$  から  $r$  の隣接ノードのそれぞれに対し、確率  $(1-\delta) \times p$  でリンクを接続する (リンクの複写)。ただし、

$$p = \frac{1}{1 + a|k_i - k_j|}, \quad (1)$$

$0 \leq \delta \leq 1$ ,  $a > 0$ ,  $k_i$  および  $k_j$  はそれぞれノード  $i$  および  $j$  の次数である。

- (5)  $IT$  個のノードを追加するごとにショートカットリンクを追加する。ショートカットリンクの追加本数は、 $0 < p_{SC} < 1$  をショートカット追加パラメータ、 $M(t)$  をノード追加数  $t$  での総リンク数として、 $p_{SC} \times M(t)$  本とする。ショートカットリンクを追加するノードの組は一様ランダムに選ばれ、式 (1) の確率  $p$  で接続される。ただし、同一ノードの組、またはすでに接続しているノードの組を選んだときは、再度ノードの組を選び直す。
- (6) ネットワークのサイズ (全ノード数) があらかじめ定められた数  $N$  になるまで、上記の処理を (2) から繰り返す。

$\delta$  は  $i-j$  間の接続のしやすさをコントロールするパラメータである。 $\delta$  が小さいほど、確率  $(1-\delta) \times p$  の値が大きくなり、局所的なリンク構造が密になる。 $a$  はネットワーク全体の次数相関をコントロールするパラメータである。 $a$  が大きいほど、異なる次数間で接続する確率が小さくなるため、次数相関が高くなる。 $k_i$  と  $k_j$  の値が近いほど  $i$  と  $j$  の接続確率  $p$  が大きくなる。

また、ノード追加数  $IT$  ごとのショートカットリンクの追加本数  $p_{SC} \times M(t)$  は、 $t$  の増加にともなう増える。 $t$  の増加にともなう、経路を確保すべきノードの組合せの数が増える。それに対し、ショートカットリンクの追加数を増やすことで、短い経路を確保できる仕組みを導入している。

上述のモデルの次数分布は指数分布で近似され、最大次数が抑えられる。そのため、接続の維持や (一般に高次数ノードに集中しがちな) 通信負荷を緩和できる点で都合が良い。また、ショートカットリンクによって少ない中継ノード数で経路が得られるため、通信効率も高い。

#### 4. 道路網状土台の上で自己組織化する頑健なネットワークモデル

本章では、GMSQ [7], [8] のリンク構造を土台として成長しながら、Hayashi [13] のモデルに基づいてリンクを生成する自己組織化ネットワークモデルを提案する. 実際の情報ネットワークの拡張は、道路網に沿って行われると想定される. そこで、GMSQ を、人口分布を反映した道路網のモデルと見なし、GMSQ のリンク構造に沿って成長するモデルを提案する. このとき、できるだけ多くの人口をカバーするため、カバー人口が最も多いノードを最優先で接続する. また、成長しながら高い頑健性を実現するために、文献 [13] の手法に基づき、近い次数のノード間の接続頻度を高め、次数相関の強化する. 提案モデルの構築法は以下のとおりである (パラメータは前章の文献 [13] のモデル生成法と同様):

- (1) GMSQ によって道路網状土台を形成する.
- (2) GMSQ 上で連結した、いくつかのノードを選ぶ.
- (3) 上記のノードを連結し、提案モデルの初期状態とする.
- (4) GMSQ 上で提案モデルに隣接するノードの中からカバー人口が最も多いノードを選び、 $r$  とする.
- (5)  $r$  を提案モデルに接続する.
- (6)  $r$  に隣接する提案モデルのノードを  $i$  とする.
- (7)  $i$  から  $r$  の各隣接ノード  $j$  に確率  $(1 - \delta) \times p$  でリンクをつなぐ (ただし、 $p$  は式 (1) から求める).
- (8)  $IT$  個のノードを追加するごとに  $p_{sc} \times M(t)$  本だけショートカットリンクを生成する. ショートカットリンクを追加するノードの組は一様ランダムに選ばれ、式 (1) の確率  $p$  で接続される. ただし、同一ノードの組、またはすでに接続しているノードの組を選んだときは、再度ノードの組を選び直す.
- (9) 提案モデルサイズ (全ノード数) があらかじめ定められた数  $N$  になるまで、上記の処理を (4) から繰り返す.

上記の (4), (5) の手順は道路網に沿って有線でネットワークを拡張することに対応している. (6)~(8) の手順は、総務省の計画にある、無線リンクによる拡張を想定している. 現在の無線によるインターネット通信技術では、最長 30 km で 7Mbps の長距離広域帯伝送が可能である [14]. また、実際のネットワークを拡張していくとき、1 個のノードを追加するごとにショートカットリンクを追加する計画を立てるのは難しいと思われる. そのため、提案モデルでは、 $IT$  個のノードを追加するごとにショートカットを追加する仕組みを採用している.

次章では、実際の人口分布メッシュデータを用いた数値実験を行い、提案モデルの構造的特徴を解析する.

#### 5. 実際の人口分布データを用いた数値実験

実験に用いる人口分布データは国土地理院が発行する地

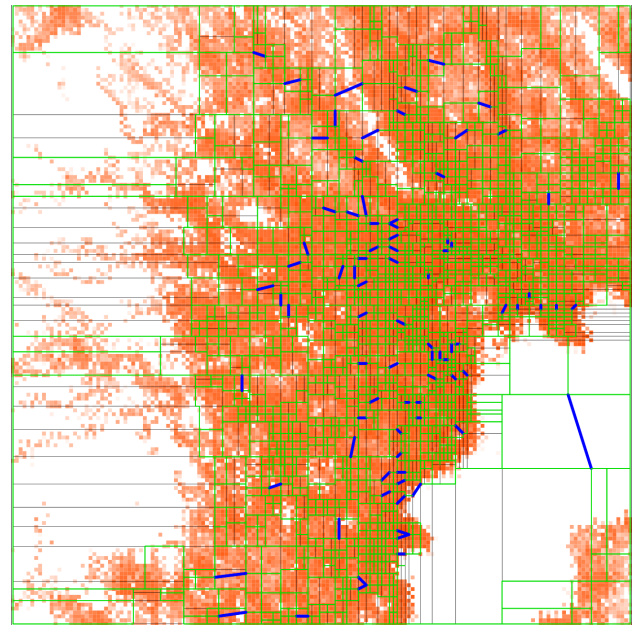


図 1 人口分布に従って構築した GMSQ および RNG の可視化例 (人口分布メッシュデータ: 東京, 赤: 人口; 濃いほど多い, GMSQ の頂点数: 3,000, 緑: GMSQ および RNG で共通のリンク, 青: RNG のみ, 黒: GMSQ のみ)

Fig. 1 Visualization of GMSQ and RNG based on population distribution (mesh data of population distribution: Tokyo, red: population; the deeper the color, the more population, node num. of GMSQ: 3,000, green: common links of GMSQ and RNG, blue: links of RNG only, black: links of GMSQ only).

