（社）日本都市計画学会 都市計画報告集 No. 9, 2010 年 11 月
Reports of the City Planning Institute of Japan, No. 9, November, 2010

実証的適用を通じた都市施設周辺での人口増加を分析する制約付きランダマイゼーション・テストの特徴および限界の検証
Examination of the properties of the restricted randomization test for analyzing the increase in population in the vicinity of urban facilities via the application of the test to an empirical study

増山 篤*
Atsushi Masuyama

The purposes of this paper are (i) to empirically apply the heretofore proposed restricted randomization test for analyzing the increase in population in the vicinity of urban facilities, and (ii) to discuss the advantages and disadvantages of the test from the empirical result. The main conclusions are as follows. First, when the test is repeatedly executed using several parameters, it is possible to appropriately avoid the multiple testing problem. Second, the test is useful not only as a method for confirmatory analysis, but also as a method for exploratory analysis. Third, the result of the test is stable to the fluctuation of the parameter required in the analysis. Fourth, there is a possibility that the test falsely determines whether there is significant decrease in population around urban facilities.

Keywords: 人口増加、都市施設、制約付きランダマイゼーション・テスト、実証的適用
increase in population, urban facilities, restricted randomization test, empirical application

1. はじめに

かねてより人口あるいはその増減を中心テーマとする都市計画研究は多い。そうした研究の近年の傾向をみると、都市施設の周辺で人口が大きくなるかを問うものが多い。そこでの問いに答える道具立ての一つたるべく、増山 [1] では、都市施設周辺での人口増加の統計的有意性を吟味する制約付きランダマイゼーション・テスト（restricted randomization test）[2,3] を提案している（やや砕いて言えば、帰無仮説下では、一定の制約にしたがう値の並べ替えが実現するものとする統計的検定を提案している）。

提案されたランダマイゼーション・テストは、大まかには以下のような流れで実行される。まず、帰無仮説の下で“もしかしたら実現したかもしれない”人口増減の空間分布（以下、「有可能性分布」）がどのようなものかを考える。次に、都市施設周辺での人口増加の顕著さを表す検定統計量を定義し、手元にあるデータ（二時点の人口分布、および、施設分布のデータ）から検定統計量の実現値を求める。そして、帰無仮説の下で“もしかしたら実現したかもしれない”人口増減の空間分布を数値的にシミュレートし、また、シミュレートされた有可能性分布における検定統計量値を算出することとする。こうしたシミュレートと算出を繰り返すことで、検定統計量の確率分布が近似的に得られる。この確率分布をもとに、帰無仮説が棄却されるか吟味する。

このテストの特徴は、有可能性分布をシミュレートする方法にある。常識に照らし合わせると、有可能性分布は、以下に挙げる二つの要件を満たすべきだろう。一つは、人口増減には正の空間的自己相関が通常は存在するから、有可能性分布においても一定程度の正の自己相関が存在すべきであるという要件である。もう一つは、人口がゼロ未満となるような場所は存在し得ないという要件である。

また、このテストでは、任意の地点から施設への“アクセシビリティ”に係るパラメータを定める必要がある。このパラメータの値がいくらであるかということに関し、不確かな先験的知識しかないのであれば、いくつかのパラメータを利用し、検定（テスト）を繰り返し実行するということが考えられる。すると、検定の多重性の問題（multiple testing problem）[4] が生じるが、文献 1）では、Tango [5] に倣った多重比較法とそれを実行する計算法を示している。

このようなテストが提案されているが、それを実際に利用した結果はまだ報告されていない。上述のように、我々の常識から要請される要件や検定の多重性の問題を考慮していることから、その意味では好ましい性質を持った検定法ではあり、そのことが（実際に用いたときの）検定結果に少なからず反映されるとは期待される。しかし、上記のような考慮のない場合と大差ない検定結果を与えるかもしれない。また、実際に利用したときに、想定していなかった問題点を露呈するかもしれない。もし、そうだとすると、提案されたテストにこれといった存在意義はない。そこで、この論文では、文献 1）で提案されている制約付きランダマイゼーション・テストを実在するデータに対して適用し、また、その結果から、このテストの特徴と限界を明らかにすることを試みる。

この論文の構成は以下の通りである。まず、2 章では、文献 1）の提案する制約付きランダマイゼーション・テストを簡単に説明する。3 章では、青森県弘前市における人口増減およびスーパーマーケットのデータに対してこのテストを適用した結果を報告する。また、この結果から、このテストの特徴と限界を議論する。4 章では、この論文をまとめ、今後の課題を述べる。

