

生活必需施設の配置と住民のトリップに着目したグラフカットに基づく生活圏検出手法の構築

只限 大暉¹・杉浦 聡志²

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)
E-mail: tdkmhrk@eis.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西)
E-mail: sugiura@eng.hokudai.ac.jp

激甚災害に備えて、物資輸送等について事前防災計画に関連する取り組みが進められているが、道路の被災パターンによっては被災地が孤立することも考えられる。孤立するときを想定すれば、生活に必要な施設に少ない移動コストでアクセスできる生活圏が形成させることが望まれる。本研究ではこの生活必需施設を中心とした生活圏を検出する手法を提供する。提案手法は画像のエッジセグメンテーション手法の 1 つであるグラフカットにより、住民の生活必需施設への需要と距離に着目したコミュニティ分割を行う。試算および実ネットワークでの適用より、需要を反映した生活圏の検出および可視化を行う。今後の大規模災害や自動車社会化の影響に対して、災害脆弱性や生活圏の拡大等を判断する 1 つの判断基準となることを期待する。

Key Words: : Community, Graph Cut, Trip, Edge Detection, Essential Facilities

1. はじめに

近年我が国では南海トラフ地震、巨大台風など、大規模災害が近い将来に起こるとされている。このような災害では輸送網への大きな被害が予想される。そのため素早く瓦礫や倒木などの障害物を取り除く道路啓開や、鉄道会社やトラック輸送会社と協力した救援物資輸送など、災害時の対応が計画されつつある。しかし、被害の大きさによっては被災地への救援物資の搬入経路が途絶し、進入することが困難となるケースも考えられる。このとき、啓開が完了するまでの数日間は被災地内で物資・サービスを調達する必要がある。こうした状況を想定したとき、生活必需を調達できる施設に小さな移動コストでアクセスできるような生活圏が形成されることが望ましい。本研究では市民の生命の維持に関わる施設を生活必需施設と定義し、施設を利用する市民の生活圏の推定を行う。推定された生活圏は災害への脆弱性などを分析する基礎単位として利用できる。生活圏が大きいうことはアクセスのために大きなコストがかかり、災害後に道路が寸断された場合に生活必需施設への到達が困難になる。このような生活圏は災害に対して脆弱であると言える。自動車交通の普及によって 1 つの施設群が受け持つ範囲が拡大し、生活圏は拡大している可能性が考え

られる。本研究は、生活圏の大きさや構造による災害脆弱性、および自動車交通の普及の影響を検討することを目指し、本稿ではまず、その基礎単位となる生活圏を検出する手法を提案する。この生活圏の検出する方法としてネットワークを分割する手法を援用するが、従来の手法とは異なり、画像解析で用いられる処理方法を用いる。具体的には、生活必需施設の配置と住民のトリップ、およびネットワークのトポロジーを用いて、画像解析分野で提案されているエッジセグメンテーションの手法により生活圏の検出手法を提案する。提案手法はテストネットワークに適用して挙動を確認する。くわえて岐阜県下呂市を中心としたネットワーク、移動需要データに適用した結果を示す。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

本研究では生活圏の特定のためにネットワークを分割する手法を用いる。ネットワークを意味のあるまとまりに分割する手法は、コミュニティ検出手法として多く知見が蓄積されている。例えば **Modularity**¹⁾ と呼ばれるコミュニティ分割の質を表す指標が用いられる。**Modularity** とは実際のグラフとランダムに結ばれたグラフとを比較し、グラフから抽出したコミュニティがランダムグラフ

から異なる, つまりランダム性が低く 1 つのまとまりであると判断出来る場合に 1 に近づき, ランダム性が高いと判断出来る場合に 0 に近づき, 0 から 1 で表される指標である. Ge et al.²⁾はこの値が最大となるコミュニティ分割手法(Louvain 法³⁾)を採用している. この手法は, Modularity を大きくするようなコミュニティを探索し, 次にそれぞれのコミュニティを 1 つのノードとして, ネットワークを縮小する. これらを Modularity の変化がなくなるまで繰り返し, コミュニティを検出する. Modularity に基づく方法は, ネットワークのトポロジーのみに着目した分割方法であり, 需要は考慮されない.

地図統計や顧客データを活用して新規店舗出店計画時の需要予測を行う商圈分析の分野では様々なモデルが構築されている. 山中⁴⁾ではいくつかのモデルに類型化されているが, このうち最も多くの成果が得られている小売引力モデルを参考にする. これは消費者は大きな店舗へ足を向けやすい. 但し, 近い方が良いという傾向を元に消費者が店舗に買い物をする確率を求める. Reilly⁵⁾は 2 つの都市がその間にある都市から顧客を吸引する割合を式(1)より計算する小売引力の法則を発見した.

$$\frac{B_a}{B_b} = \frac{P_a}{P_b} \times \left(\frac{D_{bx}}{D_{ax}} \right)^2 \quad (1)$$

ここで B_a は都市 a に吸収される販売額, P_a は都市 a の人口, D_{ax} はある都市 x から都市 a までの距離である.

