

協調と競合を考慮した集合中心性に基づく ネットワーク上での施設配置問題

伏見 卓恭¹ 大久保 誠也² 齊藤 和巳^{3,4,2}

概要：本研究では、対象都市の道路構造を空間ネットワークとして捉え、コンビニエンスストア、ガソリンスタンド、スーパーマーケットなどの施設の設置候補地を抽出する問題を扱う。新たな施設を設置する際、近隣住民がアクセスしやすい場所に配置することで、既存施設の顧客を引き入れ、自身の商圈を拡大することができる。コンビニチェーンのように複数の競合するグループが存在する場合、グループ内の協調関係とグループ間の競合関係を考慮する必要がある。本研究では、中心性の概念をノード単体からノード集合に拡張したグループ中心性に焦点を当て、協力と競争を考慮したグループ中心性を提案する。提案手法は、既存施設の位置とその商圈に基づいて新施設の出店候補地を出力する。実際の道路ネットワークとコンビニエンスストアの位置情報を使用した実験評価から、競合関係を考慮しない既存手法とは異なり、グループごとに異なる出店候補地を出力できることを確認する。

Facility Location Problem on Network Based on Group Centrality Measure Considering Cooperation and Competition

TAKAYASU FUSHIMI¹ SEIYA OKUBO² KAZUMI SAITO^{3,4,2}

1. はじめに

近年、地域のいたるところにコンビニやガソリンスタンド、スーパーマーケットなどの施設が設置されており、近隣住民だけでなく移動中の人々にとっても非常に便利な存在となっている。多くの地域住民の需要を満たし、出店側の利益を最大化するためには、地元住民が簡単にアクセスできる場所、つまり多くの住民に近い場所に立地している必要がある。さらに、新たな店舗を出店する際には、現在の商圈を把握することは重要である。

ネットワーク分析の分野では、他のノードからのアクセ

ス可能性に焦点を当てた近接中心性という指標がある。この指標は、他のノードとの間の距離の平均値が小さいノードほど、アクセシビリティが高く重要なノードであることを示す。地域の道路ネットワークを対象とした際、近接中心性ランキングにおいて上位のノードに店舗を出店すると、その場所は地元住民にとってアクセスしやすい場所であると言える。ただし、近接中心性は他のノードまでの距離のみを用いて計算されるため、既に存在する店舗との位置関係は考慮できない。したがって、近接中心性に従って立地候補地を決定した場合、複数の施設がネットワーク上の同じエリアに集中する可能性がある。中心性指標の概念を拡張し、ノード群の協調的ふるまいを考慮するために、グループ中心性と呼ばれる指標が提案されている～[3]。文献～[3]では、グループ近接中心性の計算において、あるグループとグループ外のノードとの間の距離の定義として、最大距離、最小距離、平均距離を比較している。本研究の文脈では、住民は最寄りの施設に行く、すなわち、グ

¹ 東京工科大学 コンピュータサイエンス学部
School of Computer Science, Tokyo University of Technology
² 静岡県立大学 経営情報学部
School of Management and Information, University of Shizuoka
³ 神奈川大学 理学部
Faculty of Science, Kanagawa University
⁴ 理化学研究所 革新知能統合研究センター
Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN

ループ内ノードの中で最短距離のノードを選択する。したがって、最短距離に基づくグループ近接中心性に焦点を当てる。さらに、グループ近接中心性の目的関数を最小化するノード集合を見つけることは、グラフ距離に基づいて施設配置問題 (k -median 問題) を解くことと等価である。ネットワーク上での施設配置に関する研究として、文献~[1], [6], [7], [8] があげられるが、競合他社を含む複数のグループの存在は考慮されていない。本研究では、異なるグループ間の競争関係を考慮したグループ近接中心性を提案し、各グループの商圈を抽出し、グループ間の競争構造と新規施設開設の効果を分析する。

2. 関連研究

2.1 店舗の立地に関する研究

小池はカーネル密度推定によりポテンシャル値と呼ぶ立地の良さを定量化し、コンビニの立地場所を定める立地モデルを提案した [9]。ポテンシャル値が小さいほど立地に適していることを表し、各店舗はポテンシャル値が局所的に最小である場所に立地すると仮定した。立川・八王子の実データを用いた評価実験では、立地モデルによる分布と実際の店舗分布が類似していることを示した。さらに、対象地域においては、道路構造の影響力は人口の影響力の約 3.2 倍あり、道路沿いに立地しやすいことを示した。

