

修 士 論 文

地理的ネットワークにおける人口を考慮した
トラフィック特性

指導教官 林幸雄 准教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科

0750011 奥村 浩徳

審査委員： 林 幸雄 准教授（主査）
吉田 武稔 教授
金井 秀明 准教授
橋本 敬 准教授

2009年2月

目次

第1章 はじめに	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究方法	2
第2章 準備	3
2.1 人口メッシュデータの説明	3
2.2 三角形分割と四角形分割のネットワークの作り方	3
2.3 三角形分割と四角形分割のネットワークのメリット	9
2.4 パケットの送受信要求と転送方法	11
第3章 地理空間上のネットワークの基本性質	13
3.1 三角形分割と四角形分割におけるリンクの性質	13
3.2 各エリアの人口の統計的特徴	17
3.3 Stretch Factor	21
第4章 地理空間上の三角形分割と四角形分割のトラフィック特性	24
4.1 各ノードへの人口の割り当て	24
4.2 Betweenness の定義	29
4.3 Link betweenness と Node betweenness の可視化図	30
4.4 Link betweenness と Node betweenness の散布図	48
4.5 ノード数に対する Link betweenness と Node betweenness の相関係数	58
4.6 岐阜ー滋賀エリアの四角形分割の Link betweenness	67
第5章 おわりに	71
5.1 結論と今後の課題	71
参考文献	73
発表論文	75

第 1 章 はじめに

1.1 研究の背景と目的

不慮の故障やテロなどによる意図的な攻撃に対して、お互いに通信が可能なネットワークの連結性を保つ方策は、長年検討されてきた研究課題の一つである。例えば 1960年代前半に米国のポール・バランの考え[1]を基に作られた、自律分散システムとしてのインターネット (ARPANET) は、不慮の故障に対して強い耐性を持つネットワークの 1 つである。しかしながら意図的な攻撃に対しては極端に弱いことが 10年ほど前に明らかになった[2]。このインターネットと同様、現実世界の電力網や空港路線網などの多くのネットワークは、ノードの次数がべき乗則に従うスケールフリー構造となっている[3,4]。べき乗則に従うネットワーク構造を簡単に説明すると、少数のノードの次数が非常に大きく、その他の大多数のノードの次数は小さいというものである。

スケールフリー・ネットワークは、ノード間のホップ数 (あるノードから別のノードに到達するまでに最短で経由するノードの数) がネットワークのサイズ N (ノード総数) に対して $\log N$ 程度と小さく[3,4]、またノードのランダム故障に対して非常に大きな耐性を示すという利点を持つ[2,5]。このようなメリットが得られる理由としては、ハブを経由するとノード間のパス長が短くなる事、また、ランダムな故障が起きたとしても、ほとんどの場合は少ないリンクのノードが壊れるので全体の連結性にさほど大きな影響を及ぼさない事が挙げられる。反面、先に述べたような欠点も存在し、少数のハブが潰れるだけでネットワークの連結性が失われ、ネットワーク全体が機能不全に陥る[2,5,6]。

近年、母関数解析によるパーコレーション理論という数学的・統計物理学的な手法により、①ランダムな故障にも意図的な攻撃にも強いネットワークモデルは、2種類の次数を持つ ($O(\sqrt{N})$ 程度のハブと数本くらいで結合した低次数ノードで構成される) ものであることが分かった[6]。一方、地理空間上でネットワーク構造を考えると、②コスト等のかかる長距離リンクが少なく、③電波干渉の原因となるリンクの交差がないなど、別の側面からネットワークの構築方法を考えなければならない。そこで、これら 3 点を踏まえたネットワークモデルが提案されている[7,8,9]。

さらに、現実世界においてそれらの地理的ネットワークを構築・運用する際、ノ

ド間で転送物（本研究ではパケット）のやりとりが行われる。その際、一般に単純なモデル化のために仮定されているランダムなパケットの送受信要求[13,14,17]に対して、人口に応じた確率でパケットの送受信要求が発生する場合に、ネットワークがどのようなトラフィック特性を示すのかをコンピューターシミュレーションによって解明することが本研究の目的である。

1.2 研究方法

当研究室で開発された **Java** 言語によるネットワーク分析用ツール `net_analysis`[10]をベースとして、文献[7,8]で提唱されている地理的ネットワークを、国内の4つのエリアの人口メッシュデータ(第2章 2.1 節で説明)に対して生成する。まず、ネットワークのトポロジーに関する基本的性質としてリンク長の分布などを調べ、次に、パケット転送によるリンクやノードへの負荷に関するトラフィック特性を、シミュレーションによって分析する。これらの結果から、人口がパケット転送に与える影響を明らかにする。

第2章 準備

2.1 人口メッシュデータの説明

本研究では、(財) 統計情報研究センターから提供されている、金沢ー福井エリア、岐阜ー滋賀エリア、名古屋エリア、京阪神エリアの4種類の人口メッシュデータを扱う。各メッシュデータがどのようなものかを説明すると、一辺の長さが80kmの正方形を縦と横にそれぞれ8等分し、その各正方形をさらに縦横それぞれ10等分し、そうしてできた正方形を最後に4等分した小さな正方形(これをブロックと呼ぶ)にどれだけ人口が存在するか数値として表したものである。分割の仕方より、人口メッシュデータには $8^2 \times 10^2 \times 4 = 25600$ 個のブロックが存在することになる。

2.2 三角形分割と四角形分割のネットワークの作り方

以下、文献[7,8]で行われている、地理空間上の三角形(四角形)分割のネットワークの作成方法を説明する。

Step1. 人口メッシュデータ上に初期の正三角形(正方形)を配置する。この状態を $t=0$ とする。

Step2. 各正三角形(正方形)が占める領域の人口に応じた確率で、正三角形(正方形)を一つ選ぶ。

Step3. 図 2.1.1~8 のように選んだ正三角形(正方形)を分割する。分割の仕方は正三角形(正方形)の各辺の midpoint に新しいノードを作成して、それらを辺で結ぶというものである。

Step4. Step2,3 を $t=t+1$ として、ノード数 $N(t)$ が一定になるまで繰り返す。

次項から示す図 2.2.1~4 は、2.1 節で説明した4つのエリアの人口メッシュデータのそれぞれに対して、上記の方法でノード数が100(正確には三角形分割が成り立つような100に近い値)になるまで分割を繰り返した際のネットワークの例である。こ

ここで、毎時刻 t において、1つの正三角形が4つに分割され、リンクは3本追加されるが、リンク上に存在するノードは既に隣接する三角形のものである場合があるので、ノードは平均的に2～3個追加される。(これが、ノード100個でちょうど三角形分割が行われるとは限らない理由である。)

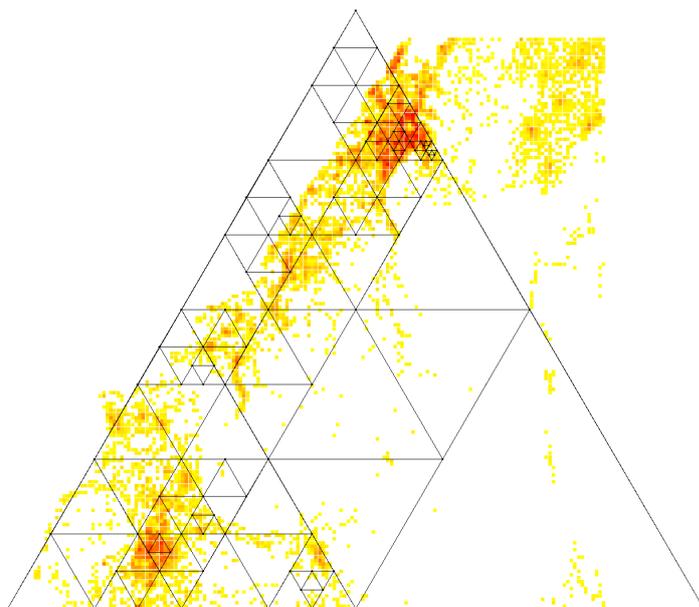


図 2.2.1 金沢ー福井エリアにおける三角形分割ネットワーク

初期の正三角形の一辺の長さは 96.8km であり、金沢市と福井市を含むように配置した。各ブロックの色について、白の時は人口が存在せず、薄い黄色の時は人口が少なく、濃い赤の時は人口が多い。また左上の白い部分は日本海を、右下の白い部分は白山麓を表している。(辺の長さについては図 2.2.4 まで同様。)

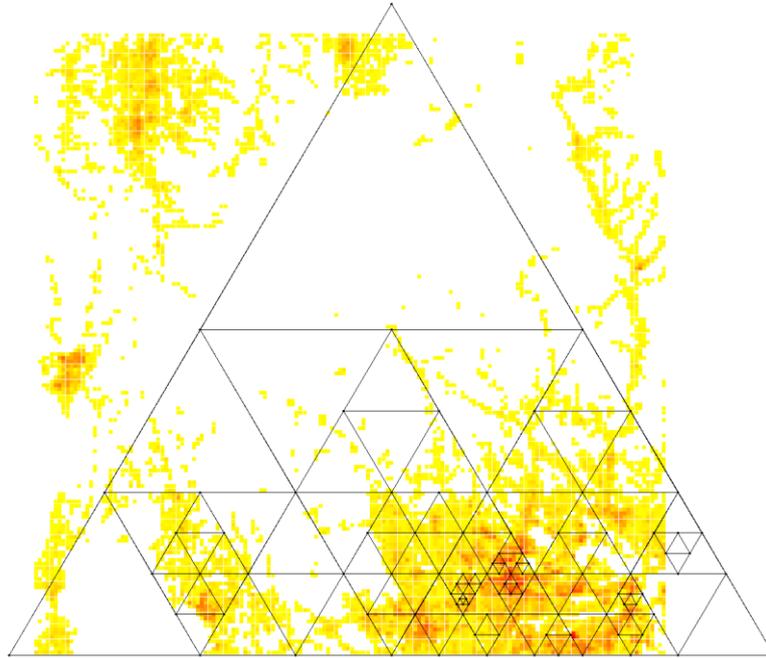


図 2.2.2 岐阜ー滋賀エリアにおける三角形分割ネットワーク

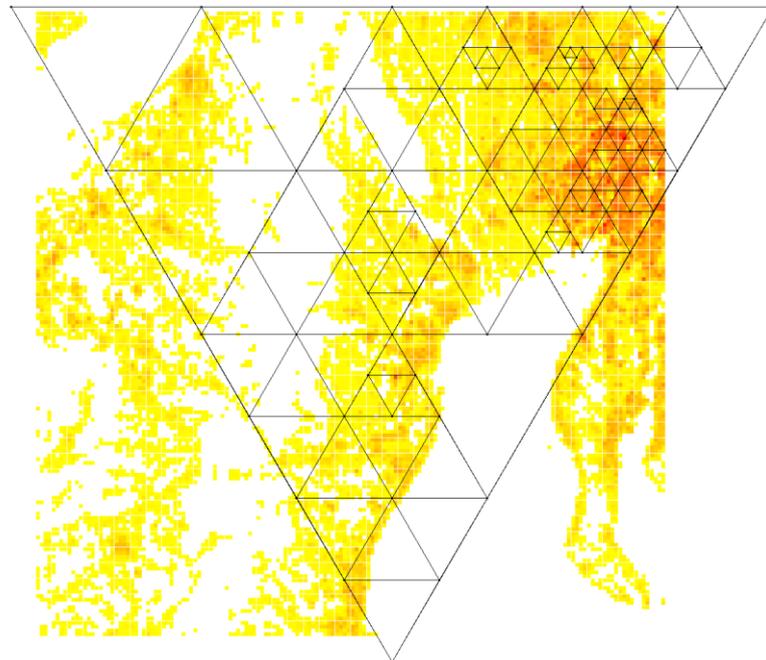


図 2.2.3 名古屋エリアにおける三角形分割ネットワーク

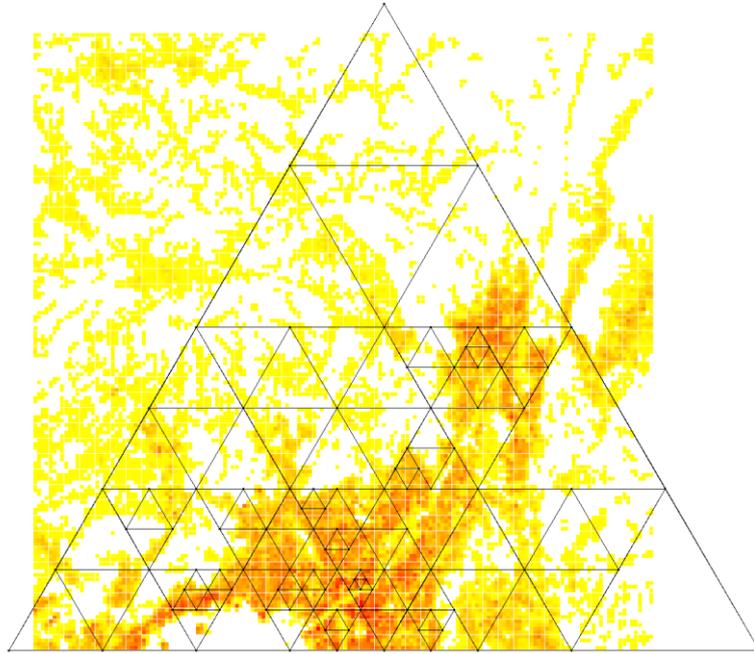


図 2.2.4 京阪神エリアにおける三角形分割ネットワーク

四角形分割のネットワークも三角形分割と同様の手順で作成するが、Step.3において、選んだ正方形の中心にもノードを配置する点が異なる。

図 2.2.5~8 は各エリアにおいてノード数が 100 になるまで、四角形分割を繰り返した際のネットワークの例である。

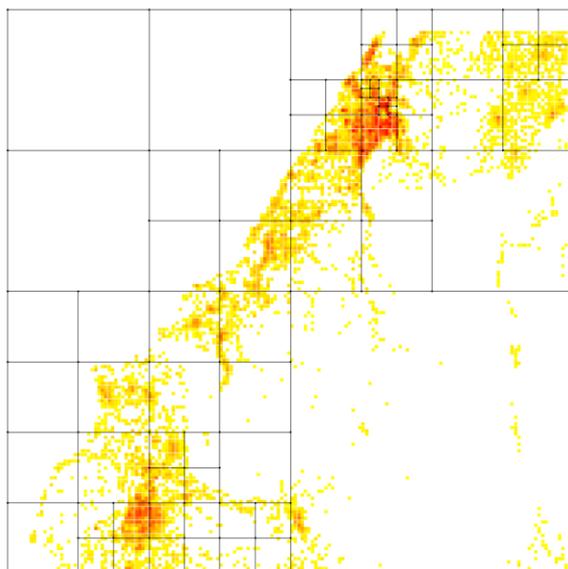


図 2.2.5 金沢ー福井エリアにおける四角形分割ネットワーク

初期の正方形の一辺の長さは 83.6km である。これは三角形分割のネットワークにおける、初期三角形の一辺の長さよりも短い。

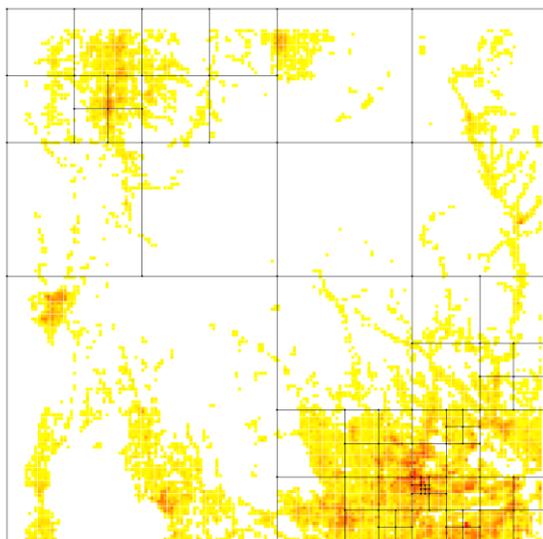


図 2.2.6 岐阜ー滋賀エリアにおける四角形分割ネットワーク

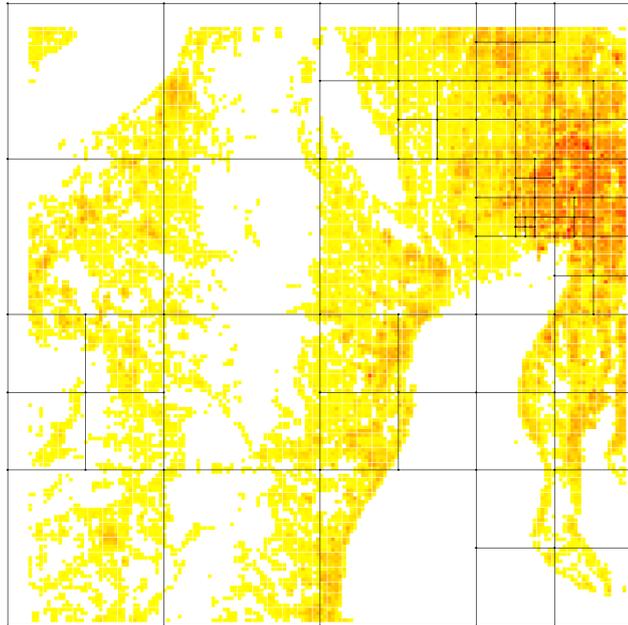


図 2.2.7 名古屋エリアにおける四角形分割ネットワーク

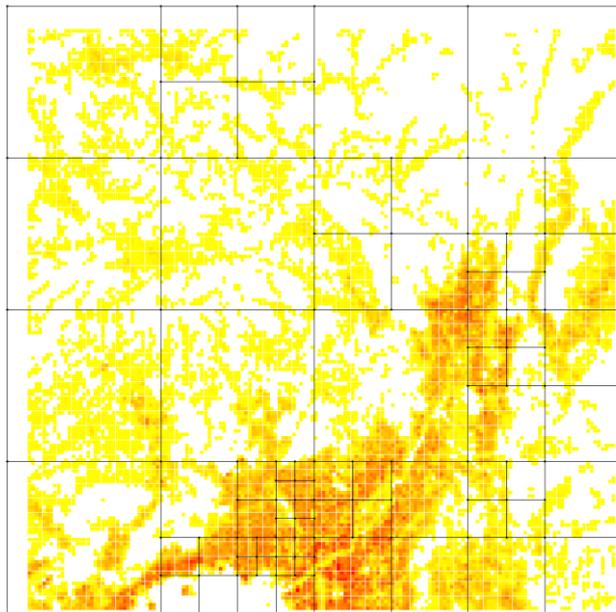


図 2.2.8 京阪神エリアにおける四角形分割ネットワーク

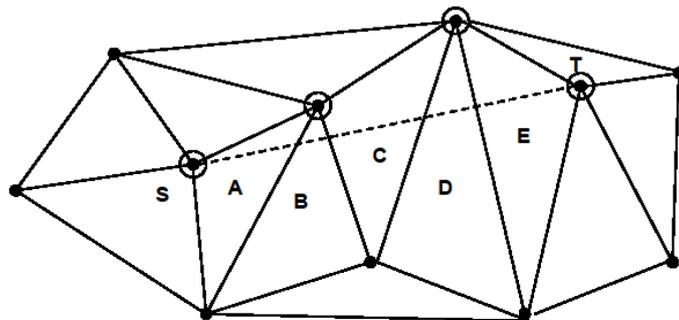
2.3 三角形分割と四角形分割のネットワークのメリット

2.2 節で示したように三角形分割と四角形分割によるネットワークの生成方法は比較的単純だが、次の①～④に挙げるようにネットワーク自体は様々な良い性質を持っている。

①平面グラフであること

三角形分割と四角形分割のネットワークは2次元平面に埋め込まれた、リンクの交差のないものである。これは電波の干渉が起こらないという点で都合が良い。さらに、図 2.3.1 のように **Face Routing** として、パケット転送の始終点として2つのノード **S** と **T** を結ぶ直線が交わる面 (**A,B,C,D,E**) の縁の中から、隣接ノードの位置に関する局所的な情報のみを用いて必ず距離の最短経路を見つけ出す事ができる[11]。図 2.3.1 の例では白丸のパスが最短となる。(平面グラフでない一般の場合は、最短経路を求めるには、ネットワークの全域的な情報が必要となる。)

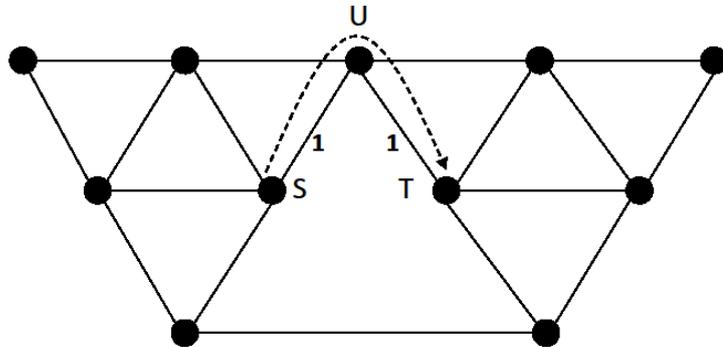
図2.3.1 平面グラフにおけるFace Routing



②t-spanner 性

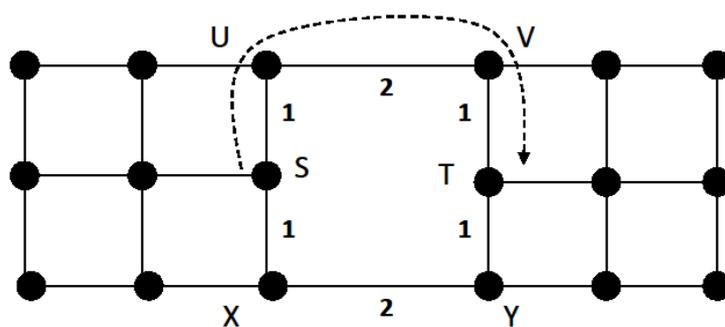
部分グラフ G' における任意のノードペア間の最短のパス長和としてのユークリッドの距離が、元のグラフ G の最短パス長和の t 倍以下で抑えられるとき、 G' は G の **t-spanner** と呼ばれる[12]。 G として完全グラフを考えたとき、最短パスは直線となり、三角形分割と四角形分割のネットワーク G' においては t の値が 2 である。

図2.3.2 三角形分割でStretch Factorの上限値が2となる例



三角形分割の場合において最もパスが遠回りをしないといけない場合について、上図において S と T の直線距離は 1 なので、ネットワーク上での S と T の最短経路はノード U を通るもので、その値は S と U、U と T の距離を合わせて 2 となる。よって t の値は $2 \div 1 = 2$ となる。(Stretch Factor の定義は 3.3 節で述べる)

図2.3.3 四角形分割でStretch Factorの上限値が2となる例



四角形分割も同様に、上図において S と T の直線距離は 2 なので、ネットワーク上での最短経路の距離は 4 となって (ノード U と V、またはノード X と Y と通るルート)、 t の値は $4 \div 2 = 2$ となる。三角形分割と四角形分割のネットワークにお

いて、2つのノード間の直線距離に対してネットワーク上の最短パスでどのくらい遠回りをしなければいけないかについては、Stretch Factor の分布から、3.3 節で述べる。

③平均リンク長

三角形分割と四角形分割のネットワークでは分割が行われるたびに、リンクの長さが $1/2$ になっていく。そして人口メッシュデータ上での分割を考えた場合、人口が密集している箇所を集中して分割するので、短いリンクが多くできるようになる。よって、初期の三角形または四角形の一边の長さに対して、平均リンク長はかなり小さくなる。これについては 3.1 節で具体的に値を調べる。

④次数が3種類

三角形分割のネットワークに存在するノードの次数の種類（モード）は、2か4か6の3個となっている。同様に四角形分割の場合のモード数は、2か3か4の3個である。文献[5,6]によると、ランダムな故障にも意図的な攻撃にも強いネットワークに存在できるモードの臨界値 m_c は理論的に、ネットワークのノード数 N とノードの平均次数 $\langle k \rangle$ から $m_c = 1 + (0.62 \langle k \rangle - 1.0) \log_{10} N$ と得られる事が分かっている。第3章 3.1 節の表 3.1.1~2 より三角形分割と四角形分割のネットワークの、ノード数 1000 と 100 の場合の平均次数が分かり（ $\langle k \rangle$ は総リンク数を2倍して N で割ることに注意）、その結果3種類のモード数というのは、ノード数 1000 の場合も 100 の場合も分割の仕方に関わらず臨界値 m_c を下回っている事が分かる。よってこれらのネットワークはランダムな故障にも意図的な攻撃にも強いというメリットを持つ。

2.4 パケットの送受信要求と転送方法

第4章において、三角形分割と四角形分割のネットワーク上でパケットの転送シミュレーションを行うが、ここで簡単にその手順を述べておく。

1)パケットに対するノードの送受信要求は一般的な一様ランダムな場合と、各ノードの受け持つ人口に応じた確率に応じたものと分けて考える。（ノードの受け持つ人口というのは、各ブロック内に存在する人口を最も近いノードに割り振った時の値である。）こうすることによって、ネットワークのトポロジーだけでなく、人口の影響も

取り入れたトラフィック特性が明らかになる。

2)各パケットは互いに干渉せず独立に動く。現実世界ではノードの処理能力に限界があったり、ノードにキュー（先に入ったパケットが先に出る並び）やスタック（後から入ってきたパケットが先に出る並び）が存在したりするが、まずはネットワークの基本的なトラフィック特性を知る為にこのような設定にした。尚、ノードにおけるキューやスタックを考えて、ネットワークがどの程度混雑するかについての研究は近年活発に行われている[13,14]。

3)各パケットはパスのユークリッド距離またはホップ数に基づく最短経路をそれぞれ通る。本研究では、ダイクストラ法によりこれらを求めているが、最短経路以外の確率的なルーティングを含めて、限られた情報だけでパケットを目的地まで届けるアルゴリズムも考えられている[15,16,17]。

第3章 地理空間上のネットワークの基本的性質

3.1 三角形分割と四角形分割におけるリンクの性質

総リンク数について

地理的なネットワークにおいては、ノード数 100 とノード数 1000 の場合において、ネットワークにどれだけのリンクが存在するかを調べた。リンク長が多いほど、実際のネットワークを構築する際の設置・運用コストが大きくなることに注意する。シミュレーションは 100 回行い、得られたリンク数の平均をとった。

	三角形分割	四角形分割
金沢－福井エリア	223.33	169.36
岐阜－滋賀エリア	225.94	170.12
名古屋エリア	225.52	170.97
京阪神エリア	226.71	171.19

表 3.1.1 三角形分割と四角形分割の総リンク数(ノード数 100)

	三角形分割	四角形分割
金沢－福井エリア	2320.53	1734.29
岐阜－滋賀エリア	2331.33	1724.33
名古屋エリア	2334.43	1742.59
京阪神エリア	2336.48	1738.90

表 3.1.2 三角形分割と四角形分割の総リンク数(ノード数 1000)

まず表 3.1.1 と 3.1.2 から分かるのは、ノード数に対してリンク数が極端に大きな値にはならないという事である。リンク数に対するノード数は、三角形分割の場合には 2.2~2.3 倍、四角形分割の場合には 1.7 倍程度となっている。これはノード数が 100 でも 1000 でもほぼ同じである。

また三角形分割と四角形分割のネットワークで、総リンク数に違いが出てくるのは、

三角形分割ネットワークでは初期の正三角形を作る3点の次数が**2**で、それ以外の頂点の次数が**4**か**6**になるのに対して、四角形分割ネットワークでは初期の正方形を作る4点の次数が**2**で、それ以外の頂点の次数は**3**か**4**になるからである。

リンクの長さの分布

地理空間上のネットワークでは、コストのかかる長距離リンクは多く存在しないと考えるのが自然であるし、現実のインターネットや航空路線ネットワークでもその事が確認されている[18,19]。

そこで、三角形分割と四角形分割のネットワークがそうした性質を満たしているかどうかを調べるために、初期に設置した三角形および四角形の一辺の長さを1として、リンクの長さの分布と平均リンク長を求めた。シミュレーションは100回を行い、それぞれ平均を取った。

図 3.1.3~6 は、各エリアのネットワークのリンク長の分布図である。横軸 Length がリンク長、縦軸 $P(L)$ が存在確率を表している。埋め込まれた図は縦軸を対数にしたもので、これは三角形分割と四角形分割のネットワークのリンク長の分布が、いくつかの現実のネットワークのリンク長分布に見られる Waxman の規則[20]に従うように、ほぼ指数的に減衰している事を示している。

