

空間データにおけるネットワークボロノイ領域の分析方法

Applications of Network Voronoi Diagrams for Spatial Analyses

相馬 絵美*・橋本 雄一**

Emi SOMA* and Yuichi HASHIMOTO**

キーワード：ネットワークボロノイ領域、空間データ、GIS、札幌市、避難場所

Key words : Network Voronoi region, spatial data, GIS, Sapporo city, shelters

Abstract

This study discusses applications of Network Voronoi diagrams for spatial analyses. I compared Network Voronoi diagrams with plane Voronoi diagrams. This method does not make network cells on the line of the network, but makes areas using network distance. In this method, a plane Voronoi region is made for every node on a street network. The nodes have the nearest shelter point from them by network distance, and the shelter point holds the area of those nodes and makes one region, a Network Voronoi region. This method can overlay the point data on a plane and a network, and we represent moving by the nearest street. As a case study, I calculate the shortage of shelters' capacity using Network Voronoi diagrams. The study area is central Sapporo city. In this case, a Network Voronoi region represents the area that residents move to near shelters on street. This result shows applications of this method, Network Voronoi diagram for spatial analyses.

I. はじめに

本研究は、空間データにおけるネットワークボロノイ領域の分析方法について考察することを目的とする。そのため、ネットワークボロノイ図と、従来から利用してきた平面ボロノイ図との比較検討を行う。

ボロノイ図とは、平面空間上に複数の母点が配置されている時、任意の母点と、その近隣の母点とで、空間を分割することにより作成される図である(図1)。一般的なボロノイ図の場合には、母点数とボロノイ領域数が一致する。ボロノイ領域の境界線を「ボロノイ境界」と呼び¹⁾、このボロノ

イ境界の交点が「ボロノイ点」である。任意の3母点の外接円を描いた時、その円の内部に他の母点が存在しない場合、その円の中心がボロノイ点となる。この平面上に生成されるボロノイ図が、「平面ボロノイ図」である。

これに対してネットワークボロノイ図は、平面空間の代わりに、連結した線分の集合であるネットワーク空間を前提としたものである(図2)。例えば、住民による市街地での歩行動態は、直線距離よりも道路距離を仮定したネットワーク空間での分析が現実的である。そのため、その歩行動態の圈域などを分析する際には、ネットワークボロ

