

# 都市道路網の接続構造指標に基づく 一般的道路網生成手法の提案

田中 大智<sup>1</sup>・安藤 宏恵<sup>2</sup>・柿本 竜治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 熊本大学 工学部土木建築学科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目39-1)

E-mail: 184t1230@st.kumamoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 熊本大学助教 くまもと水循環・減災研究教育センター

(〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目39-1)

E-mail: hiroeando@kumamoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup>正会員 熊本大学教授 くまもと水循環・減災研究教育センター

(〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目39-1)

E-mail: kakimoto@kumamoto-u.ac.jp

道路網の接続構造が性能に与える研究の多くは、格子状や放射状などの規則的ネットワークや次数分布・次数相関などが既知であるネットワークを仮定する 경우가多く、実際の都市道路網を適切に表現できているとはいえない。そのため本研究では、実都市道路網の特徴を考慮した一般的道路網生成モデルを構築する。日本の 141 都市の道路網データを用いて接続構造指標によるクラスタリングを行い、各クラスターに最適なノード数とリンク数を入力パラメータとする道路網生成モデルを構築した。さらに、生成された道路網を階層化する手法を提案し、拠点ペア間の移動時間分布に基づいて道路網の性能を検証することで、上位ランク道路を環状とすることや、最下位ランク道路の道路延長割合を小さくすることが性能向上につながることを確認できた。

**Key Words:** network topology, road network, cluster analysis, road hierarchy

## 1. はじめに

近年の技術革新によって収集可能なデータ量は年々大幅に増加している。膨大なデータの中から関係性の可視化や構造化のために、Network Science の研究分野は発展が著しい。Network Science 分野では、あらゆるデータの関係性をネットワーク化されたシステムにより表現し、特徴や構造を明確化する方法やシステム自体の評価に関する研究が多く実施されている。これまでに Network Science 分野において研究されてきた関係性は Web や通信システムなどの情報的なネットワークや人間関係のような社会的なネットワーク、または遺伝子研究などの生物学的なネットワークが多数であり、道路網や鉄道網、電力網などのインフラ分野におけるネットワークを対象とした分析は少数派だといえる。しかしながら、都市構造に対する Network Science のアプローチは長期的な変化や成長を研究・理解するための新たな視点として認識されており、これまでに都市の性能を評価するために道路網や鉄道網などの交通システム構造を分析する研究が行わ

れてきた。インフラネットワークを対象とした研究で用いられるネットワークはスモールワールド性<sup>1)</sup>やスケールフリー性<sup>2)</sup>、ランダム性<sup>3)</sup>のような代表的な性質を持つネットワークがほとんどであり、これらは次数分布や次数相関、規則性などの接続構造を既知としている。社会的ネットワークや情報的ネットワークの接続構造が上記のような代表的なネットワークモデルで記述できることは知られているが、物理的制約を持つインフラネットワークでは接続構造が一律的でないことも多い。また、仮想ネットワークによる研究が進む一方、実都市データを活用した実験的アプローチが欠けているため、実際のインフラシステムが持つ構造をもっともらしく表現できているのか、特性を定量化しているのか疑問が残る。

これらの背景を踏まえ、本研究では現実の都市道路網のデータを活用し、その特徴を踏まえた一般的道路網生成モデルを構築することを目的とする。これにより道路の特徴を踏まえた一般的なネットワークを大量に生成することを可能とするため、グラフ理論や Network Science 分析手法を用いた道路網解析の発展や実験的アプローチ

の材料となることに加えて、機械学習等の適用を見据えた学習データの生成に寄与する。

## 2. 既往研究と本研究の位置付け

### (1) 既往研究の整理

グラフ理論を用いた都市道路網の分析はいくつか研究が行われている。渡部<sup>4)</sup>は22の都市道路網のノードデータを抽出し、ノード間の近接性から定義される近接グラフのリンクと、実道路網のリンクの一致度合いを評価することで、道路網の構築原理を分析した。相対近傍グラフによって説明できるリンクが多いことを述べている。

Liu and Zhao<sup>5)</sup>は日本の歴史的地区の街路ネットワークに対し構造的特性を定量的に把握し、地区の立地環境や歴史的特徴、役割に沿った考察を行った。腰塚ら<sup>6)</sup>は格子状と放射状の街路ネットワークにおいて、旅行距離と交通量の分布を解析的に求める手法を提案している。さらに、Steven et al.<sup>7)</sup>は Network Science の既存指標から道路網構造を持つ供給システムの問題を述べた上で、実験的な枠組みに基づく少数のパラメータによって幅広い構造特性を持つ平面道路網を生成する単純なモデルを提案した。さらに平均リンク混雑度と無秩序の代償という2つの性能指標に道路網生成パラメータが与える影響の調査を行っている。Xie and Levinson<sup>8)</sup>はリンク角度が90°, 45°, 30°のネットワークと完全ネットワーク、ここからリンクを削除し階層ランクを指定した12種類のネットワークを対象として、不均一性、接続パターン、連続性の尺度からネットワークの特性を定量的に分析している。

