ネットワーク・セルカウント法を用いた点分布の分析

塩出志乃・岡部篤行

Analysis of Point Patterns Using the Network Cell Count Method

Shino SHIODE and Atsuyuki OKABE

Abstract: One of the most fundamental spatial analytical methods on a two-dimensional plane is the cell count method. This paper extends the ordinary cell count method defined on a plane, called the planar cell count method, to a method defined on a network, called the network cell count method. These two methods are applied to the same distribution of points in a small study area in Shibuya, Tokyo. The statistical tests by the goodness-of-fit test and a spatial autocorrelation analysis reveal that the planar cell count method tends to overestimate the extent of dispersion in comparison with the network cell count method.

Keywords: ネットワーク・セルカウント法 (network cell count method), 最短距離木 (shortest path tree), 適合度検定 (goodness-of-fit test), 空間自己相関 (spatial autocorrelation)

1. はじめに

平面空間上で点分布を対象として行われてきた空間統計手法の中で伝統的な手法の一つに、セルカウント法がある (Haggett, 1965). これは、対象地域を形状と面積が同一の小区域であるセルに区切り、セル単位で集計した点の数と、セルの位置情報、或いはセル同士の隣接関係を用いて、空間統計分析を行う方法である。セルカウント法は、距離法 (Diggle, 1976) と並んで、点分布の分布形態を分析する際の基本的な手法であり、これまで頻繁に利用されてきている (Diggle, 2003). セルの形状としては、三角や六角形を用いる方法もあるが、多くの場合、正方形のセル (Quadrat) (Ripley, 1981) を隙間なく敷き詰める方法が用いられている (Boots and Getis, 1998). また、正方形や円 (Greig-Smith, 1964) を対象領域内にランダムに置く方法 (Roach, 1968) もあり、これは、

生態学や森林学などの分野で空間サンプリング (Pielou, 1975; Dale, 1999) を行う際に用いられてきている (Upton and Fingleton, 1985).

セルカウント法を用いた分析は、従来、主に平面上に分布する現象を対象に行われてきた。しかし、我々の身の回りには、路上犯罪や交通事故のように、ネットワーク上でのみ発生する現象や、道路に沿って立地する商業店舗や各種都市施設のように、ネットワークに沿って分布する現象など、ネットワーク上で発生する現象も多く存在する。

これらのように、点データがネットワーク上に分布しており、その点データを対象に空間分析を行う際には、従来の平面空間上よりも、ネットワーク空間上でセルカウント法を適用する方が、現実空間の地理的特性をよりの確に分析結果に反映できると考えられる。

例えば図1は、道路ネットワークと、それに沿って立地している二点の点的施設、及びこの領域内に配置された平面上のセルの例である。仮に、一セル内の空間が連続しており、施設が平面上のいずれの

塩出：〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
東京大学空間情報科学研究センター
Center for Spatial Information Science, University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN
Tel 03-5841-6259
E-mail shino@ua.t.u-tokyo.ac.jp

位置にも立地できるならば、施設Aと施設Bは互いを結ぶ直線距離で近接しているため、それら二点を同一セル内の点として集計しても問題は生じない。ところが実際には、AとBは道路に沿って立地しており、ネットワーク経路上では必ずしも近接しているとは言えない。また、両施設はネットワーク経路上においてセルの外を迂回してつながっている。このように、実際に施設が立地しているネットワークの連続性が一セル内で保持されていない場合、従来の平面上の分析で用いられているグリッド状のセルで領域を分割し、AとBを同一セル内の点として集計することは、誤った結果を導く恐れがある。

それに対して、各セル内のネットワークが連結しているようなセルを単位として点データを集計することができれば、ネットワーク上の点分布の特徴をよりの確に把握することができると考えられる。

以上のことから、本研究では、平面上の点分布を分析する空間統計手法として確立されているセルカウント法をネットワーク空間上に拡張することを目的とする。具体的には、

- (1) ネットワーク空間上でのセルの構築、
 - (2) 平面上のセル(以下では平面セルと呼ぶ)を用いて行われてきた空間分析手法をネットワーク上に拡張するための枠組みの構築、
 - (3) 平面セルを用いた分析結果との比較を通じた、ネットワーク上でのセルカウント法の有効性の検討
- を行う。