域メッシュデータ [15] である. 各メッシュは各区画に対応し、総務省統計局の国勢調査の結果に基づく人口が割り当てられている. ここでは、1 区画を 500 m 四方とする 160 区画×160 区画 (80 km × 80 km) の関東地域のデータを用いる. また、他にも中部地域 (名古屋近辺)、京阪神地域のデータでも実験を行い、同様の結果を得た.

#### 5.1 GMSQ と RNG との比較

図 1 は GMSQ および RNG の可視化例である. 赤の各区画の濃淡が人口分布を表しており、濃い地域ほど人口が多い. 緑の線は GMSQ および RNG で共通のリンク、青の線は RNG のみのリンク、黒の線は GMSQ のみのリンクを示す. また、GMSQ のノード数  $N_b$  は  $N_b = 3,000$  とし、RNG のノード配置は GMSQ のノード配置を用いた. 図 1 から、人口が多い地域のリンク構造はよく似ていることが分かる.

表 1 に同一の人口分布に対する GMSQ および RNG のリンクの比較結果を示す. ここでは、GMSQ を、関東、京阪神、中京地域の人口分布メッシュデータに基づいて生成した. RNG の生成には GMSQ のノード配置を用いた. 表 1 では、GMSQ および RNG の合計リンク数 (重複なし) を基準として、80%以上のリンクが一致する. この結

表 1 GMSQ および RNG のリンクの重複度. 項目の説明: (a) 地域名, (b) GMSQ のノード数, (c) GMSQ と RNG の合計リンク数 (重複なし), (d) 共通リンクの割合

Table 1 Link multiplicity of GMSQ and RNG.

(a)	(b)	(c)	(d)
関東	3,000	5,302	0.884
	5,000	9,050	0.873
	12,041	22,759	0.864
京阪神	3,000	5,363	0.869
	5,000	9,088	0.859
中京	10,565	18,834	0.847
	3,000	5,458	0.875
	5,000	9,237	0.859
	10,135	19,562	0.828

果から, GMSQ は RNG と同様に道路網に似た構造的特徴を持つと考えられる.

### 5.2 提案モデルの可視化

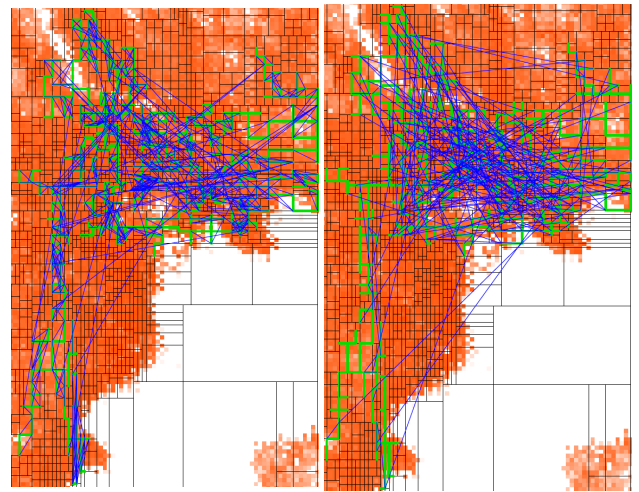
次に, 図 2(a)~(d) は提案モデルの可視化例である. 共通パラメータは GMSQ のノード数  $N_b = 3,000$ , 提案モデルのノード数  $N = 600$ ,  $IT = 50$  とした. 他の各パラメータの組合せは, 5.3 節以降で平均次数が同じになるように選んだ.  $\delta$  および  $a$  の値が大きいと, リンクが複写される頻度が下がる. そのため, 大きな値の  $\delta$  および  $a$  に対し, ショートカット追加パラメータ  $p_{sc}$  は大きくなる. 以下にパラメータの値の組合せを示す: (a)  $a = 0.3$ ,  $\delta = 0.3$ ,  $p_{sc} = 0.008$ , (b)  $a = 0.3$ ,  $\delta = 0.9$ ,  $p_{sc} = 0.042$ , (c)  $a = 30$ ,  $\delta = 0.3$ ,  $p_{sc} = 0.044$ , (d)  $a = 30$ ,  $\delta = 0.9$ ,  $p_{sc} = 0.045$ . 赤の濃淡は人口分布を表し, 黒の線は GMSQ のリンクである. 緑の線は新規ノードが提案モデルの既設ノードに接続するときのリンクを表し, 青の線は新規ノード接続時の複写リンクおよびノード追加数  $IT$  ごとのショートカットリンクを表す.

図 2(a)~(d) では, パラメータの違いが青色のリンクの距離 (隣接するノード間のユークリッド距離) の違いとして現れている. ただし, 提案モデルのパラメータは本来, リンク距離とは直接の関係を持たないことに注意されたい.

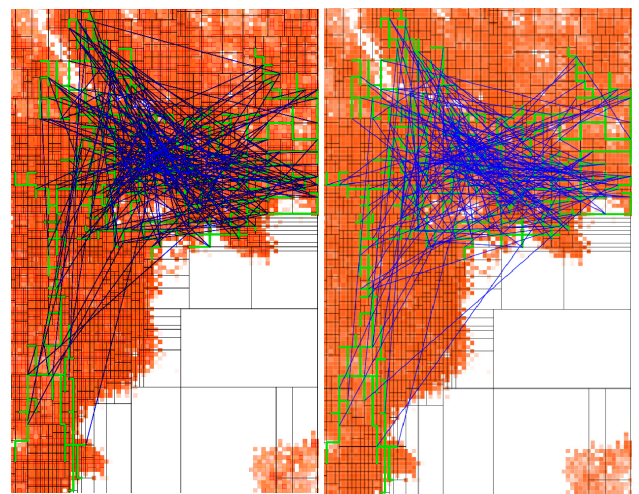
図 2(a) から,  $\delta$  および  $a$  が小さいとき, ユークリッド距離の上で近いノード間のリンクを張りやすいことが分かる. 一方, 図 2(b) では,  $\delta$  が大きいと複写リンクの本数が少なくなり, かつショートカットの本数が多くなる. そのため, 地図上の距離の上で遠いノード間のリンクが多くなっている.

次に,  $a$  が大きくなると, 次数が異なるノード間の複写リンクが少なくなる. そのため,  $\delta$  の値によらず, 複写リンクの本数が少なくなり, ショートカットリンクが多くなる.

図 2(c) および (d) は (b) との構造の違いがほとんどみられない. また, 以下で解析する, 頑健性, 効率性について



(a)  $a = 0.3$ ,  $\delta = 0.3$ ,  $p_{sc} = 0.008$  (b)  $a = 0.3$ ,  $\delta = 0.9$ ,  $p_{sc} = 0.042$



(c)  $a = 30$ ,  $\delta = 0.3$ ,  $p_{sc} = 0.044$  (d)  $a = 30$ ,  $\delta = 0.9$ ,  $p_{sc} = 0.045$

図 2 提案モデルの可視化例 (共通パラメータ; 人口分布メッシュデータ: 東京,  $N_b = 3,000$ ,  $N = 600$ ,  $IT = 50$ )

Fig. 2 Visualization of our proposed model (common parameters; mesh data of population distribution: Tokyo,  $N_b = 3,000$ ,  $N = 600$ ,  $IT = 50$ ).

