情報処理学会論文誌　数理モデル化と応用　Vol.11　No.2　87–98 (July 2018)

ステップ分解型媒介中心性による道路網の混雑度分布の分析

鈴木 優伽[1,a)]　斉藤 和巳[2,b)]

受付日 2017年11月13日，再受付日 2018年4月13日，
採録日 2018年4月30日

概要：近年，複雑ネットワークの分析手法を用いた道路ネットワークの研究がさかんに行われている．なかでも，媒介中心性に基づくアプローチが注目されており，災害発生時における優先復旧ノードの特定や，避難行動を仮定した際の高リクス経路の抽出等に応用されている．本研究でも同様に，ある経路間の媒介ノードは人々が通過しやすいまたは集まりやすいノードであるとし，ノードの媒介度は経路や交差点の混雑度を表すと仮定する．従来の媒介中心性では，ノードの媒介度をネットワークのリンク構造で計算するため，ネットワークの構造が変わらない限り媒介度（混雑度）は変化しない．しかし，人々の移動行動等，現実に即して考えると，各ノードにおける人々の集まり具合は時間によって変化するため，ノードの混雑度もそのつど計算するのが自然である．そのため本研究では，単位時間あたりに進む距離として「ステップ」を導入し，各ステップにおける媒介度を計算することでノードの混雑度の変化をとらえることを目指す．浜松市，沼津市および静岡市の道路網のデータを用いた評価実験では，本指標の基本的性質や，本指標で求めた道路網上の混雑度の分布を分析し，混雑度の分布は各地域ごとに異なる傾向を持つことが分かった．また本指標が，ネットワーク構造等のデータ変動に比較的頑健であり，さらに，従来のネットワーク分析で用いられる他の統計指標とは異なる性質を持つことが確認できた．

キーワード：道路ネットワーク，媒介中心性，OSM（Open Street Map），避難経路，複雑ネットワーク

Analysis of Congestion Distribution of the Road Networks by Step-decomposition Betweenness Centrality

Yuka Suzuki[1,a)]　Kazumi Saito[2,b)]

Received: November 13, 2017, Revised: April 13, 2018,
Accepted: April 30, 2018

Abstract: In recent years, researches on road networks using analytical methods of complex networks have been actively conducted. Above all, approaches based on betweenness centrality is paying attention, and it is applied to identify priority restoration nodes at the time of disaster occurrence and extraction of high-rise route when assuming evacuation behavior. Likewise in this research, we assumed that an intermediary node between certain routes is a node that people are easy to pass or gather easily, and its betweenness represents the congestion degree of a route or an intersection. Conventionally, since the betweenness centrality is calculated by the link structure of the network, As long as the structure of the network does not change, betweenness does not change. However, considering the reality, such as the movement behavior of people, since the degree of gathering of people at each node varies with time, it is natural to calculate the betweenness of the node each time. Therefore, in this research, "step" is introduced as the distance traveled per unit time, we aim at grasping changes in node congestion degree by calculating betweenness in each step. In the evaluation experiment using the data of the road network of Hamamatsu City, Numazu City and Shizuoka City, analysis of the basic characteristics of proposed index and the distribution of congestion degree on the road network obtained by proposed index showed that the distribution of congestion degree tends to be different for each region. It is also confirmed that proposed index is relatively robust to data fluctuation such as network structure and has properties different from other statistical indicators used in conventional network analysis.

Keywords: road networks, betweenness centrality, OSM (Open Street Map), evacuation route, complex networks

© 2018 Information Processing Society of Japan

1. はじめに

現実世界の様々な現象を説明する新たなパラダイムとして，複雑ネットワーク研究がさかんに行われている [1], [2], [3]．なかでも，ノードの重要度や影響度の定量化は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重要なタスクと考えられ，それらを測る「中心性指標」の研究がさかんである [4]．代表的な中心性指標として，Freeman が提唱した「次数中心性」「近接中心性」「媒介中心性」があげられ，各中心性指標はネットワーク分析の目的によって使い分けられている．たとえば，ネットワーク内におけるノード間の橋渡し的ノードの抽出が目的であれば，媒介中心性が用いられる．近年，これら中心性の研究は Web 上のネットワークにとどまらず，交差点をノード，交差点間の道をリンクとした道路ネットワークにも適応されている [5], [6], [7], [8]．とりわけ，ノード間の移動行動を前提にした道路ネットワークでは，ある交差点間の媒介ノードに着目することが多く，媒介中心性 [4] を用いた分析がさかんである．たとえば，福山ら [9]，Porta ら [10] の研究では，媒介中心性を用いることで Hillier らが提唱した [11] 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．また，媒介度が高いノードほど他のノード間の経路の橋渡しとなる存在であるため，災害発生時における優先復旧ノードの特定等，災害復旧技術や道路網の頑健性向上の研究に応用されている [12], [13]．本研究も同様に，道路網分析へのアプローチとして媒介中心性を採用し，道路網上の混雑度の分析を行う．ここで，あるノード間を媒介するノードは人々が通過しやすいまたは集まりやすい橋渡しノードであるとし，ノードの媒介度はそのノードを利用する人々の密集度合であり，道路網上での混雑度と見なすことに注意する．

従来の媒介中心性は，ノードの媒介度をネットワークのリンク構造から計算するため，ネットワークの構造が変わらない限り媒介度（以下，混雑度とも呼ぶ）は変化しない．しかし，人々の実行動を考慮した場合，ノードの混雑度がただ 1 つの値に定まるとは限らない．たとえば，**図 1** に示した始点ノード x から終点ノード y へ中間地点ノード z を経由して人々が移動する際に，始点ノード x から中間地点ノード z への橋渡しノードである α と，中間地点ノード z から終点ノード y への橋渡しノードである β では，人々はノード x から出発するとすれば，最終的に通過する（媒介する）人数は α と β の両者で等しくなる．しかし，始点ノード x から中間地点ノード z へ移動が開始された前半では，多くの人がノード α を媒介し，ノード β を媒介する段階には至ってない．逆に，始点ノード x から中間地点 z まで移動が完了した後半では，ノード α の媒介はほとんどなくなり，多くの人がノード β を媒介することになる．すなわち，起点と目的地が定まっている実行動においては，ノードの混雑度は，人々が今どこの地点にいるかで変化すると考えられる．よって本研究では，単位時間あたりに進む距離として「ステップ」を導入し，ステップが進むごとの混雑度として「ステップ分解型媒介中心性」を計算することで，既存媒介中心性を実行動を考慮した指標へ拡張する．また，算出したステップごとの混雑度から，道路網上の混雑度の分布をとらえることを目指す．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始点・終点ノード間を媒介しているのかを陽に考慮し，各ステップにおける混雑度を算出していく．このとき計算されるノードの混雑度は，任意のノードペア間を移動する際の混雑度であることに注意されたい．そのため，より実行動を考慮した混雑度をとらえるために，人間や乗用車等の移動主体が，起点となる始点ノードから目的地等の終点ノードまで移動する基本行動モデルを取り入れた指標を提案する．本稿では，前者を「AP（All-Pair）型ステップ分解媒介中心性」，後者を「OD（Origin-Destination）型ステップ分解媒介中心性」と定義する．

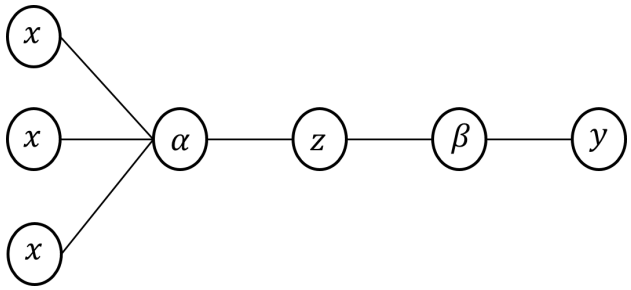


図 1　ステップ分解型媒介中心性のサンプル
Fig. 1　Sample of step-decomposition betweenness centrality.