図1 セル内のネットワークの連結性(細線は道路ネットワーク、太線の格子は平面上のセル)

2. ネットワーク・セルカウント法

与えられたネットワークの部分集合で、その部分集合に含まれるリンクが互いに連結しているものを、サブネットワークと呼ぶ。また、サブネットワークを構成するリンクの長さの総和を、サブネットワーク長と呼ぶ。そして、周辺部分を除き、ネットワークを等しいサブネットワーク長に分割することを、セル分割といい、同じ長さのそれぞれのサブネットワークを、ネットワーク・セルと呼ぶことにする。

いま、ネットワーク L があるとき、これを、

$$(1) \quad L_{PC} = \{L_1, \dots, L_n\}$$

$$(2) \quad L_{IC} = \{L_{n+1}, \dots, L_{n+n^*}\}$$

の、2タイプのサブネットワークに分けることにする。 L_{PC} は、ネットワーク・セルの条件を満たす、完成したセルである。それに対して、 L_{IC} は、いずれのネットワーク・セルにも含まれない、周辺の半端なリンクの集合(これを半端セルと呼ぶ)である。

L_{PC} と L_{IC} は、以下の条件を満たすものとする。

- (1) L_i を構成するネットワークは、互いに連結している。
- (2) $|L_i|$ を、セル i に含まれるリンクの長さの総和(これを以下ではセル長と呼ぶ)とすると、 L_{PC} は、一定のセル長 c を持っている。

$$|L_i| = c, \quad i = 1, \dots, n$$

- (3) L_{IC} のセル長は、 L_{PC} のセル長より小さい。

$$|L_i| < c, \quad i = n+1, \dots, n+n^*$$

- (4) L_{PC} と L_{IC} の和集合で、ネットワーク全体になる。

$$L = L_{PC} \cup L_{IC} = \left[\bigcup_{i=1}^n L_i \right] \cup \left[\bigcup_{i=n+1}^{n+n^*} L_i \right]$$

- (5) 2つのネットワーク・セルは、それらの境界点以外では交差しない。

$$|L_i \cap L_j| = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n+n^*$$

以上のようなネットワーク・セルを集計単位とするネットワーク・セルカウント法とは、

- (1) ネットワークをネットワーク・セルに分割する

- (2) 各セル単位に点データを集計する
 - (3) その集計結果をもとに分析する
- 手法である。

平面セルの形状は、通常、等間隔の直交グリッドであることから、対象領域を容易にセルに分割でき、また、平面セルに含まれない領域は、自ずと境界周辺部に現れる。それに対して、ネットワーク・セルの形状は、与えられたネットワークの形状に規定されるため、特殊なケースを除きセルの形状が不均一となり、平面セルのように一括してセルを構築することができない。そのため、(1)のセル構築の作業においては、任意に設定した出発点からネットワーク・セルを一つずつ構築していくことになる。また、そのような方法でセルを構築していくと、セル構築の途中でネットワークの内部に半端セルが現れることがある(これを内部半端セルと呼ぶ)。その場合、平面セルと同様に、それらが周辺部分の半端セルとなるような処理を行わなければならない。ネットワーク・セルの構築は、平面セルの構築ほど容易ではない。そこで、ネットワーク・セルカウント法においては、この(1)を実現する方法を提案することが重要となる。以下では、その中の一つの方法を提案する。

3. ネットワーク・セルの構築

3. 1 セル構築におけるデータ構造

対象ネットワークをネットワーク・セルに分割するセル構築では、まず、分割を効率よく行うためのデータ構造が必要となる。

セル構築は、対象ネットワーク上の任意の一地点(以下、これをルーツノードと呼ぶ)を出発点として、ルーツノードに近い場所から遠い場所に向かって、1セルずつ進められる。その際、構築の順序を決定する手がかりとして、ルーツノードからネットワークの外側方向に向かって、各ネットワークノードに番号(以下、これを深さと呼ぶ)を付与することが必要となる。