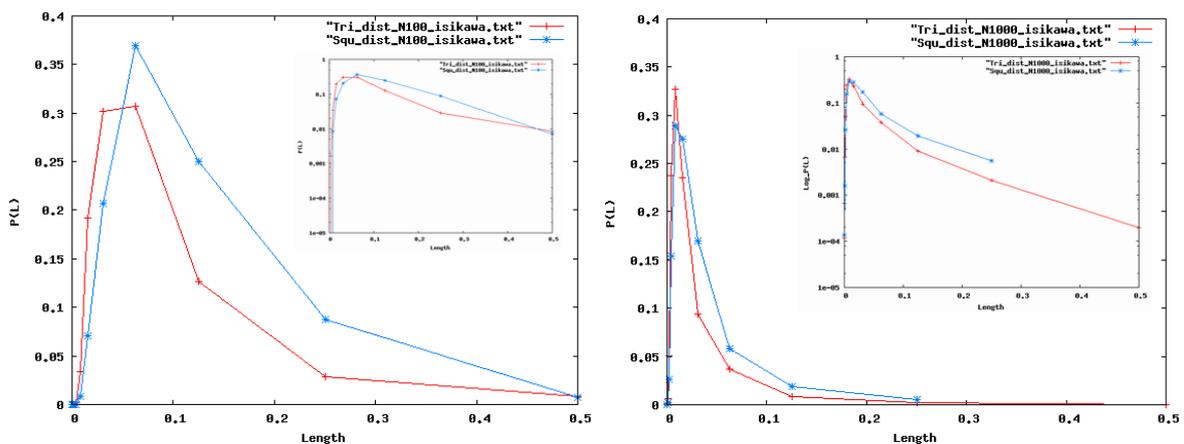


図 3.1.3 金沢一福井エリアにおける三角形分割と四角形分割のリンク長分布図(左側が $N=100$, 右側が $N=1000$ 。赤い線が三角形分割、青い線が四角形分割を表す。以降、図 3.3.4 まで同様。)

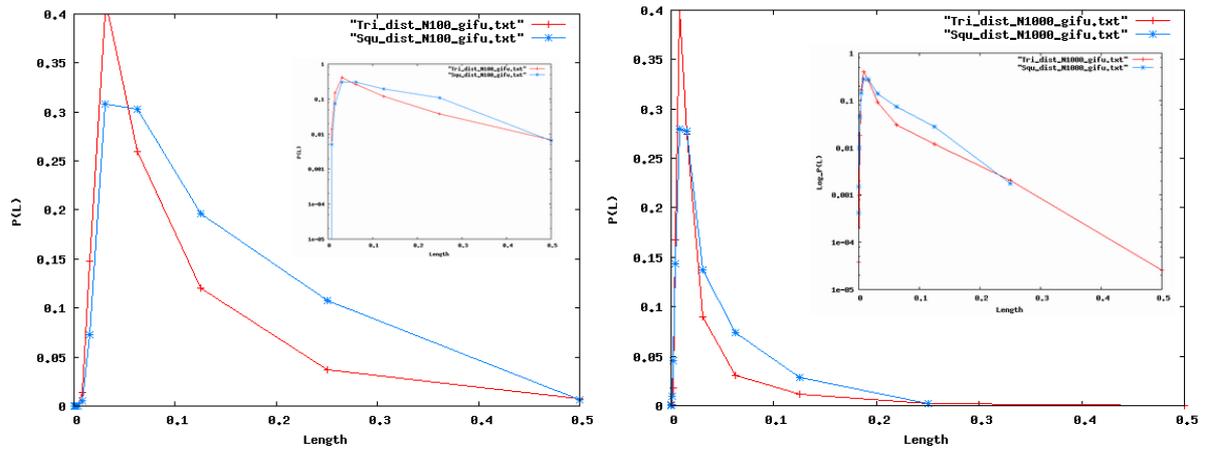


図 3.1.4 岐阜—滋賀エリアにおける三角形分割と四角形分割のリンク長分布図

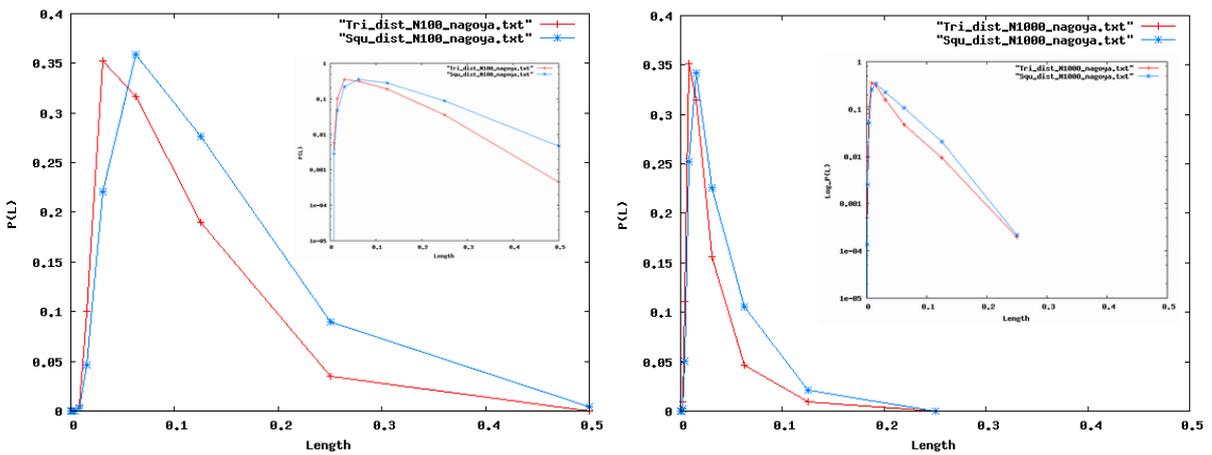


図 3.1.5 名古屋エリアにおける三角形分割と四角形分割のリンク長分布図

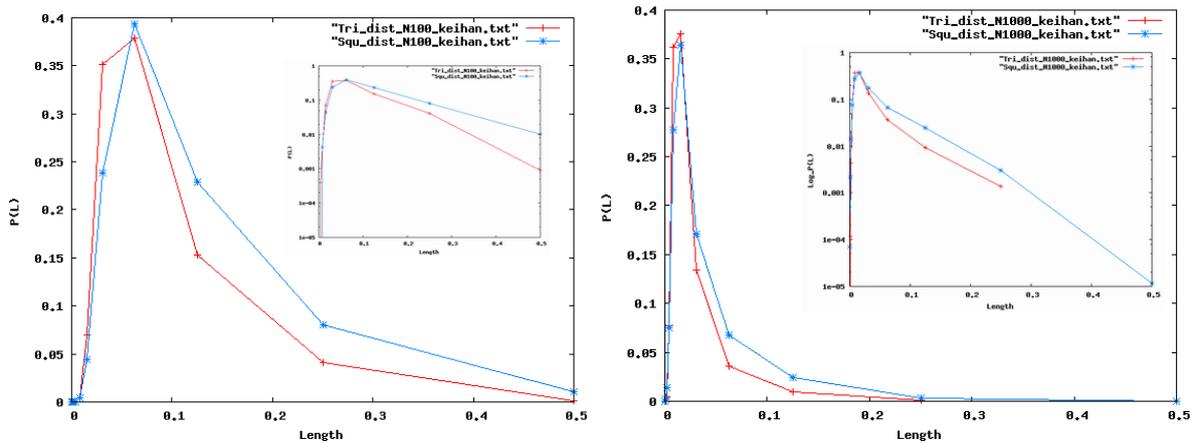


図 3.1.6 京阪神エリアにおける三角形分割と四角形分割のリンク長分布図

リンクの長さの平均値

図 3.3.3~6 に対して、各エリアにおける三角形と四角形分割のリンクの長さの平均値を求めて表にまとめた。ノード数は 100 と 1000 について、シミュレーションを 100 回行った。

	三角形分割	四角形分割
金沢ー福井エリア	0.05908	0.08735
岐阜ー滋賀エリア	0.05941	0.08455
名古屋エリア	0.06517	0.08932
京阪神エリア	0.06563	0.08655

表 3.1.3 三角形分割と四角形分割の平均リンク長(ノード数 100)

	三角形分割	四角形分割
金沢ー福井エリア	0.01425	0.01995
岐阜ー滋賀エリア	0.01484	0.02007
名古屋エリア	0.01716	0.02381
京阪神エリア	0.01697	0.02158

表 3.1.4 三角形分割と四角形分割の平均リンク長(ノード数 1000)

上記の 2 つの表より、リンクの長さの平均値は、全エリアで分割の仕方に関わらず小さい事が分かる。これはネットワークにおける整備のコストや電波の減衰を考える際に大きなメリットとなる。ノード数 100 の場合に、四角形分割の平均リンク長の方が三角形分割よりも大きくなっているのは、内部により多くのブロックを含んでおり(次節で補足説明する)、分割対象となる箇所が増えるからである。またノード数が大きくなり、より細分が行われると、短いリンクが出来るので平均リンク長の値は小さくなる。

エリアによる平均リンク長の値の違いはほとんどないが、名古屋エリア、京阪神エリアの方が、他の 2 つのエリアよりも若干大きくなっている。これは、人口の多い箇所がネットワーク内部に複数あると、どこかに集中した細かな分割が行われなくなり、その結果短いリンクの数が減るからである。実際に、三角形分割と四角形分割の各エリアの図 2.1.1~8 を見れば、そうになっている事が確認できる。(具体的な人口のばらつきは次節で求める。)

3.2 各エリアの人口の統計的特徴

初期三角形および四角形に囲まれるブロックの順位付け

三角形分割と四角形分割のネットワークにおいてそれぞれ、初期の三角形と四角形内部の各ブロックに対して、人口の多いものから順にランク付けして、人口のばらつきがどのようになっているかを調べた。これは、第4章において各ノードへ人口の割り振りをする際に、ノードの受け持つ人口の最大値や平均値との対応付けをする為である。各ブロックが初期三角形および四角形の内部に含まれるかどうかは、ブロックの中心点の位置で判断している。

図 3.2.1~8 は縦軸 Population が各ブロックに存在する人口数、横軸 Rank が順位を表している。また埋め込まれた図は縦軸を対数にとったものであるで、どのエリアでも人口が極端に少ない (Rank 値の大きい) テールの部分を除いて、ほぼ指数的な減衰を示している事が分かる。尚、人口の存在していないブロックには順位を付けていない。

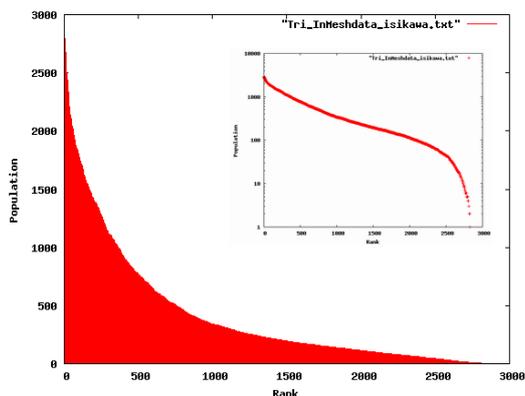


図 3.2.1 金沢ー福井エリアにおける初期三角形内部のブロックの人口順位(Max:2917;Min:1)

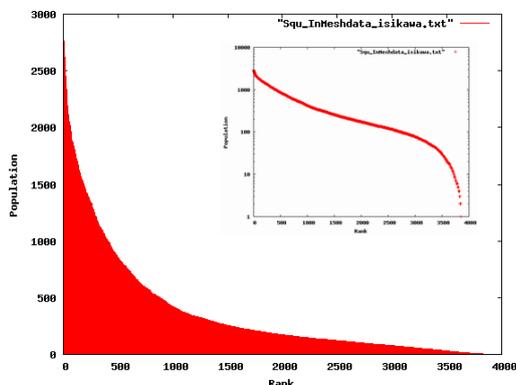


図 3.2.2 金沢ー福井エリアにおける初期四角形内部のブロックの人口順位(Max:2917;Min:1)

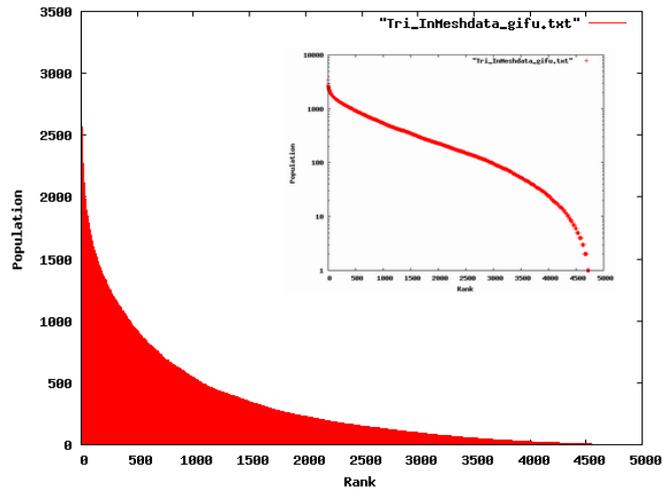


図 3.2.3 岐阜—滋賀エリアにおける初期三角形内部のブロックの人口順位(Max:3432,Min:1)

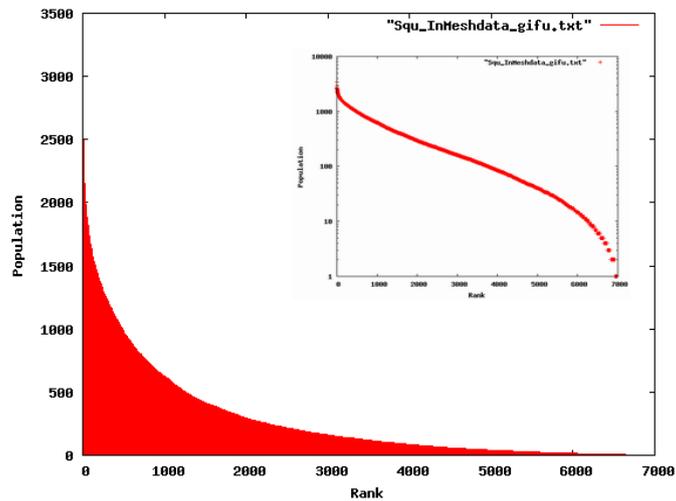


図 3.2.4 岐阜—滋賀エリアにおける初期四角形内部のブロックの人口順位(Max:3432,Min:1)

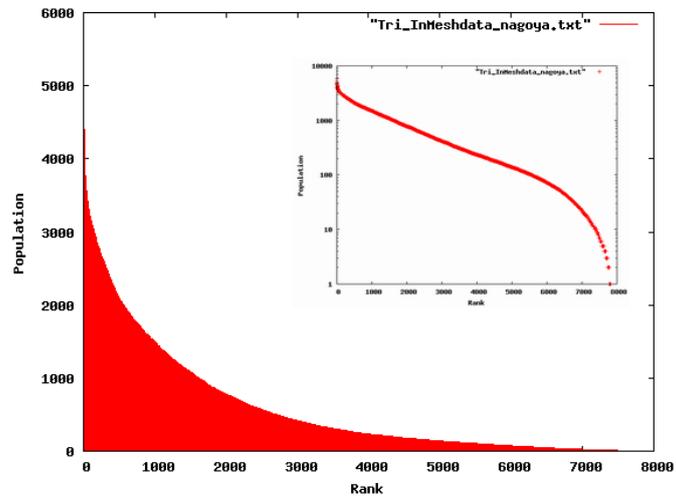


図 3.2.5 名古屋エリアにおける初期三角形内部のブロックの人口順位(Max:5906,Min:1)

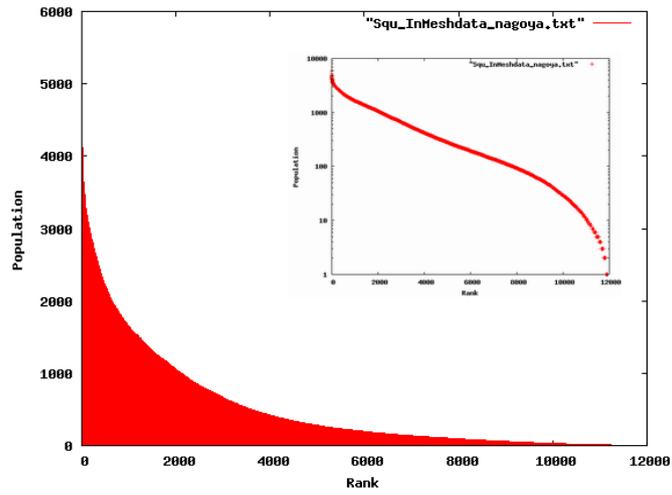


図 3.2.6 名古屋エリアにおける初期四角形内部のブロックの人口順位(Max:5906,Min:1)

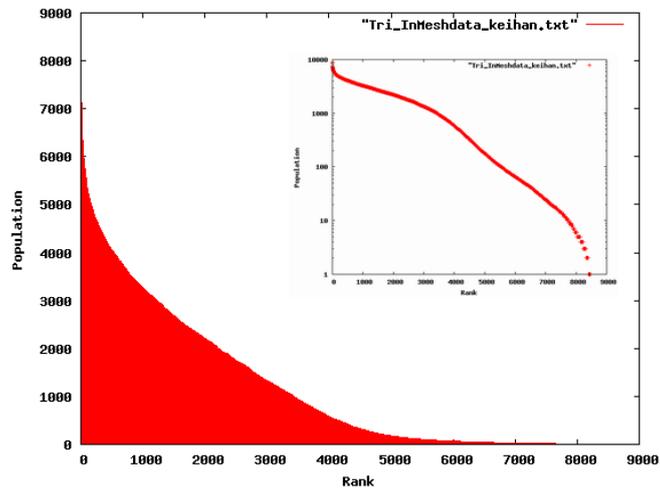


図 3.2.7 京阪神エリアにおける初期三角形内部のブロックの人口順位(Max:8811,Min:1)

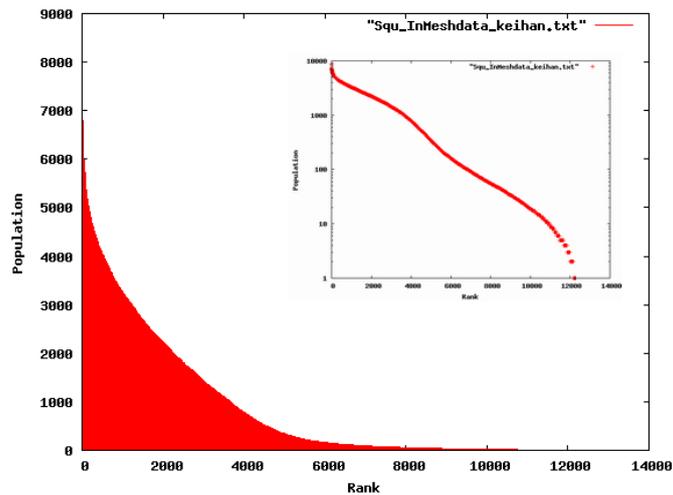


図 3.2.8 京阪神エリアにおける初期四角形内部のブロックの人口順位(Max:8811,Min:1)

初期の三角形及び四角形に囲まれるメッシュのブロック数と総人口数

図 3.2.1~8 において、人口のばらつきが各エリアでどのように変化するかを見たが、三角形分割と四角形分割では内部に含まれるブロック数が違うにも関わらず、同じエリアでの人口のばらつきは小さい。それは初期三角形の3点を配置する際に人口密集箇所を多く含むように人為的に位置を調節したからであるが、その事を具体的に数値で確認するために、各エリアにおいて、三角形分割と四角形分割の外枠の内部にどれだけ数のブロックと人口が含まれているかを調べた。

	三角形分割	四角形分割
金沢－福井エリア	15520	25600
岐阜－滋賀エリア	15520	25600
名古屋エリア	15328	25600
京阪神エリア	15520	25600

表 3.2.1 三角形分割と四角形分割の内部ブロック数

	三角形分割	四角形分割
金沢－福井エリア	1195051	1441374
岐阜－滋賀エリア	1609225	1951606
名古屋エリア	4601890	6061350
京阪神エリア	10175527	10940558

表 3.2.2 三角形分割と四角形分割の内部総人口数

表 3.2.1 では、各エリアにおいて、三角形分割と四角形分割の外枠に対する内部のブロック数は 10000 程度違っている事が分かる。(三角形分割の名古屋エリアの値が他のエリアと違うのは、初期三角形を逆に設置した為である。)

表 3.2.2 では、三角形分割と四角形分割の内部人口総数は大きく違わない。これは初期の三角形を配置する際に、人口の密集している箇所を内部に多く含むように3点の位置を調整したからである。従って、各分割のエリアごとに内部ブロック数の違いはほとんどないが、内部総人口数には違いがある事には注意すべきである。この事は、第4章の4.1節で議論する。

3.3 Stretch Factor

地理的ネットワーク上の異なる2個のノード間の直線距離に対して、距離とホップ数に基づくパスが遠回りをしなければいけないという状況は、パケット転送のコストと都合が悪い。一方、第2章で述べたように三角形分割や四角形分割のネットワークは、最大でもノード間の直線距離の2倍で、互いに行き来できる良い性質を持っている。以下、Stretch Factor という値:STF を定義して、その性質をもう少し詳しく述べる。

$$STF = \frac{d_{short}}{d_{direct}}$$

ここで d_{short} はネットワーク上における異なる2頂点のリンク長の和としての距離、 d_{direct} はその2頂点を結ぶ直線のユークリッド距離である。STF の最小値は1で、その場合は2頂点の直線距離と、ネットワーク上のルーティングのパス長が同一となる。一方、この値が大きいほど、ネットワークの異なる2頂点間の直線距離に対して、ルーティングのパス長は長くなる。

ノード数100と1000の場合で、各エリアにおける三角形分割と四角形分割ネットワークのStretch Factorの分布状況を図3.3.1~4に示す。縦軸P(STF)が存在確率、横軸STFがStretch Factorの値で区間は0.05刻みとした。シミュレーションは100回行い、平均値をとった。

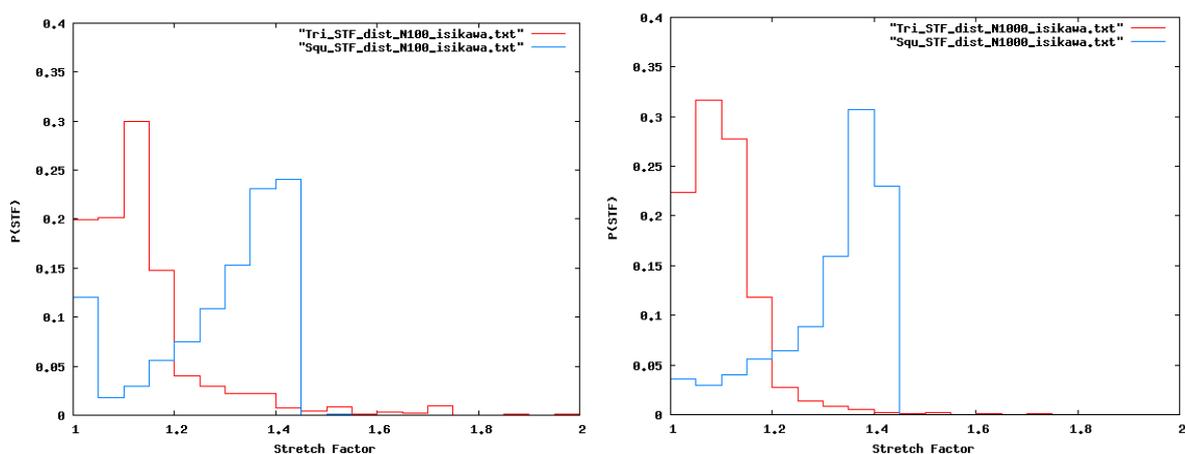


図 3.3.1 金沢一福井エリアにおける Stretch Factor の分布のヒストグラム(左側が N=100, 右側が N=1000。赤い線が三角形分割, 青い線が四角形分割を表す。以降図 3.3.4 まで同様。)

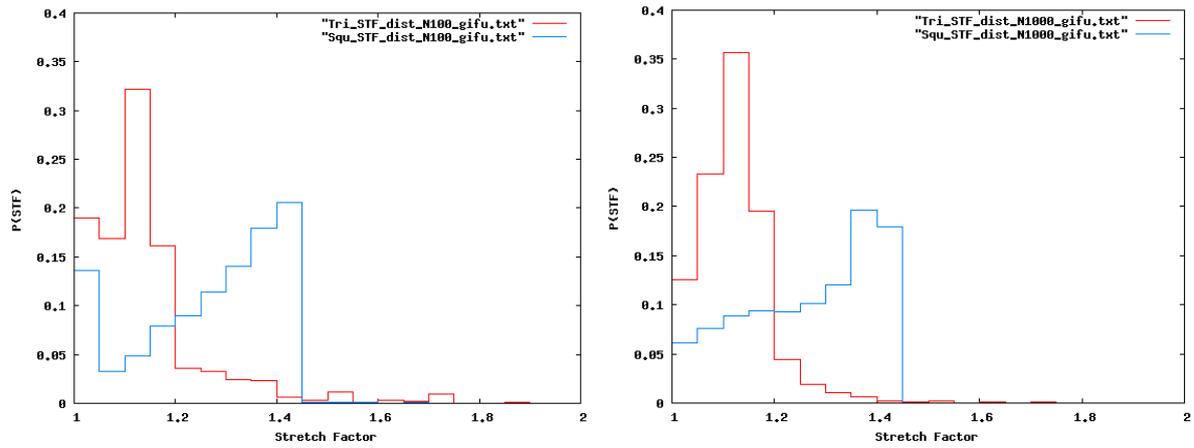


図 3.3.2 岐阜—滋賀エリアにおける Stretch Factor の分布のヒストグラム

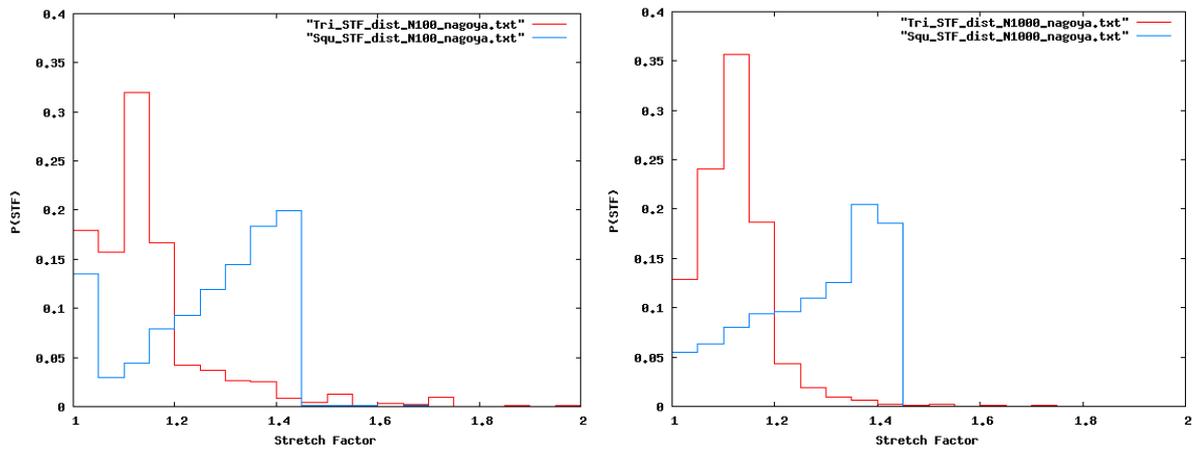


図 3.3.3 名古屋エリアにおける Stretch Factor の分布のヒストグラム

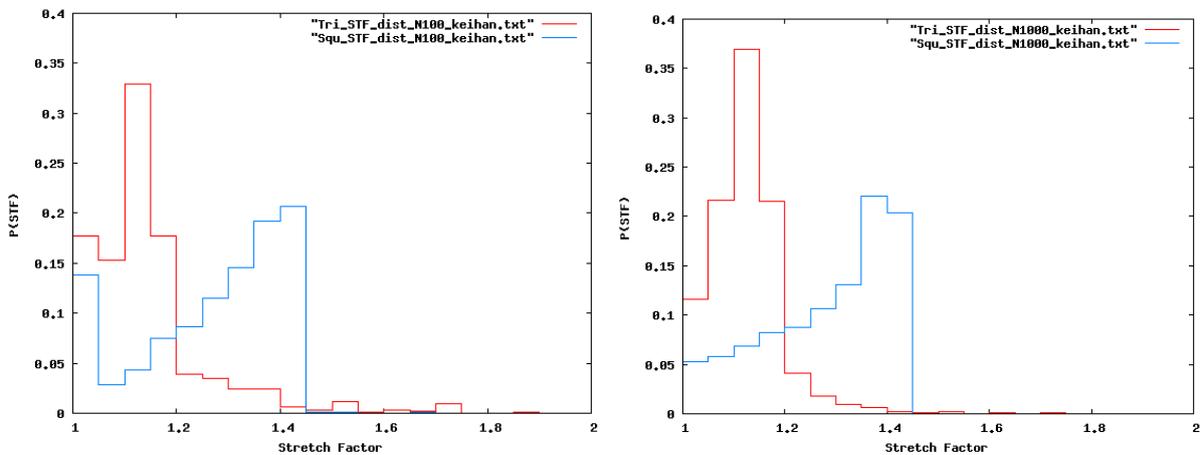


図 3.3.4 京阪神エリアにおける Stretch Factor の分布のヒストグラム

各エリアにおける三角形分割と四角形分割ネットワークの STF の平均値

	三角形分割	四角形分割
金沢－福井エリア	1.136	1.287
岐阜－滋賀エリア	1.141	1.264
名古屋エリア	1.148	1.265
京阪神エリア	1.144	1.267