### (2) 本研究の位置づけ

ネットワーク構造と道路性能に関する研究のほとんどは規則性のあるネットワークを対象としており実都市との乖離が大きいこと、考慮する階層数に制約があることが課題として挙げられる。また、広範囲を対象とする場合、高速道路などの非平面ネットワークの要素も考えるべきである。本研究ではネットワーク分野の接続構造指標を用いて実都市の道路網データから構造的特徴を分析したうえで、適切なインプットデータを持つ一般的道路網生成モデルを構築、階層化を行い、性能を検証する。

## 3. 研究で用いた指標とデータ

### (1) 接続構造指標

本研究で用いた9つの道路網の接続構造指標を以下に述べる。これらの指標はノード数 $n$ 、リンク数 $m$ 、道路延長 $L$ 、エリア面積 $S$ でネットワークの接続構造特性を

評価することができる。

#### a) NPL<sup>5)</sup>

ノード数とリンク数の比で、式(1)の通り表される。

$$NPL = \frac{n}{m} \quad (1)$$

#### b) GTP<sup>4)</sup>

結合性に関する指標を拡張し、正方格子状道路網との関係性を評価するための指標であり、式(2)で表される。値が高いほど正方格子状に近く、完全な正方格子状道路網の場合に1となる。日本の22の地区を対象としてGTPが0.348から0.595の間にあることが示されている。

$$GTP = \frac{m - n + 1}{(\sqrt{n} - 1)^2} \quad (2)$$

#### c) CF<sup>4)</sup>

頂点と道路延長の関係を扱った分析の一つにランダムラインモデルがある。道路網を、対象領域を通過する一様にランダムな直線とみなし、道路延長が交差点数の平方根に比例するというルートNの法則を明らかにした。この関係をもとに式(3)のように表され、密な道路網ほど小さい値を示す。日本の22の地区を対象としてCFが0.373から0.707の間にあるという結果が示されている。

$$CF = \frac{nS}{L^2} \quad (3)$$

#### d) Meshedness<sup>9)</sup>

平面グラフのみを対象とし、全体的な接続性レベルを定量化した指標で閉路充足率とも呼ばれる。式(4)で表され、値が大きいほど発展度、利便性、迂回性を示す。フランスの10都市を対象としてMeshednessが0.2から0.47の間にあるという結果が示されている。

$$M = \frac{m - n + 1}{2n - 5} \quad (4)$$

#### e) $\gamma$ -index<sup>5)</sup>

完全グラフのリンク数と実際のリンク数の比で表される。平面グラフでは完全グラフのリンク数は最大で $3n - 6$ となるため式(5)となる。したがってこの指標は値が高いほど完全接続型のグラフに近いことを示す。

$$\gamma - index = \frac{m}{3n - 6} \quad (5)$$

#### f) Road-Density<sup>5)</sup>

式(6)に示しているように総延長とエリア面積の比で、 $Dl$ で表される。

$$Dl = \frac{L}{S} \quad (6)$$

#### g) Node-Density<sup>5)</sup>

式(7)に示しているようにノード数とエリア面積の比で、 $Dc$ で表される。

$$Dc = \frac{n}{S} \quad (7)$$

h) Circuitness<sup>8)</sup>

ブリッジとは、連結しているグラフにおいてそのリンクを削除すると不連結になるリンクのことである。道路ネットワークにおいて、ブリッジは主に次数が1のノードに接続しているリンク（行き止まり道路）となる。この指標の値が大きいほど回路性のある道路網であることを示し、ブリッジのない道路網では1となる。

$$\phi_{circuit} = 1 - \frac{\text{ブリッジの総延長}}{L} \quad (8)$$

i) Average Dispersion<sup>5)</sup>

全ノード間の最短距離の平均値、式(9)で表される。この値が小さいほど他のノードにアクセスするときの距離が短いため、アクセス性が良いことを示すことができる。ここで $d(i, j)$ はノード $i$ とノード $j$ の最短距離である。

$$D = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d(i, j) \quad (9)$$

## (2) 実道路網データと対象範囲

47都道府県の人口上位3都市、計141都市道路網を対象として、各都市の市役所を中心とする3km四方に含まれる道路網をオープンストリートマップから取得する。範囲内に海が含まれる場合には内陸側に3km中心点をずらす。なお、道路網は無向グラフとする。