Tabata らの手法では、ネットワークにおける近接中心性に基づくランキングで 1 位のノードを高速に計算し、そのノードを施設配置候補地としている [7]。すなわち、 k -medoids クラスタリングの貪欲法における第 1 代表ノードを高速に求めている。一般的に、複数の施設を設置することでより多くのノード (住民) の需要に応えることができ、それぞれの施設が影響を与える領域を抽出することで設置内容の戦略につながる。

伏見らの手法では、自然災害によって道路が塞がれている状況下でも多くの住民が到達できる避難施設の設置場所を推定する手法を提案している [10]。グラフのリンク切断により確率的に発生する道路閉塞をモデル化し、不確実な連結性の下での可到達ノード数の期待値を計算することで各ノードの連結度を定量化した。さらに、複数の設置場所を推定するために、単一ノードに対する連結度を拡張しノードグループの連結度を定義して、連結度を最大にするノードグループを抽出する手法を考案している。実際の道路網を使用した評価実験では、ノード間距離に基づく手法、リンク密度に基づく手法と比較して、提案手法の有効性と効率性を示している。

2.2 商圈分析に関する研究

小山らの研究では、配置済みの看板の勢力圏をマンハッタン距離に基づくボロノイ分割により抽出している [11]。これは、最短距離に位置する看板を閲覧することを前提と

している。前述したように、看板設置場所が移動の目的地であることは稀であり、最短距離に位置する看板を閲覧するというモデルには限界がある。通常は、任意のノードペア間の移動途中で看板を閲覧するのが自然なモデルである。本研究で焦点当てるコンビニ配置においても、コンビニが目的地になるモデルに加え、看板のように出発地から目的地への最短経路において多くの人が通過する経路地となるモデルも考える必要がある。

2.3 競合モデルに関する研究

本問らは従来店 (非効率的だが多様な施設) とコンビニ (効率的だが画一的な施設) の競合関係を、数理モデルを用いて明らかにしている [12]。店舗の選択にネスティッドロジットモデルを用いたうえで、「来客数が増えるなら”従来店”から”コンビニ”に転換する」というルールで時間発展するモデルを構築していた。結果として、従来店およびコンビニと競合する第 3 の業態が存在していた。従来店は互いに競合しないため、商店街を形成する傾向があった。コンビニの出店位置はチェーン内の物流の効率を重視して決定された。以上の 3 つの結論になっている。

2.4 空間ネットワーク分析に関する研究

Montis らは、自治体をノード、自治体間の通勤者トラフィックを重み付きリンクとした多重無向ネットワークを分析している [4]。次数とクラスタ係数の関係から自治体に階層性が存在すること、中心性指標と人口・富などに正の相関があることを示している。Park らは、道路ネットワークに対して中心性指標を適用し、そのエントロピーを計算することにより、住宅街と繁華街などのトポロジー構造の違いを評価している [5]。Crucitti らは、交差点間の距離重みを考慮した道路ネットワークを対象に 4 つの中心性指標の分布を分析している。中心性値分布のフィッティングパラメータやジニ係数により、類似道路構造をもつ地域を分類している [2]。このように、道路ネットワークの分析に関する研究では中心性が重要な役割を果たしている。

3. 問題設定

まず、本研究で扱う問題についてイメージ図を用いて説明する。対象地域の道路ネットワークにおける交差点ノードの集合を $\mathcal{V} = \{u, v, w, \dots\}$ 、交差点間のリンクの集合を $\mathcal{E} = \{e = (u, v), \dots\}$ とし、道路ネットワークを無向グラフ $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ として扱う。 $\mathcal{D} \subset \mathcal{V}$ を、既に施設 (店舗) が立地している交差点ノードの集合とする。次に、施設が設置されていない通常のノード $\mathcal{V} \setminus \mathcal{D}$ には地域住民が住んでおり、特定の基準に従って近くの施設を選択する。そして、その施設の商圈に含まれるとする。本研究では、施設からの距離を基準とする。図 1(a) は、道路ネットワーク上に 6 つの店舗 (赤グループの店舗が 3 つ、緑グループの店舗が