また Converse⁶⁾により式(1)で求める B_a/B_b の値が 1 となる地点を商圈の境界の分岐点とし, これを求める式(2)のような商圈分岐点公式が導出された.

$$D_b = \frac{D_{ab}}{1 + \sqrt{\frac{P_a}{P_b}}} \quad (2)$$

ここで, D_b は都市 b と商圈分岐点の距離, D_{ab} は都市 a, b 間の距離である.

これをもとに Huff⁷⁾によって, 消費者が買い物先として選択する買い物施設を選ぶ問題に適用された. Huff は選択の確率が店舗の売場面積に比例し, そこまでの距離や時間に反比例する効用関数式(3)のように定式化した.

$$\pi_{ij} = \frac{S_j D_{ij}^{-\lambda}}{\sum_{j=1}^n S_j D_{ij}^{-\lambda}} \quad (3)$$

ここで, π_{ij} は居住地 i の消費者が店舗 j で買い物する確率, S_j は店舗 j の売場面積, D_{ij} は居住地 i から店舗 j までの距離や時間, λ は買い物行動に対する距離の影響を示すパラメータ, n は競合店舗数である.

この Huff モデルの効用を決定する変数である売場面積を魅力度 A , 距離や時間を抵抗度 R に代替し一般化を図ったものが式(4)で表される小売引力モデル⁸⁾である.

$$\pi_{ij} = \frac{A_j/R_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_j/R_{ij}} \quad (4)$$

里村⁹⁾では商圈分析を行うためのエリア・セグメンテ

ーションの手法として潜在クラスモデル, およびこれを利用したジョイント・セグメンテーション¹⁰⁾を用いている. 潜在クラスモデルは様々な種類が混在するデータを統計的にグループ分けを行い潜在構造を読み解くモデルである. ジョイント・セグメンテーションは利用目的と利用商品の二つそれぞれに潜在クラス分析を同時に行って消費者を分類している.

以上のようにリンクの密度や距離, 購入する確率によって領域を求める方法は数多く検討されているが, 基本的に消費量に基づいているため, 実態のトリップには着目していない.

本研究では, 道路ネットワークを明示的に考慮して, その上を移動するトリップを用いた指標に基づいて, 道路ネットワークを分割することで生活圏の特定を試みる. このネットワークの特性とトリップを考慮するために, 画像中の物体の色情報から前景と背景を分割するエッジセグメンテーションの手法を用いる. 画像のエッジセグメンテーションの手法も多く提案されているが, そのうちでグラフカットに基づくもの(Boykov and Jolly¹¹⁾, Li et al.¹²⁾)を援用する. この手法に住民の日常的な輸送を示す指標を導入することで, 生活圏を特定する手法を提案する. 住民の行動には距離の近さの他に, 需要が存在するかということも大きな要因の 1 つだと考えられる. この手法では住民の実際の行動に基づいたコミュニティ, 生活圏の検出を可能にする.

3. 提案手法

(1) 記号

本研究で用いる記号を以下のように定義する.

- N : ネットワーク中のノード集合. その成分は $n \in N$ で表記する.
- A : ネットワーク中のリンク集合. その成分は $a \in A$ で表記する.
- Π : 生活必需施設種類の集合. その成分は $\pi \in \Pi$ で表記する. (例えば $\pi = 1$: 病院, $\pi = 2$: 食料品店, $\pi = 3$...)
- T_π : 生活必需施設種類 π の施設ノードの集合 ($T_\pi \subseteq N$). その成分は $t_{\pi l} \in T_\pi$ で表記する. $t_{\pi l}$ は種類 π の l 番目の施設ノードである.
- u : 全ての生活必需施設の集合
- W : 対象とする生活圏の集合 $w \in W$
- Φ_w : 生活圏 w の生活必需施設の集合.
- c_a : リンク a の所要移動コスト. (時間, ガソリン代, あるいは運賃)
- y_n : ノード n が対象とする生活圏 w に含まれるなら 1, そうでなければ 0 をとる変数
- δ_F : 前景側 F の中心を意味する仮想ノード
- δ_B : 背景側 B の中心を意味する仮想ノード
- $f_n^{st\pi}$: ノード n における居住地 s から施設 t_π の需要通

過量
 $d_i^{\Phi_w}$: ノード*i*における生活圏内の生活必需施設を終点とする経路の通過量

(2) 提案手法の概要

本研究では生活圏の中心となる生活必需施設を事前に設定する。これは、生活圏の核となる地点を指定することを意味する。生活圏の推定とは、その核が受け持つ範囲を推定する問題として定義する。生活圏の核となる生活必需施設の集合 Φ_w は、想定する生活圏の数だけ定義する。いずれの生活必需施設についても、ネットワーク中のノードと対応させて定義する。すなわち、 $\Phi_w \subset N, \forall w \in W$ である。生活圏を特定するにあたり、各居住地から生活必需施設への需要が調査により既知であるとする。例えばパーソントリップ調査により得られるデータを想定する。一般的にこのような調査ではセントロイドと呼ばれるゾーンの代表点を起終点とする集計が実施されるため、一部のノードのみ生活必需施設への需要量をもつ。これはすなわち、多くのノードでどの生活圏に含まれるべきかの参照情報を与えることができないことを意味する。そこで本研究では、各居住地から生活必需施設までの需要がネットワーク上のノードを通過する量は、通過されるノードにおける生活必需施設への需要を代替的に表現すると考える。居住地の代表点よりも空間的に生活必需施設に近い場合には、代表点よりも生活必需施設を利用する可能性が高いと考えられることから、これを代替的に表現するものとも言えよう。ノードの通過量は居住地と生活必需施設への経路交通量を Dial¹³⁾のアルゴリズムを用いて求めることとする。Dial のアルゴリズムとは経路選択率を計算し、一定の確率を満たす経路のみを考慮するものである。まず(5)式より起点*r*から他の全ノードへの最小移動コストを計算する。