提案指標は，従来指標を「ステップ」ごとに分解した指標であるため，各ステップの混雑度の総和は従来指標と同値であり，自然な拡張指標であると考えられる．ただし，従来のリンク構造から計算する従来指標が，ノードの「平均的な混雑度」をとらえるのに対し，「ステップ」ごとに計算する提案指標は，移動行動中の「ある時点における混雑度」をとらえていることに注意されたい．また，「ステップ」に分解して混雑度を計算することで，ある時点での混雑のボトルネックとなるノードを特定可能であると考えられる．そのため，提案指標の応用として，交通渋滞の緩和を目指した道路網の再整備や，混雑状況に応じて目的地まで巡回するスケジューリング技術 [14] への適応が期待でき

[1] 静岡県立大学
University of Shizuoka, Shizuoka 422–8526, Japan
[2] 神奈川大学
Kanagawa University, Hiratsuka, Kanagawa 259–1293, Japan
[a)] j16105@u-shizuoka-ken.ac.jp
[b)] k-saito@kanagawa-u.ac.jp

© 2018 Information Processing Society of Japan

る．一方，ネットワーク上で多数の人々が確率モデルに基づき移動する最も単純なケースは，ページランク等と同様にランダムウォークとして定式化できる．このような定式化に基づき，ステップごとの人々のノード上の存在確率分布に着目し，その時系列変化を利用・分析した研究としては，たとえば，Fushimi らの研究 [15] があげられる．これに対し，本稿では，人々は最短パス長の経路を選択し移動すると定式化し，そのステップごとの変化を利用・分析する点が本質的に異なり，著者らの知る限り，これまで見すごされてきたユニークな研究パラダイムであると主張できる．

本研究の構成は以下である．2 章では，提案指標について詳細に述べる．3 章では，提案指標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. ステップ分解型媒介中心性

$G=(\mathcal{V},\mathcal{E})$ をグラフ構造とし，$\mathcal{V}=\{v,w,x,y,\cdots\}$ はノードの集合を，$\mathcal{E}=\{e=(v,w),\cdots\}$ 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 型ステップ分解型媒介中心性

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 型媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v)$ 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．

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

ここで，$\sigma_{x,y}$ 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，単位時間あたりに進む距離として「ステップ s」を導入する．ただし本稿では簡略化のため，隣接する任意のノード間の移動距離が 1 ステップに相当するとし，隣接する任意のノード間の移動時間も 1 ステップで完了すると仮定する．そして，任意のノードペア間の移動におけるノード v の混雑度として，何ステップ目に媒介するかを陽に考慮した AP 型ステップ分解型媒介中心性を提案する．このとき，ノード $v\in\mathcal{V}$ のステップ $s\in\{1,2,\cdots\}$ での AP 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v;s)$ 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．

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

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 型媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v)$ と AP 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v;s)$ に対して，以下の関係が成立する．

$$\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v)=\sum_{s}\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v;s). \tag{3}$$

すなわち，AP 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v;s)$ は AP 型媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v)$ のステップごとの分解であり，後者は最終状態に対する静的な混雑度であるのに対し，前者はステップ数の計算プロセス（時間経過）を考慮した時間ごとの混雑度と考えることができる．

本稿では簡略化のため，任意のノードペア間の距離を 1 ステップで定義したが，道路網上の実距離を導入しステップ数を割り当てることで，本枠組みを容易に拡張することができる．さらに，より現実的なステップ数を割り当てて，道路網上の実距離だけではなく，交差点間の道路自体の幅や十字路・T 字路等の交差点の形状を考慮すべきと考えられる．たとえば，経路の幅が狭い場合，そこを通過できる人数が自然に限られるため，その経路間で要するステップ数は大きくなると予想される．すなわち，将来的には，本枠組みの自然で簡易な拡張として，単位時間あたりの移動距離と実距離から経路間のステップ数を算出することで，上記の性質を考慮したモデルを構築する．

2.2 OD 型ステップ分解媒介中心性

AP 型では，任意のノード間を移動する際のノードの混雑度を計算している．しかし実行動では，起点と目的地が定められていることが多い．そのため，多数の移動主体（住民等）が起点（たとえば移住地等）から目的地（たとえば避難地等）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 $u\in\mathcal{D}$ を最寄りのノード（交差点）$w\in\mathcal{V}$ 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 $n(x)$ とする．このとき，OD（Origin-Destination）型媒介中心性でのノード $v\in\mathcal{V}\setminus\mathcal{D}$ の OD 型媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v)$ を，起点 $x\in\mathcal{V}\setminus(\mathcal{D}\cup\{v\})$ から目的地 $y\in\mathcal{D}$ 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．ただし，最短ステップ数で到達可能な目的地は一般に複数存在しうるので，その集合を $\mathcal{D}(x)$ とする．$\mathcal{D}(x)\subset\mathcal{D}$ かつ，媒介ノード v が起点や目的地となるケースを除くことに注意する．

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

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 型ステップ分解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 型ステップ分解

© 2018 Information Processing Society of Japan

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 $s \in \{1, 2, \cdots\}$ での OD 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v; s)$ 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．

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

明らかに，OD 型媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v)$ と OD 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v; s)$ に対しても，以下の関係が成立する．

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

すなわち，OD 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v; s)$ も OD 型媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v)$ のステップごとの分解であり，後者は主体の移動が完了した最終状態に対する混雑度であるのに対し，前者は移動過程でのステップ数（時間経過）を考慮した時間ごとの混雑度と考えることができる．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 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v; s)$ 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. ステップ分解媒介中心性の計算法

媒介中心性の計算式 (1) 等の単純計算では，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るので，ナイーブには $O(|\mathcal{V}|^3)$ 程度の計算量が必要となるが，すで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 [16]．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 $\mathrm{bc}_x(v)$ を求め，これらを次式のようにすべて加算することで，各ノード $v \in \mathcal{V}$ に対して，媒介度 $\mathrm{bc}(v)$ を求める．

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

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 $d_x(y) \in \{1, 2, \cdots\}$，最短パス数 $\sigma_x(y) = \sigma_{x,y}$，および，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，$\mathrm{bc}_x(v) \leftarrow 0$ 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 $\mathrm{bc}_x(v)$ を求めることができる．

