

時間経過の変化に基づく動的中心性の提案と応用

鈴木 優伽^{1,a)} 齊藤 和巳¹

概要: 近年、複雑ネットワークの分析手法が現実の空間ネットワークに適応されている。中でも、ネットワークの中心性指標は道路網などの空間ネットワークに広く適応されており、その有用性が示され、中心性指標の研究の重要性はますます高まっている。本研究では、その1つである媒介中心性に着目する。従来の媒介中心性は、ある最終状態のネットワークを仮定し媒介度を計算している静的な媒介度であるため、ある一定期間に有意に媒介されるノードと、常に一定数媒介されるノードが同じ媒介度となる場合もある。本研究では、従来指標では陽に表現されないノードの時間経過ごとの媒介特性を表現するために「動的媒介中心性」を提案する。評価実験では、提案媒介指標が従来指標と異なる観点でノードの媒介度を捉えられる事を示すと共に、異なる媒介傾向をもつノードの特性を分析する。

キーワード：道路ネットワーク、媒介中心性、OSM、避難路、複雑ネットワーク

Proposal of Dyynamic Centrality Based on Changes over Time Step and its Application

YUKA SUZUKI^{1,a)} KAZUMI SAITO¹

1. はじめに

ネットワーク内の関係性や相互関係を単純化し分析するために、ノードの重要度や影響度を定量化することは重要なタスクである。代表的な指標に次数中心性、近接中心性、媒介中心性などがあり [1]、Web 空間内のネットワーク分析に用いられている。近年では、交差点をノード、交差点間の経路をリンクとした道路ネットワークにも応用され、道路網の利便性や頑健性を高める重要ノードの特定や、ネットワークの特性分析などの研究が展開されている [2], [3], [4], [5]。中でも、媒介中心性を用いたアプローチが注目されており、最近の研究では、有澤らが災害発生時における頑健性向上を目的に、媒介中心性に基づく道路網の復旧順序特定方を提案した [6]。菅野らの研究では、災害発生時の避難行動において、混乱や将棋倒しが起こる可能性がある高リスク経路を、媒介中心性で特定し可視化することで、避難行動におけるリスク回避や削減の推進に寄与

できる事を示した [7]。また、福山 [8]、Porta [9] らの研究では、媒介中心性を用いることで Hillier らが提唱した [10] 空間解析手法とは異なる観点から道路網の特性を分析できるとした。

従来の媒介中心性は、あるノードが任意の2ノード間を最終的にどれだけ媒介したかを図る静的な中心性である。一方、[6][7]のような、災害発生時における道路網の復旧順序や密集経路の特定時には、ノードが他のノード間を「いつ」媒介したかが重要な指標となりうる。例えば、どの時間も一定の媒介度をもつノードより、特定の時間において非常に媒介度が高いノードの方が、より緊急性の高い密集地であると考えられる。また、ある時に有意に多くの他ノード間を媒介するノードと常に一定数媒介するノードの基本的性質は、異なる考えるのが自然である。

よって本研究では、時間経過における媒介傾向を考慮した中心性として、「動的媒介中心性」を提案する。具体的には、任意のノードペアを始点・終点として移動した際に、最短経路上の各ノードは何ステップ目で媒介されたのかを陽に考慮し、動的に媒介度を算出する。また、応用として

¹ 静岡県立大学

University of Shizuoka

^{a)} j16105@u-shizuoka-ken.ac.jp

人々の移動行動を取り入れた動的媒介中心性も定義し、提案指標の実用性の確立を目指す。

本研究の構成は以下である。2章では、動的媒介中心性について詳細に述べる。3章では、動的媒介中心性を効率的に計算するアルゴリズムについて説明する。4章では、実験設定の詳細な設定と、実験で得られた結果を示す。最後に、本研究のまとめと、今後の展望を述べる。

2. 動的媒介中心性

$G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ をグラフ構造とし、 $\mathcal{V} = \{v, w, x, y, \dots\}$ はノードの集合を、 $\mathcal{E} = \{e = (v, w), \dots\}$ はリンクの集合を表すとする。本実験で対象とする道路網では、ノード集合 \mathcal{V} は交差点の集合に、リンク集合 \mathcal{E} は交差点間の道の集合に対応する。

2.1 AP 型動的媒介中心性

AP (All-Pair) 型媒介中心性は既存の媒介中心性に対応し、ノード $v \in \mathcal{V}$ の AP 媒介度 $bc^{AP}(v)$ は、任意のノードペア間の最短パスのうち、ノード v を媒介するパスの割合として、次式で定義される。

$$bc^{AP}(v) = \sum_{x \in \mathcal{V} \setminus \{v\}} \sum_{y \in \mathcal{V} \setminus \{v, x\}} \frac{\sigma_{x,y}(v)}{\sigma_{x,y}}. \quad (1)$$

