

移動コストを考慮した街路ネットワークの媒介中心性分析

Between Centrality Analysis of Street Networks Considering Travel Costs

○北本英里子^{*1}, 山田悟史^{*2}, 宗本晋作^{*3}, 及川清昭^{*4}
Eriko KITAMOTO^{*1}, Satoshi YAMADA^{*2}, Shinsaku MUNEMOTO^{*3}, and Kiyooki OIKAWA^{*4}

- *1 立命館大学 理工学研究科 環境都市専攻 博士後期課程
Doctoral program, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.
*2 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科 任期制講師・博士(工学)
Lecturer, Dept. of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan Univ., Dr.Eng.
*3 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科 教授・博士(工学)
Prof., Dept. of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan Univ., Dr.Eng.
*4 立命館大学 理工学部 特命教授・工博
Prof., Dept., Ritsumeikan Univ., Dr.Eng.

This study focuses on the importance of the street, and develops and verifies a new method to grasp the structure of the street network quantitatively. In basic street network analysis, the street network is replaced with links and nodes, and the connection of the street is grasped quantitatively based on graph theory. Especially in urban analysis, between centrality is used, which is also used in this study. The distance and inclination of the route greatly affect the movement, but the topographical information is ignored in the previous evaluation method. Therefore, we propose a new evaluation method that incorporates geographical information such as distance and slope. Specifically, link number between centrality, distance between centrality, Incline between centrality, metabolic between centrality. Then, a simple 3D model is created, and the usefulness of the existing street evaluation method and the proposed evaluation method is verified. In addition, it applies to Kobe city and tries adaptation to a city. As a result, it is clarified that the method considering distance and inclination can obtain superior information. It also revealed that different pathways are selected for distance-between centrality and metabolic-between centrality.

キーワード: グラフ理論; 媒介中心性; 街路ネットワーク; 実距離; 傾斜角; 代謝的換算距離

Keywords: Graph Theory; Between Centrality; Road Network; Actual Distance; Inclination Angle; Metabolic Conversion Distance

1. はじめに

街路ネットワークの定量的評価は、交差点に接続する街路数や2地点間を移動する際の最短経路の発見など、様々な活用されるが、歩行者を想定して行う場合には、距離と高低差を加味する必要がある。人が出発地点から目的地に移動する際に、距離と高低差の移動コストを少なくなるように経路を選択する傾向を無視することはできない。このような生理科学的負荷という観点は、本研究が対象とする海から山に至る範囲に市街地を持つ神戸市のような傾斜の多い地域において、歩行を想定した観光計画や避難計画を立案する際には特に有用となる。

街路をネットワークとして捉え、街路ネットワークを構成する街路毎の重要度を示す代表的な解析方法に、中心性指標^{注1)}やSpaceSyntax理論^{注2)}と呼ばれる方法がある。中でも経路の重要性を示すには、媒介中心性という

概念が有効である。これは、物理的に存在するネットワークのみ対象とする解析方法ではないが、街路をノードとリンクに置き換え街路ネットワークを作成し、ネットワークの特徴を幾何学的に捉えるもので、既往研究としては以下がある。

太田¹⁾は、中心性を指標とし、街路に隣接する建物の延床面積に応じて人数を算出した値を街路の重みとして、媒介中心性を算出した手法を提案している。また福山ら²⁾は、コミュニティ指標^{注3)}と媒介中心性指標^{注4)}を用い、都市の形成過程を定量的に把握している。SpaceSyntax理論に関する研究として、劉ら³⁾は、アクシャル分析^{注2)}を用いて重伝建地区を対象とし、解析範囲を増やしながら地区内および周辺の街路の接続性^{注2)}を明らかにしている。また永田ら⁴⁾は、アクシャル分析に加えてセグメント分析^{注2)}も対象として、入力データにシェープファイ

ル形式を用いたシステムを開発している。これらの研究は、平坦な2次元の街路ネットワークを用いており、地形に合わせた勾配を持つ3次元街路ネットワークを用いたものはない。一方、3次元街路ネットワークを用いた研究としては、渡辺ら⁵⁾や溝口ら⁶⁾の研究が挙げられる。勾配のある経路の移動に対する影響を、アンケート調査と最短経路の差によってモデルを構築し、勾配や階段による抵抗感を定量的に把握しているが、勾配に対する心理的な負荷を把握するにとどまり、中心性を扱うものも、生理科学的な負荷の観点から街路の選択を提示するものもない。