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

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 $\mathrm{bc}_x(v)$ 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 型ステップ分解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 $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v)$ が求まる．一方，AP 型ステップ分解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 AP 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v; s)$ 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 AP 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}_x^{\mathrm{AP}}(v; s)$ を求め，これらを次式のようにすべて加算することで，各ノード $v \in \mathcal{V}$ に対して，AP 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v; s)$ を求める．

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

また，AP 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}_x^{\mathrm{AP}}(v; s)$ については，各ノード $v \in \mathcal{V}$ とステップ s に対して，$\mathrm{bc}_x^{\mathrm{AP}}(v; s) \leftarrow 0$ 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 型ステップ分解媒介度 $\mathrm{bc}_x^{\mathrm{AP}}(v; s)$ を求めることができる．

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

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 型ステップ分解媒介中心性の計算法

各ノード $v \in \mathcal{V}$ の OD 型媒介度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v)$ 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 $\mathrm{bc}_x^{\mathrm{OD}}(v)$ を求めて加算し，OD 型媒介度 $\mathrm{bc}_x^{\mathrm{OD}}(v)$ を求める．いま，$\mathrm{bc}_x^{\mathrm{OD}}(v)$ 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，$\mathrm{bc}_x^{\mathrm{OD}}(v) \leftarrow 0$ 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 $\mathrm{bc}_x^{\mathrm{OD}}(v)$ を求めることができる．

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

式 (11) では，ノード w が目的地に含まれなければ，その影響をなくすため $i(w)$ 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 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v; s)$ を式 (5) に基づき求める計算法を示す．ここ

© 2018 Information Processing Society of Japan

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 $\mathrm{bc}_x^{\mathrm{OD}}(v;s)$ を求めて加算し，OD 型動的媒介度 $\mathrm{bc}_x^{\mathrm{OD}}(v;s)$ 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，$\mathrm{bc}_x^{\mathrm{OD}}(v;s) \leftarrow 0$ 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 $\mathrm{bc}_x^{\mathrm{OD}}(v;s)$ を求めることができる．

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

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

実験には，Open Street Map（OSM）データ [17] から取得した静岡県の浜松市，静岡市，および，沼津市の道路網データを用いる．**表 1** に，実験で用いた各都市の道路網データの詳細を示す．ノード数は，浜松が 104,813，沼津が 15,483，静岡が 53,903 であり，リンク数は，浜松が 255,296，沼津が 38,106，静岡が 132,888 である．OD 型ステップ分解媒介中心性で用いる目的地集合には，各都市の避難地データを用いる．目的地数は，浜松が 432，沼津が 232，静岡が 363 である．x が起点の主体数 $n(x)$ を人口比に応じて設定することで，より現実の移動行動を反映した結果が得られると考えられるが，本実験ではステップ分解型媒介中心性の基本的な性能を確認したいため，主体数 $n(x)$ を 1 と設定する．以降では，AP 型ステップ分解媒介中心性を AP 型，OD 型ステップ分解媒介中心性を OD 型と略記する．

4.1 ステップ分解媒介中心性の基本特性の分析

4.1.1 評価方法

以下に，ステップ分解媒介中心性の基本特性を分析するための各方法について説明する．まず，AP 型と OD 型のそれぞれでのステップ数 s の分布を求める．このとき，起点ノードと終点ノード間のステップ数の分布 $f^{\mathrm{AP}}(s)$ と $f^{\mathrm{OD}}(s)$ を以下で定義する．

$$f^{\mathrm{AP}}(s) = |\{(x,y) \mid x \in \mathcal{V},\ y \in \mathcal{V},\ d(x,y) = s\}|. \quad (13)$$
$$f^{\mathrm{OD}}(s) = |\{x \mid x \in \mathcal{V},\ \exists y \in \mathcal{D}(x),\ d(x,y) = s\}|. \quad (14)$$

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．

表 1　道路網データの概要
Table 1　Overview of road network data.

	ノード数	リンク数	目的地数	最大パス長
浜松	104,813	255,296	432	486
沼津	15,483	38,106	232	459
静岡	53,903	132,888	363	414

次に，各ステップ s でのネットワーク全体の混雑度（混雑度の全ノードでの総和）の分布を求める．そのため，$* \in \{\mathrm{AP}, \mathrm{OD}\}$ とし，ステップ s に対し，AP 型と OD 型それぞれのステップごとのすべてのノードによる媒介度の分布 $g^*(s)$ を以下で定義する．

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

また，従来の媒介指標と本提案指標の違いを定量的に評価するために，ステップ s でのステップ分解混雑度 $\mathrm{bc}^*(v;s)$ と従来指標での混雑度 $\mathrm{bc}^*(v)$ 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 $h_1^*(s)$ を以下で定義する．

$$h_1^*(s) = \frac{\sum_{v \in \mathcal{V}} \mathrm{bc}^*(v;s) \times \mathrm{bc}^*(v)}{\sqrt{\sum_{v \in \mathcal{V}} \mathrm{bc}^*(v;s)^2} \sqrt{\sum_{v \in \mathcal{V}} \mathrm{bc}^*(v)^2}}. \quad (16)$$

さらに，ステップ s で算出される混雑度 $\mathrm{bc}^*(v;s)$ が，ステップ数が異なることで変化するか検証する．そのため，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ステップ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する．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．

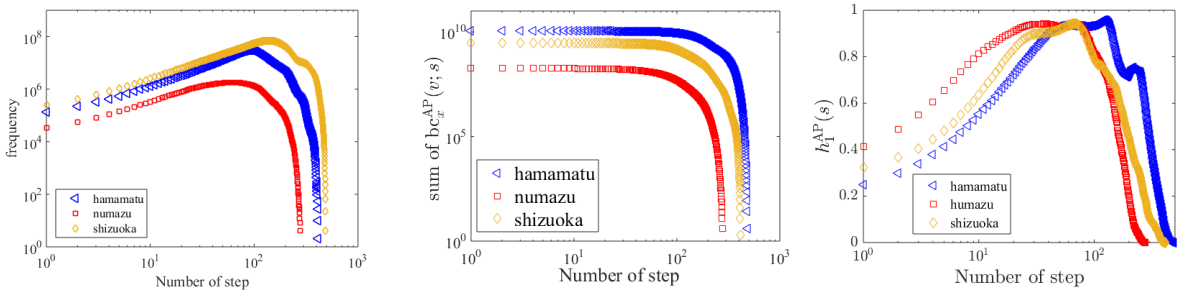
$$h_2^*(s,t) = \frac{\sum_{v \in \mathcal{V}} \mathrm{bc}^*(v;s) \times \mathrm{bc}^*(v;t)}{\sqrt{\sum_{v \in \mathcal{V}} \mathrm{bc}^*(v;s)^2} \sqrt{\sum_{v \in \mathcal{V}} \mathrm{bc}^*(v;t)^2}}. \quad (17)$$