の構造的特徴の解析結果も同様であった. そのため, 以下では  $a = 0.3$  を共通のパラメータとして解析結果を示す.

### 5.3 基礎的な構造的特徴

本節では, 提案モデルの基本的な構造的特徴として, 提案モデルのサイズ (全ノード数) に対するカバー人口の総数および次数分布について述べる. 道路網状土台となる GMSQ には, 人口分布メッシュデータをできるだけ分割したものをを用いた. そのときの GMSQ のノード数は  $N_b = 12,041$  となった. 提案モデルの初期状態は, 次の手順で準備した:

- (1) GMSQ のノードから, カバー人口に比例した確率でノード  $s$  を選ぶ.
- (2)  $s$  から GMSQ 上でリンクをたどり, 4 ノードを選ぶ.
- (3)  $s$  も含め, 5 ノードを完全結合する.

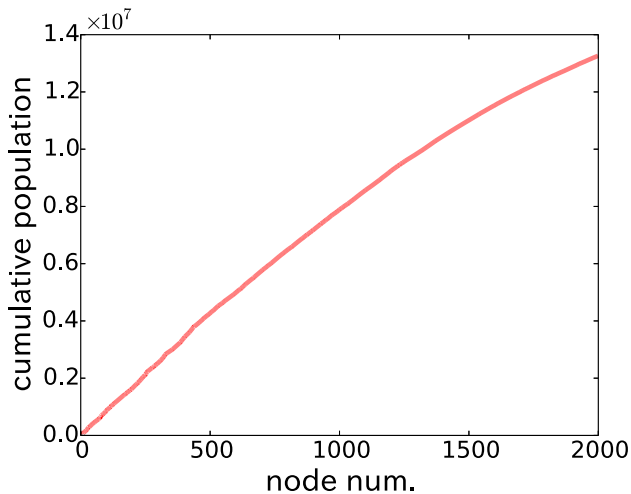


図 3 提案モデルのサイズに対するカバー人口

Fig. 3 Covering population to network size of our proposed model.

また、ここでのサンプル数は 10 である。

図 3 に提案モデルのサイズに対するカバー人口を示す。提案モデルは、パラメータの組合せによらず、最も多くのカバー人口を持つノードを接続しながら成長する。そのため、ネットワーク全体のカバー人口については、パラメータの組合せによらず同様の結果が得られる。実験に用いた関東地域の人口分布メッシュデータ内の総人口が 2,800 万人強である。それに対し、提案モデルを 2,000 ノードまで成長させたとき、ネットワーク全体のカバー人口の総和は平均で 1,300 万人強となった。また、実験例では、GMSQ で生成した道路網状土台には 12,041 個のノードがあった。したがって、成長の土台となる GMSQ の 17% 弱のノード数で、人口分布メッシュデータの 40% 強の人口をカバーしていることになる。この結果は、提案モデルが成長過程で優先的にカバー人口が多いノードを優先的に接続できることを示す。少ないノード数で多くの人口をカバーできることは効率性の観点から望ましい。

続いて、図 4 に度数分布を示す。本実験では、文献 [13] との比較のため、 $IT = 50$  として、提案モデルのサイズ  $N$  が  $N = 2,000$  のときに、平均度数  $\langle k \rangle$  が  $\langle k \rangle \sim 5.6$  となるようにショートカットの追加パラメータ  $p_{sc}$  を選んだ。また、パラメータの各組合せに対するサンプル数は 10 である。

図 4 では、最大度数が 15~20 となっており、ハブ（極端に高い度数のノード）がないことが分かる。この点は文献 [13] と共通する。ハブがないことは悪意ある攻撃への脆弱性 [18] および輻輳の集中 [19] を避けるために有効である。しかしながら、低い度数のノード数の分布は文献 [13] と異なる。文献 [13] では度数分布全体が指数分布で近似できる。一方、提案モデルの度数分布は度数  $k$  が 2~8 の間でほぼ一定である。この違いは、文献 [13] はトポロジのみを考慮するのに対し、提案モデルは空間に埋め込まれるためだと考えられる。

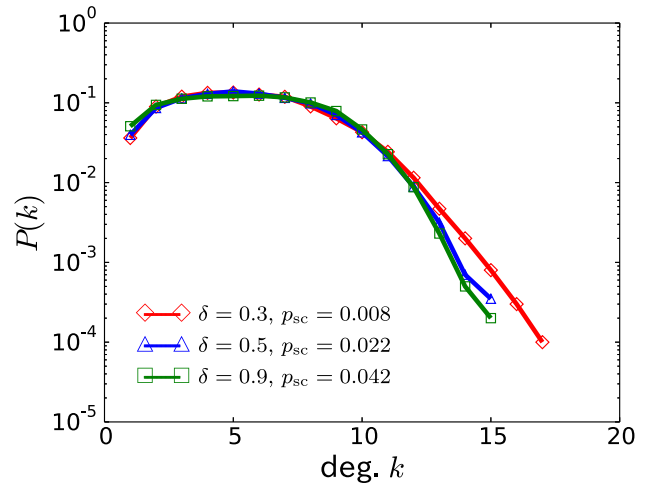


図 4 度数分布 ( $N_b = 12,041$ ,  $N = 2,000$ ,  $a = 0.3$ )

Fig. 4 Degree distribution of our proposed model ( $N_b = 12,041$ ,  $N = 2,000$ ,  $a = 0.3$ ).

ここで、自己組織化ネットワークの度数分布と頑健性の関係について述べる。先行研究により、実際の多くの自己組織化ネットワークの度数分布がべき乗則に従うことが明らかにされてきた。べき乗則に従う度数分布を持つネットワークの構造は Scale-Free (SF) 構造と呼ばれる。SF 構造には、わずかなリンクしか持たない大多数のノードとハブ（多くのリンクを持つ極少数のノード）とが混在する。SF 構造の頑健性について、Albert ら [18] はランダム故障への頑健性およびハブ攻撃への脆弱性を示している。特に、巨大な情報ネットワークであるインターネットの SF 構造が実データから示されている。この事実は、情報ネットワークの信頼性の実現に対する課題となっている。

しかしながら、ハブ攻撃よりも甚大な被害を及ぼす攻撃法が近年 2 つ提案された。1 つは、可能な限り少ないノード除去で単一の大きなループを抽出する手法に基づく CI 攻撃である。もう 1 つは、可能な限り少ないノード除去で全域木を抽出する手法に基づく BP 攻撃がある。

数値実験では、CI 攻撃 [16] より BP 攻撃 [17] の方が少ないノード除去率でネットワークを分断できることが示されている。また、図 4 から、提案モデルの度数分布はべき乗則には従わないことが分かる。そこで、頑健性解析に BP 攻撃 [17] を用いる。