表 3.3.1 三角形分割と四角形分割ネットワークの STF の平均値(ノード数 100)

	三角形分割	四角形分割
金沢－福井エリア	1.104	1.315
岐阜－滋賀エリア	1.124	1.267
名古屋エリア	1.123	1.274
京阪神エリア	1.126	1.283

表 3.3.2 三角形分割と四角形分割ネットワークの STF の平均値(ノード数 1000)

表 3.3.1 と 3.3.2 から、全てのエリアにおいて三角形分割の Stretch Factor の値の方が、四角形分割のそれよりも小さくなっている事が分かる。また、ノード数が 100 と 1000 ではそれほど大きく Stretch Factor の値が変化していない。さらに、ノード数と分割法が同じであれば、どのエリアでも値はかなり小さいもの(平均値:1.1~1.3)になっている。これらから、任意の2個のノード間の距離に基づく最短パスは、直線距離よりも平均的にはせいぜい1~2割ほど長い程度となる事が分かる。

第4章 地理空間上の三角形分割と四角形分割のトラフィック特性

三角形分割と四角形分割で生成したネットワークは、各ノードの次数が2から6とほぼ一定なので、極端に次数が大きいハブのノードや、ハブどうしを繋ぐリンクは存在しないように見える。しかしながら、地理空間上のネットワーク上のパケット転送によるトラフィックを考えた時、ノードやリンクの「位置」や、ノード周辺の人口の影響が絡んでくるので、重要な役割を果たしているノードやリンクがどこかに存在すると考えられる。その場合、重要なノードやリンクは負荷に対して耐性を強化するべきであるし、外部からの攻撃のターゲットにもなりやすいので優先的に防御しなければならない。

この章では、ネットワーク上のルーティングパスにおけるリンクやノードの媒介率を表す **Betweenness** という指標によって、三角形分割と四角形分割ネットワークの各ノードやリンクへの負荷のかかり具合や、その位置などを明らかにする。

4.1 各ノードへの人口の割り当て

三角形分割と四角形分割で生成したネットワークにおいて、各ノードを基地局に対応させ、そのノードに近い周辺箇所の人口数に応じてパケットの送受信要求が発生すると考えるのが自然である。すなわち、ユーザーから最も近い基地局が選ばれて、パケットの送信・受信要求が地理空間上の人口分布に応じて（確率的に）発生するものとする。

そこで、各エリアにおいて、メッシュに存在するブロックの中心点から、最も近いノードに人口を割り振った。等距離に2つ以上の n 個のノードが存在する場合は、 n 当分した確率で1つのノードを選択する。

ここで、四角形分割の場合は初期四角形の内部に全てのブロック含んでいるから問題はないが、三角形分割の場合は初期三角形からはみでるブロックが存在するので、今回のシミュレーションでは、それらのブロックは除外することにした。

三角形分割ネットワークの場合

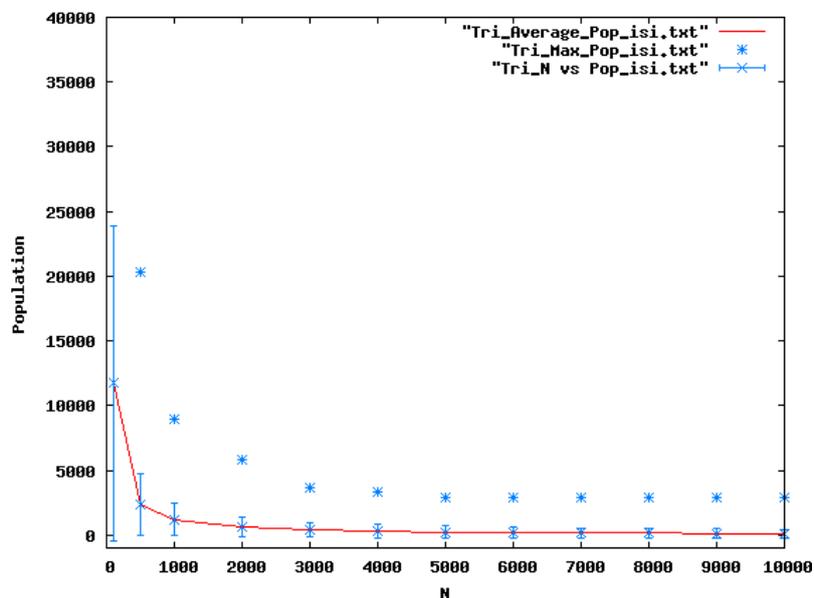


図 4.1.1 金沢-福井エリアにおける三角形分割の各ノードの受け持つ人口の平均値,最大値,標準偏差

図 4.1.1 は横軸 N がノード数、縦軸 Population が人口である。赤い線が各ノードの受け持つ人口の平均値を結んだもの、青いエラーバーはが平均値からの標準偏差の幅を表したもの、青い点 * はネットワーク中のノードの受け持つ人口の最大値を表す。横軸の 1000 未満の値は、0 に近い方から順に N=100,500 である。N=100 の時の青い点が図から消えているが、その値は 53543 である（平均値と標準偏差の見やすさを考慮して、図には載せていない）。

上図から分かるように、ノード数の値 N が大きくなるに従って、全ての Population 値が減少している。ノード数が増えれば、初期三角形内部ブロックの人口を割りふる対象が増えるので、平均値が減るのは当然だが、標準偏差や最大値がかなり小さくなるのは、ネットワークの作り方より、分割が進む（=ノードの数が増える）に従って人口の多い箇所によくのノードが優先的に配置されるからである。

注) 図 4.1.1~4.1.8 において、横軸の各 N においてネットワークはそれぞれ 1 個しか作っていない。精度の保証をするためには各 N に対して、ネットワークを多く作ってそれらの平均値をとるべきだが、N の値が小さいとネットワークをつくる度に最大値がかなり変わるので、1 個ずつしか作らなかった。もちろん、最大値が大きく変化

しても、平均値や標準偏差がほとんど変わらない事は、シミュレーションの回数を重ねて確認してある。

これらの説明は、以降の図 4.1.2~8 の他のエリアのネットワークにおいても同様に当てはまる。

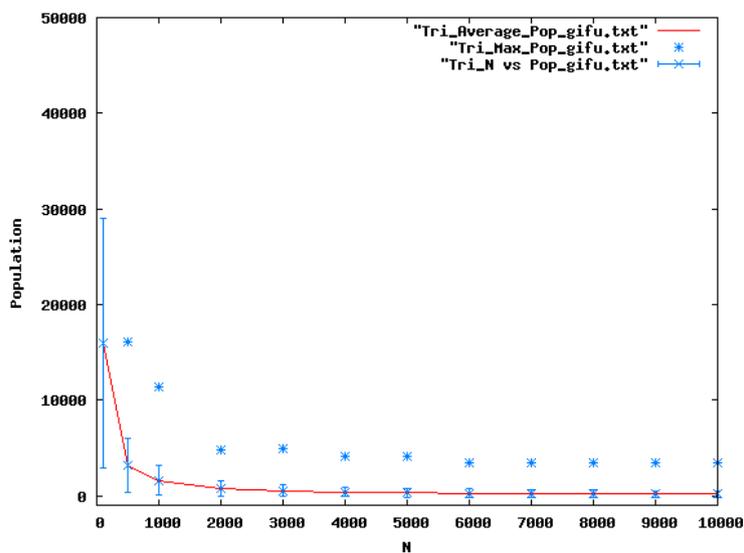


図 4.1.2 岐阜—滋賀エリアにおける三角形分割の各ノードの受け持つ人口の平均値,最大値,標準偏差
N=100 の時の最大値は 65827 である。

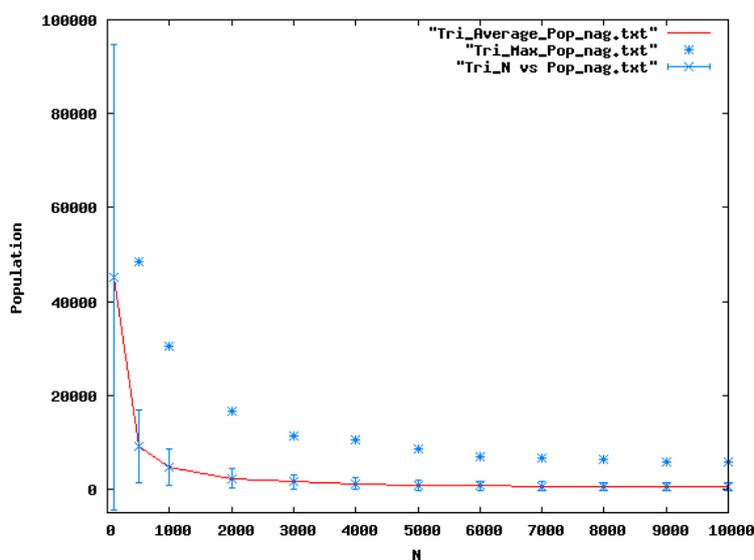


図 4.1.3 名古屋エリアにおける三角形分割の各ノードの受け持つ人口の平均値,最大値,標準偏差
N=100 の時の最大値は 265258 である。

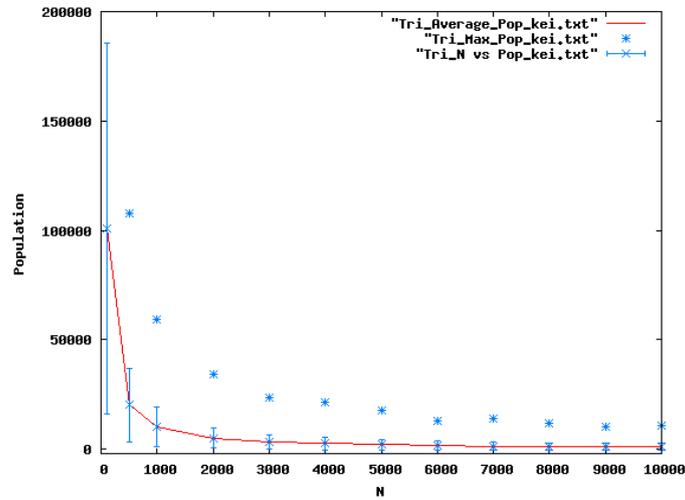


図 4.1.4 京阪神エリアにおける三角形分割の各ノードの受け持つ人口の平均値,最大値,標準偏差
N=100 の時の最大値は 465226 である。

四角形分割ネットワークの場合

図 4.1.5~4.1.8 の見方は、三角形分割ネットワークの場合の図 4.1.1~4.1.4 と同様である。第 3 章の 3.4 から分かるように、内部に含まれるブロック数や総人口数は四角形分割ネットワークの方が多いので、その分平均値、最大値、標準偏差の値が、三角形分割における図 4.1.1~4 に比べて高くなっている。

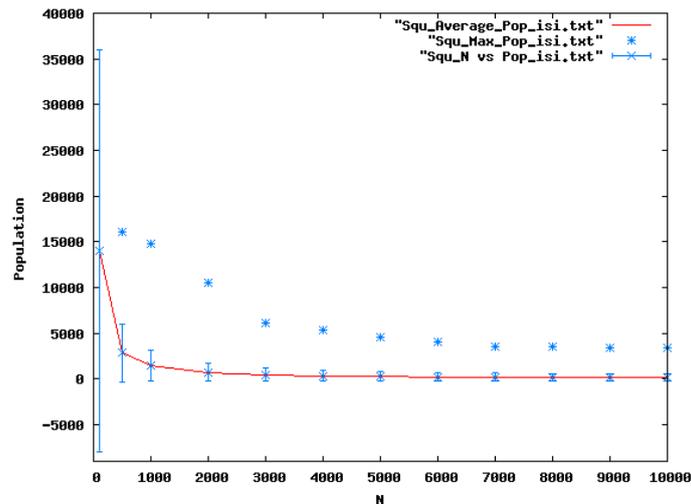


図 4.1.5 金沢-福井エリアにおける四角形分割の各ノードの受け持つ人口の平均値,最大値,標準偏差
N=100 の時の最大値は 147020 である。

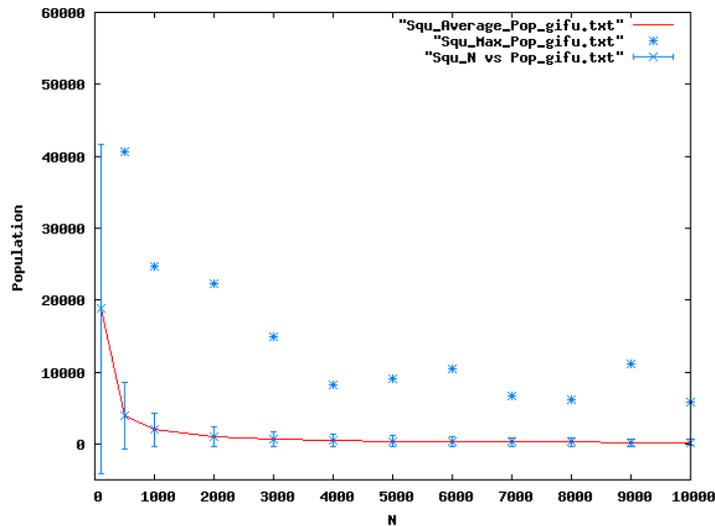


図 4.1.6 岐阜-滋賀エリアにおける四角形分割の各ノードの受け持つ人口の平均値,最大値,標準偏差
N=100 の時の最大値は 127518 である。

(N=5000,6000,9000 で、一つ前の N の値に対して最大値が増加しているのは、人口の多い場所の分割が一つ前の N の時よりも細かく行われなかったか、または多くの人口を受け持つ座標にたまたまノードが配置されたからである。)

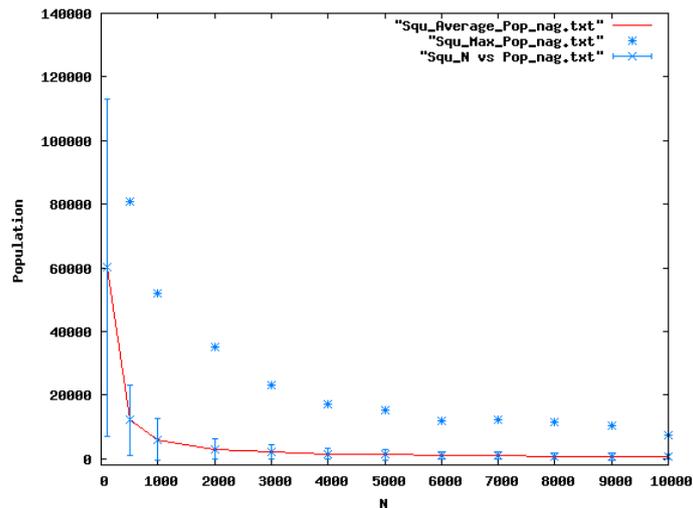


図 4.1.7 名古屋エリアにおける四角形分割の各ノードの受け持つ人口の平均値,最大値,標準偏差
N=100 の時の最大値は 261495 である。

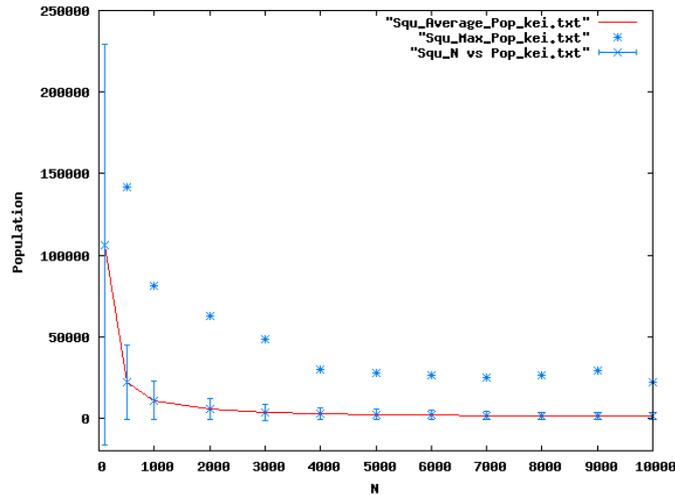


図 4.1.8 京阪神エリアにおける四角形分割の各ノードの受け持つ人口の平均値,最大値,標準偏差
 N=100 の時の最大値は 671927 である。

4.2 Betweenness の定義

ネットワーク上のある送信元ノード \mathbf{s} (source)から、 \mathbf{s} とは異なる受信元ノード \mathbf{t} (terminal)へと、パケットをそれぞれ2つの経路(ユークリッドの距離で測った最短経路とホップ数で測った最短経路の2種類)で流す事を考える。その際、リンクやノードへの負荷が測れるように、ネットワーク上の任意のリンク \mathbf{l} とノード \mathbf{n} の Betweenness[21]を次のように求めた。

• Link betweenness $B(\mathbf{l})$

$$B(\mathbf{l}) = \frac{1}{E} \sum_{count(\mathbf{s},\mathbf{t})=1}^E b_s^t(\mathbf{l}) \quad (\mathbf{s} \neq \mathbf{t} \neq \mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2)$$

ここで $count(\mathbf{s},\mathbf{t})$ はネットワークからノード \mathbf{s} と \mathbf{t} を選んだ回数、 E はパケットを流した回数、 $b_s^t(\mathbf{l})$ はパケットがノード \mathbf{s} から \mathbf{t} に向かう際にリンク \mathbf{l} を通った回数で、 \mathbf{l}_1 と \mathbf{l}_2 はリンク \mathbf{l} の両端のノードを表す。 $\mathbf{s} \neq \mathbf{t} \neq \mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2$ の意味は、リンク \mathbf{l} はノード

s と **t** を含んだものではない、言い換えれば最短経路としてリンクが 3 本以上存在するような **s** と **t** を選ぶという事で、これは **l** が最短経路の他のリンクをどの程度『媒介』しているかを調べるためである。なお、**s** から **t** に至るまでの最短経路が 2 本以上存在した場合は、それらの中から等しい確率で 1 本の最短経路を選ぶようにしてある。

• **Node betweenness B(n)**

$$B(n) = \frac{1}{E} \sum_{count(s,t)=1}^E b_s^t(n) \quad (s \neq t \neq n)$$

記号の意味は Link betweenness の場合と同様である。

4.3 Link betweenness と Node betweenness の可視化図

図 4.3.1~32 では、各エリアの三角形と四角形分割において、どのリンクやノードが中心的な役割を果たしているかを色分けして示している。ノード数は 100 個、パケットはノード数の 100 倍の 10000 個発生させ、3.2 の定義式にしたがって Link betweenness と Node betweenness を求めた。パケットに対する送受信要求の発生は、一様ランダムに **s** と **t** を選ぶ場合と、各ノードの受け持つ人口に応じた確率で **s** と **t** を選ぶ場合とを設定した。これらから、トポロジーのみに依存したトラフィック特性と、実際にネットワークを運用した場合に相当する人口に応じたトラフィック特性を比較する。

リンクやノードへの色づけは、パケットへの送受信要求を一様ランダムに発生させた場合と、ノードの受け持つ人口に応じて発生させた場合の両方から、B(l)や B(n)の内一番値が高いものを選んで 4 つの等区間に分けて順に色づけをした。色は、値の高い区間から順にブルー，マゼンタ，シアン，細線のブラックとした。

三角形分割ネットワーク（リンク）

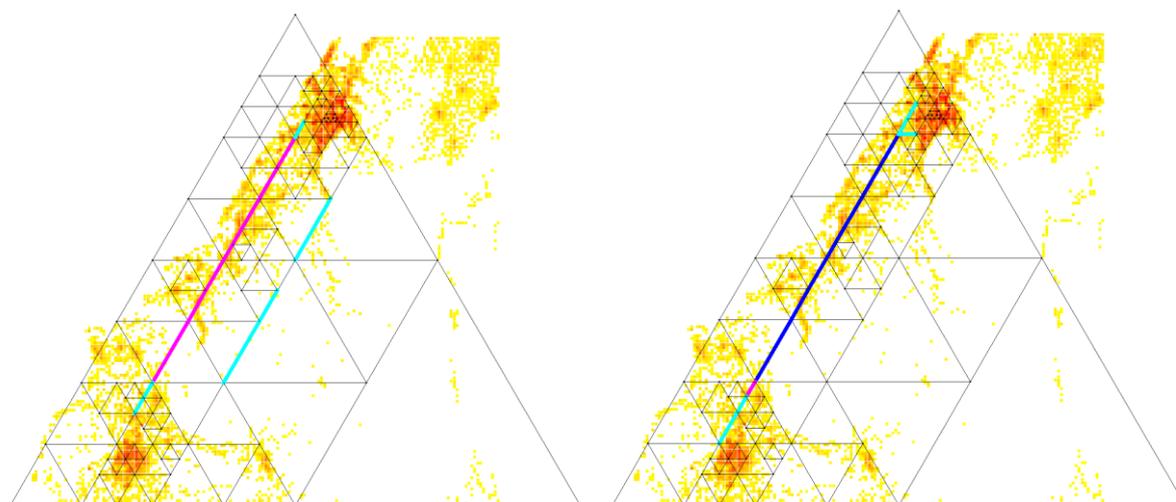


図 4.3.1 金沢－福井エリアにおける距離に基づくパスの **Link betweenness** の比較図（左側が一様ランダム、右側が人口に応じた確率のパケットの送受信要求を表したもの。）

図 4.3.1 の左に示したように、パケットの送受信要求をランダムに発生させ、パケットが距離に基づく最短経路のパスを通る場合には、人口の密集箇所をつなぐ直線上のパスをパケットが集中して流れる傾向が分かる。また、同図の右に示したように、各ノードの受け持つ人口に応じた確率でパケットの送受信要求を発生させた場合には、よりその傾向が強くなっている事が見て取れる。ランダムな送受信要求で、パケットが人口密集箇所をつなぐ直線上のパスを集中して流れるのは、ネットワークの作り方からそれらの箇所にノードが多く配置される為で、一様ランダムにノードを選んだとしても、結果的に人口が多く割り振られたノードを選ぶ確率が高いからである。

この傾向は、以降の各エリアでパケットが距離に基づく最短経路のパスを流れる場合の、リンクやノードの **Betweenness** を可視化して見た場合も同様に表れる。

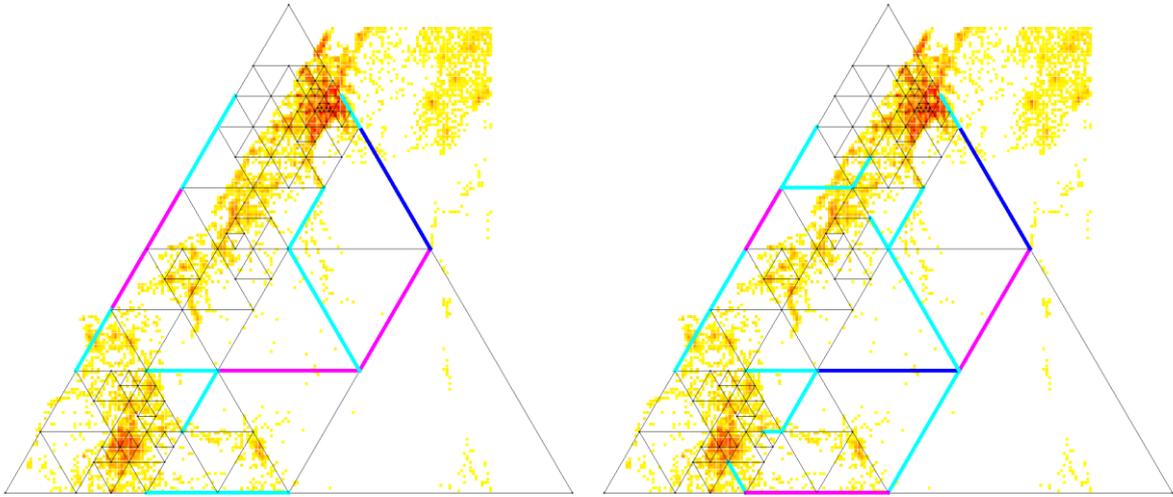


図 4.3.2 金沢ー福井エリアにおけるホップ数に基づくパスの **Link betweenness** の比較図(左側が一様ランダム、右側が人口に応じた確率のパケットの送受信要求を表したもので、以降図 4.3.32 まで同様。)

一方、図 4.3.2 に示したように、ホップ数に基づく最短経路のパスを選び、**Link betweenness** を色付けして見た場合には、パケットが集中して通るリンクが、人口密集箇所をつなぐ直線からずれた場所に存在する事が分かる。これはノードが人口密集箇所に沢山配置されているために、ホップ数が大きくなるように、パケットがそれらの箇所を避けるように流れるからである。