2. 都市施設周辺での人口増加を分析する制約付きランダマイゼーション・テスト

この章では、文献 1）で提案されている制約付きランダマイゼ

* 正会員・弘前大学人文学部(Hirosaki University, Faculty of Humanities)

ーション・テストを説明しておこう。

今、n 個の空間単位 $S_1, S_2, ..., S_n$ からなる領域 S があるとする。空間単位 S_i の面積を A_i とする。空間単位 S_i の中に適当な代表点を取ったとき、その位置を表すベクトルを $\mathbf{x}_i$ とする。二時点 t_1，t_2 （ただし、t_1 が t_2 に先行する時点である）における S_i 内の人口を、それぞれ P_{i1}，P_{i2} とする。空間単位 S_i における、時点 t_1 から t_2 にかけての人口増減量を δ_i とする。つまり、

$$\delta_i = P_{i2} - P_{i1}, \qquad (1)$$

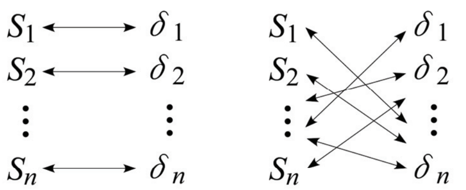
とする。この δ_i は「単位内人口増減」と名付けられている。

S 内には、ある特定のタイプの施設が m 個分布しているとする。施設 j の位置を表すベクトルを $\mathbf{y}_j$ とする。二地点 $\mathbf{x}$，$\mathbf{y}$ 間の距離を $\|\mathbf{x}-\mathbf{y}\|$ と表すことにする。

2.1 有可能性分布

“実際に起こった通り”ではなく、“他にありえたかもしれない”人口増減の空間分布を「有可能性分布」と呼ぶことにしよう。実際の人口分増減布においては、$\{S_1, S_2, ..., S_n\}$ と $\{\delta_1, \delta_2, ..., \delta_n\}$ の間で、S_i と δ_i がペアとなって一対一に対応しているが（図 1(a)）、このペアが組み替えられて、有可能性分布では、S_i と δ_j （$i \in \{1,2,...,n\}, j \in \{1,2,...,n\}$）がペアとなるように一対一に対応する（図 1(b)）ものとしている。以下では、有可能性分布において、S_i とペアになる単位内人口増減値を δ_i' と表すことにする。

空間単位と単位内人口増減値のペアが組み替えられるにあたって、有可能性分布は二つの要件を満たすべきものとされている。一つは、単位内人口増減値の正の空間的自己相関が存在しなければならないという要件である。この要件は、「自己相関要件」と名付けられている。もう一つは、有可能性分布が実現したとき、すべての空間単位において、時点 t_2 における人口が非負でなければならないという要件である。つまり、$S_i + \delta_i' \geq 0$ でなければならないという要件である。この要件は「非負人口要件」と名付けられている。



(a) 実際の人口増減分布　(b) 空間単位と単位内人口増減値のペアを組み替えたもの

図 1　空間単位と単位内人口増減値の組み合わせ

2.2 周辺増加指標（検定統計量）

Tango [6] で用いられている検定統計量に倣い、都市施設周辺での人口増加の顕著さを表す指標を定義し、これを検定統計量としている。この検定統計量は、「周辺増加指標」と名付けられているが、具体的には、以下のようなものである。

空間単位 S_i （の代表点 $\mathbf{x}_i$ ）から都市施設へのアクセシビリティを a_i とする。特に、a_i がパラメータ λ に依存するとき、$a_i(\lambda)$ と表す（このλのように、a_i に関するパラメータを、単に「パラメータ」と呼んでいる）。次に、δ_i の平均を Δ とする。つまり、

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^{n} \delta_i}{n}, \qquad (4)$$

とする。このように a_i, Δ を定義した上で、以下の式で与えられる c^* を、実際に起こった人口増減の空間分布に対する周辺増加指標をとしている。

$$c^* = \sum_{i=1}^{n} a_i (\delta_i - \Delta). \qquad (5)$$

要するに、アクセシビリティと（Δ を基準とした相対的な）人口増加量を乗算し、すべての空間単位について足し合わせたものを検定統計量（周辺増加指標）としている。したがって、有可能性分布における周辺増加指標を C と書くことにすると、これは以下の式で与えられる。

$$C = \sum_{i=1}^{n} a_i (\delta_i' - \Delta). \qquad (6)$$

その性質上、C は離散型確率変数である。

なお、周辺増加指標値を計算するには、a_i を具体的に与える必要がある。この与え方にはさまざまなものが考えられるが、具体的には、以下の二つが挙げられている。一つは、

$$a_i = a_i(r) = \begin{cases} 1, & \min\limits_{j=1,2,...m} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_j\| \leq r, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \qquad (7)$$