都市道路網は同じ特徴が都市全体に一律に広がっているわけではないため、取得する面積によって構造的特徴に変化が生じる可能性がある。取得データ範囲の影響を確認するため、東京都と9つの政令指定都市において9, 25, 49, 100km<sup>2</sup>を対象としたときの各指標値の分布を調べた。例として図-1にCircuitnessとCFを、都市を色で分け、面積をマーカーの種類で分けてプロットしたものである。同都市は近い位置にまとまっており、面積条件によって指標値の特徴が明確に分かれることはない。その他の指標についても同様の傾向であったため、対象範囲の大きさが指標に直接的な影響を与えることはないと判断し、今後の分析には3km四方の道路網データを用いる。

## 4. クラスタリングによる都市道路網分析

実都市道路網において算出された9つの指標値に基づいて、クラスタリング（ウォード法）による都市の分類を行い、141都市を4つのクラスターに分類した。表-1は各クラスターに含まれる都市名と県内人口順位を示し、表-2は各クラスターにおける指標値の平均値を示している。

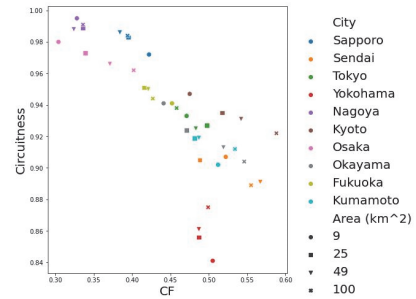


図-1 CFとCircuitnessの面積変化

## (1) クラスタ1の特徴

クラスター1はGTP, CF, Circuitness,  $\gamma$ -indexの値が4クラスターの中で最も良く、Node-Density, Road-Density, Average Dispersionも2番目に良い値である。このことからクラスター1は正方格子状に近く、回路性、アクセス性にも優れており密な道路網であることを示しており、最も高水準なクラスターといえる。クラスター1には仙台市、広島市、熊本市などの政令指定都市や、正方格子状道路網を持つ都市として知られている札幌市、名古屋市、京都市などが含まれていた。また愛知県、福岡県は上位3都市すべてがこのクラスターに含まれていた。

## (2) クラスタ2の特徴

クラスター2はGTP, CF, Circuitness,  $\gamma$ -index, Average Dispersionの値が4クラスターの中で最も悪い値となっている。これによりクラスター2は回路性、アクセス性ともに悪く、疎な道路網であるといえる。しかし、このクラスターには新潟市、大津市、長崎市等の各県の人口1位都市が7都市含まれていた。これらの多くは海や湖沿いに細長く分布しており、地理的条件を大きく受けているため、本研究における道路網データ取得方法では都市の特徴をうまく捉えられていないと考えられる。

## (3) クラスタ3の特徴

クラスター3はCFの値が2番目に悪いが、Average Dispersionの値は最も良い値となっている。このことから疎ではあるがアクセス性が良い道路網であるといえる。アクセス性を評価する指標であるAverage-Dispersionは近接中心性とも呼ばれ、ノードが中心的な位置にあるかを示す。市役所を中心とした1.5km四方内のノード数が占める割合の平均値は、表-3のようにクラスター3が最も大きい。このことからクラスター3に属する都市は道路網が市役所の周りに集中していると考えられる。このクラスターにおいては「アクセス性が良い」ではなく「中心部にアクセス性が集中している」といえ、都市の発展している範囲が狭いという捉え方もできるだろう。このクラスターには八代市、天草市、つくば市などの県内の人口順位が2位もしくは3位の都市が多く、県内での人

口順位 1 位都市は岩手県の盛岡市と島根県の松江市しか含まれていなかった。

(4) クラスター4の特徴

クラスター4は Node-Density と Road-Density の値が最も大きい密な道路網と判断することができる。しかし同様に密な道路網であるクラスター1と比較して、Node-Density の値が 1.20 倍であるにも関わらず Road-Density の値が 1.07 倍と低めであることや、ノード数とリンク数の比率を示す NPL の値がクラスター1 より大きいことから、ノードの密度は大きいがリンクの密度は小さい道路網であることが分かる。道路網の総合的な密度を示す CF はクラスター1 と比較して悪い値を示す上に、迂回の増加により Average-Dispersion が 2 番目に悪い値を示している。しかし、このクラスターには県内での人口順位 1 位の都市が 23 都市と最も多く含まれていた。含まれている都市の特徴として、特別区や横浜市等は例外ではあるが、地方の都市が多い。これにより地方において人口第 1 位都市はノード密度の観点では優れているが、都市全体の密度や回路性、正方格子状との関係性などの観点においては県内でも最も優れている都市というわけではないことが明らかとなった。

また、クラスター3 とクラスター4 は NPL, Meshedness,  $\gamma$ -index, Circuitness の値がほぼ一致していた。このことからノード数とリンク数の比率や回路性がほとんど変わらないにも関わらず、アクセス性や道路網の密度が大きく違う道路網が多くあることが分かった。