#### 5.4 頑健性解析

本節では、提案モデルの BP 攻撃に対する頑健性、および提案モデルのサイズの増加に対する頑健性と他の構造的指標との関係について述べる。

まず、図 5 は BP 攻撃によるノード除去率  $q$  ( $0 \leq q \leq 1$ ) に対する最大連結成分の割合  $S(q)/N$  ( $S(q)$ : 最大連結成分のノード数,  $N$ : ネットワークのサイズ) を示す。  $q$  が高くなったときに、 $S(q)/N$  が大きいほど、頑健であることを示す。図 5 では、 $\delta$  が大きい方が頑健であることが分

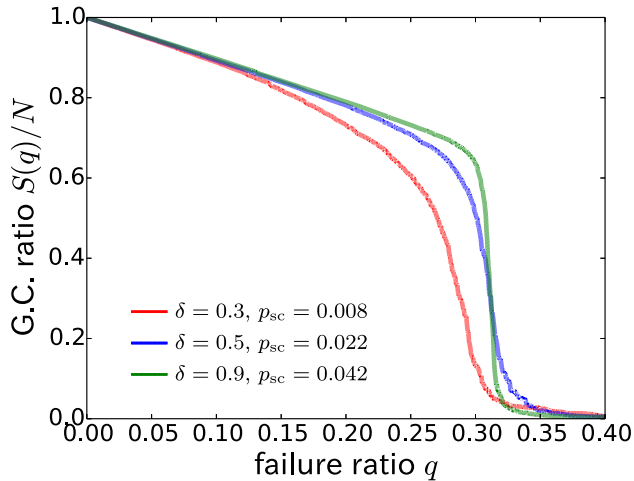


図 5 ノード除去率  $q$  に対する最大連結成分の割合  $S(q)/N$   
**Fig. 5** Remaining rate of giant component  $S(q)/N$  to removal rate of node  $q$ .

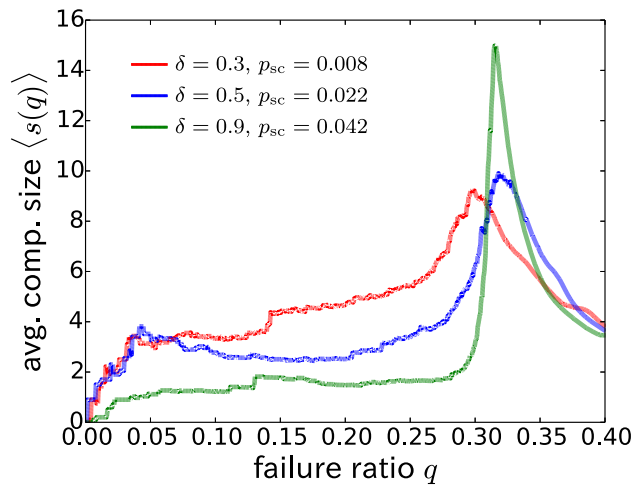


図 6 ノード除去率  $q$  に対する最大連結成分から孤立した連結成分の平均サイズ  $\langle s(q) \rangle$   
**Fig. 6** Average size of components except giant component  $\langle s(q) \rangle$  to removal rate of node  $q$ .

かる。本実験では、すべてのパラメータの組合せで平均次数が同じ値になるように設定している。そのため、 $\delta$  が大きい方が、地図上で遠いノード間をつなぐショートカットリンクが増えて、迂回路が多く生じるためだと考えられる。

次に、図 6 は故障率  $q$  に対する最大連結成分から孤立した連結成分の平均サイズ  $\langle s(q) \rangle$  を示す。 $q$  が高くなって、ネットワークの分断が始まると、 $\langle s(q) \rangle$  の値が大きくなる。また、 $q$  に対し、 $\langle s(q) \rangle$  の変化が急激であるほど、ネットワークの崩壊も急激に進む。図 6 では、 $\delta = 0.3$  のとき最も早くネットワークの崩壊が起こっている。また、 $\delta$  が大きくなると、急激な崩壊が起こることが分かる。

上記の結果から、高い頑健性を実現するには  $\delta$  が大きい方が有利であると考えられる。しかしながら、コストとの観点からは  $\delta$  が小さい方が望ましい。 $\delta$  が大きいとき、平均次数を同じにするためには、離れたノード間を接続する

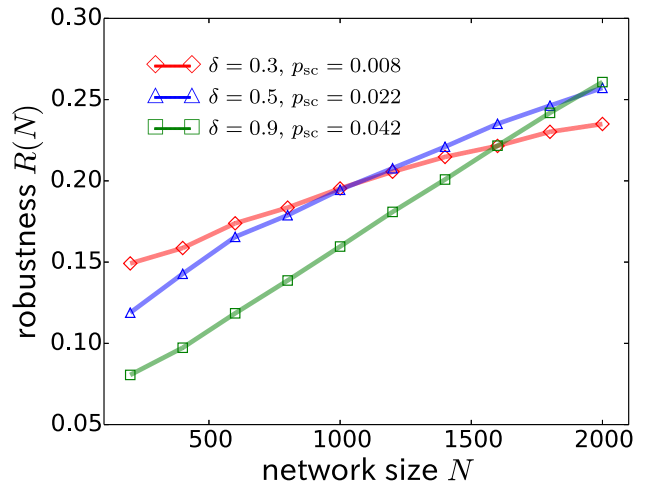


図 7 ネットワークサイズ  $N$  に対する頑健性指標  $R(N)$   
**Fig. 7** Robustness index  $R(N)$  to network size  $N$ .

長距離のショートカットリンクの数が増える。一般に、リンク距離が長いほど構築および維持にかかるコストは高くなる。そのため、頑健性とコストの間にはトレードオフが存在する。

続いて、ネットワークのサイズの増加に対する頑健性について解析する。ネットワーク全体の頑健性評価には次の指標を導入する [10], [11], [20]。記号の意味は次のとおりである； $N$ ：ネットワークのサイズ， $q$  ( $0 \leq q \leq 1$ )：攻撃によるノード除去率， $S(q)$ ： $qN$  に対し、最大連結成分のサイズ。

$$R = \frac{1}{N} \sum_{q=1/N}^1 S(q)$$

$S(q)$  は  $S(0) = N$  から始まり、 $q$  の増加にともなって単調減少する。頑健性指標  $R$  の値の範囲は  $0 \leq R \leq 0.5$  である。 $R = 0$  のとき、ネットワークは孤立した頂点のみからなり、 $R = 0.5$  のとき、ネットワークが最も頑健であることを示す。ここではノードやリンクの接続性のみを考慮して議論を進める。

図 7 にネットワークサイズに対する頑健性指標を示す。どのパラメータの組合せでも  $N = 2,000$  のときに  $\langle k \rangle \sim 5.6$  となるように設定している。図 7 では、 $\delta$  が大きいほど、成長にともない頑健性がより向上している。 $\delta$  が大きい方がショートカットリンクの数が増えることで、互いに離れたノード間の接続頻度が高くなるためだと考えられる。

図 8 に平均次数  $\langle k \rangle$  に対する頑健性指標  $R$  を示す。各グラフは左から右に  $N = 200, 400, \dots, 2,000$  のときの結果に対応する。そのため、 $\langle k \rangle$  および  $R$  は成長にともなって増えている。この結果から、提案モデルの頑健性は  $\langle k \rangle$  の増加にともなって強化されることが分かる。