$$c(i) \leftarrow \min[r \rightarrow i] \tag{5}$$

(6)式より全リンクについてリンク尤度を計算する。ただし、 $\theta > 0$ である。

$$L[i \rightarrow j] = \begin{cases} \exp[\theta\{c(j) - c(i) - t_{ij}\}] & \text{if } c(i) < c(j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

起点*r*から*c(i)*の値の昇順 (*r*から近い順) にノードを考え、(7)式より各ノード*i*から流出するリンクの重みを計算する。(I_i はノード*i*へ流入するリンクの起点集合)

$$W[i \rightarrow j] = \begin{cases} L[i \rightarrow j] & \text{for } i = r \\ L[i \rightarrow j] \sum_{m \in I_i} W[m \rightarrow i] & \text{otherwise} \end{cases} \tag{7}$$

*c(i)*の値の降順 (*r*から遠い順) にノードを考え、各ノード*j*に流入するリンク交通量 x_{ij} を(8)式より計算する。ただし O_j はノード*j*から流出するリンクの終点集合であ

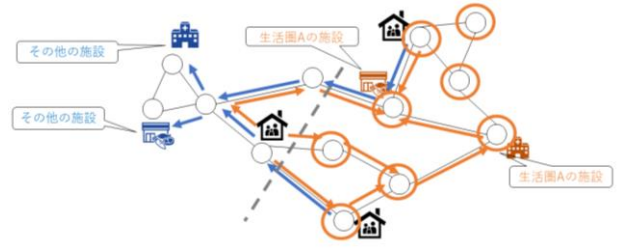


図-1 提案手法の概要

る。

$$x_{ij} = (q_{rj} + \sum_{m \in O_i} x_{jm}) \frac{W[i \rightarrow j]}{\sum_{m \in I_j} W[m \rightarrow j]} \tag{8}$$

この配分は全経路の中で最短経路の選ばれる確率が最大、コストの大きい経路ほど選択率が下がるという特徴を持っている。設定されたパラメータ θ を変化させることで最短経路を選択する確率が変化する。 θ が大きいと最短経路を選択する確率が高くなり、小さいと最短経路と遠回りをする確率が同値に近づく、つまりランダムに経路選択を行う。本稿では、リンク所要時間は混雑も考慮された平均的な値が外生的に与えられると仮定して、交通量配分のようなリンクコスト関数の更新による繰り返し演算はせず、ネットワークローディングを一度だけ行う。生活必需施設として設定されたノードは Φ_w に複数存在するため、ある任意の Φ_w に含まれるノードを目的的に持つトリップ数の和をそのノード*n*の Φ_w の通過量として(9)式で求める。

$$f_n^{st\pi} = \sum_{i \in I_n} x_{in}^{st} \tag{9}$$

ここで、 x_{in}^{st} は起点*s*、終点*t*のトリップにおけるリンク(*i, j*)を通過する交通量である。

得られた生活必需施設へのノード交通量に基づいて、任意の生活必需施設の集合 $\Phi_w | w \in W$ に対してエッジセグメンテーション手法による生活圏検出を行う。この操作を全ての生活必需施設の集合に適用することで、すべての生活必需施設集合に対する生活圏を特定する。具体的に図-1を例として手法の流れを整理する。ネットワークから複数の生活必需施設群を設定する。セントロイドからすべての施設への需要を示す OD 表から Dial のアルゴリズムで各ノードの通過量を求める。続いて対象(A)の生活圏に含まれる施設への需要を選択し、同様にして通過量を求める。全体の通過量から対象の施設へ向かう経路の通過量を引くことで、その他の施設へ向かう経路の通過量を求めることができる。この2つの通過量を重みとしたリンクとネットワークが持つリンクコストを重みとしたグラフを作成し、グラフカットを行う。以上より、A の生活圏が検出される。この操作を設定した生活必需施設群すべてで同様に行うことで、生活圏の検出が完了する。

(3) コミュニティ分割手法

提案手法ではコミュニティ分割手法のために Boykov and Jolly¹¹⁾が提案したグラフカットによるエッジセグメンテーションを援用する。彼らは画像の画素 1 つ 1 つに含まれる画素値を重みとしてもつノード，隣接画素の色の違いを重みとしてもつリンクで構成されたグラフを用いている。このグラフにおいて，(10)式に示すエネルギー関数を最小化するような分割を最大流問題によって導出する。

$$E(y) = \sum_{i \in V} \theta_i(y_i) + \lambda \sum_{(i,j) \in E} \theta_{ij}(y_i, y_j) \quad (10)$$

