

修士論文

人口分布に基づいた遅延耐性通信ネットワークの  
メッセージフェリー最適配分問題

1450204

GAO YANG

主指導教員	林	幸雄
審査委員主査	林	幸雄
審査委員	西本	一志
	宮田	一乗
	由井	蘭 隆也

北陸先端科学技術大学院大学  
知識科学研究科

平成 29 年 2 月

# 目次

第1章	
序論.....	1
1.1 研究の背景と目的.....	1
1.2 本論文の構成.....	3
第2章	
地域人口分布の可視化.....	4
2.1 地域メッシュについて.....	4
2.2 人口データの加工.....	7
2.2.1 データ変換手順：.....	8
2.3 地域メッシュコードの可視化.....	9
第3章	
再帰的自己相似分割に基づくネットワーク.....	14
3.1 再帰的分割に基づく MSQ ネットワーク.....	14
3.2 ダイクストラ法による最短距離経路.....	17
3.2.1 ダイクストラ法.....	17
3.2.2 複数本の最短経路を求める方法.....	17
3.2.3 面グラフを用いた改善案.....	21
3.3 メッセージフェリーのルーティングと最適なサービス負荷.....	21
第4章	
ネットワークの特徴分析.....	24
4.1 実験の概要.....	24
4.2 実験の方法.....	24
4.3 ネットワーク構築.....	25
4.4 ネットワーク上の面情報.....	40
4.5 最適解 $\mu$ .....	41
4.6 最適解 $\mu$ の累積分布.....	55
4.7 最適解の指標.....	58
第5章	
結論.....	60
5.1 実験結果のまとめ.....	60
5.2 今後の課題.....	61
参考文献.....	62
謝辞.....	63

## 図目次

図. 1 DTN の伝送技術	1
図. 2 第一次地域区画から第三次地域区画までの関係	9
図. 3 京阪エリア	11
図. 4 名古屋エリア	11
図. 5 福岡エリア	11
図. 6 広島エリア	11
図. 7 札幌エリア	11
図. 8 仙台エリア	12
図. 9 東京エリア	12
図. 10 各エリアのメッシュ内の人口数の累積分布	13
図. 11 各エリアのメッシュ内の人口数の累積分布 (片対数)	13
図. 12 多角形	15
図. 13 正三角形と正方形	15
図. 14 正三角形の MSQ ネットワーク	15
図. 15 正方形の MSQ ネットワーク	16
図. 16 始点 $i$ から終点 $j$ までのグラフ	18
図. 17 ノード数が 22 の正三角形ネットワーク	19
図. 18 ニノード間の複数本最短経路	19
図. 19 複数の最短経路 1.	20
図. 20 複数の最短経路 2.	20
図. 21 複数の最短経路 3.	20
図. 22 面グラフを用いた改善方法	21
図. 23 メッセージがネットワーク上のフェリー移動	22
図. 24 福岡 100 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	25
図. 25 福岡 200 ノード 正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	26
図. 26 福岡 500 ノード 正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	26
図. 27 福岡 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	26
図. 28 福岡 100 ノードから 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	27
図. 29 福岡 100 ノードから 1000 ノード 正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	27
図. 30 広島 100 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	28
図. 31 広島 200 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	28
図. 32 広島 500 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	28

図. 33 広島 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 29
図. 34 広島 100 ノードから 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	..... 29
図. 35 広島 100 ノードから 1000 ノード正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	..... 29
図. 36 京阪 100 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 30
図. 37 京阪 200 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 30
図. 38 京阪 500 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 30
図. 39 京阪 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 31
図. 40 京阪 100 ノードから 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	..... 31
図. 41 京阪 100 ノードから 1000 ノード正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	..... 31
図. 42 名古屋 100 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	... 32
図. 43 名古屋 200 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	... 32
図. 44 名古屋 500 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	... 32
図. 45 名古屋 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.. 33
図. 46 名古屋 100 ノードから 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	..... 33
図. 47 名古屋 100 ノードから 1000 ノード正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	..... 33
図. 48 札幌 100 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 34
図. 49 札幌 200 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 34
図. 50 札幌 500 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 34
図. 51 札幌 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 35
図. 52 札幌 100 ノードから 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	..... 35
図. 53 札幌 100 ノードから 1000 ノード正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	..... 35
図. 54 仙台 100 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 36
図. 55 仙台 200 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 36
図. 56 仙台 300 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 36
図. 57 仙台 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク	.... 37
図. 58 仙台 100 ノードから 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の	..... 37

図. 59 仙台 100 ノードから 1000 ノード正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の .....	37
図. 60 東京 100 ノード正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク ...	38
図. 61 東京 200 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク .....	38
図. 62 東京 500 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク .....	38
図. 63 東京 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク ....	39
図. 64 東京 100 ノードから 1000 ノード正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の .....	39
図. 65 東京 100 ノードから 1000 ノード正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の .....	39
図. 66 福岡 100 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	41
図. 67 福岡 200 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	41
図. 68 福岡 500 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	42
図. 69 福岡 1000 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布 .....	42
図. 70 広島 100 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	43
図. 71 広島 200 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	43
図. 72 広島 500 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	44
図. 73 広島 1000 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布 .....	44
図. 74 京阪 100 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	45
図. 75 京阪 200 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	45
図. 76 京阪 500 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	46
図. 77 京阪 1000 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布 .....	46
図. 78 名古屋 100 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	47
図. 79 名古屋 200 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	47
図. 80 名古屋 500 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	48
図. 81 名古屋 1000 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ 最適解分布 .....	48
図. 82 札幌 100 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	49
図. 83 札幌 200 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	49
図. 84 札幌 500 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	50
図. 85 札幌 1000 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布 .....	50
図. 86 仙台 100 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	51
図. 87 仙台 200 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	51
図. 88 仙台 500 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	52
図. 89 仙台 1000 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布 .....	52
図. 90 東京 100 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	53
図. 91 東京 200 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	53

図. 92 東京 500 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布.....	54
図. 93 東京 1000 ノード正三角形と正方形のネットワーク各 $\mu l$ の最適解分布 .....	54
図. 94 福岡エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu l$ の累積分 布 .....	55
図. 95 広島エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu l$ の累積分 布 .....	55
図. 96 京阪エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu l$ の累積分 布 .....	56
図. 97 名古屋エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu l$ の累積 分布 .....	56
図. 98 札幌エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu l$ の累積分 布 .....	56
図. 99 仙台エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu l$ の累積分 布 .....	57
図. 100 東京エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu l$ の累積分 布 .....	57
図. 101 各ノード数の正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク最適解 $\mu l$ の 最大値グラフ.....	58
図. 102 各ノード数の正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク最適解 $\mu l$ の 平均値グラフ.....	58
図. 103 各ノード数の正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク最適解 $\mu l$ の 分散値グラフ.....	59
図. 104 各ノード数の正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク最適解 $\mu l$ の 総負荷の合計値グラフ.....	59

## 表目次

表. 1 地域メッシュデータの基本的なファイル形式.....	7
表. 2 地域メッシュデータの基本的なファイル形式.....	10
表. 3 ネットワーク構築の組合せ.....	25
表. 4 7つのエリアで構築した MSQ ネットワークの面の数.....	40
表. 5 正三角形と正方形の最適解 $\mu l$ のまとめ.....	60

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景と目的

技術の急速な進歩につれ、通信ネットワークはすでに人々の生活に欠かせない一部となっている。特に、通信ネットワークの超高速化と大容量化は国民生活と商業ビジネスの基盤となっている。また、近年の無線通信技術の成長とともに、通信ネットワークはすでに、広範囲で多様なネットワークになっている。しかし、多様性と範囲の拡大とともに、通信劣化や障害の発生頻度が高くなってきた。従って、このような劣悪な通信条件を克服する通信技術が必要になる。

その一方で、世界中でまだ通信インフラがない地域がたくさん存在している。その地域において、通信サービスを提供するための通信インフラ構築は不可欠である。更に、地震、津波、洪水などの災害で通信インフラが破壊された時、緊急通信をするための通信ネットワークの構築はとても重要である[1]。

そこで、遅延耐性ネットワーク（DTN: Delay Tolerant Networking）に着目する。DTN は一時的に断線しても通信を可能とする中継技術である。特に、劣悪な通信環境や災害時に通信インフラが機能停止になった状況に適した技術である。その特徴は蓄積伝搬型転送と呼ばれ、送信元ノードから宛先ノードまでの通信を行う時、中継ノードが転送データを一時的に蓄積して、車などの物理移動手段を使って、宛先ノードまで伝搬する（図 1 参照）[1]。

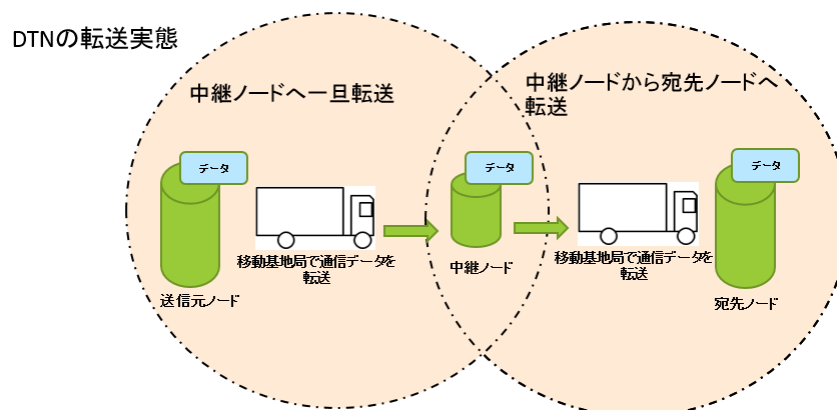


図. 1 DTN の伝送技術



DTN を効率よく使うには、ノード間のデータ中継伝送技術が必要となる。現在 DTN において中継伝送技術は三つの方式：①決定的中継伝送方式、②確率的中継伝送方式、③ハイブリッド型中継伝送方式である。

- ① 決定的中継伝送方式は、あらかじめ経路や接触相手を決め、ノード間は計画通り接触する手法である。経路を決めるために、現場の情報をあらかじめ集める必要がある。しかし、現場の情報が獲得できない場合は利用できない[1]。
- ② 感染型中継方式 (Epidemic Routing) は確率的中継方式の中で最も多く使われている方式である。この方式は、デバイス性能や電源が乏しいケースを想定して、宛先端末へ到着可能な全ての通信経路に複製メッセージを送出する。しかしながら、この方式は明らかにネットワーク資源の消費量が多く、非効率となる[1]。
- ③ ハイブリッド型中継伝送方式は上記二種類の中継伝送方式を組み合わせでできた方式である。その中で、直接通信できない端末間でメッセージの送受信を行うためにあらかじめ定められたルーティング上に移動するフェリーと呼ばれる、移動体による搬送をメッセージ伝搬手段として利用したメッセージフェリー手法は効率的である[1]。

特に、複数のメッセージフェリーを利用する場合は、転送効率が高いため、**multiple** フェリー手法も提案された[2]。このような手法では、情報転送能力や移動能力は単一メッセージフェリーより高く、カバーする範囲も広い。また、故障や意図的な攻撃に対して、頑健性が強くなることも期待できる。

本研究では、指定したエリア内の人口分布を考慮した空間的に非均一な送受信を考え、直接通信できない端末間でメッセージの送受信を行う際に、あらかじめ定められたサイクル(面)上を移動する複数フェリーによるメッセージ伝搬を利用する。また、次数順のノードにも結合耐性が強い、直線距離高々の  $t$  倍で抑えられと局所情報のみで効率的に求められるという長所がある MSQ (Multi-Scale Quartered) ネットワークという再帰的分割によるネットワークにおけるメッセージフェリーの最適配分について、シミュレーションを通して検討する。

## 1.2 本論文の構成

本論文は序論と結論を含め 5 章で構成している。以下にその構成を述べる。

第 2 章では、本研究は指定したエリア内の人口分布可視化について説明する。

第 3 章では、人口分布に従った、再帰的分割で構築される MSQ ネットワークの生成手法を説明する。また、生成したネットワーク上に、任意二つノード間の最短経路の複数本求める方法を述べ、ネットワークの通信コストと評価基準を紹介する。

第 4 章では、正三角形と正方形の二つの MSQ ネットワークの構造とメッセージフェリーの巡回度を考え、信頼性が高くかつ効率的なルーティングを実現する。End-to-end 遅延とサービス負荷間のバランスをとることにより、通信コストを最小化する最適解を数値的に求める。また、二つの MSQ ネットワークを通信コストに関して比較し、より良い設計法を議論する。

第 5 章では、本研究の結論をまとめる、さらに今後の課題に関して述べる。

## 第2章

# 地域人口分布の可視化

### 2.1 地域メッシュについて

人口分布地図の作成には地域メッシュデータが必要となる。今回、使った地域メッシュ統計データは経度・緯度の座標に従った80km×80kmの大きさの各地域のデータである。このデータは平成22年国勢調査の結果を用いて作られたものである。

地域メッシュは以下のように第1次地域区画、第2次地域区画、第3次地域区画に分けられている。

#### 第1次地域区画（1次メッシュ）

- ❖ 経度差1度、緯度差40分
- ❖ 1/20万地勢図の図郭割の範囲に該当
- ❖ 約80km×80km

#### 第2次地域区画（2次メッシュ）

- ❖ 経度差7分30秒、緯度差5分
- ❖ 1/2.5万地形図の図郭割の範囲に該当
- ❖ 約10km×10km

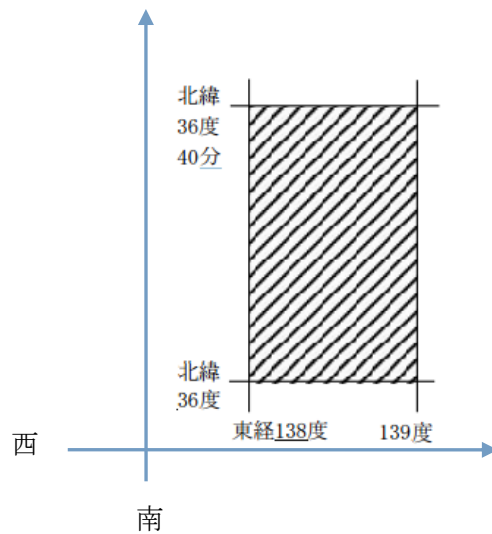
#### 第3次地域区画（3次メッシュ、基準地域メッシュ）

- ❖ 経度差45秒、緯度差30秒
- ❖ 各1/2.5万地形図の図郭割の縦横10等分の範囲に該当
- ❖ 約1km×1km

## 地域メッシュコードの付け方

日本全国土をカバーする上記の地域メッシュは、東経 122° から 154° 、北緯は 20° から 46° までを範囲としている[3]。

第 1 次地域区画は 4 桁の数字で表示される。例では：5438 においては、前の二桁の意味は南端緯度  $36 \times 1.5 = 54$  となる。後ろの二桁は西端経度 138 の下二桁を使う [138 ⇒ 38]。



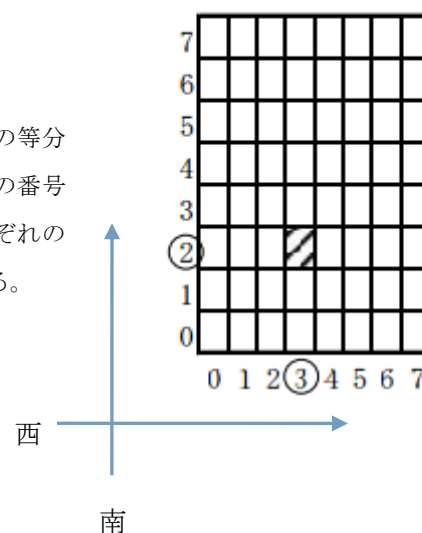
第 2 次地域区画は 2 桁の数字で表示される。

例：543823

第 1 次地域区画の縦の等分区画に南から 0～7 の番号を付け、これをそれぞれの区画を示す数字

第 1 次地域区画の横の等分区画に西から 0～7 の番号を付け、これをそれぞれの区画を示す数字とする。

第1次地域区画  
(地域メッシュ・コード5438)

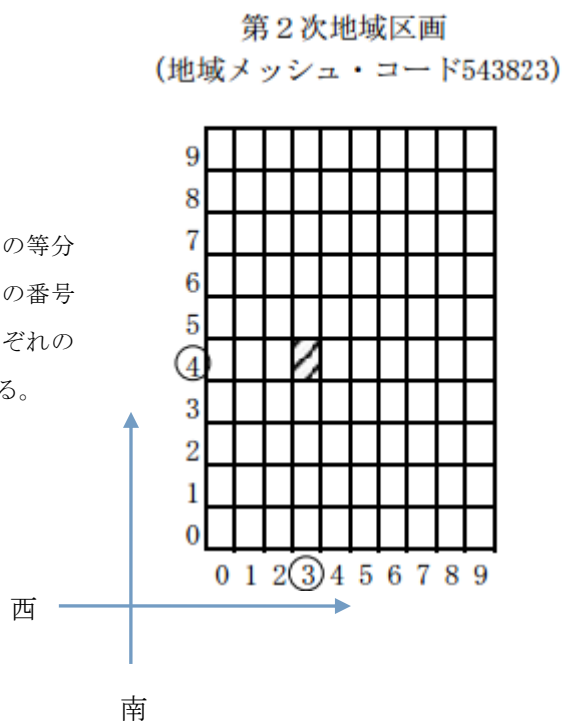


第3次地域区画は2桁の数字が表示されている。

例：54382343

第2次地域区画の縦の等分区画に南から0～9の番号を付け、これをそれぞれの区画を示す数字

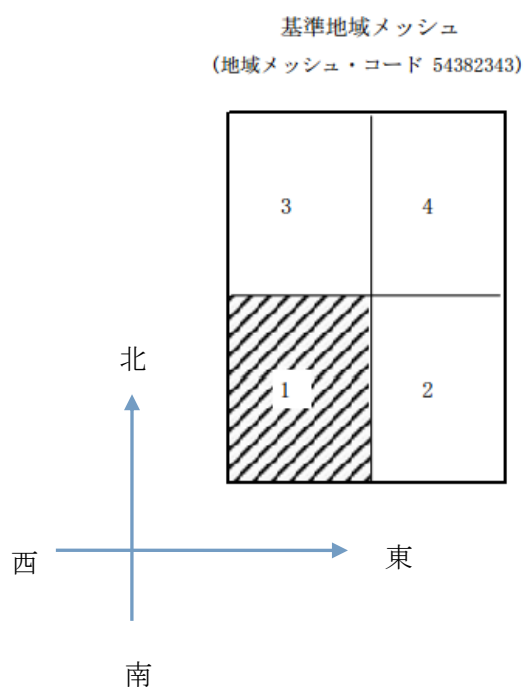
第2次地域区画の横の等分区画に西から0～9の番号を付け、これをそれぞれの区画を示す数字とする。



2分の1地域メッシュは第3次地域区画コードの後ろに1桁数字で表示される。

例：54382343 1

基準地域メッシュの各辺を2等分して得られる4個の区画に、南西側、南東側、北西側、北東側の順に1～4の番号を付け、これをそれぞれの区画を示す数字とする。



## 2.2 人口データの加工

先に述べた人口メッシュデータは（公益財団法人）統計情報研究開発センターから提供された平成 22 年国勢調査地域メッシュ統計普及編成データである。

データの基本的なファイル形式は以下のように定められている。

地域メッシュコード					総人口
1 次	2 次	3 次	4 次	区画区分	
5640	00			2	2163
5640	00	19		3	6
5640	00	19	4	4	6
5640	00	36		3	36
5640	00	36	4	4	36

表. 1 地域メッシュデータの基本的なファイル形式

プログラムによってデータを読み込む時、表 1 のような基本的なファイル形式から、処理プログラムに適したデータ形式に変換する必要がある。

このような変換をする際、AWK という UNIX 上で開発されたプログラミング言語を使った。

AWK のコマンド形式：

**% awk '条件 {アクション}' 対象ファイル名**

上記の '条件 {アクション}' は読みこんだデータの一行がある条件に一致するのなら、{ } の中の、アクションを実行せよということを表す。

例： **% awk -F, '(\$1>200) {print \$1,\$2}' ファイル名>新しいファイル名**

説明：

1. **-F,** はデータのカラムの間のコンマを消す時使う命令。同じく **-F,** の代わりに **-F\t** を使うとデータのカラムの間のタブを消す命令になる。
2. **\$1** はデータの 1 カラムという意味。
3. **(\$1>200)** はデータの 1 カラムの数値は 200 を大きいという条件。
4. **print \$1,\$2** はカラム 1 と 2 を表示するというアクション。
5. **>** は表示したいデータを新たなデータファイルに保存するパイプ命令。

### 2.2.1 データ変換手順：

まず、地域メッシュコードの中に存在するスペース（タブ）を削除する（但し、地域メッシュコードと総人口数の間のスペースは消さない）。すると、元のデータは”5640001944>6”のような形に変換される。

この指令コードは：`% awk -F' t' '{printf $1,$2}' ishikawa.txt > ishikawa.csv`とした。

次に、4次メッシュコードと区画区分までの、必要な部分だけを保存する。そのため、タブが削除された `ishikawa.csv` では必要のデータ部分が 5640000000 より大きい値となる。保存されたデータを `result_ishikawa.csv` と命名する。

この指令コードは：`$ awk '($1>5640000000){print $1,$2}' ishikawa.csv > result_ishikawa.csv`とした。

最終的に読み込んだデータは `result_ishikawa.csv` というデータファイルになる。

以上の手法で加工した結果を検証するため、別のコマンドとして5カラム目の区画区分の値が4の時だけを抽出したデータと比較した。その結果、得られた結果は全て同じ結果になることを確認した。

この指令コードは：`% awk '($5=4){print $1,$2}' ishikawa.csv`とした。

## 2.3 地域メッシュコードの可視化

地域メッシュコードを可視化するために、OpenGL という三次元のグラフィックスライブラリ（正確には Application Program Interface, API）を利用した。OpenGL によりディスプレイ上で表示できるのは画像上の座標値の画像であるため、地域メッシュコードを座標値に変換する必要がある。さらに、座標値は2分の1地域メッシュ(4次メッシュコード)をベースにして、左下の座標を基準点として一辺の長さを0.05とする正方形が第4次地域区画(4次メッシュコード)最小単位の各メッシュを表し、各メッシュ内の人口を濃淡で描画する。第3次地域区画(3次メッシュコード)の長さは4次の倍の0.1となる。第2次地域区画(2次メッシュコード)の長さはその10倍となる。これらから、第1次地域区画(1次メッシュコード)5640の地域は長さ8(第1次地域区画は縦と横が8等分されている)になる(図2参照)。