続いて、次数相関は assortativity [22] で求める

$$r = \frac{S_1 S_e - S_2^2}{S_1 S_3 - S_2^2}, \quad (2)$$

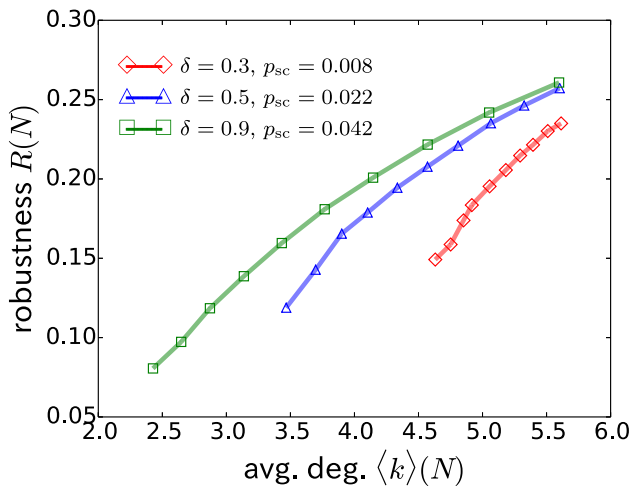


図 8 平均次数  $\langle k \rangle(N)$  に対する頑健性指標  $R(N)$  (左下から右上に向かって  $N$  が増えている)  
**Fig. 8** Robustness index  $R(N)$  to average degree of node  $\langle k \rangle(N)$ ; ( $N$  increases from the lower left to the upper right).

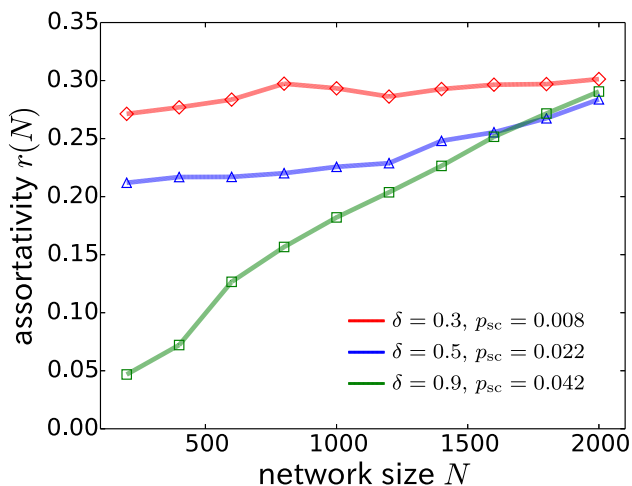


図 9 ネットワークサイズ  $N$  に対する次数相関  $r(N)$  ( $N_b = 12,041, a = 0.3$ )  
**Fig. 9** Degree correlation  $r(N)$  to network size  $N$  ( $N_b = 12,041, a = 0.3$ ).

ここで、 $S_1 = \sum_i k_i, S_2 = \sum_i k_i^2, S_3 = \sum_i k_i^3, S_e = \sum_{ij} A_{ij} k_i k_j$ ,  $A_{ij}$  は隣接行列の  $i$ - $j$  成分を指す。式 (2) の右辺は元の定義より  $r$  の計算しやすい形になっている。 $r$  は次数の相関係数であり、その値の範囲は  $-1 \leq r \leq 1$  である。同じ次数を持つノードがつながっている傾向が強ければ  $r > 0$  となり、異なる次数を持つノードがつながっている傾向が強ければ  $r < 0$  となる。

図 9 にネットワークサイズ  $N$  に対する次数相関  $r$  を示す。どのパラメータの組合せでも、 $N = 2,000$  のときに  $r \sim 0.3$  となっている。 $\delta$  が大きいほど、サイズ  $N$  の増加にともなう  $r$  の増加が急激である。この結果から、提案モデルは成長にともなう玉葱状構造の性質が強くなるものと考えられる。

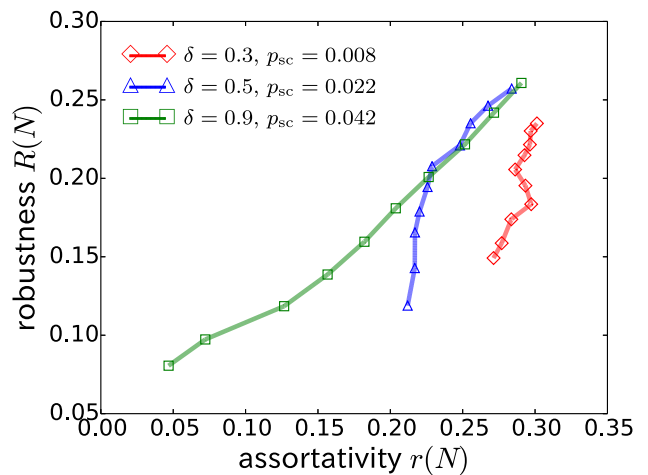


図 10 次数相関  $r(N)$  に対する頑健性指標  $R(N)$  (下から上に向かって  $N$  が増えている)  
**Fig. 10** Robustness index  $R(N)$  to degree correlation  $r(N)$ ; ( $N$  increases from the lower to the upper).

次に、図 10 に次数相関  $r$  に対する頑健性指標  $R$  を示す。各グラフは下から上に向かって  $N = 200, 400, \dots, 2,000$  のときの結果に対応する。どのパラメータの組合せでもネットワークの成長にともなう assortativity および頑健性が上がる傾向がある。

上記の結果では、ネットワークのサイズおよび平均次数を同じにすると、 $\delta$  が大きい方が、高い頑健性を実現している。しかしながら、以下の理由から  $\delta$  を大きくするだけで、高い頑健性を実現することは難しいと考えられる； $\delta$  が大きいと、互いに遠い距離にあるノード間をショートカットリンクで接続する頻度が高くなる。ただし、ネットワークのサイズが小さいときは、リンクの総数が少ない。そのため、追加されるショートカットリンクの本数も少なく、高い頑健性を実現することは難しい。

### 5.5 通信効率の解析

本節では、2 ノード間結ぶ中継リンクの数、および中継リンク長の総和のそれぞれを経路長の基準として提案モデルの通信効率を解析する。中継リンクの数を経路長の基準とすると、中継リンク数が最も少ない経路の長さを最小ホップ数とする。同様に、中継リンクの長さの総和を基準とすると、中継リンク長の総和が最も短い経路の長さを最短経路長とする。

図 11 に  $N = 2,000, a = 0.3$  のときの最小ホップ数分布を示す。 $\delta = 0.3$  の分布のピークに対する最小ホップ数は、 $L_{ij} \sim 7$  である。また、 $\delta = 0.5$  および  $0.9$  のピークに対しては、 $L_{ij} \sim 5$  である。この結果は文献 [13] と同様である。この結果に対して、 $\delta$  が大きいときに、ショートカットリンクの数が増えることが影響していると考えられる。

続いて、図 12 に  $a = 0.3$  のときのネットワークサイズ  $N$  に対する最小ホップ数の平均  $\langle L_{ij} \rangle(N)$  を示す。 $N$  の増