図2に示したネットワークを例にとってみよう。いま仮に、ネットワークノード $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, $n=28$ の中の1点 p_0 をルーツノードとして指定し、

p_0 から全ネットワークに対して最短距離木(Dijkstra, 1959)を発生させる。図2の太線のリンクは、ルーツノードから発生させた最短経路上のリンクを表すものとし、太線以外のリンクを、ここでは可動リンクと呼ぶことにする。また、ルーツノードから出発して、別ルートからの最短経路距離が等しくなる点(例えば $p_0 \rightarrow p_8 \rightarrow p_{22}$ と $p_0 \rightarrow p_4$ の2方向からの、リンク p_{22}, p_4 上の一点)を、衝突点と呼ぶ。ルーツノードから全ての衝突点までの最短距離木が、拡張最短距離木である。(衝突点、及び拡張最短距離木の詳細については、Okabe and Kitamura, 1996; Okabe and Okunuki, 2001参照)。上の可動リンクは、拡張最短距離木を発生させたときに、衝突点が発生するリンクと一致する。この衝突点をルーツノードからの等距離地点に固定せず、可動リンク上の任意の位置に移動可能にしたものを、可動点と呼ぶことにする(その例を図3に示した)。

図3を擬似的なツリー構造で表したものが、図4であり、これを可動的拡張最短距離木と呼ぶ。可動点Aは可動点Bと接しているが、これらの点は、両点に乗っている可動リンク上を自由に動くことができ、リンク上の任意の地点で分割し、2本のリンクに分けられるものとする。

最後に、ルーツノードからの深さを各点に付与する。図5は、図2の各ノードに与えられた0から4の深さを示したものである(ただし、図中のリンクの長さは、実際のリンクの長さに対応していない)。

図2 ルーツノード p_0 からの最短経路探索及び可動リンク

図3 可動リンクと可動点

図4 可動的拡張最短距離木

図5 ルーツノードから各ノードまでの深さ

このようにして構築したデータ構造をもとに、ツリーの上から下に向かって順にセルを構築する。

3. 2 1セルの構築手順

既にセル長 c が与えられている状態のもとの、上記のデータ構造を用いた1セルの構築手順を、図6に示した一連の図を用いて示すことにする。

ネットワーク・セルを一つずつ構築していく際、新しいセルの構築は、既に構築済みセル(図中の太線を、既にいずれかの構築済みセルに属しているリンクとする)の端点ノード i を出発点とする。 i 番目のセルを構築する際の出発点となるこのノードを、セル i の第一始点と呼び、まずは、これを決定する(図6(a)の点A)。次に、第一始点に接続しており、且つまだどのセルにも属していないリンク(これを未踏リンクと呼ぶ)を、順にセル i に加える(図6(b))。全ての未踏リンクを追加したら、既にセルに加わったリンク(これを既踏リンクと呼ぶ)に接続する端点ノードの中から、一つを選択する。このノードを第二始点として(図6(c)の点B)、第二始点

に接続する未踏リンクを順にセルに加える。加えるリンクが可動リンクの場合は、セルに加えたリンクの長さの合計がセル長に達しない限り、可動リンク長まで可動点を移動させ、リンクの反対側にあるノード(図6(d)の点C)に到達した時点で、可動リンクを切断する(図6(e))。セルに加えたリンクの長さの合計がセル長に達するまでこの作業を繰り返し(図6(f)、及び第三始点Dの選択と、リンクの追加(図6(g))、セル長に達した時点で、セル i の構築を終了する。リンクの途中でセル長に達した場合は、その地点でセルを切断し、セル i の終点となるノードを追加する(図6(g)の点E)。この時点で、セル i の構築が完了する。