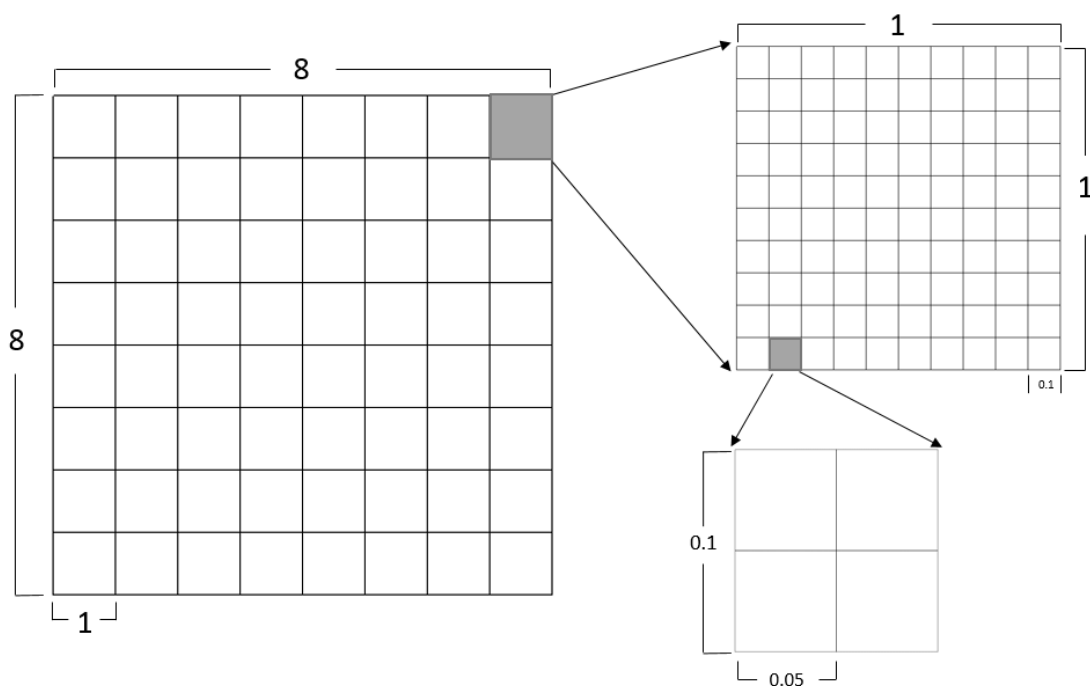


図. 2 第一次地域区画から第三次地域区画までの関係



地域メッシュコード					
1次	2次	3次	4次	区画区分	総人口
	ab	cd	e	f	
5640	00			2	2163
5640	00	19		3	6
5640	00	19	4	4	6
5640	00	36		3	36
5640	00	36	4	4	36

表. 2 地域メッシュデータの基本的なファイル形式

座標値は表 2 に示す 2 次メッシュコードのコラム a, b, c, d, e から区画区分 f までで決まる。

座標の計算式は：

$$x \text{ 座標} = b + 0.1 * d + 0.05 \quad (0 \leq b \leq 7, 0 < d \leq 9)$$

$$y \text{ 座標} = a + 0.1 * c + 0.05 \quad (0 \leq a \leq 7, 0 < c \leq 9)$$

例：5640 00 19 4 4 は a=b=0, c=1, d=9 で、e の値がある場合は 0.05 に加える。

2 分の 1 地域メッシュまでのコードの座標は：

$$x \text{ 座標} = 0 + 0.1 * 9 + 0.05$$

$$y \text{ 座標} = 0 + 0.1 * 1 + 0.05$$

また、得られた座標値（長さ 8 の座標図）が OpenGL のウィンドウのサイズをあわせるために、座標値を  $x * (w/8)$ 、 $y * (h/8)$  に掛け算する。（w は OpenGL ウィンドウの横幅、h は OpenGL ウィンドウの縦幅）

こうして得られた座標を左下の基準点として、長さ 0.05 の正方形のを最小単位とした人口メッシュを描画する。

以下は、京阪、名古屋、福岡、広島、札幌、仙台、東京の 7 つのエリアの人口メッシュデータを可視化した図 3~9 を示している、各ブロックの色は人口数に比例した濃淡として赤→黄→白で表示している。このような濃淡により人口数の偏りが直観的にわかりやすくなる。また、図 10 ~ 11 のように各メッシュに割り当てられた人口数の累積分布は指数分布に従うことが分かった。

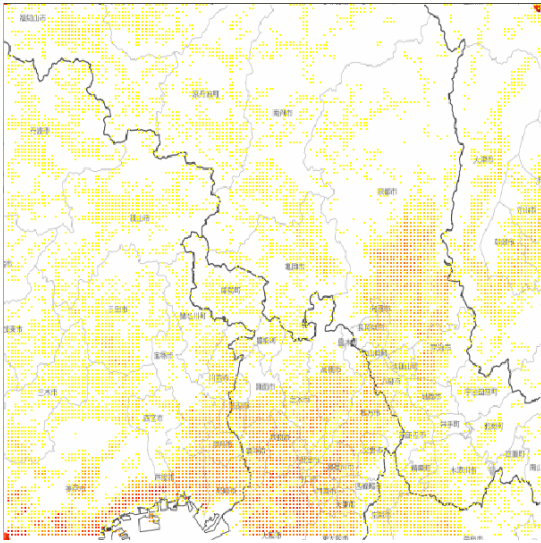


図. 3 京阪エリア

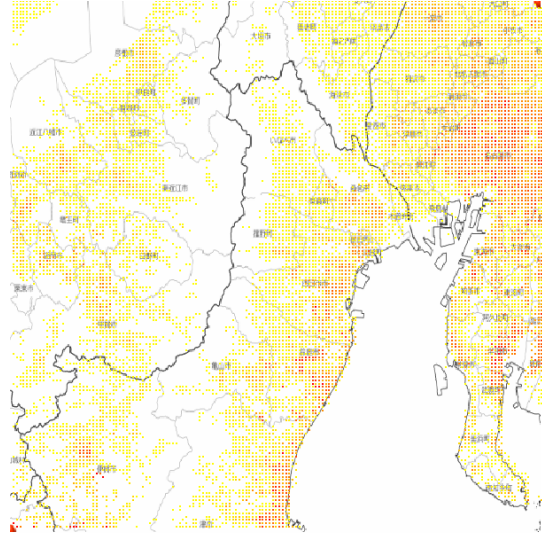


図. 4 名古屋エリア

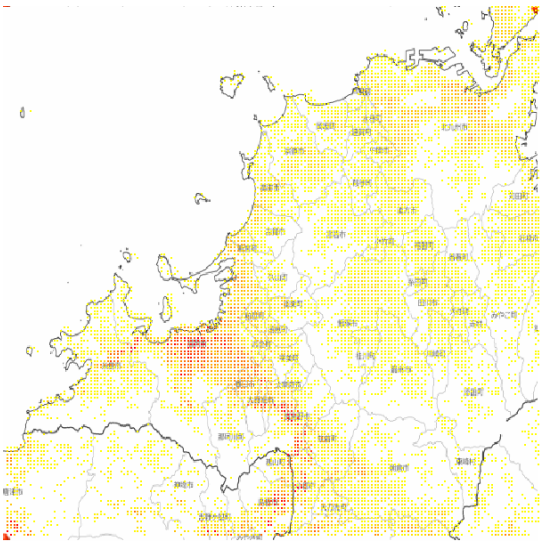


図. 5 福岡エリア

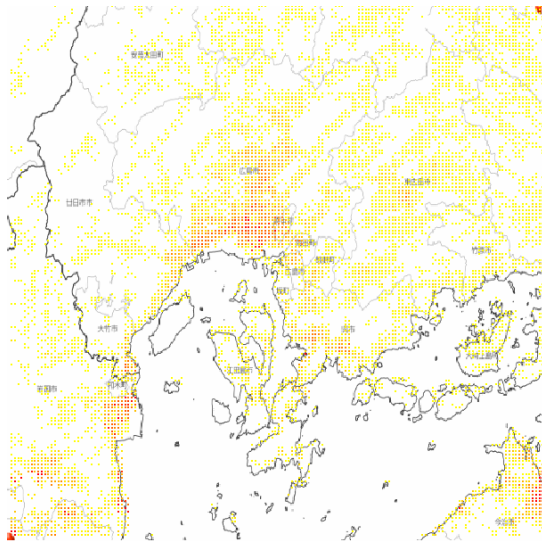


図. 6 広島エリア

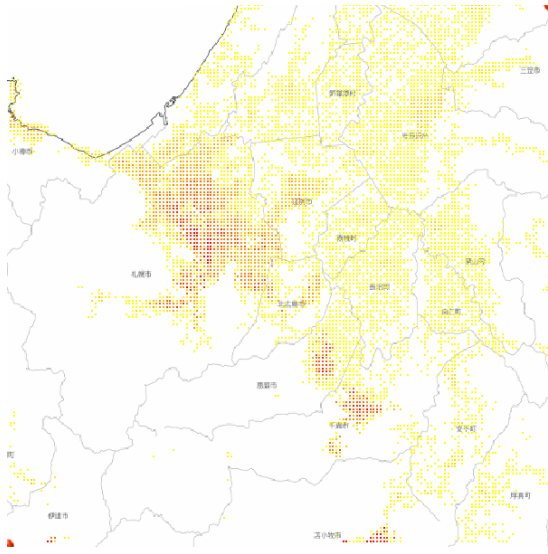


図. 7 札幌エリア

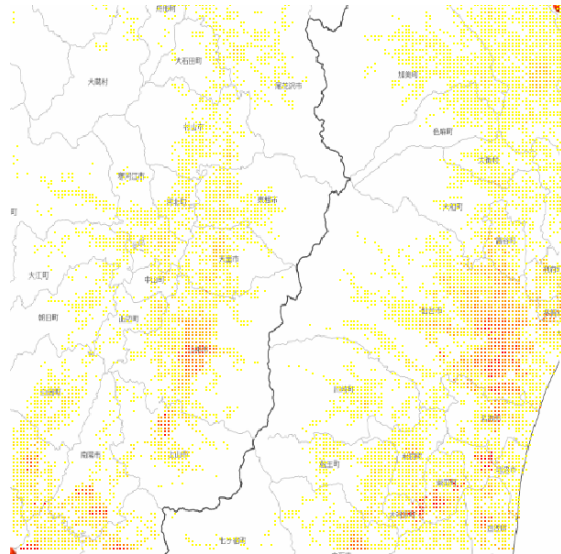


図. 8 仙台エリア

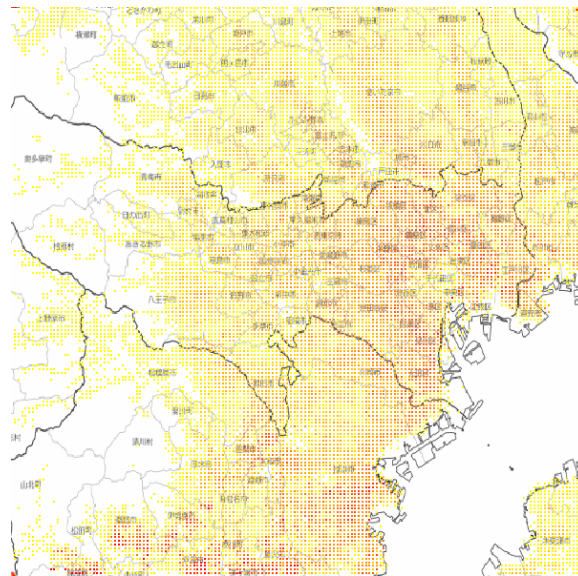


図. 9 東京エリア

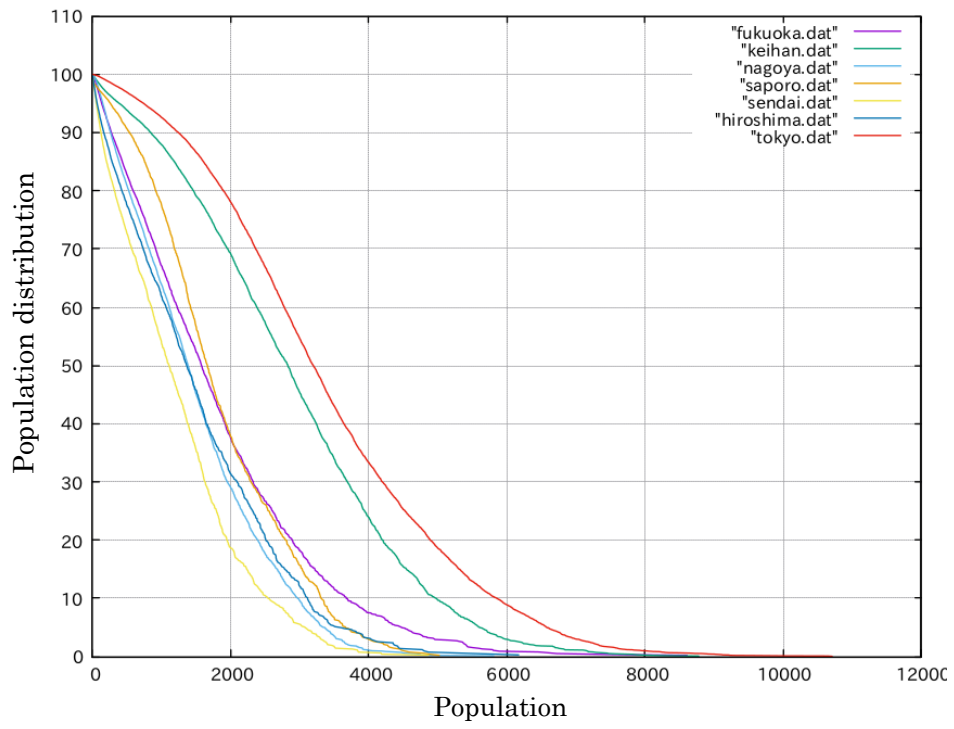


図. 10 各エリアのメッシュ内の人口数の累積分布

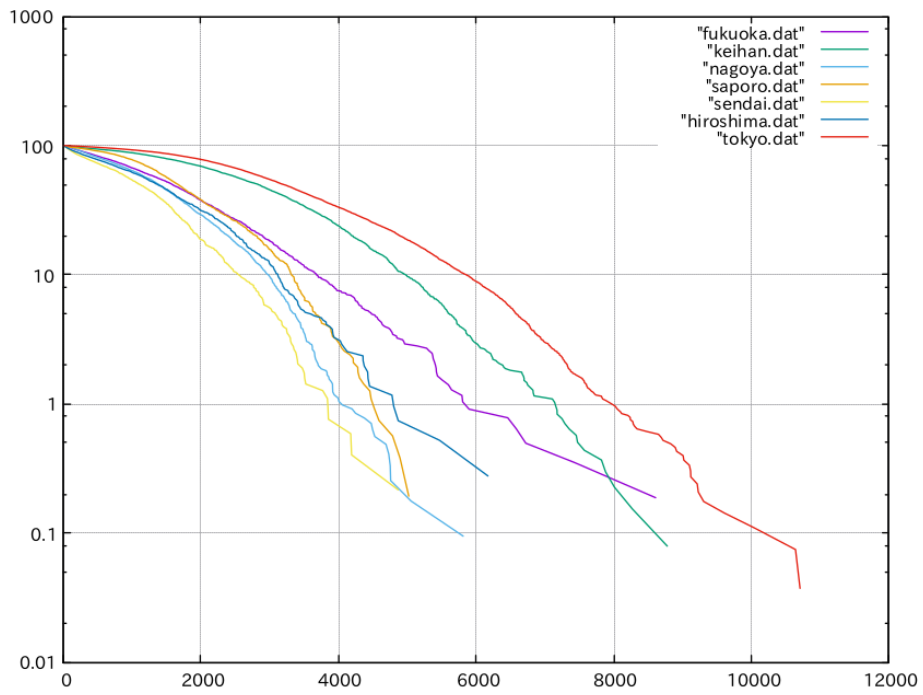


図. 11 各エリアのメッシュ内の人口数の累積分布 (片対数) : 直線的部分が指数分布

## 第 3 章

### 再帰的自己相似分割に基づくネットワーク

インターネット、電力網、通信網や交通網など現実の多くのネットワークには共通の特徴がある。それはノードの次数  $k$  を持つノード数の分布がべき乗測  $P(k) \sim k^{-r}$  ( $2 < r < 3$ ) に従い、このような特徴を持つネットワークはスケールフリー (SF) ネットワークと呼ばれている。しかし、スケールフリーネットワークは故障やランダム攻撃に対しては頑健性があるに対して、意図的なハブへの集中攻撃に極めて脆い [4,5]。

ネットワークを構築する時、構築の方法によって、さまざまなネットワークができる。例えば、“成長”と“優先選択”により作られた SF ネットワークや、枝をつなぎかえることにより構成されたネットワークなどがある[6]。

一般的な通信網では、人口の密度によって通信量が変わってくる。特に人口密度が高いところの通信量と通信頻度が高くなると考えられる。スケールフリー構造の通信網では、インターネットなどと同様に数パーセントのハブを除去するだけで、ネットワークが崩壊されてしまう[7,8]。そこで、適切なノード配置とノード間の結合を考え、各地のユーザーは一番近いノード (基地局) にアクセスすると仮定して、できる限り通信負荷のバランスをとることによって、頑健性を向上させる必要がある。そこで、ノードの空間配置を自己組織的に人口に応じて決める地理的な MSQ ネットワークを考えた。[9]。

#### 3.1 再帰的分割に基づく MSQ ネットワーク

自己相似な四分割をくりかえす Multi-Scale Quartered (MSQ) ネットワークにおいて、ノード間の通信経路ホップ数的遠回りさせないようにする正三角形と正方形に着目する (図 12 と図 13 に示すように正三角形と正方形の方が二ノード間のホップ数がより少ない)。正三角形と正方形で構築したネットワークはノードの次数が低いので (次数は 4 か 6)、攻撃に対して頑健性が強い。ランダムで選択された二つのノード間の最短距離は最悪で二ノード間の直線距離の二倍であり、平均は 1.1 倍である。また、面グラフであるので、二ノード間の直線と通過した面の局所情報だけで最短距離が求めることができる[9]。

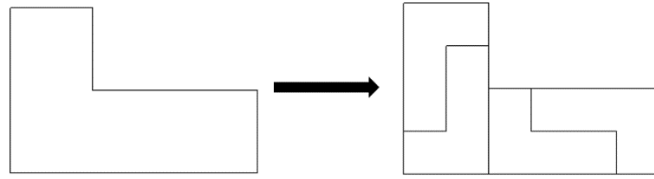


図. 12 多角形

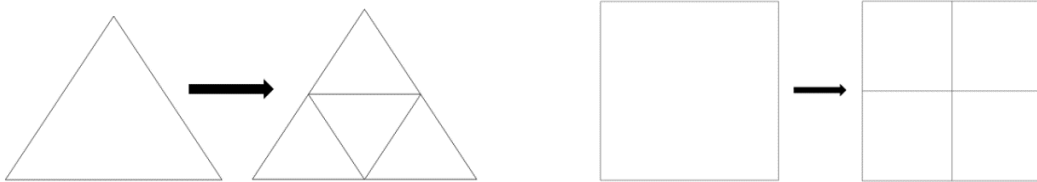


図. 13 正三角形と正方形

実際の人口メッシュデータに基づいて分割された MSQ ネットワークを図 14 と図 15 に示す。正三角形ネットワークの最大次数は 6 で、正方形ネットワークの最大次数は 4 である。

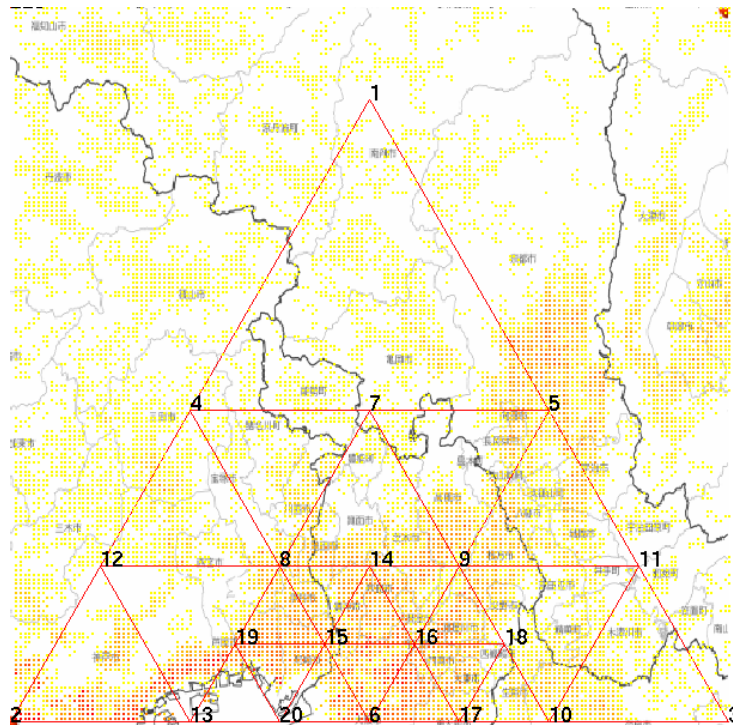


図. 14 正三角形の MSQ ネットワーク



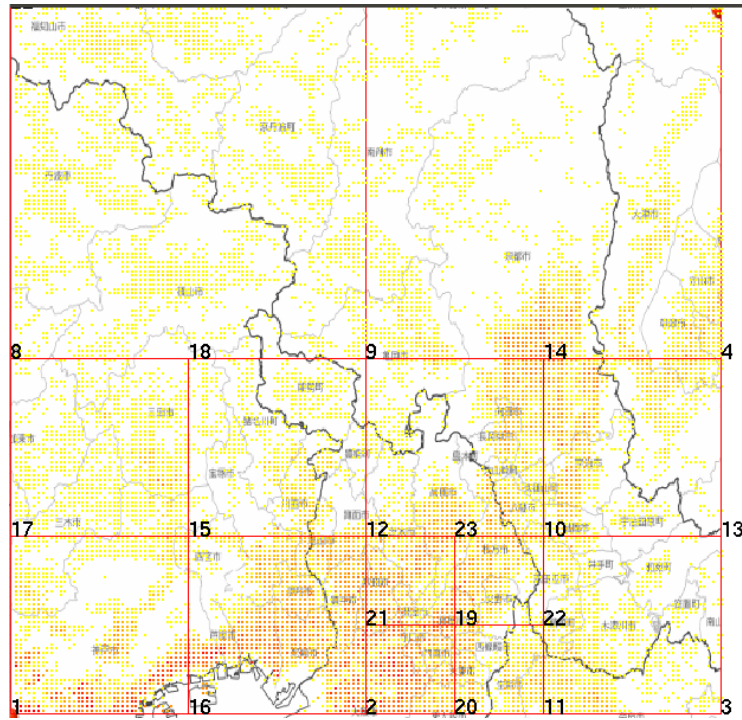


図. 15 正方形の MSQ ネットワーク

MSQ ネットワークの生成手順を以下に示す。

Step0: 人口分布地図の上に、初期構成としての正三角形または正方形を構成する。

Step1: 全ての正三角形または正方形内の人口数（面内に含まれているメッシュの人口和）を計算する。

Step2: 人口数が一番大きい正三角形または正方形を 4 つの小さな正三角形または正方形に細分する。

Step3: 設定された総ノード数 N になるまで、Step1 に戻って処理を繰り返す。

## 3.2 ダイクストラ法による最短距離経路

ダイクストラ法はグラフ理論の中で、最短経路を求める代表的なアルゴリズムである。今回考えるのは、重みをノード間のユークリッド距離として、ネットワークの頂点と辺の隣接関係に基づいての最短距離の経路を求めた [10]。

### 3.2.1 ダイクストラ法

ダイクストラ法はオランダ人ダイクストラが 1959 年に提案した、有向グラフを用いて優先順位探索の手法により最短経路問題を解くためのアルゴリズムである。

優先順位構造は、仮に  $P(i,j)=\{V_i...V_m...V_n...V_j\}$  が頂点  $i$  から頂点  $j$  の最短経路とすると、 $m$ 、 $n$  は経路上の頂点であり、 $P(m,n)$  は必ず  $m$  から  $n$  までの最短経路となる。なぜなら、 $P(i,j)=\{V_i...V_m...V_n...V_j\}$  は頂点  $i$  から頂点  $j$  の最短経路である、なら  $P(i,j)=P(i,m)+P(m,n)+P(n,j)$  は必ず成立する。もし、 $P(m,n)$  が  $m$  から  $n$  までの最短距離でないなら、他に  $m$  から  $n$  までの最短距離  $P'(m,n)$  が存在する。すると、 $P'(i,j)=P(i,m)+P'(m,n)+P(n,j)<P(i,j)$  となって、 $P(i,j)$  が頂点  $i$  から頂点  $j$  の最短経路であることと矛盾する。よって、最短経路であることが証明できる。

この性質から、 $\{V_i...V_m...V_n...V_j\}$  が頂点  $i$  から頂点  $j$  の最短経路であれば、 $\{V_i...V_m...V_n\}$  は頂点  $i$  から頂点  $n$  の最短経路である。