* 北海道大学大学院文学研究科・院生

* Graduate Student, Graduate School of Letters, Hokkaido University

**北海道大学大学院文学研究科

**Graduate School of Letters, Hokkaido University

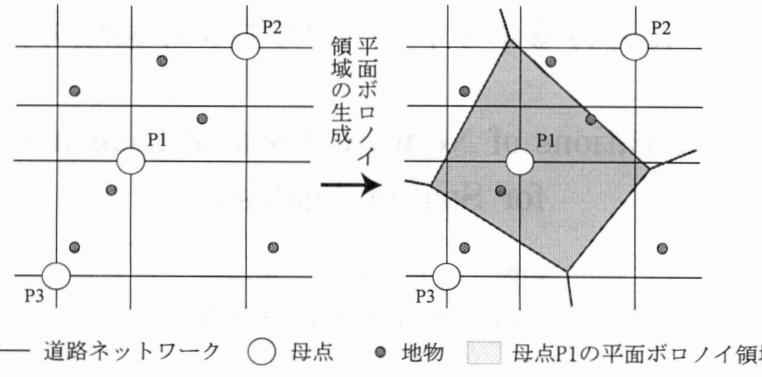


図1 平面ボロノイ領域の生成

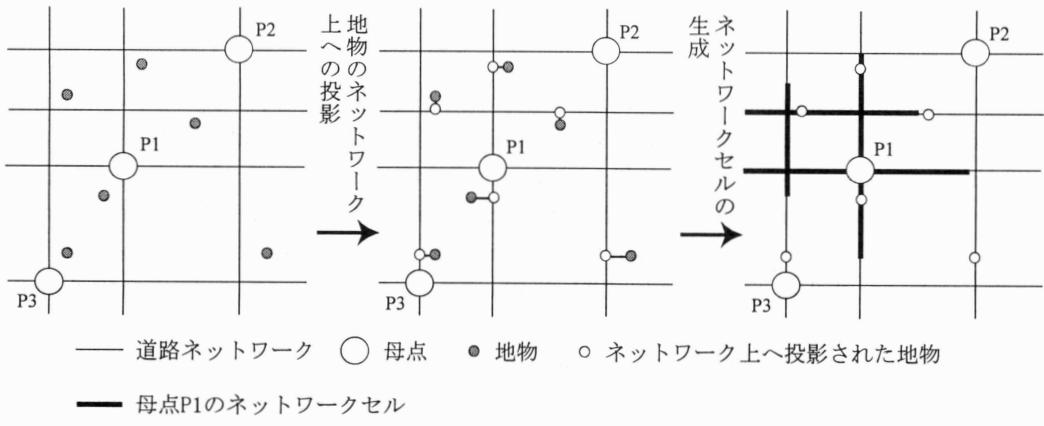


図2 ネットワークセルの生成

ノイ図の利用が有効となる。

従来のネットワークボロノイ図に関する手法は、ネットワーク上の地点情報の分布状況や、分布間の相互関係を分析するものが主である。その事例としては、ネットワーク上での最近隣法(四茂野, 1993)、ネットワーク上でのハフモデルを拡張した商圈確定法(北村・岡部, 1995)、ネットワーク上でのK閾値法(山田・岡部, 2000)が挙げられる。また、ネットワーク上に存在する点の分布状況を計測するネットワークセルカウント法(塩出・岡部, 2004a)やネットワーククランプ法(塩出・岡部, 2004b)なども存在する。さらに、ネットワーク空間分析ソフトウェア「SANET」は、ネットワーク距離を用いた移動行動などのネットワーク空間事象を対象にした分析を可能としている(佐藤・岡部, 2005)。このソフトにおいてボロノイ図は、ネットワーク空間上のネットワークセルとしてのみ生成される。そのため、ネットワー-

クから外れた場所に位置するポイントは、ネットワークの最近接に投影され分析が行われる(岡野・岡部, 2005; 奥貫ほか, 2006)。

これらの手法に対し、本研究で行うネットワークボロノイ領域分割は、任意の母点と到達距離が最短になるノードを基点とした平面ボロノイ領域を、母点に属する領域として生成される(図3)。この手法は、ネットワーク空間上における線の分割ではなく、ネットワークに基づく平面空間の分割であるため、他の空間データとの重ね合わせなどの分析が可能となる(相馬・橋本, 2005)。

II. ネットワークボロノイ領域の定義

本研究におけるネットワークボロノイ領域を、Okabe *et al.* (2000) を参考にして定義すると以下のようなる。まず、ネットワーク上のノードを q 、この空間上(平面空間およびネットワーク空間を含む)の任意の点を r 、ネットワーク上の 2 点間

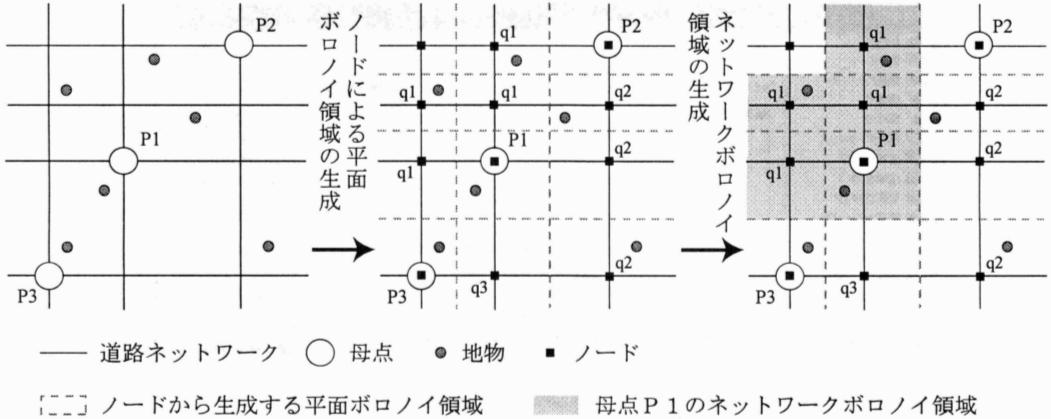


図3 ネットワークボロノイ領域の生成

の距離を d とすると、任意のノード q_g を基点とした平面ボロノイの領域 V は式1のように表せる。

$$V(q_g) = \{r | d(r, q_g) \leq d(r, q_h)\} \quad (g \neq h = 1, \dots, l) \quad (\text{式 } 1)$$