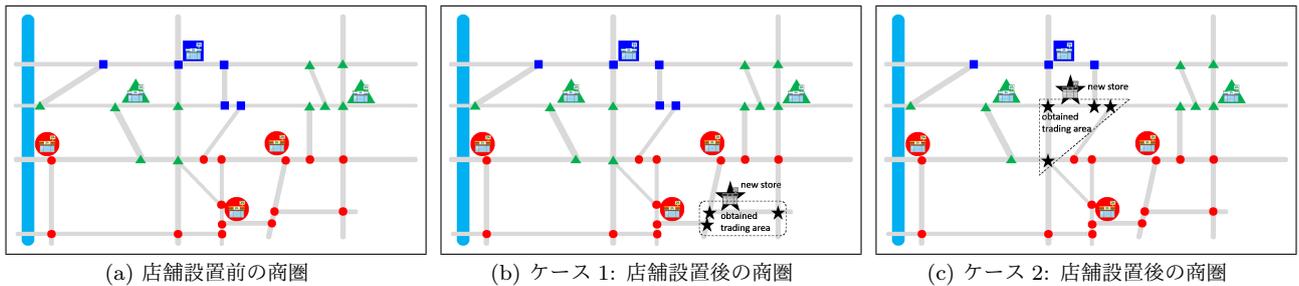


図 1 各店舗の商圏の変化

2つ、青グループの店舗が1つ)が配置されている例である。交差点ノードの色は、どのグループの商圏に含まれているかを示している。図 1(a)より、赤グループの商圏に14ノード、緑グループに10ノード、青グループに5ノードが含まれている。

次に、新しい店舗を配置することによって、その店舗およびグループが獲得できる商圏のサイズについて考える。1つの考え方として、新店舗を設置することで他グループの顧客(商圏に含まれるノード数)をより多く獲得できる場所に立地するのが望ましい。図 1(b)は、ネットワークの右下に新しい店舗を設置した際の商圏の変化を表している。図 1(a)と比較して、赤グループの商圏に含まれる3ノードを獲得できている。したがって、この立地場所は、赤グループの新店舗としては適切ではないが、競合する緑、青グループの新店舗の出店候補地にはなりうるということがわかる。図 1(c)は、ネットワークの中央に新しい店舗を設置した際の例である。この例では、緑グループの商圏から2ノード、青グループの商圏から2ノード獲得できている。したがって、この場所は赤グループにとって新しい店舗の候補地になりうるということがわかる。

4. 提案指標

次に、新店舗設置に際して、競合グループからより多くの顧客を獲得し、商圏を拡大するように立地候補地を求める提案指標について説明する。道路ネットワーク G における各リンク $e = (u, v) \in \mathcal{E}$ に対して、ノード間の移動時間 $t(u, v)$ を設定する。直接つながっていない任意のノードペア $(u, w) \notin \mathcal{E}$ に対しては、ノード間のパスのうち移動時間が最も小さいもの $t_G(u, w)$ を設定する。そして、各ノード $v \in \mathcal{V}$ に対して、周辺の人口を表す重み $n(v)$ を設定する。このとき、各施設ノード $v \in \mathcal{D}$ に対して、 \mathcal{D} のうち最も近い施設が v であるノードの集合を定義する：

$$\mathcal{C}(v; \mathcal{D}) = \{u \in \mathcal{V} \mid t_G(u, v) < \min_{w \in \mathcal{D} \setminus \{v\}} t_G(u, w)\}.$$

$\mathcal{C}(v; \mathcal{D})$ を施設ノード v の商圏と呼ぶ。 $t_G(u, v)$ をノード u, v 間のグラフ距離で定義した場合、全ノードの集合 \mathcal{V} を $\mathcal{C}(v; \mathcal{D})$ に分割することはボロノイ分割と等価である。さらに、最寄りの施設が v である住民の数を、以下のように

ノードの重み付き和で定義する：

$$f(v; \mathcal{D}) = \sum_{u \in \mathcal{C}(v; \mathcal{D})} n(u).$$

そして、施設ノード集合に追加する新店舗ノードとして、以下のように重み付き和が最大となるノードを選択する：

$$\hat{x} = \arg \max_{x \in \mathcal{V} \setminus \mathcal{D}} f(x; \mathcal{D} \cup \{x\}). \quad (1)$$

つまり、最も多くの住居がノード \hat{x} を最近傍施設としていることを意味する。

いま、各施設が K 個の競合グループのうち1つに属するとする。施設ノード $v \in \mathcal{D}$ が属するグループ番号を $z(v) \in \{1, \dots, K\}$ とし、最も近い施設がグループ k であるノードの集合を定義する：

$$\mathcal{V}_k = \bigcup_{\{v \mid z(v)=k, v \in \mathcal{D}\}} \mathcal{C}(v; \mathcal{D}).$$