図6 可動的 shortest 距離木を用いたセル i の構築

3. 3 セル構築アルゴリズム

構築中のセルの番号を i 、セルの始点番号を j とすると、全てのセルの構築手順は、以下のようになる。

- Step 0: 初期設定. $i=1$. $j=1$.
- Step 1: 第 i 番目セルの構築開始. L_{PC} の頂点集合に属するノードの中で、1本以上の未踏リンクに接続しているノードの集合を、新セルの始点候補点とする(ただし $i=1$ の場合は、ルーツノードを候補点とする). 候補点がない場合は、Step24へ。
- Step 2: Step1の候補点の中で深さが最小のものを、 i 番目セルの第 j 始点とする(ノード番号の等しいノードが複数ある場合は、任意のノードでよい)。
- Step 3: 第 j 始点に接続する未踏リンクを列挙する。
- Step 4: Step3で列挙したリンクを優先順位に従ってソートする。優先順位は、1. 可動リンク、2. 端点に接続しているリンク、3. その他のリンクの順²⁾となる。
- Step 5: Step4の中から、優先順位の最も高いリンクを選択する。選択するリンクがない場合は、Step7へ。
- Step 6: Step5で選択したリンクをセル i に加える。リンクの反対側にあるノードまでのリンクを加えてもリンクの長さの総和が c に満たない場合、そのリンクをセル i の要素に加え、Step5へ。それ以外は、Step10へ。
- Step 7: 現始点に接続するリンクの追加終了。
- Step 8: セル i に属するノードの中で、1本以上の未踏リンクに接続しているノードを、セル i の次の始点候補点とする。候補点がない場合は、Step12へ。
- Step 9: Step8の候補点の中で、深さが最小のノードを、第2始点以降の始点とする(ノード番号の等しいノードが複数ある場合は、任意のノードでよい)。 $j=j+1$ として、Step3へ。
- Step10: c に達した地点に、セルの終端ノードを追加する(追加した終点には、直前の交点の

深さを付与する)。

- Step11: 現セル探索終了. $i=i+1$, $j=1$ として、Step1へ。
- Step12: セル i に属するノード集合の中に、ネットワークの端点ノード³⁾が少なくとも1つ含まれている場合、Step13へ。それ以外は、Step14へ。
- Step13: セル i を L_{IC} とする。
- Step14: セル i が内部半端セルとなる。内部半端セル長 h を計測する。
- Step15: 内部半端セルに隣接する L_{PC} を探索・列挙し、優先順位に従ってソートする⁴⁾。 $k=1$ 。
- Step16: ソートしたものの中から、最も優先順位の高い L_{PC} を選択する。
- Step17: Step16で選択したセルを、内部半端セル側に移動する⁵⁾。
- Step18: Step17で移動した後、新たに出現した内部半端セル長 h_k を計測する。
- Step19: $h_k=0$ の場合(内部半端セルを外部に押し出せた場合⁶⁾)は、Step23へ。
- Step20: 内部半端セル長 h の更新. $h=h_k$ とする。
- Step21: 新しくできた内部半端セルに隣接する L_{PC} を探索・列挙し、Step15と同じ優先順位に従ってソートする。
- Step22: $k=k+1$. Step16へ。
- Step23: 内部半端セルの除去終了. Step1に戻る。
- Step24: セル構築終了。

上の操作の結果、最終的に得られた i の値が、 L_{PC} の数、即ち構築されたネットワーク・セルの数となる。

4. 実データを用いたネットワーク・セル、及び平面セルによる点データの集計

前節で提案したアルゴリズムに従って作成したプログラム⁷⁾を用いて、実データを対象に、セル分割を行うことにする。

図7に示した対象領域と、領域内の道路ネットワーク(東京都内の約1.3km×1.0kmの領域、及び総延長21802mの道路ネットワーク)を対象に、838m

図7 分析対象領域と道路ネットワーク

図8 ネットワーク・セルに分割した結果

図9 平面セルに分割した結果

のセル長のもとでセル構築を行った結果、図8に示すネットワーク・セル $L_{PC} = \{L_1, \dots, L_n\}$, $n=24$ に分割できた。 L_1 内の一地点を出発点としてセルを構築し、構築された順に1から24のセル番号を付与した。また、半端セル(図中黄色のセル) $L_{IC} = \{L_{n+1}, \dots, L_{n+n^*}\}$, $n=24$, $n^*=15$ には、セル番号-1を与えた⁸⁾。

図9の対象領域内に散らばっている点は、図7の道路ネットワークに沿って立地する440点の商業施設である⁹⁾。これらの点と、構築した24のネットワーク・セルを重ね合わせ、各セルに含まれる施設数を集計した。その頻度分布を、図10に示した。