図 2 と**図 3** に，AP 型と OD 型のそれぞれで，浜松市，静岡市，および，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) にはネットワーク全体での媒介度の分布 $g^*(s)$ を，(c) には従来指標とのコサイン類似度 $h_1^*(s)$ を示す．

4.1.2 評価結果 AP 型の基本特性

図 2 (a) から，AP 型では 100 から 200 ステップ前後が最も頻度が高く，これらステップで多くのノードペア間が移動可能なことが分かる．この傾向は，浜松・沼津・静岡のどれも共通している．また，100 以下のステップや 200 以上のステップとなるペアも存在することが確認できる．図 2 (b) から，1 から 100 ステップ目までネットワーク全体の混雑度は高く，100 から 200 ステップ前後で混雑度が減少し始めることが分かる．これは，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．さらに，100 ステップ以前でのネットワーク全体の混雑度が最頻度である 100 から 200 ステップの混雑度と同等の値であり，ステップごとに分解するという本アプローチの有望性が示唆される．図 2 (b) の媒介度の分布 $g^{\mathrm{AP}}(s)$ を見ると，AP 型では，200 ステップ前後で $g^{\mathrm{AP}}(s)$ の値が 0 に漸近し始めることが分かる．以降では，AP 型での有効ステップ数は 200 ステップと考える．ただし，200 ステップ以降は，他のステップ時に比べ混雑度は低いが，10^3 から 10^5 程度の混雑度とな

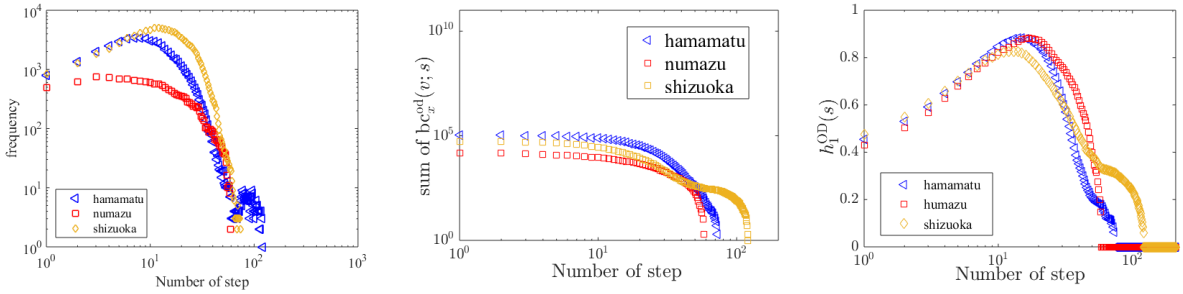
© 2018 Information Processing Society of Japan



(a) ステップ数の分布 $f^{\mathrm{AP}}(s)$　(b) 媒介度の分布 $g^{\mathrm{AP}}(s)$　(c) コサイン類似度 $h_1^{\mathrm{AP}}(s)$

図 2　AP 型動的媒介中心性

Fig. 2　AP betweenness centrality $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v;s)$.



(a) ステップ数の分布 $f^{\mathrm{OD}}(s)$　(b) 媒介度の分布 $g^{\mathrm{OD}}(s)$　(c) コサイン類似度 $h_1^{\mathrm{OD}}(s)$

図 3　OD 型動的媒介中心

Fig. 3　OD betweenness centrality $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v;s)$.

るので，比較的最後のステップで経由されるというノードの特徴に関しても，混雑度の観点で適切にとらえて分析することも可能である．図 2 (c) のコサイン類似度 $h_1^{\mathrm{AP}}(s)$ を見ると，AP 型では，50〜100 ステップ前後で従来の混雑度との類似度 $h_1^{\mathrm{AP}}(s)$ が高いことが分かる．また，比較的最初のステップである 10 ステップや最後のステップ周辺である 100 ステップ以降では類似度が低いことから，それらのステップで計算される混雑度は，従来指標での混雑度とは異なるといえる．

4.1.3　評価結果 OD 型の基本特性

図 3 (a) から，OD 型では 50 ステップ前後でステップ数の頻度が減少し始めており，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分かる．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あげられる．また，図 3 (b) を見ると，図 2 (b) と同様の傾向を持つことが確認できる．図 3 (b) の媒介度の分布 $g^{\mathrm{OD}}(s)$ を見ると，OD 型では 50 ステップ前後で $g^{\mathrm{OD}}(s)$ の値が 0 に漸近し始めることが分かる．以降では，OD 型での有効ステップ数は 50 ステップと考える．図 3 (c) を見ると，OD 型では，15 ステップ前後で最も類似度 $h_1^{\mathrm{OD}}(s)$ が高いことが分かる．また AP 型の結果と同様，5 ステップや 30 ステップ等の最初や最後のステップ周辺は類似度が低いことが分かる．以上の結果から，各ステップでの混雑度は，従来の混雑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，従来指標での混雑度は本指標での中盤周辺ステップ（AP 型なら 50〜100，OD 型なら 15 ステップ前後）の混雑度に類似することも確認できた．

4.1.4　評価結果 AP 型 OD 型のステップペアごとの混雑度特性

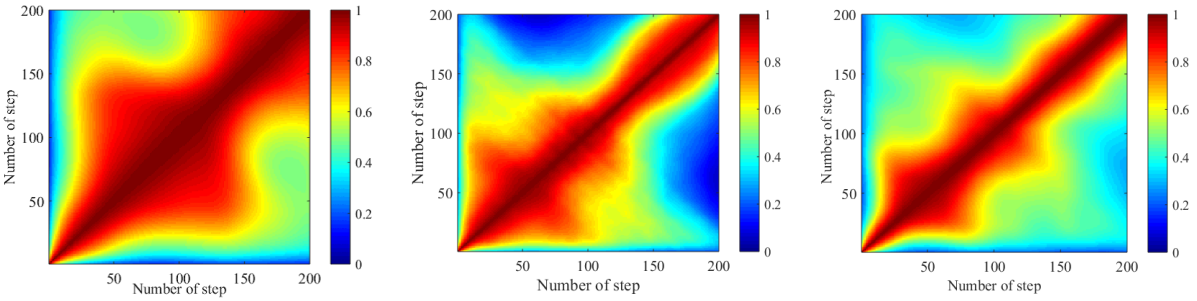
図 4 と**図 5** には，ヒートマップ可視化結果を示す．図 4 のステップペアごとの類似度を見ると，同じ段階（同じようなステップ数）のステップでの類似度は高く，異なれば類似度が低いことが分かる．特に，沼津市データはその傾向が顕著である．図 5 を見ると，上述の傾向がより顕著に現れている．すなわち，ステップが異なれば，各ノードの混雑度が変化することを視覚的にも確認できる．以上の結果から，各ノードの混雑度はステップ経過ごとに変化することが確認され，提案指標はそのようなノードの混雑度の変化を自然にとらえられていると考えられる．