ここで、ノード間の距離はステップ数で定義され、 $\sigma_{x,y}$ はノード x, y 間の最短パス数を、 $\sigma_{x,y}(v)$ はノード v を通るノード x, y 間の最短パス数を表す。

次に、ノード v がノードペア間の最短パスを媒介するとして、何ステップ目に媒介するかを陽に考慮した AP 型動的媒介中心性を提案する。すなわち、ノード $v \in \mathcal{V}$ のステップ $s \in \{1, 2, \dots\}$ での動的 AP 媒介度 $bc^{AP}(v; s)$ を、任意のノードペア間の最短パスのうち、ノード v をステップ s で媒介するパスの割合として、次式で定義する。

$$bc^{AP}(v; s) = \sum_{x \in \mathcal{V} \setminus \{v\}} \sum_{y \in \mathcal{V} \setminus \{v, x\}} \frac{\sigma_{x,y}(v; s)}{\sigma_{x,y}}. \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{x,y}(v; s)$ はノード v をステップ s で通るノード x, y 間の最短パス数を表す。明らかに、AP 媒介度 $bc^{AP}(v)$ と動的 AP 媒介度 $bc^{AP}(v; s)$ に対して、以下の関係が成立する。

$$bc^{AP}(v) = \sum_s bc^{AP}(v; s). \quad (3)$$

すなわち、動的 AP 媒介度 $bc^{AP}(v; s)$ は AP 媒介度 $bc^{AP}(v)$ のステップ毎の分解であり、後者は最終状態に対する静的な中心性であるのに対し、前者はステップ数の計算プロセスを考慮した動的な中心性と考えられる。本稿では、ノード間の距離をステップ数で定義するが、道路網など空間ネットワークでは実距離を採用するケースでは、距離区間を導入して本枠組みを容易に拡張することができる。

2.2 OD 型動的媒介中心性

多数の移動主体（住民など）が起点から目的地（避難地など）に移動する基本行動モデルを定義する。いま、 \mathcal{D} を目的地の集合とし、便宜上、それぞれを最寄りのノード（交差点）に対応させ $\mathcal{D} \subset \mathcal{V}$ であるとする。同様に、移動主体の起点もノードに対応させ、ノード x が起点の主体数を $n(x)$ とし、最短ステップ数で到達可能な目的地の集合を $\mathcal{D}(x) \subset \mathcal{D}$ とする。このとき、OD (Origin-Destination) 型媒介中心性でのノード $v \in \mathcal{V}$ の OD 媒介度 $bc^{OD}(v)$ を、任意の起点から目的地への最短パスのうち、ノード v を媒介するパスの割合として、次式で定義する。

$$bc^{OD}(v) = \sum_{x \in \mathcal{V} \setminus (\mathcal{D} \cup \{v\})} \frac{n(x)}{|\mathcal{D}(x)|} \sum_{y \in \mathcal{D}(x)} \frac{\sigma_{x,y}(v)}{\sigma_{x,y}}. \quad (4)$$

ここで、 $|\mathcal{D}(x)|$ はノード x から最短パスで到達可能な目的地数を表し、これら目的地のどれが選択されるかは一様であると仮定する。

次に、AP 型動的媒介中心性と同様に、ノード v が起点から目的地への最短パスを媒介するとして、何ステップ目に媒介するかを陽に考慮した OD 型動的媒介中心性を提案する。すなわち、ノード $v \in \mathcal{V}$ のステップ $s \in \{1, 2, \dots\}$ での動的 OD 媒介度 $bc^{OD}(v; s)$ を、任意のノードペア間の最短パスのうち、ノード v をステップ s で媒介するパスの割合として、次式で定義する。

$$bc^{OD}(v; s) = \sum_{x \in \mathcal{V} \setminus (\mathcal{D} \cup \{v\})} \frac{n(x)}{|\mathcal{D}(x)|} \sum_{y \in \mathcal{D}(x)} \frac{\sigma_{x,y}(v; s)}{\sigma_{x,y}}. \quad (5)$$

明らかに、OD 媒介度 $bc^{OD}(v)$ と動的 OD 媒介度 $bc^{OD}(v; s)$ に対しても、以下の関係が成立する。

$$bc^{OD}(v) = \sum_s bc^{OD}(v; s). \quad (6)$$

すなわち、動的 OD 媒介度 $bc^{OD}(v; s)$ も OD 媒介度 $bc^{OD}(v)$ のステップ毎の分解であり、後者は主体の移動が完了した最終状態に対する中心性であるのに対し、前者は移動過程でのステップ数を考慮した動的な中心性と考えられる。具体的には、災害発生から住民が避難地に移動する基本行動モデルを想定すれば、動的 OD 媒介度 $bc^{OD}(v; s)$ が高いノード v とステップ s は、それぞれ渋滞が予想される交差点と時刻と解釈できる。