また、平面セルカウント法による結果とネットワーク・セルカウント法による結果を比較するため、同じ対象領域を、ネットワーク・セル分割で得たセル数と同数の24の平面セルに分割した。その結果、図9に示す $170\text{m} \times 170\text{m}$ の平面セルが生成された¹⁰⁾。また同様に、各セルに含まれる施設数を集計し、その頻度分布を図11に示した。

図10 セルあたり観測数の頻度分布(ネットワーク・セル)

図11 セルあたり観測数の頻度分布(平面セル)

表1 ネットワーク、及び平面セルにおける観測数の集計結果

	ネットワーク・セル	平面セル
観測数合計	416	335
平均	17.333	13.958
分散	79.536	92.476
標準偏差	8.918	9.616

図10と図11の頻度分布をもとに基本統計量を算出した結果が、表1である。これによると、平面セルによる集計の方が、分布のばらつきを大きく算出していることがわかる。

5. ネットワーク・セルを用いた空間分析、及び平面セルを用いた場合との比較

ここでは、ランダム性に対する仮説検定手法として最も頻繁に使われている適合度検定を行い、平面上での結果と比較することで、ネットワーク・セルカウント法の有効性を検討することにする。

5. 1 ランダム性に対する仮説検定—適合度検定—

もし、領域内に分析対象点が独立して出現するならば、点の分布は二項分布に従うが、点の数が多い場合には、近似的にポアソン分布に従う。ポアソン分布では、一セル内に x 個の点が与えられる確率分布 $P(X)$ が、

$$P(X=x) = \frac{(\rho a)^x e^{-\rho a}}{x!}$$

で表される(x :セルあたり観測数, ρ :点の密度, a :集計単位の大きさ(これは、ネットワーク上ではセル長、平面上ではセル面積にあたる))。そこで、このポアソン分布に従う理論度数に対する、先に導出した観測度数の適合度を、 χ^2 検定を用いて検討することにした。上で求めた $P(X)$ を k 個のカテゴリにまとめると、 χ^2 統計量は、

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^k \frac{(O_i - nP_i)^2}{nP_i}$$

として得られる(k :カテゴリ数, n :セル数, O_i :カテゴリ i における観測度数, p_i :カテゴリ i における理論確率)。

ネットワーク、平面それぞれの χ^2 値を χ^2_{NT} 、 χ^2_{PL} としたとき、 $k=4^{11)}$ のもとで分析を行った結

果、 $\chi^2_{NT} = 44.752$ 、 $\chi^2_{PL} = 94.450$ となった。

有意水準5%における臨界値が $\chi^2_{0.05}(3) = 7.815$ 、有意水準1%における臨界値が $\chi^2_{0.01}(3) = 11.345$ (括弧内の数字は(カテゴリ数-1))であることから、平面セル、ネットワーク・セルいずれを用いた χ^2 統計量も、これらの値を大きく上回った。

このことから、通常用いられる有意水準ではどちらのケースでもランダム性の帰無仮説は棄却され、局所的に凝集した分布であることが判明した。ただし、両者の χ^2 統計量を比較すると、同じ点分布を対象としたにもかかわらず、平面セルによる χ^2 値の方が大幅に大きい。両者の結果にこのような違いが出たのは、平面セルによる集計では、公園や空地など、施設が立地できない空間まで集計の対象空間に加えられ、実際に立地できる空間の占める割合がセル間で異なってしまったことが原因であると考えられる。

5. 2 ネットワーク・セルを用いた空間自己相関分析

5. 2. 1 ネットワーク・セルの隣接性

前章までは、セルごとに集計された事象数 $x_i, i=1, \dots, n$ のみを用いて、すなわち、セル同士の相対的位置関係を考慮せずに点分布の特徴を導出した。

セルカウント法は、広い意味で点分布を領域データに変換する方法であり、セルという領域単位で、点集合の特性を集約している。領域集計データとして扱えるということは、各領域に付随する属性値の空間的関係を分析する際に用いられる、空間自己相関分析(例えばGriffith, 1987)が適用できるということになる。そこでここでは、セル同士の相対的位置関係を考慮した分析例として、ネットワーク・セル単位で集計した結果に対して、自己相関分析を適用することにする。