4.2　道路網での混雑度分布の分析

4.2.1　評価方法

本項では，各道路網データでのステップ分解混雑度を可視化して分析する．以下では，各ノードのステップ s でのステップ分解混雑度 $\mathrm{bc}^*(v;s)$ で構成されるベクトル（以降では，混雑度ベクトルと呼ぶ）を K-medoids 法でクラスタリングする方法について説明する．まず，K-medoidos 法で用いられるノード集合 $\mathcal{V}$ とその要素 $u, v \in \mathcal{V}$ 間の類似度 $\rho(u,v)$ を以下で定義する．

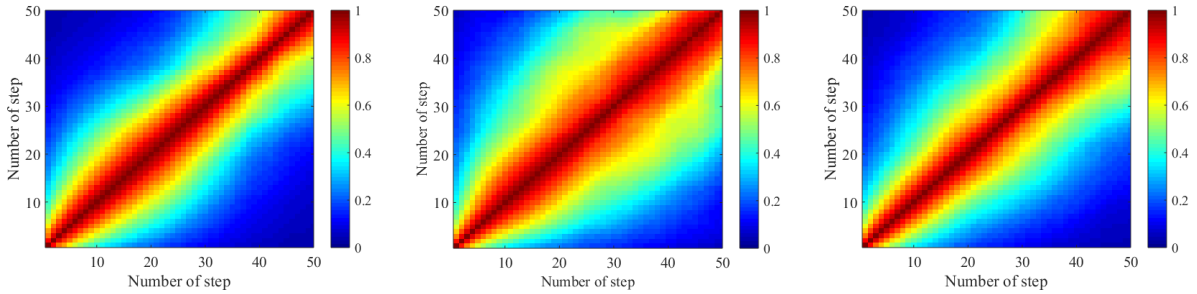
© 2018 Information Processing Society of Japan



(a) 浜松市　(b) 沼津市　(c) 静岡市

図 4　AP 型でのステップペアごとの類似度 $h_2^{\mathrm{OD}}(s,t)$

Fig. 4　Similarity $h_2^{\mathrm{OD}}(s,t)$ for each step pair of $\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v;s)$.



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

図 5　OD 型でのステップペアごとの類似度 $h_2^{\mathrm{OD}}(s,t)$

Fig. 5　Similarity $h_2^{\mathrm{OD}}(s,t)$ for each step pair of $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v;s)$.

表 2　ネットワークごとの最大ステップ数 S

Table 2　Maximum number of steps S per network.

	AP 型	OD 型
浜松	486	74
沼津	459	59
静岡	414	122

$$\rho(u,v)=\frac{\sum_{s=1}^{S}\mathrm{bc}^*(u;s)\mathrm{bc}^*(v;s)}{\sqrt{\sum_{s=1}^{S}\mathrm{bc}^*(u;s)^2}\sqrt{\sum_{s=1}^{S}\mathrm{bc}^*(v;s)^2}}.$$

ここで S は各ネットワークにおける最大ステップ数であり，AP 型と OD 型における S の値を**表 2** に示す．

また，与えられた混雑度ベクトル集合から代表ノード集合 $\mathcal{G}$ を求める目的関数を以下で定義する．

$$J(\mathcal{G})=\sum_{u\in\mathcal{V}}\max_{v\in\mathcal{G}}\{\rho(u,v)\}.$$

$K=|\mathcal{G}|$ 個の代表ノード集合を抽出したのち，残りのノード群を最も類似する代表ノードのクラスタに割り当てることで，ノード集合 $\mathcal{V}$ を K 個のクラスタ $g^1,g^2,\cdots,g^K$ に分割する．このとき，各クラスタに属するノードは互いに素であり，クラスタリング結果は以下を満たす．

$$\bigcup_{k=1}^{K}g_k=\mathcal{V}$$

また，目的関数 $J(\mathcal{G})$ はサブモジュラ性 [18] を有するため，本研究では近似解法として貪欲法を採用する．

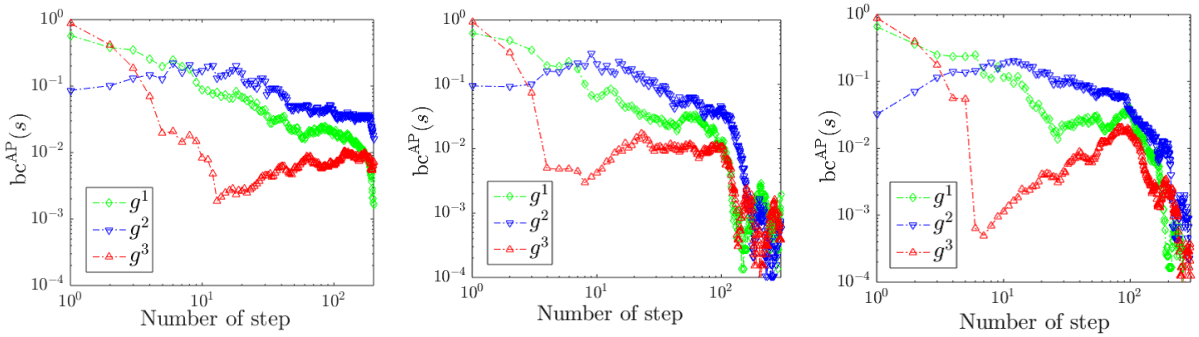
4.2.2　評価結果 各クラスタの特性

図 6 と**図 7** に，AP 型および OD 型の混雑度ベクトルを $K=3$ でクラスタリングした代表ノード $w\in\mathcal{G}$ に対し，貪欲法によって抽出した代表ノードから順に緑・青・赤で色付けした結果を示す．以降では，代表ノード $w\in\mathcal{G}$ の混雑度ベクトルの形状から，各クラスタに属するノード群を，初期ノード群，中盤ノード群，および，終盤ノード群と呼ぶ．具体的には，AP 型では 1 から 10 ステップ前後でピークを持ち，その後値が急激に減少するクラスタ g^3（赤△）は初期ノード群，10 ステップ前後でピークを持つクラスタ g^1（緑◇）は中盤ノード群，そして，ステップ s が増加するにつれて混雑度 $\mathrm{bc}^*(v;s)$ が増加する傾向を持つクラスタ g^2（青▽）は終盤ノードとする．また，OD 型では 1〜5 ステップ前後でピークを持ち，その後値が急激に減少するクラスタ g^3（赤△）は初期ノード群，5 ステップ前後でピークを持つクラスタ g^1（緑◇）は中盤ノード群，そして，ステップ s が増加するにつれて混雑度 $\mathrm{bc}^*(v;s)$ が増加する傾向を持つクラスタ g^2（青▽）は終盤ノードとする．

4.2.3　評価結果 道路網上での混雑度分布の考察

図 8 と**図 9** に，図 6 と図 7 のクラスタごとの色を用い，各都市の道路網上に，クラスタリングしたノードに彩色を施しプロットした結果を示す．図 8 (a) と図 9 (a) から，浜松市では浜松駅周辺に近いほど初期ノード群 g^3（赤）が多く，郊外にいくほど終盤ノード群 g^2（青）が多いことが分か