5. 接続構造指標に基づく一般的道路網生成モデルの構築

クラスタリングによって特徴づけられた実都市道路網の構造的特性に基づいて、各クラスターにおいて一般的な道路網を生成するためのインプットデータとなるノード数とリンク数の最適解を探索する。

(1) 一般的道路網生成モデル

本研究では Steven ら<sup>1)</sup>によって提案された道路網生成モデルを援用し実都市道路網の特徴を考慮した生成モデルに改良する。まずは、既存モデルの生成手順を記述する。ノード数 $n$ 、リンク数 $m$ 、エリア面積 $S$ 、最小ノード間距離 $d$ をインプットデータとする一般化道路網の生成手順は以下の通りである<sup>1)</sup>。

表-2 各クラスターに含まれる都市における指標の平均値

指標	1	2	3	4
NPL	0.630	0.741	0.683	0.683
GTP	0.620	0.373	0.500	0.488
CF	0.418	0.612	0.575	0.470
Meshedness	0.295	0.177	0.234	0.234
$\gamma$ -index	0.530	0.451	0.490	0.489
Node-Density	164	145	93.4	196
Road-Density	20.4	17.1	13.5	21.8
Circuitness	0.960	0.845	0.922	0.920
Average Dispersion	1.87	1.99	1.78	1.95

表-3 3km 四方内ノード数のうち 1.5km 四方内ノード数の比率

	クラスター1	クラスター2	クラスター3	クラスター4
ノード比率	0.274	0.286	0.349	0.250

表-1 クラスタリング結果

クラスター	人口順位	都市
1 (39)	1	札幌市, 仙台市, 富山市, 福井市, 岐阜市, 名古屋市, 京都市, 大阪市, 和歌山市, 岡山市, 広島市, 福岡市, 熊本市, 大分市, 宮崎市, 鹿児島市
	2	旭川市, 前橋市, 川口市, 川崎市, 長岡市, 大垣市, 静岡市, 豊田市, 堺市, 姫路市, 福山市, 北九州市, 別府市, 都城市
	3	酒田市, 栃木市, 太田市, 相模原市, 小松市, 南アルプス市, 各務原市, 岡崎市, 久留米市
2 (20)	1	山形市, 水戸市, 新潟市, 大津市, 奈良市, 徳島市, 長崎市
	2	船橋市, 倉敷市, 山口市, 阿南市, 今治市, 佐世保市
	3	大崎市, 福島市, 市川市, 富士市, 生駒市, 浜田市, 宇部市
3 (41)	1	盛岡市, 松江市
	2	一関市, 横手市, つくば市, 小山市, 白山市, 坂井市, 甲斐市, 田辺市, 米子市, 丸亀市, 南国市, 唐津市, 八代市, 霧島市, 沖縄市
	3	奥州市, 大仙市, 日立市, 川越市, 上越市, 射水市, 越前市, 上田市, 鈴鹿市, 長浜市, 亀岡市, 橋本市, 倉吉市, 津山市, 呉市, 鳴門市, 三豊市, 四万十市, 諫早市, 天草市, 中津市, 延岡市, 鹿屋市, うるま市
4 (41)	1	青森市, 秋田市, いわき市, 宇都宮市, 高崎市, さいたま市, 千葉市, 特別区, 横浜市, 金沢市, 甲府市, 長野市, 浜松市, 四日市市, 神戸市, 鳥取市, 下関市, 高松市, 松山市, 高知市, 佐賀市, 那覇市
	2	八戸市, 石巻市, 鶴岡市, 郡山市, 八王子市, 高岡市, 松本市, 津市, 草津市, 宇治市, 樫原市, 出雲市
	3	函館市, 弘前市, 町田市, 東大阪市, 西宮市, 新居浜市, 鳥栖市

1.  $n$ 個のノードを $A \text{ km}^2$ 四方の領域にランダムに散布し、最小ノード間距離（リンク長） $d_{min}$ を設定。
2. 1.で生成したノード集合 $N$ に対して、最小木(MST)とドロネー三角形を構築する。オイラーの式より最大リンク数は $3n - 6$ となる。ドロネー三角形とMSTはネットワークのリンクの候補となる。

MST：すべての点を結ぶグラフのうち辺の総長が最小となるグラフである。ドロネー三角形の部分グラフで辺の本数は $n - 1$ となる。

ドロネー三角形：3点以上の点に内接する円の内部に他の点がない場合にそれらの点を結ぶ辺で構成されるグラフである。

3. ドロネー三角形から $m (\geq n - 1)$ 個のリンクを選択して新しいネットワーク $G$ を作成。最初にMSTの $n - 1$ 個のリンクが選択され、残りの $m - (n - 1)$ 個のリンクはドロネー三角形からランダムに選択される。