なる式で与えられるアクセシビリティである。もう一つは、

$$a_i = a_i(\beta) = \sum_{j=1}^{m} \exp(-\beta \|\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_j\|), \qquad (8)$$

なる式で与えられるアクセシビリティである。これらの前者は「0-1 型アクセシビリティ」、後者は「距離減衰型アクセシビリティ」と名付けられている。

2.3 有可能性分布をシミュレートする方法

実際の人口増減の空間分布における（単位内人口増減の）空間的自己相関の程度を、Moran の I 統計量を使って表すものとする。また、その I 統計量値が I^* であったとする。さらに、微小な正数 ε を定めたとする。自己相関要件を満たすべく、I 統計量値が $I^* \pm \varepsilon$ の範囲内に収まるようにし、なおかつ、非負人口要件を満たすようにしながら、空間単位と単位内人口増減値の組み合わせをランダムに変える（有可能性分布をシミュレートする方法が提案されている。この方法は、単に「シミュレーション方法」と名付けられている。

2.4 パラメータを一つに決めた場合のランダマイゼーション・

テスト

パラメータ（r あるいは β）が一つの値 λ に定められたとき、このパラメータ値 λ "だけ" を用い、都市施設周辺での人口増加を分析する制約付きランダマイゼーション・テストは、以下のように実行される。

まず、「パラメータ値が λ のとき、人口増減は都市施設位置と無関係である」という帰無仮説 H_0 を立て、および、「パラメータ値が λ のとき、都市施設周辺で人口増加が大きい」という対立仮説 H_1 を立てる。次に、c^* を計算する（繰り返し算出された値の集合が、周辺増加指標の確率分布を近似的に求めたものとなる）。そして、十分大きな数 N を決め、有可能性分布を生成するシミュレーションを $(N-1)$ 回繰り返す。各シミュレーション回毎に、（そのときシミュレートされた有可能性分布における）周辺増加指標値を計算する。c^* と $(N-1)$ 個の周辺増加指標値を降順にソートし、c^* の順位を求める。この順位を N で除した値が、ここでの検定における p 値を近似的に求めたものに他ならない [7]。そのため、この（近似的な）p 値が有意水準 α を下回るならば、H_0 を棄却する。

なお、H_1 に代わり、「パラメータ値が λ のとき、都市施設周辺で人口減少が大きい」という対立仮説を立てたとしても、ほぼ同様にして検定することができる。有意水準を α としたとき、先ほどの p 値が $1-\alpha$ を上回るならば、H_0 を棄却する。

また、このテストでは自己相関要件と非負人口要件を考慮しているが、これらを外したランダマイゼーション・テストに "デチューン" したものを考えることも容易である。有可能性分布のシミュレーションにおいて、その過程を部分的に省略することで、二つの要件どちらも、あるいは、いずれか一方を外すことができる。

2.5 複数のパラメータを用いた場合のランダマイゼーション・テスト

前節では、パラメータ値がいずれか一つに決められるとしたが、現実には、確信を持ってある特定の値に "ピンポイント" には決められないだろう。やや話を先取りするが、仮にピンポイントで決められないとしても、およそ一つの値に "あたりをつける" ことはできれば、その "およその値" をパラメータ値とし、前節のテストを行えばよい。しかし、ある程度幅のある区間にまでしか絞り込めないとなれば、いくつかのパラメータ値を試してみるということになろう。

複数のパラメータ値を用いるとなれば、2.4 節で説明したテストを繰り返して、そのパラメータ値ごとに（近似的な）p 値が得られる（得られた値の集合は、「近似 p 値列」と名付けられる）。このとき、近似 p 値列のうちの一つと有意水準 α を単純に見比べ、統計的有意性を論ずることは、もはや適切ではない。いわゆる「検定の多重性の問題」が生ずる。このことを鑑み、文献 5）に倣った多重比較法（少なくとも一つの帰無仮説が誤って棄却される確率が、有意水準 α 以下になるようにコントロールするという方法）とそれを実行する計算方法が提案されている。