3. 動的媒介中心性の計算法

媒介中心性の計算式 (1) などの単純計算では、各ノード $v \in \mathcal{V}$ に対して、任意の起点ノード $x \in \mathcal{V}$ から終点ノード $y \in \mathcal{V}$ までのパスをどの程度媒介するかを求め、ナイーブには $O(|\mathcal{V}|^3)$ 程度の計算量が必要となるが、既に計算済みの子ノードの媒介度を利用することで、 $O(|\mathcal{V}| \times (|\mathcal{V}| + |\mathcal{E}|))$ の計算量で高速に計算するアルゴリズムが提案されている [11]。具体的には、起点ノード x を固

定し、各ノード v に対して、他の任意のノード y の媒介度 $bc_x(v)$ を求め、これらを次式のように全て加算することで、各ノード $v \in \mathcal{V}$ に対して、媒介度 $bc(v)$ を求める。

$$bc(v) = \sum_{x \in \mathcal{V} \setminus \{v\}} bc_x(v). \quad (7)$$

一方、起点ノード x を固定して、他の任意のノード y への最短パスを幅優先探索で求めれば、任意の y に対し、最短パス長 $d_x(y) \in \{1, 2, \dots\}$ 、最短パス数 $\sigma_x(y) = \sigma_{x,y}$ 、及び、幅優先探索で定まる子ノード集合 $\mathcal{C}_x(y) = \{z \mid (y, z) \in \mathcal{E}, d_x(z) = d_x(y) + 1\}$ が得られる。よって、各ノード $v \in \mathcal{V}$ に対して、 $bc_x(v) \leftarrow 0$ と初期化し、最短パス長 $d_x(v)$ でノードを降順にソートした順番で次式を適用すれば、各ノード v に対し媒介度 $bc_x(v)$ を求めることができる。

$$bc_x(v) = \sum_{w \in \mathcal{C}_x(v)} (1 + bc_x(w)) \frac{\sigma_x(v)}{\sigma_x(w)}. \quad (8)$$

したがって、各ノード $v \in \mathcal{V}$ に対して、任意の起点ノード $x \in \mathcal{V}$ で媒介度 $bc_x(v)$ を求める計算量は $O(|\mathcal{V}| \times |\mathcal{E}|)$ であり、これらを加算する計算量は $O(|\mathcal{V}| \times |\mathcal{V}|)$ となるので、全体の計算量は $O(|\mathcal{V}| \times (|\mathcal{V}| + |\mathcal{E}|))$ となる。

3.1 AP 型動的媒介中心性の計算法

既存の媒介中心性に対応する AP 型媒介中心性については、式 (7) と (8) をそのまま利用し、各ノード $v \in \mathcal{V}$ の AP 媒介度 $bc^{AP}(v)$ が求まる。一方、AP 型動的媒介中心性については、何ステップ目に媒介するかを陽に考慮して、式 (7) と (8) を拡張し、各ノード $v \in \mathcal{V}$ の動的 AP 媒介度 $bc^{AP}(v; s)$ を求める。すなわち、起点ノード x を固定し、各ノード v に対して、他の任意のノード y のステップ s での動的 AP 媒介度 $bc_x^{AP}(v; s)$ を求め、これらを次式のように全て加算することで、各ノード $v \in \mathcal{V}$ に対して、AP 型動的媒介度 $bc^{AP}(v; s)$ を求める。

$$bc^{AP}(v; s) = \sum_{x \in \mathcal{V} \setminus \{v\}} bc_x^{AP}(v; s). \quad (9)$$

また、AP 型動的媒介度 $bc_x^{AP}(v; s)$ については、各ノード $v \in \mathcal{V}$ とステップ s に対して、 $bc_x^{AP}(v; s) \leftarrow 0$ と初期化し、最短パス長 $d_x(v)$ でノードを降順にソートした順番で次式を適用すれば、各ノード v に対し AP 型動的媒介度 $bc_x^{AP}(v; s)$ を求めることができる。

$$bc_x^{AP}(v; d_x(v)) = \sum_{w \in \mathcal{C}_x(v)} (1 + bc_x^{AP}(v; d_x(w))) \frac{\sigma_x(v)}{\sigma_x(w)}. \quad (10)$$

ここで、 $d_x(v) + 1 = d_x(w)$ が成り立つ。式 (10) では、起点ノード x を固定すれば、各ノード v が他のノードを媒介するステップ $d_x(v)$ は一意に決まる性質を利用している。