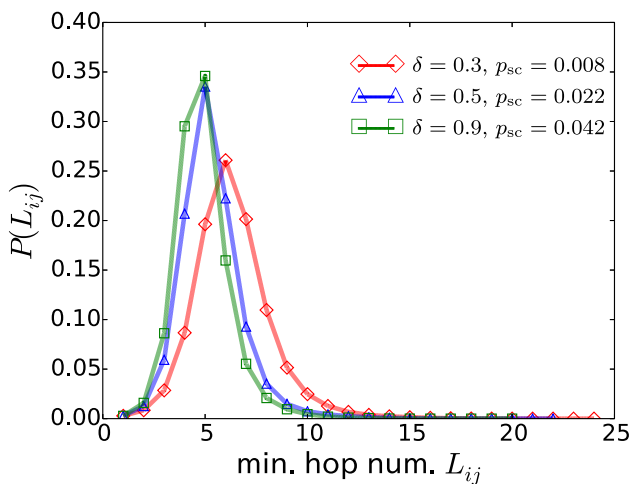


図 11 最小ホップ数分布

Fig. 11 Distribution of minimum number of hops.

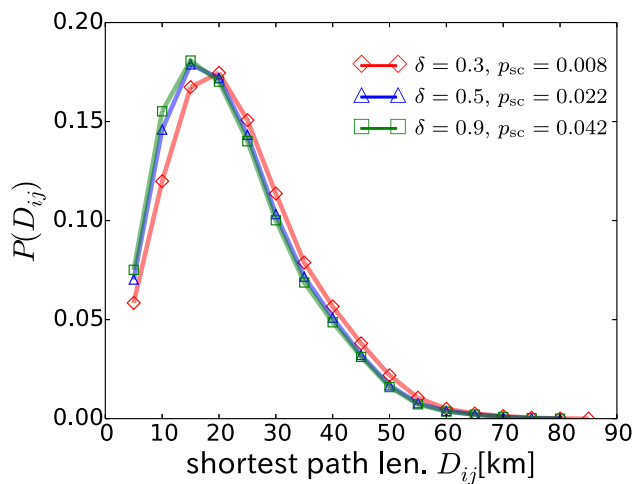


図 13 最短経路長の分布

Fig. 13 Distribution of length of shortest paths.

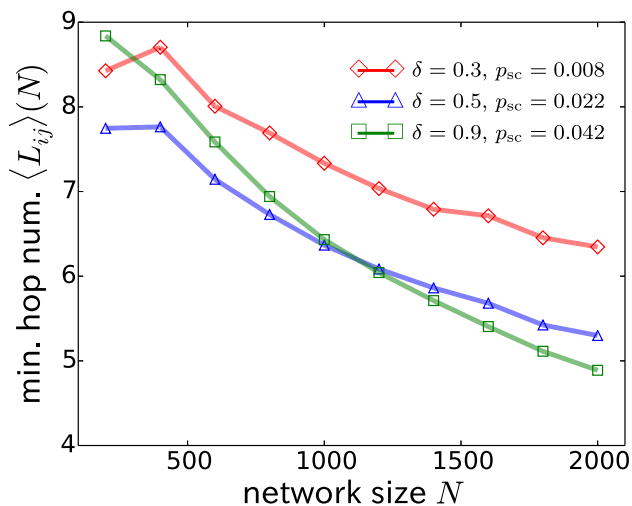


図 12 ネットワークサイズに対する最小ホップ数の平均

Fig. 12 Average of minimum number of hops to network size.

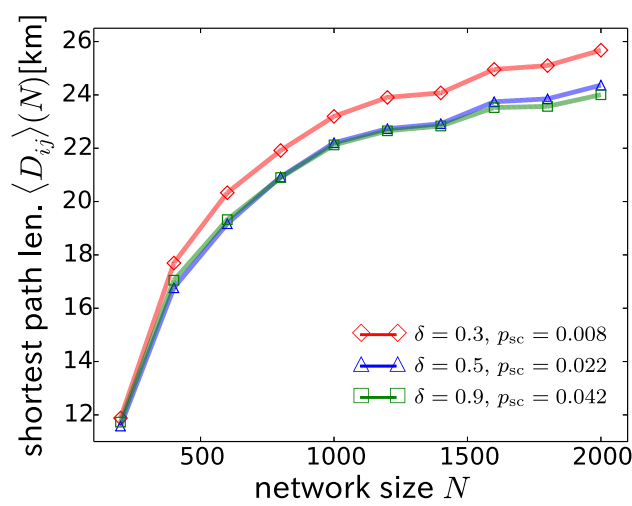


図 14 ネットワークサイズに対する最短経路長の平均

Fig. 14 Average of lengths of shortest paths to network size.

加にともない  $\langle L_{ij} \rangle(N)$  が減少する傾向は文献 [6] と同様である。この傾向は  $\delta$  の値によらず、 $N$  が増加するとショートカットリンクの数が増えるためだと考えられる。ただし、 $\delta$  が大きいと、ネットワークの成長にともない、ショートカットリンクの数が相対的に多くなる。そのため、 $\delta$  が大きい方が、 $\langle L_{ij} \rangle(N)$  が急激に減少する。

図 13 に  $N = 2,000$ 、 $a = 0.3$  のときの最短経路長の分布を示す。最短経路長の分布は  $\delta$  の値からあまり影響を受けないことが分かる。この傾向は文献 [13] と同様である。次に、図 14 に  $a = 0.3$  のときのネットワークサイズ  $N$  に対する最短経路長の平均  $\langle D_{ij} \rangle(N)$  を示す。全体の傾向として、 $N$  の増加にともない、 $\langle D_{ij} \rangle(N)$  の増え方が緩やかになることが分かる。この傾向は文献 [13] とは異なっている。本実験では、提案モデルを 80 km 四方の面の中で成長させている。提案モデルを埋め込む面の広さがあらかじめ決まっているので、 $N$  の増加にともない、 $D_{ij}$  が大きなノードの組が生じにくくなると考えられる。

### 5.6 リンク長の影響

本節では、提案モデル上で隣接するノード間のリンク距離分布、および構築できるリンク距離を制限したときの頑健性および最小ホップ数について解析する。一般に、リンク距離が長いほど頑健性が上がることが示されている [23] が、実際には構築できるリンク距離が制限される場合が考えられる。

まず、図 15 に、リンク距離を制限しないときの提案モデルのリンク長  $l$  の累積分布を示す。どのパラメータの組合せも、 $l \leq 30$  [km] でのリンク数が 80% を占めており、極端に長いリンクは少ない。また、 $\delta$  が大きいほど、 $l$  に対する累積分布の増え方が緩い。これは  $\delta$  が大きいほど、長いリンクが多く生じることを示す。

次に、図 16 に最大リンク距離  $l_{lim}$  を制限したときの頑健性指標  $R$  を示す。 $l_{lim}$  は、10, 20, ..., 100 km とした。凡例を表 2 に示す。 $l_{lim}$  によらず、平均次数は  $N = 2,000$  のときに  $\langle k \rangle \sim 5.6$  となるように設定している。ネットワー