この多重比較法では、（複数パラメータを用いた）一連の検定における p 値の最小値を「最小 p 値」と名付け、これに着目する。帰無仮説が真であるとしたとき、最小 p 値も一種の確率変数である。そこで、ある最小 p 値を下回る最小 p 値が実現する確率を考える。この確率は「調整 p 値」と名付けられているが、その定義より、帰無仮説が真であるとき、一連の検定の少なくとも一つが誤って棄却される確率は調整 p 値に等しい。そこで、$(N-1)$ 回繰り返された（有可能性分布を生成する）シミュレーションの結果に基づき、調整 p 値の実現値を近似的に求める計算法が提案されている。この調整 p 値が有意水準 α を下回るならば、複数用いられたうちの少なくとも一つのパラメータ値の下で、帰無仮説を棄却する。

なお、統計的有意性に強く拘泥しないのであれば、近似 p 値列が示す傾向やパターンに着目し、それを探索的分析（exploratory analysis）に利用するということも考えられる。

3. 弘前市の人口増減およびスーパーマーケット分布データへの適用とそれを通じた制約付きランダマイゼーション・テストの特徴と限界に関する議論

この章では、実際のデータに対し、前章で提案したランダマイゼーション・テストを適用した結果をみてみよう。より具体的には、青森県弘前市中心部におけるスーパーマーケットの分布を記録したポイントデータ、および、2000 年から 2005 年にかけての人口増減を記録したデータに対する適用結果をみることにする。また、他の分析結果を適用した結果もみることにする。これらの適用結果から、この論文で提案したランダマイゼーション・テストの特徴や限界を明らかにすることを試みる。

3.1 データ

分析対象地域は、増山 [8] で扱っている空間的範囲と同一である。つまり、まず、青森券弘前市の中でも比較的人口密度が高い長方形的領域（東西、南北方向それぞれの長さが 4km と 5km）を切り出し、次に、この領域を一辺の長さが 100m の正方形メッシュに分割し、そして、これら正方形メッシュのうち、大規模都市公園に対応するものなどを除外して、最後に、残されたメッシュ群（全 1940 個）が覆う空間的範囲を分析対象領域とした。これらメッシュの代表点は、それぞれの中心（対角線の交点、重心）とする。

スーパーマーケットの分布を記録したポイントデータも、基本的には、文献 8）で用いているものと同一のものを利用した。ただし、上記研究では、2009 年時点に存在していると考えられるスーパーマーケットの分布を記録したデータを用いているが、これに対して修正を加えて、ここでは用いている。

2008 年 7 月に、青森県内に展開していたスーパーマーケットチェーンが経営破綻し、弘前市内でもこのチェーンのいくつかの店舗が閉鎖された。こうしたこともあり、2000 年から 2005 年にかけて存在したスーパーマーケットの空間分布を記録したデータとして、増山 (2010) でのデータをそのまま利用するのは不適切と思われた。いくつかのウェブサイト [9),10),11)] などを参考にし、図 2 にあるように、（修正された）スーパーマーケットポイ

ントデータを準備した。

分析対象地域における 2000 年から 2005 年にかけての人口増加に関するデータは、以下のようにして作成した。まず、ウェブサイト「政府統計の総合窓口」（URL: http://www.e-stat.go.jp/）から、町丁字単位で集計された平成 12 年度および平成 17 年度国勢調査データを入手した。次に、面積按分法を用い、すべてのメッシュについて、2000 年および 2005 年における人口を推定した。そして、この二時点で推定された人口の差を取ることで、各メッシュ内の 2000 年から 2005 年にかけての単位内人口増減を推定した。

このようにして推定される δ_i の空間分布について概観しておこう。図 2 では、δ_i の z スコアの大小に応じたコロプレス地図表現がされている。これをみると、δ_i には強い正の空間的自己相関があるように見受けられる。つづく 3.2 節では、どの程度の空間的自己相関があるか見てみよう。