なお、本ネットワークは平面構造を前提としている。

## (2) 目的関数

生成モデルによって得られる道路網の9つの指標値と、実都市道路網の指標値の差を求め、それらの合計が最も小さくなるようなノード数とリンク数をクラスターごとに求める。そのため、式(10)に示す目的関数は指標値の差の合計である。生成モデルにおける領域面積 $A$ は取得データに合わせて $9 \text{ km}^2$ 、最小ノード間距離 $d_{min}$ は実道路網の最小ノード間距離の平均値 $4.03 \text{ m}$ とする。ここで $Value^V$ は一般化道路網のランダム性に対処するため道路網を100個生成した時に得られる各指標値の平均値、 $Value^R$ は表-1に示す各クラスターに含まれる実道路網における指標値の平均値である。

$$y = \sum \left( 1 - \frac{Value^V}{Value^R} \right)^2 \quad (10)$$

## (3) ハーモニーサーチによる最適化

目的関数内の $Value^V$ を求める過程においてランダム性が含まれるため、ヒューリスティックスアルゴリズムによって最適解を求める。本研究では、最適なノード数 $n$ 、リンク数 $m$ を求める手法として、音楽家の即興演奏過程を模倣した最適解探索アルゴリズムであるハーモニーサーチ<sup>10)</sup>を用いた。なお、変数となる $n$ 、 $m$ は整数制約をもつ。ハーモニーサーチでは解候補をハーモニー、解候補集合をハーモニーメモリ（以下HMと記述）と呼び、以下の3つの手法のいずれかにより新しいハーモニーを生成する。

1. HMから1つのハーモニーを選択する。
2. HM内の1つのハーモニーを式のように調整する。  
ここで $B$ は1要素の範囲の10%とした。

表4 ハーモニーサーチによる最適ノード数とリンク数

クラスター	ノード数	リンク数	目的関数値
1	1491	2371	0.00246
2	1364	1884	0.0531
3	841	1230	0.0314
4	1817	2716	0.0265

$$x_{i+1} = x_i + B \times \text{rand}[-1,1] \quad (11)$$

3. 新しいハーモニーを境界条件下でランダムに生成する。

最適化アルゴリズムには多様性と収束性が不可欠であるが、ハーモニーサーチではハーモニーの調整とランダム生成により多様性を維持し、HMにより収束性を保証する。また本研究における最適化は、実行するたびに値が若干変化するランダム性が存在するが、HMによってランダム性にも対応することが可能である。HM内のハーモニーを選択する確率 $R_c = 0.85$ 、HMから選択したハーモニーを調整する確率 $R_a = 0.35$ 、ハーモニー数は5とパラメータ設定を行った。また、 $n$ と $m$ の境界条件は実道路網データの最小値と最大値を採用し、終了条件は目的関数を $f(x)$ として式(12)のように設定した。

$$\frac{|f(x_i) - f(x_{i+1})|}{|f(x_i)|} < 0.001 \quad (12)$$

## (4) 最適なノード数とリンク数

算出された $n$ 、 $m$ 、目的関数値を表-4に示す。目的関数値はクラスター1が最も小さく、クラスター2が最も大きい。これは構築した一般化道路網がクラスター2に含まれる都市の道路網の特徴をうまく再現できていないと解釈できる。クラスター2の特徴は回路性がないことが挙げられるが、行き止まり道路の数が多く、このような特徴を持つ道路網の構築は本研究で活用した道路網生成手順では難しいことが分かった。それに対しクラスター1のような密で回路性がある道路網の特徴はうまく再現することが可能だと分かった。回路性の道路網の生成が難しい原因としてドロネー三角形が木構造の要素がない完全回路性の構造であることが考えられる。そのためドロネー三角形からのリンク選択では多くの行き止まり道路は少なくなる。回路性のない道路網を構築するためには道路網生成のリンクを選択する段階においてノードの次数分布などの制約を加える必要があるだろう。また、渡部<sup>9)</sup>は近接グラフの中でドロネー三角形よりも相対近傍グラフやガブリエルグラフの方が実道路網のリンクとの一致率が大きいと示しているため、これらを用いることによりさらに実道路網に近い一般的道路網を生成できる可能性が高い。

## 6. 一般的道路網の階層化と性能の検証

一般的な道路網において道路階層を表現することは必要不可欠な要素である。階層型道路ネットワークでは、各階層において道路の機能分担が実現することで、交通を効率的に処理することができると同時に、生活道路からの通過交通の排除などにより周辺居住環境も良好に保たれることが期待されている。本章では階層化手法を提案したうえで、前章において最も実都市の特徴を再現したクラスター1を対象に、提案する階層化手法を適用し、一般的階層型道路網の性能を検証する。ここで生成する一般的道路網のエリアの大きさは5km×5kmとする。