ただし、 l はノードの総数である。次に、ノード q のうち、ボロノイ領域の母点 p_i への到達距離 $d(q, p_i)$ が最短になる $q(p_i)$ は式2のように表せる。

$$q(p_i) = \{q | d(q, p_i) \leq d(q, p_j)\} \quad (i \neq j = 1, \dots, m) \quad (\text{式 } 2)$$

ただし、 m は母点の総数である。ノード $q(p_i)$ に該当するものを s_k とすると、母点 p_i の平面ボロノイの領域 $V(p_i)$ は式3のように表せる。

$$V(p_i) = V(s_k) \quad (k = 1, \dots, n) \quad (\text{式 } 3)$$

ただし、 n はノード $q(p_i)$ に該当するものの総数である。任意の母点と到達距離が最短になるノードを基点とした平面ボロノイ領域を母点が保有する。母点 p_i のネットワークボロノイ領域は $V(s_k)$ の集合として生成されるため、この母点に関するネットワークボロノイ領域 N は式4のように表すことができる。

$$N(p_i) = \{V(s_1), \dots, V(s_m)\} \quad (\text{式 } 4)$$

以上のことから、ネットワーク領域分割図は式5のように定義できる。

$$N = \{N(p_1), \dots, N(p_m)\} \quad (\text{式 } 5)$$

従来のネットワークボロノイ図の生成方法と異なり、本研究ではノードから一時的に平面ボロノイ図をつくり、その保有关係をネットワーク上の距離に基づいて規定することで、ネットワークボロノイ領域を生成する。この操作により面的領域を生成できるため、ネットワーク空間上のデータだけでなく、平面空間上データに対してもオーバーレイ分析を施すことが可能となる。

III. ネットワークボロノイ領域生成のための作業手順

本章では、前述したネットワークボロノイ領域を生成するための具体的な分析の操作について説明する。なお、本研究では、マップコン社製のGISソフト「PC-Mapping」のネットワーク空間解析ツールを用いる。

ここでは学校施設への地域住民の徒歩移動を事例とし、道路ネットワークによる領域生成を試みる。このネットワークボロノイ領域の生成にはネットワーク状のアーケ（ライン）と母点となるポイントデータが必要となるので、国土地理院刊行の数値地図25000（空間データ基盤）に含まれる道路ネットワークおよび公共施設データを用いる。札幌市北西部を対象地域として、札幌市中央区、北区、西区、東区の道路および施設データを取り込む。