第 1 項はノードの重み，第 2 項はリンクの重みを表す。 θ_i は対象のノードが前景(Foreground)と背景(Background)のどちらの色に近いかを表す。 y_i は対象の画素に与えるラベルであり，前景なら 1，背景なら 0 となる未知変数である。 θ_{ij} は隣接した画素の色の近さを表す。 i, j が同じラベルならエネルギーは 0，異なるときエネルギーが生じる。 λ は二項間の重みパラメータである。このエネルギー関数に基づいて，最大流問題が適用できるようにネットワークを加工する。

図-2の画像を例題として解説する。図中の数字はグレースケールにおける画素値である。次にこの画像を図-3のようなグラフに変換する。図中の $\theta_{ij}(y_i, y_j)$ の値は画素間の色の近さを表現し，これをリンクの重みとして付与する。ノードの重み $\theta_i(y_i)$ は前景Fと背景Bのどちらに近いを示す。各ノードと仮想ノード δ_F および δ_B にリンクを接続し，そのリンクにノードの重みをそれぞれ与えることで前景，背景との近さを代替的に表現する。分析者が事前に前景側であると設定した画素については， δ_F と当該ノードを接続するリンクに ∞ の重みを， δ_B と当該ノードを接続するリンクに0の重みを与える。一方で背景側であると設定した画素については， δ_F と当該ノードを接続するリンクに0の重みを， δ_B と当該ノードを接続するリンクに ∞ の重みを与える。例題において，ノード1は前景，ノード4を背景であると事前に設定した場合，図-3のように重みが与えられる。事前に背景か前景を設定しないノードは前景として最もふさわしい色との近さに関連した重みを与える。ここでは黒，すなわち画素値0との距離を δ_F ， δ_B との接続リンクで重みとして与える。得られた図-4のようなグラフにおいて(δ_F, δ_B)間の最大流問題を求解し，最小カットを導出することで，エネルギー関数が最小となる分割を得ることができる。本研究では，この手法を住民の日常的な輸送を示す指標を導入することで，生活圏を特定する手法を提案する。住民の行動には距離の近さだけでなく，実際に需要が存在するかを考慮する必要があると考える。提案手法ではノードの交通量を考慮することでこれを達成する。

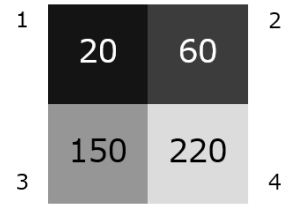


図2 例題の画像

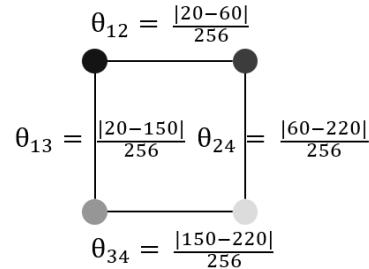


図3 グラフ化された例題画像およびリンクの重み

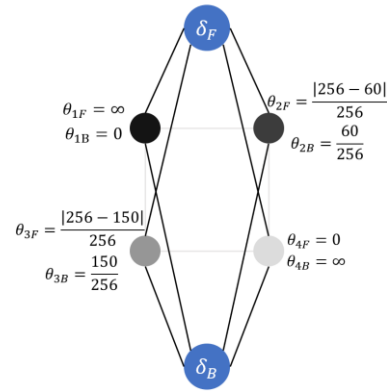


図4 仮想ノードと接続されるリンクの重み

(4) 生活圏検出の定式化

上記の最大流問題による分割を実行するための定式化を述べる。まず，ある 1 つの生活圏には事前に設定したすべての種類の生活必需施設のノードが 1 つずつ以上含まれることとする。すなわち， $\Phi_w = \{t_{1l}, t_{2o}, \dots, t_{l\pi l\rho}\}$ である。生活必需施設は例えば，医療施設，食料品店等を想定する。この選定は分析者が適当に設定する必要がある。設定された Φ_w を通常利用する人口が多い範囲を， Φ_w に対応する生活圏とする。また， $\Phi_\xi (= \cup_{\pi \in \Pi} T_\pi - \Phi_w)$ は対象の生活圏以外に存在する生活必需施設の集合とする。ネットワーク内のノード分割により生活圏を判定するため，交通ネットワーク上にエネルギー関数を与える必要がある。居住地から生活必需施設への需要量と道路ネットワークの特性をもとにしたエネルギー関数を与える。例えば，ある居住地sからある生活必需施設 $t_{\pi l} \in \Phi_w$ の需要量が大きく，距離も近いのであれば，この2つが分割されることは適当でない。一方で需要量