3.2 OD 型動的媒介中心性の計算法

各ノード $v \in \mathcal{V}$ の OD 媒介度 $bc^{OD}(v)$ を式 (4) に基づき求める計算法を示す。ここでも、まず、式 (7) に示すように、起点ノード x を固定し、各ノード v に対して、他の任意のノード y の OD 媒介度 $bc_x^{OD}(v)$ を求めて加算し、OD 型媒介度 $bc_x^{OD}(v)$ を求める。いま、 $bc_x^{OD}(v)$ の計算法を示すため、各ノード v が目的地集合 \mathcal{D} に含まれるかどうかを表すインディケータ関数 $i(v)$ を導入する。すなわち、 $v \in \mathcal{D}$ ならば $i(v) = 1$ 、さもなければ $i(v) = 0$ とする。このとき、各ノード $v \in \mathcal{V}$ に対して、 $bc_x^{OD}(v) \leftarrow 0$ と初期化し、最短パス長 $d_x(v)$ でノードを降順にソートした順番で次式を適用すれば、各ノード v に対し媒介度 $bc_x^{OD}(v)$ を求めることができる。

$$bc_x^{OD}(v) = \sum_{w \in \mathcal{C}_x(v)} \left(\frac{i(w)n(x)}{|\mathcal{D}(x)|} + bc_x^{OD}(w) \right) \frac{\sigma_x(v)}{\sigma_x(w)}. \quad (11)$$

式 (11) では、ノード w が目的地に含まれなければ、その影響を無くすため $i(w)$ を導入している。

最後に、各ノード $v \in \mathcal{V}$ のステップ s での動的 OD 媒介度 $bc^{OD}(v; s)$ を式 (5) に基づき求める計算法を示す。ここでも、まず、式 (9) に示すように、起点ノード x を固定し、各ノード v に対して、他の任意のノード y の動的 OD 媒介度 $bc_x^{OD}(v; s)$ を求めて加算し、OD 型動的媒介度 $bc_x^{OD}(v; s)$ を求める。さらに、式 (10) に示すように、各ノード $v \in \mathcal{V}$ とステップ s に対して、 $bc_x^{OD}(v; s) \leftarrow 0$ と初期化し、最短パス長 $d_x(v)$ でノードを降順にソートした順番で次式を適用すれば、各ノード v に対し媒介度 $bc_x^{OD}(v; s)$ を求めることができる。

$$bc_x^{OD}(v; d_x(v)) = \sum_{w \in \mathcal{C}_x(v)} \left(\frac{i(w)n(x)}{|\mathcal{D}(x)|} + bc_x^{OD}(w; d_x(w)) \right) \frac{\sigma_x(v)}{\sigma_x(w)}. \quad (12)$$

式 (12) は、式 (10) と式 (11) の自然な融合となっている。

4. 評価実験

表 1 道路網データの概要

	ノード数	リンク数	避難地数	最大パス長
浜松	104,813	255,296	432	486
沼津	13,410	33,554	232	277
静岡	53,903	132,888	363	414

評価実験には、Open Street Map (OSM) データ [12] から所得した静岡県の浜松市、静岡市、及び、沼津市の道路網を用いる。各都市の道路網におけるノードの AP 型動的媒介中心性を計算し、AP 型動的媒介中心性の基本的性質について評価する。同時に、各都市のデータに避難地データを加えた道路データを用いて、OD 型動的媒介中心性を評価する。ただし本実験では、動的媒介中心性の基本的な

性能を確認したいため、 x が起点の主体数 $n(x)$ を1と設定する。以降では、AP型動的媒介中心性をAP型、OD型動的媒介中心性をOD型と略記する。表4には、実験で用いた各都市の道路網のノード数、リンク数、避難地数、及び、ノード間の最大パス長を示す。

4.1 有効ステップ数と従来指標との類似度

動的媒介中心性の基本特性を分析するため、まず、ステップ s に対し、AP型とBP型のそれぞれで、起点ノードと終点ノード間のステップ数の分布 $f^{AP}(s)$ と $f^{OD}(s)$ を以下で定義する。

$$f^{AP}(s) = |\{(x, y) \mid x \in \mathcal{V}, y \in \mathcal{V}, d(x, y) = s\}|, \quad (13)$$

$$f^{OD}(s) = |\{x \mid x \in \mathcal{V}, \exists y \in \mathcal{D}(x), d(x, y) = s\}|. \quad (14)$$