以上のように、生理科学的見地から歩行者の経路選択をモデル化し、街区の中心性を捉える手法はない。本研究の特徴は、街区ネットワークに3次元グラフ理論を取り入れてモデル化し、ノード間を移動する際の生理科学的負荷が最小となる経路を抽出することにある。これにより、地形に合わせた都市の媒介中心性を把握する独自の手法を提示する。提示する手法の既往のSpaceSyntax理論における街路ネットワーク^{注2)}との相違点は、街路をリンク、街路の端点をノードとし3次元で作成することである。なお媒介中心性の定義は既往のSpaceSyntax理論と同様に、任意のノード群間を移動する際に任意に設定した移動コストが最小となる経路を抽出した際に、あるノードが何回通過されるかを示した値であり、移動時の利用されやすさ、拠点としての媒介中心性の度合いを示す指標となる。

このような手法は傾斜地に立地する地域において有用である。傾斜の多い地域の例には、本研究が対象とする神戸市が挙げられる。神戸市については傾斜地に立地するという特性について栗山ら⁷⁾が景観面から研究している。具体的には眺望景観を対象に、「神戸らしい」景観を把握し景観を阻害している構成要素の把握をしている。筆者ら⁸⁾も神戸市を対象として景観認知の関連から観光に資する認知領域とその構成を明らかにした。しかし本研究が目的とする街路ネットワークの傾斜に着目した研究は見当たらない。そこで神戸市のような、傾斜を有する海から山までに広がる都市において特に有用であると考え、神戸市を例に解析手法を提案する。

2. 研究の目的と方法

本研究は、街路の重要度を距離と傾斜に基づいて移動コストを生理科学的に算出するために3次元グラフ理論を取り入れた媒介中心性の指標を提示することを目的とする。

方法としては、まず単純な街路ネットワークを用いて傾斜の多い街路ネットワークにおいて、既往の2次元グラフに基づく媒介中心性と本研究が提示する3次元グラフの媒介中心性の違いを示し、3次元グラフを用いるこ

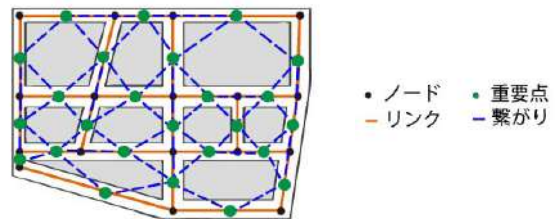


図1 グラフの作成方法



図2 カーブの作成方法

との有効性を明かにする。次に生理科学的負荷を提案し、距離と勾配を同時に評価する手法を提案し検証する。最後に神戸市の実際の街路ネットワークを用いて得られた知見を提示する。そのために、街路からグラフを作成したものを街路ネットワークと称し、以下に提案する4種類の指標から街路の重要度を評価する。なお、本稿では先行研究¹¹⁾¹²⁾に再分析、加筆をしたものである。

2.1. 街路ネットワークの作成

街路の交差点や折れ曲がり点をノードとし、ノードを繋ぐ街路をリンクとする(図1)。カーブの作成では、極地点と変曲点を補間点としてノードを作成する(図2)。モデリングソフトの3ds Max 2017で、街路1本ごとに隣接する街路(リンク)の端点(ノード)が重なるように作成する。作成した3次元の街路モデルをOBJファイルに書き出し、ノードのXYZ座標データを取得する。座標データから街路毎の距離と勾配(図3)を算出する。

2.2. 分析に用いる媒介中心性指標の提案

一般的な媒介中心性では、リンクの重みが等しいと仮定して値が算出方法される。しかし、これは都市の形状を無視していると考えられる。そこで、リンクの重みに街路移動に応じた値を与え、都市の形状を加味した評価手法を提案する。また、通常媒介中心性では、任意のリンクの通過回数を全最短経路数で除した値であるが、本研究ではリンクの通過回数を媒介中心性の値とする。そしてこれらを踏まえ、次章で簡易なモデルで検証する。

2.2.1. リンク数媒介中心性

任意の始点と終点において通過するリンク数が最小である経路を最短経路とし、全ての最短経路において任意のリンクを通過する回数を数える。最短経路が複数ある場合は経路を選択する確率等しいと仮定し、通過数が多いほど重要な街路とする。つまり、算出値が大きいほど