さらに、最寄りの施設が x であり、 x がない場合の最寄りの施設のグループが k でない住民の数を、以下のようにノードの重み付き部分和で定義する：

$$f_k(x; \mathcal{D} \cup \{x\}) = \sum_{u \in \mathcal{C}(x; \mathcal{D} \cup \{x\}) \setminus \mathcal{V}_k} n(u).$$

そして、グループ k の施設ノード集合に追加する新店舗ノードとして、以下のように重み付き部分和が最大となるノードを選択する：

$$\hat{x}_k = \arg \max_{x \in \mathcal{V} \setminus \mathcal{D}} f_k(x; \mathcal{D} \cup \{x\}). \quad (2)$$

つまり、ノード \hat{x}_k に店舗が出店する前は最寄り施設のグループが k ではなかったが、 \hat{x}_k に出店した後は \hat{x}_k が最寄りとなった住民の数が最大となる立地場所であることを意味する。

5. 評価実験

5.1 データセット

評価実験では、都会である横浜市、地方の静岡市、これらの中間的な都市である八王子市を対象地域とし、対象地域内の道路ネットワークを OpenStreetMap *1より、コン

*1 <https://www.openstreetmap.org/>

表 1 各都市のノード数 (店舗数, 住民ノード数)

対象都市	g1	g2	g3	住民ノード	合計
八王子市	95	76	36	12,117	12,324
横浜市	492	417	428	123,379	124,716
静岡市	118	106	65	30,752	31,041

コンビニ店舗の位置情報を NAVITIME *2よりそれぞれ収集した。交差点ノード数 (住民) およびコンビニノード数を表 1 に示す。コンビニグループとして, 大手 3 社の g1: セブンイレブン, g2: ファミリーマート, g3: ローソンのみを用いる。今回の実験では, 住民は, 住宅地, 都市部, 山間部に関係なく各交差点ノードに均等に分布しているとす。すなわち, すべてのノード v に対して, $n(v) = 1$ とする。

5.2 比較に用いる指標

近接中心性は, 他の多くのノードへ少ないステップで行ける, ネットワークの中心にいるようなノードを抽出する指標である。ノード間の距離 $d(x, u)$ を用いて以下のように定義される:

$$clc(x) = \sum_{u \in \mathcal{V}, u \neq x} d(x, u).$$

本研究では, $clc(x)$ の値が最も小さいノード $\arg \min_{x \in \mathcal{V} \setminus \mathcal{D}} clc(x)$ に施設を配置する。以降, この手法を clc と表記する。

近接中心性は既存施設の設置場所を考慮せず, ネットワーク構造のみから設置場所を求めている。既存施設の位置を踏まえ, それらとの協調関係を考慮するように拡張したグループ近接中心性を定義する。グループ近接中心性では, 既存施設群 \mathcal{D} にノード $x \in \mathcal{V}$ を追加した際, 追加前の最短距離 $\delta(u, \mathcal{D}) = \min_{r \in \mathcal{D}} d(u, r)$ をどの程度減少させられたかに基づいて以下のように定義される:

$$gclc(x) = \sum_{u \in \mathcal{V} \setminus \mathcal{D}} \min\{d(u, x) - \delta(u, \mathcal{D}), 0\}.$$

本研究では, $gclc(x)$ の値が最も小さいノード $\arg \min_{x \in \mathcal{V} \setminus \mathcal{D}} gclc(x)$ に施設を配置する。以降, この手法を $gclc$ と表記する。すべてのノードに関して住民数を表す重み $n(v)$ が等しい場合, グループ間の競合を考慮せず既存施設から多くの商圈を獲得するノード, 式 (1) における \hat{x} と等価となる。

媒介中心性は, 多くのノードペア間の橋渡しをしているノードを抽出する指標である。ノード v, w 間の最短パス数 $\sigma_{v,w}$ とそのうちノード u を通る数 $\sigma_{v,w}(u)$ を用いて以下のように定義される:

$$bwc(u) = \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{w \in \mathcal{V}} \frac{\sigma_{v,w}(u)}{\sigma_{v,w}}.$$