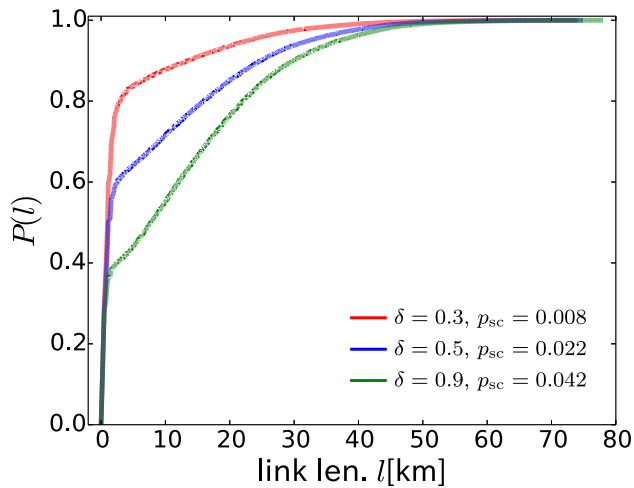


図 15 リンク長の累積分布

Fig. 15 Cummulative distribution of link lengths.

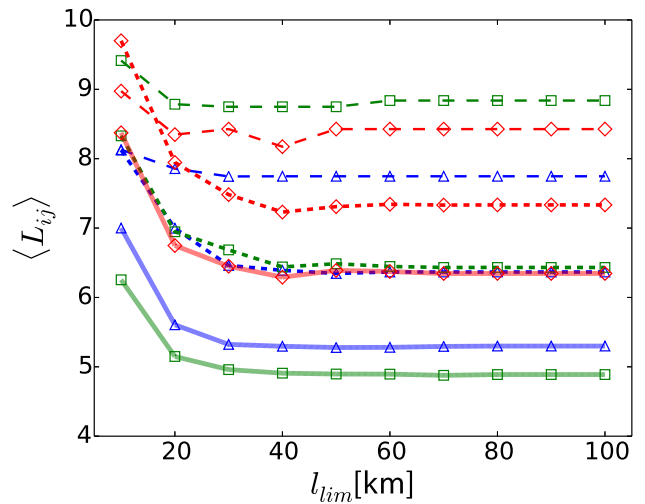


図 17 最大リンク長  $l_{lim}$  に対する最小ホップ数の平均  $\langle L_{ij} \rangle$

Fig. 17 Average of minimum number of hops  $\langle L_{ij} \rangle$  to length of the longest link  $l_{lim}$ .

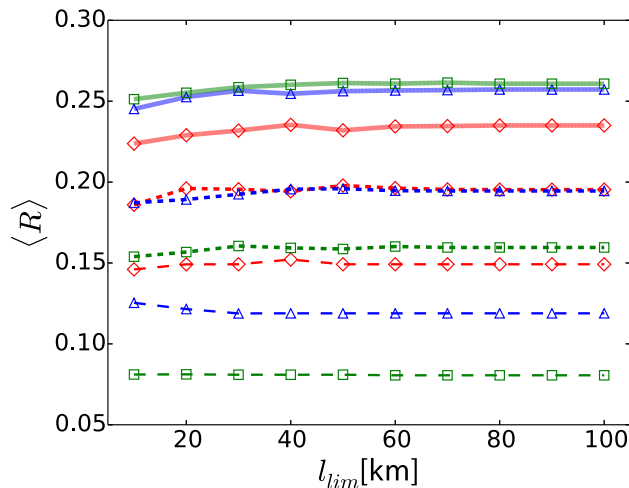


図 16 最大リンク長  $l_{lim}$  に対する頑健性指標  $\langle R \rangle$

Fig. 16 Average of robustness index  $\langle R \rangle$  to length of the longest link  $l_{lim}$ .

表 2 図 16 および図 17 の凡例

Table 2 Legends of Figs. 16 and 17.

$N$	$\delta = 0.3,$	$\delta = 0.5,$	$\delta = 0.9,$
	$p_{sc} = 0.008$	$p_{sc} = 0.022$	$p_{sc} = 0.042$
200	◇ - ◇	△ - △	□ - □
1,000	◇ - ◇	△ - △	□ - □
2,000	◇ - ◇	△ - △	□ - □

クサイズおよび  $\delta$  の値によらず、 $l_{lim}$  が増加しても頑健性はほとんど上がらない。実験結果から、10 km より長いリンクは、高い頑健性の実現に対し、影響が小さいことが分かる。

図 17 に  $l_{lim}$  に対する最小ホップ数の平均  $\langle L_{ij} \rangle$  を示す。凡例を表 2 に示す。 $l_{lim} \sim 20$  までは  $\langle L_{ij} \rangle$  が下がるが、 $l_{lim} > 20$  [km] ではほとんど下らない。実験結果では、20 km より長いリンクは効率性に対し、影響が小さい。

今回の実験では、提案モデルを埋め込む空間の広さに制

限があるため、最大のノード間の距離にも上限がある。そのため、長い距離のリンクの効果が強く現れないと考えられる。また、実際の情報ネットワークの拡張も広さが決められた空間で行われると思われる。したがって、構築できるリンク距離を制限しても、制限がないときと同等の頑健性および効率性を実現できることは、技術的・経済的な観点から重要である。

## 6. おわりに

現実の情報ネットワークでは、拡張しながら、高い効率性および頑健性の実現が求められる。本論文では、上記の目的のために、どこにノードを配置すべきか、また、どのノード間にリンクを構築すべきかを試すシミュレーションモデルを提案した。提案モデルは、以下の手順で構成される：(1) 地域の人口分布メッシュデータ上の GMSQ を用いたノード配置、(2) GMSQ のリンク構造に沿った新規ノードの接続、(3) Hayashi のモデル [13] に基づくリンク生成。

GMSQ は面を再帰的に分割するため、既存ノードの配置を変更することなく、新規ノードを追加できる。この性質は現実の情報ネットワークの拡張においても大きな利点である。各メッシュはユークリッド距離で最も近いノードに通信を要求する。このとき、各ノードに対し、通信を要求する全メッシュの総人口を、そのノードのカバー人口とする。

実際の情報ネットワークの拡張は道路網に沿って進むと想定される。それに対し、文献 [9] から、GMSQ のリンク構造は道路網に類似しているものと考えられる。そこで、提案モデルは、GMSQ を、人口分布を反映した仮想的な道路網のデータとして、GMSQ のリンク構造に沿って成長する仕組みを導入した。提案モデルでは、ネットワーク全体でできるだけ多くの人口をカバーするために、カバー

人口が最も多いノードを最優先で提案モデルに接続する。実際の人口分布メッシュデータを用いた数値実験の結果では、GMSQ のノード全体の 17%で、人口メッシュデータの 40%をカバーできた。

次に、成長しながら頑健性を強化する Hayashi のモデル [13] に基づくリンク生成法を導入した。高い頑健性を持つネットワークは高い次数相関を持つことが知られている。文献 [13] は、近い次数を持つノード間を高い確率で接続することで、高い次数相関を実現する。