重要度が高いと評価する。

$$C_i = \sum_{j=k} \frac{N_{jk}(i)}{N_{jk}} \quad \begin{array}{l} N_{jk}(i): jからkの間でiを通る最小リンク数の経路数 \\ N_{jk}: jからkの最小リンク数の経路数 \end{array} \quad (式1)$$

2.2.2. 距離媒介中心性

街路の距離を加味した評価指標を提案する。ここでは任意の始点と終点において総距離が最小である経路を最短経路とし、全ての最短経路において任意のリンクを通過する回数を数える。ここでは、コストに各街路の実距離^{注5)}を与え、経路選択では距離が短いほうが選択される。

$$C_i = \sum_{j=k} \frac{D_{jk}(i)}{D_{jk}} \quad \begin{array}{l} D_{jk}(i): jからkの間でiを通る最小距離の経路数 \\ D_{jk}: jからkの最小距離の経路数, 選択経路の総距離 \\ \text{が異なる場合, } D_{jk} = 1 \end{array} \quad (式2)$$

2.2.3. 傾斜媒介中心性

街路の勾配を加味した評価指標を提案する。ここでは任意の始点と終点において総傾斜角が最小である経路を最短経路とし、全ての最短経路において任意のリンクを通過する回数を数える。ここでは、コストに各街路の傾斜角の絶対値を与え、経路選択では傾斜が小さいほうが選択される。

$$C_i = \sum_{j=k} \frac{A_{jk}(i)}{A_{jk}} \quad \begin{array}{l} A_{jk}(i): jからkの間でiを通る最小傾斜角の経路数 \\ A_{jk}: jからkの最小傾斜角の経路数, 選択経路の総傾斜 \\ \text{が異なる場合, } A_{jk} = 1 \end{array} \quad (式3)$$

2.2.4. 代謝媒介中心性

街路の距離と勾配を加味した評価指標を提案する。ここでは任意の始点と終点において総代謝的換算距離^{注6)}が最小である経路を最短経路とし、全ての最短経路において任意のリンクを通過する回数を数える。ここでは、コストに各街路の代謝的換算距離を与え、経路選択では代謝的換算距離が小さいほうが選択される。

$$C_i = \sum_{j=k} \frac{E_{jk}(i)}{E_{jk}} \quad \begin{array}{l} E_{jk}(i): jからkの間でiを通る最小エネルギー代謝の経路数 \\ E_{jk}: jからkの最小エネルギー代謝の経路数 \\ \text{選択経路の総エネルギー代謝が異なる場合, } E_{jk} = 1 \end{array} \quad (式4)$$

3. 単純モデルによる検証

傾き 30° の面に、直角碁盤目 (図3), 斜め碁盤目 (図4), 直交斜め (図5), 直交蛇行 (図6), および起伏を有する土地を想定したモデル (図7) の5種類の3次元モデルを作成し、それぞれの式を検証する。

直角碁盤目モデル (図3) は、ノード数媒介中心性、距離媒介中心性および代謝媒介中心性では中央のリンク (6-5, 9-10, 6-9, 5-10) の値が高く、同じ結果となった。一方、傾斜媒介中心性では水平方向のリンク (6-5, 9-10) の値が高くなった。

斜め碁盤目モデル (図4) は、ノード数媒介中心性では中央のリンク (6-5, 9-10, 6-9, 5-10) の値が高く、距離媒介中心性では最短のリンク (8-9) の値が高く、傾斜媒介中心性では水平方向のリンク (6-5, 9-10) の値が高く

なった。一方で、代謝媒介中心性では中央の傾斜方向のリンク (6-9, 5-10) が一番高く、次にリンク (1-6, 2-5, 9-14, 10-13) の値が高くなった。

直交斜めモデル (図5) では、斜め碁盤目モデル同様、ノード数媒介中心性では中央のリンク (6-5, 9-10, 6-9, 5-10) の値が高く、距離媒介中心性では最短のリンク (8-9) の値が高く、傾斜媒介中心性では水平方向のリンク (6-5, 9-10, 14-13) の値が高くなった。一方で、代謝媒介中心性では中央の傾斜方向のリンク (5-10) の値が一番高く、次にリンク (2-5, 10-15) の値が高くなった。