本研究では, $bwc(x)$ の値が最も大きいノード $\arg \max_{x \in \mathcal{V} \setminus \mathcal{D}} bwc(x)$ に施設を配置する。以降, この手法を bwc と表記する。

5.3 出店候補地の抽出結果の比較

図 2 に, 各種指標に基づき抽出したノードに新規店舗を出店した際, 既存店舗から獲得できる顧客の数 (今回は $n(v) = 1$ のため, ノード数と等価) を示す。図 2 において, $prop(g1)$, $prop(g2)$, $prop(g3)$ は提案指標によりグループ g1 (セブンイレブン), g2 (ファミリーマート), g3 (ローソン) の視点で最良の候補地を抽出した結果である。gclc, clc, bwc は, 比較指標であるグループ近接中心性, 近接中心性, 媒介中心性により抽出した結果である。また, 棒グラフは獲得した顧客の内訳を表しており, 赤が g1, 緑が g2, 青が g3 の顧客を意味する。

図 2(a) の八王子市の結果を見ると, 既存施設との協調を考慮しない clc と bwc に比べ, 協調を考慮する gclc は非常に多くの顧客を獲得できている。しかし, グループ間の競合を考慮していないため, g1 の顧客ばかりを獲得している。グループ g1 の視点では, 望ましくない結果である。競合を考慮した g1 視点の $prop(g1)$ は, 他グループである g3 の顧客を多く獲得できている。このように, 提案指標は, 各グループの視点から協調と競合を考慮した最適な候補地を抽出できていると言える。

図 2(b) の横浜市の結果でも, g1 視点の $prop(g1)$ は g2 と g3 の顧客を多く, g2 視点の $prop(g2)$ は g3 の顧客を多く, g3 視点の $prop(g3)$ は多くの g2 の顧客と少しの g1 の顧客を獲得できるノードを候補地として抽出している。図 2(c) の静岡市の結果も, ほぼ同様の傾向が見られる。

図 3 に, 八王子市における抽出ノードを示す。図中の赤●が g1, 緑▲が g2, 青■が g3 の既存店舗の位置を表す。そして, ★が抽出した候補地を表す。他のノードは, そこに出店した際の期待獲得顧客数でグラデーションしている。図 3 の結果を見ると, 赤★に出店することで, 丸で囲った領域内のノードを獲得できる。

5.4 競合構造に基づく地域分類

次に, すべてのノードに対して, そこに店舗を出店した際に各グループから獲得できる顧客の期待数をベクトルとし, クラスタリングすることで地域の競合構造を分析する。本研究では, セブンイレブン, ファミリーマート, ローソンの 3 グループを対象としているため, 全 N ノードに対して 3 次元ベクトルが定義される。

図 4 に, k -medoids 法によりクラスタリングした結果を示す。クラスタ数は 7 とした。図中, 同じ色のノードは同じクラスタに属する, すなわち各グループから獲得できであろう顧客数の傾向が似ているノードであることを意味