### 3.2.2 複数本の最短経路を求める方法

人口メッシュデータに基づいて分割された MSQ ネットワークを用いて、ダイクストラ法で頂点  $i$  から頂点  $j$  までの最短経路を求める。正三角形と正方形には対称性があるので、正三角形と正方形の MSQ ネットワークには複数本の最短経路が存在する。

ところが、複数本の最短経路を求める既存方法がないので、今回ダイクストラ法に基づいて、複数本の最短経路を求める方法を考えた。以下にそのアルゴリズムを示す。

**step0:** 送信元ノード  $s$  と宛先ノード  $d$  間の複数本最短経路を求める時、初期設定としてノード  $d$  をスタックに入れ、参照配列を作ってスタックに入れるノードを記録し、経路最大数は 1 本にする。

**step1:** ダイクストラ法に基づいて、ノード  $v$  の ( $s$  ノードからの) 距離を表す  $Label_v$  を  $v$  に付ける。ノード  $u$  と  $v$  の間の距離を表す  $D_{uv}$  を辺  $uv$  にラベル付ける。

**step2:** スタックの最上位からノードを取り出し、参照配列と比較し、等しい時は対応の経路配列に記録する。取り出したノード  $v$  が  $s$  ノードの場合は該当経路が終了となり **step2** に戻る。取り出したノード  $v$  が  $s$  ノードではない場合は **step3** に進む。



- step3:** 取り出したノード  $v$  の隣接ノード  $u$  に対して、 $Label_v \cdot D_{uv} = Label_u$  の条件を満足するノード  $u$  を逐次スタックに入れる。先のノードをスタックに入れる際、その一個目のノードを **step2** で比較できた参照配列位置に入れる。スタックに入れるノードは一つの場合は **step2** に戻る、複数の場合は **step4** に進む。
- step4:** 二個目以降は経路最大数を更新しながら、参照配列の新しい位置で記録する。**step3** の条件を満足した全てのノードに対して上記の処理が終わったら **step2** に戻る。
- step5:** スタックの中身がなくなったら終了とする。

上記の手順の概要を述べる。まず、ダイクストラ法の距離情報を使って、ある頂点に来た時の行先が参照できる配列を作った。頂点  $i$  から頂点  $j$  の最短経路は終点の方向から始点まで、経路上に各頂点に付けた距離情報から辺の距離を引いて、行先頂点と等しければ配列に保存し、全ての頂点を調べたら終了する。次に、複数の最短経路が存在する時、上記の条件を満足する複数の行先頂点がスタック処理を通して、異なる経路を表示する。

図 16 に示すように、終点  $j$  をスタックに入れた後、毎回スタックから一つのノードを取り出し、最短経路の配列に記録し、距離条件を満足するノードをスタックに入れる。距離条件を満足するノードが複数存在する場合は、すでに来た最短経路を複数本にコピーし、またスタックに入れる。最後に、スタックの中がなくなるまで、この過程を繰り返す。

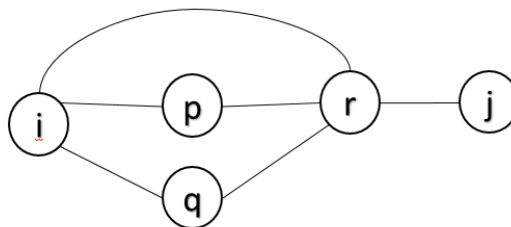


図. 16 始点  $i$  から終点  $j$  までのグラフ

例としてノード数  $N$  を 22 個にして、生成したネットワークを図 17 に示す。(ノード番号は複数の最短距離パスを見やすくする為に付けた)。

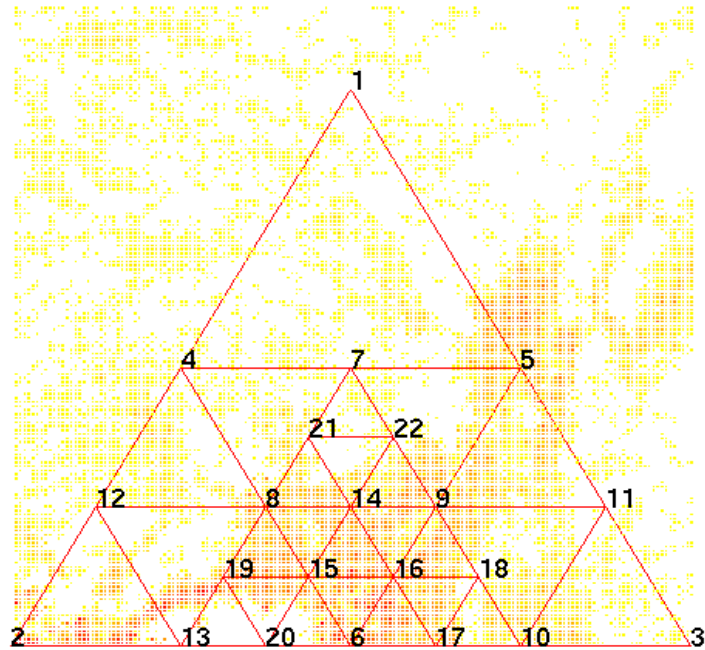


図. 17 ノード数が 22 の正三角形ネットワーク

例では、ネットワークで始点  $s$  (source) を 4 にして、終点  $d$  (destination) を 3 にして、複数本の最短経路を求めると、図 18 のように最短経路は 10 本になる。

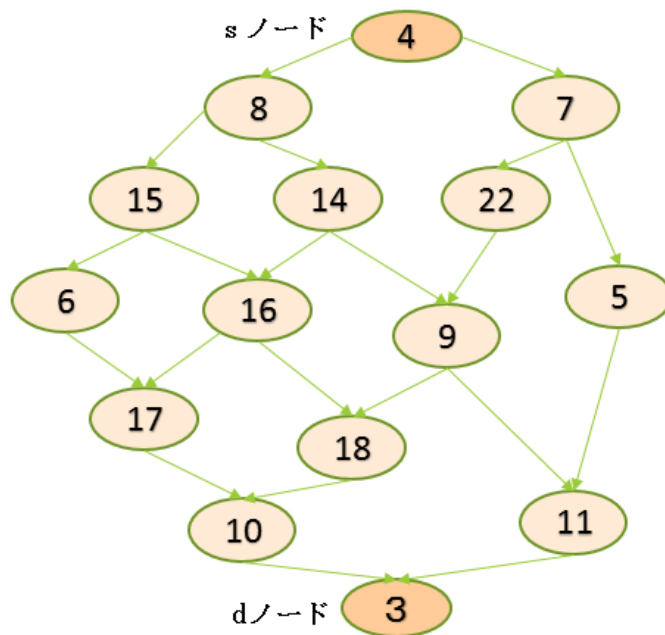


図. 18 二ノード間の複数本最短経路

但し、この方法で最短経路を求める時、二ノード間の最短経路の本数はノード間を経過した面の数とともに爆発的に増える。図.19 に示すように、頂点  $i$  から頂点  $j$  までの最短経路の本数は 14 本であり、図.20 に示すように、頂点  $i$  から頂点  $j$  までの最短経路の本数は 38 本である。図.19 と図.20 を繋ぐことによって (図.21)、最短経路は  $14 \times 38 = 532$  本まで増えるので、この方法を改善する必要がある。

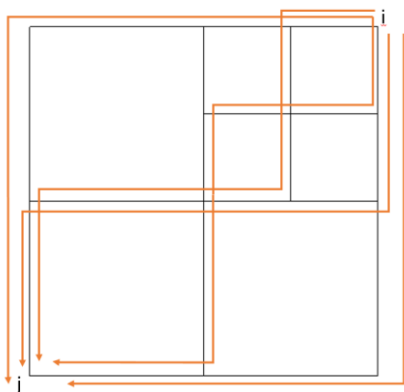


図. 19 複数の最短経路 1

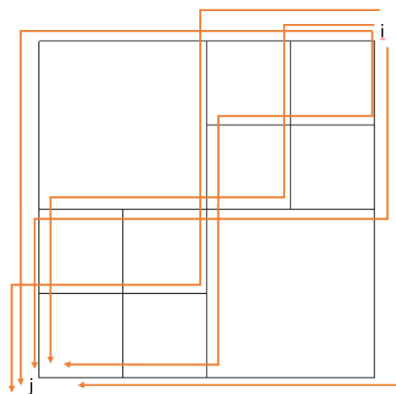


図. 20 複数の最短経路 2

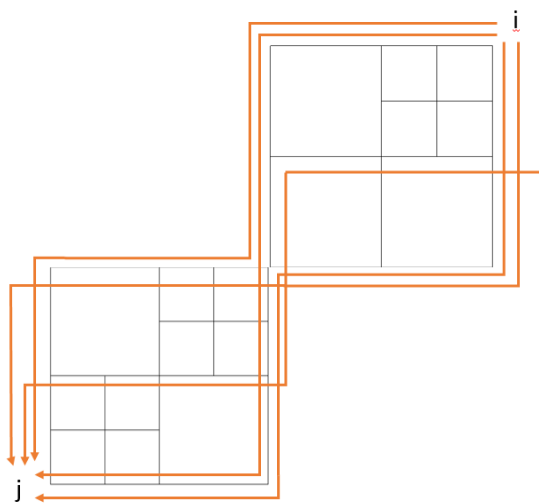


図. 21 複数の最短経路 3

### 3.2.3 面グラフを用いた改善案

この方法では、図.22 に示すように、頂点  $i$  から頂点  $j$  までの最短距離の経路をそれらの頂点間の直線と交差する面の辺による経路を選ぶ方法である[11]。この方法で最短経路の辺を選ぶ時、ダイクストラ法の距離関係で、経路の最短性を確かめる。

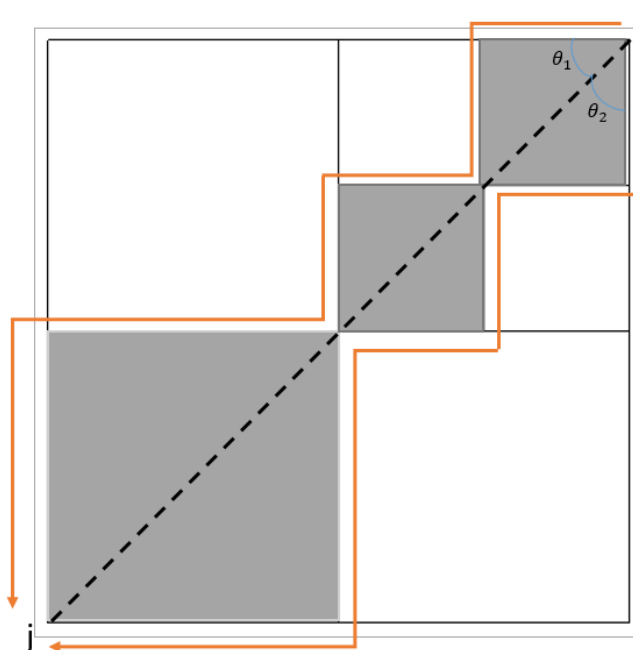


図. 22 面グラフを用いた改善方法

### 3.3 メッセージフェリーのルーティングと最適なサービス負荷

上記の手法で作られた MSQ ネットワークの上に、メッセージフェリーをどのように配分するのかを説明する。

図.23 に示すように、中継ノードは各三角形の面の上に時計周りまたは反時計周りの方向に移動する。各三角形の三つの辺は一つのサイクルに対応する。これらのサイクルはメッセージフェリーの移動ルートを表す。中継ノードが各サイクルで移動するとき、非同期的に移動すると想定し、ノード間の送受信要求に応じて各サイクルのメッセージフェリーの配分数が巡回スピードを調整する。正方形の MSQ ネットワークでも同様に考える[12]。

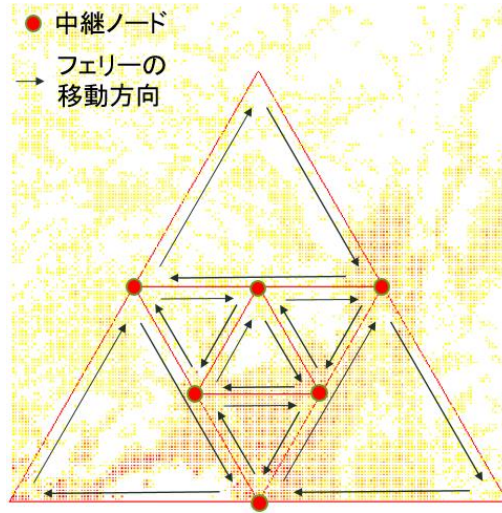


図. 23 メッセージがネットワーク上のフェリー移動

任意の二つノード間の通信要求はランダムで発生すると想定して、通信量は送信元ノードと宛先ノードにアクセスする人口数の積に比例し、そのデータ転送は複数の最短通信経路を經由して宛先ノードまで到着するものとする。

ここで、通信フローは M/M/1 待ち行列モデルが適用できる。

M/M/1 待ち行列モデルでは、到着率  $\lambda$  がポアソン到着、サービス率  $\mu$  は指数分布に従い、平均の客数は  $L = \frac{\rho}{1-\rho}$  ( $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ ) であり、エンドツーエンドの遅延は  $E(T) = \frac{L}{\lambda} = \frac{1}{\mu - \lambda}$  となる。このようなモデルは送信元ノードと宛先ノード間の各経路上のポアソン過程による直列型待ち行列で表現できる [13]。ネットワーク上メッセージフェリーの  $l=1 \sim N$  個の各サイクルに対応する  $\frac{1}{\mu_l - \lambda_l(k)}$  における  $k$  は各サイクルの三辺または四辺のエンドツーエンド遅延を表す。但し、サービス負荷量  $\mu_l$  は各辺の到着率  $\lambda_l$  より大きい必要がある。つまり、 $\mu_l > \max\{\lambda_l(1), \lambda_l(2), \lambda_l(3)\}$  である。すると、ネットワーク上の通信コスト  $C$  はエンドツーエンド遅延とサービス負荷量で構成され、すなわち  $F(\mu_l) = \sum_l (\mu_l + \sum_{k=1}^3 \frac{w_l(k)}{\mu_l - \lambda_l(k)})$  と定義する。

通信コスト  $C$  を最小化するために、ニュートン法を用いてメッセージフェリーの最適配分は

$$\frac{\partial}{\partial \mu_l} \left( \frac{w_l(k)}{\mu_l - \lambda_l(k)} + \mu_l \right) = 1 - \frac{w_l(1)}{(\mu_l - \lambda_l(1))^2} - \frac{w_l(2)}{(\mu_l - \lambda_l(2))^2} - \frac{w_l(3)}{(\mu_l - \lambda_l(3))^2} = 0 \quad (1)$$

式(1)により  $\mu_l$  の極値を得る (正方形ネットワークの場合は、四つの辺があるので、 $\frac{w_l(4)}{(\mu_l - \lambda_l(4))^2}$  まで引き算をする)。  $\mu_l$  の初期値は式(2)に示すように (正方形は、 $\lambda_l(4)$  までの最大値を求める) とする。

$$\sqrt{w_l(k)} + \max\{\lambda_l(1), \lambda_l(2), \lambda_l(3)\} \quad (2)$$

ニュートン法を用いて $\mu_l$ の極値を求める手順は次のようになる：

- ①  $\mu_l$ 初期値を求める
- ②  $\mu_l' = \mu_l - \frac{F(\mu_l)}{F'(\mu_l)}$ を求める
- ③  $|\mu_l' - \mu_l| < 0.000001$ の時、 $\mu_l'$ は極値とみなす。 $|\mu_l' - \mu_l| \geq 0.000001$ の時  
は $\mu_l'$ の値を $\mu_l$ に更新して②に戻す。

## 第4章

### ネットワークの特徴分析

本章では、3章で説明したネットワーク構成手法により生成された正三角形と正方形のMSQネットワークの上に、メッセージフェリーでデータ転送する際の、各ネットワークにおけるメッセージフェリーの最適配分を調べる。

#### 4.1 実験の概要

C言語によりOpenGLで人口分布を可視化した上で、MSQネットワークの構築と最適解の計算を行う。その結果から、比較したMSQネットワークサービス負荷最適解の最大値、平均値と分散値を調べる。

実験の流れとしては：

- 1:初期ネットワークを構築する。
- 2:全てのノード間の最短経路を求め、最短経路上の各辺の重み $w_l$ と $\lambda_l$ を計算する。
- 3:ネットワークの各サイクルについて、初期値 $\mu_0$ を求めた後に各最適解 $\mu_l$ を求める。
- 4:上記で計算した各 $\mu_l$ から、最大値、平均値、分散値を可視化して比較する。

#### 4.2 実験の方法

実験を行う際の具体的な設定数値を表.3を示す。7つの地域で、ネットワークを構築した。異なるネットワーク構造上で、ネットワークサイズを順次100ノードから1000ノードまで変化させて違いを調べる。

構成されたネットワークのサイズ	100 ノード 200 ノード 500 ノード 1000 ノード
対称にする地域	広島エリア 福岡エリア 京阪エリア 名古屋エリア 札幌エリア 仙台エリア 東京エリア
ネットワーク構造	正三角形 MSQ ネットワーク 正方形 MSQ ネットワーク

表. 3 ネットワーク構築の組合せ

### 4.3 ネットワーク構築

図 24-27 は福岡のエリアの MSQ ネットワーク構築図で、図 28-29 はネットワーク上各頂点に集中する人口数の累積分布図を示し、特にノード数が多くなるほど、各ノードに割り当てられた人口数は小さくほぼ一定になる。

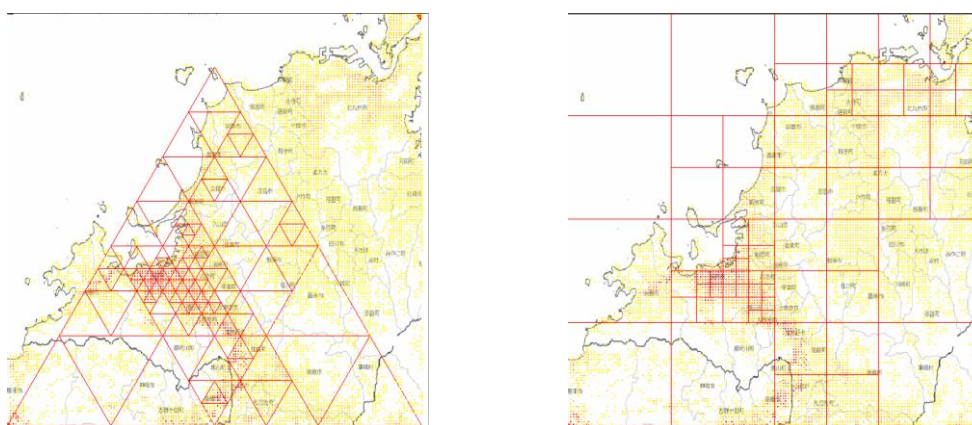


図. 24 福岡 100 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク



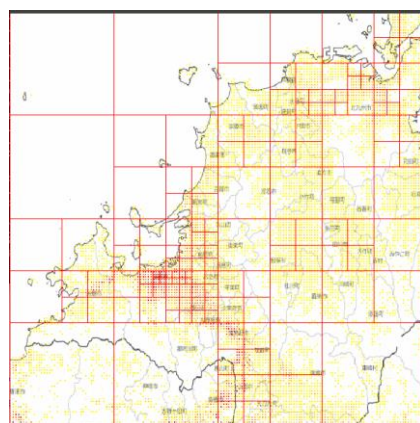
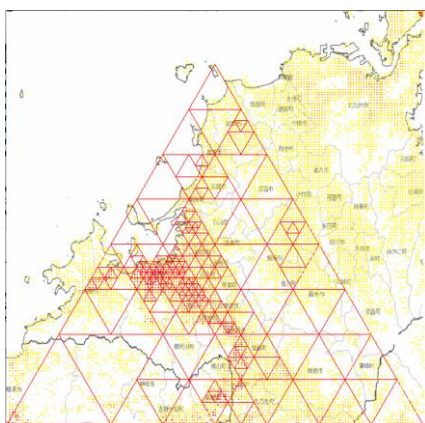


図. 25 福岡 200 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

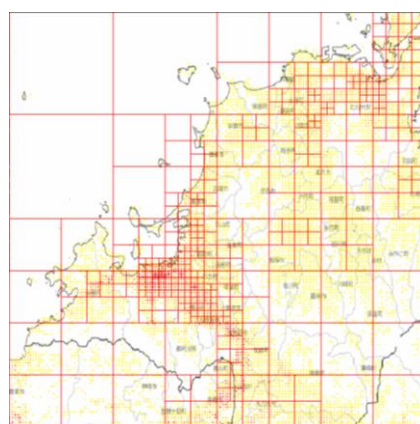
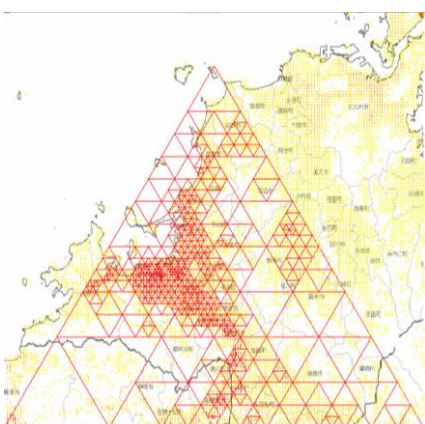


図. 26 福岡 500 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

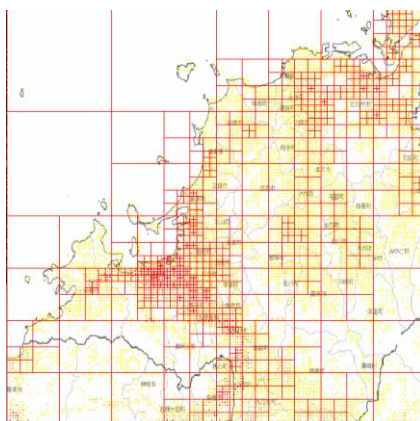
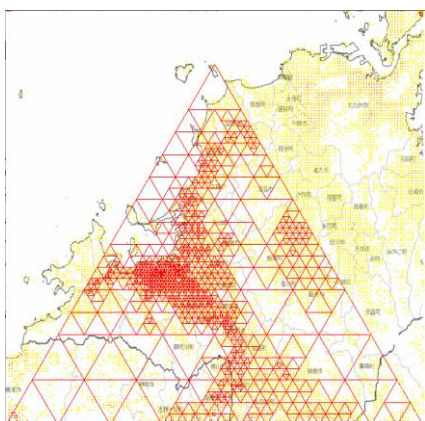


図. 27 福岡 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

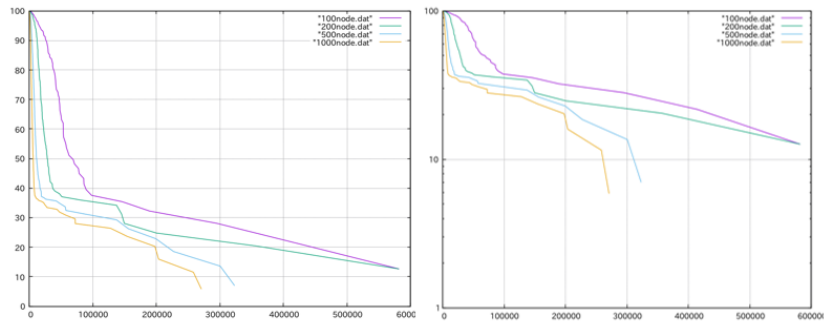


図. 28 福岡 100 ノードから 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ(直線部分は指数分布)