直交蛇行モデル (図6) では、ノード数媒介中心性と距離媒介中心性では中央の傾斜方向のリンク (7-12) の値が高くなった。一方で、傾斜媒介中心性では水平方向のリンク (6-7, 11-12) の値が高く、代謝媒介中心性では中央の傾斜方向のリンク (6-9, 9-11) の値が一番高くなった。

起伏モデル (図7) では、図の赤の範囲に示すとおり、ノード数媒介中心性はモデルの中央部分の値が高く、距離媒介中心性では起伏の上の部分の値が高く、傾斜媒介中心性では平坦でノードの数が多い部分の値が高くなった。一方で、代謝媒介中心性では、起伏の周辺の値が高くなり、傾斜を迂回する傾向にある。

以上より、リンク数媒介中心性ではモデルの中心、距離媒介中心性では短いリンク、傾斜媒介中心性では横方向のリンクの値が高くなる傾向がある。その一方で、代謝媒介中心性では、直角に交差しているリンクに対して、斜めに傾いているリンクのほうの値が高くなる傾向がある。つまり、距離や傾斜それぞれの単一の指標ではなく、両者の指標の指標が加味されている結果である。また、街路が複雑になるほど、4つの指標の結果が異なる。

4. 都市への適用

3次元の地図データ^{注7)}をもとに街路ネットワークを作成し、距離と代謝を加味した経路を検討する。次に、3章で提示した媒介中心性を算出し可視化する。

4.1. データの作成

2.1. をもとに神戸市中央区の約 3.3km × 2.6km の範囲を対象として、歩行可能な街路ネットワークを作成した (図8)。

結果、ノード数が 2,881 点、リンク数が 4,073 本である。距離の最小値は 2.848m、最大値は 666.710m、平均値は 45.900m、標準偏差は 35.058m である。傾斜の最小値は 0%、最大値は 157.353%、平均値は 4.438%、標準偏差は 7.956% である。