*2 <https://www.navitime.co.jp/category/>

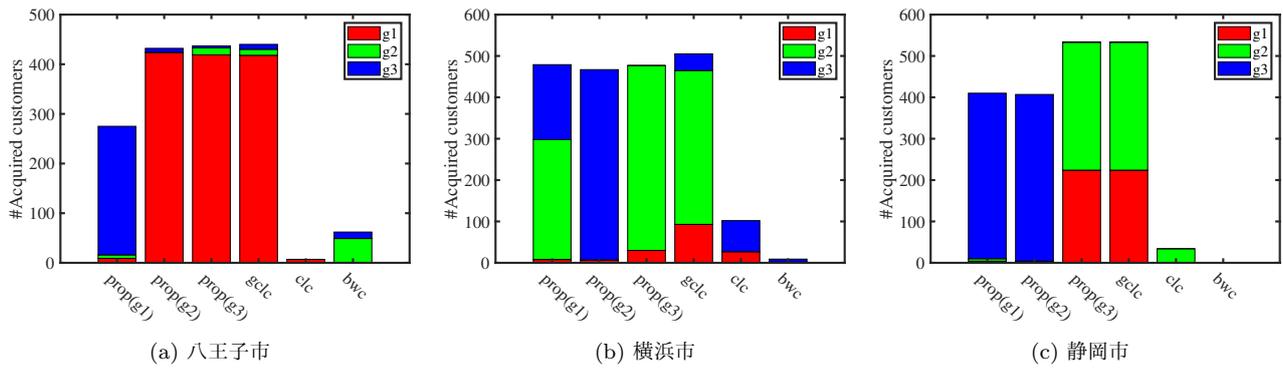


図 2 獲得顧客数

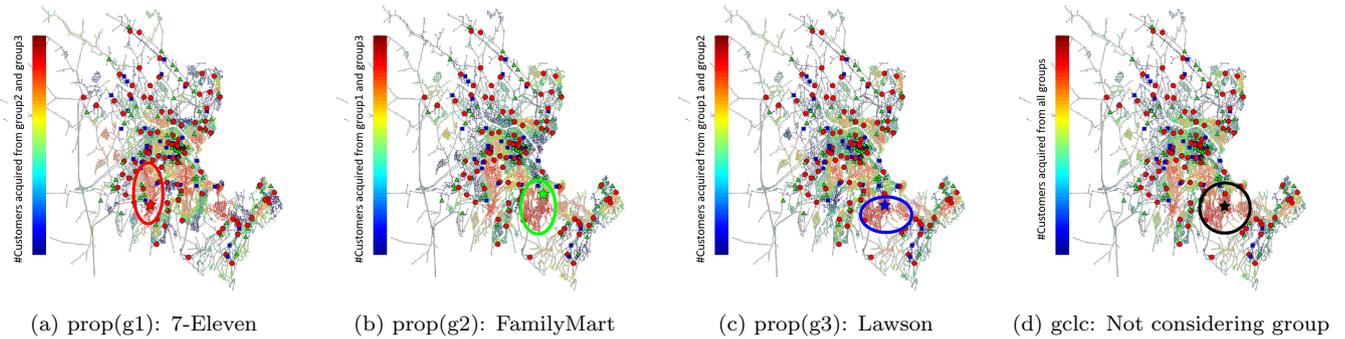


図 3 新店舗の出店候補地 (八王子市)

する。図中の棒グラフは、各クラスタの代表ベクトルである。図 4(a),(b),(c)の棒グラフを比較しながら見ると、いずれの都市でも、赤クラスタは獲得顧客数が同じくらいの割合であることがわかる。すなわち、3つのグループの顧客をバランスよく奪えるため、3つのグループ以外の第4のグループが出店する候補地として適した地域と言える。しかし可視化結果を見ると、そのようなノードはあまり多くはないことから、いずれの都市でも既存3グループの寡占状態であると言える。

緑クラスタは g2 の顧客を、青クラスタは g3 の顧客を、黄クラスタは g1 の顧客を多数獲得できることがわかる。これらのクラスタは3グループのうち、いずれか1グループの顧客を多数奪える地域であるため、他グループの店舗を閉店させる狙いがある場合などに適した地域と言える。特に、黄クラスタは3都市とも領域全体に広く分布していることが見てとれる。これらの領域はドミナント戦略によりセブンイレブンが非常に多く出店している地域である。桃、水、橙クラスタは、都市によりグループの組合せに違いはあるが、3グループのうち2グループの値が高いことから、それら2グループの競争関係が激しいことが伺える。このように、地域を期待獲得顧客数で分割することにより地域の競争構造を把握することができ、新規出店の決定に重要な役割を果たしていると言える。

6. Conclusion

本研究では、新規店舗の出店候補地を抽出すべく、グルー

プ内の協調とグループ間の競合を考慮したグループ近接中心性を提案した。近接中心性は他ノードとの平均距離を用いてアクセシビリティの高いノードを抽出できるが、既存施設の位置を考慮できない。グループ近接中心性は、既存施設との協調関係を考慮できるが、それらにグループ間競合の関係があることを考慮できない。これらの中心性概念を拡張した提案指標は、競合する他のグループの顧客、商圈をより多く奪えるノードを抽出できる。3都市の道路網とコンビニ大手3グループの実データを用いた評価実験により、比較に用いた既存の中心性指標と異なり、各グループの視点で最適な候補地を抽出できることを確認した。さらに、期待獲得顧客数を要素としたベクトルを用いた分析により、提案指標は地域の競争構造を把握でき、新規出店の決定に重要な役割を果たすことが示唆された。

今後の課題として、住民ノードが最近傍の1店舗を選ぶのではなく、店舗への距離に応じて確率的に選択するように一般化すること、店舗を目的地とした行動モデルだけではなく、経由地としたモデルを構築すること、また、店舗の開店閉店のダイナミクスを導入することなどがあげられる。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 (No.19K20417) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Agra, A., Cerdeira, J.O., Requejo, C.: A decomposition approach for the p-median problem on disconnected graphs. *Computers & Operations Research* 86, 79–85