ここで、 $d(x, y)$ はノード x と y 間の最短ステップ数を表す。次に、 $*$ が $\{AP, OD\}$ とし、ステップ s に対し、AP型とBP型それぞれのステップ毎の全ノード媒介度の分布 $g^*(s)$ を以下で定義する。

$$g^*(s) = \sum_{v \in \mathcal{V}} bc^*(v; s). \quad (15)$$

また、ステップ s での動的媒介度 $bc^*(v; s)$ と最終的な媒介度 $bc^*(v)$ のそれぞれに対して、全ノードの値を並べて構成するベクトルを考え、それらのコサイン類似度 $h^*(s)$ を以下で定義する。

$$h^*(s) = \frac{\sum_{v \in \mathcal{V}} bc^*(v; s) \times bc^*(v)}{\sqrt{\sum_{v \in \mathcal{V}} bc^*(v; s)^2} \sqrt{\sum_{v \in \mathcal{V}} bc^*(v)^2}}. \quad (16)$$

図1と図2に、AP型とOD型のそれぞれで、浜松市、静岡市、及び、沼津市の各データに対し、(a)にはステップ数の分布 $f^*(s)$ を、(b)には媒介度の分布 $g^*(s)$ を、(c)にはコサイン類似度 $h^*(s)$ を示す。

図1(a)と図2(a)のステップ数の分布 f^* をから、AP型では100~200ステップ周辺まで値が単調増加し、それ以降で徐々に値が減少していることが分かる。OD型では50ステップ前後で値が減少し始め、AP型と比べると短いステップ数で値が減少し始めることが見て取れる。この理由として、OD型では目的地が設定されているため、ステップ数が比較的短くなりやすいことが挙げられる。

図1(b)と図2(b)の媒介度の分布 $g^*(s)$ をみると、AP型では、200ステップ前後で $g^{AP}(s)$ の値が0に漸近し始め、OD型では50ステップ前後で $g^{OD}(s)$ の値が0に漸近し始める事が分かる。これは、図1(a)と図2(a)のステップ数の分布と符合する自然な結果である。そのため以降では、AP型では200ステップ、OD型では50ステップを有効ステップ数とし、以降の実験結果を考察する。

図1(c)のコサイン類似度 $h^*(s)$ をみると、AP型では、50ステップ前後で従来媒介度との類似度 $h^{AP}(s)$ が高いことが分かる。また、初期ステップや最終ステップ周辺では

類似度が低いことから、それらステップで計算される動的媒介度は、最終的な媒介度と比較して、ある程度異なると言える。図2(c)をみると、OD型では、15ステップ前後で最も類似度 $h^{OD}(s)$ が高いことが分かる。またAP型の結果と同様、初期ステップや最終ステップ周辺は類似度が顕著に低いことが分かる。以上の結果から、各ステップでの媒介度は、従来の媒介度(最終的な媒介度)と、一般に異なることの実証結果が得られたと考えられる。さらに今回の結果では、従来指標での媒介度は提案指標での中盤周辺ステップの媒介度に類似することも確認できた。

4.2 動的媒介中心性の各ステップごとの類似度

図3と図4に、横軸と縦軸をそれぞれステップ数 s と t とし、ステップペアごとの動的媒介中心性値のコサイン類似度 $h_2^*(s, t)$ をヒートマップで可視化した結果を示す。ここでは、赤色ほど類似度が高く、青色ほど類似度が低くなるよう彩色し、コサイン類似度 $h_2^*(s, t)$ は以下で定義される。

$$h_2^*(s, t) = \frac{\sum_{v \in \mathcal{V}} bc^*(v; s) \times bc^*(v; t)}{\sqrt{\sum_{v \in \mathcal{V}} bc^*(v; s)^2} \sqrt{\sum_{v \in \mathcal{V}} bc^*(v; t)^2}}. \quad (17)$$

以降では便宜上、ステップ数を3つの段階に分けて、それらを初期ステップ、中盤ステップ、最終ステップと呼ぶ。図3から、同じ段階のステップでの類似度は高く、異なれば類似度が低いことが分かる。特に、沼津市データはその傾向が顕著である。図4をみると、上述の傾向がより顕著に現れている。すなわち、初期、中盤、最終とステップが進むにつれて、各ノードの媒介度が変化していることが視覚的にも確認できる。以上の結果から、各ノードの媒介度はステップ経過ごとに動的に変化することが確認され、提案指標はそのようなノードの媒介特性を自然に捉えられていると考えられる。

4.3 ステップごとのノード特性についての考察

4.2節の実験結果から、ステップ経過につれてノードが一般に異なる媒介度を持つことが確認できた。本節では、ステップごとに動的媒介中心性の高い上位1000ノードの集合を抽出し、それら抽出ノード集合の特徴付けを試みる。すなわち、初期、中盤、及び、最終ステップのそれぞれで媒介度が高いノードは、ネットワーク構造の観点で、どのような性質を有するのか分析する。