以降の各エリアで、ノードに対して色づけをして見た場合も同様の傾向が現れる。

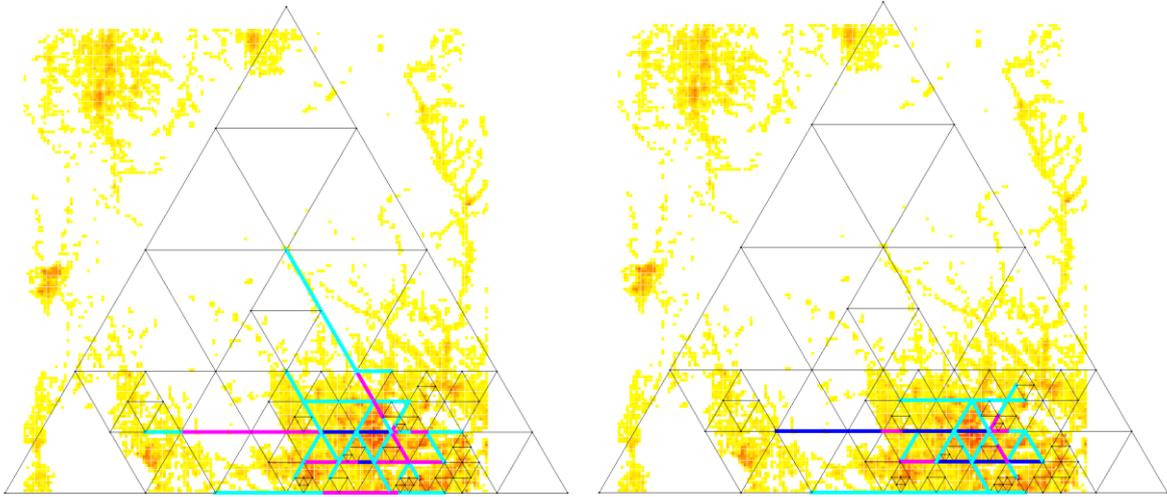


図 4.3.3 岐阜—滋賀エリアにおける距離に基づくパスの Link betweenness の比較図

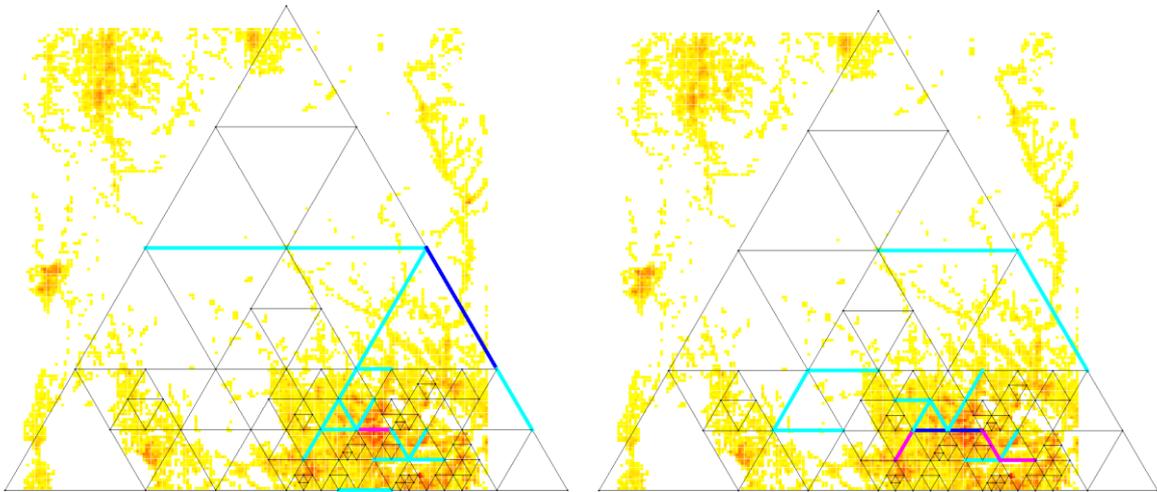


図 4.3.4 岐阜—滋賀エリアにおけるホップ数に基づくパスの Link betweenness の比較図

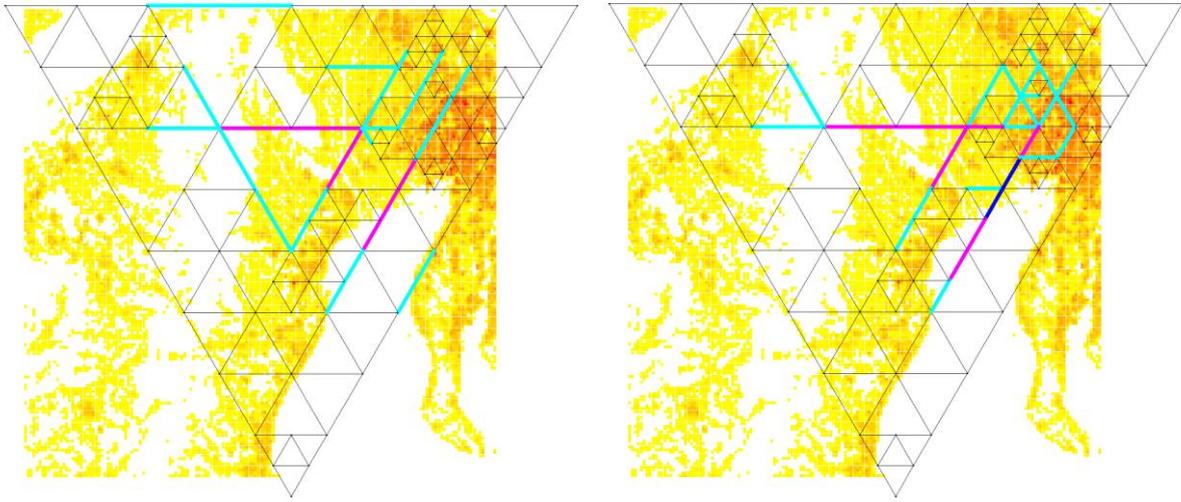


図 4.3.5 名古屋エリアにおける距離に基づくパスの Link betweenness の比較図

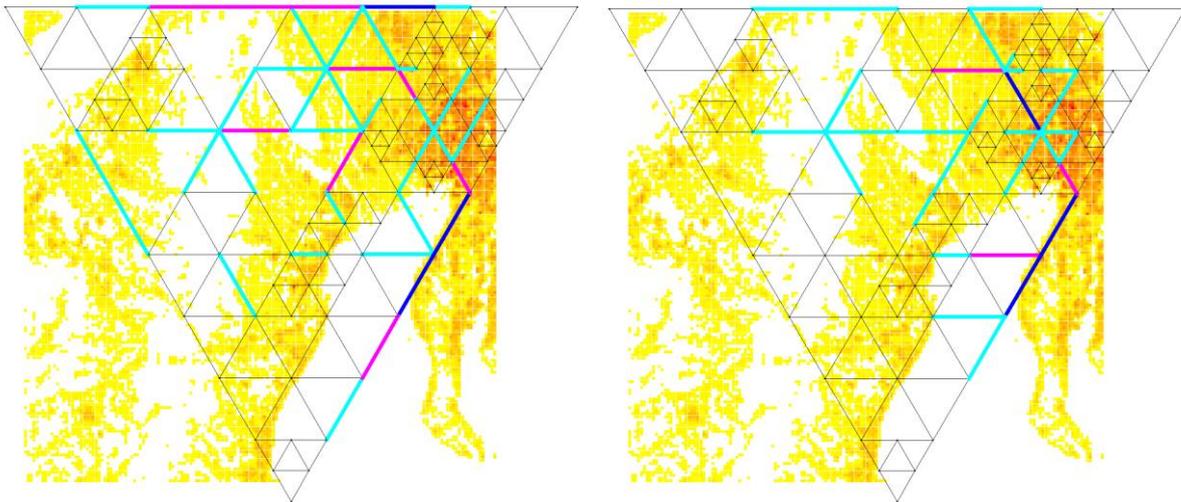


図 4.3.6 名古屋エリアにおけるホップ数に基づくパスの Link betweenness の比較図

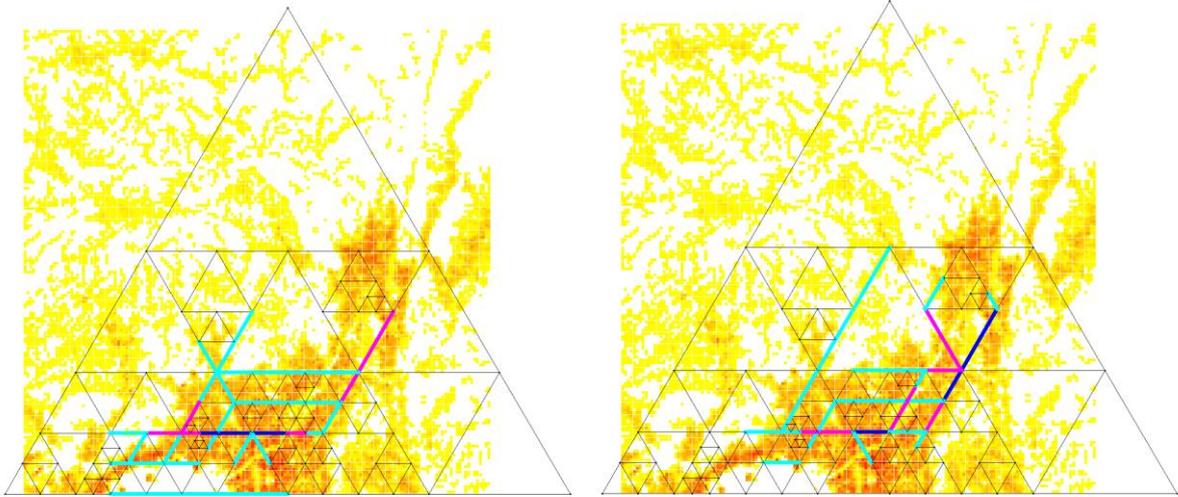


図 4.3.7 京阪神エリアにおける距離に基づくパスの Link betweenness の比較図

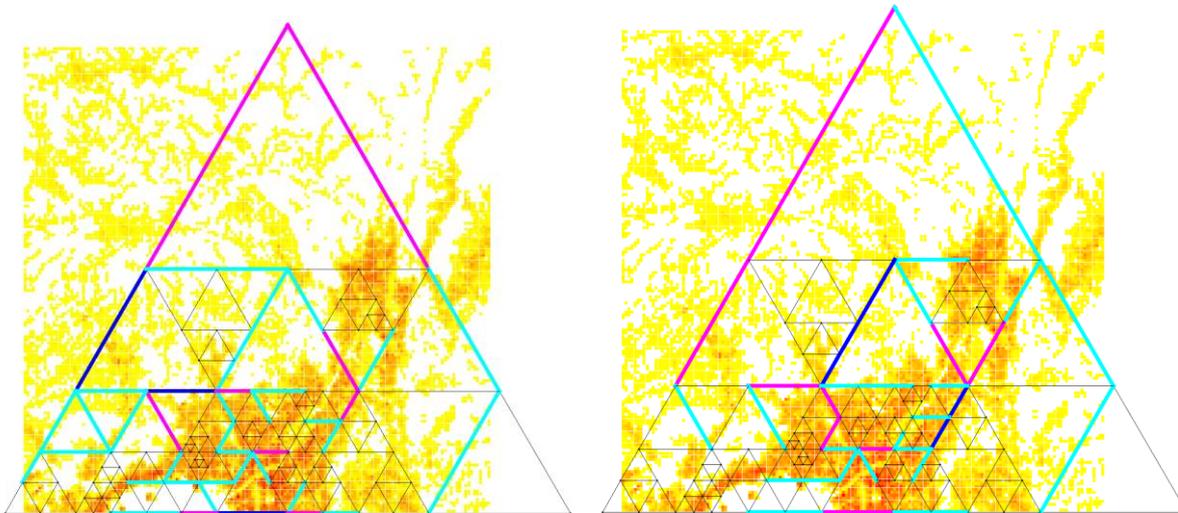


図 4.3.8 京阪神エリアにおけるホップ数に基づくパスの Link betweenness の比較図

三角形分割ネットワーク（ノード）

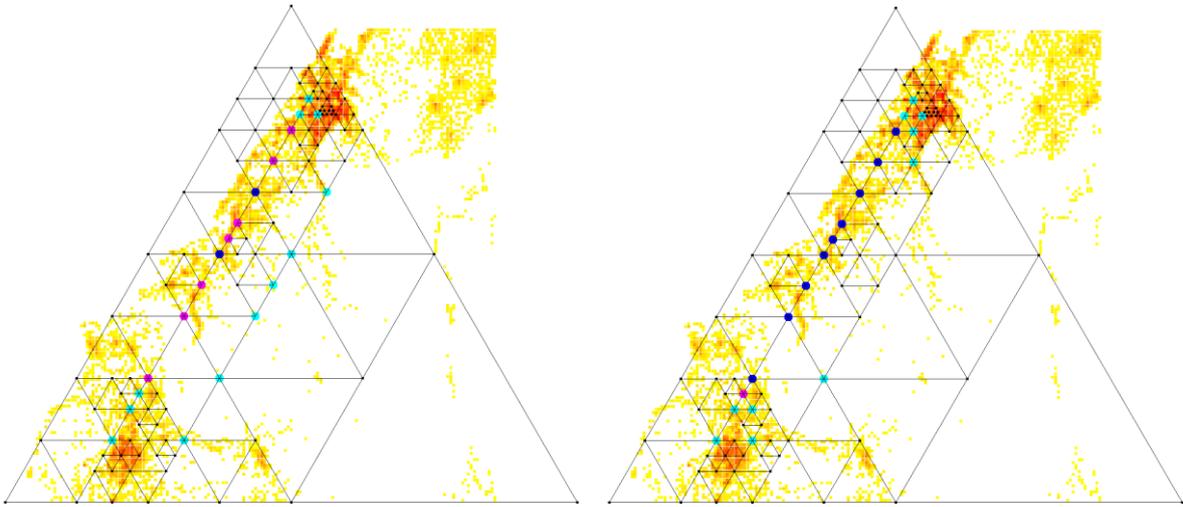


図 4.3.9 金沢ー福井エリアにおける距離に基づくパスの Node betweenness の比較図

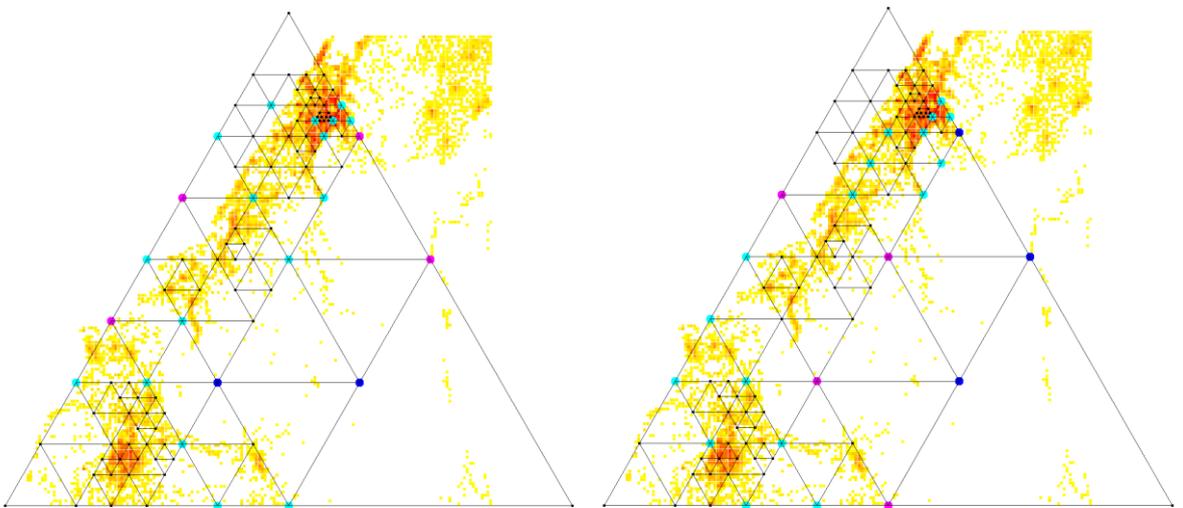


図 4.3.10 金沢ー福井エリアにおけるホップ数に基づくパスの Node betweenness の比較図

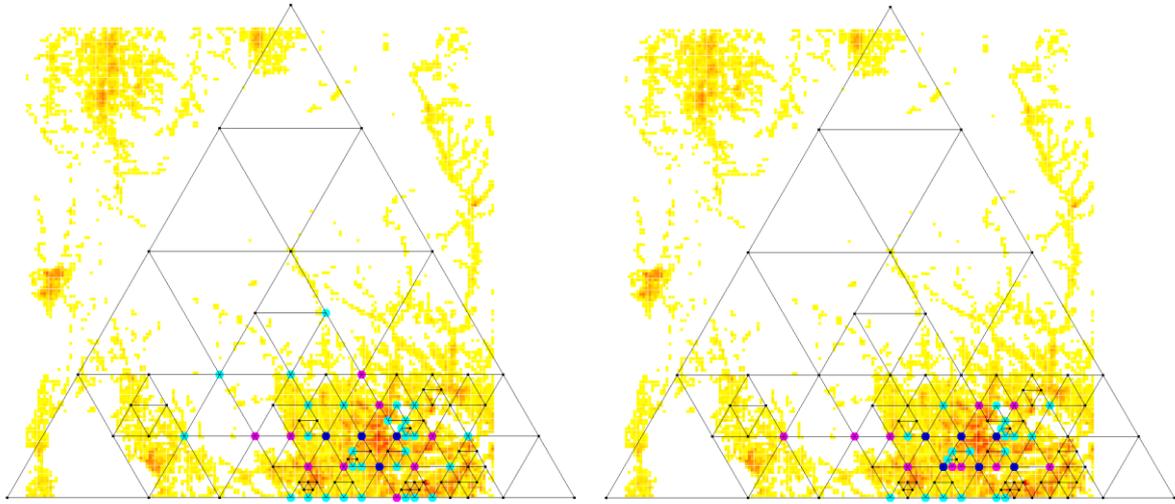


図 4.3.11 岐阜—滋賀エリアにおける距離に基づくパスの Node betweenness の比較図

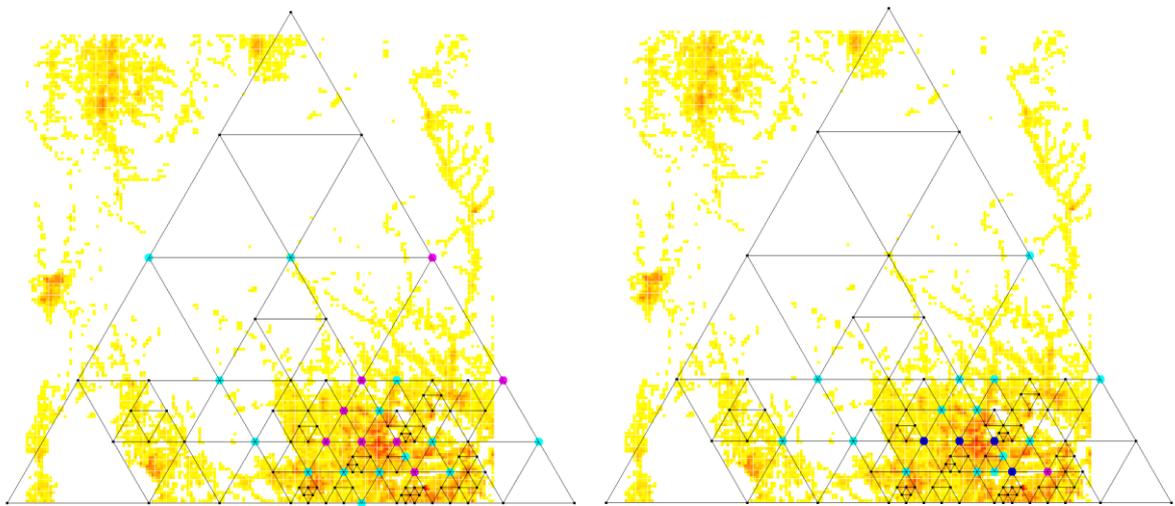


図 4.3.12 岐阜—滋賀エリアにおけるホップ数に基づくパスの Node betweenness の比較図

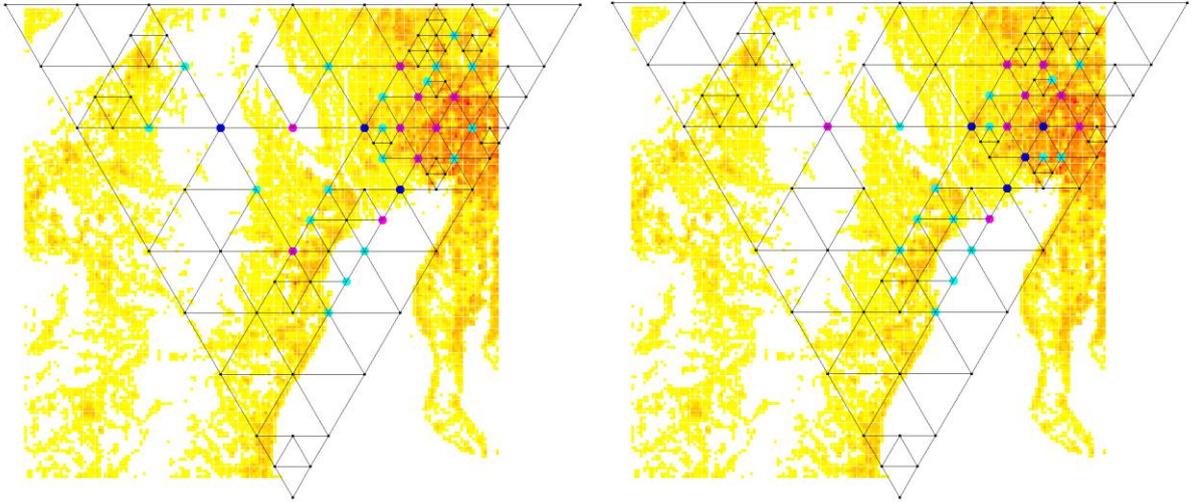


図 4.3.13 名古屋エリアにおける距離に基づくパスの Node betweenness の比較図

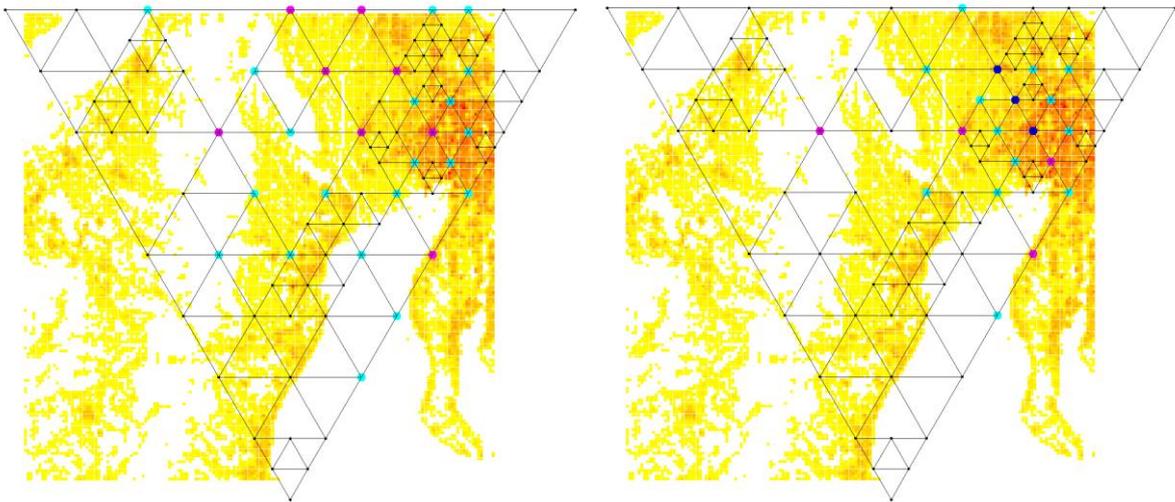


図 4.3.14 名古屋エリアにおけるホップ数に基づくパスの Node betweenness の比較図

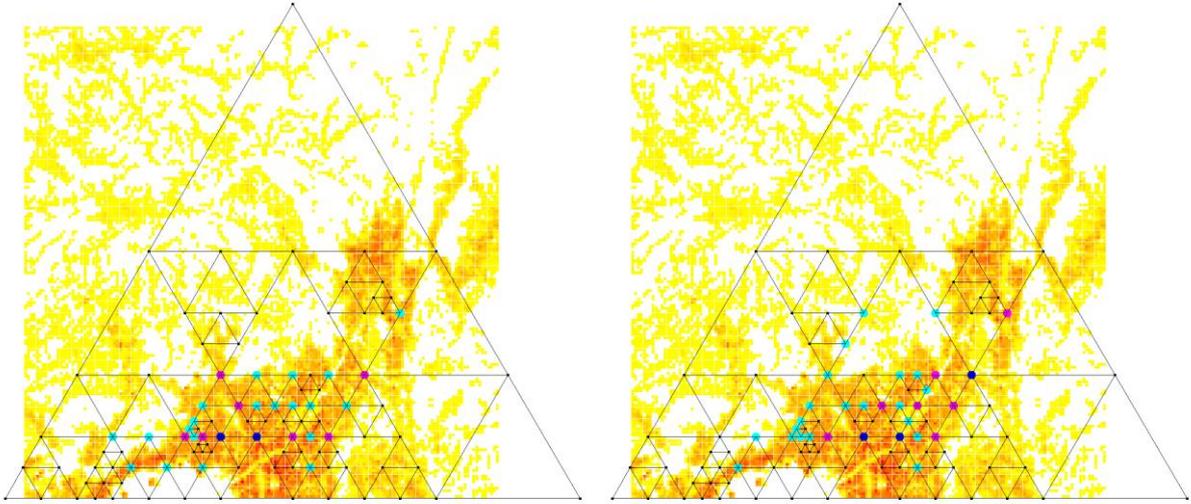


図 4.3.15 京阪神エリアにおける距離に基づくパスの Node betweenness の比較図

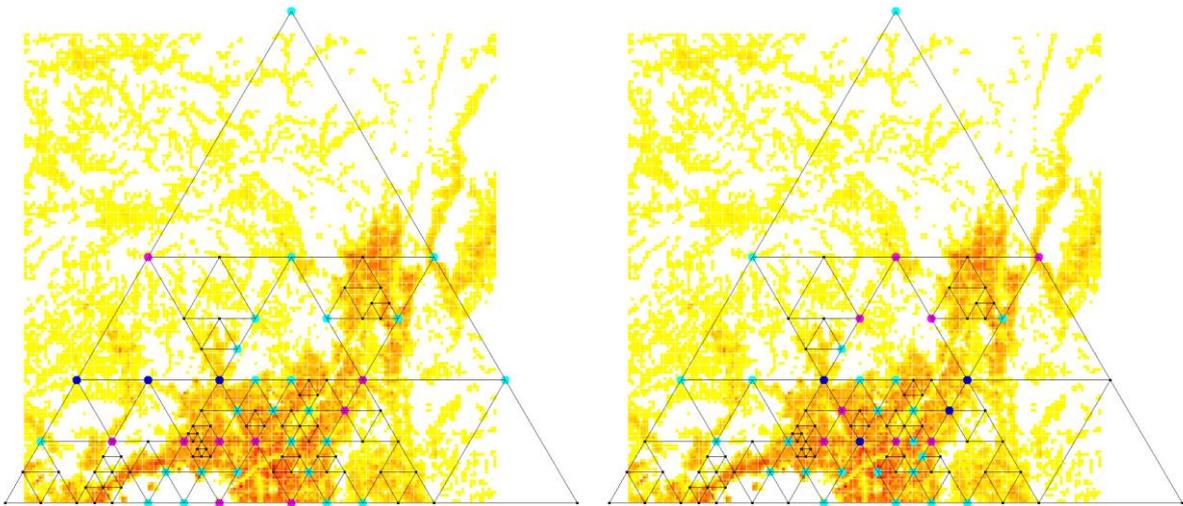


図 4.3.16 京阪神エリアにおけるホップ数に基づくパスの Node betweenness の比較図

四角形分割ネットワーク（リンク）

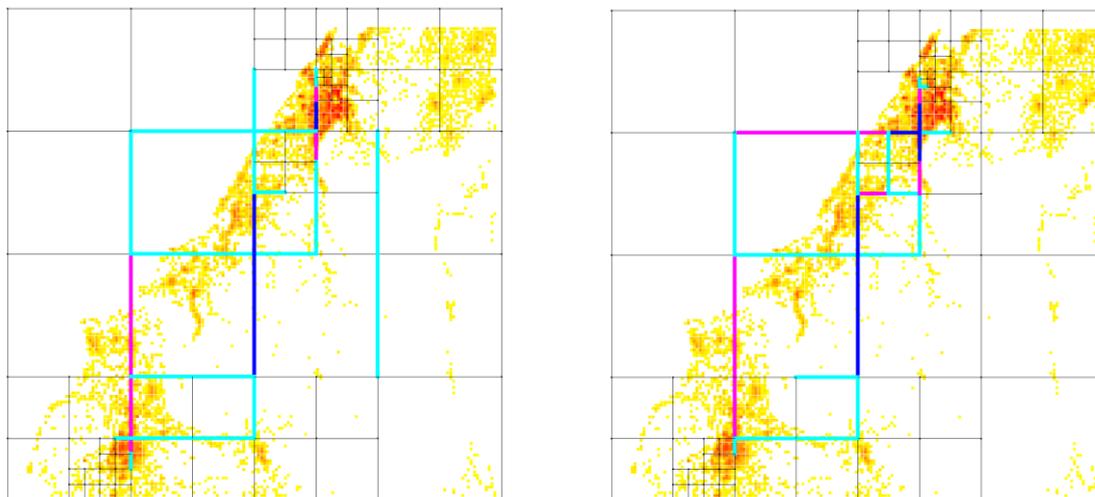


図 4.3.17 金沢－福井エリアにおける距離に基づくパスの **Link betweenness** の比較図

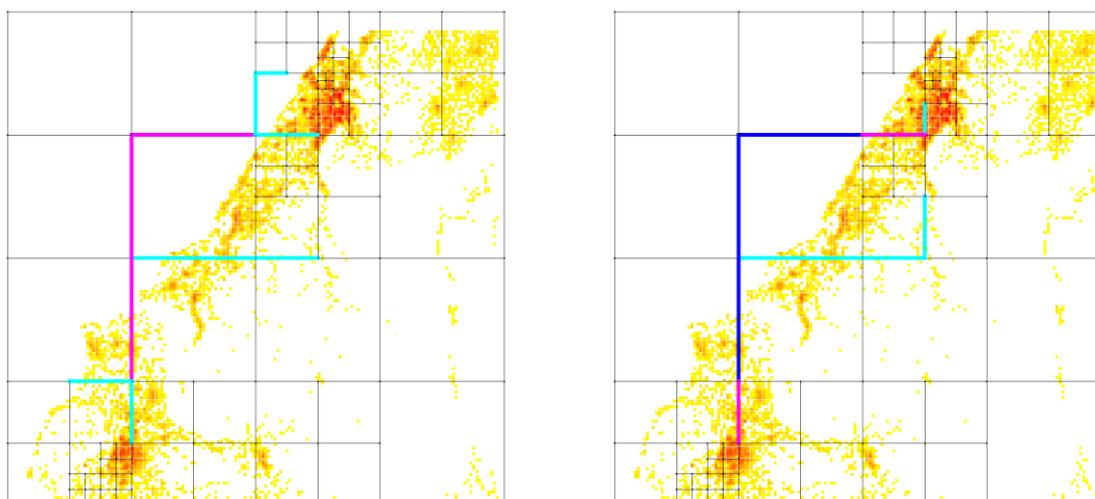


図 4.3.18 金沢－福井エリアにおけるホップ数に基づくパスの **Link betweenness** の比較図

四角形分割の場合も、三角形分割と同じような傾向が見られるが、四角形分割の方が内部により多くのブロックを含むので、三角形分割に比べてノードが集中して存在する箇所が少なくなる（三角形分割より、ノードの配置が少しバラバラになる）。また四角形という制約から、距離に基づく最短経路のパスとホップ数に基づく最短経路のパスで、パケットが集中して流れるリンクやノードの位置が似てくる。（以降図 4.3.32 まで同様。）