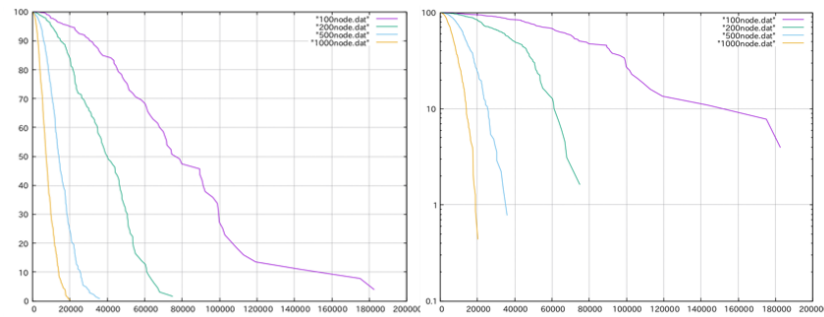


図. 29 福岡 100 ノードから 1000 ノード 正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ

図 24-27 は福岡エリアの人口メッシュ地図において、ノード数が 100 から 1000 までの正三角形（左）と正方形（右）の MSQ ネットワークにおいて、アクセス負荷のバランスを取るために人口が集中している福岡市のところが細かく分割されている。ここで、アクセス負荷はノードに割り当てられた各地点からアクセスする人口の通信要求に比例するものと定めている。

図 30-33 は広島のエリアの MSQ ネットワーク構築図で、図 34-35 はネットワーク上各頂点に集中する人口数の累積分布図を示し、特にノード数が多くなるほど、各ノードに割り当てられた人口数は小さくほぼ一定になる。

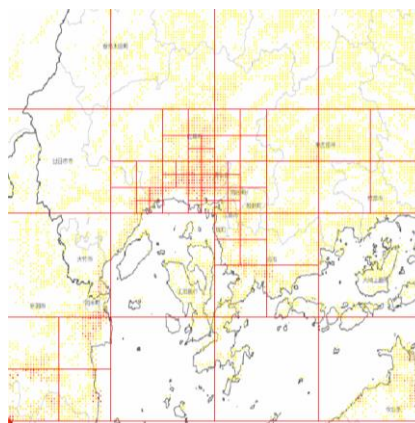
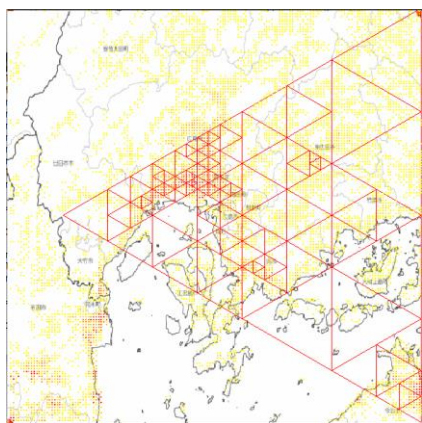


図. 30 広島 100 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

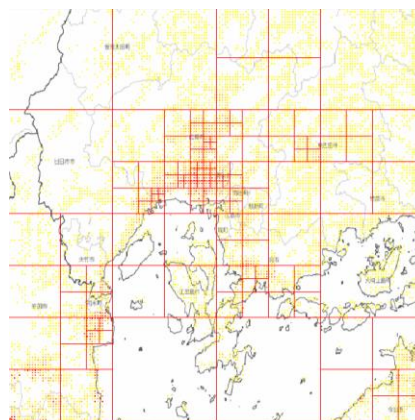
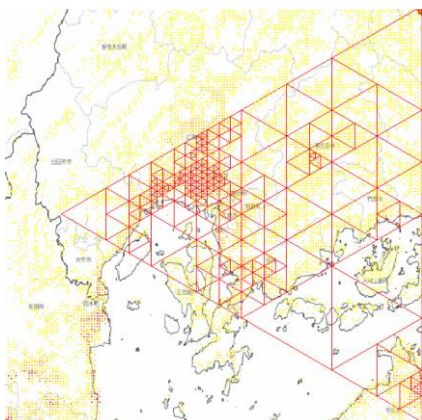


図. 31 広島 200 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

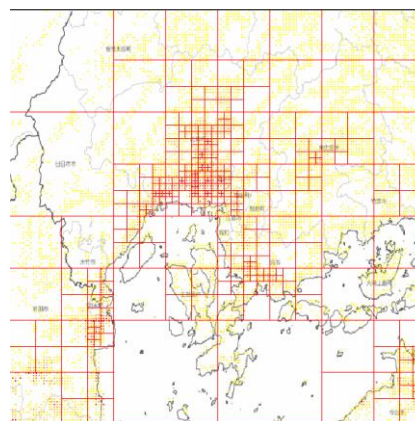
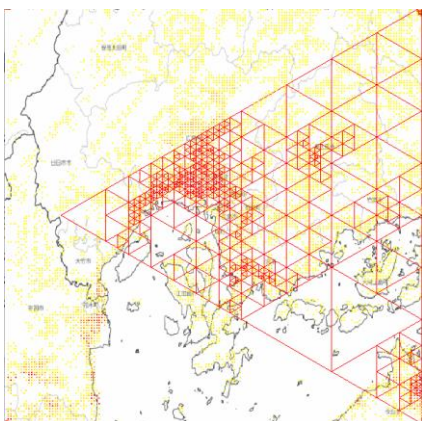


図. 32 広島 500 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク



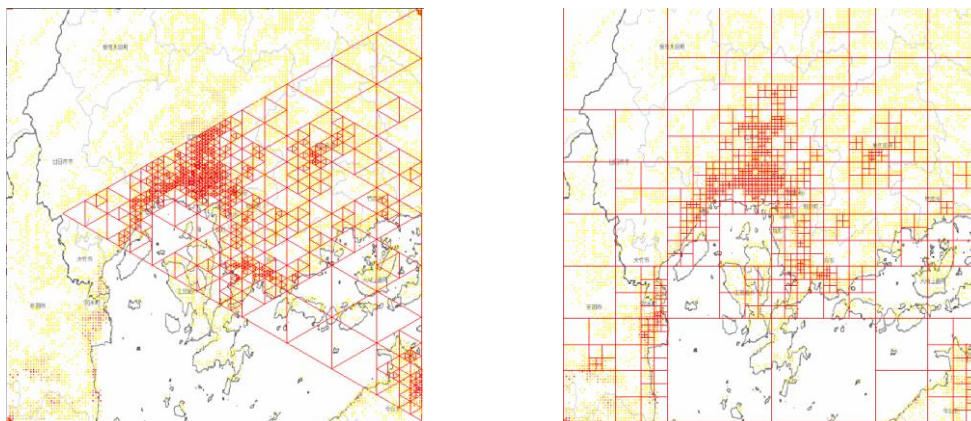


図. 33 広島 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

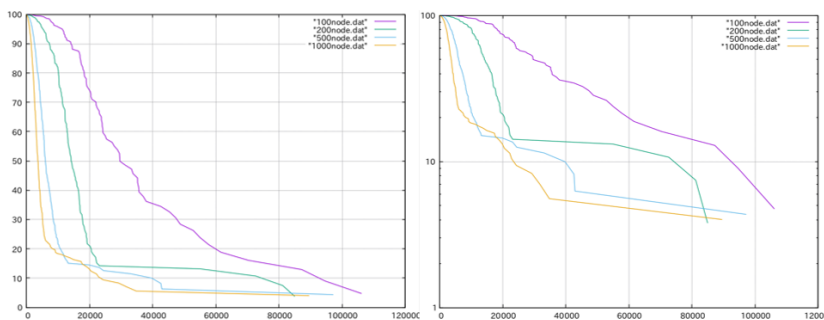


図. 34 広島 100 ノードから 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ(直線部分は指数分布)

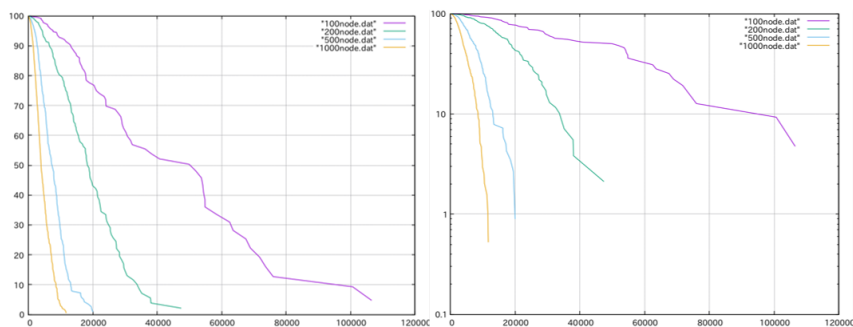


図. 35 広島 100 ノードから 1000 ノード 正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ

図 30-33 は広島エリアの人口メッシュ地図において、ノード数が 100 から 1000 までの正三角形 (左) と正方形 (右) の MSQ ネットワークにおいて、アクセス負荷のバランスを取るために人口が集中している広島市と周辺の廿日市のところが細かく分割されている。

図 36-39 は京阪のエリアの MSQ ネットワーク構築図で、図 40-41 はネットワーク上各頂点に集中する人口数の累積分布図を示し、特にノード数が多くなるほど、各ノードに割り当てられた人口数は小さくほぼ一定になる。

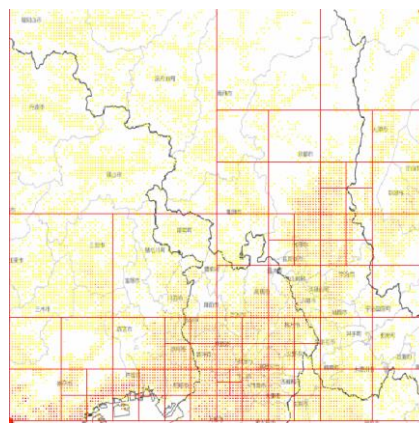
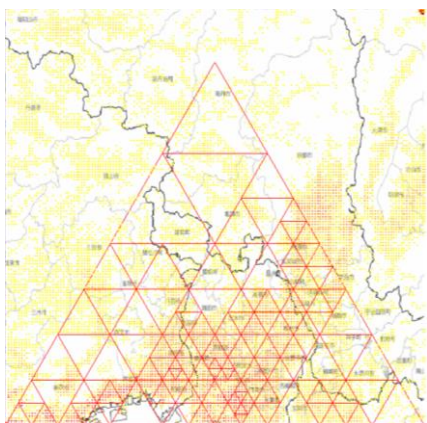


図. 36 京阪 100 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

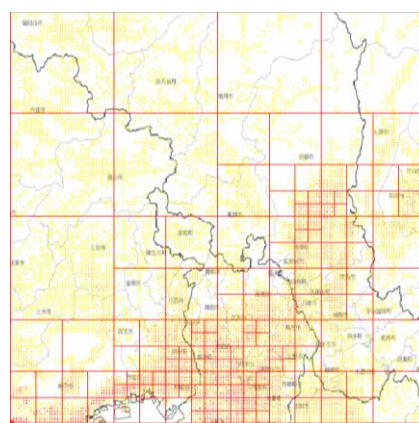
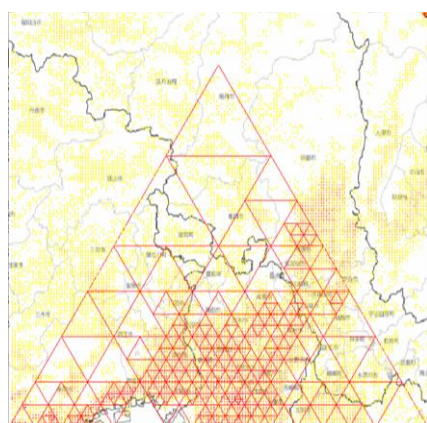


図. 37 京阪 200 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

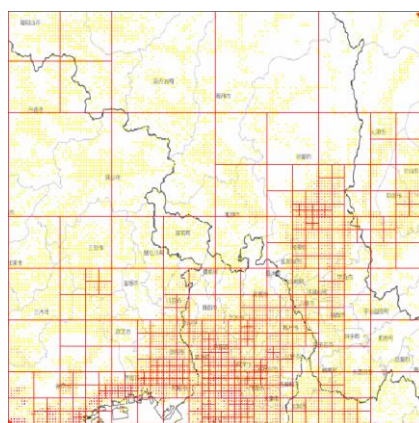
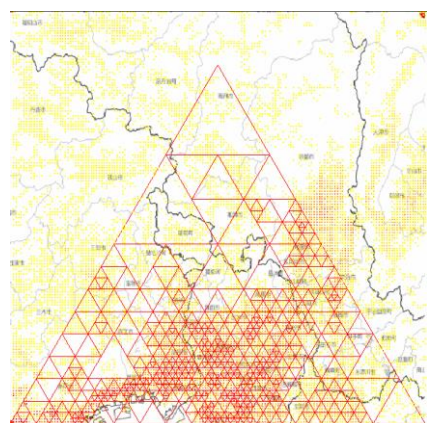


図. 38 京阪 500 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

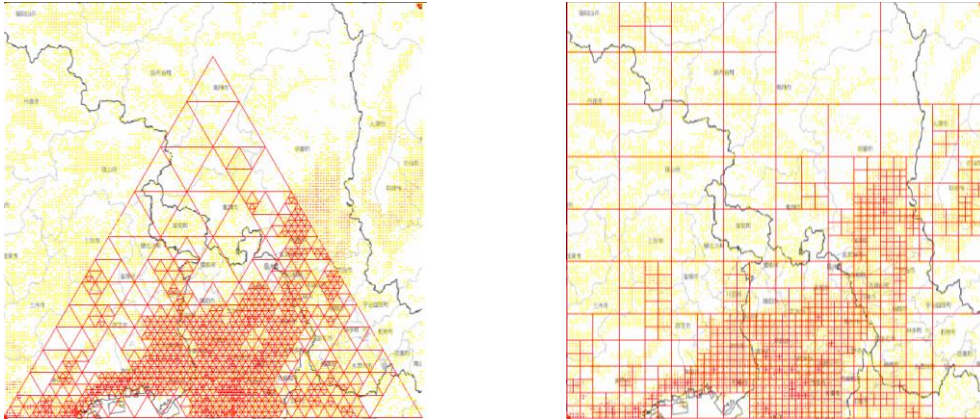


図. 39 京阪 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

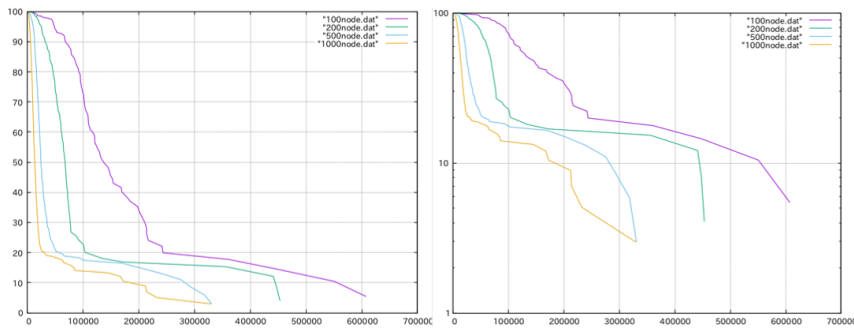


図. 40 京阪 100 ノードから 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ(直線部分は指数分布)

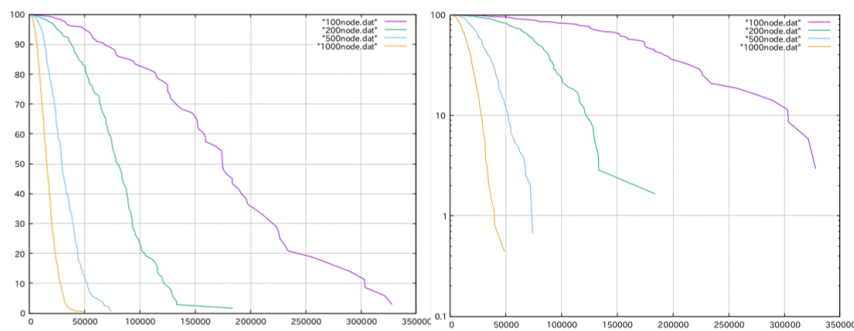


図. 41 京阪 100 ノードから 1000 ノード 正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ

図 36-39 は京阪エリアの人口メッシュ地図において、ノード数が 100 から 1000 までの正三角形 (左) と正方形 (右) の MSQ ネットワークにおいて、アクセス負荷のバランスを取るために人口が集中している大阪と京都のところが細かく分割されている。



図 42-45 は名古屋のエリアの MSQ ネットワーク構築図で、図 46-47 はネットワーク上各頂点に集中する人口数の累積分布図を示し、特にノード数が多くなるほど、各ノードに割り当てられた人口数は小さくほぼ一定になる。

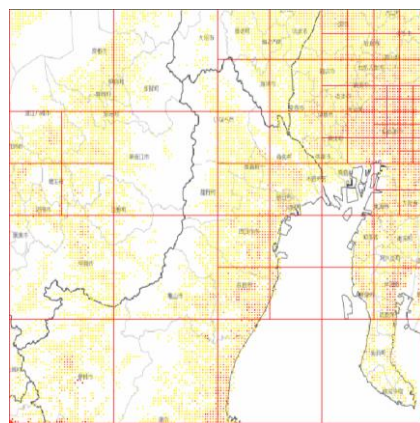
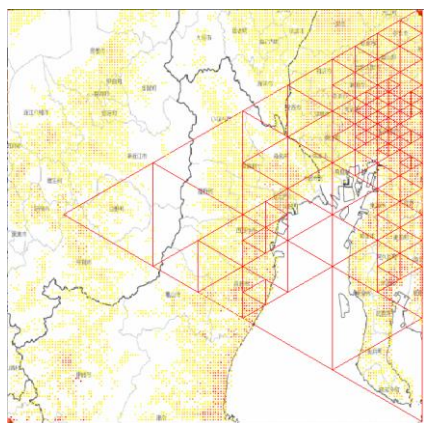


図. 42 名古屋 100 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

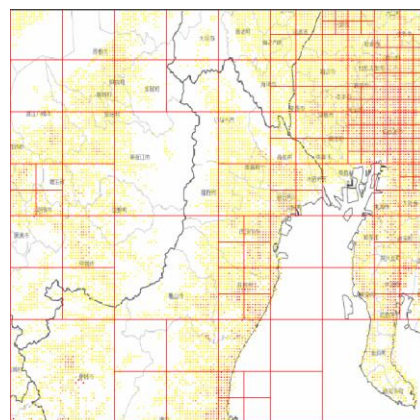
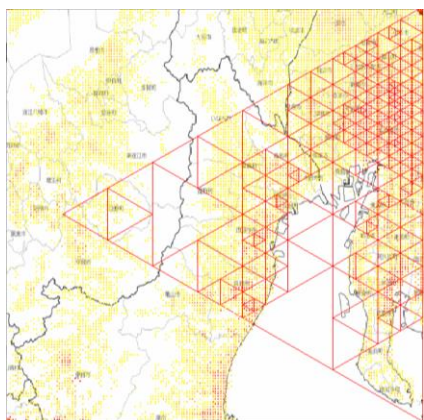


図. 43 名古屋 200 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

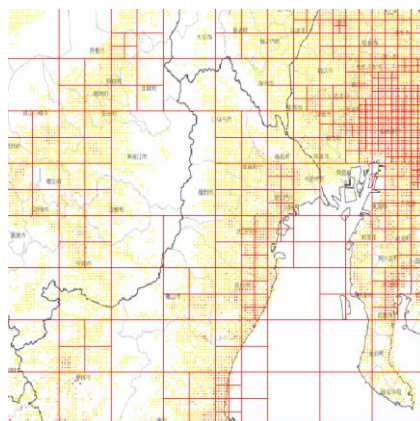
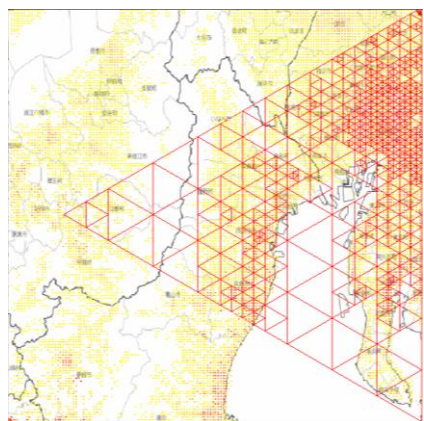


図. 44 名古屋 500 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク



図. 45 名古屋 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

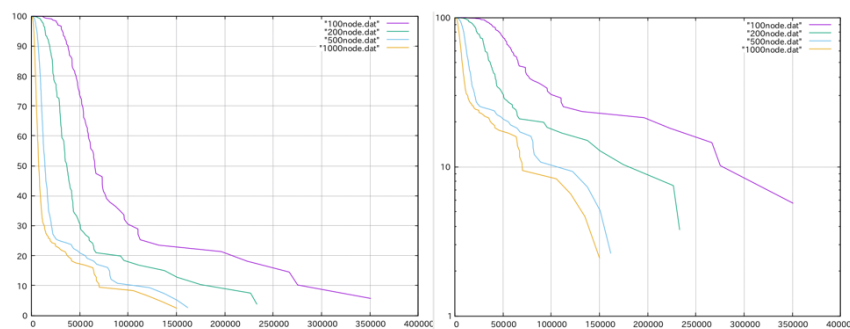


図. 46 名古屋 100 ノードから 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ(直線部分は指数分布)

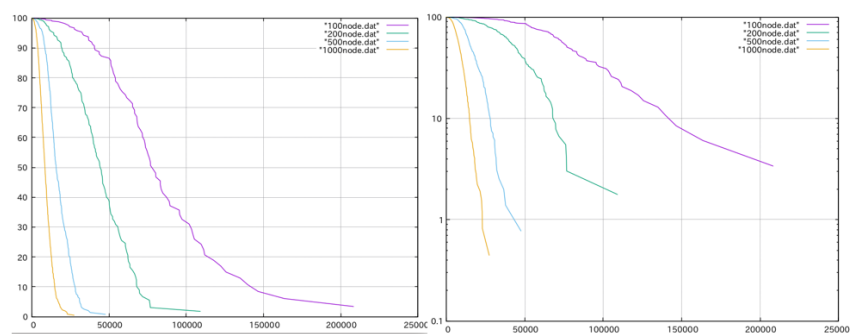


図. 47 名古屋 100 ノードから 1000 ノード 正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ

図 42-45 は名古屋エリアの人口メッシュ地図において、ノード数が 100 から 1000 までの正三角形 (左) と正方形 (右) の MSQ ネットワークにおいて、アクセス負荷のバランスを取るために人口が集中している名古屋市のところを細かく分割されている。



図 48-51 は札幌のエリアの MSQ ネットワーク構築図で、図 52-53 はネットワーク上各頂点に集中する人口数の累積分布図を示し、特にノード数が多くなるほど、各ノードに割り当てられた人口数は小さくほぼ一定になる。