検証には、ネットワークの代表的な統計量である次数、クラスタ係数、近接中心性のZ-scoreを用いる。ノード $v \in \mathcal{V}$ の次数、クラスタ係数、近接中心性を $D(v)$ 、 $CC(v)$ 、 $CL(v)$ とする。また、全ノードでの平均を $\mu(D) = \sum_{v \in \mathcal{V}} D(v)/|\mathcal{V}|$ 、 $\mu(CC) = \sum_{v \in \mathcal{V}} CC(v)/|\mathcal{V}|$ 、 $\mu(CL) = \sum_{v \in \mathcal{V}} CL(v)/|\mathcal{V}|$ とし、標準偏差を $\sigma(D)$ 、 $\sigma(CC)$ 、 $\sigma(CL)$ とする。一方、各ステップでの動的媒介中心性上位1000ノードの集合を、それぞれ $\mathcal{V}^1, \mathcal{V}^2, \dots, \mathcal{V}^S$ とすれば、集合 \mathcal{V}^s での平

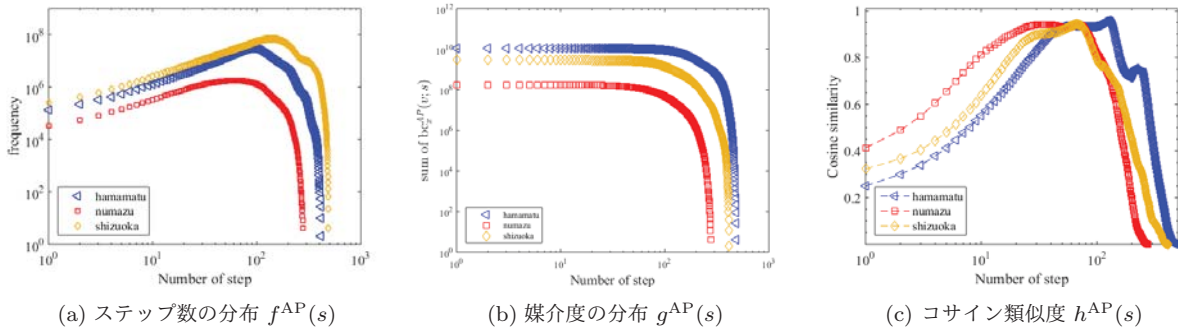


図 1 AP 型動的媒介中心性

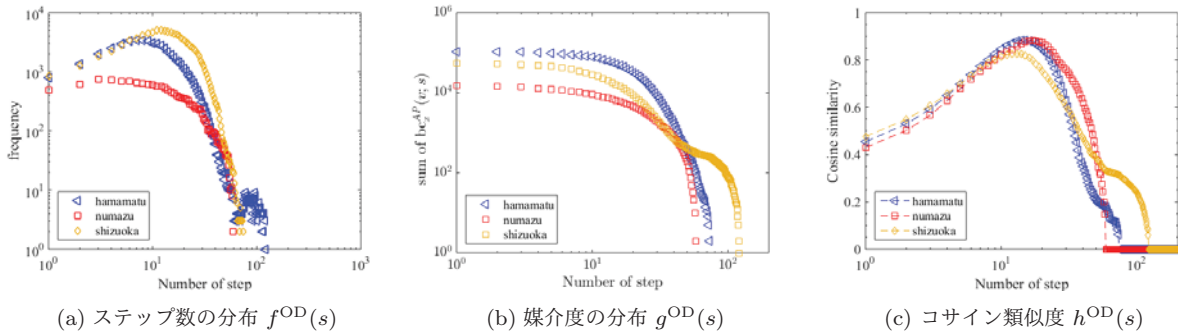


図 2 OD 型動的媒介中心性

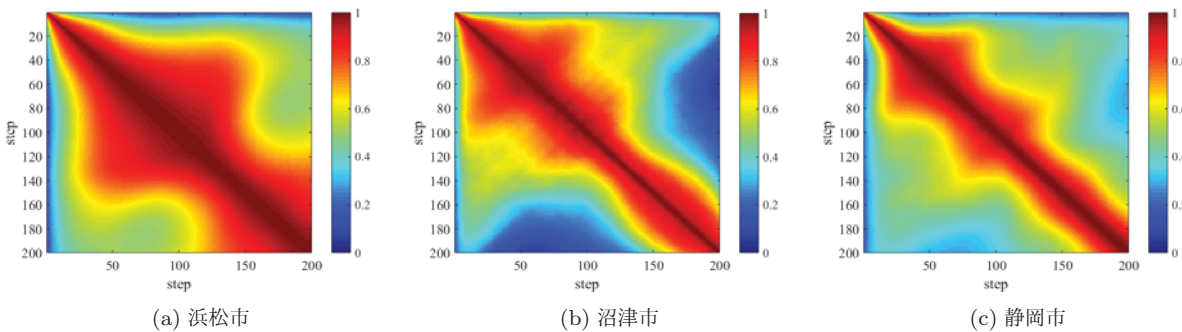


図 3 AP 型動的 centrality でのステップペアごとの類似度 $h_2^*(s, t)$

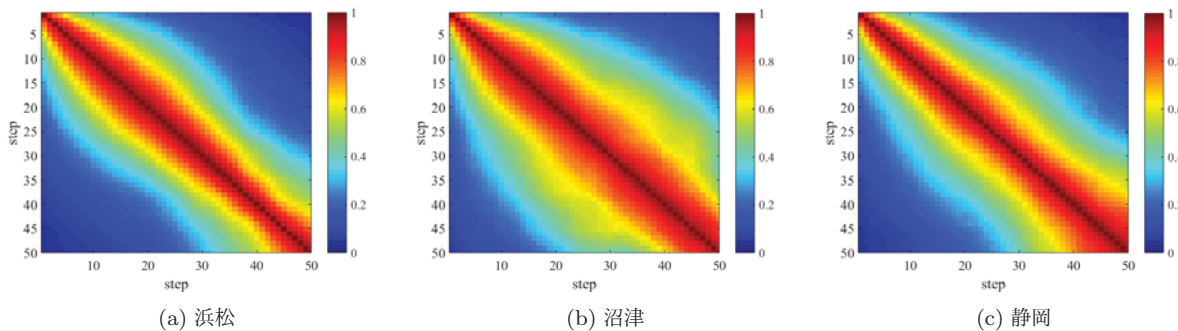