が小さく、距離が遠いのであれば居住地 s を対象生活圏に含めるのは不相当だと考えられる。エネルギー関数はこうした条件を踏まえて以下の(11)から(13)式の通りに定式化する。

$$\begin{cases} E_1(y_i = 1) = 0 & \forall i \in \Phi_w \\ E_1(y_i = 0) = \infty & \\ E_1(y_i = 1) = \infty & \forall i \in \Phi_\xi \\ E_1(y_i = 0) = 0 & \\ E_1(y_i = 1) = \frac{d_i^{\Phi_w}}{d_i^{\Phi_w} + d_i^{\Phi_\xi}} & \forall i \in N - (\Phi_w \cup \Phi_\xi) \\ E_1(y_i = 0) = \frac{d_i^{\Phi_\xi}}{d_i^{\Phi_w} + d_i^{\Phi_\xi}} & \end{cases} \quad (11)$$

where

$$\begin{aligned} d_i^{\Phi_w} &= \sum_{s \in S} \sum_{t_\pi \in \Phi_w} f_n^{st_\pi} \\ d_i^{\Phi_\xi} &= \sum_{s \in S} \sum_{t_\pi \in \Phi_\xi} f_n^{st_\pi} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sum_{a \in A} E_2(a) = |a_i - a_j| \cdot \frac{1}{c_a + 1} \quad (13)$$

(11)式、(12)式は2点間のノードがそれぞれ生活圏内外にそれぞれ分割されたときに距離を変数とした関数で与える。 Φ_w は対象生活圏 w の生活必需施設集合であるから、必ず前景側となるように重みが与えられる。一方で他の生活必需施設群 Φ_ξ は必ず背景側に含まれるような重みが与えられる。その他の判別すべきノードには Dial のアルゴリズムに基づく生活必需施設への需要における対象ノードの通過量を重みとして与えている。(13)式は隣接ノードとの距離に応じて与えられる重みである。リンク所要コストが大きい場合には、その両端点がそれぞれ違う集合に分割されやすく、その逆は同じ集合に分割されやすくなることを表現している。

(5) テストネットワークへの適用

前項までで定式化した最大流問題をテストネットワークに適用し試算を行い、どのような挙動を示すのかを確かめる。テストネットワークの概要、具体例を用いた手法の手順、結果・考察を記述する。

a) 手順

試算ではリンク数 76、ノード数 24 の Sioux Falls¹⁴⁾ ネットワークを用いる。このテストネットワークには居住地と施設の位置などの情報はなため、これらを設定する必要がある。居住地と施設の位置、および交通需要を表-1 のように設定した。4番を起点、1番を終点としたときのネットワーク上それぞれのノード通過量を Dial のアルゴリズムで配分する。この作業を表中すべての組み合わせに対して行い、ノードの全体通過量を算出する。推

定生活圏内の施設群(ノード1と7)を終点とする経路の通過量 $d_i^{\Phi_w}$ を算出し、全体通過量からこれを引くことで、その他の施設群(ノード18と21)を終点とする経路の通過量 $d_i^{\Phi_\xi}$ が算出できる。この2つの通過量の全体通過量に占める割合、つまり(10)式の $\frac{d_i^{\Phi_w}}{d_i^{\Phi_w} + d_i^{\Phi_\xi}}$ を仮想ノード δ_F とネットワーク上それぞれのノードを結ぶリンクの重み、 $\frac{d_i^{\Phi_\xi}}{d_i^{\Phi_w} + d_i^{\Phi_\xi}}$ をネットワーク上それぞれのノードと仮想ノード δ_B を結ぶリンクの重みとし、実際のネットワークのリンクに(12)式で求める重みとしてこれらを結合させたグラフを作成する。このグラフを Python のモジュールである NetworkX で最小カットを行い、結果を得る。

b) 結果と考察

試算を行い、生活圏の検出をした結果を図-5に示す。これより明らかだが、生活圏内の施設へ最短でたどり着くことのできるノード(0, 5, 6, 8, 15)はAの生活圏

表-1 居住地から生活必需施設への交通需要

		生活必需施設 (終点)			
		Φ_w (Aの施設)		Φ_ξ (その他の施設)	
		1	7	18	21
居住地 (起点)	4	100	500	100	200
	10	200	800	400	1100
	13	100	400	300	1300
	23	0	200	100	1100