### (1) 一般的道路網の階層化手法

以下、4.(1)にて構築された一般的道路網を階層化する手順について述べる。本研究では階層数を4とし、階層のランクは上位からA, B, C, Dとした。

- 2つのノードをランダムに選択し、最短経路長が $L_A$ の $\pm 10\%$ に収まっている場合、この経路を階層Aの道路とする。 $\pm 10\%$ に収まっていない場合は、再度新たなノードをランダムに選択する。
- 階層Aの道路において、階層Aと下位階層が接続可能となる接続点ノードを間隔 $d$ ごとに指定し、階層Aに含まれるその他のノードを下位階層と切り離し立体交差とする。
- 階層Aの接続点に接続しているA以外のリンクを階層Bとする。
- 階層Aの接続点の数だけノードをランダムに選択し、選択されたノードと階層Aと階層Bの接続点ノードの最短経路を計算する作業を接続点の数だけ繰り返し、その道路延長が $L_B$ の $\pm 10\%$ に収まっている場合、この経路を階層Bの道路とする。
- 階層Bに含まれるノードから確率に従ってノードを抽出し、これらのノードに対して4.の作業を実行し、その道路延長が $L_C$ の $\pm 10\%$ に収まっている場合、この経路を階層Cの道路とする。
- 階層が決定していない道路を階層Dとする。

階層を増やしたい場合は階層Cのノード集合に対して手順5の作業を行うとよい。各階層の道路延長 $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$ 及び階層Aにおける下位階層との接続点の間隔 $d$ が入力パラメータとなる。ドイツの階層型ネットワーク計画指針 RIN<sup>1)</sup>などによれば、階層間の接続は上下二つ目の階層までが一般的としてあるため、階層Aには階層Bのみが接続可能、階層B, C, Dは互いに接続可能とする。この手順によって階層化された道路網の1つを図-2に示す。手順1において各象限からランダムに4点を選択することにより階層Aが環状道路となるような工夫(図-3)も可能である。

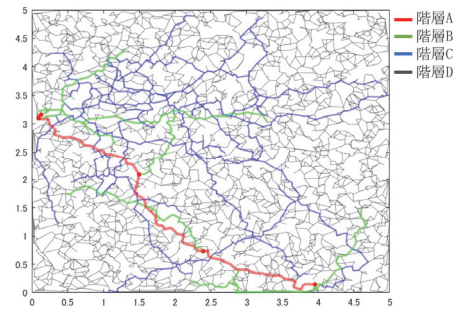


図-2 階層化した道路網 (赤点:階層AとBの接続点)

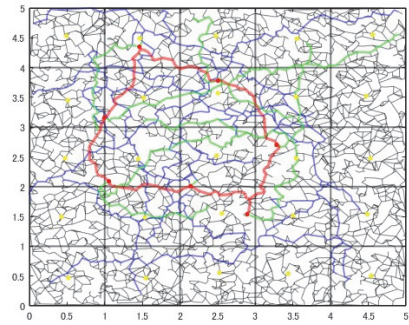


図-3 メッシュ分割した道路網 (黄点:拠点ノード)

表-5 各パターンへの入力データ

パターン	1	2	3	4	5
Aの割合	0.0180	0.0180	0.0360	0.0180	0.0180
Bの割合	0.0400	0.0400	0.0400	0.0800	0.0400
Cの割合	0.100	0.100	0.100	0.100	0.200
Dの割合	0.842	0.842	0.824	0.802	0.742
Aの形状	一本道	環状	環状	環状	環状

### (2) 性能の検証方法

拠点間の最短旅行時間を用いて階層化した一般的道路網の性能を検証する。構築した道路網を図-3に示すように25個のメッシュに分割し、各メッシュの重心に最も近いノードを拠点とする。設置された25個の拠点に対して、全拠点間の最小旅行時間を求め、パーセンタイル、度数分布多角形の観点から構築した階層型一般化道路網の性能を評価した。

道路総延長に対する各階層の道路延長割合、階層Aの形状を変化させた5つの道路網パターン(表-5)において性能検証を行う。接続点の間隔 $d$ は首都高速道路の平均インター間<sup>2)</sup>である1.8kmを採用した。パターン1および2の道路総延長あたりの割合は公共財団法人特別区協議会のデータ集<sup>3)</sup>を参考に設定し、パターン3からパターン5は各階層の割合を2倍にした。階層化手順はランダム性を有するため、各パターンにおいて道路網を50個作成し、全50個の道路網における各25拠点間旅行時間を分析対象結果とした。各階層における旅行速度は階層AからDまでそれぞれ80, 60, 40, 20km/hとする。また、通常では階層間の乗り換え箇所には交差点やイン