4.2. ルートの検出

本章では、観光地間のルートについて、最短距離と最小代謝換算距離を用いて経路を可視化し、比較して考察を述べる。

4.2.1. 三ノ宮駅から北野異人館へのルート

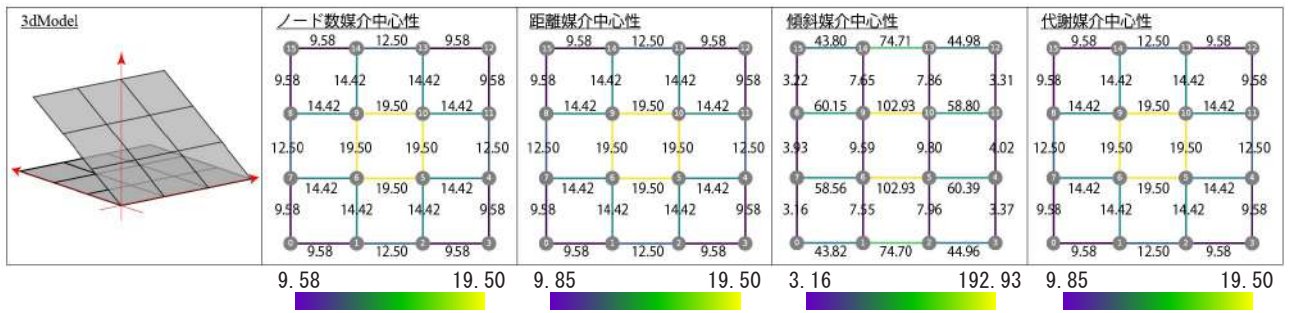


図3 直交基盤目モデル

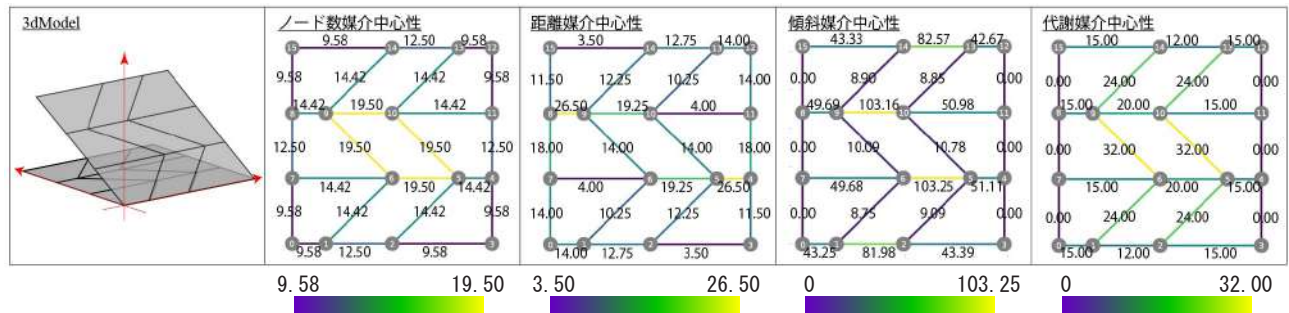


図4 斜め基盤目モデル

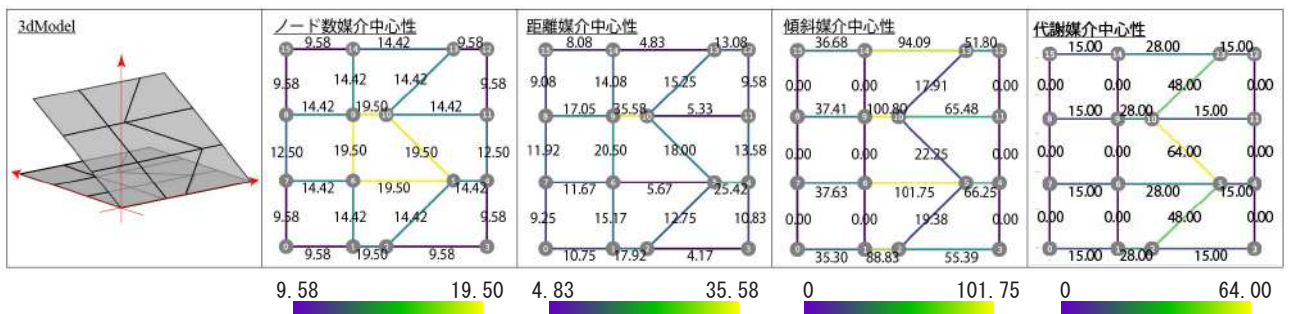


図5 直交斜めモデル

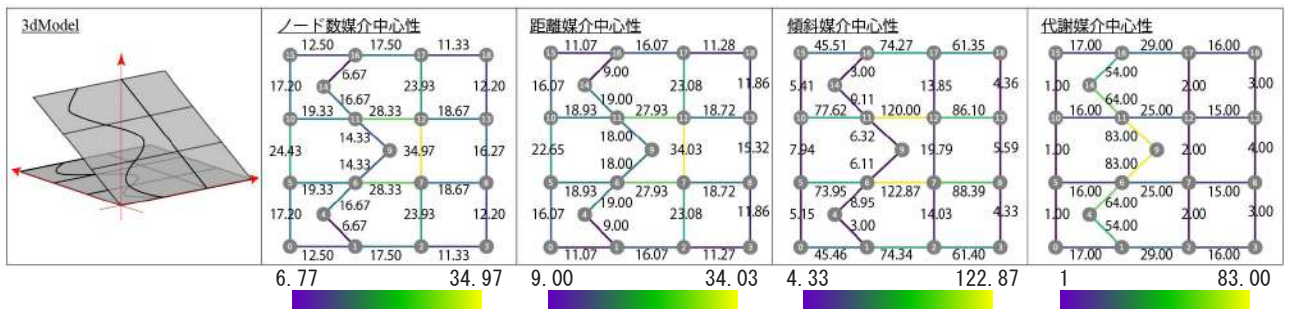


図6 直交蛇行モデル

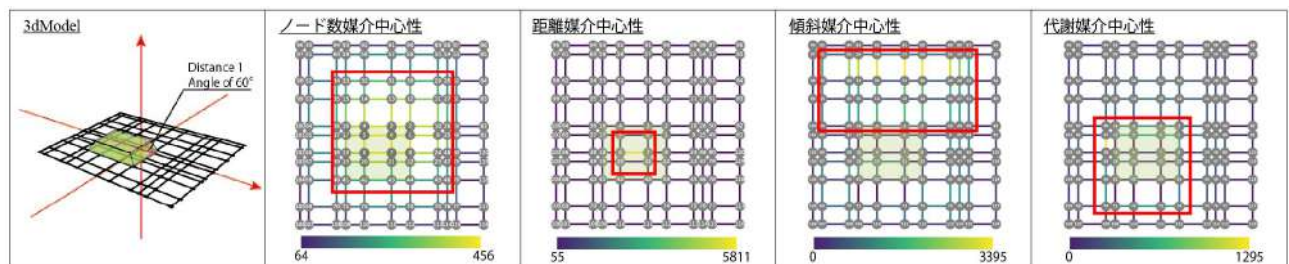


図7 起伏モデル

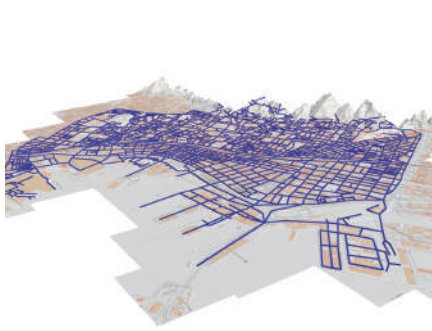