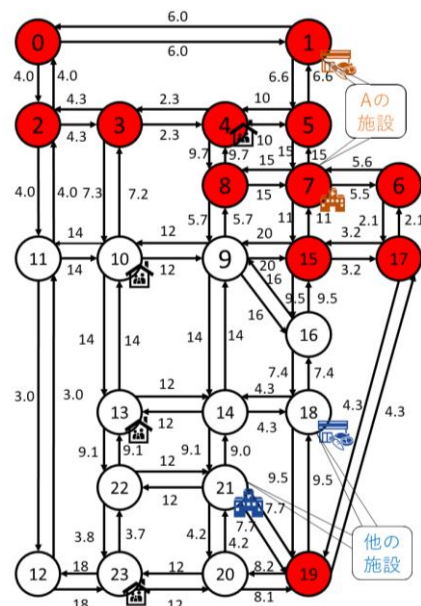


図-5 生活圏検出の結果

に含まれることがわかる。また、先ほどのノードに隣接するもの (2, 4, 9, 17) も9番を除き生活圏に含まれている。ここで9番のノードに注目しよう。距離はAの施設に近いものの、需要がその他の施設との間で大きいため、Aの生活圏の外にあると判定された。ノード10, 11についても同様のことが言える。一方でノード19はその他の生活圏の施設に隣接しているにも関わらず、Aの生活圏に含まれると判定された。Dialのアルゴリズムから得られる経路選択率を確認したところ、居住地ノード23を起点、生活必需施設ノード7, 18を終点とする経路のみがノード19を通過することが分かった。前ページ表-1においてノード23から7, 18への交通需要は、7のノードに向かう方が大きい。この需要の大小関係によってノード19はAの生活圏に含まれた。以上より、生活圏に含まれているノードは距離が近い、需要が多い、あるいはその両方を満たしていることがわかる。この結果は地図の見た目や距離だけでなくトリップに注目した本研究の特徴であると言える。

4. 実ネットワークへの適用

(1) 下呂市ネットワーク

下呂市は岐阜県の東部に位置する人口約3万人、南北約45km、東西約35kmに広がる面積約851km²の都市である。山林が全体の約9割を占め、中央を流れる飛騨川に沿った平坦地とゆるやかな斜面を利用して、農業地、商業地、住宅地などが混在する。地目別では森林(91.05%)、農用地(1.50%)、宅地(0.90%)、道路他(6.55%)となっている¹⁵⁾。図-6は下呂市のリンク数3473、ノード数2674の道路ネットワークを示したものである。十字の地点は生活必需施設の位置を示す。

(2) 分析手順

まずは地図を参照し、生活圏を推定する。本試算では、ネットワークのうちAからLの12つの生活必需施設群を設定した。岐阜県下呂市の住民を対象に実施されたアンケート調査をもとに居住地の代表地点から施設までのOD表を作成する。ここで起点となる居住地の代表地点は69か所、終点となる施設は54か所である。

前章のテストネットワークでの試算と同様にOD表の全ての組み合わせに対してDialのアルゴリズムにより通過量を求め、ノードの重みを計算する。ここでリンクの重みにはグラフカットが行われるように任意のパラメータλ(今回は0.02)を乗ずる。グラフは元のネットワークの3473のリンクに、仮想ノード(δ_F, δ_B)と元のネット

ワークの2674のノードを結ぶリンクを加えるため、8821のリンクを持つグラフとなる。このグラフにおいて δ_F, δ_B 間の最大流問題を求解し、最小カットを求めることで、Aの生活圏を得る。B~Lの施設群に対しても同様の操作を行って、B~Lの生活圏を得る。最後に得られた生活圏を地図上に反映させ、生活圏の位置、範囲の大きさを可視化する。

(3) 生活圏検出結果

図-6は下呂市のネットワーク上に各生活圏に含まれるノードを生活圏別の色を与えて、生活圏の可視化を行った結果である。どこの生活圏にも属さなかったノードは白色としている。

配色の分布を確認すると、生活必需施設群を中心としてある程度の大きさを持った生活圏が検出されていることがわかる。D, E, F, Lのように1地点に多くの施設が集中している生活圏は広範囲に広がっていることがわかる。表-2で示すように、E, F, Lではその生活圏内で半数以上の需要が満たされており、需要に基づいた生活圏の検出がされていると言える。またDについては、半数以上の需要は満たされてはいなかったが、極端に少ないのではなく、ある程度の需要を満たしており、需要と距離の両面に基づいた生活圏の検出がされたと言える。

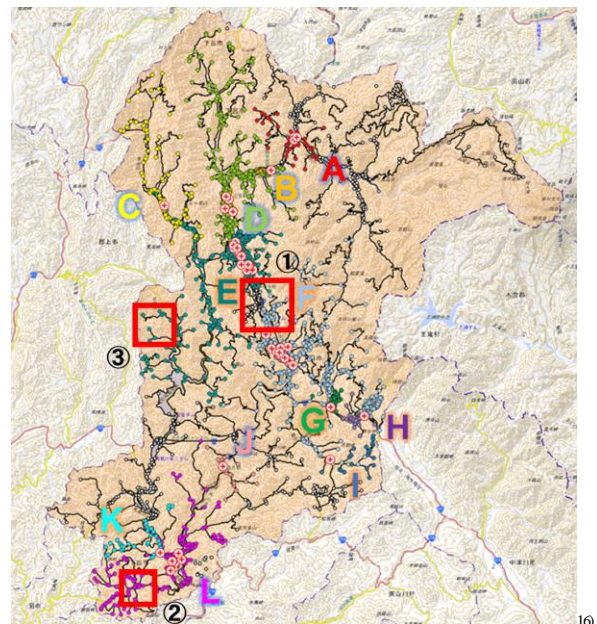


図-6 生活圏検出の結果

表-2 一部生活圏のトリップ

	C	D	E	F	L
圏内のトリップ	2	226	420	625	147
トリップ合計	57	583	650	1019	293

一方でCのように施設が少なく、需要も小さい生活必需施設群の生活圏に含まれるノードは、他の生活必需施設群への需要も大きく、一つのノードが二つの生活圏に含まれる例も見られた。ここでは二つの生活圏に含まれるノードについては、描画上困難であることから、Dial のアルゴリズムにより算出された通過量を比較し、より大きい方の生活圏に含まれるとした。