PC-Mappingを起動し、〔ファイル〕→〔新規作

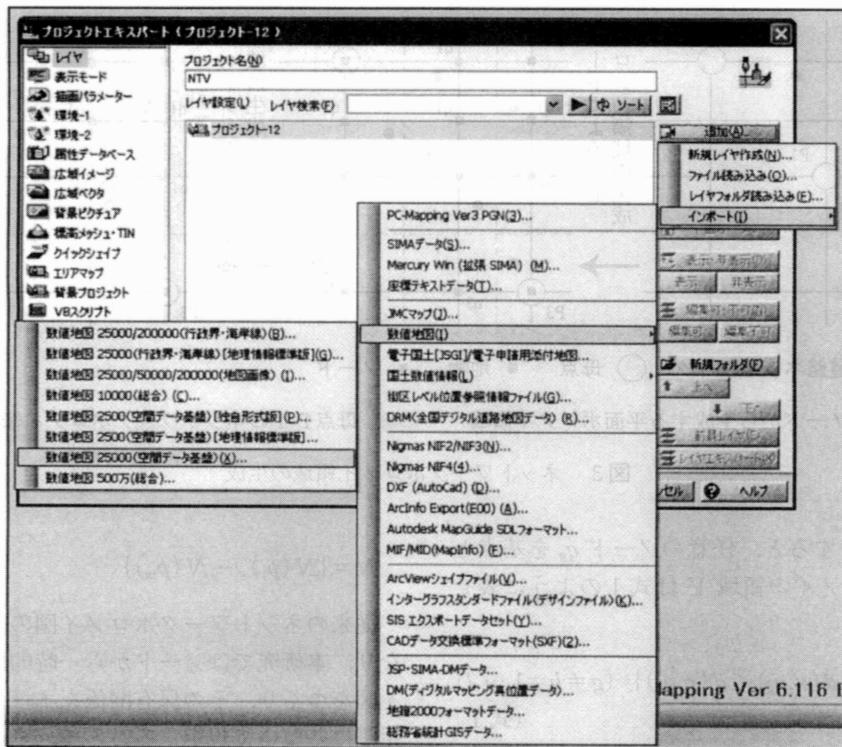


図4 数値地図データのインポート

成]→[プロジェクト]をクリックすると、「プロジェクトエキスパート」ダイアログが表示される。プロジェクト名を「NTV (ネットワークボロノイの略称)」と入力し、「追加」ボタンから〔インポート〕→〔数値地図 25000 (空間データ基盤)〕を選択する(図4)。ファイルの選択ダイアログが表れるので、予め数値地図 CD-R 内の圧縮ファイルから解凍したデコードデータを選ぶ。ここでは、道路ネットワークのデータ(アーチつまりライン)は、ファイル名の最後に'DK'が付くので、選択して取り込む。同様に、母点となる公共施設のポイントデータのデコードデータ(ファイル名の最後に'KO'が付く)を取り込む。これで、今回の分析に必要な空間データの取り込みができる²⁾。

次に、分析に適した内容のデータに加工する。数値地図には、公共施設として学校以外にも郵便局や病院などの施設が含まれているので、まず本分析で用いる学校施設だけを抜き出す。公共施設のポイントデータレイヤを前景に設定し、属性選択から名称に「学校」を含むポイントを選択し(末尾一致「学校」または種類区分「6」)，その選択

を反転させ学校以外の公共施設を選択した状態にする。〔編集〕→〔選択編集〕→〔アーク・ポイント削除〕で学校以外の公共施設ポイントを削除できる³⁾。

次に、道路ネットワークのうち、分析に必要な種類区分の道路(アーチ)を消去し、複数のレイヤになっている3つの道路データを統合することで、ひとつのネットワーク空間をつくる。〔属性〕→〔属性ウィンドウをひらく〕→〔アーチ属性〕で属性レコードウィンドウをひらき、「レコードの検索」から「種別区分」=1, 2, 4(庭園路1, 石段2, 高速4)として選択する。〔リンク〕→〔選択状態をベクタへ転記〕を行い、ベクタ画面(地図表示ウィンドウ)に戻ると、検索した選択されているアーチを〔編集〕→〔選択編集〕→〔切り取り〕で消去する。〔編集〕→〔レイヤ〕→〔併合・連結〕で、ほかの道路ネットワークレイヤを選択し(チェックオンすると緑ランプがつく)，連結を行う(図5)。統合後、前景レイヤとなっていたレイヤに結合された状態となるため、不要なレイヤは解除する。ここでレイヤ名称を変更しておくと作業が進

めやすいので、レイヤ名を「札幌北西部道路」とする。しかし、このままでは各レイヤに重複して存在した同一の道路や、レイヤ間で連結すべき交差点のノードが離れたままになってしまう。そこで、この統合後の道路ネットワークレイヤ「札幌北西部道路」を編集ターゲットにしたままで、[編集]→[交点・ダブリーアーク]→[交点ノード生成、ダブリーアーク削除]を行うと(図6)、ひとつつながりのネットワーク空間が生成できる。

同様に、学校施設の各ポイントデータレイヤも統合し、ひとつのレイヤにする。ここまででの作業によって、ネットワークポロノイ領域生成を行う

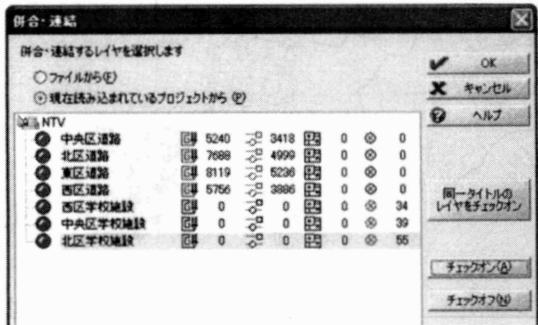


図5 レイヤの併合・連結ダイアログ

ためのデータセットが準備できる(図7)。

ここから、空間解析ツールの「ネットワーク最短到達領域解析」を用いて学校施設を母点としたネットワークポロノイ領域を生成させる。ポイントデータの「学校施設」を編集ターゲットにし、[ツール]→[ネットワーク解析]→[ネットワーク最短到達領域解析(ネットワーク領域分割)]で(図8)，ネットワークレイヤとして札幌北西部道路を選択し、実行する。するとネットワークポロノイ領域が生成され、自動的に新しいポリゴンレイヤ