図8 街路データ

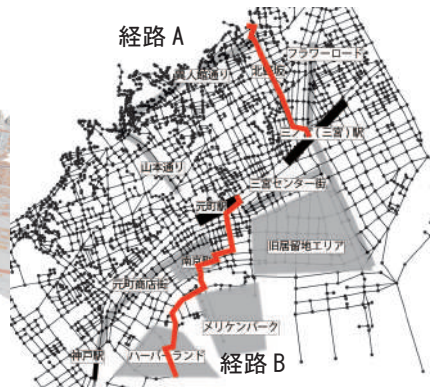


図9 最短距離の経路抽出



図10 最小代謝的換算距離の経路抽出

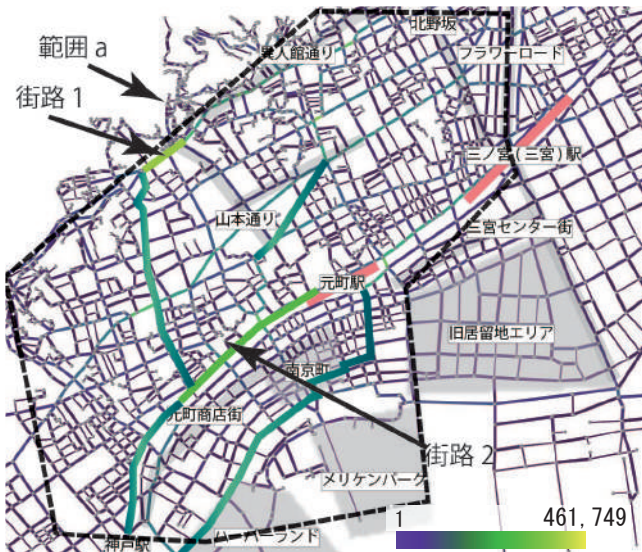


図11 距離媒介中心性の算出値の分布

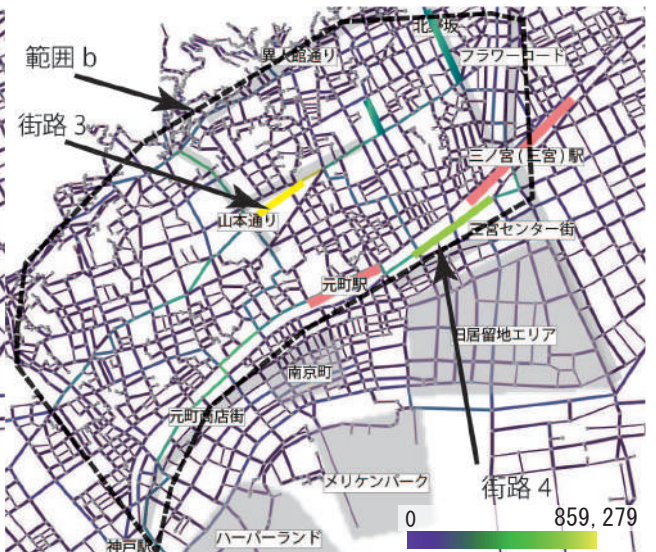


図12 代謝媒介中心性の算出値の分布

最短距離は図9の経路Aをたどり、総距離は960.482mであり、最小代謝的換算距離は図10の経路Cをたどり、総代謝的換算距離は85.000であった。最短距離・最小代謝的換算距離のどちらも北野坂を通るが、経路Cは一度、北野坂からフラワーロードに向かうのが特徴的であり、一度迂回してから目的地に向かっている。よって三宮駅-元町駅間の沿線の北側は、両者の違いが大きい。