ネットワーク・セルを用いて自己相関分析を行うためには、まずセルの隣接関係を定めなければならない。平面セルを用いる場合は、通常、「2つの領域の境界が接している場合に、それら2つのセルは隣接している」と定義づけられている。ネットワー

ク・セルの場合、この「境界が接している」という状態は、2つのネットワークが接する点に現れることになる。

そこでセル同士が接しているネットワーク上の点をセルの境界点と呼び、「境界点を共有するネットワーク・セルは、互いに隣接している」と定義することにする。再度図8のセル分割例を用いると、図12に示したそれぞれの白丸が、セル同士の境界点となる。例えばセル4は、合計7点の境界点で、セル1, 5, 6, 8, 9, 10と接している。

図12 ネットワーク・セルの境界点（白丸）

境界点を用いて導出したネットワーク・セルの隣接関係をもとに、 24×24 の隣接行列 $W = w_{ij}$, $i, j = 1, \dots, n$ を作成した。隣接行列の作成方法は種々存在するが¹²⁾、ここでは、以下の最も単純なバイナリ型を用いた。

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{セル} i \text{ とセル} j \text{ が隣接している} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases}$$

また、図10で分割された平面セルに対しては、一つのセルを囲む8つのセルを隣接セルとして、 24×24 の隣接行列を作成した。

5. 2. 2 Moran's I 統計量による自己相関分析

以上のようにして得られた隣接行列 W と、各セル毎の事象数を用いて、ここでは、代表的な自己相関分析手法の一つである、Moran's I 統計量 (Moran, 1948) を適用することにする。

Moran's I 統計量は、

$$I = \frac{n}{S} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

で得られる ($S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$, $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, n : セル数, x_i : セル i の事象数)。

ネットワーク、平面セルのセルカウント結果に対するMoran's I 統計量をそれぞれ I_{NT} , I_{PL} とすると、 $I_{NT} = 0.232 > 0$, $I_{PL} = 0.068 > 0$ が得られ、どちらも正の空間自己相関が存在しているという結果となった。

また、 I の標準化統計量 Z は、中心極限定理によって近似的に正規分布に従うことから、 Z を用いた、空間自己相関に対する仮説検定が可能になる (Bailey and Gatrell, 1995)。正規性の仮定のもとでの I_{NT} , I_{PL} , それぞれの期待値は、 $E(I_{NT}) = -0.0435$, $E(I_{PL}) = -0.0435$, 分散は、 $V(I_{NT}) = 0.0168$, $V(I_{PL}) = 0.0104$ であるため、ネットワーク、平面それぞれに対して、

$$Z_{NT} = \frac{I_{NT} - E(I_{NT})}{\sqrt{V(I_{NT})}}, \quad Z_{PL} = \frac{I_{PL} - E(I_{PL})}{\sqrt{V(I_{PL})}}$$

で表される I の標準化統計量は、 $Z_{NT} = 2.1223$, $Z_{PL} = 1.0946$ となり、値に大きな差が出た。

「セルに含まれる点の数の分布に空間的自己相関が存在しない」という帰無仮説に対して、有意水準 5 % で両側検定 ($Z_{0.05} = 1.96 < |Z|$) を行くと、 Z_{NT} について帰無仮説が棄却され、ネットワーク・セルで集計した結果にのみ空間的自己相関が存在するという結果になった。

平面セルとネットワーク・セルで検定結果が異なった背景として、まず、適合度検定の場合と同様に、平面セルでは施設が立地できないエリアを含めて集計しているということが挙げられる。そしてさらにこのことが、空間自己相関分析において、平面セルにおける隣接セル間のカウント数により大きな乖離をもたらす原因になったと考えられる。つまり、隣り合うセルのうち、片方のセルに空地や公園等、商業施設が立地できないエリアが多く含まれており、

他方のセルにはネットワーク、及び施設が比較的多く含まれていた場合、平面セルによる集計では、隣接するセル同士の施設数に大きな差ができ、それによって、隣接セル間のカウント数の相関が低くなったといえよう。