図 4 OD 型動的 centrality でのステップペアごとの類似度 $h_2^*(s, t)$

均 $\mu(D; \mathcal{V}^s)$, $\mu(CC; \mathcal{V}^s)$, $\mu(CL; \mathcal{V}^s)$ と標準偏差 $\sigma(D; \mathcal{V}^s)$, $\sigma(CC; \mathcal{V}^s)$, $\sigma(CL; \mathcal{V}^s)$ が求まる. このとき, \mathcal{V}^s の統計量 $m \in \{D, CC, CL\}$ の Z-score は以下で計算される.

$$z(m; \mathcal{V}^s) = \frac{\sqrt{|\mathcal{V}^s|}(\mu(m; \mathcal{V}^s) - \mu(m))}{\sigma(m)}$$

ステップ数 s を x 軸, Z-score の値を y 軸として図 5 と図 6 に, (a) 次数, (b) クラスタ係数, (c) 近接中心性での Z-score の結果を示す. 図 5 と図 6 から, 初期ステップで

高媒介度のノード集合は, 次数とクラスタ係数が有意に高いことが分かる. また, 中盤ステップでは近接中心性の Z-score が高い傾向を持つことが確認できる. この結果から, 初期に媒介されやすいノードは, 自身を中心としたスター構造をもつ可能性が高いと考えられる. また, 多くの人と短いステップで繋がっているが, ネットワークの中心ではないノードである事が示唆される. 一方, 中盤に媒介されやすいノードほど, どのノードからも距離が比較的