4.2.1. 元町駅からハーバーランドへの経路

最短距離では図9の経路Bをたどり、1695.828mであり、最小代謝的換算距離では図10の経路Dをたどり、総代謝的換算距離は85.702であった。経路Bは南に下ってから海沿いを通るのに対し、経路Dは元町高架下の商店街の北側を西へ移動してからハーバーランドに向かっているのが特徴的であり、経路が大きく異なる。よって元町駅-神戸駅間の沿線の南側は、北側よりも影響が大きいと考えられる。

4.3. 媒介中心性の算出結果

距離媒介中心性の結果を図12に示す。凡例に示す通り街路の色が紫色が値が小さく、緑色が中間値、黄色が値が大きくなる。なお、街路の太さは幅員ではなく、特に

値が低い街路を示している。街路が選択された回数の最小値は1、最大値は461,749、平均値は30,804、標準偏差が57685.87回であった。値の高い街路はフラワーロードより西側全体(範囲a)に分布している。山側に東西方向に通っている異人館通りの値が一番高く(街路1)、次に元町駅-神戸駅間の沿線の北側の街路(街路2)の値が高くなった。

代謝媒介中心性の結果を図12に示す。なお図11と同様に凡例の色が値の高低を示すが、同じ色でも図12と値が異なる。街路の選択数は最小値が0回、最大値が859,279回、平均値が30,500回、標準偏差が72540.96回であった。値の高いリンクは山本通り周辺を中心に敷地の中心部(範囲b)に位置している。特に三宮駅から元町駅と異人館通りとの間の東西方向の通り(街路3)の値が一番高く、次に三宮駅-元町駅間の沿線の街路(街路4)の値が高くなった。また、標準偏差より代謝媒介中心性は算出値の分布が距離媒介中心性に比べてばらつきが大きい。両者の値を比較すると山本通と北野坂に違いがある。距離媒介中心性のほうが相対的に高いのは山本通であり、代謝媒介中心性のほうが相対的に高いのは北野坂である。

一方で、三宮駅-元町駅-神戸駅間の沿線から南側では代謝媒介中心性より距離媒介中心性のほうが相対的に値が高い街路が多く、東西に繋がりを持つ経路が選択されている傾向にあり、北側では、代謝媒介中心性の方が相対的に値が高い街路が多い。

さらに、4.2. のルート进行分析すると、図9の経路Aを図11に重ねると距離媒介中心性の値が高い街路と重複していないが、比較的、距離媒介中心性の値が高い街路に隣接している。経路Bは距離媒介中心性の値が高い街路が選択されておらず、周辺も値の低い街路に隣接している。一方で、図10の経路Cは比較的、代謝媒介中心性の値が高い街路と重複している。経路Dは最小代謝的換算距離は代謝媒介中心性の値が高い街路を選択し、指定した地点を行き来するのに理想的な経路と考えられる。

以上より、敷地全体で傾斜値を有し、街路の形状が複雑な都市で距離媒介中心性と代謝媒介中心性の結果が異なることが明らかとなった。

5. おわりに

本研究では、移動経路の地形条件を加味した評価手法を提案し、実際の敷地に適用し分析と考察を行った。また、応用方法についての提案をした。以下に、得られた知見をまとめる。

- 1) 媒介中心性指標において仮定の3次元モデル上で、距離、傾斜、代謝的換算距離を重みとして扱うことで違いがあることを明らかにした。
- 2) 実際の敷地に地形を加味した評価指標が希薄であり、神戸市中央区で適応した場合に傾斜を有する山側のエリアで代謝媒介中心性における有益な知見が得られた。

今後の展望として、回遊性を考慮した経路提案として重要スポットや街路の選定方法の確立、さらにより都市の形状や移動条件に対応した評価指標を提案し、経路選択における街路評価の知見を増やしていく。

[注釈]