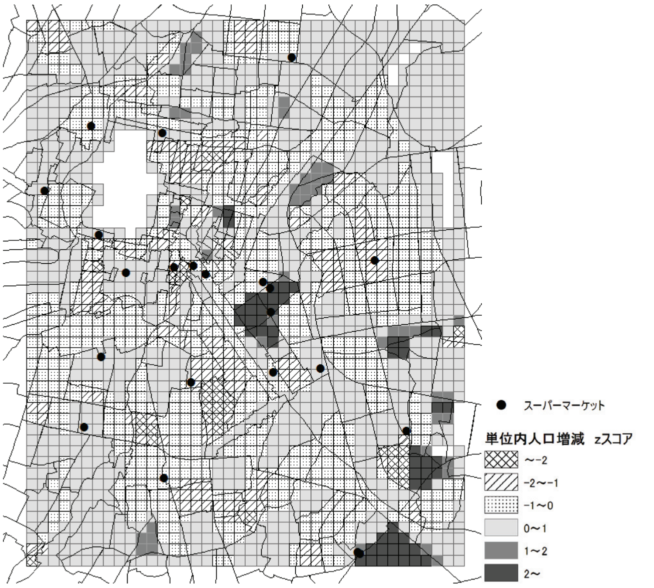


図2　分析対象地区における単位内人口増減およびスーパーマーケットの分布

3.2　単位内人口増減の空間的自己相関の程度

単位内人口増減に関する空間的自己相関の程度を、Moran の I 統計量を用いて表すために、メッシュ間の隣接関係を定義しよう。今、メッシュに対して適当に番号を振り、i 番目のメッシュと j 番目のメッシュの隣接関係に関する量 w_{ij} を考える。もし、図 3(a)に描くように、i 番目のメッシュと j 番目のメッシュが辺を共有する場合には、$w_{ij} = 1$ とする。図 3(b)に描くように、i 番目のメッシュと j 番目のメッシュが点を共有する場合には、$w_{ij} = 1/\sqrt{2}$ とする。それ以外の場合には、$w_{ij} = 0$ とする。このような w_{ij} を i 行 j 列目の要素とする行列を $\mathbf{W}$ とする。この行列 $\mathbf{W}$ を、行方向の和が 1 となるように基準化する。つまり、

$$w'_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_j w_{ij}} \quad , \qquad (9)$$

なる w'_{ij} を定義したとき、この w'_{ij} を i 行 j 列目の要素とする行列を考える。この基準化によってできる行列を、$\mathbf{W}'$ と書くことにしよう。メッシュ間の隣接関係を $\mathbf{W}'$ で表すものとし、また、I 統計量の算出においても用いることにする。

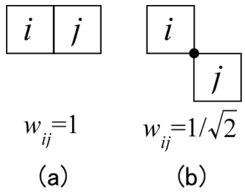


図3　メッシュ間の隣接関係の定義

行列 $\mathbf{W}'$ を定義すると、実際に起こった人口増減に関する空間的自己相関の程度を表す I 統計量値は、以下の式で与えられる。

$$I = \frac{\sum_i \sum_j w'_{ij} (\delta_i - \Delta)(\delta_j - \Delta)}{\sum_i (\delta_i - \Delta)^2} \quad , \qquad (10)$$

なお、$\mathbf{W}'$ は行方向の和が 1 になるように基準化されているため、空間分析のテキスト（例えば、張 [12]）などにみられる I 統計量の定義式よりも、式(10)は簡潔になっている。

この式(10) にしたがうと、実際の δ_i の空間分布に関する I 統計量値は、6.1283×10^{-1} と算出される。そこで、この後の 3.3 節において、この論文で提案してきた制約付きランダマイゼーション・テストを実行するが、その実行にあたっては、$I^* = 6.1283 \times 10^{-1}$ とすることにしよう。

3.3　制約付きランダマイゼーション・テストの実行結果

この節では、この論文で提案してきた制約付きランダマイゼーション・テストを実行した結果を見てみよう。テストを実行するためには、N および ε を外生的に与える必要がある。ここでは、$N = 10000$、$\varepsilon = 1.0 \times 10^{-5}$ とした。

まず、0-1 型アクセシビリティを用いたときの近似 p 値列および調整 p 値をみてみよう。式(8)を用いるにあたって、r の値を具体的に与える必要がある。ここでは、二点間の距離を表す際に、直線距離を用いている。文献 1) での議論を踏まえ、300 から 500 までの区間を 50 間隔で刻むことで得られる 5 通りの値（300, 350, 400, 450, 500）を用いた。図 4 は、これらの値を使ってランダマイゼーション・テストを実行し、そのとき得られる近似 p 値列をまとめたものである。また、調整 p 値の実現値は、0.4179 と計算された。