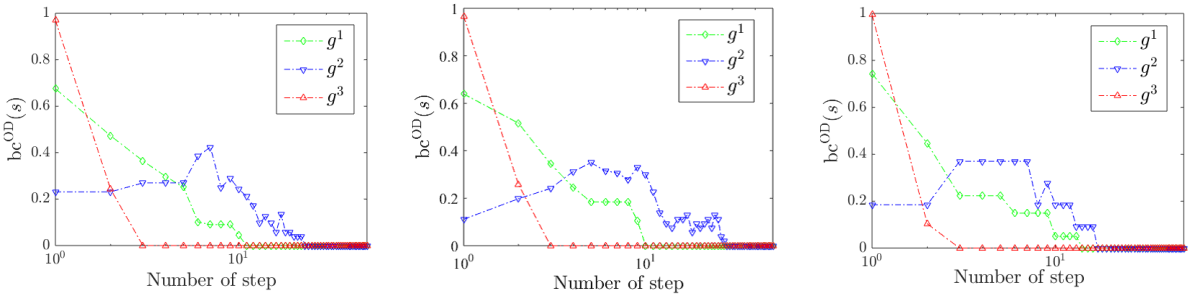
© 2018 Information Processing Society of Japan



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

図 6　AP 型 代表クラスごとのステップ分解混雑度

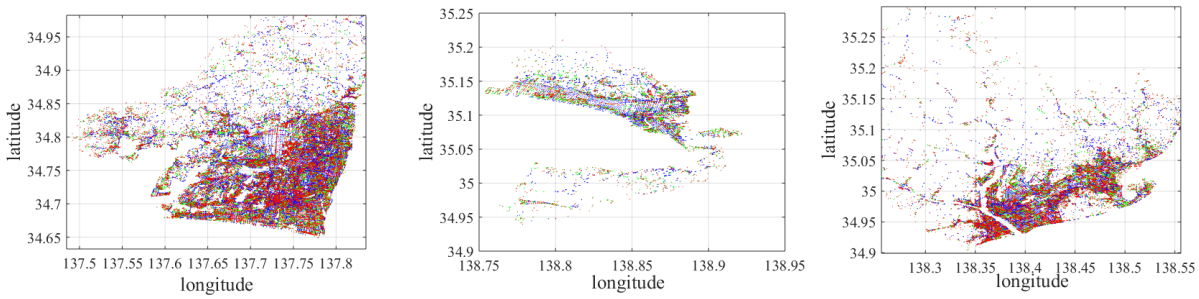
Fig. 6　$\mathrm{bc}^{\mathrm{AP}}(v;s)$ for each representative class.



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

図 7　OD 型 代表クラスごとのステップ分解混雑度

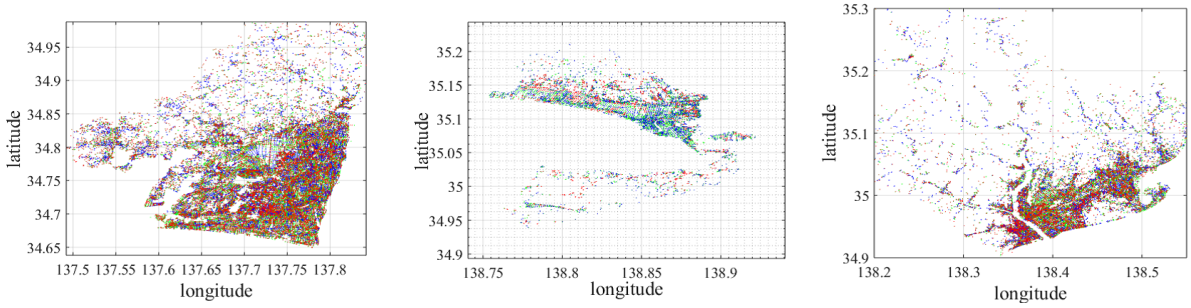
Fig. 7　$\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v;s)$ for each representative class.



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

図 8　AP 型 道路網上での混雑度の分布

Fig. 8　AP: Distribution of congestion degree on road network.



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

図 9　OD 型 道路網上での混雑度の分布

Fig. 9　OD: Distribution of congestion degree on road network.

© 2018 Information Processing Society of Japan

る．特に，浜松市の北に位置する山間部において終盤ノード群 g^2（青）が多い．そのため，都市の中心である浜松駅周辺ほど初期に混雑度が高く，郊外や山間部にいくほど終盤に混雑する傾向を持つと考えられる．また，図 9 (a) の OD 型の結果から，住宅地や人々の行動の起点となる場所ほど初期ノード群 g^3（赤）が多く分布し，目的地に近づくほど中盤ノード g^1（緑）や終盤ノード群 g^2（青）が多く分布していることが分かった．これは，OD 型の基本行動モデルが反映された自然な結果であると考えられるため，今後より詳細な分析を行い，災害発生時の道路網復旧や交通渋滞の緩和に応用していきたい．図 8 (b) と図 9 (b) から，沼津では，東名高速道路沿いや南西地区は終盤ノード群 g^2（青）が多く，沼津駅周辺の中心市街地には，中盤ノード群 g^1（緑）が多く存在することが分かる．また，伊豆方面への幹線道路沿いに多くの終盤ノード群 g^2（青）が存在することが見て取れる．以上の結果から，浜松と沼津は道路網の構造が異なり，異なる混雑傾向を持つと考えられる．初期ノード群 g^3（赤）ほど，他ノードとの距離が比較的近く密度が高い場所に存在していると仮定できるため，中心市街地に初期ノード群が多い浜松は，中心市街地ほど早く混雑すると考えられる．一方，三島・伊豆・富士等の周辺地域へつながる地点ほど多くの初期ノード群 g^3（赤）が密集している沼津は，郊外ほど早く混雑すると考えられる．図 8 (c) と図 9 (c) 静岡の結果を見ると，中心市街地と郊外に初期ノード g^3（赤）・中盤ノード群 g^1（緑）が多く存在し，中心市街地と郊外を結ぶ地域に多くの終盤ノード群 g^2（青）が存在していることが分かる．この理由として，静岡市は中心市街地・郊外の両方に密なリンク構造を持ち，それらを結ぶ地域は疎なリンク構造であることが考えられる．

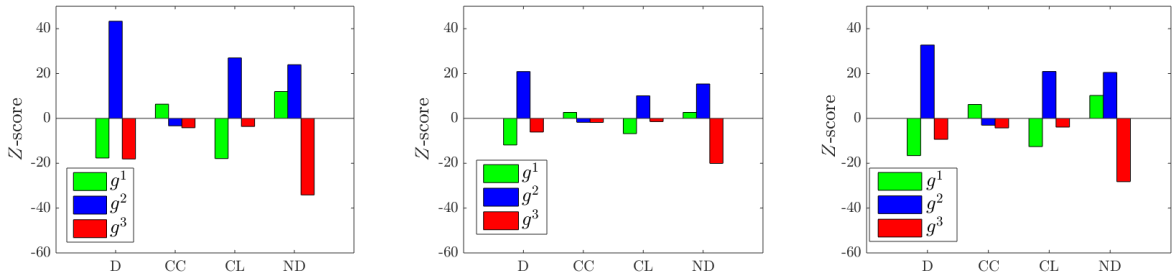
4.3　道路網での混雑度分布におけるノードの特性

4.3.1　評価方法

4.2 節の実験では，各都市の道路網上での混雑度の分布を可視化して分析した．本項では，クラスタリングして得られた初期ノード群・中盤ノード群・終盤ノード群に対し，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（D），クラスタ係数（CC），近接中心性（CL），および，近傍平均次数（ND）の Z-score を用いる．