次にどこにも属さなかったノードについて考察する。図中左上や右下の領域に見られるように、主に人口が著しく少ないと思われる山間地・森林地域であり、いずれの生活必需施設へも需要が発生しなかったことが原因だと考えられる。

一方で、図-7で拡大している①の地域は飛騨川沿いに位置し、集落がある。しかしながら、生活圏検出の結果ではどの生活圏にも属さない結果が得られている。この地域はEとFという下呂市の中でも特に需要の大きな施設群のちょうど中間に位置している。そのため、どちらかの生活圏に含まれると考えるのが自然である。そこでこの地域の2つのセントロイドの位置を調べると、図-7のように丸で囲った箇所となっており、それぞれがEとFの生活圏の端点にあたるのが分かった。つまり、この地域はセントロイドの配置によって、周辺のノードの通過量が0になったため、どちらの生活圏にも含まれないという結果になったと考える。

さらに、Dial のアルゴリズムの結果では、ノードの通過量が0となるノードも存在した。しかしながら、これらの多くは、近隣のノードがいずれかの生活圏に近いと重みがついたとき、そのノードからの距離によって、すなわちリンクの重みによって隣接するノードと同一の生活圏に含まれていた。例えば図-8で丸で囲ったノードは通過量が0であったが、周りのノードはLに含まれるため、距離の関係からLの生活圏に含まれると判定された。このようにDial のアルゴリズムの特性や課題を含んでいても隣接ノードとの関係が考慮されて生活圏が検出されていることがわかる。これらも需要と距離によって生活圏を検出する提案手法の特徴であるといえる。

今回得られた結果から災害への脆弱性や考えられる施策について考察する。前述の通り、受け持つ生活圏がかなり大きいものもある。図-9のようにこれらの施設群から離れた地域は山間部が多く、道路が1本しか通っていないため、地震や大雨で土砂崩れが起こった際に道路が

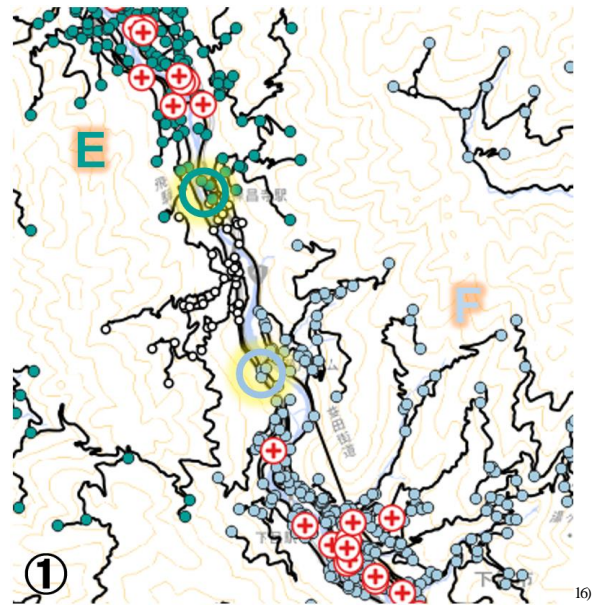


図-7 ①の拡大図



図-8 ②の拡大図

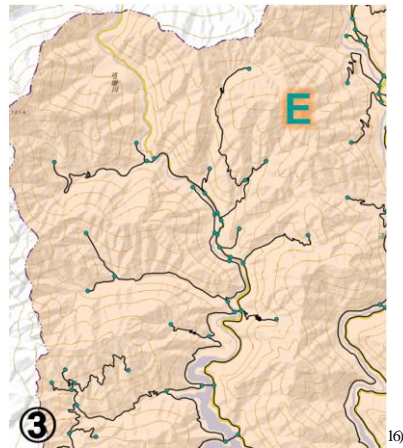


図-9 ③の拡大図

寸断されて孤立する可能性が高い。災害に対しての脆弱性が大きいといえる。考えられる施策として、まず施設を増やすことが挙げられる。施設を増やすことで需要を分散させて生活圏を小さくすることができる。しかし、単純に施設を設置するだけで需要が分散するかが不明瞭であり、需要の少なかった地域に施設を設置することは

利益の観点からはあまり得策ではない。

現実的なものとして、寸断された場合に孤立が発生する地域の道路を補強することや周辺を切り開いて倒木などを移動できるようにすることが挙げられる。さらに道路ネットワークの構造を考慮すると、施設群の周辺の住民には避難の際の車の使用を控えるよう要請することも、山間部の住民の避難との合流による渋滞を防ぐために重要だと考えられる。

5. おわりに

本研究では災害時の孤立等に備えて、災害脆弱性や自動車交通の普及の影響を検討することを目指し、生活必需施設を利用する市民の生活圏の推定を行った。画像解析分野で提案されているエッジセグメンテーションの手法の1つであるグラフカットを援用することで、住民の行動の理由となる需要と距離に着目したネットワークを作成し、コミュニティ分割を行った。試算および実ネットワークでの適用より、需要を反映した生活圏の検出および可視化を可能にした。