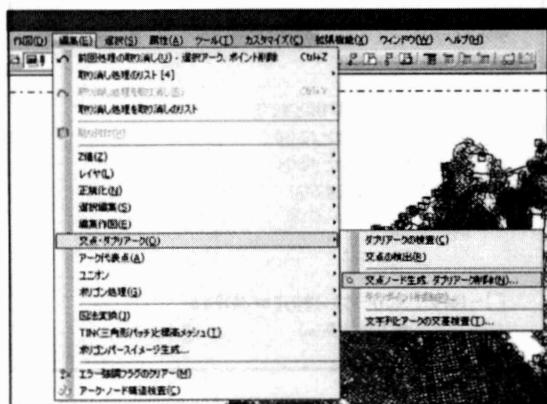


図7 交点ノード生成・ダブリーアークの削除

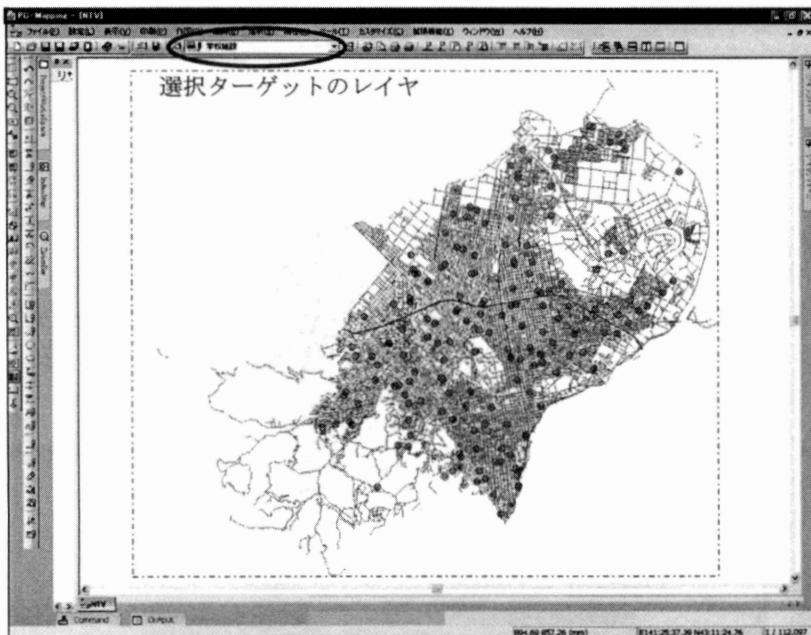


図6 道路ネットワークレイヤと学校施設レイヤ
(選択ターゲットが「学校施設レイヤ」の状態)