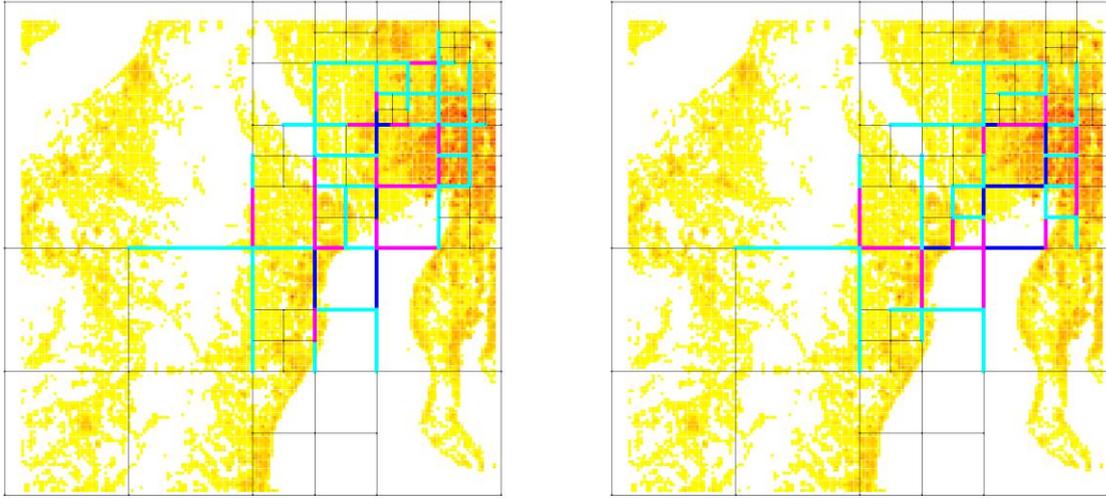


図 4.3.21 名古屋エリアにおける距離に基づくパスの Link betweenness の比較図

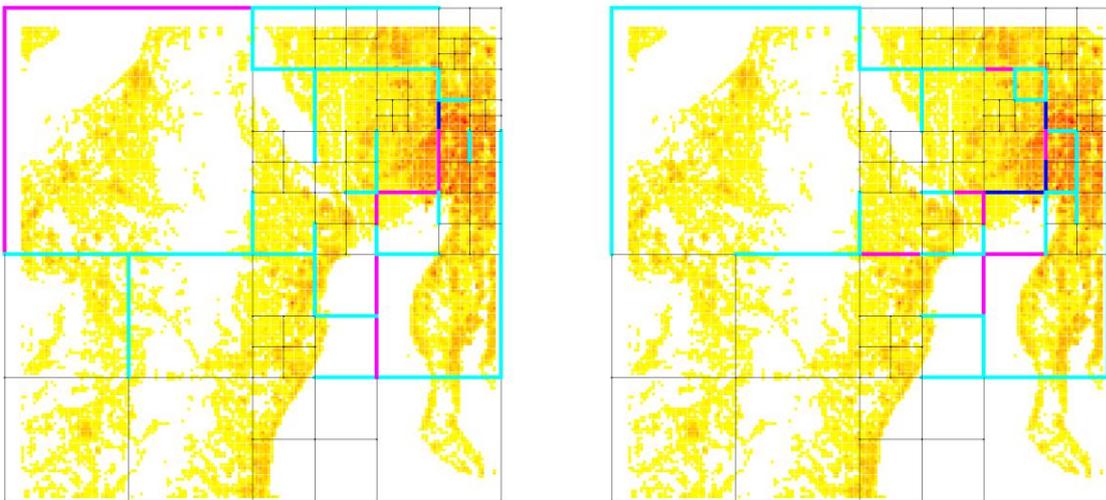


図 4.3.22 名古屋エリアにおけるホップ数に基づくパスの Link betweenness の比較図

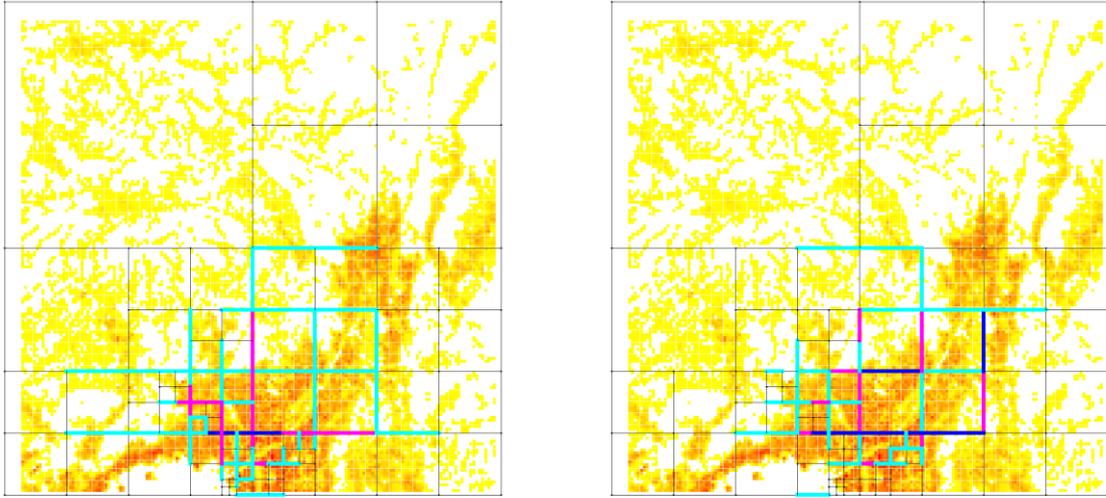


図 4.3.23 京阪神エリアにおける距離に基づくパスの Link betweenness の比較図

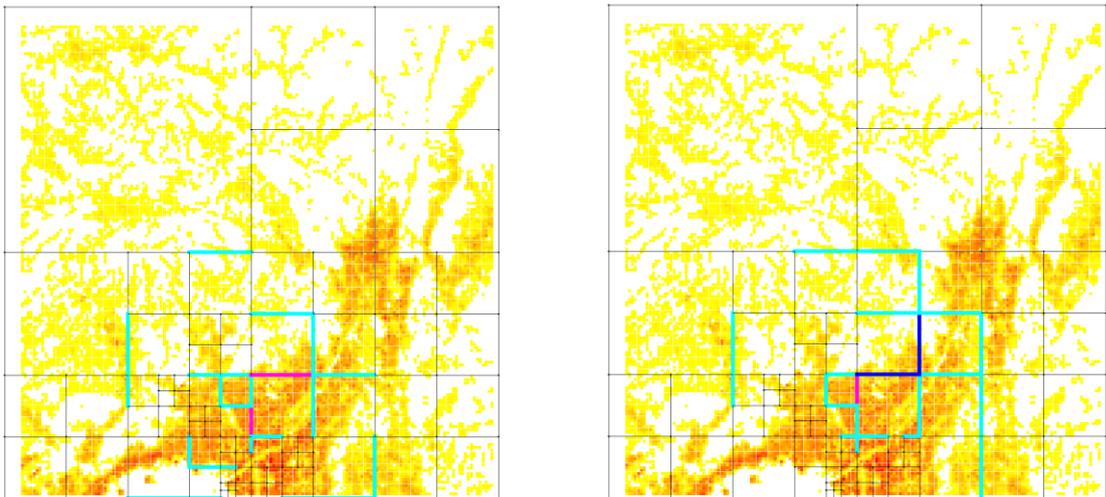


図 4.3.24 京阪神エリアにおけるホップ数に基づくパスの Link betweenness の比較図

四角形分割ネットワーク（ノード）

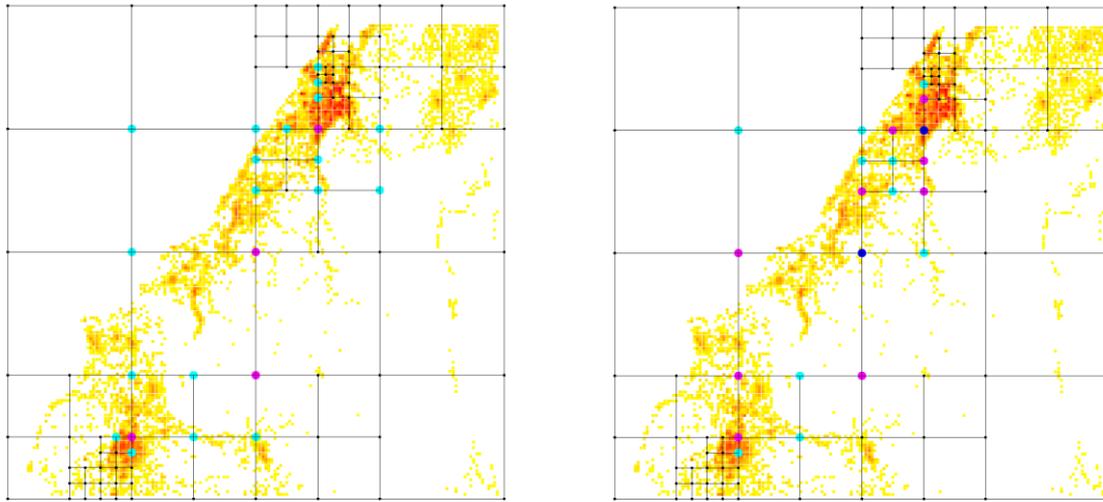


図 4.3.25 金沢ー福井エリアにおける距離に基づくパスの Node betweenness の比較図

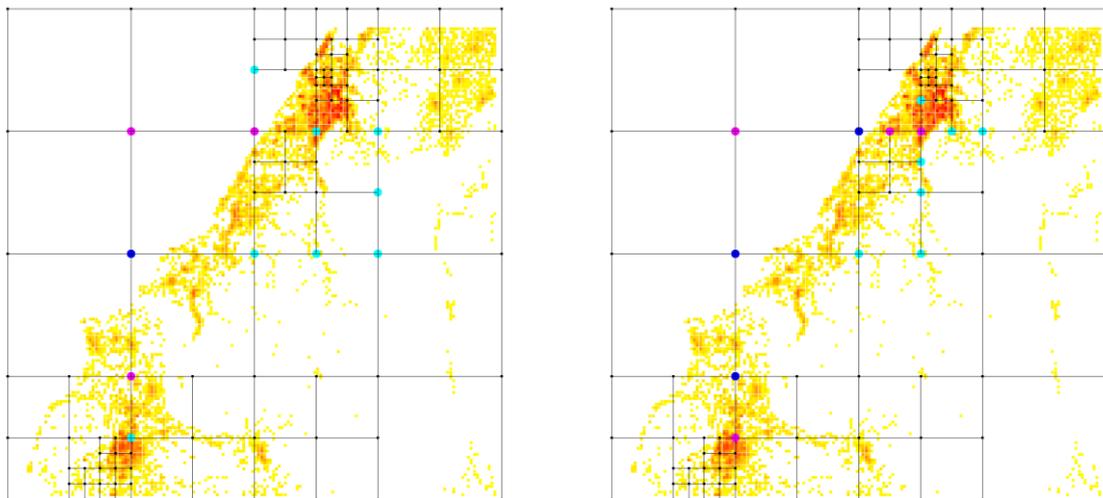


図 4.3.26 金沢ー福井エリアにおけるホップ数に基づくパスの Node betweenness の比較図

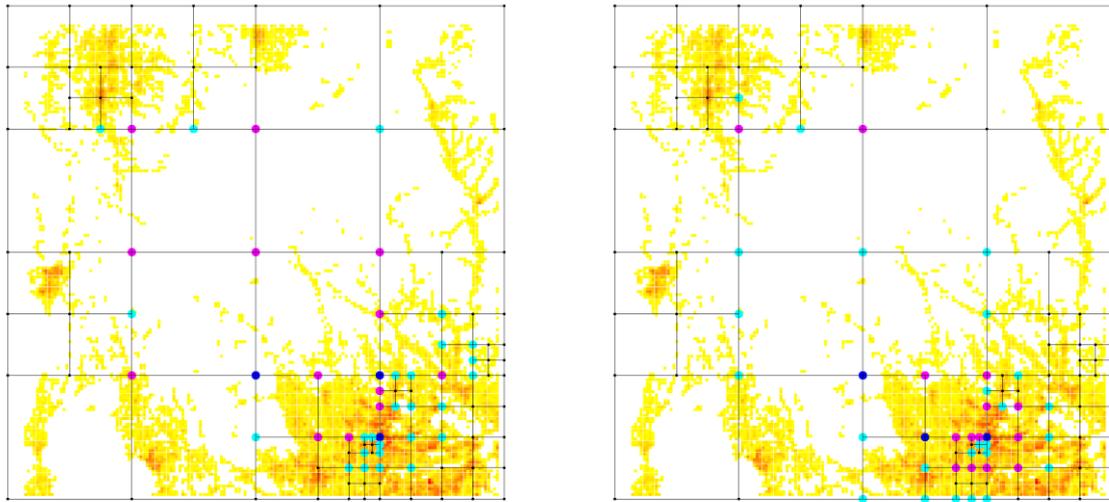


図 4.3.27 岐阜－滋賀エリアにおける距離に基づくパスの Node betweenness の比較図

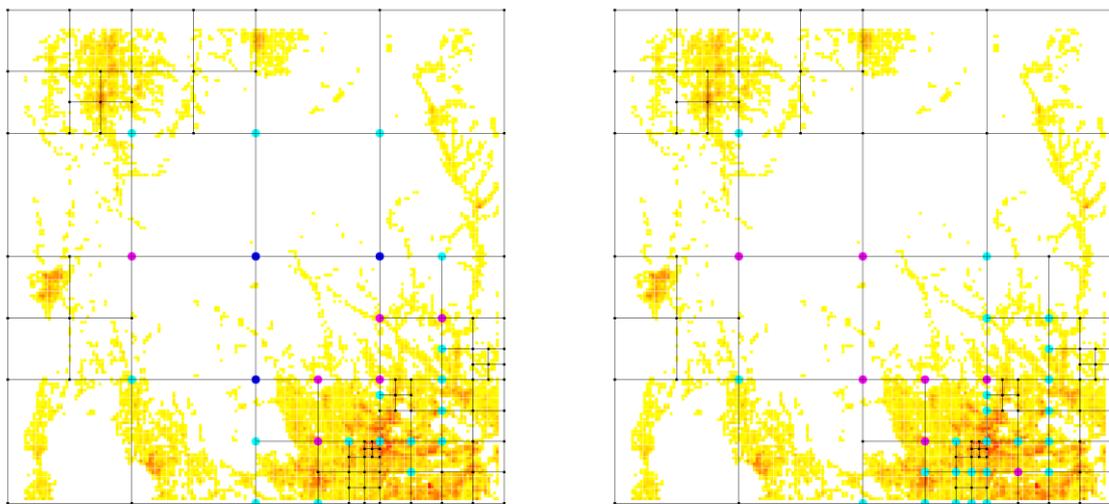


図 4.3.28 岐阜－滋賀エリアにおけるホップ数に基づくパスの Node betweenness の比較図

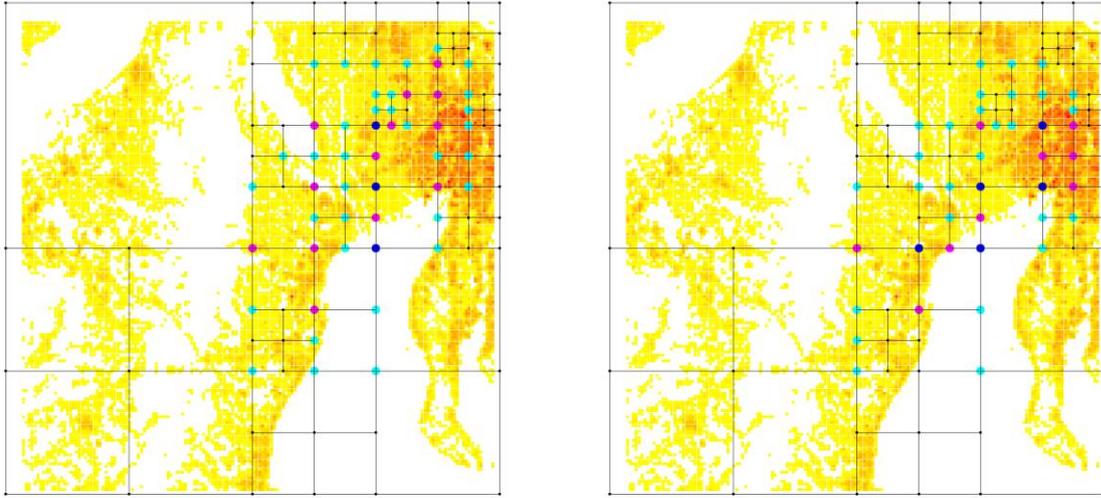


図 4.3.29 名古屋エリアにおける距離に基づくパスの Node betweenness の比較図

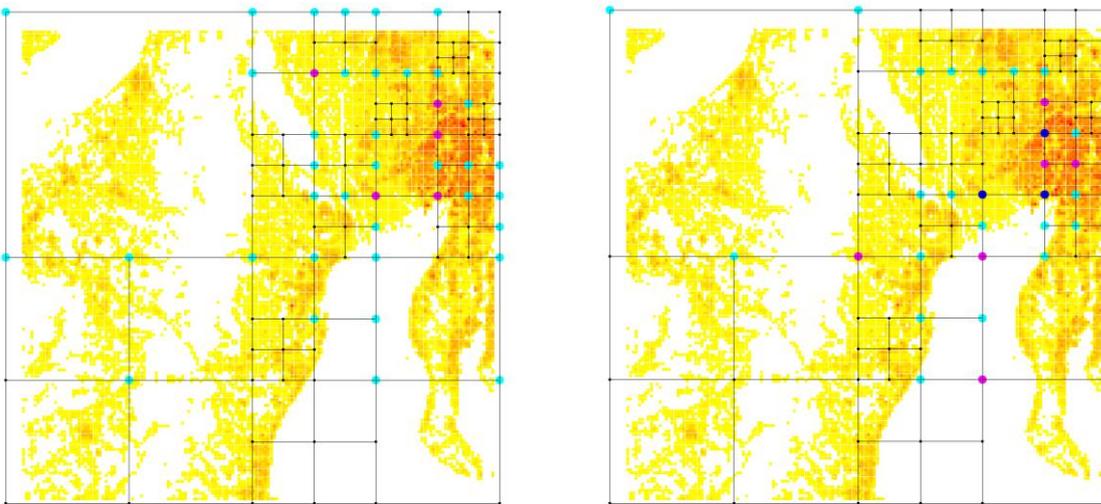


図 4.3.30 名古屋エリアにおけるホップ数に基づくパスの Node betweenness の比較図

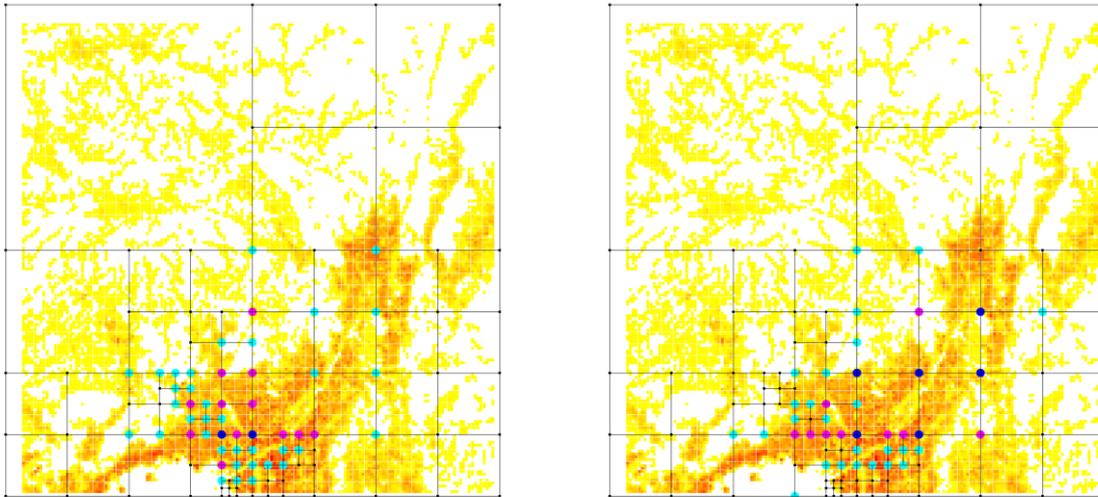


図 4.3.31 京阪神エリアにおける距離に基づくパスの Node betweenness の比較図

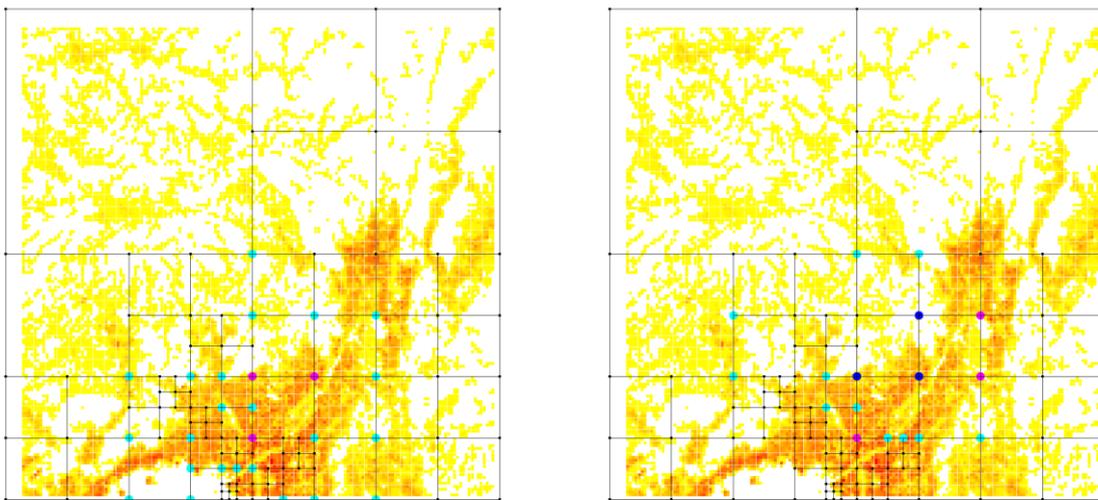


図 4.3.32 京阪神エリアにおけるホップ数に基づくパスの Node betweenness の比較図

4.4 Link betweenness と Node betweenness の散布図

パケットを流すときに、ノード **s** と **t** をランダムに選んだ場合と、ノードの受け持つ人口に応じた確率で選んだ場合で、どれほどリンクやノードの **Betweenness** が変化するかを調べるために、各エリアにおいての三角形分割と四角形分割のネットワーク **Link betweenness** と **Node betweenness** の散布図を作成した。

ノード数は 100 個と 1000 個にして、パケットはそれぞれ 10000 個と 100000 個流した。ネットワークはそれぞれの場合において 10 個作成した。

以降の図は横軸がノード **s** と **t** をランダムに選んだ場合の **Betweenness**、縦軸が人口に応じた確率で **s** と **t** を選んだ場合の **Betweenness** で、両軸の数値は同一にしてある。また、ひとつの点はネットワーク上の 1 個のリンク、もしくはノードに対応している。

例えば、金沢、福井エリアの三角形分割の図 4.4.1 と 4.4.2 からは、ノード数が 100 の時は点がばらつくが、ノード数 1000 では傾き 45° の対角線付近に点が集まるようになる。これは人口密集箇所（金沢市と福井市）に多くのノードが配置されて、各ノードの受け持つ人口にばらつきが無くなったためである（特に三角形分割の場合の図 4.4.1~8 を参照）。この傾向は、距離に基づく最短経路のパスやホップ数に基づく最短経路のパス、**Link betweenness** や **Node betweenness** に着目しても変わらない。

三角形分割ネットワーク

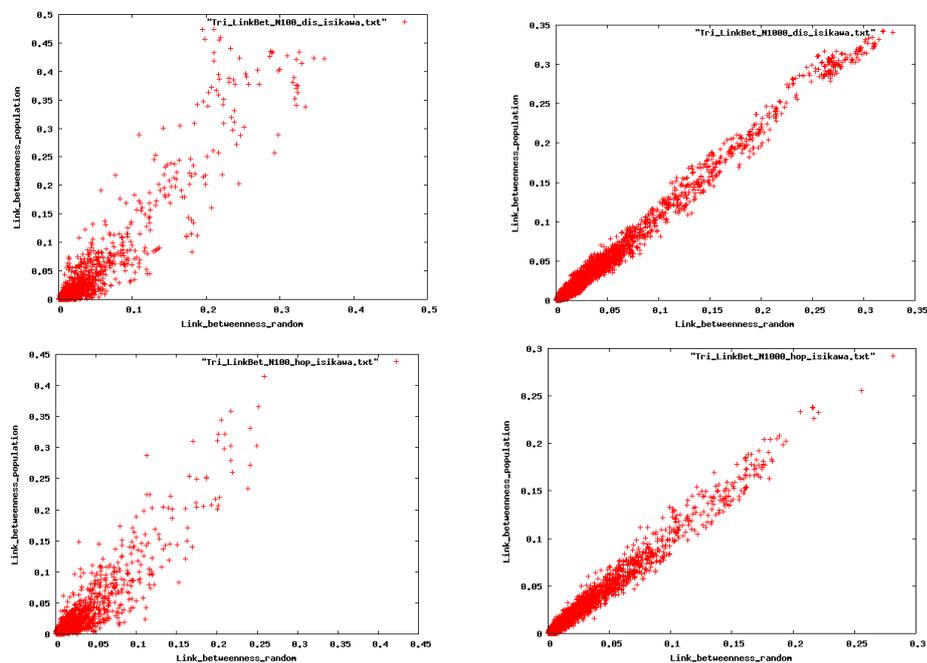


図 4.4.1 金沢一福井エリアにおける三角形分割の距離とホップ数のパスの Link betweenness 散布図
 (左側がノード数 100,右側がノード数 1000。上 2 枚が距離の最短経路, 下 2 枚がホップ数のパスで、
 図の並びは以降図 4.4.16 まで同様。)