6. おわりに

本稿では、従来平面空間上で行われてきたセルカウント法をネットワーク空間上に拡張した、ネットワーク・セルカウント法を提案し、開発したセル分割プログラムを用いて、実データに対してネットワーク・セルの構築、及びネットワーク・セルを用いた空間分析を行った。

ネットワーク・セルを用いた点分布の集計結果に対しては、平面セルを対象として行われてきた空間分析手法が適用可能である。本稿では、それらの中から、ランダム性に対する仮説検定の一つである適合度検定、及び Moran's I 統計量による空間自己相関分析を適用し、ネットワーク・セルカウント法の有効性を検討した。

まず適合度検定では、平面セルの場合、施設が実際に立地できる空間であるネットワークの長さがセル間で異なったことによって、同じ点分布を対象にしたにもかかわらず、セルごとの観測数のばらつきをより大きく算出する結果となった。それに対してネットワーク・セルの場合は、実際に立地可能な空間を等しい大きさの部分空間に分割できる。このことから、ネットワーク空間上でより的確に点のばらつき具合を導出するには、ネットワーク・セルを用いる方が適しているといえよう。またネットワーク・セルの利点として、1章で述べたように、1単位のセルに属するネットワークが連結しているということが挙げられる。セルカウント法は本来近くにある点を一つのセルの特徴として集約する方法であることから、ネットワーク・セルによる集計は、現実の距離（ネットワーク距離）ベースでの近接点をそれぞれのセルにまとめることができるという点で、より実態に即した方法であると考えられる。

また、Moran's I 統計量による空間自己相関分析では、ネットワーク・セルの場合のみ、隣接セル間

でのカウント数に有意な相関が見られた。平面セルでは、セルあたりのカウント数のばらつきを拡大させたことが、隣接セルのカウント数の格差を広げることにもつながったのに対して、ネットワーク・セルは、上で述べたように、セルあたりの空間の大きさが均一であり、且つ一セル内での空間の連続性を保持することに加え、集計単位同士の空間の連続性も保持する。それらのことによって、隣接セル間のカウント数の類似度、ひいては対象領域全体での点分布の空間的相関をより厳密に把えることができたと考えられる。

以上の結果から、分析対象点がネットワーク上に分布しており、且つ対象領域が比較的狭い場合には、ネットワーク・セルカウント法は実際に立地できる空間内での点分布の特性をより正確に分析する一手法となり得るといえよう。

ネットワーク・セルカウント法では、セルの大きさとルーツノードの位置によって、半端セルの比率と同時に、セルの形状が変化する¹³⁾。それによって、集計結果、及びその集計結果を用いた分析結果が変化することは避けられない。セルの大きさと位置の設定は、平面セルにおいても共通のテーマであり、ネットワーク・セル特有の問題とは言えない。しかし、ネットワーク・セルの方は形状そのものが変化するため、それが集計結果にどう影響するか、或いは、集計結果の安定性については、今後の課題として引き続き研究する予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（日本学術振興会特別研究員奨励費）、及び、科研費特定（B）領域番号602「人文社会科学の空間情報科学」（領域代表：岡部篤行教授）による研究成果の一部である。

本稿をまとめるにあたり、多くの方々のご助言、ご意見をいただいた。浅見泰司教授（東京大学空間情報科学研究センター）、貞広幸雄助教授（東京大学工学部都市工学科）、小出治教授（東京大学工学部都市工学科）、清水英範教授（東京大学工学部土木工学科）、塩出徳成助教授（ニューヨーク州立大学バッファロー校地理学科）に、この場で感謝の意