ターチェンジなどが存在しており時間抵抗が発生する。本研究では後藤・中村<sup>19)</sup>を参考にし、拠点間旅行時間 $T$ を求める際に式(13)の第 2 項のように、旅行速度 $v_{now}$ の現在の階層から旅行速度 $v_{next}$ の次の階層に乗り換える際の時間抵抗を階層間の旅行速度差で表す。ここで $t_R$ は乗換抵抗の度合いを表すパラメータで本研究では  $4.17 \times 10^4$  (h) としている。また、トリップが使用する階層数を $k$ 、階層 $i$ における旅行速度を $v_i$ 、走行距離を $x_i$ 、階層間乗換回数を $l$ とする。

$$T = \sum_{i=1}^k \frac{x_i}{v_i} + \sum_{i=1}^l \{t_R \cdot |v_{now} - v_{next}|\} \quad (13)$$

### (3) 検証結果

#### a) パーセンタイル

表-6 は各パターン の 25, 50, 75 パーセンタイルを示す。いずれもパターン 5 が最も優れていることがわかる。パターン 1 とパターン 2 の結果より、階層 A の道路延長割合は変化せず形状のみ一本道から環状にした結果、50 パーセンタイルと 75 パーセンタイルでは差がなかったが、25 パーセンタイルでは 0.0008 小さくなっており若干の差がみられた。同様に階層 B の割合が大きいパターン 4 と階層 C の割合が大きいパターン 5 を比較すると、25 パーセンタイルにおいて差が最も大きい。パターン 2 とパターン 3 の結果より、階層 A の道路延長割合を増加させると 50 パーセンタイルと 75 パーセンタイルは減少するが、25 パーセンタイルは増加することが分かった。

#### b) 度数分布多角形

図-4 は各パターンの度数分布多角形をまとめたもので、表-7 に各パターンの最頻値を示す。階級の幅は 0.02 とした。度数分布多角形において小さい階級値における度数が大きく、大きい階級値における度数が小さいほど、拠点間旅行時間が短いトリップが多く、長いトリップが少ないことを表すため性能が良いといえる。最頻値に着目すると、パターン 4 とパターン 5 が 0.11 で他のパターンの 0.13 よりも小さくなっていった。パターン 1 とパターン 2 の結果より、階層 A の道路延長割合を変化させず形状のみを一本道から環状に変化させると、階級値が 0.07 までは度数が増加し階級値が 0.27 以上ではすべての度数が減少したため、性能が向上したといえる。また、パターン 2 とパターン 3 の結果より、階層 A の道路延長割合が増加すると、度数は階級値が 0.21~0.25 の区間で大きく減少し 0.09~0.13 の区間で大きく増加したため、長距離間の移動の時間短縮が出来ていることが推測され性能が向上したといえる。階層 B の割合が大きいパターン 4 と階層 C の割合が大きいパターン 5 を比較すると、階級値が 0.09 以上では 0.17 を除くすべての階級値においてパターン 5 が小さい。このことからパターン 5 の方がより性能が高いことが明らかである。

表-6 各パターンのパーセンタイル

パーセンタイル	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5
25	0.0925	0.0917	0.0920	0.0861	0.0830
50	0.129	0.129	0.126	0.118	0.116
75	0.166	0.166	0.161	0.152	0.151

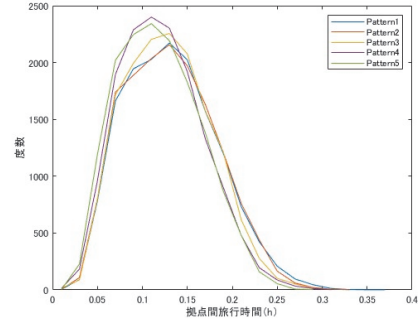


図-4 各パターンの度数分布多角形

表-7 各パターンの最頻値

	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5
最頻値	0.13	0.13	0.13	0.11	0.11

### (4) 性能評価と考察

2 つの観点から得られた結果を分析したところ、パターン 5, 4, 3, 2, 1 の順に性能が良いことが分かった。このことから本研究で構築した一般的道路網においても確認できた性能が 2 つある。

1 つ目は、階層 A の形状を一本道から環状にすることによって性能が向上した点である。ただし、大幅な性能の向上は見られなかった。その原因として、道路延長を変化させずに形状だけを変化しても大きな環状道路網が生成されるわけではないことや、本研究のエリア面積が 5 km×5 km と小さいことなどが考えられる。面積を広げることによって長距離移動の時間に大きな差が出ることが推測される。度数分布多角形とパーセンタイルの結果から、階層 A の形状を環状のまま変化させず割合だけを増加させた場合、結果から旅行距離の長い拠点間時間は改善することができるが、旅行距離の短い拠点間時間の改善はあまり見込めないことが分かった。このことから階層 A の形状に何かしらの工夫が必要である。

2 つ目は階層 D の割合が小さいほど性能が向上する点である。この根拠として、パターン 5 から 4, 3, 2 と続く順位は階層 D の道路延長割合の小ささと一致している。しかし、階層 B と階層 C の道路延長割合の変化が性能に影響していないとは考えにくいので、階層 B と階層 C それぞれにおいて道路長割合の増加が及ぼした影響について考える。まず階層 C の道路延長割合が大きいと、階層 C の道路が中心部に集中せずエリアの隅々まで張り巡らされるため、外延部の隣接メッシュ間の旅行時間が大きく改善されて全体的に性能が向上した。次に階層 B の