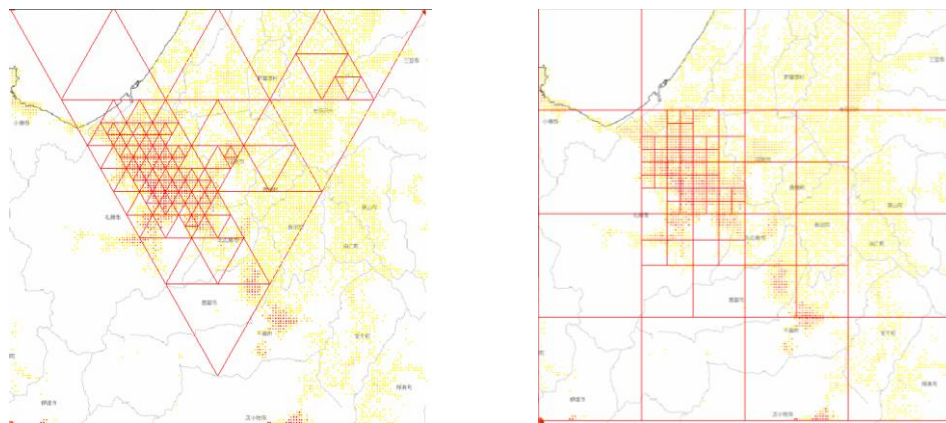


図. 48 札幌 100 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

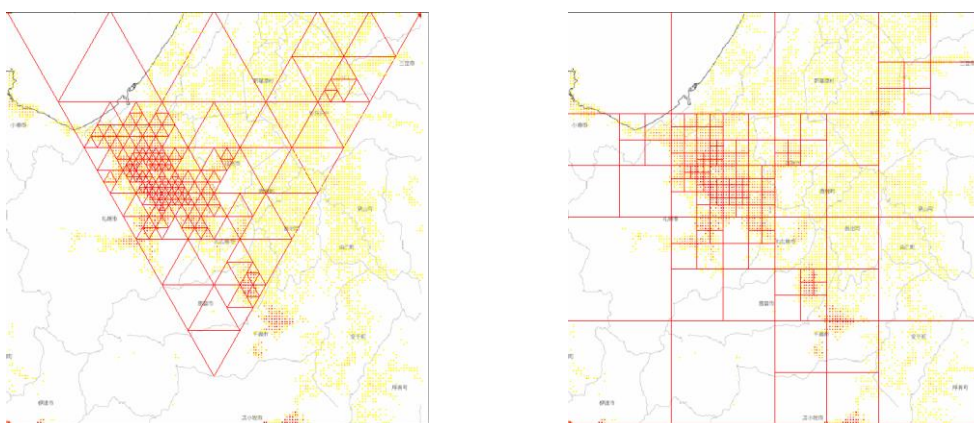


図. 49 札幌 200 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

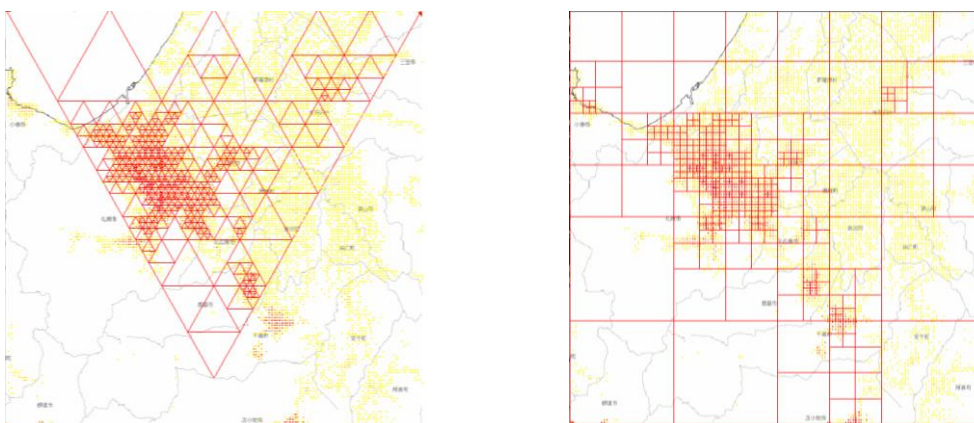


図. 50 札幌 500 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

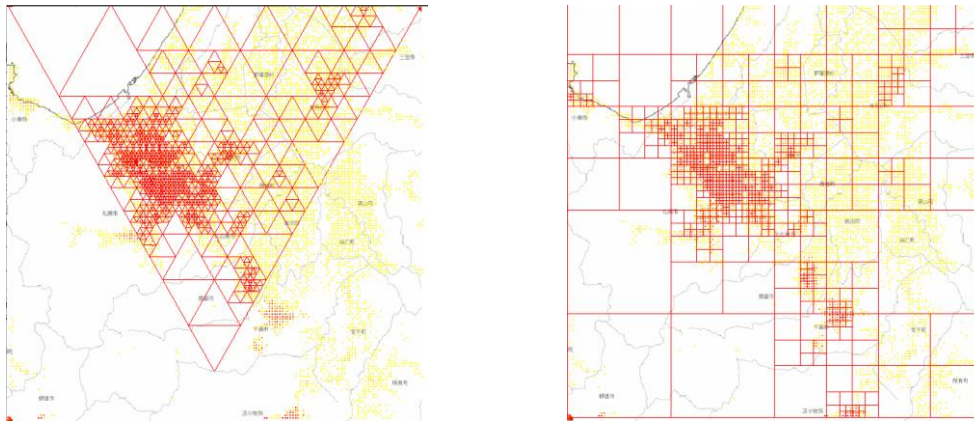


図. 51 札幌 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

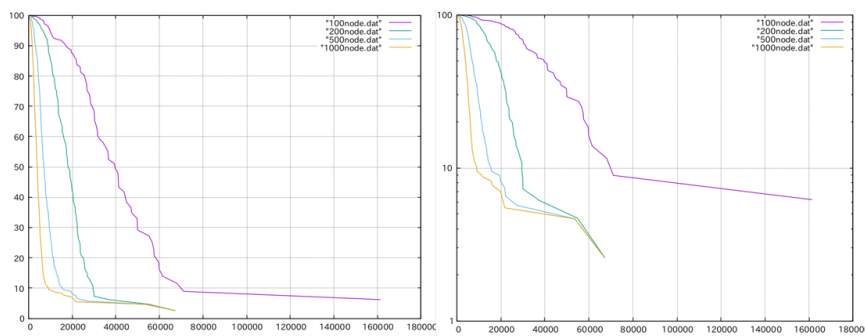


図. 52 札幌 100 ノードから 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ(直線部分は指数分布)

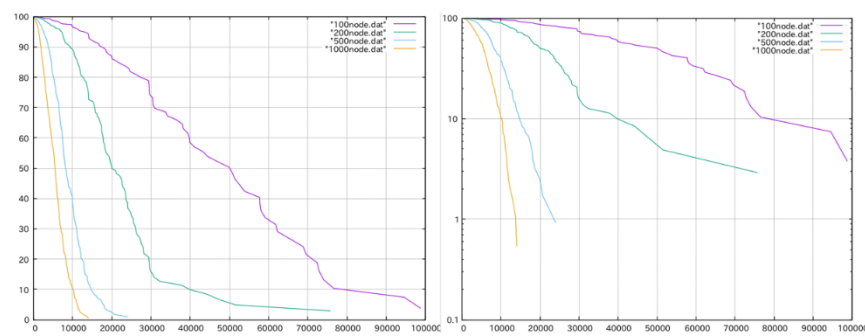


図. 53 札幌 100 ノードから 1000 ノード 正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ

図 48-51 は札幌エリアの人口メッシュ地図において、ノード数が 100 から 1000 までの正三角形 (左) と正方形 (右) の MSQ ネットワークにおいて、アクセス負荷のバランスを取るために人口が集中している札幌市と周辺のところが細かく分割されている。

図 54-57 は仙台のエリアの MSQ ネットワーク構築図で、図 58-59 はネットワーク上各頂点に集中する人口数の累積分布図を示し、特にノード数が多くなるほど、各ノードに割り当てられた人口数は小さくほぼ一定になる。

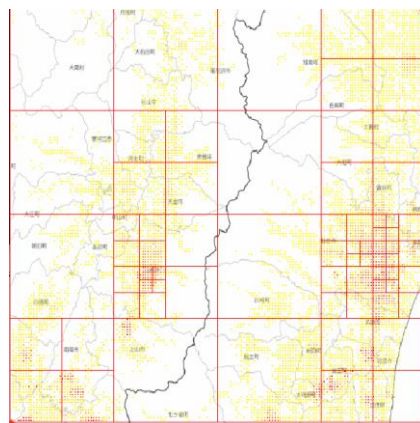
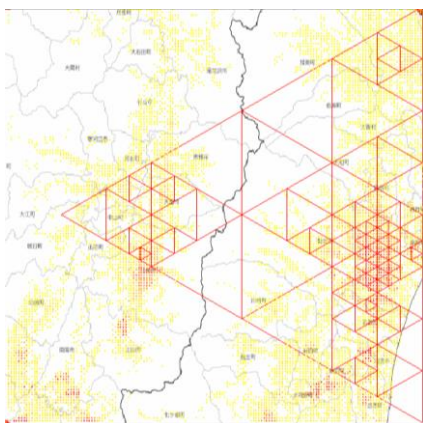


図. 54 仙台 100 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

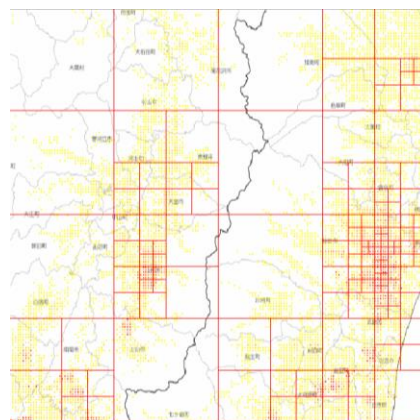
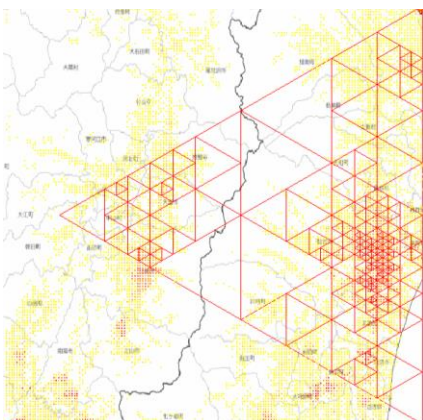


図. 55 仙台 200 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

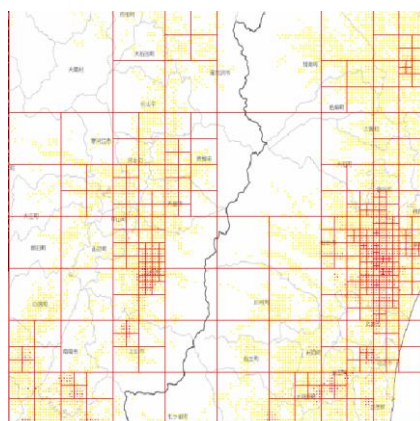
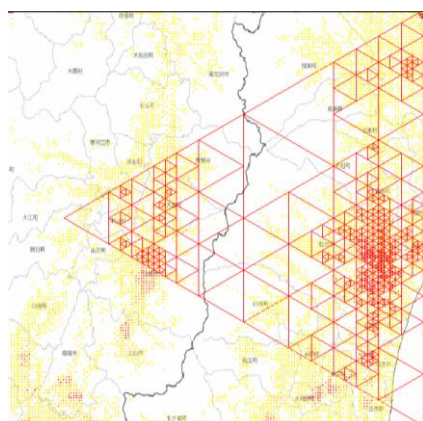


図. 56 仙台 300 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク



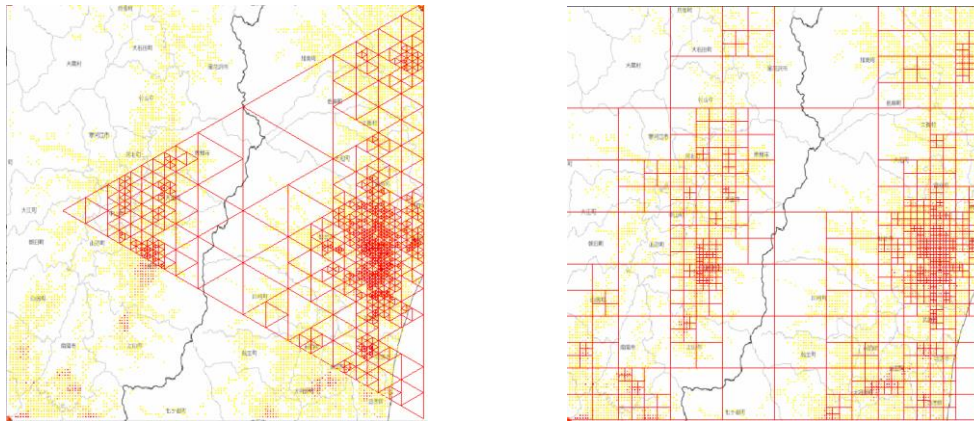


図. 57 仙台 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

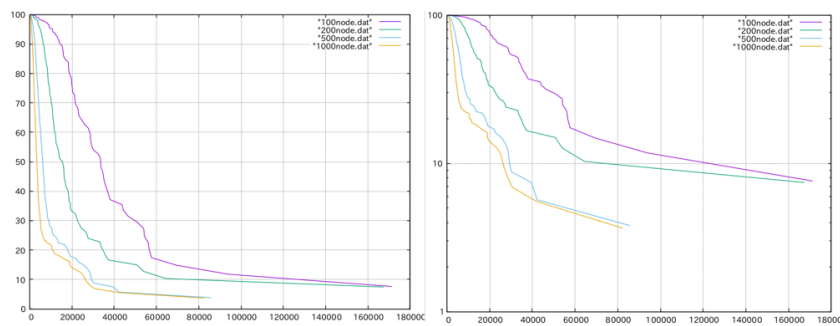


図. 58 仙台 100 ノードから 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ(直線部分は指数分布)

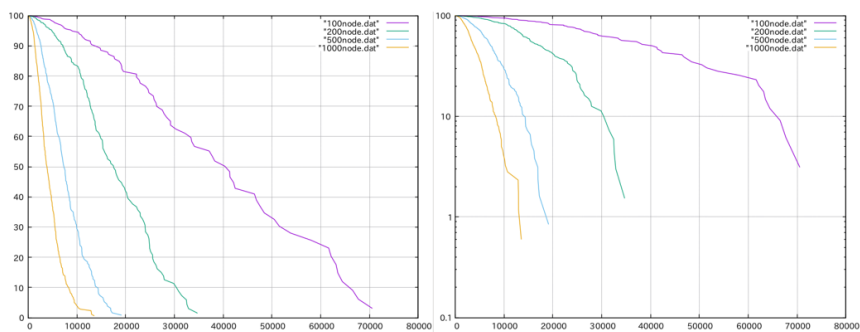


図. 59 仙台 100 ノードから 1000 ノード 正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ

図 54-57 は仙台エリアの人口メッシュ地図において、ノード数が 100 から 1000 までの正三角形 (左) と正方形 (右) の MSQ ネットワークにおいて、アクセス負荷のバランスを取るために人口が集中している仙台市と山形市のところが細かく分割されている。

図 60-63 は東京のエリアの MSQ ネットワーク構築図で、図 64-65 はネットワーク上各頂点に集中する人口数の累積分布図を示し、特にノード数が多くなるほど、各ノードに割り当てられた人口数は小さくほぼ一定になる。

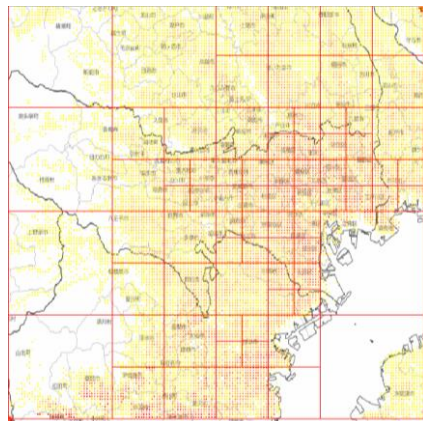
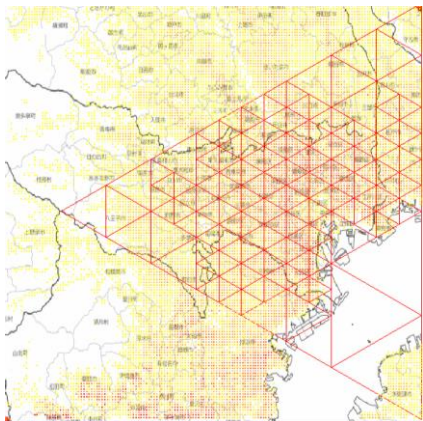


図. 60 東京 100 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

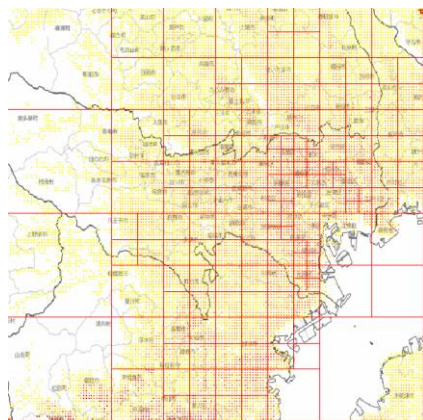
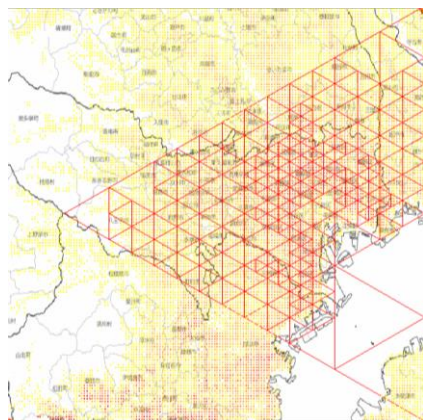


図. 61 東京 200 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

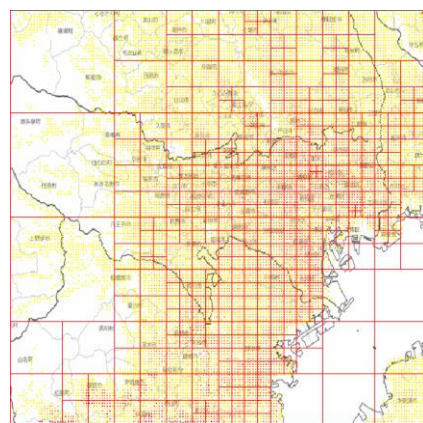
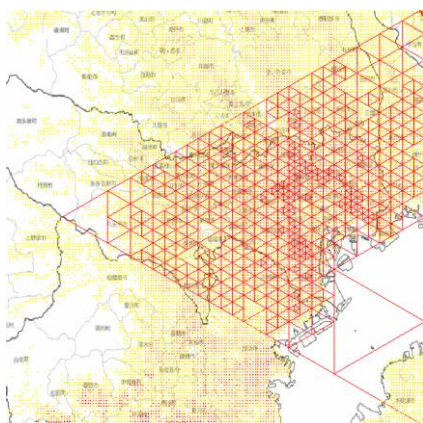


図. 62 東京 500 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

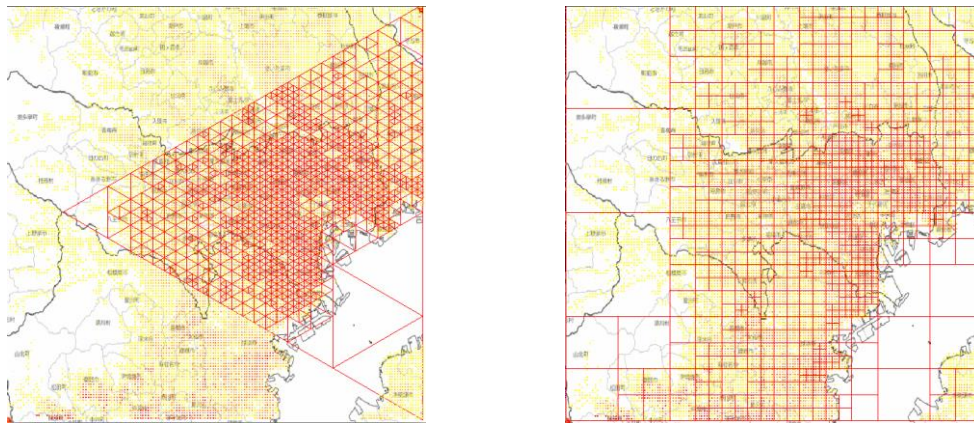


図. 63 東京 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク と正方形 MSQ ネットワーク

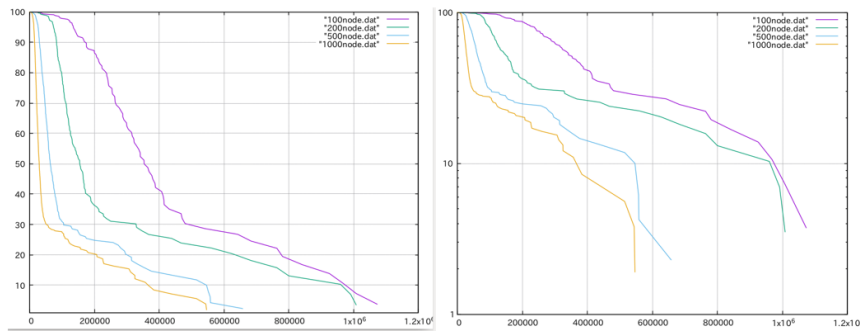


図. 64 東京 100 ノードから 1000 ノード 正三角形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ(直線部分は指数分布)

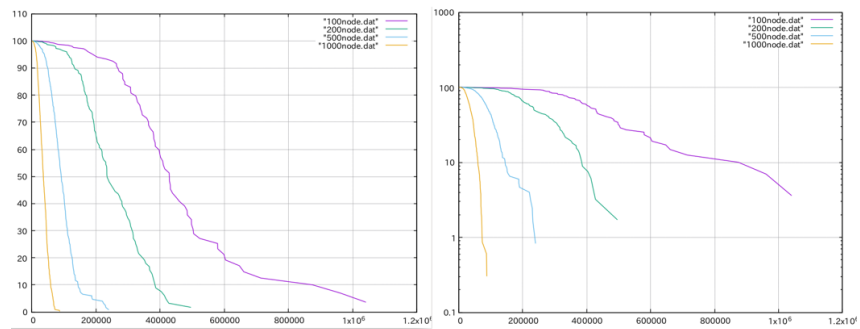


図. 65 東京 100 ノードから 1000 ノード 正方形 MSQ ネットワーク各ノードに集中する人口の  
累積分布と累積分布の片対数グラフ

図 60-63 は東京エリアの人口メッシュ地図において、ノード数が 100 から 1000 までの正三角形 (左) と正方形 (右) の MSQ ネットワークにおいて、アクセス負荷のバランスを取るために人口が集中している東京都 23 区のところを細かく分割されている。

#### 4.4 ネットワーク上の面情報

表.4 では、7つのエリアでノード数が 100,200,500,1000 の正三角形と正方形の MSQ ネットワークの面の数を示す。

	福岡	広島	京阪	名古屋	札幌	仙台	東京
100 ノード 正三角形	136	130	142	142	145	130	157
正方形	73	70	73	73	76	70	76
200 ノード 正三角形	283	286	298	289	298	283	319
正方形	145	142	154	151	151	145	160
500 ノード 正三角形	730	691	751	781	715	703	811
正方形	391	373	394	400	379	382	424
1000 ノード 正三角形	1492	1387	1528	1498	1480	1426	1693
正方形	787	769	805	796	796	775	856

表. 4 7つのエリアで構築した MSQ ネットワークの面の数

表.4 から、異なるエリアで同じノード数の正三角形同士あるいは正方形同士で面の数を比較するとほぼ同じである。各ノード数の各エリアで、正三角形の面の数は正方形の面の数のほぼ 2 倍になっている。



## 4.5 最適解 $\mu_l$

正三角形のMSQネットワークと正方形MSQネットワーク上の負荷に相当する各サイクルの最適解 $\mu_l$ に収束する様子を図 66 から図 93 に示す。各折れ線はニュートン法で各サイクル $\mu_l$ の極値を求める時、通信コスト  $F(\mu_l)$  値の変化を示す。折れ線の一番低いところの値が $\mu_l$ の極値である。