を表したい。

注

- 1) L_{PC} リンクに接続しているノードのうち、1本のみの L_{PC} リンクに接続しているノード。
- 2) 内部半端セルをできるだけ発生させないための順位。
- 3) 分析対象ネットワークを構成するノードのうち、次数1のノード。
- 4) (1) 一度に内部半端セルを外部に押し出せる (つまり、この1回の処理で内部半端セル長が0になる) 隣接 L_{PC} 、(2) 任意の隣接 L_{PC} の順。
- 5) この際、選択した L_{PC} を構成するリンクの中で、外側の端点 (未踏リンクに接続している L_{PC} 内の端点) に接続しているリンクから優先的に内部半端セルの方向に移動させ、内部半端セルを構成するリンクの長さの総和 (内部半端セル長 h_k) を可能な限り小さくするよう試みる。
- 6) 選択したセルを内部半端セルの方向に移動させた結果、内部半端セルを構成する端点のうち一点でも未踏リンクに連結されている状態にすることを指す。
- 7) プログラムの詳細は塩出 (2003) 参照。
- 8) 領域内の道路総延長に対する半端セルの比率は約8%、全点に対するセルに含まれない点データの比率は約5.5%となった。
- 9) 商業施設は道路上に沿って立地しており、建物の入り口には道路上の一点からアクセスしなければならないので、分析を行う段階では、ネットワーク上のデータとして扱っても差し支えないと考え、ネットワーク分析ツールSANET (Okabe *et al.*, 2005) の一機能を用いて、建物中心点データを道路上に移した。
- 10) 周囲の半端面積率は約32%、セルに含まれない点の率は23.9%となった。
- 11) 統計理論上は、カテゴリごとの度数が3以上であることが望ましいとされているので、それを満たすカテゴリ数とした。
- 12) 例えば $w_{ij}(d) = d^{-m}$ (Chen and Getis, 1998) など、代表点間距離の関数を重みとする方法がある。ネットワーク・セルに関しては、セル同士の境界点の数や他のセルへのパス数を重みとする方法も考えられる。
- 13) セルは出発点の位置によって変化し、一意には定まらない。

参考文献

塩出志乃 (2003) ネットワーク上の空間分析手法とその実装化に関する研究, 東京大学工学部都市工学科博

士論文。

- Bailey, T. and Gatrell, A. (1995) *Interactive Spatial Analysis*, London: Longman.
- Boots, B. and Getis, A. (1988) *Point Pattern Analysis*, SAGE Publications.
- Chen, D. and Getis, A. (1998) *Point Pattern Analysis (PPA)*, Department of Geography, San Diego State University (unpublished).
- Dale, M. (1999) *Spatial Pattern Analysis in Plant Ecology*, Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Diggle, P. J. (1976) Statistical Analysis of Spatial Point Patterns by Means of Distance Methods, *Biometrics*, **32**, 659-667.
- Diggle, P. J. (2003) *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns - Second Edition* -, New York: Oxford University Press.
- Dijkstra, E. (1959) A Note on Two Problems in Connection with Graphs. *Numerische Mathematik*, **1**, 269-271.
- Greig-Smith, P. (1964) *Quantitative Plant Ecology*, London: Butterworths.
- Griffith D. A. (1987) Spatial Autocorrelation, *Resource Publications in Geography*, AAG, Washington, D.C.
- Haggett, P. (1965) *Locational Analysis in Human Geography*, London: Edward Arnold.
- Moran, P. A. P. (1948) The Interpretation of Statistical Maps, *Journal of the Royal Statistical Society*, B, **10**, 243-251.
- Okabe, A., and Kitamura, M. (1996) A Computational Method for Market Area Analysis on a Network, *Geographical Analysis*, **28** (4), 330-349.
- Okabe, A. and Okunuki, K. (2001) A Computational Method for Estimation the Demand of Retail Stores on a Street Network and its Implementation in GIS, *Transactions in GIS*, **5** (3), 209-220.
- Okabe, A., Okunuki, K. and Shiode, S. (2005) SANET: A Toolbox for Spatial Analysis on a Network Version 3.0, *Center for Spatial Information Science, University of Tokyo*. <http://okabe.t.u-tokyo.ac.jp/okabelab/atsu/sanet/sanet-index.html>
- Pielou, E. C. (1975) *An Introduction to Mathematical Ecology*, Wiley.
- Ripley, B. D. (1981) *Spatial Statistics*, New York: Wiley.
- Roach, S. A. (1968) *The Theory of Random Clumping*, Methuen.
- Upton, G. and Fingleton, B. (1985) *Spatial Data Analysis by Example*, Chichester: Wiley.