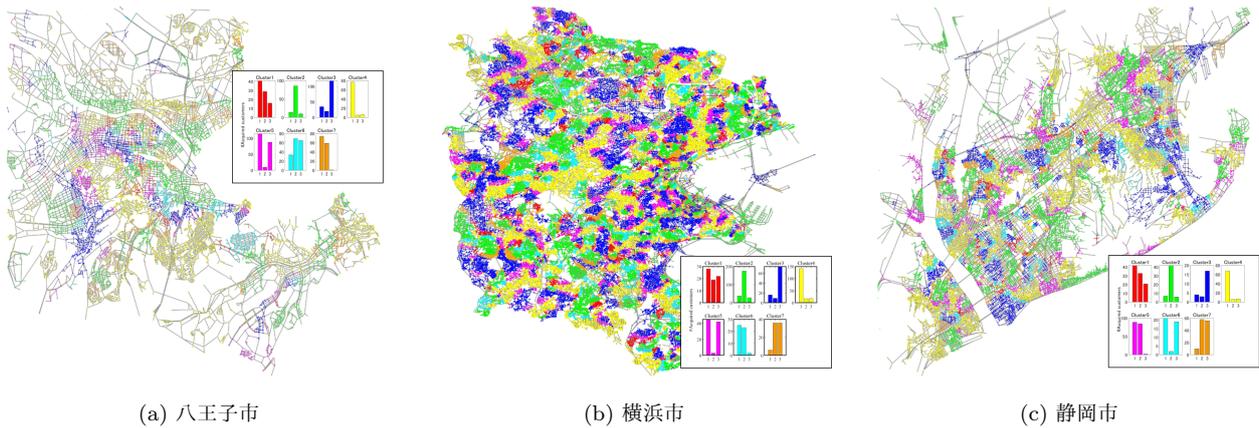


図 4 獲得顧客数に基づくクラスタリング結果 (クラスター数 : 7)

- (2017)
- [2] Crucitti, P., Latora, V., Porta, S.: Centrality Measures in Spatial Networks of Urban Streets. *Physical Review E* 73(3), 036125+ (Mar 2006)
 - [3] Everett, M.G., Borgatti, S.P.: The centrality of groups and classes. *The Journal of Mathematics Sociology* 23(3), 181–201 (1999)
 - [4] Montis, D.A., Barthélemy, M., Chessa, A., Vespignani, A.: The Structure of Interurban Traffic: A Weighted Network Analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design* 34(5), 905–924 (2007)
 - [5] Park, K., Yilmaz, A.: A Social Network Analysis Approach to Analyze Road Networks. In: *Proceedings of the ASPRS Annual Conference 2010* (2010)
 - [6] Rahmaniani, R., Ghaderi, A.: A combined facility location and network design problem with multi-type of capacitated links. *Applied Mathematical Modelling* 37(9), 6400–6414 (2013)
 - [7] Tabata, K., Nakamura, A., Kudo, M.: An efficient approximate algorithm for the 1-median problem on a graph. *IEICE Transactions on Information and Systems* E100.D(5), 994–1002 (2017)
 - [8] Thorup, M.: Quick k-median, k-center, and facility location for sparse graphs. *SIAM Journal Computing* 34(2), 405–432 (2004)
 - [9] 小池 光太郎：空間点分布を考慮したコンビニエンスストアの立地モデルの研究，大学院研究年報理工学研究科編，Vol.37，2007.
 - [10] 伏見 卓恭，齊藤 和巳，池田 哲夫，風間 一洋：災害時の道路閉塞を想定した道路ネットワークの空間分割，第 122 回数理モデル化と問題解決研究発表会 (MPS122)，2019.
 - [11] 小山 雅明，高橋 由樹，椎塚 久雄：ポロノイ図を用いた野立て看板のなわばりモデルの基礎的考察，日本感性工学会論文誌，Vol.14, No.1, pp.239–247，2015.
 - [12] 本間 健太郎，宇野 求：混在する“多様な施設 (従来店)”と“画一的な施設 (コンビニ)”の競合モデル，日本建築学会計画系論文誌，Vol.78, No.694, pp.2565–2571，2013.