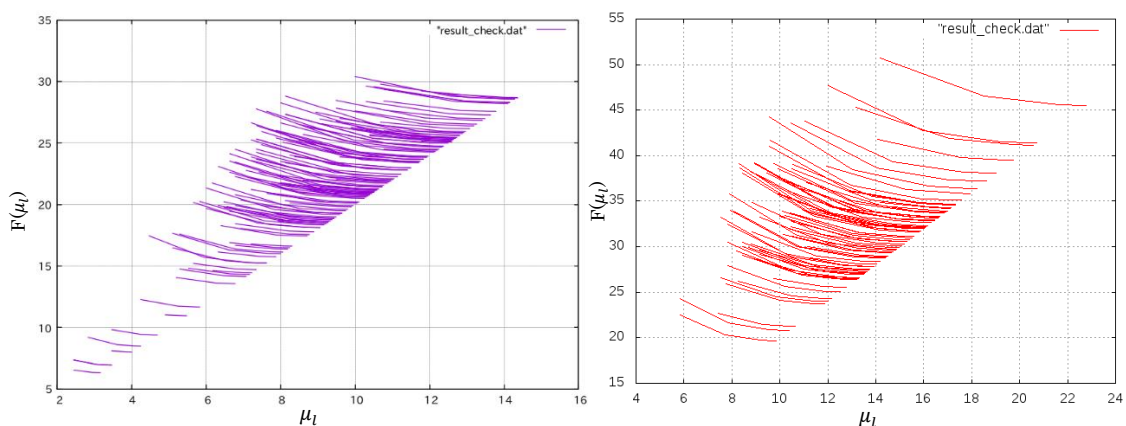


図. 66 福岡 100 ノード 正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

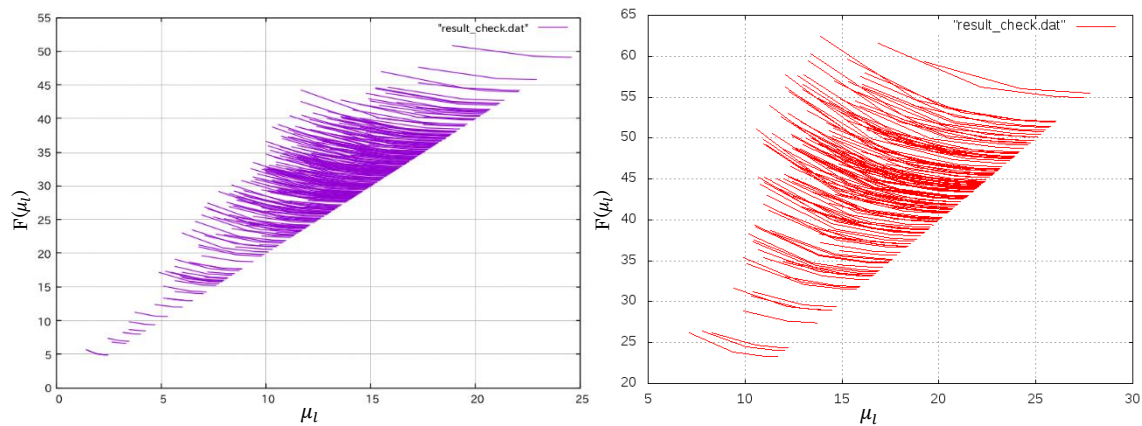


図. 67 福岡 200 ノード 正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布



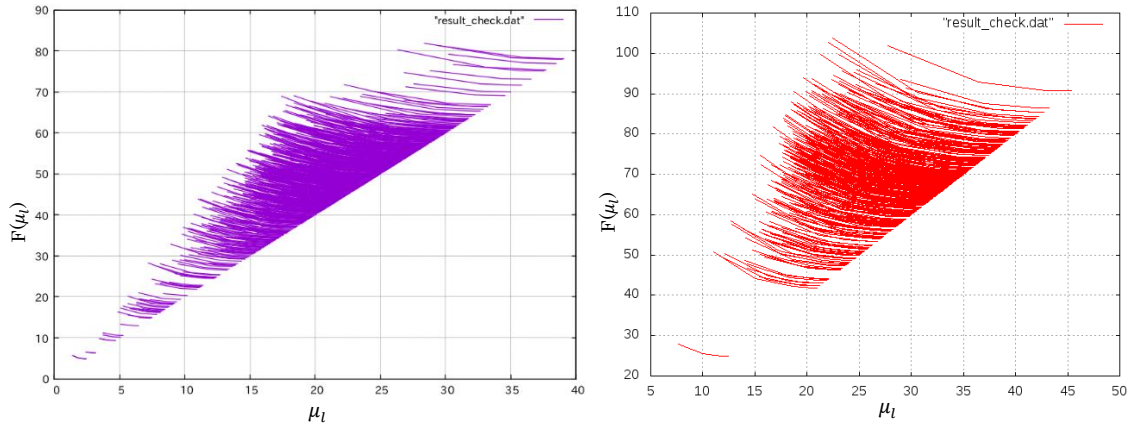


図. 68 福岡 500 ノード 正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

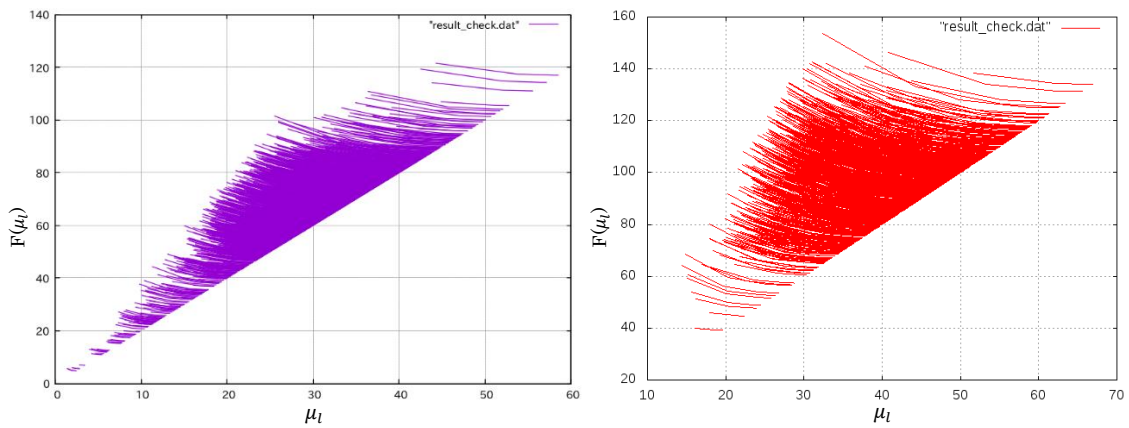


図. 69 福岡 1000 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

図 66～69 までは福岡エリア正三角形（左）と正方形（右）の MSQ ネットワークノード数が 100～1000 の各サイクル $\mu_l$ に対応する通信コスト  $F(\mu_l)$ の分布である。図 66～69 の正三角形（左） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 6 倍から 10 倍の間であり、正方形 MSQ（右） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 3 倍ぐらいとなった。

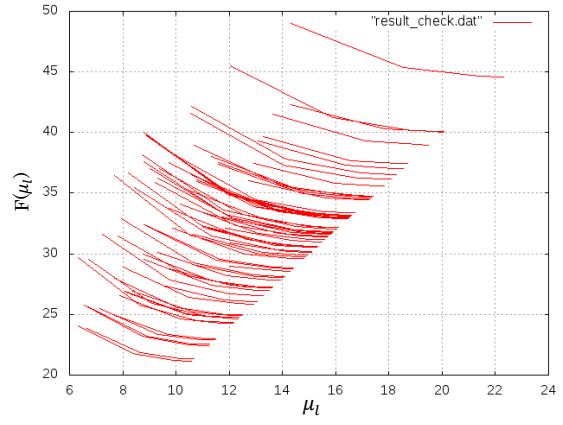
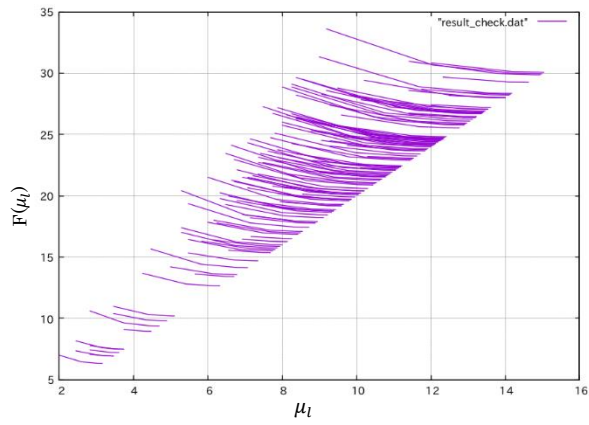


図. 70 広島 100 ノード 正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

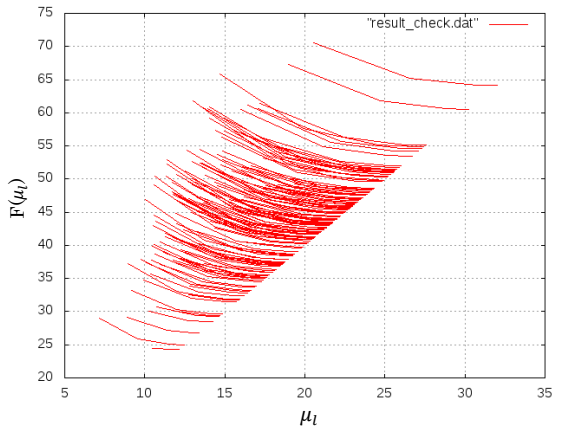
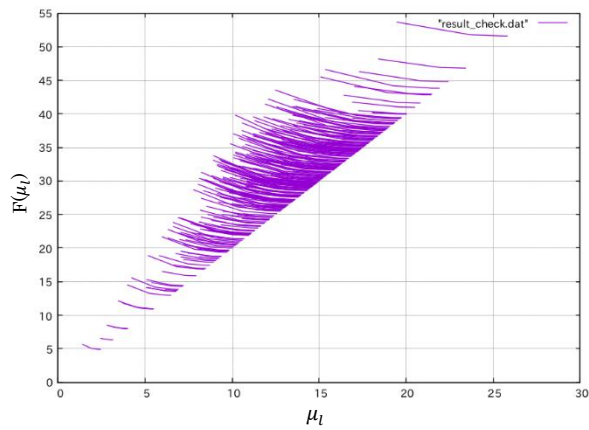


図. 71 広島 200 ノード 正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

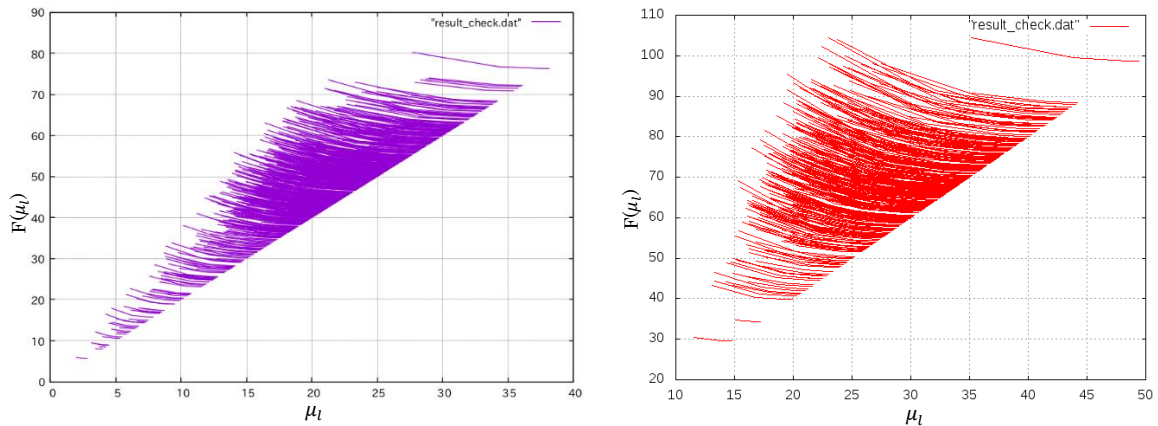


図. 72 広島 500 ノード 正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

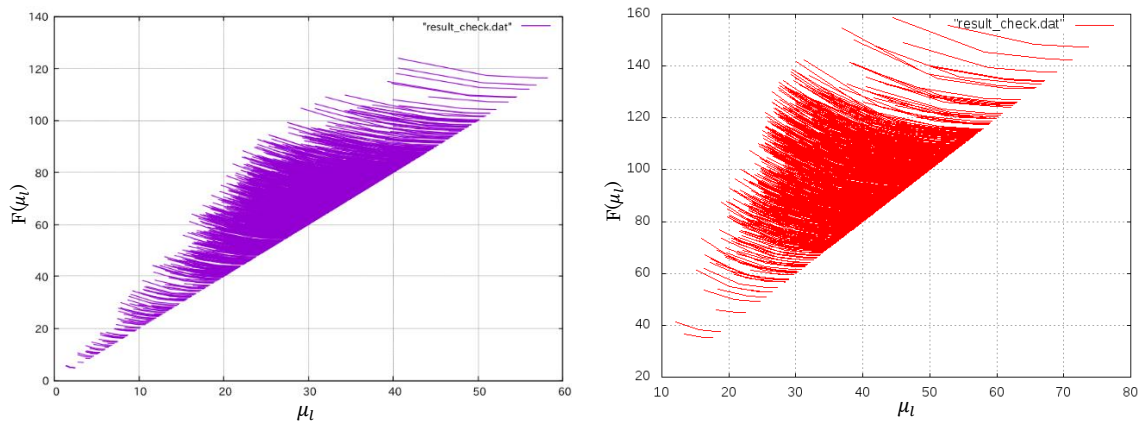


図. 73 広島 1000 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

図 70～73 までは広島エリア正三角形（左）と正方形（右）の MSQ ネットワークノード数が 100～1000 の各サイクル $\mu_l$ に対応する通信コスト  $F(\mu_l)$ の分布である。図 70～73 の正三角形（左） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 7 倍から 10 倍の間であり、正方形 MSQ（右） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 3 倍ぐらいとなった。

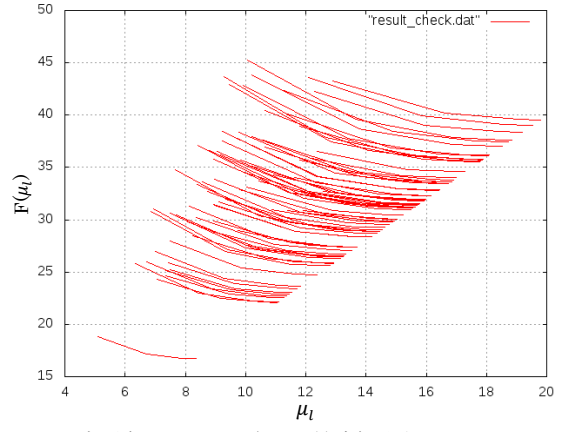
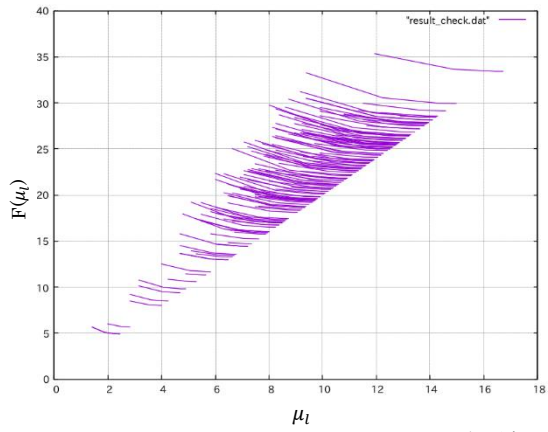


図. 74 京阪 100 ノード 正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

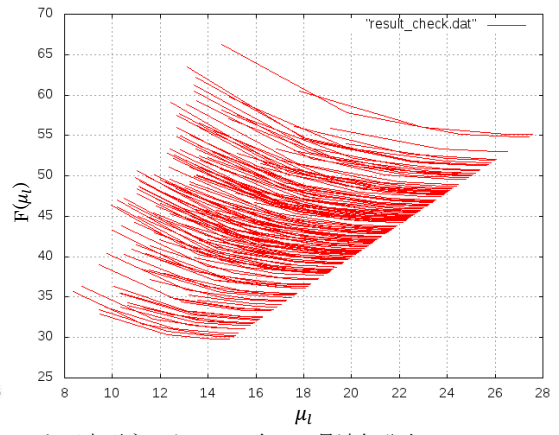
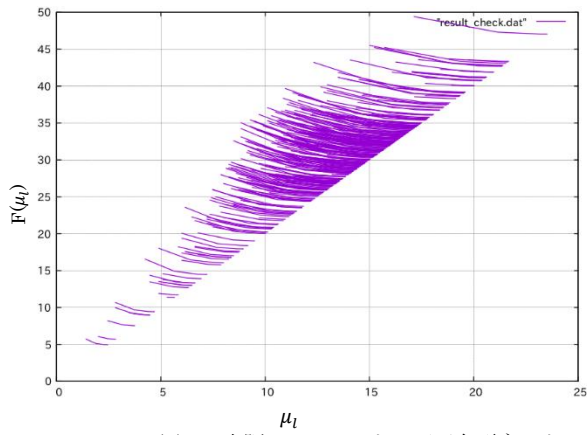


図. 75 京阪 200 ノード 正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

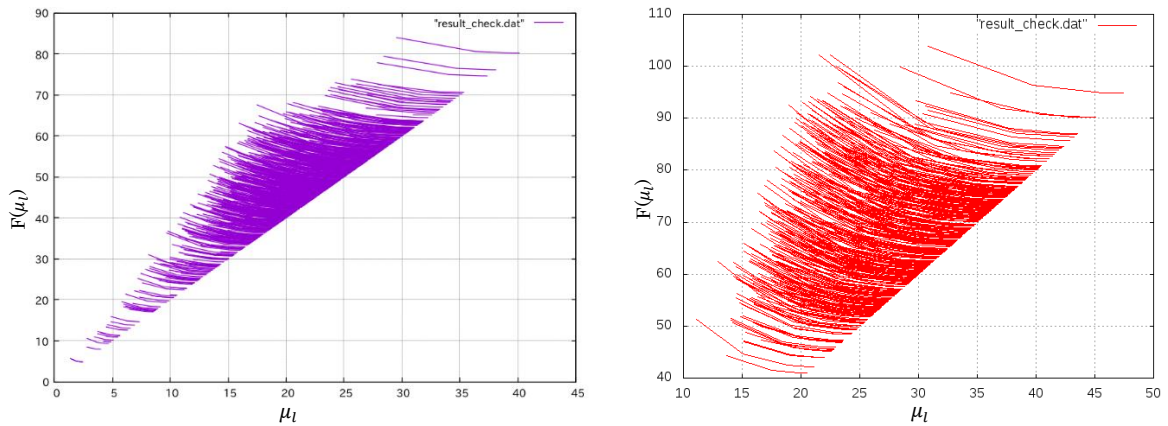


図. 76 京阪 500 ノード 正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

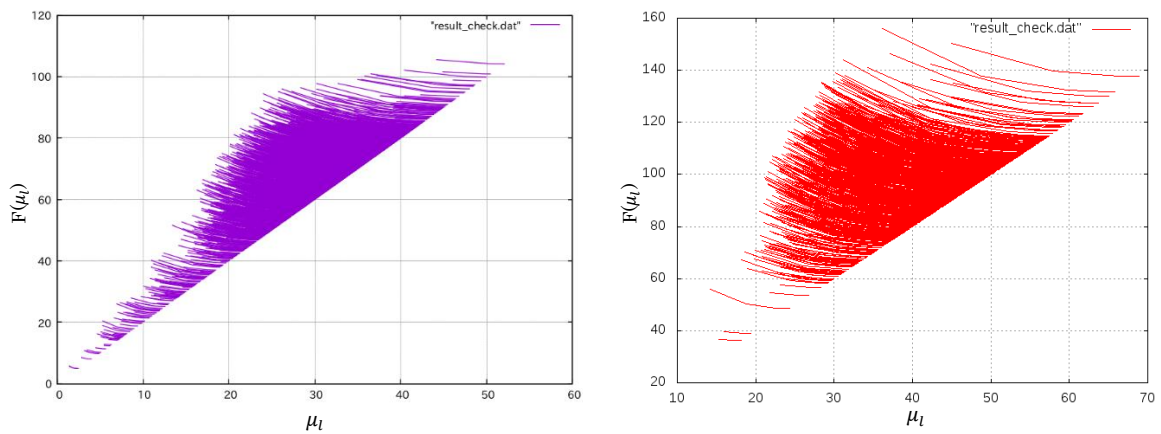


図. 77 京阪 1000 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

図 74～77 までは京阪エリア正三角形（左）と正方形（右）の MSQ ネットワークノード数が 100～1000 の各サイクル $\mu_l$ に対応する通信コスト  $F(\mu_l)$ の分布である。図 74～77 の正三角形（左） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 7 倍から 10 倍の間であり、正方形 MSQ（右） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 3 倍ぐらいとなった。

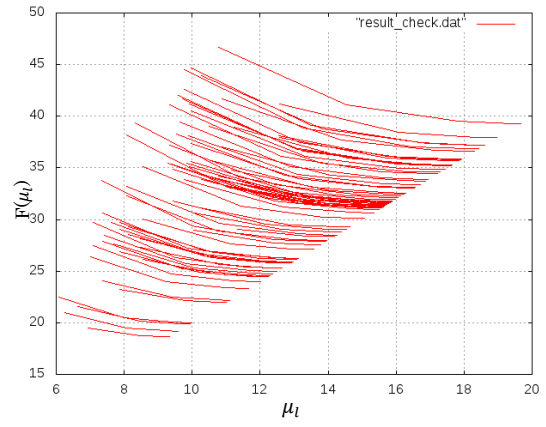
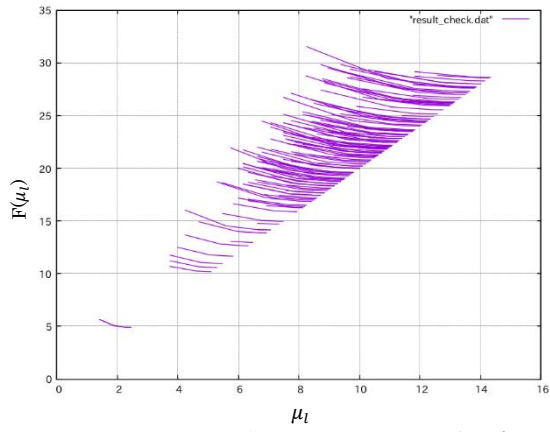


図. 78 名古屋 100 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

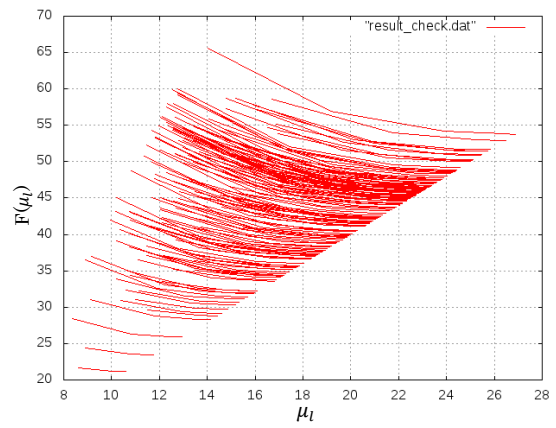
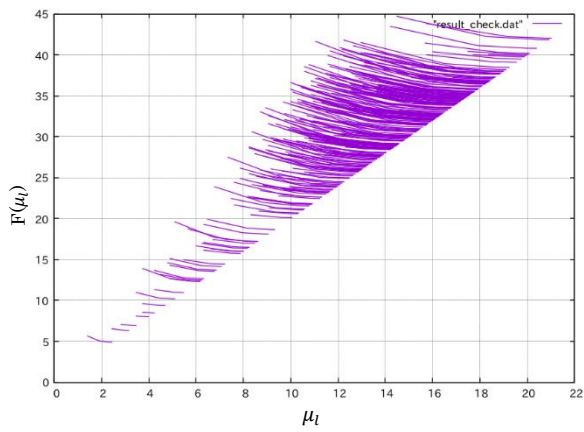