またこの結果から災害への脆弱性、考えられる施策などの考察を行った。今後の大規模災害や大きなショッピングモールの建設などによる自動車社会化の影響に対して、災害脆弱性や生活圏の拡大等を判断する1つの判断基準となることを期待する。

本稿での試算ではノードの重みを施設群への通過需要とし、Dial のアルゴリズムで求めたノードの通過量としていた。しかしこのアルゴリズムはコストの差に基づいて確率を決定するため、欠点として5kmと10kmの2経路と120kmと125kmの2経路を同一の確率で選択することや経路が限定されてしまうことが挙げられる。よって今後は経路限定をしないマルコフ配分やロジックモデルではなく確率を正規分布と仮定したプロビットモデルを用いた交通量配分を導入することも考えられる。

また、リンクの重みをリンクコストの逆数とし、ここではリンクコストを距離としていた。しかし、需要を考慮する上では施設に到達するまでの時間をコストとした方が良い可能性もある。さらに自動車での移動を考慮する場合は、交差点や曲がり角の数をコストとすることも検討する余地があるだろう。生活圏に含まれるノードはDial のアルゴリズムのパラメータによっても変化する。この影響については今後検討が必要である。下呂市のネ

ットワークへの適用ではそれぞれのパラメータをある値に基づいた一つの結果を示したが、以上の課題を踏まえば、パラメータによる感度分析が必要であり、これが住民の行動と見比べて現実的な結果を得られるか確認する必要がある。

また、提案手法はパーソントリップ調査等の住民トリップに関する起点と生活必需施設への需要が把握できるデータとネットワークのみが入力として必要であることから、他地域への応用が可能である。本稿では岐阜県下呂市を対象とした分析を示したが、パーソントリップ調査等のデータが蓄積されている都市ネットワークに対しても提案手法を適用することで、手法のパフォーマンスに関する知見を蓄積する必要があるだろう。

検出された生活圏はその内部で分割されると通常な生活が困難となる単位と考えることができる。この内部での道路網が分割するような外力に対して脆弱であるかの評価は事前の道路整備施策や地区が備えるべき要件について防災計画等で考慮する重要な情報を提供できるだろう。そのため、この手法は地域防災計画の助けとなることを最終的な目標としている。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 21H01452 によって実施された。また、岐阜県下呂市の分析に用いた住民の移動データ、ネットワークデータは岐阜大学倉内文孝教授の研究室から貸与した。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) Newman, M.E.J. and Girvan, M.: Finding and Evaluating Community Structure in Networks, *Physical Review E* 69, 026113, pp.1-16, 2004.
- 2) Ge, Q., Wang, P. and Fukuda, D.: A Community Detection for Identifying Neighborhoods. *Proceedings of the 21st HKSTS Conference*, 2016.
- 3) Blondel, V. D., Guillaume, J.L., Lambiotte, R. and Lefebvre, E.: Fast unfolding of communities in large networks, *J. Statist. Mech.: Theory Exp.*, vol. 2008, no. 10, 2008.
- 4) 山中均之：小売商圈論，千倉書房，1977年，pp.5-6.
- 5) Reilly, W. J. (1929). Methods for the study of retail relationships. University of Texas Bulletin, Monograph 4, n. 2944.
- 6) Converse P.D, "New Law of Retail Gravitation," *Journal of Marketing*, Vol.14, pp.134-143, 1949
- 7) D. Huff : "Detetmination of Intra-Urban Retail Trade Areas," *Publication of Retail Estate Research Program, Graduate School of Business Administration, Divisions of Research*, 1962
- 8) 中西正雄：小売吸引力の理論と測定，千倉書房，

- 1983.
- 9) 里村卓也：商圈分析のためのエリア・セグメンテーション，経営の科学 オペレーションズ・リサーチ，Vol50, No.2,2005.
 - 10) V. Ramaswamy, R. Chatterjee and H. S. Cohen: “Joint Segmentation on Distinct Interdependent Base With Categorical Data,” *Journal of Marketing Research*, Vol. 33, pp. 337-350, 1996
 - 11) BOYKOV, Y., AND JOLLY, M. P.: Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in n-d images. *In Proceedings of ICCV 2001*.
 - 12) LI, Y., SUN, J., TANG, C. K., SHUM, H. Y.: Lazys-napping. *In Proc. of ACM SIGGRAPH '04*, 303-308, 2004.
 - 13) Dial, R. B : A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration, *Transportation Research*, Volume 5, Issue 2, 1971, USA, Pages 83-111
 - 14) Leblanc, L. J., Morlok, E. K., Pierskalla, W. P.: An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem, *Transportation Research*, Vol.9, pp.309-318, 1975.
 - 15) 岐阜県下呂市：下呂市の概況
(<https://www.city.gero.lg.jp/soshiki/9/735.html>)
(2022.2.1 閲覧)
 - 16) 国土地理院ウェブサイト
(<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>)
(2021.12.23 閲覧) より国土地理院タイルを使用し，推定生活圏やノード，リンク等を追記