割合が大きいパターン 4 は階層 C の割合が大きいパターン 5 と比べ、道路延長割合が階層 C は 10% 小さく階層 D は 6% 大きい。それにも関わらず 50 パーセンタイル、75 パーセンタイルでは同等の性能を示している。このことから複数の階層の乗換が必要となる長距離間の移動には階層 B の道路延長割合が大きな影響を持つといえる。

## 7. おわりに

以下に本研究の具体的な成果と今後の展望を述べる。

- 1) ネットワーク分析における指標を用いることによって都市道路網の構造を定量化することができた。また、その値に基づいてクラスタリングを行うことにより、141 の実都市道路網を 1. 回路性アクセス性に優れている密な道路網、2. 回路性アクセス性が劣っている疎な道路網、3. 疎ではあるが中心性が高い道路網、4. ノードの密度が大きいアクセス性が優れていない道路網の 4 つのクラスターに分類できた。
- 2) ノード数とリンク数の最適化による疎な道路網の再現性が低く、既往研究で提案された道路網生成モデルでは行き止まり道路が多い道路網の生成が難しいことが分かった。一般的道路網生成におけるリンクの選択段階において、ドロネー三角形からではなく相対近傍グラフやガブリエルグラフからリンクを選択することによって再現性が向上すると考える。
- 3) 道路網の階層化手法を提案し、拠点間旅行時間による性能検証を行った結果、階層 A の形状を環状とすること、階層 D の道路延長割合を小さくすることが道路網の性能が向上に繋がることを確認できた。

今後の課題点及び展望について以下に示す。

- 1) 都市道路網分析において本研究の道路網データの取得方法では海沿いの都市など地理的要因が大きな都市の取得は難しいため、道路網データ取得方法はさらなる工夫が必要である。

- 2) 構築された道路網生成手法は今後の研究における学習データセットの収集やネットワークモデルによる解析等に寄与できるだろう。
- 3) 階層ランクの記載がある実道路網データを用いて、構築した一般的階層型道路網の再現性を検証する必要がある。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 (22K14341) の助成を受けて遂行された。ここで記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Barabasi, A., Albert, R : Emergence of scaling in random networks Science, No. 286, pp. 509-512, 1999.
- 2) Watts D.J., Strogatz S.H : Collective dynamics of 'small-world' networks : Nature, No. 393, pp. 440-442, 1998.
- 3) Erdős, P., Rényi, A : On random graphs, 1. Publicationes Mathematicae (Debrecen), 6:290-297, 1959.
- 4) 渡部大輔 : 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析, 日本都市計画学会都市計画論文集, No. 40-3, pp. 133-138, 2005.
- 5) Liu, Z., Zhao, S : Characteristics of road network forms in historic districts of Japan, Frontiers of Architectural Research, No. 4, pp. 296-307, 2015.
- 6) 腰塚武志 : 移動からみた放射状と格子状ネットワークの比較, 第 34 回日本都市計画学会学術研究論文集, pp. 763-768, 1999.
- 7) O'Hare S., J., Connors, R., Watling, D : Using Ensemble Analysis to study effects of Network Topology on Performance in Urban Road Networks, Physics and Society, 2020.
- 8) Xie, F., Levinson, D : Measuring the Structure of Road Networks, Geographical Analysis, No. 39, pp. 336-356, 2007.
- 9) Barthélemy, M : Spatial Networks, Physics Reports, No. 499, pp. 1-101, 2011.
- 10) Geem, Z. W., Kim J.H., Logannathan, G, V : A new heuristic optimization algorithm: harmony search, Simulation, No. 76, pp. 60-68, 2001.
- 11) Forschungsgesellschaft für Straßen -und Verkehrswesen (FGSV) : Richtlinien für integrierte Netzgestaltung RIN, 2008.
- 12) 首都高速道路株式会社データ集 : <https://www.shutoko.co.jp/company/database/route/> (2023 年 2 月 1 日アクセス)
- 13) 公益財団法人特別区協議会 : 第 41 回特別区の統計 2021 年版
- 14) 後藤梓, 中村英樹 ; 階層型ネットワーク計画における道路間隔と目標旅行速度の設定方法, 交通工学論文集, 第 1 巻, 第 2 号 (特集号 A) , pp. A\_107-A\_115, 2015

(Received March 6, 2023)

## PROPOSAL FOR A GENERAL ROAD NETWORK GENERATION METHOD BASED ON THE STRUCTURE INDEX OF URBAN ROAD NETWORKS

Taichi TANAKA, Hiroe ANDO, and Ryuji KAKIMOTO