- 1) ネットワークのノードの重要度を評価する指標である。評価値はネットワークの構造に寄与する。
- 2) SpaceSyntax 理論では街路をノード、その接続関係をリンクとして、空間の接続性を明らかにする指標である。空間を単位としたコンベックス分析、空間を見通すのに貫く直線を利用したアクシャル分析、そして、歩行における経路選択を考慮する場合は分岐点のない線分を利用したセグメント分析がある。これらは位相的接続性を明らかにすることができる⁹⁾。
- 3) ネットワーク内でリンク密度が相対的に高い部分を抽出したものである。ある特定の集団が街路を移動する時に連結の強い範囲を動く確率が高く、その行動範囲の重なりが大きい範囲が、コミュニティが高い。広場に接続する街路が多いほど、広場の値が高くなることを明らかにしている。
- 4) ネットワーク内の2地点間を移動する時の任意のリンクが最短経路上に位置する度合いである。分割された場所でブリッジの役割となる街路の端点の値が高くなることを明らかにしている。
- 5) 本稿で3次元距離を扱っている。
- 6) 代謝的換算距離¹⁰⁾とは坂道歩行時に消費する代謝エネルギー

を指標とした負荷である。エネルギー代謝率とは80m/minの歩行時の勾配ごとの代表的な値から求めた近似式である。代謝的換算距離では、エネルギー代謝率(式： $y=3.113e^x(4.614x)$ 、 x は坂の勾配率を代入)に実距離÷(80m/min)を乗じた値を利用する。ただし、移動方向を考慮に入れないため、上りと下りの平均値を用いる。しかし、小範囲では確認済みだが、広範囲の解析ではプログラム作成過程で、勾配の絶対値を採用した。

7) 国土地理院から提供されている「基盤地図情報(数値地形モデル)5mメッシュ(標高)」のVRMLファイルを使用した。

[参考文献]

- 1) 太田浩史：建物ノード付き街路のネットワークの研究，日本建築学会計画系論文集，第78巻，第686号，pp.883-889，2013. 4
- 2) 福山祥代，羽藤英二：街路ネットワーク分析による広場-街路構成の特性の把握-イタリア・スペイン旧市街の街路ネットワークを対象として，日本都市計画学会，都市計画論文集，No.45-3，pp.421-426，2010. 10
- 3) 劉澤，趙世晨：AxialMapを用いた伝統的建造物保存地区の空間位相的接続性の分析に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第80巻，第716号，pp.2283-2292，2015. 10
- 4) 永田暢彦，岸本達也：GISデータを用いたスペースシンタックスによる都市空間解析ソフトウェアの開発，日本建築学会技術報告集，第16巻，第34号，pp.1197-1200，2010. 10
- 5) 渡辺義則，角知憲，清田勝，秦裕二郎：自転車通勤する高校生を対象としての自転車利用者の経路選択モデルに関する基礎研究，土木学会論文集，No.618/IV-43，pp.27-37，1999. 4
- 6) 溝口秀勝，山川仁：斜面住宅地における勾配を考慮した徒歩移動に関する研究，日本都市計画学会学術研究発表会論文集，No.36，pp.841-846，2001
- 7) 栗山尚子，南野剛也，三輪康一，末包伸吾，安田丑作：斜面市街地における眺望喪失危険性による眺望対象の評価に関する研究-神戸市の眺望点における眺望景観の阻害要因の事例分析を通して-，日本建築学会計画系論文集，第74巻，第644号，pp.2207-2214，2009.10
- 8) 北本英里子，山田悟史，宗本晋作，大内宏友，及川清昭：神戸の震災による環境変化に対する地域住民の景観認知について，日本建築学会計画系論文集，第81巻，第720号，pp.357-367，2016.2
- 9) 及川清明：スペースシンタックス、『空間解析入門-都市を測る・都市がわかる-』朝倉書店，pp.137-139，2018年所収
- 10) 佐藤栄治，吉川徹，山田あすか：地形による負荷と年齢による身体能力の変化を勘定した歩行換算距離の検討-地形条件と高齢化を勘定した地域施設配置モデル その1-，日本建築学会技術報告集，第610号，pp.133-139，2006.12
- 11) 北本英里子，山田悟史，及川清昭：多次元グラフ理論による建築都市の定量把握，日本建築学会(東北)，学術講演梗概集，情報システム技術，pp.117-120，2018
- 12) 北本英里子，山田悟史，及川清昭：傾斜地に立地する都市の街路ネットワーク解析の提案，日本建築学会，第41回情報・システム・利用・技術シンポジウム，pp.290-293，2018