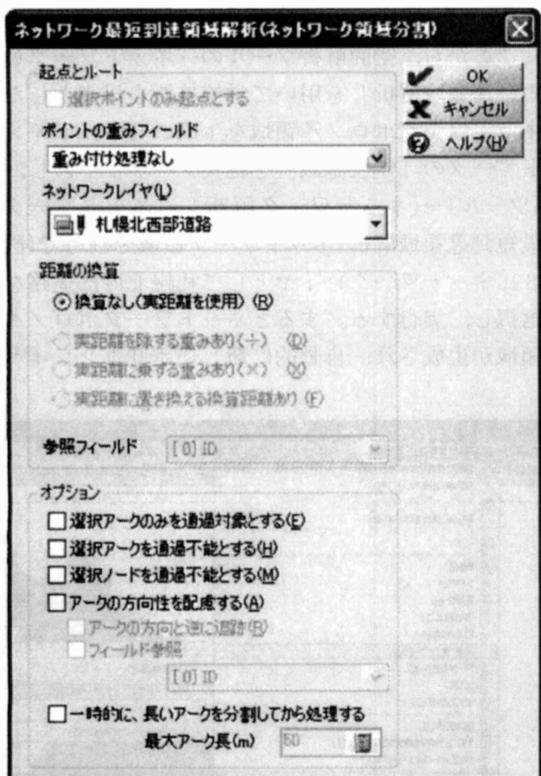


図 8 ネットワーク最短到達領域解析（ネットワーク領域分割）ダイアログ

「学校施設（ネットワーク領域分割）」が作られる（図 9）。この領域のポリゴン属性を見ると、母点である学校施設の属性が反映されていることを確認できる（図 10）。

以上の作業の結果として、学校施設についての道路ネットワークによる領域を面的な空間データとして生成することができる。そのため、任意の



図 10 ネットワーク領域分割ポリゴンの属性データ

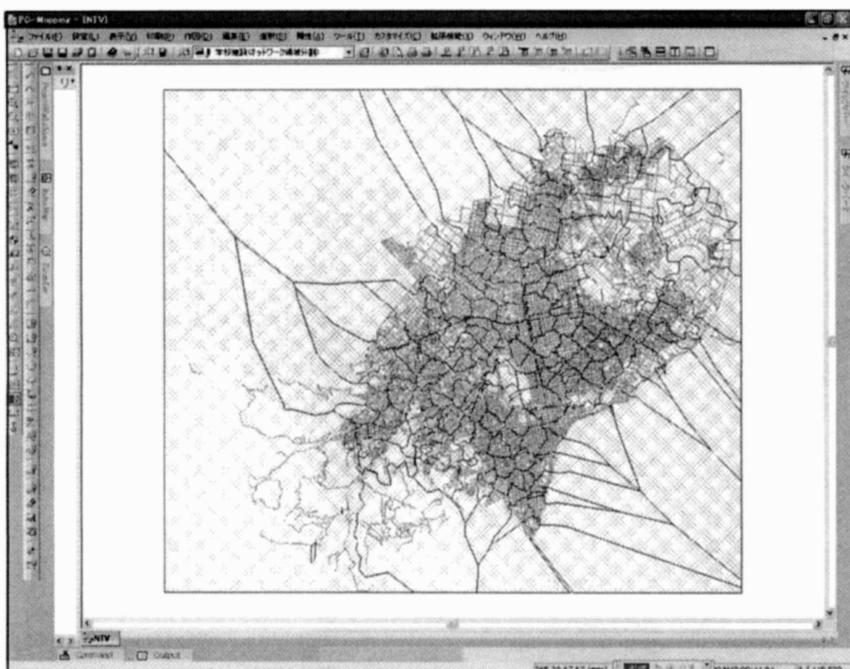


図 9 学校施設（ネットワーク領域分割）レイヤ

施設の圏域内に、属性をもつポイントデータが点在している場合、その属性情報をネットワークに投影して「同一ネットワーク上のデータである」という追加条件を設定する必要がない。本手法は、オーバーレイによる圏域内のデータ集約を容易に行うことができることから、徒步移動の目的地となる施設の圏域分析に適している。

この空間解析ツールでは、ネットワーク空間の個別のアーケに重み付や一方通行等の条件を設定して領域を生成することもできるので、徒步以外による移動で車線の方向や交通量を想定した商圈の分析や、災害時のネットワーク断絶を想定した分析も可能である。特に積雪地域では、路面凍結や除排雪による雪の堆積で受けけるネットワーク上の状況変化を反映した利便性評価に活用することができる。

IV. ネットワークボロノイ領域による分析事例

ここで、ネットワークボロノイ領域による分析事例として、札幌市中心部における避難場所の圏域を画定し、各避難場所における非収容人口を算出する(図11)。分析のためのデータとして、地域人口については1998年の札幌市住民基本台帳人口の条丁目別人口を、避難場所の種類・収容人員データについては札幌市防災会議事務局の資料を用いる⁴⁾。分析では、積雪時を考慮し、屋内施設である収容避難場所のみが利用可能であるという状況を想定する。

まず、避難場所を終点としたネットワークボロノイ領域を設定し、その領域内の人口を算出する。次に、領域内人口と収容避難場所の定員との差を求める。この差として得られる数値が、任意のネットワークボロノイ領域内における避難場所の非収容人口である。

分析の結果、対象地区内の多くの地区で、領域内の人口が避難場所の定員を超えることがわかる。多くの地区で避難場所の収容能力に不足が生じたのは、過去に設立された避難場所施設の分布や規模は長期間変化していない固定的なものであるのに対しても、人口は都心を取り囲む地域で著しく増加していることによると考えられる。また、この道路ネットワークのボロノイ領域によって作られた避難場所の圏域は、広い敷地を有する施設