実験結果では、提案モデルの頑健性はネットワークの成長にともなって高くなることが示された。また、ノードの総数と平均次数が同じになるようにパラメータの組合せを設定したとき、リンクの複写確率が低い方が頑健になった。実験では、平均次数を同じにするため、リンクの複写確率が低いほど、ショートカットリンクの数が増えた。その結果、互いに遠いノード間の接続が増えることで、ネットワークの大域的なつながりが強化されたためだと考えられる。

加えて、効率性を解析するために、最小ホップ数および最短経路長について調べた。最短経路長はどのパラメータの組合せでも同様の傾向を示した。それに対し、最小ホップ数は、リンクの複写確率が低い方が小さくなった。

頑健性および効率性の解析結果から考えると、リンクの複写確率を下げ、ショートカットの本数を増やした方がよいように思える。しかしながら、実際には、ネットワークのサイズによって、要求される頑健性および効率性を実現するパラメータの組合せが変わる。そのため、リンクの複写パラメータとショートカットの追加パラメータの適切な組合せを見つけるのは難しい。

さらに、現実的な設定での提案モデルの性質を調べるために、最大リンク距離を制限した場合の頑健性と効率性を解析した。制限なしの場合の最大リンク距離を基準とすると、同等の頑健性を実現するために必要な最大リンク距離は、10%程度であった。また、同等の最小ホップ数の実現のためには、40%弱であった。リンク距離を制限しても、制限なしのときと同等の性能を実現できることは、リンク構築の技術的・経済的な制約の観点から重要である。

上述の項目とリンク距離との関係の解明は、提案モデルも含め、空間に埋め込まれたネットワークモデルの今後の課題である。また、情報ネットワークのモデルの今後の課題として、カバー人口に基づく通信負荷の分析があげられる。

## 参考文献

- [1] 総務省：平成 27 年度 情報通信白書 第 2 部 第 4 節 (1) ユビキタスから IoT へ、入手先 (<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/nc254110.html>)。
- [2] 総務省：電気通信サービスの事故発生状況（平成 27 年度）、入手先 ([http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000431566.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000431566.pdf))。
- [3] 情報通信審議会：情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会報告 (案) 1-3 高速無線伝送システムの利用イメージと需要動向, pp.7–12 (2014), 入手先 ([http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000283988.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000283988.pdf))。
- [4] 総務省：電気通信事業者のネットワーク構築マニュアル [各論] 1 線路敷設, 入手先 ([http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/japanese/misc/NetWork-Manual/kakuron.html#01](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/japanese/misc/NetWork-Manual/kakuron.html#01))。
- [5] Watanabe, D.: A study on analyzing the grid road network patterns using relative neighborhood graph, *9th Intr. Symp. on OR and Its App.*, pp.112–119 (2010)。
- [6] Hayashi, Y.: Spatially self-organized resilient networks by a distributed cooperative mechanism, *Physica A*, Vol.457, pp.255–269 (2016)。
- [7] Hayashi, Y. and Komaki, T.: Adaptive Fractal-like Network Structure for Efficient Search of Targets at Unknown Positions and for Cooperative Routing, *Int. J. on Adv. in Networks and Services*, Vol.6, No.1&2, pp.37–50 (2013)。
- [8] Hayashi, Y.: Rethinking of Communication Requests, Routing, and Navigation Hierarchy on Complex Networks – for a Biologically Inspired Efficient Search on a Geographical Space, *Networks – Emerging Topics in Computer Science, Chapter 4*, Rezazadeh, A., Momeni, L. and Bilogrevic, I. (Eds.), pp.67–88, iConcept Press (2012)。
- [9] 松久保潤, 林 幸雄：道路網状土台の上で成長する頑健な通信網の構築法, 信学会総合大会, NBS-1-11 (2016)。
- [10] Schneider, C.M. et al.: Mitigation of malicious attacks on networks, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, Vol.108, No.10, pp.3838–3841 (2011)。
- [11] Herrmann H.J. et al.: Onion-like network topology enhances robustness against malicious attacks, *J. Stat. Mech.*, 01027 (2011)。
- [12] Tanizawa, T., Havlin, S. and Stanley, H.E.: Robustness of onionlike correlated networks against targeted attacks, *Phys. Rev. E*, Vol.85, 046109 (2012)。
- [13] Hayashi, Y.: Growing self-organized design of efficient and robust complex networks, *IEEE Xplore Digital Library, SASO, Proc. 2014 IEEE 8th Int. Conf. on SASO*, pp.50–59, DOI: 10.1109/SASO.2014.17 (2014)。
- [14] 日本電業工作：4.9 GHz 帯長距離無線 LAN バックホール機能付き Wi-Fi アクセスポイントを開発, 入手先 (<http://www.den-gyo.com/news/2015/20150521.html>)。
- [15] 総務省統計局, 地域メッシュ統計の特質・沿革, 入手先 (<http://www.stat.go.jp/data/mesh/pdf/gaiyo1.pdf>)。
- [16] Morone, F. and Makse, H.A.: Influence maximization in complex networks through optimal percolation, *Nature*, Vol.524 pp.65–68 (2015)。
- [17] Mugisha, S. and Zhou, H.: Identifying optimal targets of network attack by belief propagation, *Phys. Rev. E*, Vol.94, 012305 (2016)。
- [18] Albert, R. and Barabási, A.-L.: Error and attack tolerance of complex networks, *Nature*, Vol.406, pp.378–382 (2000)。
- [19] Goh, K.-I., Kahng, B. and Kim, D.: Universal behavior of load distribution in scale-free networks, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.87, No.27, 278701 (2001)。
- [20] Wu, Z.-X. and Holme, P.: Onion structure and network robustness, *Phys. Rev. E*, Vol.84, 026116 (2011)。
- [21] Filho, C.I.N.S. et al.: Mandala Networks: Ultra-small-world and highly sparse graphs, *Scientific Reports*, Vol.5, Article number: 9082, DOI: 10.1038/srep09082

(2015).

- [22] Newman, M.E.J. and Barabási, A.-L.: *Networks – An Introduction*, Oxford Univ. Press (2010).
- [23] Danziger, M.M., Shekhtman, L.M., Berezin, Y. and Havlin, S.: *Two Distinct Transitions in Spatially Embedded Multiplex Networks*, arXiv:1505.01688 (2015).



松久保 潤

1976年生。1999年北九州工業高等専門学校専攻科修了。2003年北陸先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。2003年北陸先端科学技術大学院大学COE研究員。2004年北九州工業高等専門学校助手。2015年同校准教授。博士（知識科学）。ネットワーク科学の研究に従事。

授。博士（知識科学）。ネットワーク科学の研究に従事。



林 幸雄（正会員）

1962年生。1985年豊橋技術科学大学卒業。1987年同大学大学院修士課程修了。富士ゼロックス(株)、(株)ATR視聴覚機構研究所および人間情報通信研究所研究員を経て、現在、北陸先端科学技術大学院大学教授。博士（工

学）。ネットワーク科学、情報ネットワークの研究に従事。電子情報通信学会等会員。