図. 79 名古屋 200 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

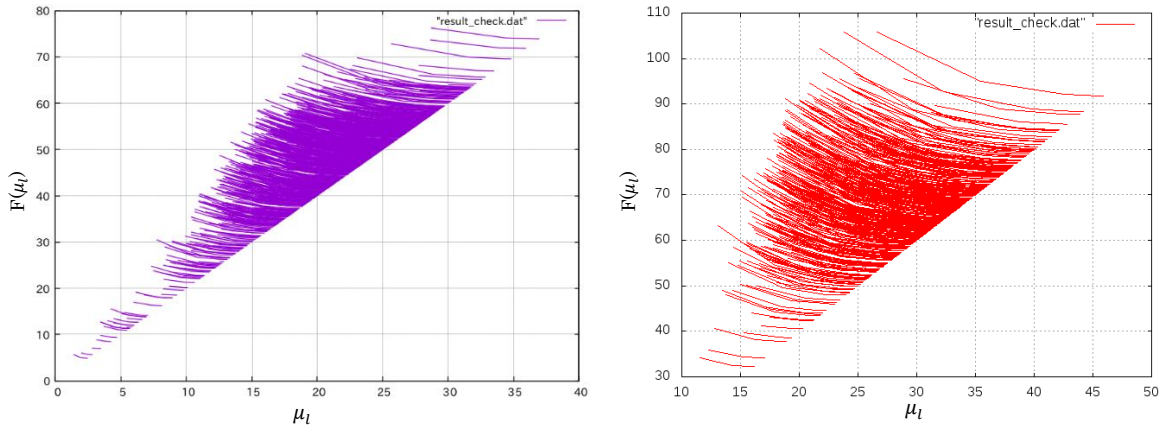


図. 80 名古屋 500 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

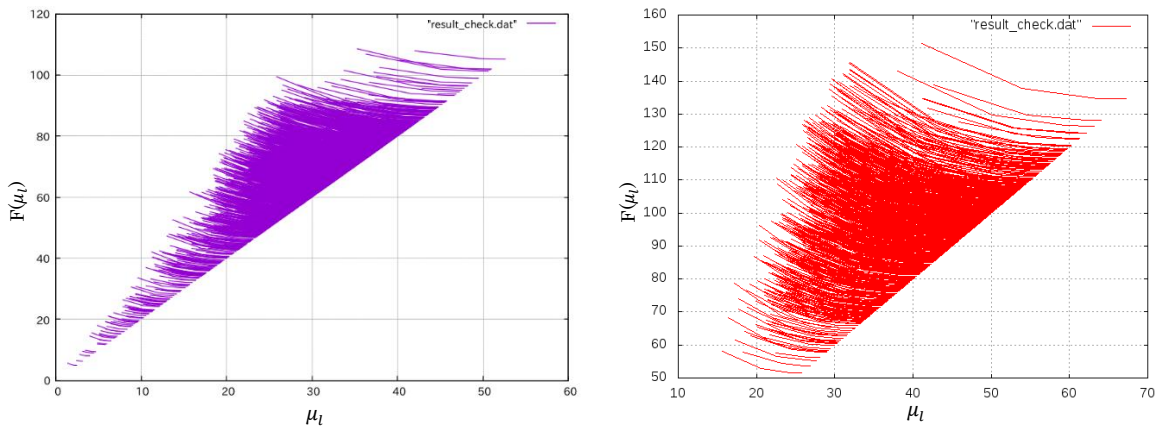


図. 81 名古屋 1000 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ 最適解分布

図 78~81 までは名古屋エリア正三角形（左）と正方形（右）の MSQ ネットワークノード数が 100~1000 の各サイクル $\mu_l$ に対応する通信コスト  $F(\mu_l)$  の分布である。図 78~81 の正三角形（左） $\mu_l$  の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$  の最大値は最小値の 6 倍から 10 倍の間であり、正方形 MSQ（右） $\mu_l$  の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$  の最大値は最小値の 3 倍ぐらいとなった。

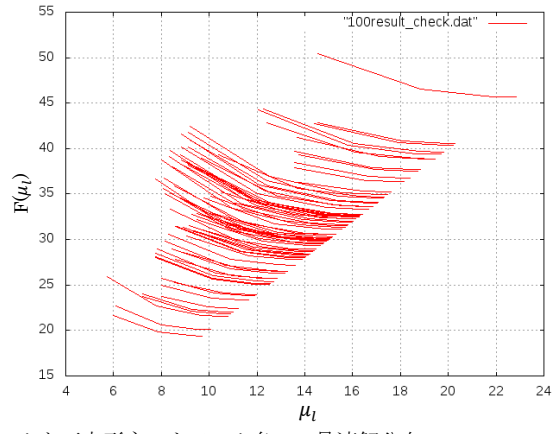
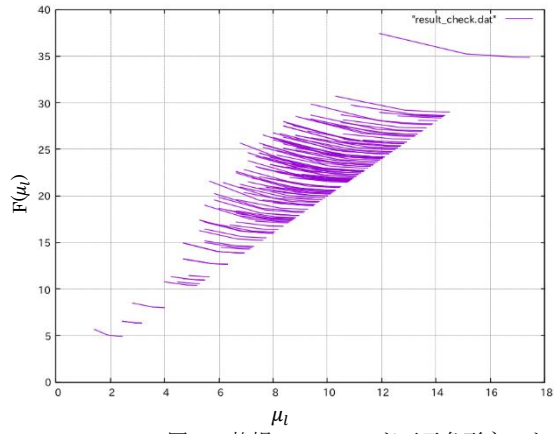


図. 82 札幌 100 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

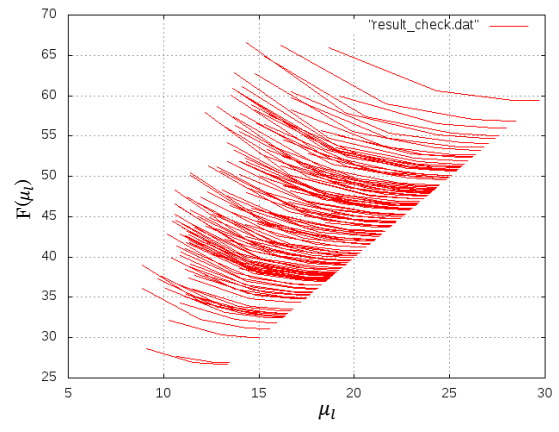
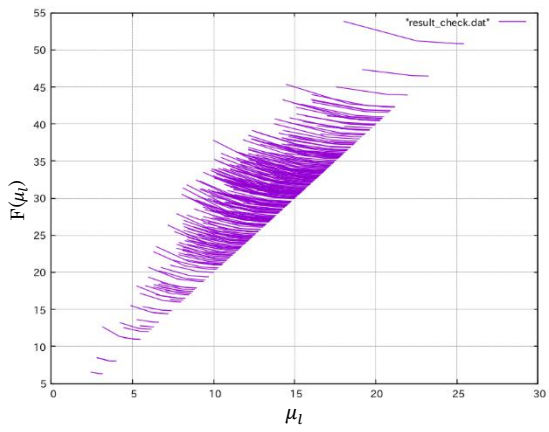


図. 83 札幌 200 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布



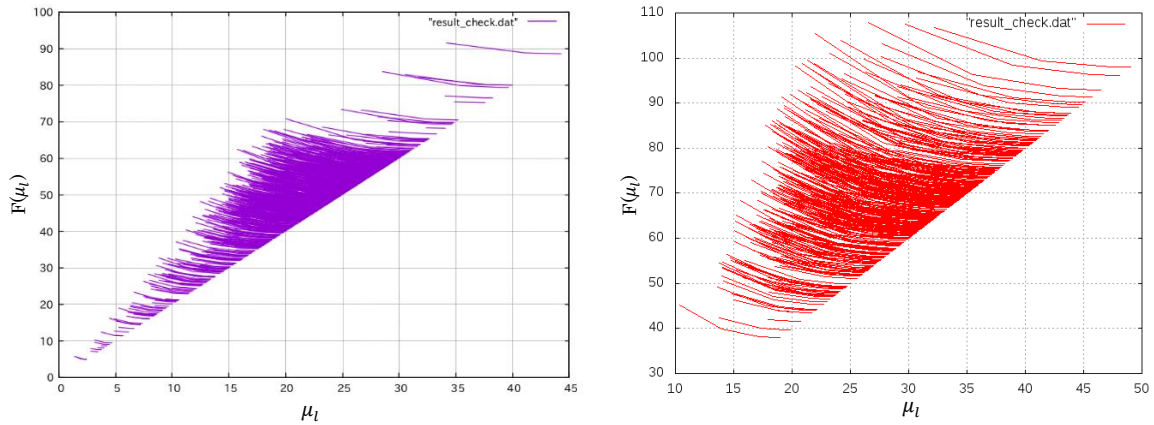


図. 84 札幌 500 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

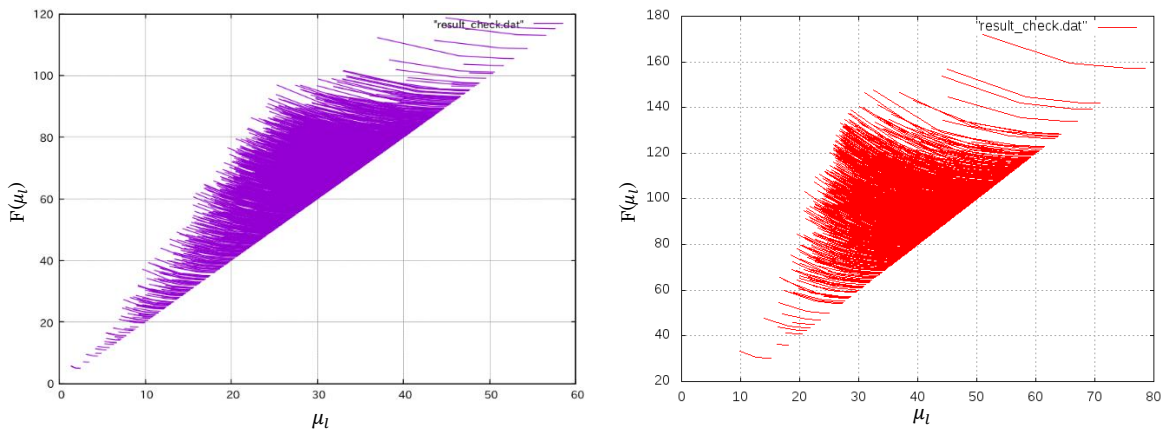


図. 85 札幌 1000 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

図 82～85 までは札幌エリア正三角形（左）と正方形（右）の MSQ ネットワークノード数が 100～1000 の各サイクル $\mu_l$ に対応する通信コスト  $F(\mu_l)$  の分布である。図 82～85 の正三角形（左） $\mu_l$  の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$  の最大値は最小値の 6 倍から 12 倍の間であり、正方形 MSQ（右） $\mu_l$  の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$  の最大値は最小値の 3 倍ぐらいとなった。

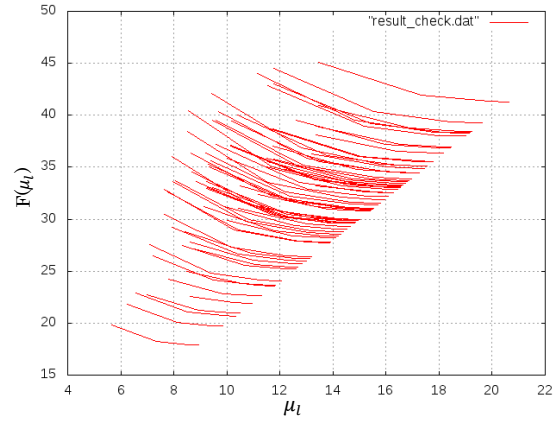
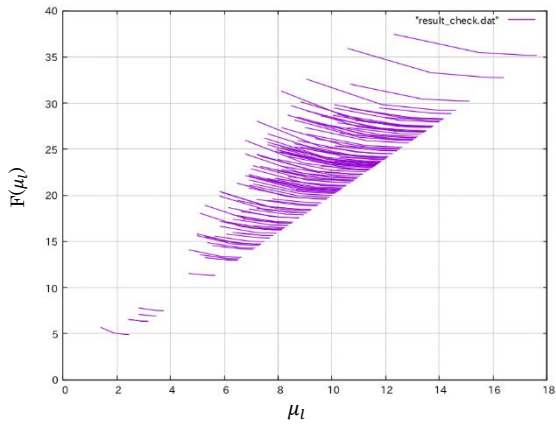


図. 86 仙台 100 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

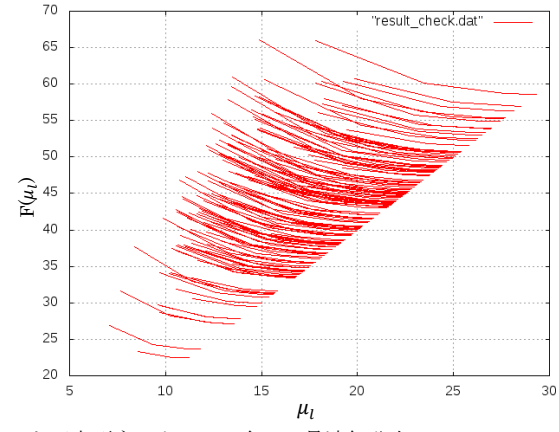
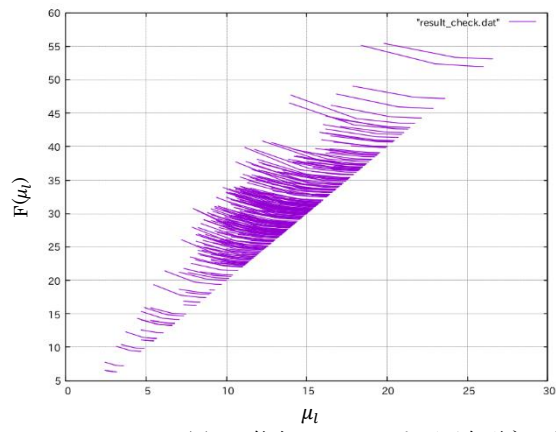


図. 87 仙台 200 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

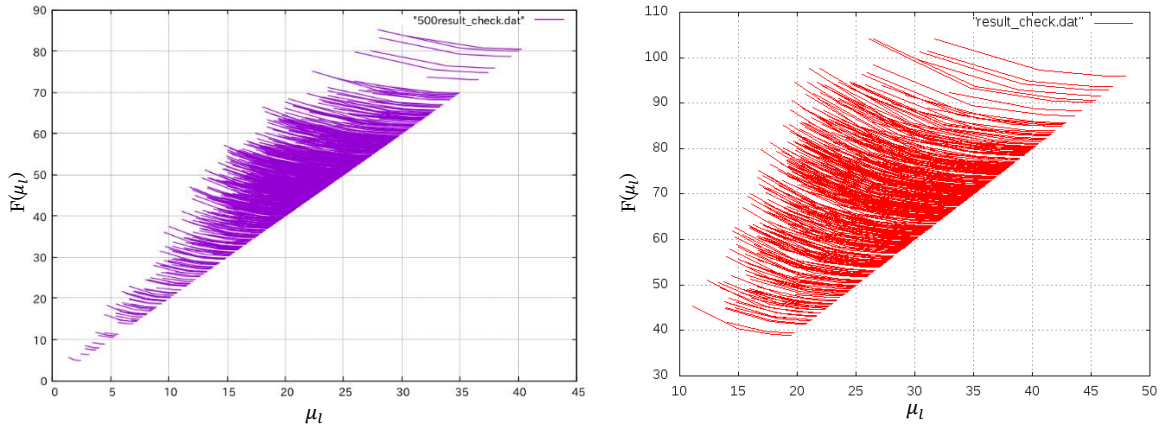


図. 88 仙台 500 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

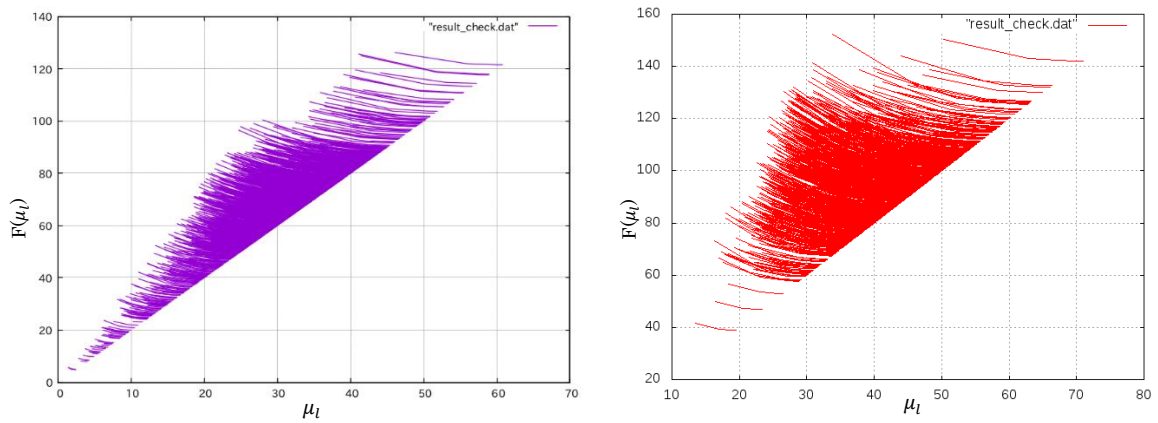


図. 89 仙台 1000 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

図 86～89 までは仙台エリア正三角形（左）と正方形（右）の MSQ ネットワークノード数が 100～1000 の各サイクル $\mu_l$ に対応する通信コスト  $F(\mu_l)$ の分布である。図 86～89 の正三角形（左） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 7 倍から 12 倍の間であり、正方形 MSQ（右） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 3 倍ぐらいとなった。

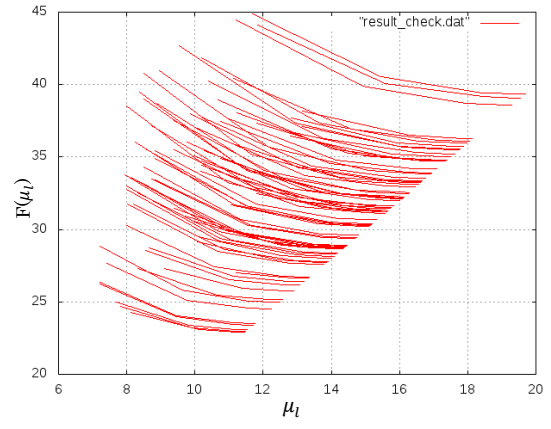
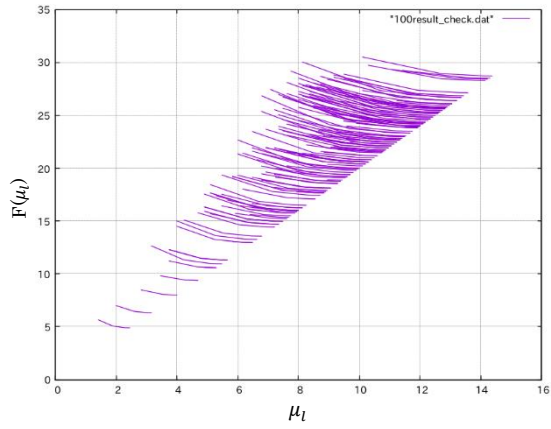


図. 90 東京 100 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

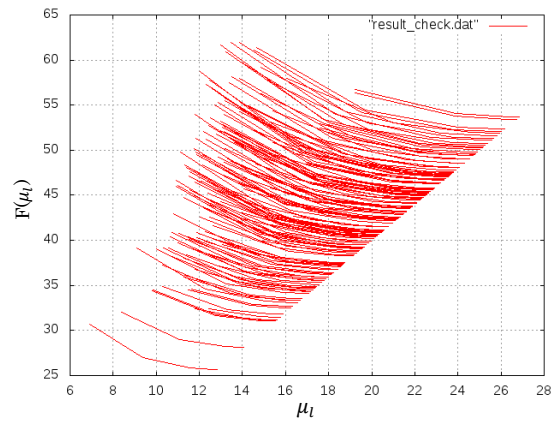
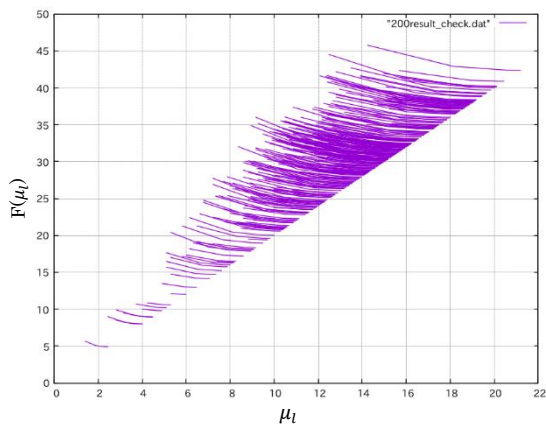


図. 91 東京 200 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

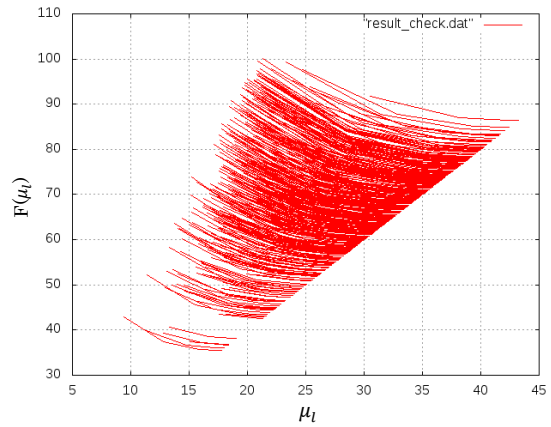
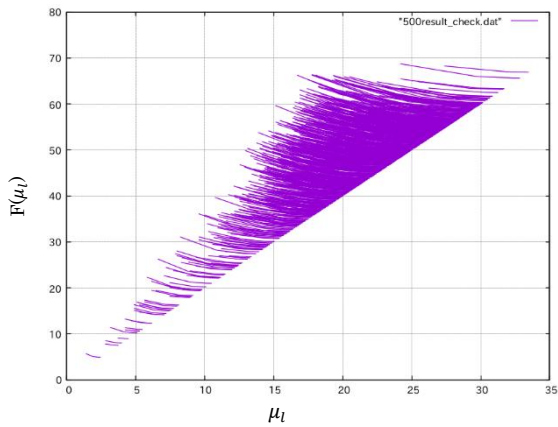


図. 92 東京 500 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

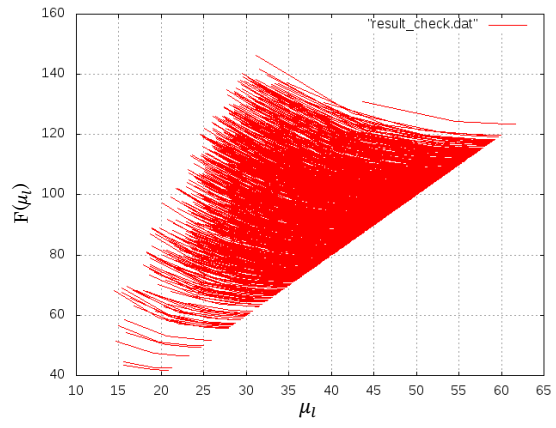
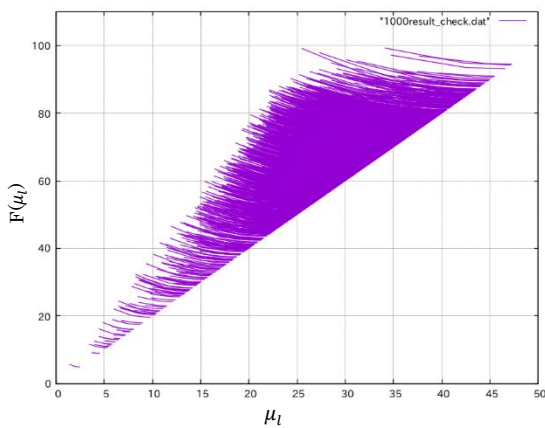