によるネットワークの面的障害による制約を考慮することができるため、現実的な避難行動について言及できる有効な手法と思われる⁵⁾。

V. おわりに

本研究では、空間データにおけるネットワークボロノイ領域の分析方法について検討するため、従来の平面ボロノイ図およびネットワークボロノイ図の比較検討を行った。ネットワーク上の地点情報の分布状況や分布間の相互関係を分析する従来の方法と異なり、ネットワーク上のノードから平面ボロノイを生成するネットワーク領域分割の方法を用いると、ポイントデータがその領域に含まれることで、最近接の道路を利用して移動することが表現できた。

本研究では、まずネットワークボロノイ領域の定義を行い、ノードからの平面ボロノイ領域を保有することでネットワークボロノイ領域を生成する手順を明らかにした。次に、PC-Mappingを用いて分析の具体的手法を解説した。さらに、ネットワークボロノイ領域による分析事例として、札幌市中心部における避難場所の圏域を画定し、各避難場所における非収容人口を算出し、本手法の空間解析における有効性を示した。

今後、本分析手法は、徒步移動の目的地となる施設の圏域分析手法として、児童や高齢者の行動範囲に関する生活環境評価などで利用できると思われる。また、ネットワーク空間の重み付設定による領域において、車線の方向や交通量を想定した自動車交通流動の分析や、積雪による通行止めといった寒冷地特有のネットワーク上の状況変化を反映した分析での活用も期待される。

注

- 1) ボロノイ境界は2母点の垂直二等分線の一部である。
- 2) 数値地図のデコードデータ作成方法は、高橋ほか編(2005)に詳しい。
- 3) この時、必要なないレイヤを「プロジェクトエクスポート」の「解除」ボタンで削除し、さらに各レイヤの名前も任意の名称に変えた方が、作業を行いやすい。
- 4) 避難行動の第一段階として、身体・生命の安全を確保する一時避難がある。災害発生時、地域住民が安全性を求めて、設定地域内全ての指定避難場所へ一時避難すると仮定して分析をすすめる。
- 5) 相馬・橋本(2005)において、避難場所を対象とした

