安定地点を考慮した土地利用遷移予測モデル

大佛 俊泰、倍田 賢一

Land-use Forecasts Considering the Existence of Steady-state Places

Toshihiro OSARAGI and Kenichi MASUDA

Abstract: Many studies on land-use transition have been carried out using a Markov chain model. Its transition probability matrix on land-use is usually estimated from current or historical data in the study area. In this process it is assumed that every place in the area is changeable following to the Markov chain process. However, there are some places whose land-use is in steady state. In this paper we propose a method for estimating the transition probability considering the existence of such steady places. Also effectiveness of this method is examined by numerical examples.

Keywords: 土地利用遷移予測(Land-use forecast)、マルコフ連鎖 (Markov chain)、土地利用遷移行列 (Transition matrix of land-use)、メッシュデータ (Lattice data)

1. はじめに

都市・地域計画の分野において、土地利用変化の予測や土地利用転換構造の分析は、今後の計画策定の際の基礎資料となるだけでなく、過去の土地利用政策の評価を行う際にも重要である。そのため、近年におけるメッシュデータの整備を背景として、土地利用の遷移構造をいかに分析するか、という点に関して様々な手法の提案がなされている。例えば金ほか(1991)は土地利用遷移確率行列を用いた土地利用用途の転移分析を試みている。また石坂(1992a、1992b)はこの研究を発展させ、遷移確率行列の固有値・固有ベクトルを用いた土地利用転換過程の構造を分析する手法を提案している。さらに青木ほか(1994)は遷移確率行列を用いた土地利用分析において生じる予測誤差の評価方法を提案している。

これら従来の研究では、対象とする全ての地点が確率過程に従って変化することを仮定して、2時点

の土地利用メッシュデータより遷移確率行列を推定するという方法をとっていた。しかし現実には、商業業務的土地利用に特化した駅前地区のように、他の土地利用形態に変化することが少なく、ある土地利用形態のまま安定的に存在し続ける地点もある。つまり対象地域内には、分析しようとする時間範囲内において確率的には変化しない安定した地点（以下、「安定地点」と呼ぶ）も存在する可能性がある。したがって、従来のモデルを安易に用いると、安定地点においても、他の地点と同様の遷移確率によって土地利用変化が生じてしまうことになり、土地利用予測の際に誤った予測値を導く危険性がある。

本研究では、安定地点の存在を考慮しながら従来のマルコフ連鎖型モデルに改良を加え、新たな遷移確率モデルを構築することを目的とする。まず、第2章では従来の遷移確率モデルにかわり、土地利用の安定地点の存在を考慮した新しい遷移確率モデルを構築し、第3章でモデルの推定方法を述べる。さらに、第4章、第5章では現実データを用いた数値計算をもとに、従来のモデルとの比較分析を試み、新しいモデルの有効性を検証する。

大佛：〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1 Tel.03-5734-3162

東京工業大学大学院情報環境学専攻

Department of Mechanical and Environmental
Informatics, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152

2. 安定地点の存在を考慮した遷移確率モデル

2.1. 従来の遷移確率モデル（Pモデル）

定常マルコフ連鎖を用いた従来のモデルでは、時点 $t+1$ での土地利用 i の面積 $x_i(t+1)$ は遷移確率 p_{ij} を用いて次のように記述していた。

$$x_i(t+1) = \sum_j p_{ij} x_j(t) \quad \cdots (1)$$

ただし、 p_{ij} は土地利用 j が土地利用 i に変化する確率である。通常この p_{ij} は、図1に示すように過去の2時点間 ($t=0 \sim 1$) において土地利用が j から i に変化した対象地域内の全面積 m_{ij} を用いて、次式で推定していた。

$$p_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_i m_{ij}} \quad \cdots (2)$$

すなわち、遷移確率 p_{ij} は、対象地域内の全ての地点が確率的に変化しているという仮定のもとで推定されている。本研究ではこの遷移確率モデルを、「Pモデル」と呼ぶことにする。