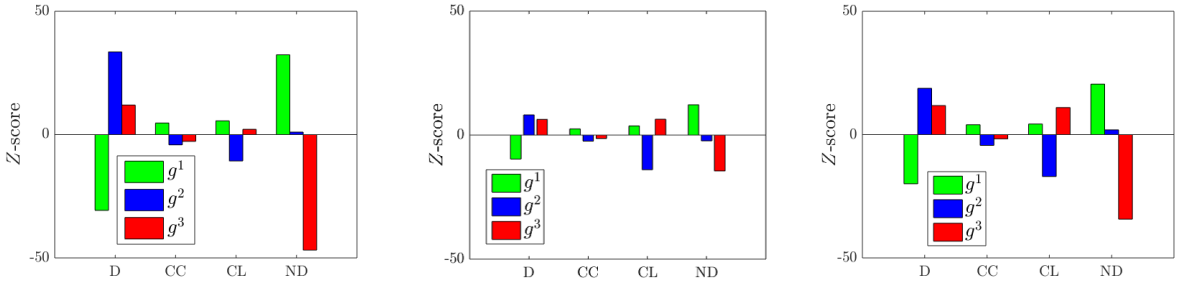
4.3.2　評価結果 各クラスタに属するノードの特性

図 10 (c) と**図 11** に各クラスタにおける統計量の Z-score を棒グラフで示す．このとき，AP 型も OD 型も初期ノード群の結果を赤色，中盤ノード群を緑色，終盤ノードを青色の棒グラフとする．図 10 (c) の AP 型の結果を見ると，どの都市においても終盤ノード群は，次数・近接中心性・近傍平均次数の Z-score が高いことが分かる．一方初期ノード群は，次数・近接中心性・近傍平均次数の Z-score が低く，終盤ノードと逆の性質を持つことが示唆される．また中盤



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

図 10　AP 型 各クラスごとの統計量
Fig. 10　AP: Statistics for each cluster.



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

図 11　OD 型 各クラスごとの統計量
Fig. 11　OD: Statistics for each cluster.

© 2018 Information Processing Society of Japan

ノード群は，クラスタ係数・近傍平均次数の Z-score が高く，他のノード群から中間的位置に存在すると考えられる．

図 11 の OD 型の結果を見ると，終盤ノード群は，次数の Z-score が高い一方，近接中心性の Z-score は低く，AP 型と異なる傾向を持つ．また，初期ノード群は，近傍平均次数の Z-score が顕著に低い．中盤ノード群は，AP 型と同様に，クラスタ係数・近傍平均次数の Z-score が高く，他のノード群から中間的位置に存在すると考えられる．

4.4　ステップ分解媒介中心性の頑健性

4.4.1　評価方法

対象とするグラフの特性（トポロジ等）や目的地集合の配置に対する本指標の頑健性を検証する．具体的には，ある確率 p（$0 < p < 1$）で目的地集合をランダムに削除したのち，ノード v のステップ分解混雑度 $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v; s, p)$ を算出する．算出した $\mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v; s, p)$ と，もともとの混雑度の $\mathrm{bc}^{*}(v; s)$ のコサイン類似度を次式で算出し，本指標が目的地集合の配置特性に影響を受けるか検証する．

$$h_3^{\mathrm{OD}}(s) = \frac{\sum_{v\in\mathcal{V}} \mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v; s, p) \times \mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v, s)}{\sqrt{\sum_{v\in\mathcal{V}} \mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v; s, p)^2}\sqrt{\sum_{v\in\mathcal{V}} \mathrm{bc}^{\mathrm{OD}}(v, s)^2}}. \tag{18}$$

4.4.2　評価結果 提案指標の頑健性の評価

図 12 に任意の確率 p でランダムに削除した際のコサイン類似度 $h_2^{\mathrm{OD}}(s)$ を確率 p ごとに示す．図 12 から，どの確率 p においてもコサイン類似度 $h_2^{\mathrm{OD}}(s)$ は比較的高い値を持つことが分かる．最低でも 0.85 前後の類似度を保っており，本指標がネットワーク構造（目的地の配置特性）の影響を受けにくく，頑健性を持つことが示唆される．また，災害や事故で目的地が使用不可能になったケースでも，本指標の有用性が期待できる．

4.5　ステップ分解媒介中心性と他指標との関係

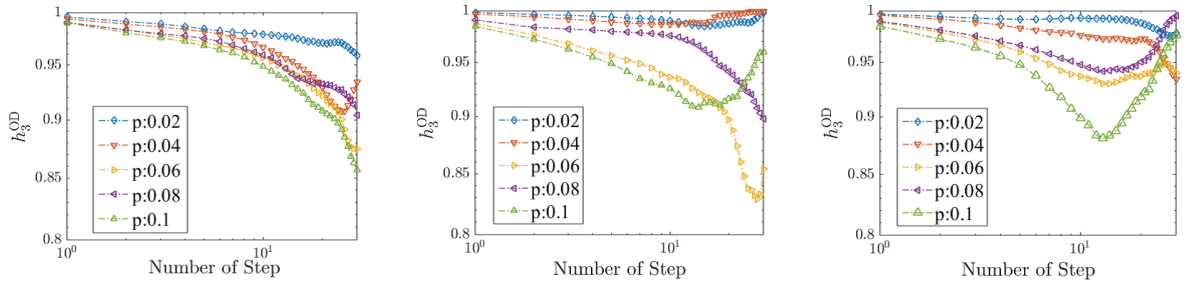
4.5.1　評価方法

ここでは，本指標が 4.3 節の実験で用いた統計指標で代替可能でないことを検証する．そのため，各都市におけるノード v の統計量 $m(v)$，$m \in \{\mathrm{D}, \mathrm{CC}, \mathrm{CL}, \mathrm{ND}\}$ と本指標の混雑度 $\mathrm{bc}^{*}(v; s)$ とのコサイン類似度を以下で定義する．

$$h_4^{*}(s) = \frac{\sum_{v\in\mathcal{V}} \mathrm{bc}^{*}(v; s) \times m(v)}{\sqrt{\sum_{v\in\mathcal{V}} \mathrm{bc}^{*}(v; s)^2}\sqrt{\sum_{v\in\mathcal{V}} m(v)^2}}. \tag{19}$$