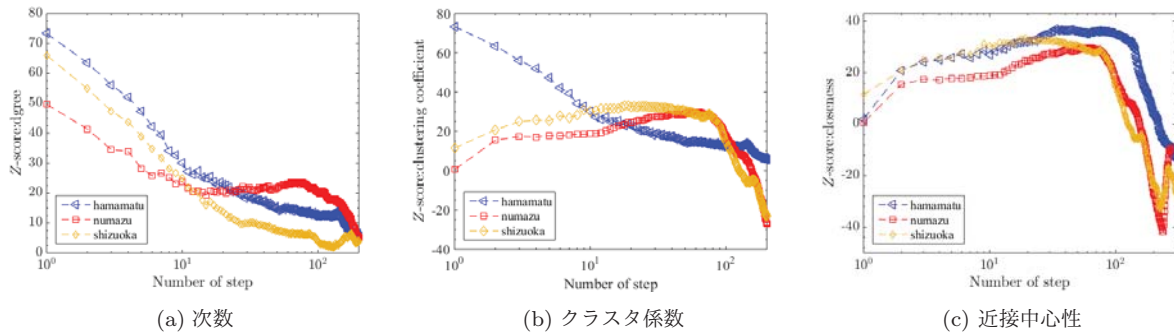


図 5 AP 型動的媒介中心性の Z-score

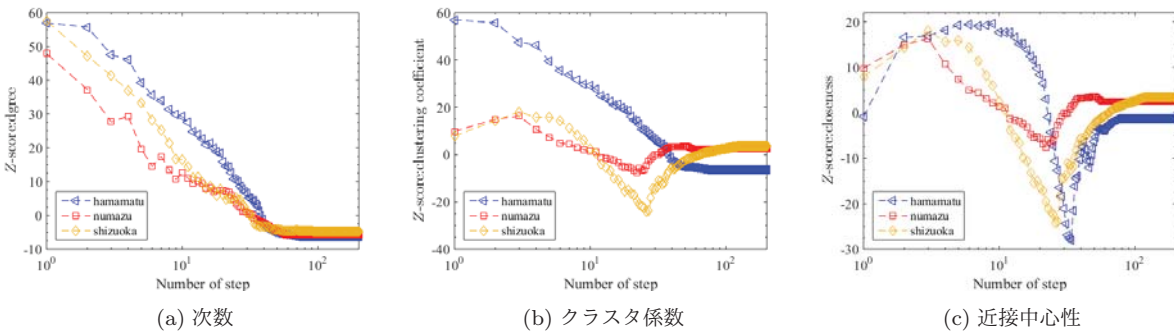


図 6 OD 型動的媒介中心性の Z-score

近く、ネットワークの中心に存在すると考えられる。さらに、終盤のステップに向かうにつれて次数、クラスタ係数、近接中心性の値が減少するのが見て取れる。そのため、終盤に媒介されやすいノードほど、ネットワークの中心から外れており、少数のノードと隣接する傾向があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、何ステップ目に媒介するかを陽に考慮した動的媒介中心性 (AP 型動的媒介中心性) と、その応用として人々の移動行動を取り入れた動的媒介中心性 (OD 型動的媒介中心性) を提案し、その基本的性質を分析し評価した。実際の道路網データを用いた評価実験では、提案指標を用いることで従来指標で隠れていた媒介傾向を表現でき、提案指標の有効性が示唆された。また、媒介傾向が似ているノード群の基本的な性質を確認することもできた。今後は、ノード間の距離をステップ数で定義するのではなく実距離を採用した距離区間を導入して、本枠組みを拡張する。また、災害発生時の密集地推定等、道路網の安全性向上技術への応用に向けて、OD 型媒介中心性における移動行動モデルを拡張し、より現実問題に即した指標とすることを目指す。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (C)(No.17H01826) の助成を受けた。

参考文献

[1] Freeman, L. C.: Centrality in social networks: Conceptual clarification, *Social Networks*, Vol. 1, No. 3, pp.

215–239 (1979).
 [2] 伏見卓恭, 齊藤和巳, 武藤伸明, 池田哲夫, 風間一洋: 実距離を考慮した中心性指標の提案と重要観光スポット抽出への応用, *人工知能学会論文誌*, Vol. 30, No. 6, pp. 703–712 (2015).
 [3] 車谷浩一, 山下倫央, 野田五十木, 和泉潔, 松尾豊: 道路交通ネットワークのダイナミクスと群ユーザ支援, *人工知能学会論文誌*, Vol. 20, No. 3, pp. 296–304 (2005).
 [4] Crucitti, P., Latora, V., and Porta, S.: Centrality in networks of urban streets. *Chaos: an interdisciplinary journal of nonlinear science*, Vol. 16, No. 1, p. 015113 (2006).
 [5] Kalapala, V., Sanwalani, V., Clauset, A. and Moore, C.: Scale invariance in road networks, *Physical Review E*, Vol. 73, No. 2, p. 026130 (2006).
 [6] 媒介中心性を考慮したレジリエントな自律的ネットワークの構成法-災害時に破損した道路網復旧への応用- (2015).
 [7] 菅野真生, 江原 遥, 廣田雅春, 横山昌平, 石川 博: 道路ネットワーク分析を用いた災害時における避難リスクの高い経路の可視化, *日本データベース学会和文論文誌*, Vol. 15-J, No. 5 (2017).
 [8] 福山祥代, 羽藤英二: バルセロナの歴史的発展過程と歩行者の行動圏域を考慮した広場一街路のネットワーク分析, *土木学会論文集 D1 (景観・デザイン)*, Vol. 68, No. 1, pp. 13–25 (2012).
 [9] Porta, S., Crucitti, P. and Latora, V.: The network analysis of urban streets: a dual approach, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 369, No. 2, pp. 835–866 (2006).
 [10] Hillier, B. and Hanson, J.: *The social logic of space*, Cambridge university press (1984).
 [11] Brandes, U.: A Faster algorithm for betweenness centrality, *The Journal of Mathematical sociology*, Vol. 25, pp. 163–177 (2001).
 [12] Open Street Map, www.openstreetmap.org