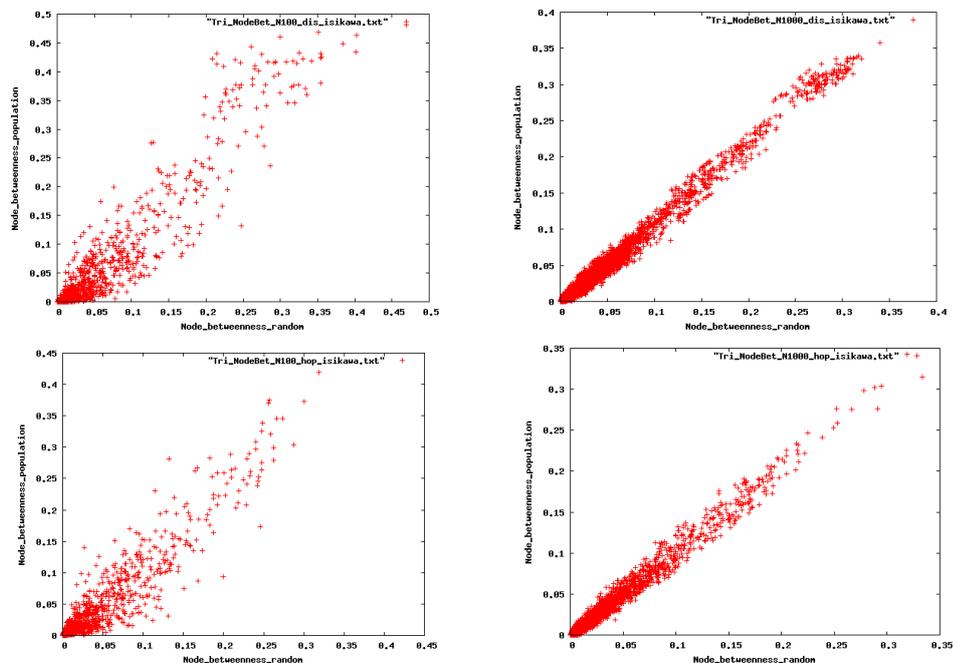


図 4.4.2 金沢一福井エリアにおける三角形分割の距離とホップ数のパスの Node betweenness 散布図

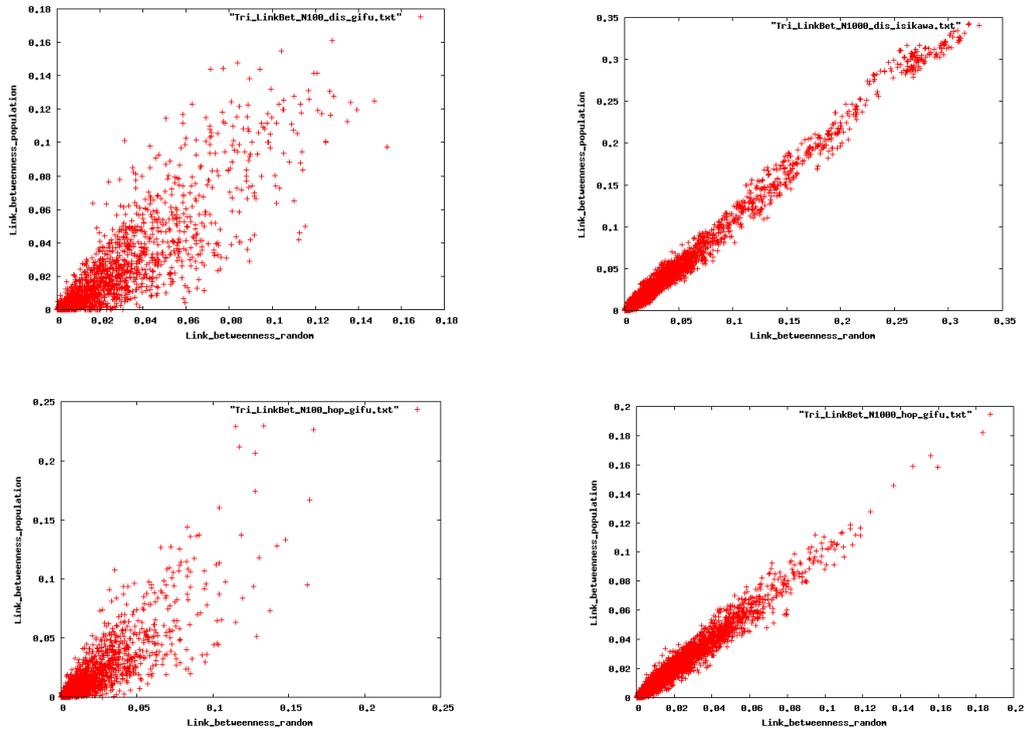


図 4.4.3 岐阜—滋賀エリアにおける三角形分割の距離とホップ数のパスの Link betweenness 散布図

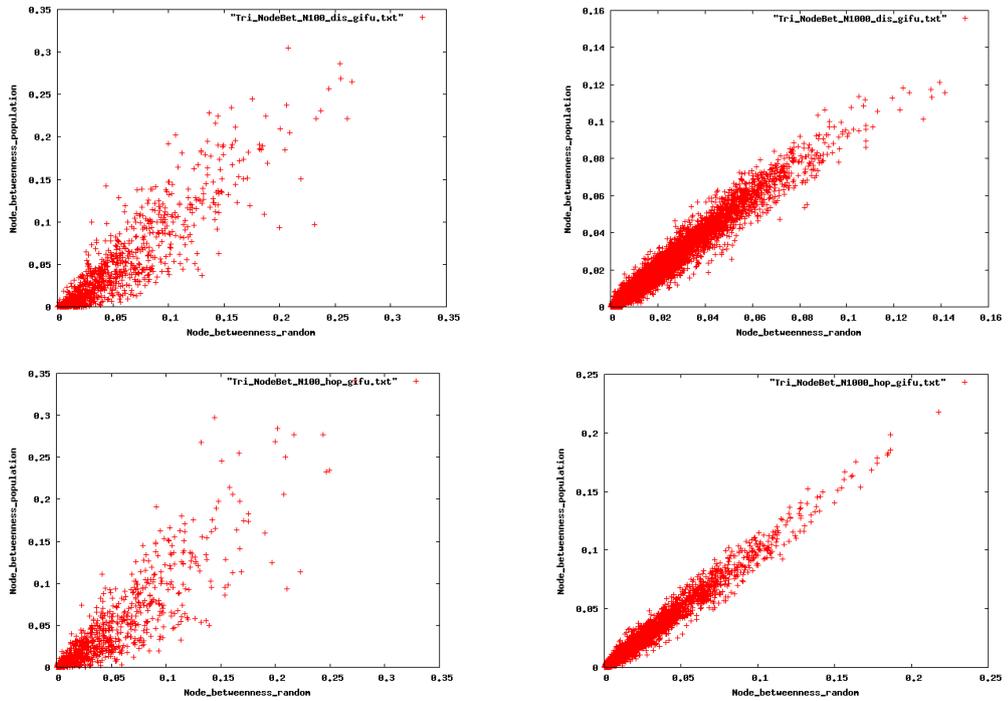


図 4.4.4 岐阜—滋賀エリアにおける三角形分割の距離とホップ数のパスの Node betweenness 散布図

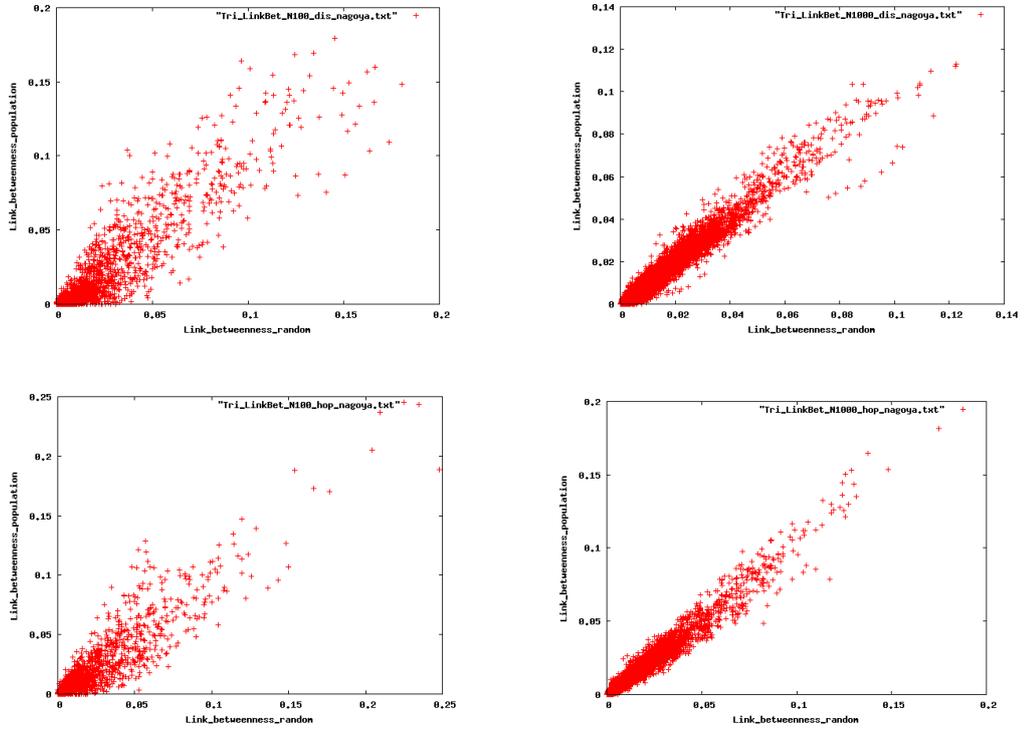


図 4.4.5 名古屋エリアにおける三角形分割の距離とホップ数のパスの Link betweenness 散布図

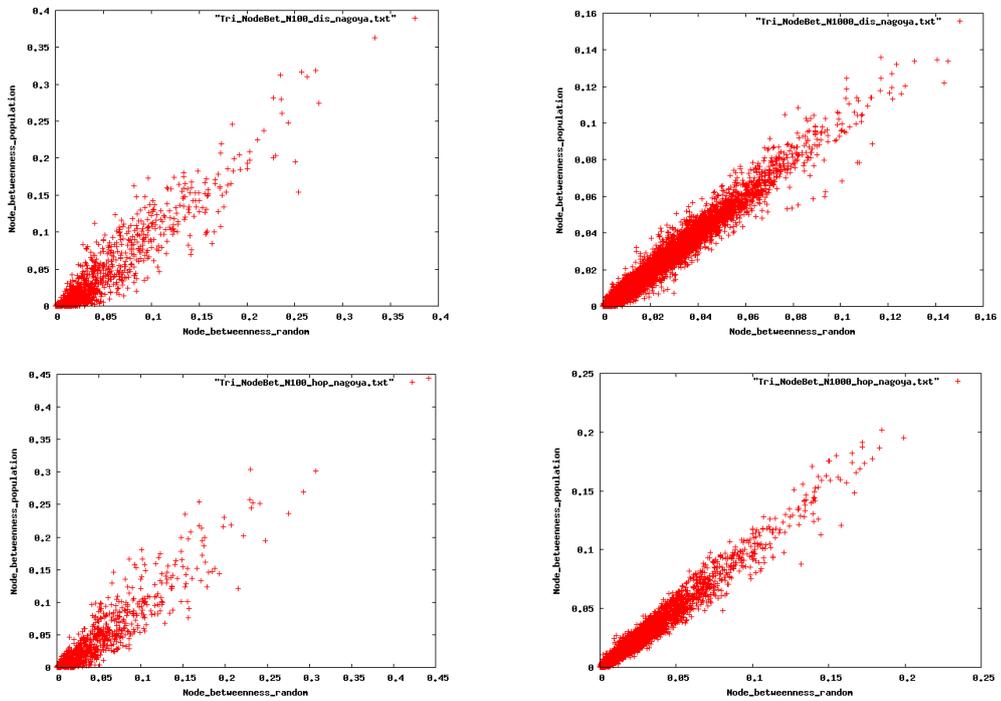


図 4.4.6 名古屋エリアにおける三角形分割の距離とホップ数のパスの Node betweenness 散布図

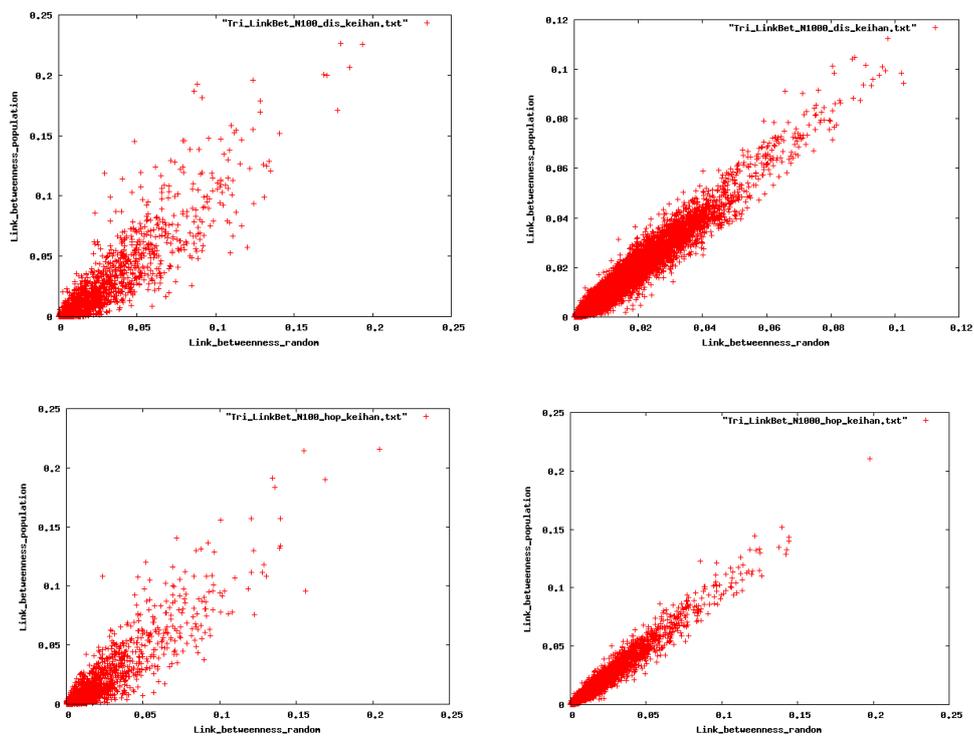


図 4.4.7 京阪神エリアにおける三角形分割の距離とホップ数のパスの Link betweenness 散布図

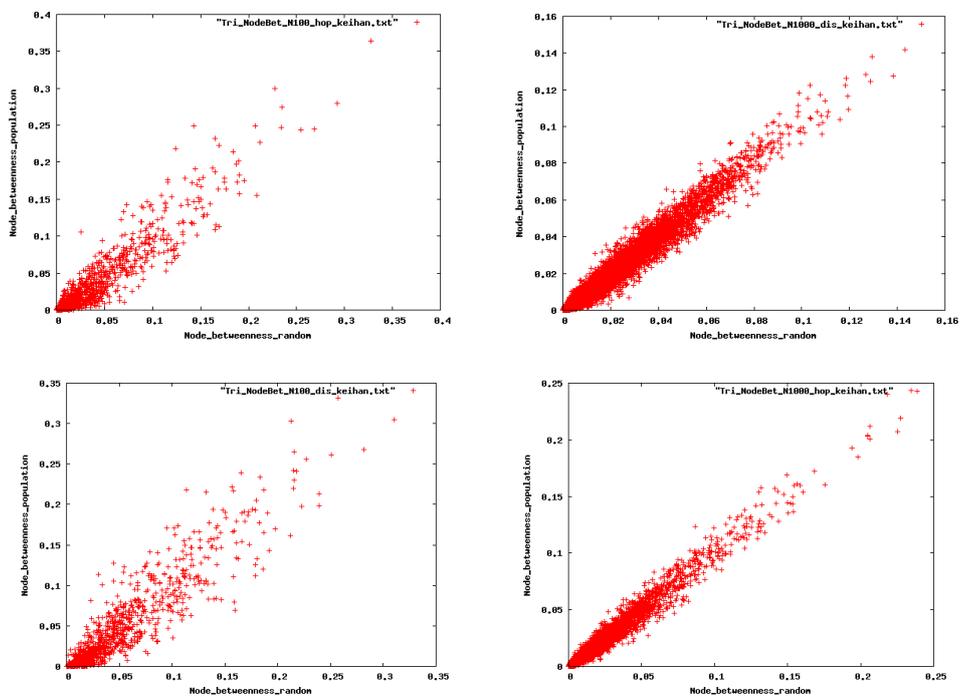


図 4.4.8 京阪神エリアにおける三角形分割の距離とホップ数のパスの Node betweenness 散布図

四角形分割ネットワーク

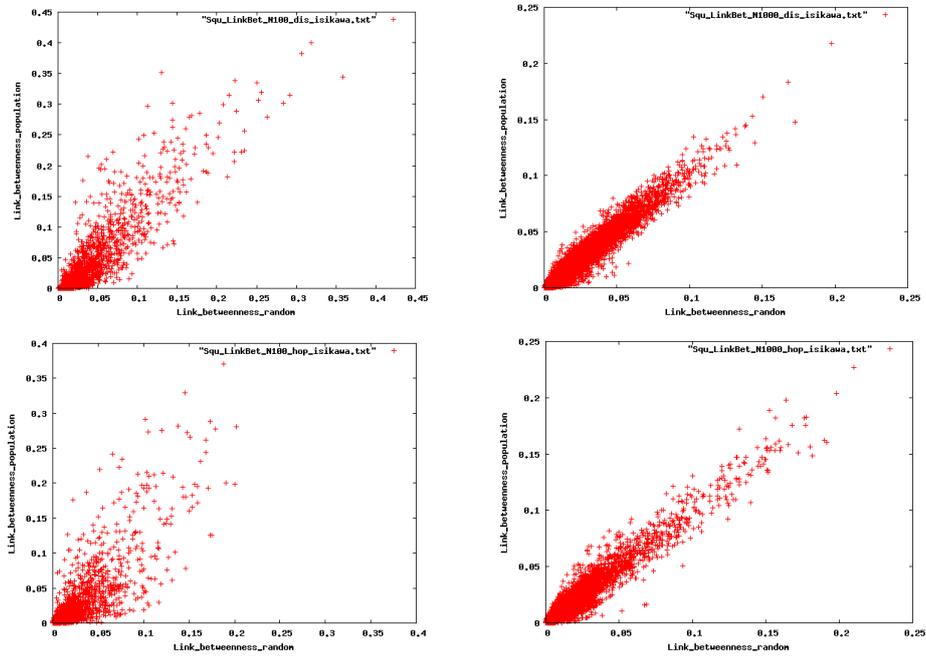


図 4.4.9 金沢一福井エリアにおける四角形分割の距離とホップ数のパスの Link betweenness 散布図

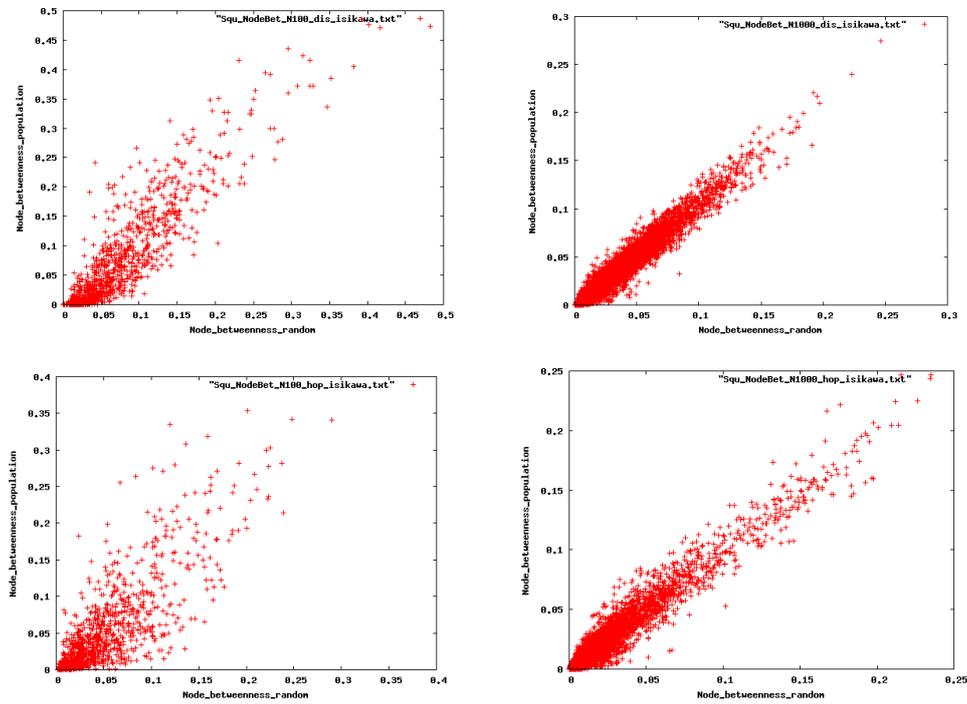


図 4.4.10 金沢一福井エリアにおける四角形分割の距離とホップ数のパスの Node betweenness 散布図

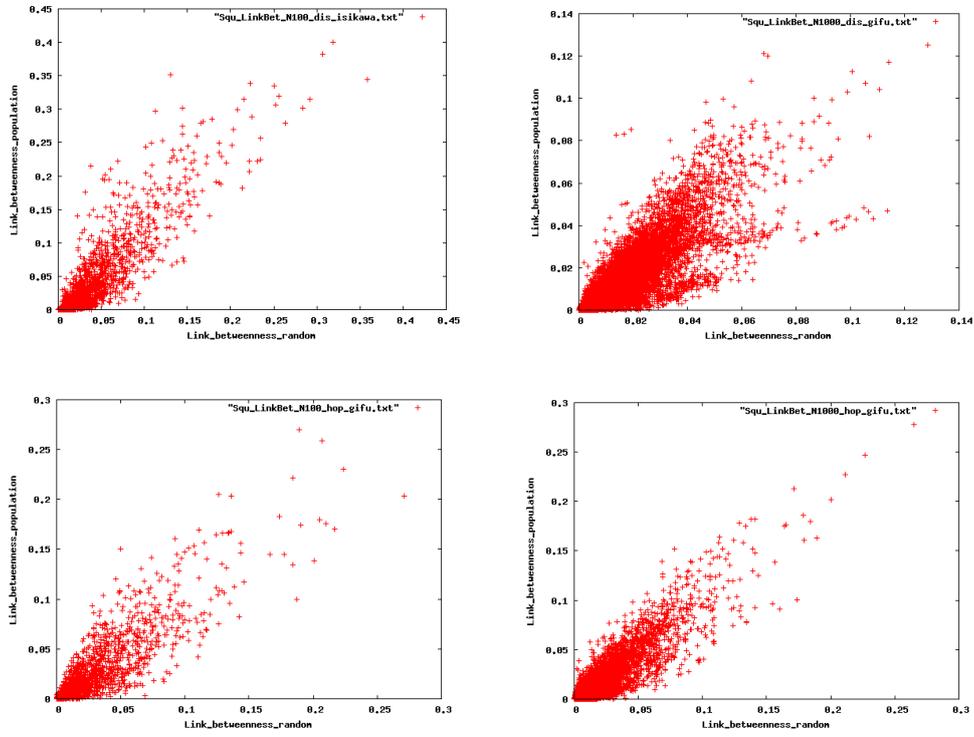


図 4.4.11 岐阜—滋賀エリアにおける四角形分割の距離とホップ数のパスの Link betweenness 散布図

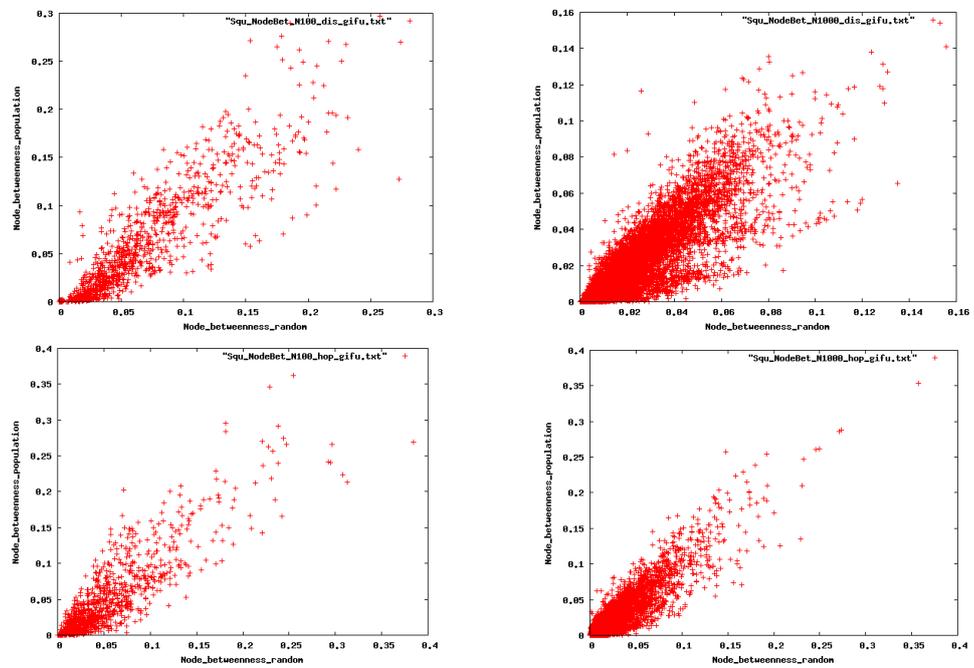


図 4.4.12 岐阜—滋賀エリアにおける四角形分割の距離とホップ数のパスの Node betweenness 散布図

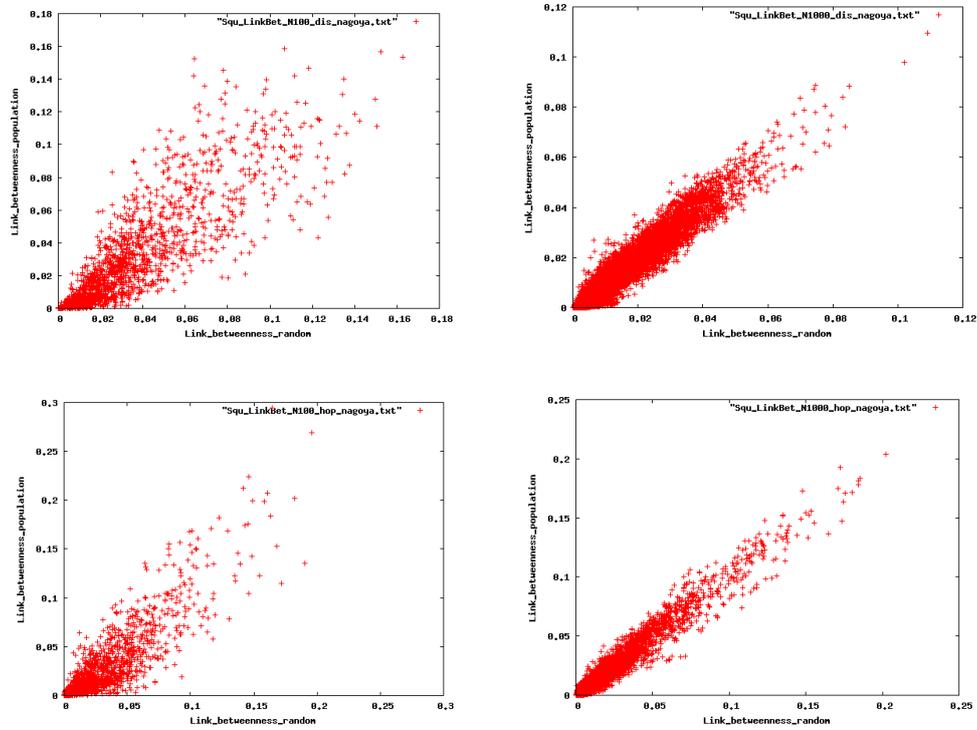


図 4.4.13 名古屋エリアにおける四角形分割の距離とホップ数のパスの Link betweenness 散布図

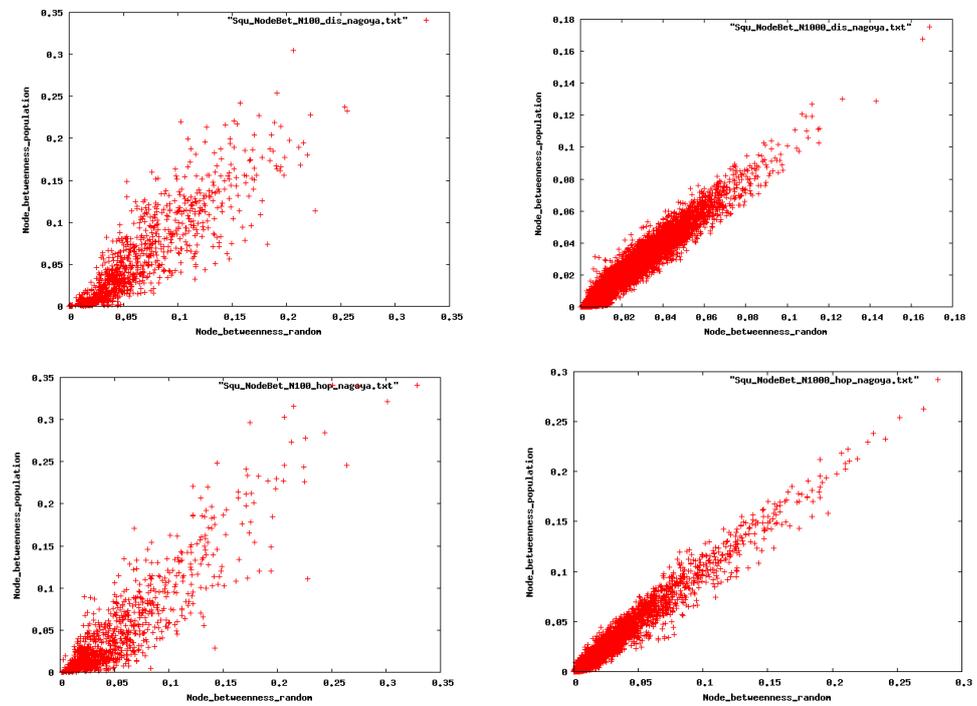


図 4.4.14 名古屋エリアにおける四角形分割の距離とホップ数のパスの Node betweenness 散布図

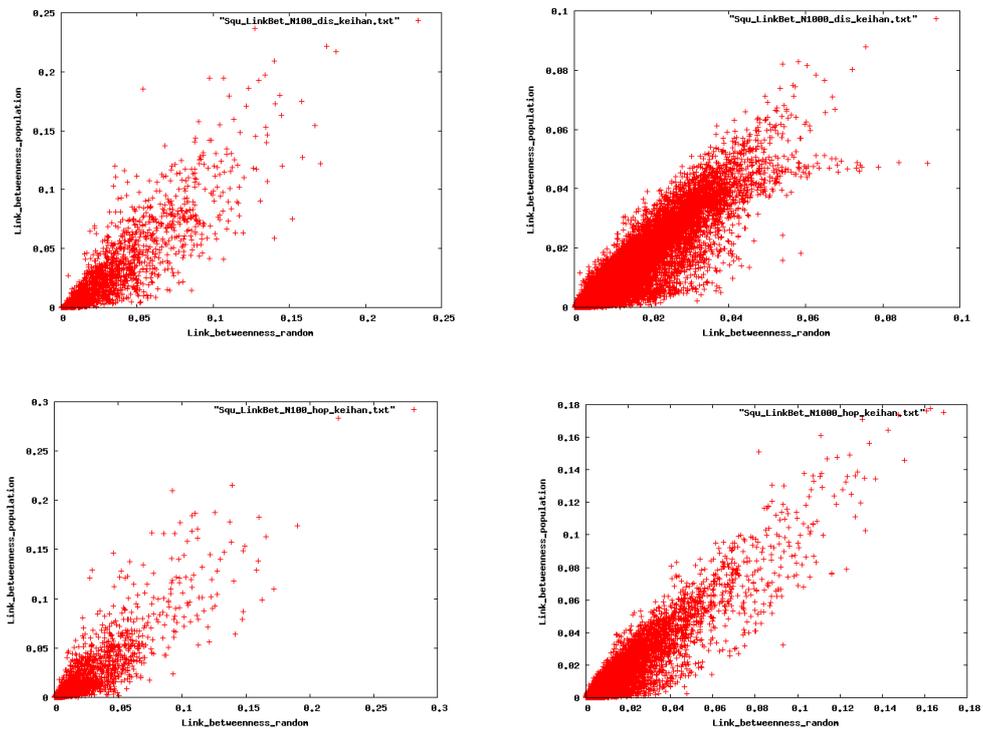


図 4.4.15 京阪神エリアにおける四角形分割の距離とホップ数のパスの Link betweenness 散布図

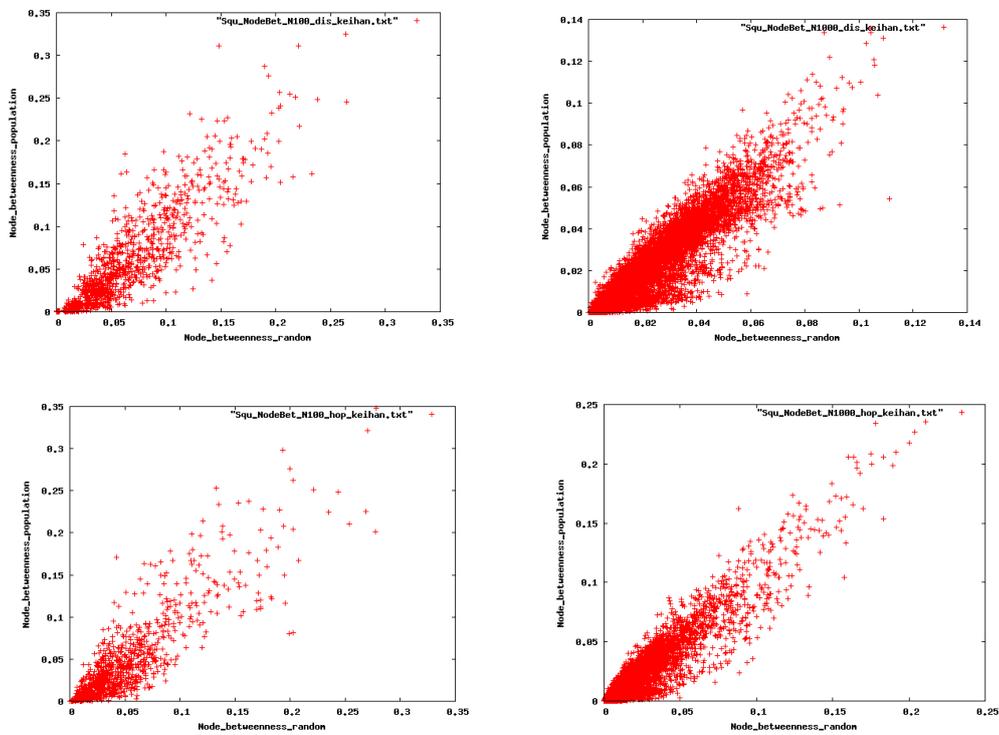


図 4.4.16 京阪神エリアにおける四角形分割の距離とホップ数のパスの Node betweenness 散布図

図 4.4.1~10 と図 4.4.13~14 では、ノード数が 1000 の方が、ノード数が 100 よりも、ランダムに **s** と **t** を選んだ場合と、各ノードの受け持つ人口に応じた確率で **s** と **t** を選んだ場合の、リンクとノードの **Betweenness** の差は小さくなっている。これは 4.2 節に示した結果から分かるように、ノード数が増えるほど各ノードの受け持つ人口の差が小さくなるので、**s** と **t** の選び方の違いが小さくなるからである。

ただし、図 4.4.11~12 と図 4.4.15~16 に見られるように、四角形分割ネットワークの岐阜-滋賀エリアと京阪神エリアについては、特に距離に基づく最短経路のパスでパケットを流した場合に、ノード数 100 と 1000 の場合の **Betweenness** のばらつき具合があまり変わっていないように見える。このことについて明らかにする為に、次節では相関係数という値を導入して、ノード数に対して、**s** と **t** の選び方によるリンクとノードの **Betweenness** のばらつき具合を定量的に分析してみる。

4.5 ノード数に対する Link betweenness と Node betweenness の相関係数

同じ要素数を持つ2種類の異なるデータ列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ と $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ に対して、相関係数:Correl は

$$\text{Correl} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

で定義される。ただし、 \bar{x} は X の相加平均、 \bar{y} は Y の相加平均である。この値が 1 に近いほど、 X と Y の同じ添え字の要素は数値的に一致している。

この節では Link betweenness および Node betweenness に関して、 s と t をランダムに選んだ場合の値を X 、各ノードの受け持つ人口に応じて選んだ場合の値を Y に対応させて、相関係数 Correl を求めた。 x と y の添え字が同じ記号の場合は、同じリンクまたはノードであることを示す。

次項からの図 4.5.1~4.5.16 では横軸 N をノード数 (100,300,500,700,1000)、縦軸 Correl を Betweenness の相関係数の値(0.8~1.0)として、ノード数に対する相関係数の変化を表した。

三角形分割ネットワーク

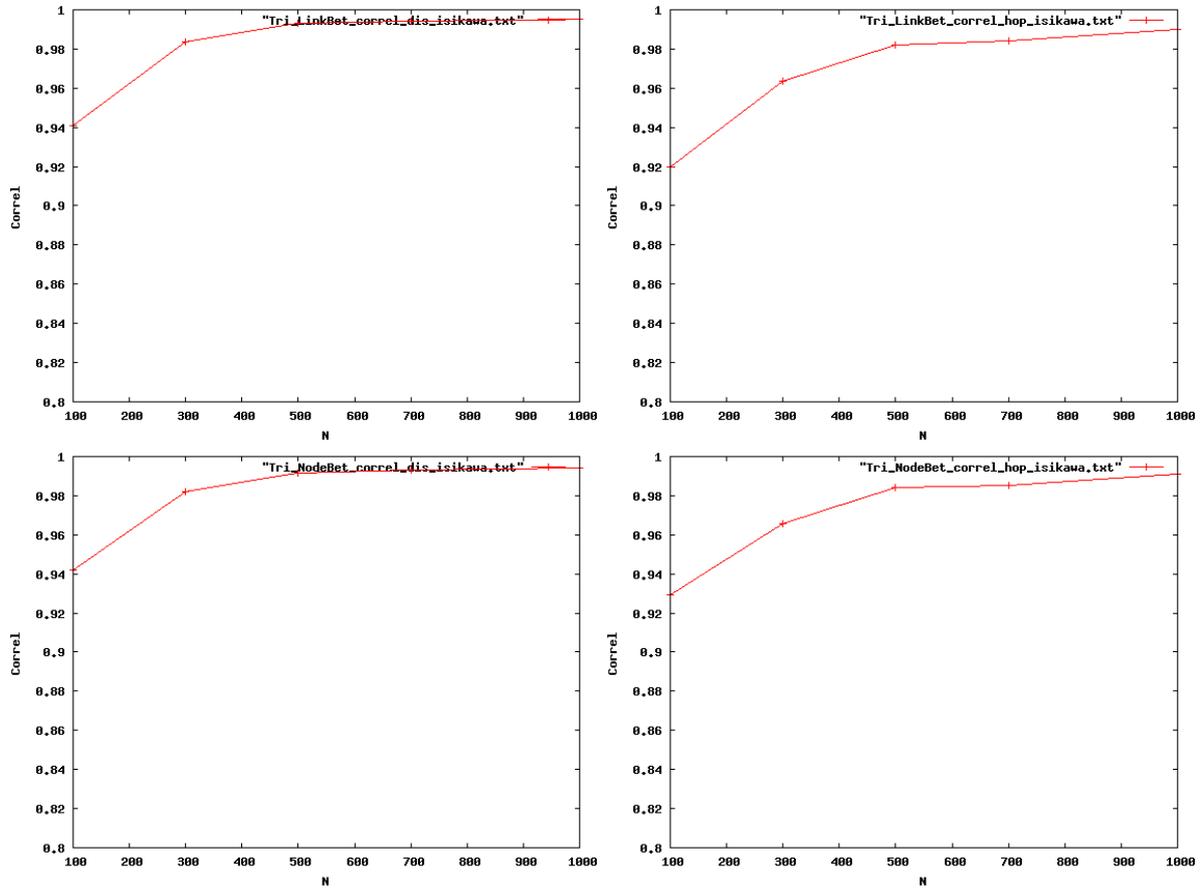


図 4.5.1 金沢-福井エリアにおける三角形分割のノード数に対する **Betweenness** の相関係数の変化図 (左側 2 枚が距離のパス、右側 2 枚がホップ数のパスのもの。また、上 2 枚が **Link betweenness**、下 2 枚が **Node betweenness** のもの。図の並びについては、以降図 4.5.8 まで同様。)