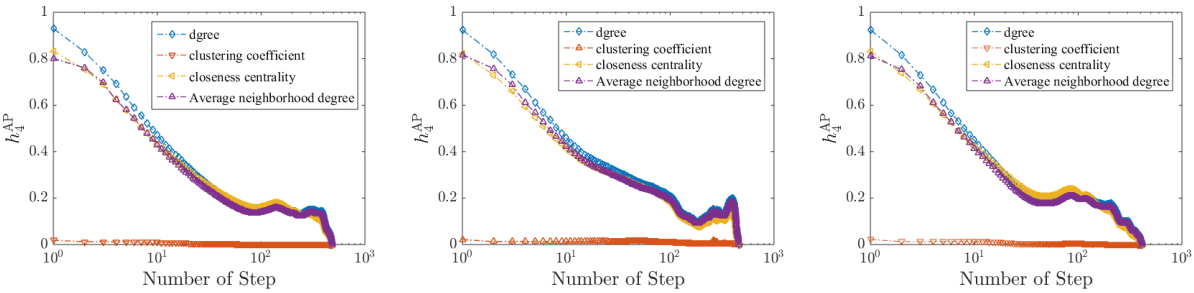
4.5.2　評価結果 提案指標と他指標との関係分析

図 13 に AP 型での結果，**図 14** に OD 型での結果を示す．図 13 と図 14 から，どの統計指標においてもステップが増加するにつれて本指標との類似度が単調減少していることが分かる．1 ステップ目は式の性質上，他の統計指標と類似するが，10 前後で類似度が 0.2 から 0.4 程度まで減少している．そのため，本指標は比較的早い段階で他指標と



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

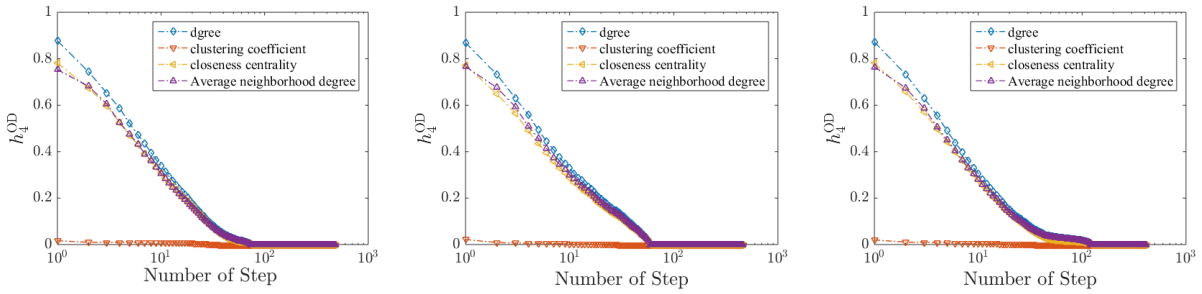
図 12　コサイン類似度 $h_3^{\mathrm{OD}}(s)$
Fig. 12　Cosine similarity $h_3^{\mathrm{OD}}(s)$.



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

図 13　コサイン類似度 $h_4^{\mathrm{AP}}(s)$
Fig. 13　Cosine similarity $h_4^{\mathrm{AP}}(s)$.

© 2018 Information Processing Society of Japan



(a) 浜松　(b) 沼津　(c) 静岡

図 14　コサイン類似度 $h_4^{\mathrm{OD}}(s)$
Fig. 14　Cosine similarity $h_4^{\mathrm{OD}}(s)$.

異なる性質を持つことが分かる．また，その傾向はステップが増加するごとに顕著になっている．すなわち，本混雑度は代表的な統計指標で代替可能でないことが確認できる．

5. おわりに

本研究では，単位時間あたりに進む距離として「ステップ」を導入し，各ステップにおける媒介度を計算する「ステップ分解媒介中心性」を提案し，時間ごとの混雑度を定量化した．浜松市，沼津市および静岡市の道路網のデータを用いた評価実験では，本指標の基本的性質や，本指標で求めた道路網上の混雑度の分布を分析した．また，本指標の頑健性や，他指標との関係を検証した．実験では，道路網上の混雑度分布では，各地域ごとに異なる傾向を持つことが分かった．また，本指標が，データの変動に比較的頑健であり，他の統計指標とは異なる性質を持つことが確認できた．

謝辞　本研究は，科学研究費補助金基盤研究（B）（No.16H02904）の助成を受けた．

参考文献

[1] Varshney, K.: Bounded confidence opinion dynamics in social network of Bayesian decision makers, arXiv (2013).
[2] Gargiulo, F. and Huet, S.: Opinion dynamics in a ground-based society, *EPL*, Vol.91, No.5 (2010).
[3] Mahdi, J.: Social power and opinion formation in complex networks, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol.392, No.4, pp.959–966 (2013).
[4] Freeman, L.C.: Centrality in social networks: Conceptual clarification, *Social Networks*, Vol.1, No.3, pp.215–239 (1979).
[5] 伏見卓恭，斉藤和巳，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).
[6] 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).
[7] Crucitti, P., Latora, V. and Porta, S.: Centrality in networks of urban streets, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, Vol.16, No.1, 015113 (2006).
[8] Kalapala, V., Sanwalani, V., Clauset, A. and Moore, C.: Scale invariance in road networks, *Physical Review E*, Vol.73, No.2, 026130 (2006).
[9] 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–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).
[10] 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).
[11] Hillier, B. and Hanson, J.: *The Social Logic of Space*, Cambridge University Press (1984).
[12] 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).
[13] 有澤俊裕，大沢英一：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，人工知能学会全国大会講演論文 29 (2015).
[14] 栗山恭嘉，村田佳洋，柴田直樹，安本慶一，伊藤　実：将来の混雑状況予測に基づく混雑回避巡回スケジューリング手法の提案，情報処理学会研究報告，Vol.28, pp.63–70 (2007).
[15] Fushimi, T., Saito, K., Ikeda, T. and Kazama, K.: Clustering and Visualizing Functionally Similar Regions in Large-Scale Spatial Networks, *Journal of Information Processing*, Vol.25, pp.398–406 (2017).
[16] Brandes, U.: A faster algorithm for betweenness centrality, *The Journal of Mathematical Sociology*, Vol.25, pp.163–177 (2001).
[17] Open Street Map, available from ⟨www.openstreetmap.org⟩.
[18] Nemhauser, G., Wolsey, L. and Fisher, M.: An analysis of approximations for maximizing submodular set functions, *Mathematical Programming*, Vol.14, pp.265–294 (1978).

© 2018 Information Processing Society of Japan



鈴木 優伽

2016 年静岡県立大学経営情報学部卒業，2018 年同大学大学院経営情報イノベーション研究科修士課程修了．修士（学術）．在学中は，複雑ネットワークの研究に従事．



斉藤 和巳　（正会員）

1963 年生．神奈川大学理学部教授．1985 年慶應義塾大学理工学部卒業，1998 年東京大学博士（工学）．2007 年静岡県立大学経営情報学部教授，複雑ネットワークの研究に従事．電子情報通信学会，人工知能学会，日本神経回路学会，日本応用数理学会，日本行動計量学会，日本データベース学会各会員．

© 2018 Information Processing Society of Japan