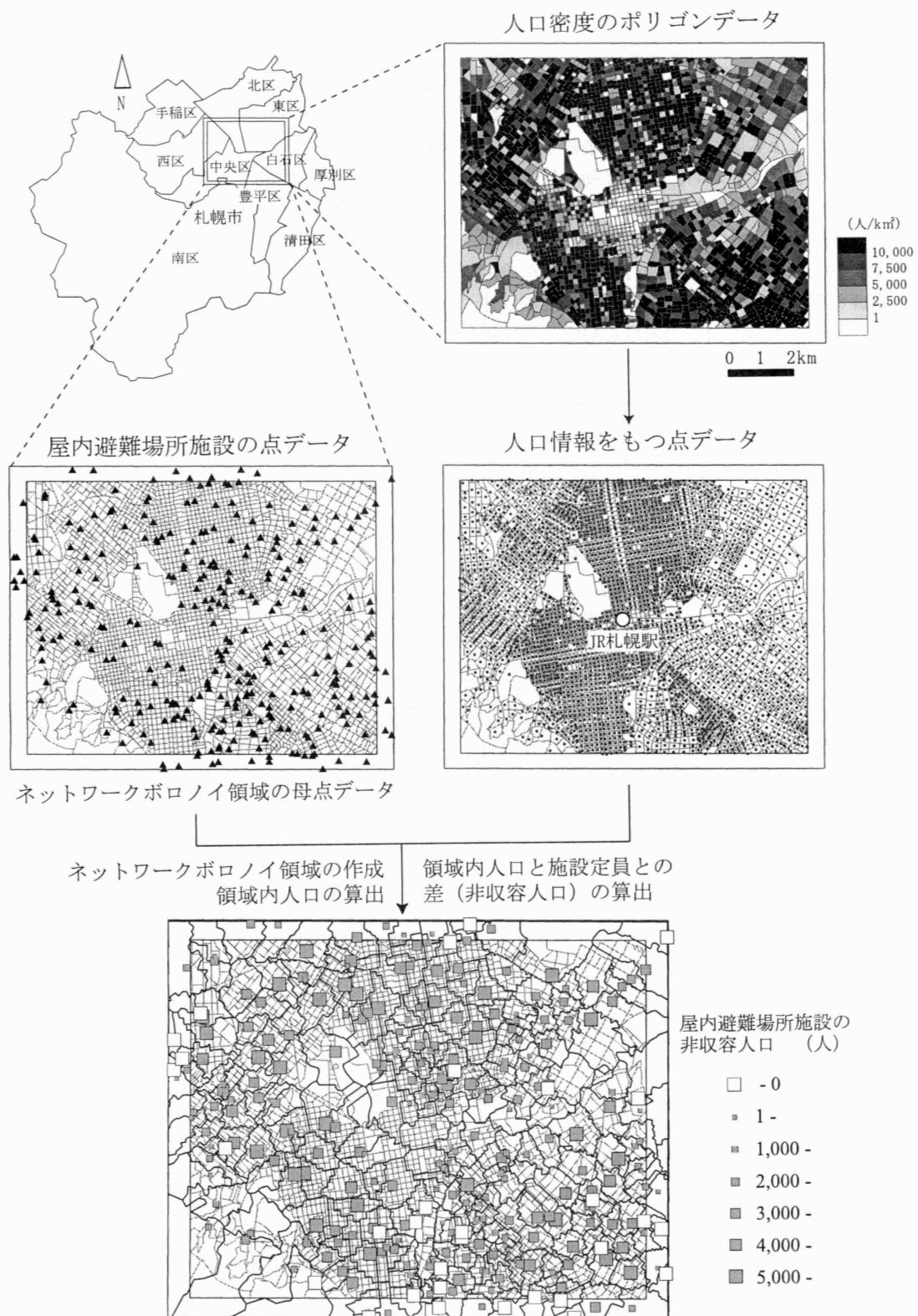


図 11 屋内避難場所施設の非収容人口の算出過程

テスト範囲を設定し、平面ボロノイとネットワークボロノイによる分割の分析結果を比較し、その差異の考察を行っている。この研究によると、圏域の空間的な差異および各分割圏内における人口にも差異が生じている。また、領域内の人口および非収容人口の差異から、面的障害の制約がある道路ネットワークが、居住者分布に影響を与えていると考えられている。当該研究では、大規模な敷地を有する高校や大学などの校舎が避難場所の場合、面的障害により道路ネットワーク上の距離が大きくなるため、そこに避難するはずの人口が、比較的小規模の他施設に収容されることになるということが述べられている。

参考文献

- 岡野京子、岡部篤行(2005)：ネットワーク上の空間分析のための面の属性値を線分に配分するツールの開発。地理情報システム学会講演論文集, 14, 277-280.
- 奥貫圭一、塩出志乃、岡部篤行(2006)：ネットワーク空間分析ソフトウェア「SANET」。岡部篤行、村山祐司編：『GISで空間分析 ソフトウェア活用術』古今書院, 142-182.
- 北村賢之、岡部篤行(1995)：道路ネットワーク上における商圈確定法。GIS—理論と応用, 3, 17-24.
- 佐藤俊明、岡部篤行 (2005)：一步通行を考慮したネットワークボロノイ図とそのシステム開発。地理情報システム学会講演論文集, 14, 221-226.
- 塩出志乃、岡部篤行 (2004a)：ネットワーク・セルカント法を用いた点分布の分析。GIS—理論と応用, 12, 155-164.
- 塩出志乃、岡部篤行 (2004b)：ネットワーク上の点分布から多層的集塊性を抽出する空間分析手法の提案、及びその実装に関する研究。GIS—理論と応用, 12, 177-185.
- 相馬絵美、橋本雄一(2005)：ネットワークボロノイを用いた都市内避難場所の圏域分析。地理情報システム学会講演論文集, 14, 443-448.
- 山田育穂、岡部篤行(2000)：ネットワーク空間におけるK関数法。GIS—理論と応用, 8, 75-82.
- 四茂野英彦(1993)：ネットワーク上での最近接距離分布の計算可能性。GIS—理論と応用, 1, 47-56.
- 高橋重雄、井上孝、三條和博、高橋朋一編 (2005)：『事例で学ぶ GIS と地域分析—ArcGISを用いて—』古今書院。
- Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K. and Chiu, S. N. (2000): *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams (Second Edition)*. John Wiley & Sons.