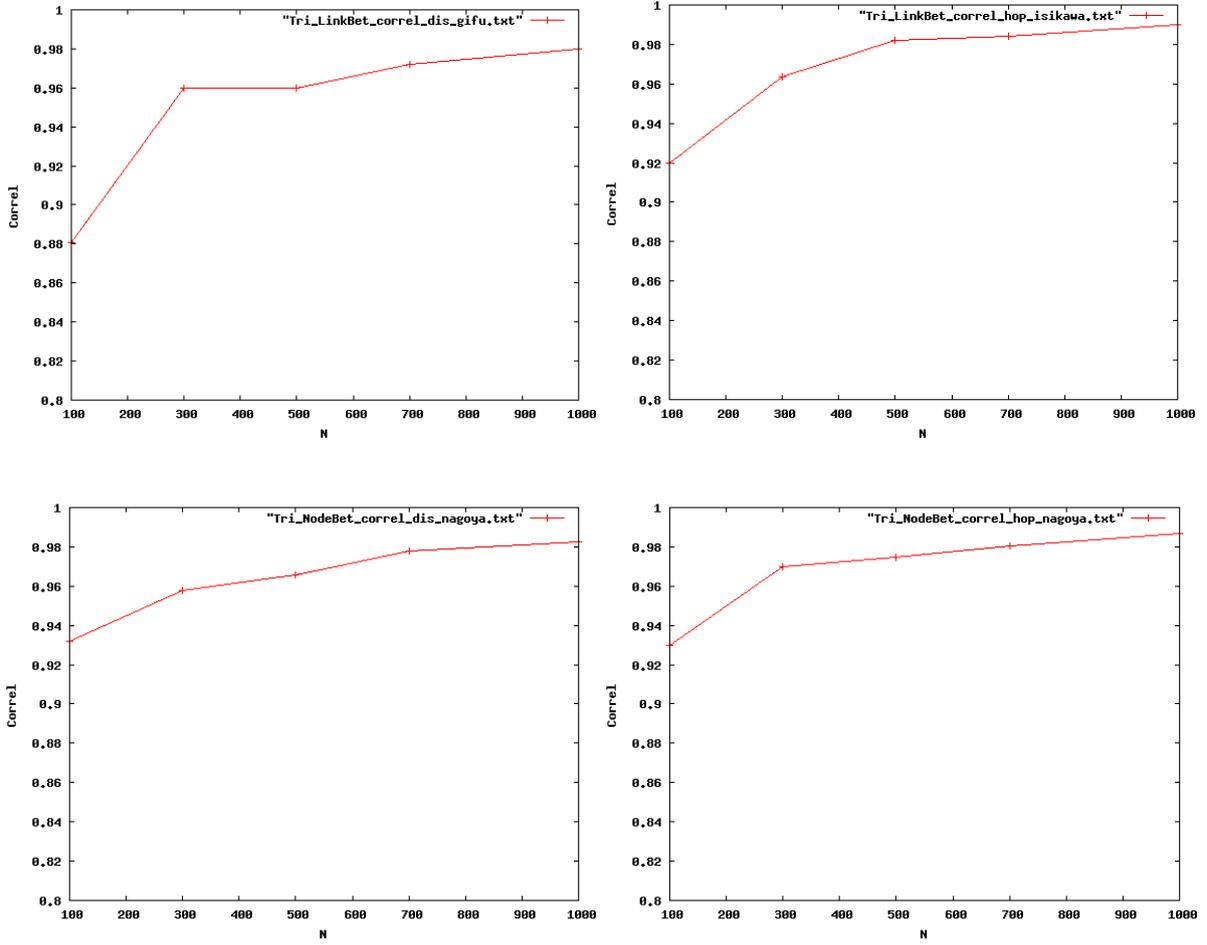


図 4.5.2 岐阜—滋賀エリアにおける三角形分割のノード数に対する **Betweenness** の相関係数の変化図

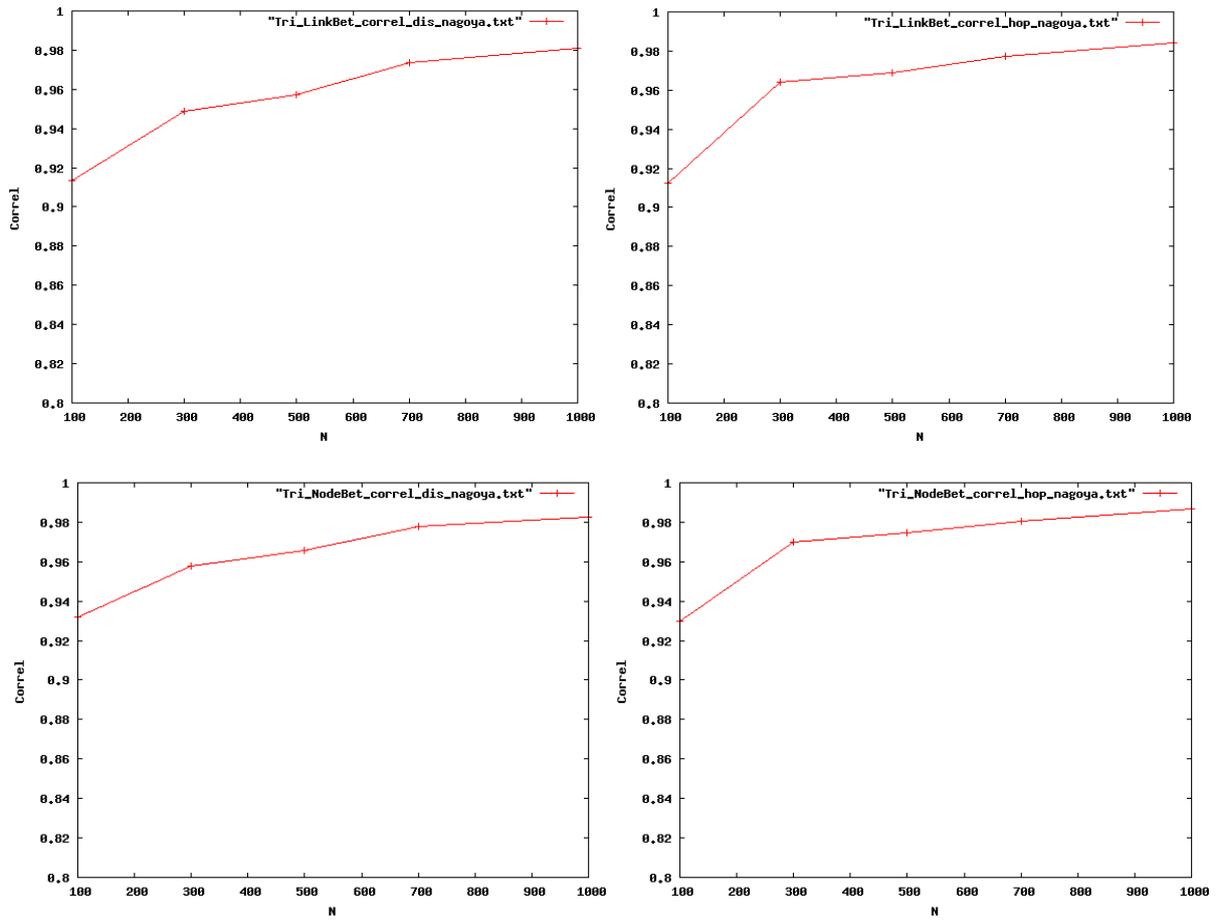


図 4.5.3 名古屋エリアにおける三角形分割のノード数に対する **Betweenness** の相関係数の変化図

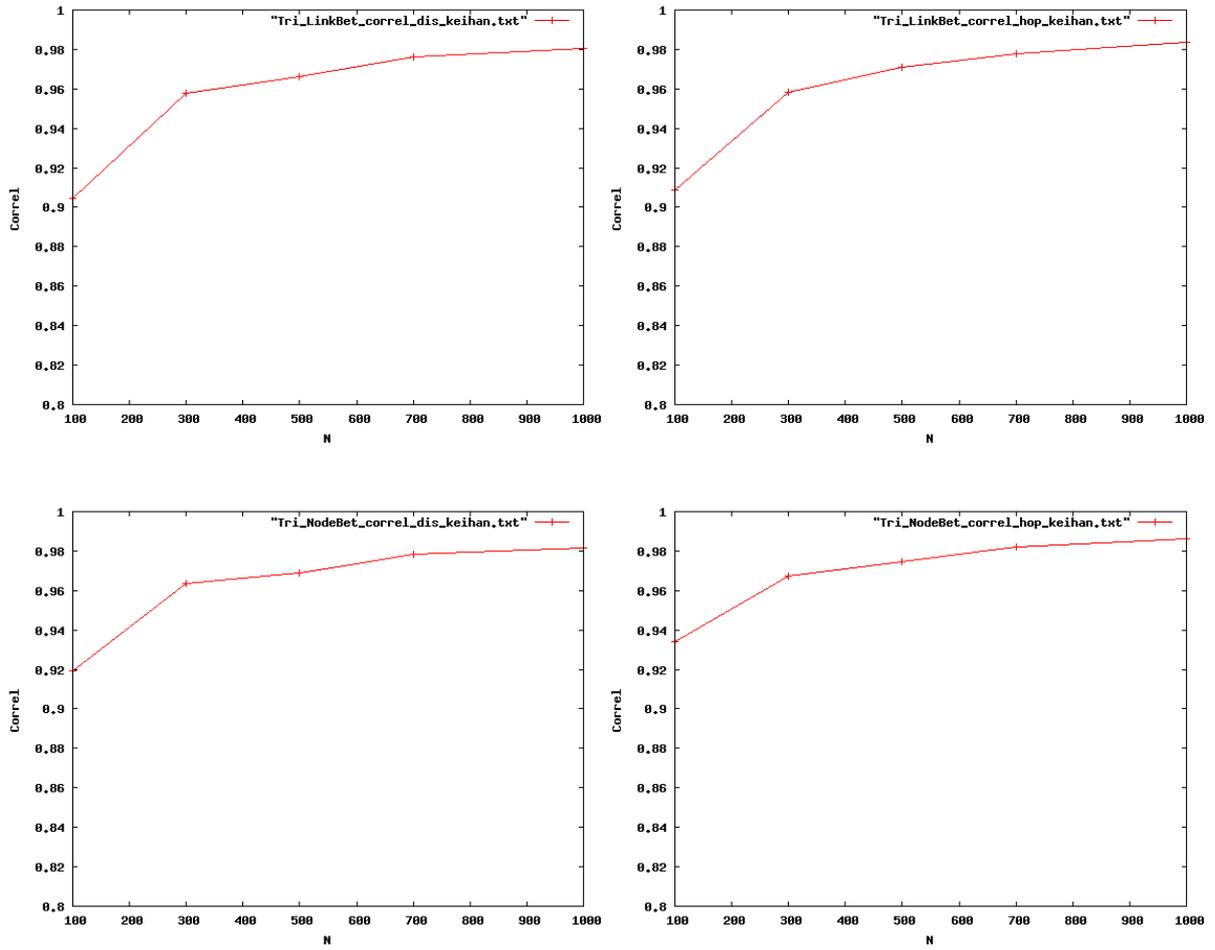


図 4.5.4 京阪神エリアにおける三角形分割のノード数に対する Betweenness の相関係数の変化図

四角形分割ネットワーク

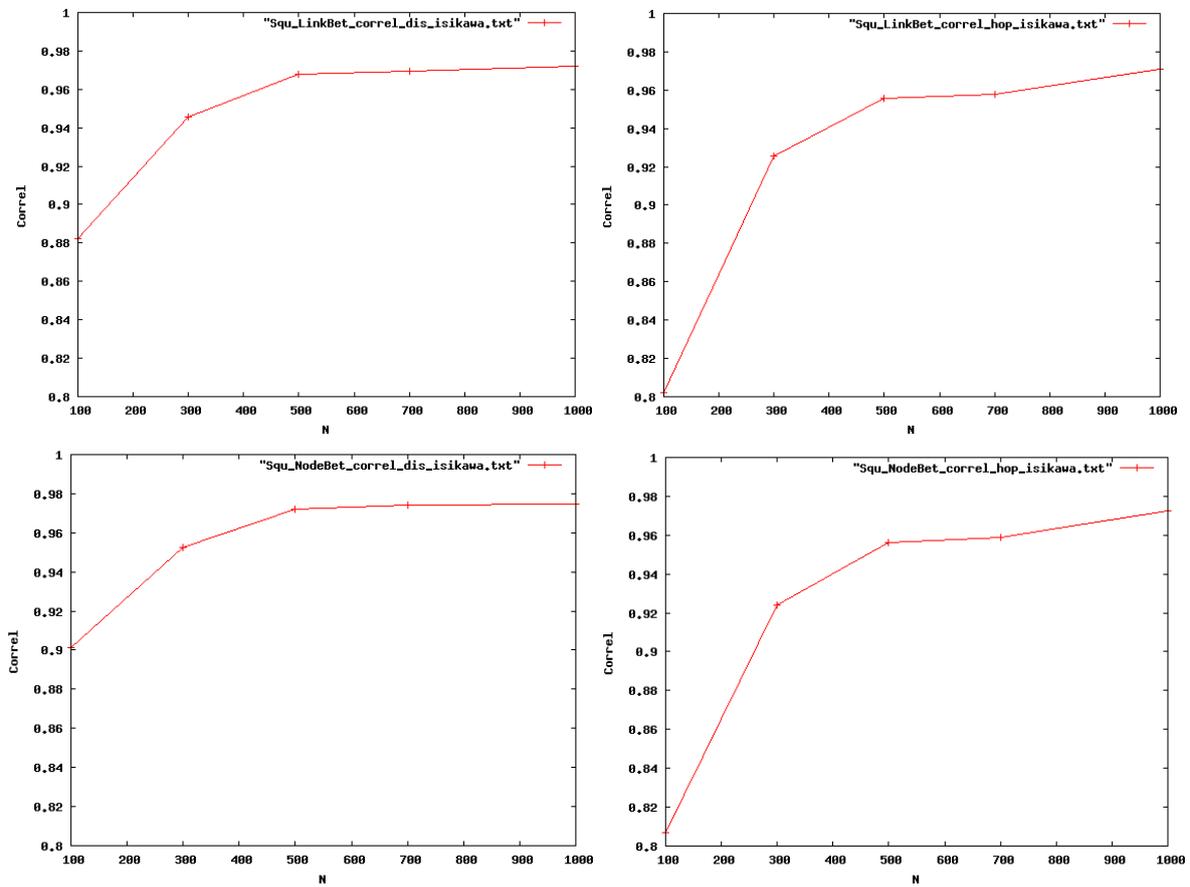


図 4.5.5 金沢ー福井エリアにおける四角形分割のノード数に対する Betweenness の相関係数の変化図

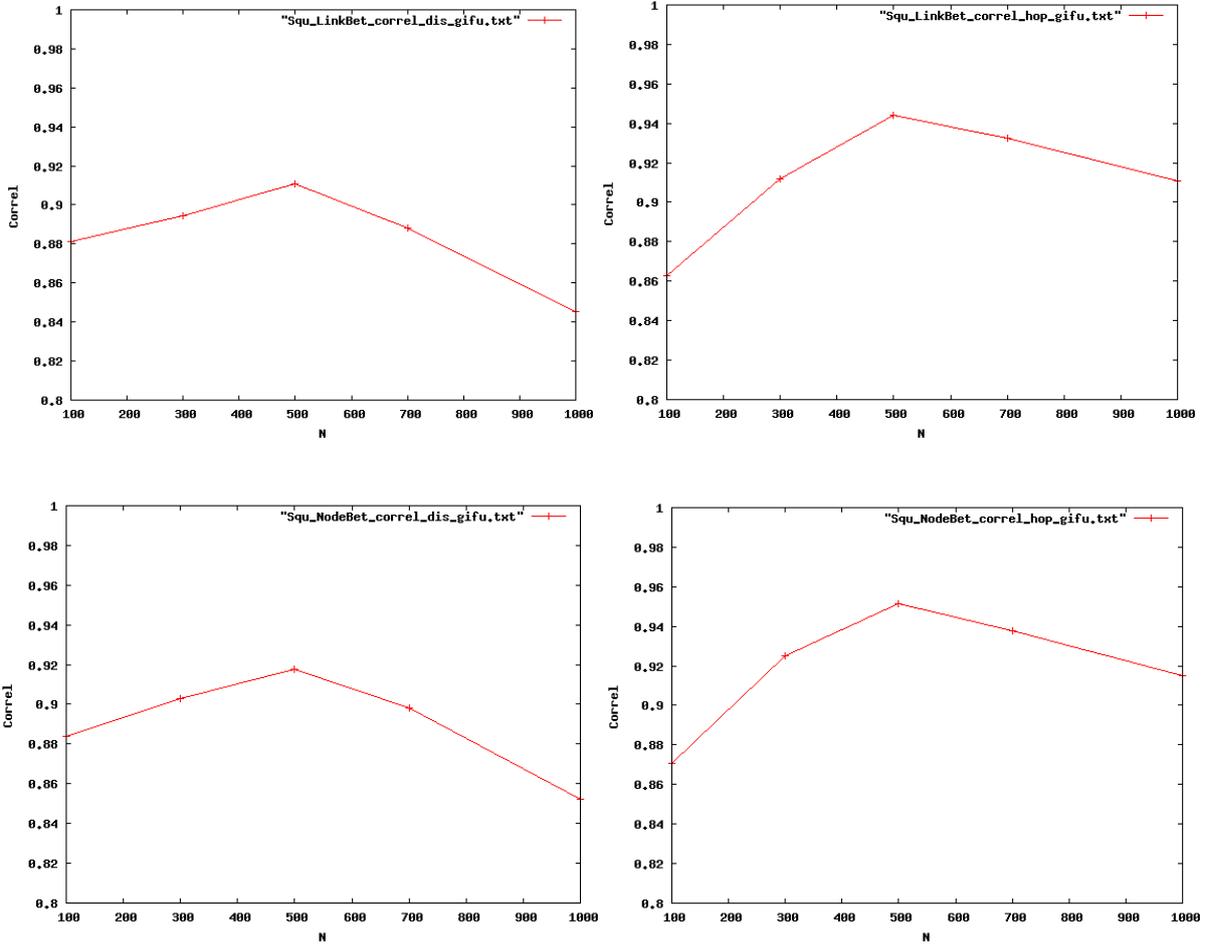


図 4.5.6 岐阜—滋賀エリアにおける四角形分割のノード数に対する **Betweenness** の相関係数の変化図

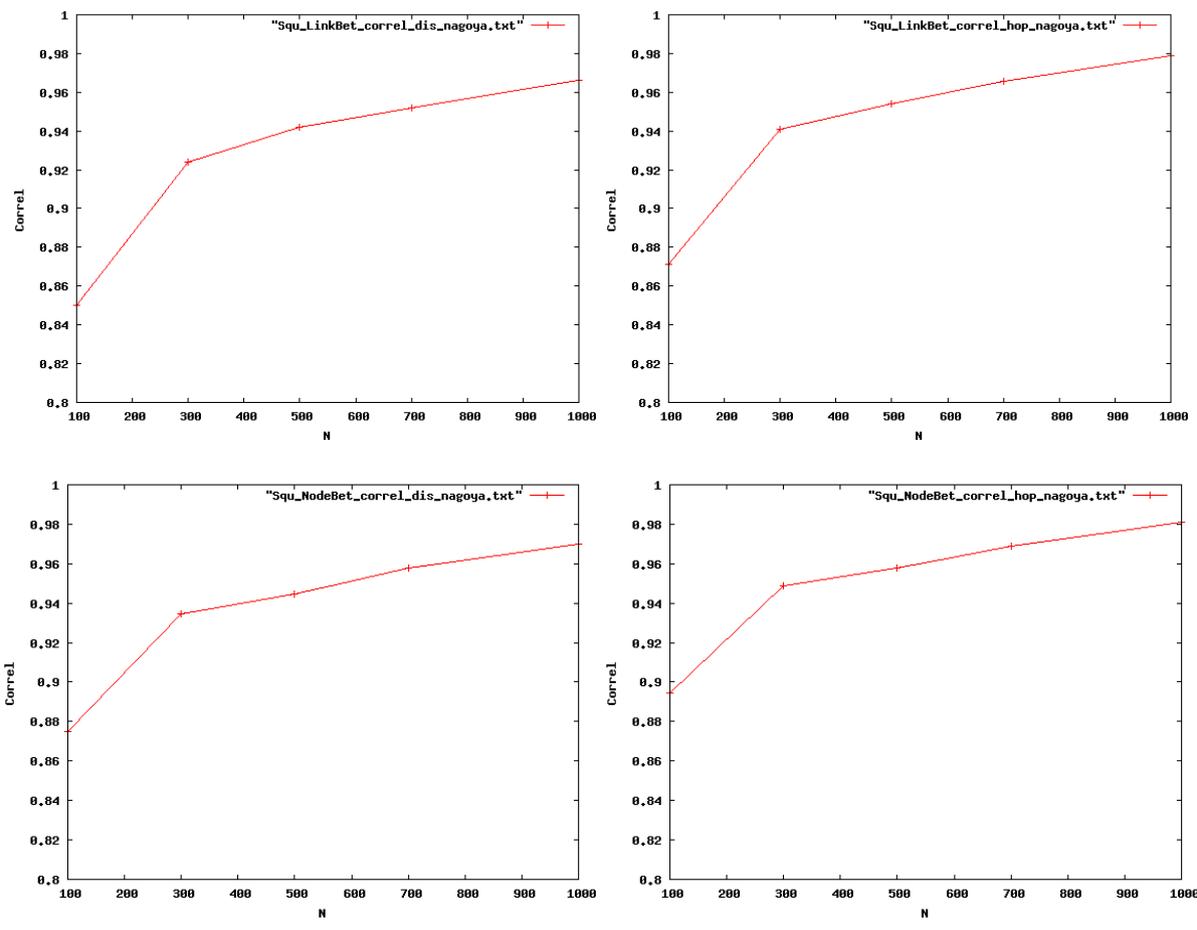


図 4.5.7 名古屋エリアにおける四角形分割のノード数に対する **Betweenness** の相関係数の変化図

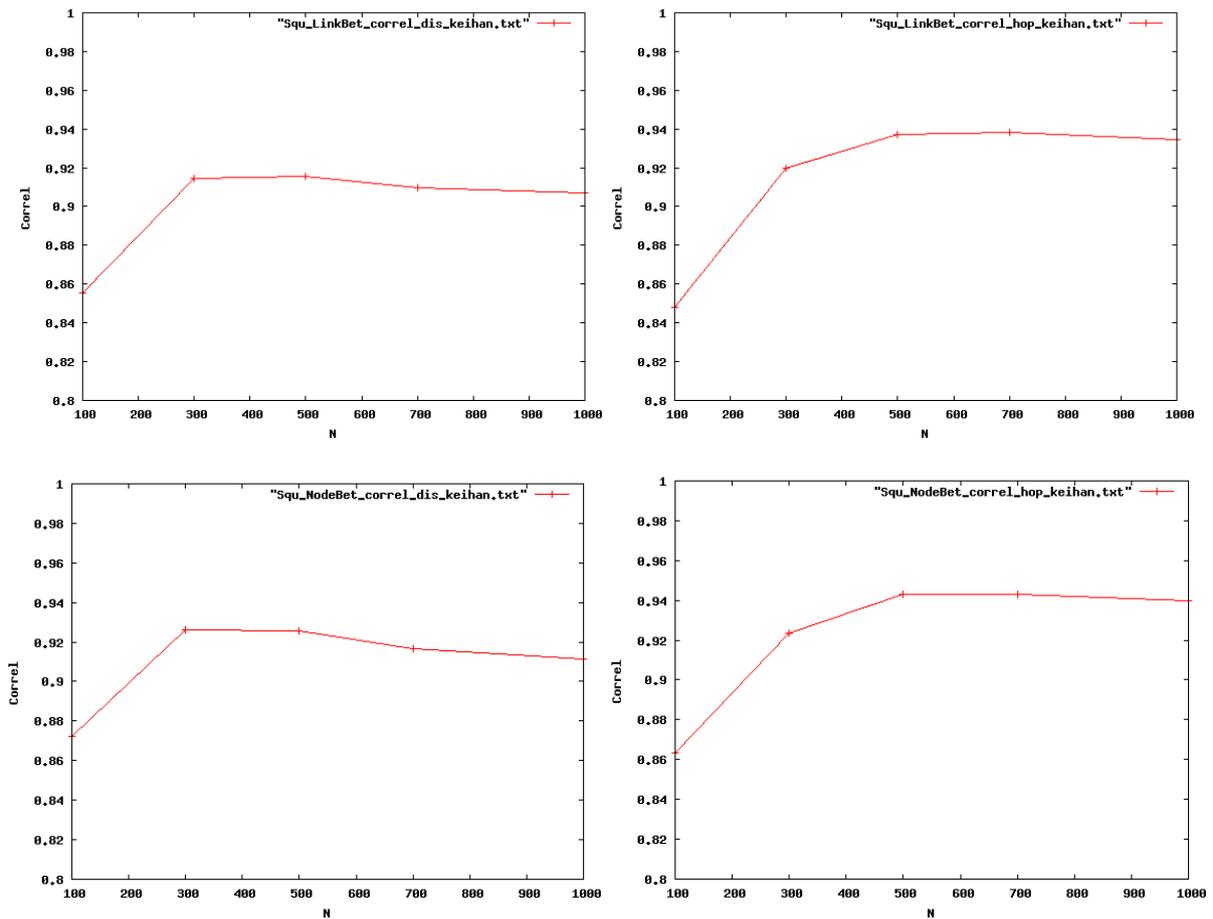


図 4.5.8 京阪神エリアにおける四角形分割のノード数に対する **Betweenness** の相関係数の変化図

まず全体的な傾向としては、全ての相関係数の値が 0.8 以上となっているのでランダムに **s** と **t** を選んだ場合と各ノードの受け持つ人口に応じた確率で **s** と **t** を選んだ場合で大幅に **Betweenness** の値が変化したりはしないという事である。これは 4.3 節でも述べたように、ネットワーク中の多数のノードが結果的に人口を多く受け持つ箇所に配置されるからである。またエリアや分割の仕方によらず、パスの種類が同じであれば **Link betweenness** と **Node betweenness** の相関係数の値の増減の傾向も同じになる。距離に基づく最短経路のパスとホップ数に基づく最短経路のパスでは、パケットが流れるリンクやノードが違うが、相関係数の値は大きく変わらず、また、ノードの増加に対する相関係数の変化は同じようなものとなる。

次に各エリアにおいて、三角形分割の場合はノード数が増えるに従って相関係数の

値が **1** に近づいていくが、それに対して四角形分割の場合では、金沢ー福井エリアと名古屋エリアは三角形分割と同様の傾向が見られるが、岐阜ー滋賀エリアと京阪神エリアではノード数 300 または 500 で相関係数が最大となり、それ以降相関係数の値は減少していく。特に、図 4.5.6 から分かるように、岐阜ー滋賀エリアにおいてパッケージが距離のパスを通った時は、ノード数 100 の場合よりもノード数 1000 の場合の相関係数の値が小さくなっている。このことは、4.1 のシミュレーション結果から分かる、ノード数が増えるに従って各ノードの受け持つ人口の差が無くなるという事実と反しているように思われる。(各ノードの受け持つ人口の差が無くなれば、人口に応じた確率で **s** と **t** を選んでも結局はランダムに選んでいるのと変わらない事になる。)

この理由を調べるために、岐阜ー滋賀エリアにおける四角形分割の距離に基づく最短経路のパスの **Link betweenness** に絞って、ノード数を増やして散布図と相関係数の図を出してみた。

4.6 岐阜ー滋賀エリアの四角形分割の **Link betweenness**

図 4.4.11~12 と図 4.5.6 から分かるように、岐阜ー滋賀エリアの四角形分割ネットワークの距離に基づく最短経路の **Link betweenness** や **Node betweenness** の値は、 $N=100$ の時よりも $N=1000$ の方がばらつくようになる。そこで、まずは N の値を大きくした時の距離に基づく最短経路の **Link betweenness** の散布図を出した。

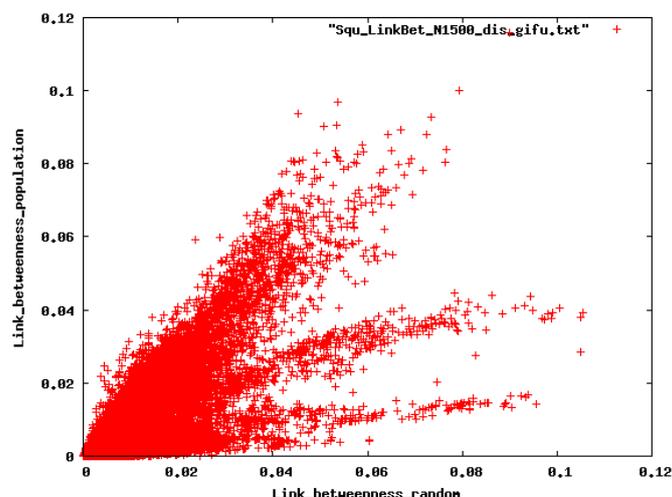


図 4.6.1 岐阜ー滋賀エリアにおける四角形分割の距離のパスの **Link betweenness** 散布図($N=1500$)

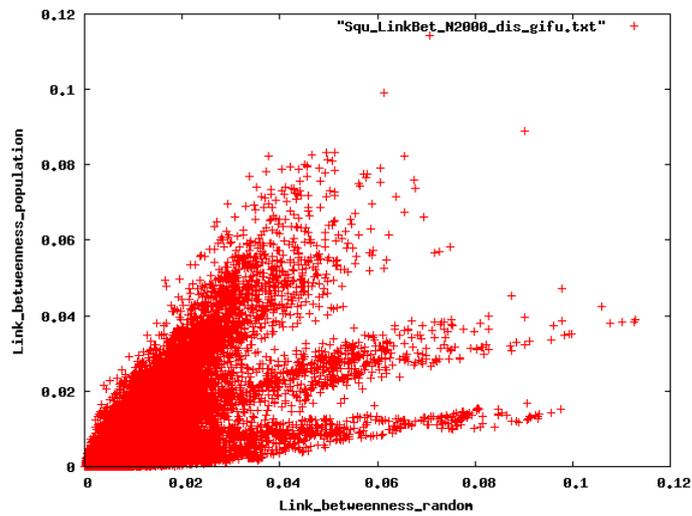


図 4.6.2 岐阜—滋賀エリアにおける四角形分割の距離のパスの Link betweenness 散布図(N=2000)

図 4.4.11 でははっきりと分からなかったが、N=1500 及び N=2000 の場合だと、各ノードの受け持つ人口に応じた確率で s と t を選んだ場合の Link betweenness の値 0.02 と 0.04 付近に、点が集まってラインを作るような現象が見られる。相関係数 Correl の値もこの現象によって小さくなると思われるので、N=2000 まで値を増やした岐阜—滋賀エリアにおける距離に基づく最短経路のパスの Link betweenness の相関係数の図を作成した。

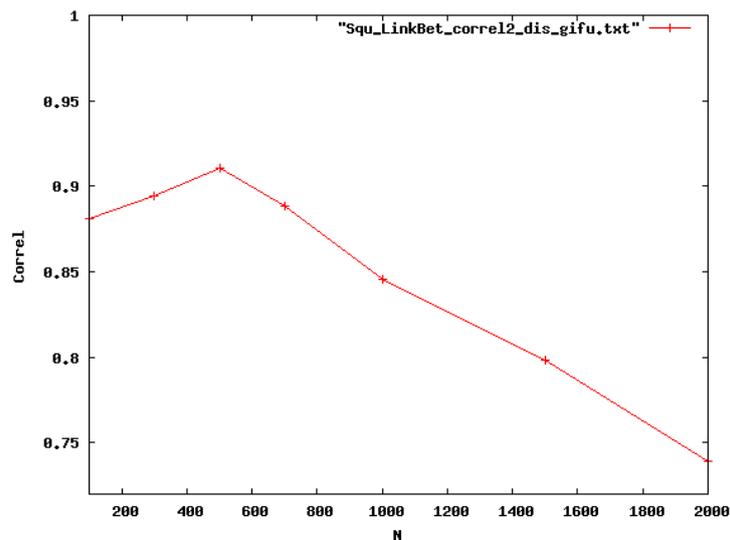


図 4.6.3 岐阜—滋賀エリアにおける四角形分割の、ノード数に対する距離のパスの Link betweenness の相関係数の変化図(N=2000 まで)

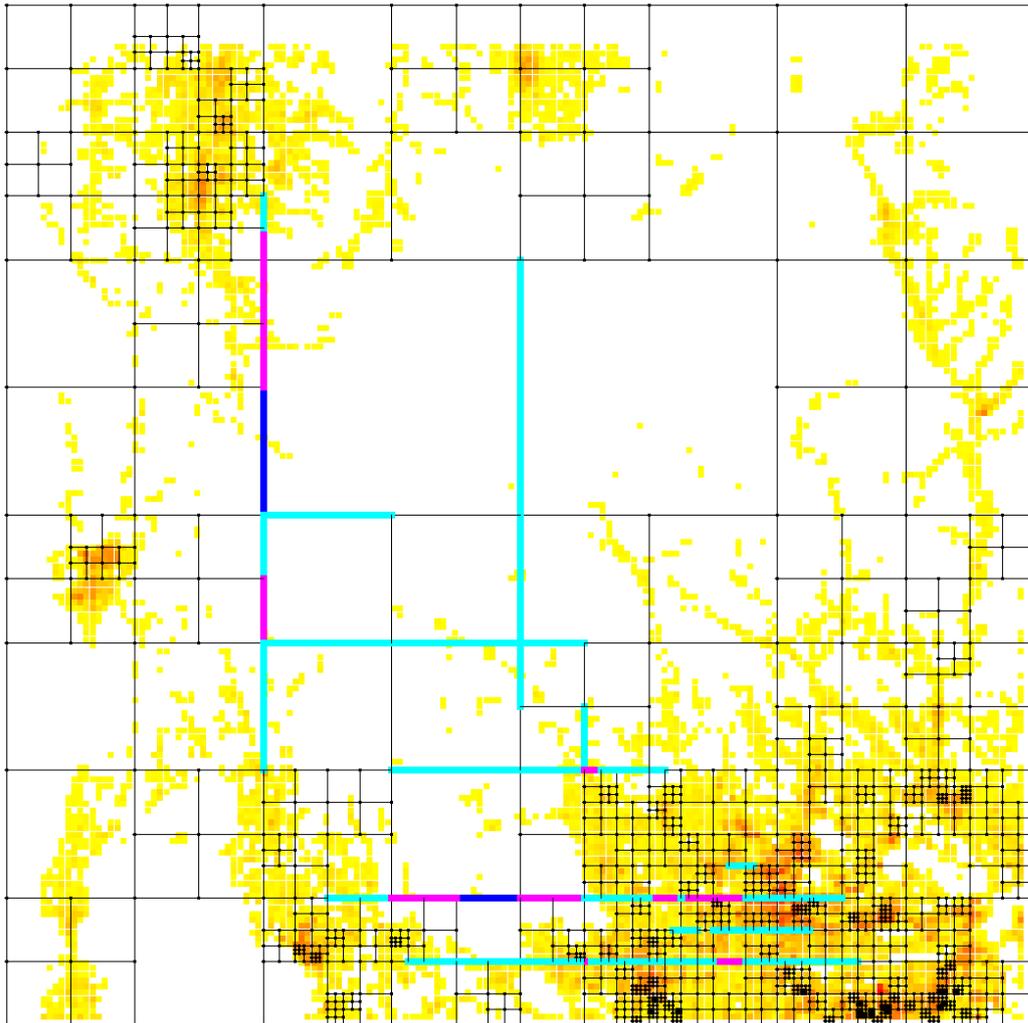


図 4.6.5 岐阜－滋賀エリアにおける距離に基づくパスの Link betweenness の可視図

(各ノードの受け持つ人口に応じた確率で s と t を選択)

図 4.6.4 では右下の人口集中箇所（岐阜市）に出来た多くのノード間で、パケットの転送が行われるので、その付近にマゼンタやシアンのラインが存在するのが確認できる。一方図 4.6.5 では人口の補正を受けるので、岐阜市と、左下の人口集中箇所（長浜市と米原市）と、左上の人口集中箇所（越前市と鯖江市）の三都市間のラインが濃くなり、岐阜市内部だけでのパケットの送受信は少なくなることが分かる。これが、ノード数が多くなるにつれて、Betweenness のばらつきが大きくなる理由だと推測される。

第5章 おわりに

5.1 結論と今後の課題

本研究では、近年提案された三角形分割と四角形分割のネットワークの生成方法に由来するリンク長に関する性質を確認し、またパケットの送受信要求に関するランダム及び人口に比例した発生について、ノードやリンクへの負荷を比較した。また、現実世界で構築・運用する際に、どのようなメリットが得られるか、どの部分に注意をしなければいけないか等についても議論した。大まかな結果としては、

- ①初期の三角形や四角形の一辺の長さとは比べて、非常に短いリンクが多く存在する。
- ②2頂点間の直線距離に対して、ネットワーク上での最短経路の距離は、平均的に1.1~1.2倍程度となる。
- ③距離に基づく最短経路とホップ数に基づく最短経路の2種類でパケット転送を行うと、負荷の高くなるリンクやノードの場所が変化する。また始終点をランダムに選んだ場合と、ノードの受け持つ人口に応じて選んだ場合では、トラフィックの集中するノードやリンクがより鮮明になる。

ことが明らかになった。

①については、4つのエリアのそれぞれについて、人口の集中箇所を細分していく方法によって、初期三角形や初期正方形の一辺の長さとは比べて、ほとんどの場合でリンク長が短く、また平均値も10分の1以下となることを確認した。このように、長いリンクがほとんど存在しないのみならず、**t-spanner**性により、2頂点間の距離の最短経路は最大でも直線距離の2倍で抑えられる。これは実際にネットワークを構築・運用する際に、電波の減衰を抑えたり、リンク設置のコストを小さくしたりできるメリットにつながる。

②については、リンク長の性質を **Stretch Factor** という値を用いて調べ、任意に選んだ異なる2頂点間の直線距離に比べて、ネットワーク上の距離に基づく最短経路のパスが平均的には1~2割程度しか大きくならない事を確かめた。この結果から、パケットの移動時間が短く抑えられるなどのメリットが得られる。

③については、パケット転送を行う際に、パケットの始終点をランダムに選んだ場