次に、距離減衰型アクセシビリティを用いたときの近似 p 値列および調整された p 値をみてみよう。ここでは、β の値を具体的に与える必要があるが、やはり文献 1) における議論を踏まえ、0.001, 0.0025, 0.005, 0.01 の 4 通りの値を用いた。図 5 は、これらの値を使ってランダマイゼーション・テストを実行し、そのとき得られる近似 p 値列をまとめたものである。また、調整 p 値の実現値は、0.1053 と計算された。

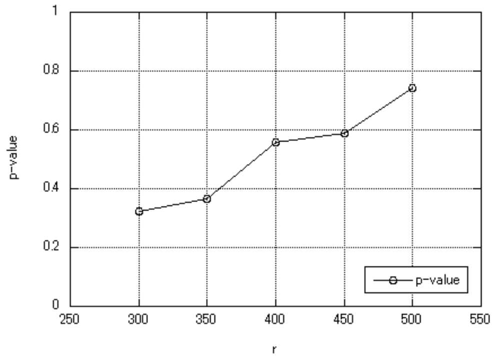


図４ 0-1 型アクセシビリティを用いたときの近似p 値列

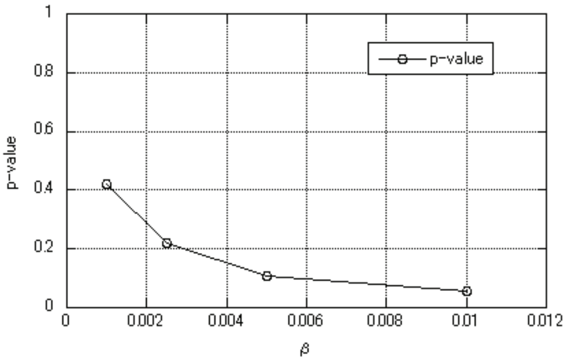


図５ 距離減衰型アクセシビリティを用いたときの近似p 値列

これらの近似p 値列や調整p 値から、どのような結論や推論が引き出しうるかみてみよう。一般的に統計的仮説検定でよくそうあるように、有意水準α を 0.05 (=5%) としよう。すると、スーパーマーケット周辺で顕著な人口増加があったということはない、というのが妥当な結論だろう。図 4 および図 5 にあるように、近似p 値列を構成する個々のp 値も、ましてや、調整p 値（の実現値）も 0.05 を下回ることがない。そのため、一つのパラメータだけを用いた検定にせよ、2.5 節で述べた多重比較法を用いるにせよ、いずれにしても、帰無仮説は棄却されない。このようにみていくと、今しがた述べたような結論を得られる。

距離減衰型アクセシビリティを用いるものとし、また、β =0.01 としたときのp 値に限って見れば、0.0577 という値である。このp 値は、0.05 にかなり近い値であるから、これだけを見るのであれば、先ほど述べた結論を保留したくもなるかもしれない。ただし、そのような保留が認められるとしても、β の値について、それが 0.01 に等しい、ないし、十分近いという確信がある場合に限られよう。逆に言えば、β の値について、決して狭くない範囲のどこかであろうとしか言い得ないのであれば、やはり先ほどの結論になろう。実際、0.001 から 0.01 までの 4 通りの値をβ とし、2.5 節で述べた多重比較法を適用したときの調整p 値は 0.1053 に達し、0.05 を優に上回る。2.5 節の冒頭でも議論したように、β が 0.01、あるいは、それに十分に近いとは断言しかねるであろうことから、やはり、先述の結論が妥当と考えられよう。このように、然るべきパラメータ値に十分な確信を持ちかねる場合、文献 1）においてその計算法が示されている多重比較法は、迂闊な第一種の過誤を犯させない役割を果たすと言えよう。

ただし、スーパーマーケットまで至近となる場所については、そこでの人口増加に関する分析を深めていく方向性を認めてもよいだろう。図 4 は、左肩下がりのグラフとなっており、図 5 は、右肩下がりのグラフとなっている。このように、“スーパーマーケットに近い場所”というものを、空間的に狭く絞って考える方向にパラメータが変わると、p 値が小さくなる。こうしてみると、スーパーマーケットの周辺で顕著な人口増加はみられなかったという結論にはなったが、スーパーマーケットに極めて近い場所について、今後の分析の余地を残しておいてもよいだろう。このように、近似p 値列は、それが示す傾向に着目したときに、今後の分析の方向性を探る探索的分析に役立つように思われる。