図. 93 東京 1000 ノード正三角形ネットワークと正方形ネットワーク各 $\mu_l$ の最適解分布

図 90～93 までは東京エリア正三角形（左）と正方形（右）の MSQ ネットワークノード数が 100～1000 の各サイクル $\mu_l$ に対応する通信コスト  $F(\mu_l)$ の分布である。図 90～93 の正三角形（左） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 6 倍から 9 倍の間であり、正方形 MSQ（右） $\mu_l$ の最大極値と最小極値から通信コスト  $F(\mu_l)$ の最大値は最小値の 3 倍ぐらいとなった。

## 4.6 最適解 $\mu_l$ の累積分布

図.94~100 は 7 つのエリアノード数が 100,200,500,1000 の正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu_l$ の累積分布図である。

図.94 福岡エリア最適解 $\mu_l$ の累積分布から：

100 ノードの時、正三角形(左)は 10%–90%の最適解 $\mu_l$ は 8 から 12 の狭い範囲にある。正方形(右)は 10%–90%の最適解 $\mu_l$ は 12 から 18 の狭い範囲にある。

200 ノードの時、正三角形(左)は 10%–90%の最適解 $\mu_l$ は 11 から 19 の狭い範囲にある。正方形(右)は 10%–90%の最適解 $\mu_l$ は 17 から 25 の狭い範囲にある。

500 ノードの時、正三角形(左)は 10%–90%の最適解 $\mu_l$ は 19 から 30 の狭い範囲にある。正方形(右)は 10%–90%の最適解 $\mu_l$ は 25 から 39 の狭い範囲にある。

1000 ノードの時、正三角形(左)は 10%–90%の最適解 $\mu_l$ は 25 から 42 の狭い範囲にある。正方形(右)は 10%–90%の最適解 $\mu_l$ は 36 から 54 の狭い範囲にある。

図.95~100 は上記で述べた図.94 と同じ狭い範囲に最適解が分布している。言い換えれば、図.103 に示すように、最適解の分散が小さいことを意味する。

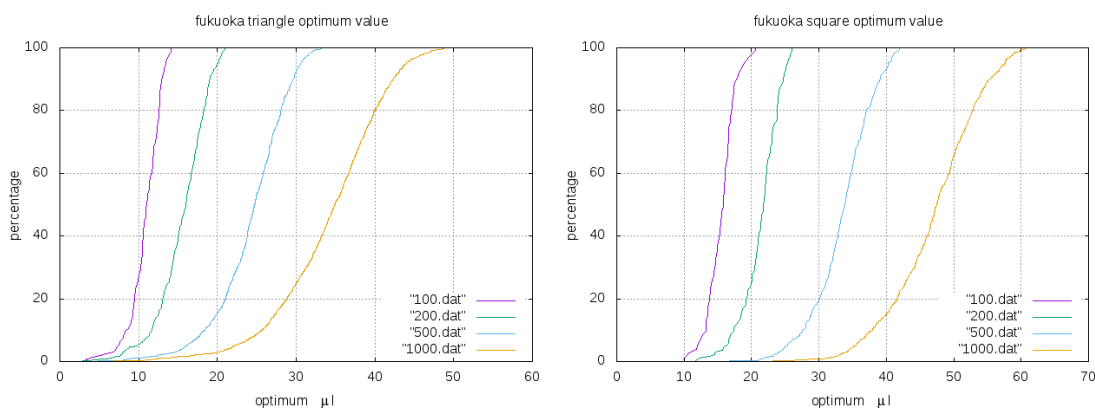


図. 94 福岡エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu_l$ の累積分布

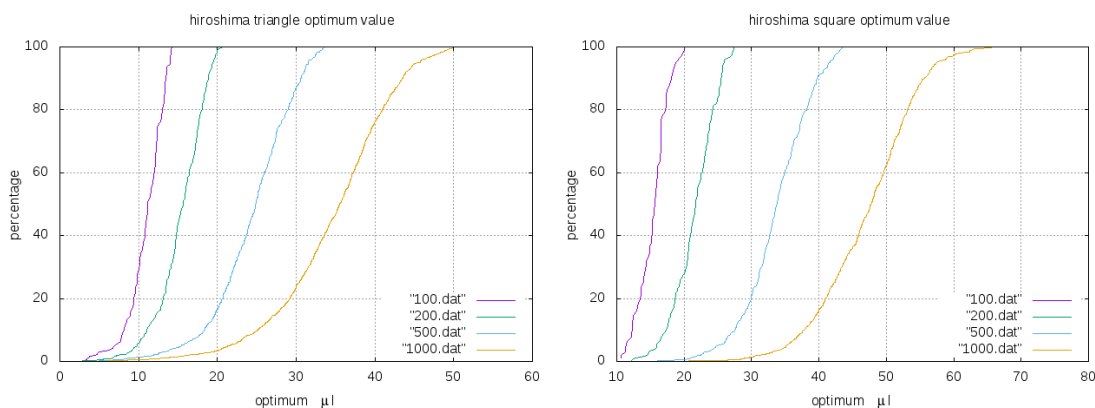


図. 95 広島エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu_l$ の累積分布

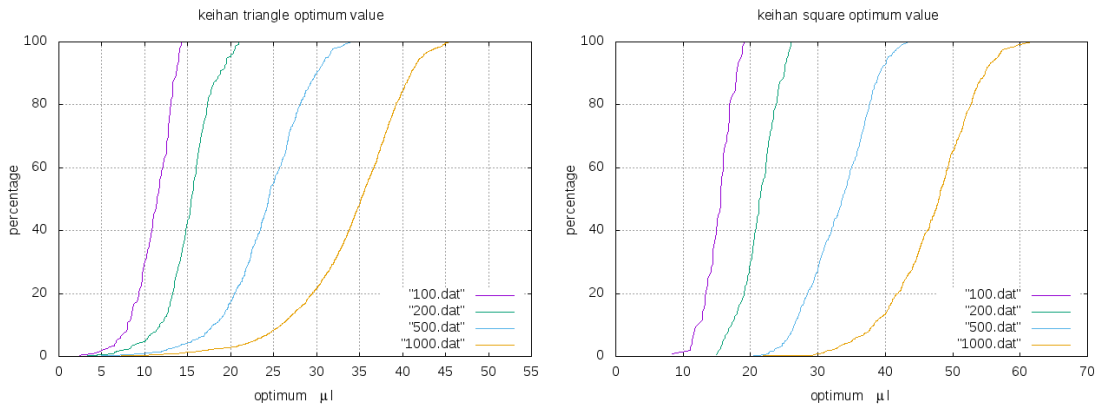


図. 96 京阪エリア正三角形(左)と正方形(右)のMSQネットワークの最適解 $\mu_l$ の累積分布

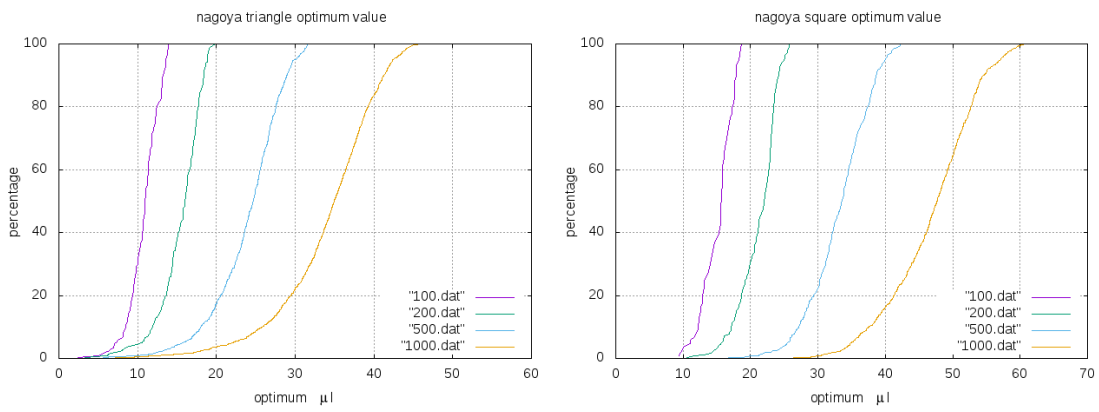


図. 97 名古屋エリア正三角形(左)と正方形(右)のMSQネットワークの最適解 $\mu_l$ の累積分布

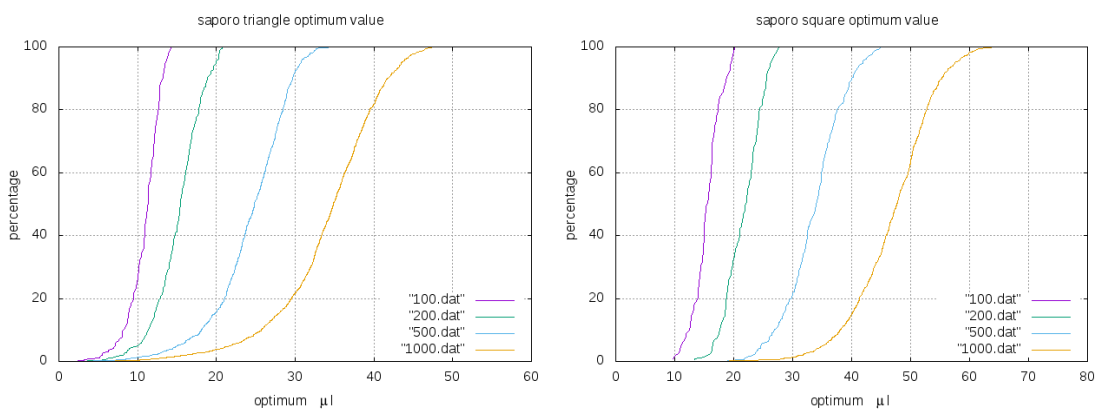


図. 98 札幌エリア正三角形(左)と正方形(右)のMSQネットワークの最適解 $\mu_l$ の累積分布

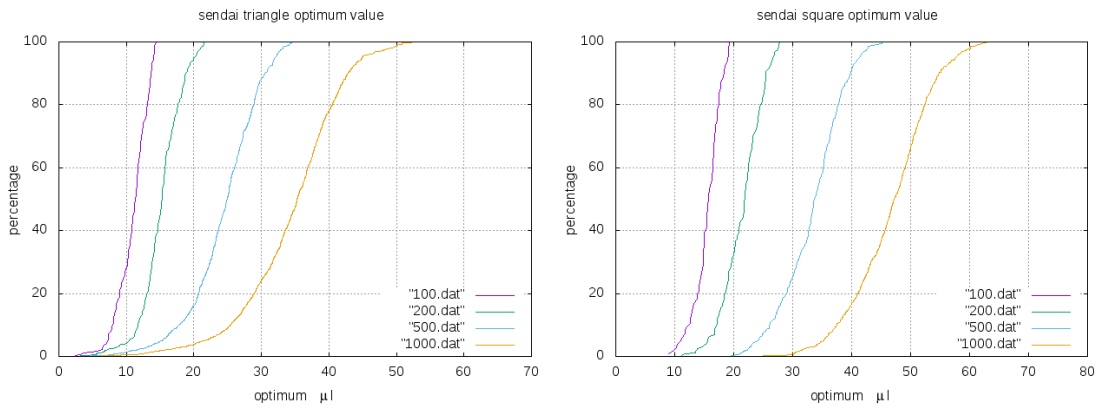


図. 99 仙台エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu_l$ の累積分布

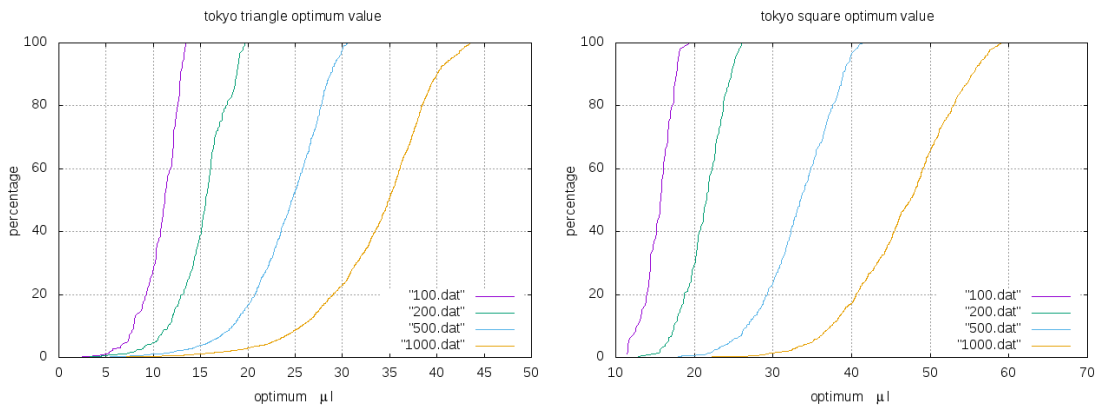


図. 100 東京エリア正三角形(左)と正方形(右)の MSQ ネットワークの最適解 $\mu_l$ の累積分布



## 4.7 最適解の指標

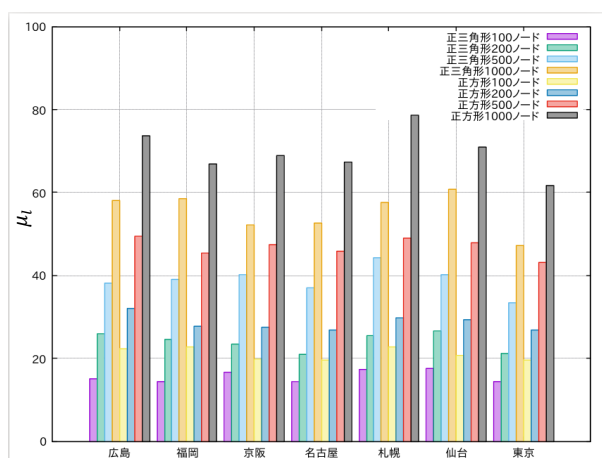


図. 101 各ノード数の正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク最適解 $\mu_l$ の最大値グラフ

図.101 では 7 つのエリア各ノード数の正三角形と正方形の MSQ ネットワークの最適解 $\mu_l$ の最大値を示す。全体的にノード数を増やすほどノード間の通信が頻繁になって、通信経路上エンドツーエンド遅延が増える。安定な通信を保持するために、サービス負荷の最適解 $\mu_l$ の最大値が増える。また、正三角形の最適解 $\mu_l$ の最大値は正方形の場合より小さい。すなわち、正三角形の各サイクル上の最大通信コストは正方形のより小さいといえる。

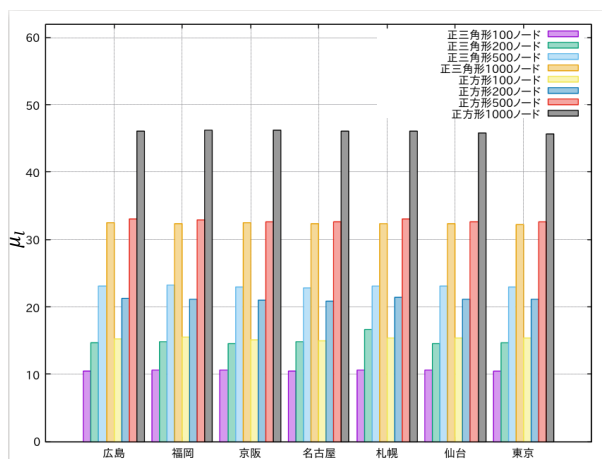


図. 102 各ノード数の正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク最適解 $\mu_l$ の平均値グラフ

図.102 では 7 つのエリア各ノード数の正三角形と正方形の MSQ ネットワークの最適解 $\mu_l$ の平均値を示す。同様に、全体的にノード数を増やすほど平均値が増える。また、正三角形の最適解 $\mu_l$ の平均値は正方形の場合より小さい。すなわち、正三角形の平均的各サイクル上の通信コストは正方形のより小さいといえる。

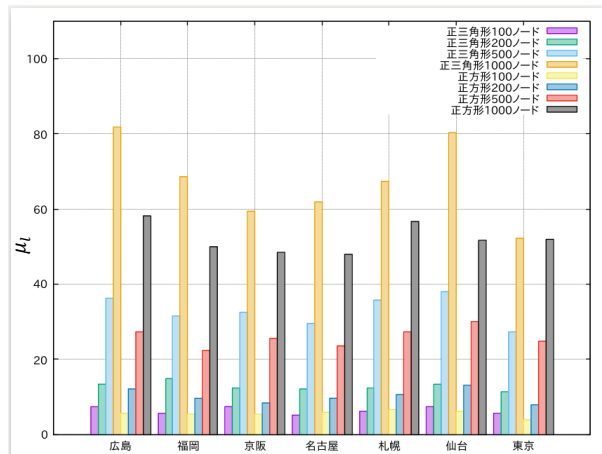


図. 103 各ノード数の正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク最適解 $\mu_l$ の分散値グラフ

図.103 では 7 つのエリア各ノード数の正三角形と正方形の MSQ ネットワークの最適解 $\mu_l$ の分散値を示す。同様に、全体的にノード数を増やすほど分散値が増える。また、正三角形の最適解 $\mu_l$ の分散値は正方形のより大きい。すなわち、正三角形の各サイクル上の通信コストのバラツキは正方形のより大きいといえる。

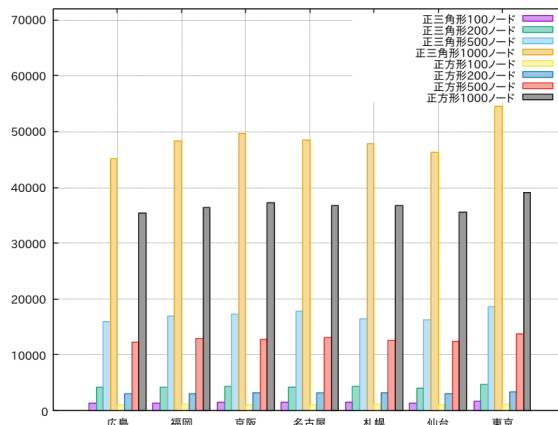


図. 104 各ノード数の正三角形 MSQ ネットワークと正方形 MSQ ネットワーク最適解 $\mu_l$ の総負荷の合計値グラフ

図.104 では 7 つのエリア各ノード数の正三角形と正方形の MSQ ネットワークの最適解 $\mu_l$ の総負荷の合計値を示す。同様に、全体的にノード数を増やすほど総負荷が増える。また、正三角形の最適解 $\mu_l$ の総負荷は正方形より大きい。すなわち、正三角形の各サイクル上の総通信コストは正方形のより大きいといえる。

## 第5章

### 結論

#### 5.1 実験結果のまとめ

7つのエリアを可視化した人口分布図 24～65 に従って構築した正三角形と正方形のMSQネットワークでは、アクセス負荷のバランスを取るために、人口が集中しているところが分割られやすい。また、ノードへの最近接アクセスで割り当てられた人口数の累積分布の結果から、正三角形と正方形のMSQネットワークでは直線的部分が指数分布に従うことが分かった。

ネットワーク上の配分に相当する各サイクルの最適解 $\mu_l$ の分布図(図 66-93)から、正三角形MSQネットワークの最適解 $\mu_l$ の最大値は最小値の6倍から10倍の間であり、正方形MSQネットワーク最適解 $\mu_l$ の最大値は最小値の3倍ぐらいとなった。よって、正方形の方が正三角形のよりサービス負荷量のバラツキが小さい、最適解 $\mu_l$ が一定の狭い範囲にある。

ノード数Nを増やし、ネットワークが分割された面の数が増えるとともに、通信経路で転送するデータ量が増えるので、最適解 $\mu_l$ の値も増加する。最適解 $\mu_l$ の分散値と $\mu_l$ の合計値による総サービス負荷量は正三角形MSQネットワークの方が正方形のより大きく、サービス負荷量のバラツキと通信コストにおいては、正方形のMSQネットワーク構造の方がより適していると考えられるが、同じノード数のネットワークでは、正三角形の面の数が正方形のより多いために、平均値では正三角形の方が最適解 $\mu_l$ の値が小さい。また、最適解 $\mu_l$ の最大値では正三角形の方が正方形の場合より小さい。これらを表.5 でまとめる。従って、正三角形と正方形のMSQネットワーク構造には一長一短があると考えられる。

	正三角形	正方形
最適解 $\mu_l$ の最大値	○小さい	
最適解 $\mu_l$ の平均値	○小さい	
最適解 $\mu_l$ の分散値		△若干小さい
最適解 $\mu_l$ の合計としての総サービス負荷量		○小さい

表. 5 正三角形と正方形の最適解 $\mu_l$ のまとめ

## 5.2 今後の課題

本研究では、通信経路を遠回りさせないようにする正三角形と正方形のネットワーク構造を考えたが、MSQネットワークが故障や意図的な攻撃を受けて一部が機能停止した時に、ネットワークを再構築する問題など、より現実的な状況を考慮した頑健性と回復力が高いネットワーク構造を検討するのは今後の課題として考えられる。

## 参考文献

- [1] 鶴 正人,内田 真人,滝根 哲哉 他, DTN 技術の現状と展望, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン NO.16[春号],pp.57-68,2011.
- [2] Wenrui Zhao, Mostafa Ammar and Ellen Zegura,Controlling the Mobility of Multiple Data Transport Ferries in a Delay-Tolerant Network, INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE ,pp1407 - 1418 vol. 2, 13-17 March 2005.
- [3] 地域メッシュ統計の特質・沿革(<http://www.stat.go.jp/data/mesh/pdf/gaiyo1.pdf>)
- [4] 林幸雄,“ネットワーク科学の拡がり”, 情報処理学会誌, Vol 49, No.3, 2008.
- [5] 林幸雄,“Scale-free ネットワークの生成メカニズム”, 応用数理, Vol. 14, No.4, 2004.
- [6] 今野 紀雄・町田 拓也 (著) ,“よくわかる複雑ネットワーク シミュレーションで見るモデルの性質”,秀和システム, 2008 年”
- [7] Yukio Hayashi, and Jun Matsukubo, “Geographical effects on the path length and the robustness in complex networks”, Physical Review E, Vol. 73, 2006
- [8] 林幸雄,“ネットワーク科学に基づいたロバストな情報通信ネットワーク”, 電気学会誌, Vol. 140, No. 5, 2010.
- [9] 林 幸雄 著,“自己組織化する複雑ネットワーク 空間上の次世代ネットワークデザイン”, 近代科学社, 2014 年
- [10] Robert Sedgewick 著、野下浩平、星守、佐藤創、田口東 訳、“アルゴリズムC 第3巻 グラフ・数理・トピックス”近代科学社,2007 年
- [11] Hayashi.Y.,and Ono,Y.,Geographical network stochastically constructed by a self- similar tiling according to population,Physical Review E,Vol.82,pp.016108,(2010)
- [12] Yukio Hayashi, Recoverable DTN Routing based on a Relay of Cyclic Message-Ferries on a MSQ Network, IEEE Xplore Digital Library FoCAS 2015, pp.37-42, 2015.
- [13] 牧野 都治著,“待ち行列の応用”,森北出版,1969 年

## 謝辞

本研究の進行にあたって、多くの方々が支援していただいて、この場を借りて、感謝の気持ちを表したいと思います。

指導教官の林幸雄教授には、研究の基礎から、論文の書き方や発表の注意事項まで、様々かつ適切な助言を頂き、また丁寧に指導していただきました。日ごろの研究生活だけではなく、日常生活まで全ての配慮に深く感謝致します。

副テーマに関して、山形大学の田中先生には、大変丁寧にご指導頂きました。先生のおかげで、プログラミングの色々な事が学べ、研究室における活動を通じて、多くの貴重な体験も出来たことを感謝致します。

研究科では西本一志先生、宮田一乗先生、由井蘭隆也先生には中間審査で有益なご指導をいただきました。研究の不足部分だけではなく、道筋も示して頂き、心から御礼申し上げます。

課外活動、就職活動では内平直志先生と藤波先生にご指導、ご評価お頂き、また多大なご支援を頂き、深く感謝しております。厚く御礼申し上げます。

最後に、日本での留学を支援してくれた自分の家族にも感謝をしたいと思います。

今後の北陸先端科学技術大学院大学の発展を御祈念させていただきます。