合は、ノード配置の密度のみがトラフィックの集中箇所に影響する一方、各ノードの受け持つ人口に応じた確率で始終点を選んだ場合は、単位面積あたりの人口が多い箇所を結ぶパスにトラフィックが集中する傾向がよりはっきりと見られる。言い換えると、ノード配置の密度が高くても、各ノードに割り振られた人口が少なければ、送受信要求は少なくなるので、トラフィックは集中しない。また、パケットが通りやすいリンクやノードはルーティングの種類によって変化する。距離に基づく最短経路の場合は、人口の密集箇所（＝ノードの多く存在する場所）をつなぐライン上のリンクやノードを通る割合が高くなる事が分かった。一方、ホップ数に基づく最短経路を通る場合は、地理的に遠い箇所を迂回する事も許されるので、人口の集中箇所を結ぶラインからずれた位置に存在するリンクやノードを通る割合が、距離に基づく最短経路を通る場合よりも高くなる。これらの傾向から、負荷のかかりそうなリンクやノードを予測して、それらを強化する事が可能となる。

今後の課題としては、より現実世界と対応させるために、各ノードでパケットをためるキューの影響等を考えたときのトラフィック特性が、パケットを独立に流した時に比べてどのように変化するのかを調べる事が挙げられる。また、他の地理的ネットワーク（例えば[9]）における、リンク長の分布や **Betweenness**、2頂点間の平均ホップ数が、三角形分割や四角形分割のネットワークの場合とどう違うのかを比較検討していくことが挙げられる。こうしたネットワークの特性を明らかにすることで、ノード間の距離やネットワークの頑健性に関するメリットが得られたり、ネットワーク構造に適したルーティング法を選択できたりして、利用目的に応じたネットワークの構築・運用へとつなげる事が可能になる。

参考文献

- [1] Paul Baran, “ON DISTRIBUTED COMMUNICATIONS: I. INTRODUCTION TO DISTRIBUTED COMMUNICATIONS NETWORK,” MEMORANDUM RM-3240-PR, 1964.
- [2] R. Albert and A.-L. Barabási, “Error and attack tolerance of complex networks,” *Nature* **406**, pp.378-382, 2000.
- [3] A.-L. Barabási 著, 青木薫 訳, “新ネットワーク思考～世界のしくみを読み解く～,” NHK 出版, ISBN:4-14-080743-11, 2002.
- [4] Mark Buchanan 著, 阪本芳久 訳, “複雑な世界、単純な法則,” 草思社, ISBN:4-7942-1385-9, 2005.
- [5] 谷沢俊弘, “小特集 複雑ネットワーク科学の拡がり: 2 故障と攻撃の両方に強いつながり方とは? —ネットワークの機能不全と構造最適化—,” 情報処理学会, 会誌『情報処理』Vol.49 No.3, pp.282-289, 2008.
- [6] T. Tanizawa, G. Paul, S. Havlin and H. E. Stanley, “Optimization of the Robustness of Multimodal Networks,” *Physical Review E* **74**, 016125, 2006.
- [7] Yukio Hayashi, “Robust Design of Geographical Networks based on a Population against Failures and Attacks,” *Proc. of the 4th Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks*, ISBN:978-963-9799-18-9, 2008.
- [8] Yukio Hayashi, “Evolutionary construction of geographical networks with nearly optimal robustness and efficient routing properties,” *Physica A* **388**, pp.991-998, 2009.
- [9] Y.-B. Xie, T. Zhou, W.-J. Bai, G. Chen, X.-K. Xiao and Bing-Hong Wang, “Geographical networks evolving with an optimal policy,” *Physical Review E* **75**, 036106, 2007.
- [10] 小野泰正, 林幸雄, “複雑ネットワーク上でのダイナミクス研究ツール,” 第4回ネットワーク生態学シンポジウム CD 予稿集, pp.55-57, 2008.

- [11] Prosenjit Bose and Pat Morin, "Online routing in triangulations," *SIAM Journal of Computing* **33**, Vol.4, pp.937-951, 2004.
- [12] M. I. Karavelas and L. J. Guibas, "Static and Kinetic Geometric Spanners with Applications," *Proc. of the 12th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 2001.
- [13] B. Danila, Y. Yu, S. Earl, J. A. Marsh, Z. Toroczkai and K. E. Bassler, "Congestion-gradient driven transport on complex networks," *Physical Review E* **74**, 046114, 2006.
- [14] W.-X. Wang, B.-H. Wang, C.-Y. Yin, Y.-B. Xie and Tao Zhou, "Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network," *Physical Review E* **73**, 026111, 2006.
- [15] Jon Kleinberg, "The Small-World Phenomenon: An Algorithmic Perspective," *Cornell Computer Science Technical Report 99-1776*, 1999.
- [16] D. Liben-Nowell, J. Novak, R. Kumar, P. Raghavan and Andrew Tomkins, "Geographic routing in social networks," *PNAS*, Vol.102, No.33, 2005.
- [17] H. P. Thadakamalla, R. Albert and S. R. T. Kumara, "Search in spatial scale-free networks," *New Journal of Physics* **9**, 190, 2007.
- [18] S.-H. Yook, H. Jeong and A.-L. Barabási, "Modeling the Internet's Large-Scale Topology," *PNAS*, Vol.97, No.21, pp.13382-13386, 2002.
- [19] Yukio Hayashi, "A Review of Recent Studies of Geographical Scale-Free Networks," *IPSJ Digital Courier*, Vol.2, pp155-164, 2006.
- [20] B. M. Waxman, "Routing of Multipoint Connection," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.6, No.9, pp.1617-1622, 1988.
- [21] L. C. Freeman, S. P. Borgatti and D. R. White, "Centrality in valued graphs: A measure of betweenness based on network flow," *Social Networks* **13**, pp.141-154, 1991.

発表論文

[1] 奥村浩徳, 林幸雄, “地理空間上のネットワークモデルのいくつかの特性,” 第5回ネットワーク生態学シンポジウム CD 予稿集掲載予定, 3/9/ 2009.