3.4 自己相関要件を考慮しない制約付きランダマイゼーション・テストの実行結果

この論文で提案した制約付きランダマイゼーション・テストでは、（帰無仮説下で実現するかもしれないとしている）有可能性分布が、自己相関要件と非負人口要件を満たさなければならないとしている。この節では、（シミュレーション方法の後半部分を省略して）自己相関要件を外したランダマイゼーション・テストを実行し、その結果と 3.3 節における結果とを見比べることで、自己相関要件が検定結果に対してどのような役割を果たすかみてみよう。

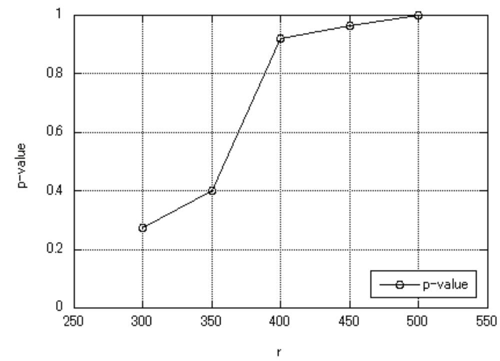


図６ 0-1 型アクセシビリティを用い、自己相関要件を考慮しない場合のp 値

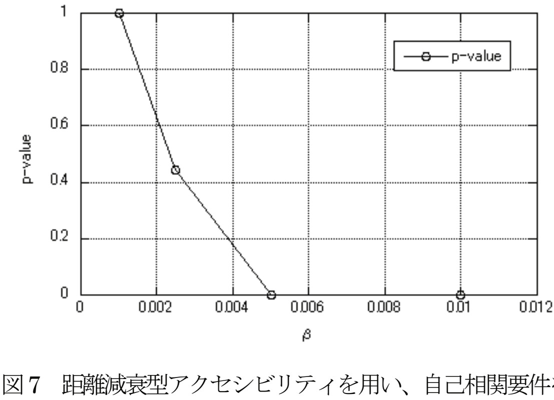


図７ 距離減衰型アクセシビリティを用い、自己相関要件を考慮しない場合のp 値

まず、3.3 節と同様に、5 通りの値の r を用い、それぞれのパラメータ値を用いたときの p 値を求めた。図 6 は、この結果をまとめたものである。また、やはり 3.3 節と同様に、4 通りの値の β を用い、それぞれのパラメータを用いたときの p 値を求めた。図 7 は、この結果をまとめたものである。これらの結果をみると、パラメータの値によって、p 値が大きく異なることが分かる。より具体的には、極端に 0 ないし 1 に振れがちであり、自己相関要件を考慮する制約付きランダマイゼーション・テストに比べて、検定結果が著しく不安定であることが分かる。このように、自己相関要件を考慮しない結果として、p 値が 0 もしくは 1 に振れがちになるということは、ほとんどいつでも帰無仮説を棄却するということであり、適切な検定とは考えがたい。

逆に言えば、この論文で提案しているランダマイゼーション・テストでは、自己相関要件を考慮しているため、ここで述べた不安定さの問題を抱えていない。また、パラメータの多少の変化によって p 値が極端に変わるということもないため、パラメータの値を比較的狭い範囲内に絞り込むことができたのであれば、一つのパラメータ値だけを用いて検定を行えばよく、2.5 節で提案した多重比較法は不要であろう。

3.5 制約のないランダマイゼーション・テストの実行結果

この節では、まず、自己相関要件も非負人口要件も考慮しない（何ら制約のない）ランダマイゼーション・テストを実行してみよう。また、その結果と非負人口要件のみを考慮した結果とを見比べてみよう。さらに、このことから、非負人口要件が検定結果に対してどのような役割を果たすかみてみよう。

ここでは、0-1 型アクセシビリティを用いるものとし、また、$r = 400$ としたときの結果をみてみよう。3.4 節にあるように、非負人口要件を考慮した制約付きランダマイゼーション・テストを行ったときの p 値は、0.9226 である。一方、何ら制約のないランダマイゼーション・テストを行ったときの p 値は 0.9773 となった。1 から 0.05 を引くことで得られる 0.95 と、これらの p 値を見比べると、前者の p 値は下回る一方、後者の p 値は上回る。したがって、有意水準を 5%とし、「スーパーマーケット周辺での人口減少は大きい」という対立仮説を立てた仮説検定を行うとすると、非負人口要件を考慮するかしないかによって、検定結果は異なる。非負人口要件を考慮した場合には、帰無仮説は棄却されない。このすぐ後に述べるように、然るべき自然な分析結果をもたらす上で、非負人口要件には利点と限界があると考えられる。これら利点と限界は、ここでの検定結果の違いによく現れているように思われる。

まず、利点の方をみてみよう。マイナスの人口が存在することは現実にはあり得ず、非負人口要件はそのようなあり得ないケースを排除するものであるから、ここでは、非負人口要件が、性急に帰無仮説を棄却することを留めていると考えられる。次に、限界の方をみてみよう。非負人口要件は、大きな絶対的人口減少が起こりうるのを、もともとある程度大きな人口を抱えている空間単位に限定する。したがって、仮に、大きな絶対的人口減少が起こりうる空間単位が、施設周辺に偏在しているのならば、非負人口要件があることによって、施設周辺での人口減少が著しくあればあるほど、帰無仮説を棄却しないことになる。これはいかにもパラドキシカルであるが、このようなパラドキシカルな検定結果をもたらす方向に働いたとも考えられる。

ここでの検定結果においては、利点と限界のどちらがより色濃く表れたのかは直ちに判じかねる。ただ、ここでの議論から、この論文で提案したランダマイゼーション・テストを利用し、その検定結果を理解するにあたっては、今しがた述べた利点と限界に注意を払う必要があるということは言えよう。

4. まとめと今後の課題

この論文では、都市施設周辺で統計的に有意な相対的人口増加があったかどうかを分析する制約付きランダマイゼーション・テスト [1] を、青森県弘前市における人口増減およびスーパーマーケット分布データに適用した。その結果は、このテストの特徴と限界を示しているように思われる。

ここでの適用結果から、このテストが有していると考えられ、なおかつ、否定的には思われない特徴を列挙すれば以下のようになる。

- アクセシビリティに係るパラメータ値に十分な確証が持てず、いくつかの値を用いざるを得ない場合に、増山 (2010) がその計算法を示している多重比較法は、迂闊な第一種の過誤を犯させないように働く
- 近似 p 値列は、今後の分析を深めていく方向性を探るなど、探索的分析に有用である
- 自己相関要件が考慮されていることで、アクセシビリティに係るパラメータ値に対し、検定結果が鋭敏になり過ぎない

一方で、ここでの適用を通じて、限界の一つも示されたように思われる。具体的には、「施設周辺での人口減少が顕著である」という対立仮説を立てたときには、非負人口要件は穏当な検定結果を与える方向に働くようにも思われるが、その逆の方向に働くようにも思われるということである。そこで、今後の課題としては、この限界を克服するような検定方法を考えるということが挙げられるだろう。

参考文献

1) 増山 篤 (2010) 都市施設周辺での相対的人口増加の統計的有意性を吟味する制約付きランダマイゼーション・テスト，都市計画報告集，9(3) (掲載予定) .
2) Manly, B.F.J. (1997) Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology, Chapman & Hall: London.
3) Fortin, M.-J. and Jacquez, G.M. (2000) Randomization tests and spatially autocorrelated data, *Bulletin of the Ecological Society of America*, **81**, 201-205.
4) 永田 靖，吉田 道弘 (1997) 統計的多重比較法の基礎，サイエンティスト社（東京）.
5) Tango, T. (2000) A test for spatial disease clustering adjusted for multiple testing, *Statistics in Medicine*, **19**, 191-204.

6) Tango, T. (1995) A class of tests for detecting "general" and "focused" clustering of rare diseases, *Statistics in Medicine*, **14**, 2323-2334.
7) Dwass, M. (1957) Modified randomization tests for nonparametric hypotheses, *Annals of Mathematical Statistics*, **28**, 181-187.
8) 増山 篤 (2010) 人口分布と生活利便施設へのアクセシビリティの関係を分析する制約付きランダマイゼーション・テスト，都市計画論文集，**45**(3)，583-588.
9) 株式会社 佐藤長，「会社概要」，available at http://satoucho.co.jp/kaisya.html，(accessed on May 26, 2010)
10) ファーストファイブエース，「マックスバリュ 安原店 ― 基礎情報」，available at http://super.ffa15.com/shop000499.html，(accessed on May 26, 2010)
11) 株式会社 伊徳，「沿革 会社案内」，available at http://www.itoku.co.jp/company/outline/history.html ，(accessed on May 26, 2010)
12) 張 長平 (2009) 増補版 地理情報システムを用いた空間データ分析，古今書院（東京）..