2.2. 安定地点を考慮した遷移確率モデル(Qモデル)

対象とする地域内に、確率的には変化しない地点（安定地点）が含まれる場合、前節で記述した遷移確率 p_{ij} は真の遷移構造を反映していない。つまり、土地利用 j の安定地点が対象地域内に面積 s_j だけ存在する場合には、図2に示すように、変化する地点のみを用いて遷移確率行列を推定するべきである。すなわち、土地利用遷移モデルは次のように記述する必要がある。

$$x_i(t+1) = s_i + \sum_j q_{ij} (x_j(t) - s_j) \quad \cdots (3)$$

ここで、 q_{ij} は安定地点の面積を除いた部分についての遷移確率である。このとき、このモデルの遷移確率 q_{ij} の推定値は次式で与えられる。

$$\begin{cases} q_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_i m_{ij} - s_j} & (i \neq j) \\ q_{jj} = \frac{m_{jj} - s_j}{\sum_i m_{ij} - s_j} \end{cases} \quad \cdots (4)$$

$$\cdots (5)$$

安定地点の面積を考慮した土地利用遷移モデルを、本研究では「Qモデル」と呼ぶ。

図1 従来の遷移確率行列推定方法

図2 安定地点を考慮した遷移確率行列の推定方法

3. Qモデルの推定方法

3.1. パラメータの推定

安定地点の面積 s_j の、 $t=0$ における土地利用 j の総面積に対する割合を a_j と表すと、次式を得る。

$$a_j = \frac{s_j}{\sum_i m_{ij}} \quad \cdots (6)$$

このとき、 p_{ij} と q_{ij} には次式の関係が存在する。

$$\begin{cases} p_{ij} = \frac{\sum_i m_{ij} - s_j}{\sum_i m_{ij}} \frac{m_{ij}}{\sum_i m_{ij} - s_j} \\ = (1 - a_j) q_{ij} \quad (i \neq j) \end{cases} \quad \cdots (7)$$

$$\begin{cases} p_{jj} = \frac{s_j}{\sum_i m_{ij}} + \frac{\sum_i m_{ij} - s_j}{\sum_i m_{ij}} \frac{m_{jj} - s_j}{\sum_i m_{ij} - s_j} \\ = a_j + (1 - a_j) q_{jj} \end{cases} \quad \cdots (8)$$

また、対象地域内から任意にある地点を抽出したとき、その土地利用 j が時点 $t=0 \sim 2$ の間にまったく変化しない確率を r_j とすると、 r_j は a_j と q_{jj} を用いて、次のように表現することができる。

$$r_j = a_j + (1 - a_j) q_{jj}^2 \quad \cdots (9)$$

式(5)–(7)より a_j を消去すると、

$$\begin{cases} q_{ij} = \frac{p_{ij}(1 - q_{jj}^2)}{1 - r_j} \quad (i \neq j) \end{cases} \quad \cdots (10)$$

$$\begin{cases} q_{jj} = \frac{p_{jj} - r_j}{1 - p_{jj}} \end{cases} \quad \cdots (11)$$

が得られる。このとき土地利用に関する数値情報が3時点($t=0, 1, 2$)で得られていれば、 p_{ij} 、 p_{jj} 、 r_j は実際のデータから推定可能であるので、Qモデルの遷移確率 q_{ij} は式(10)・(11)より推定できる。また式(9)より、土地利用 j の安定地点の面積の割合 a_j も推定可能である(図3)。

3.2. パラメータの条件

式(10)、(11)で推定されるQモデルのパラメータは、以下に示す条件を満足する必要がある。

$$0 < q_{ij} < 1 \quad \cdots (12)$$

$$0 \leq a_j < 1 \quad \cdots (13)$$

式(12)・(13)を式(9)–(11)をもとに整理すると、

$$2p_{jj} - 1 < r_j < p_{jj} \quad \cdots (14)$$

$$p_{jj}^2 \leq r_j \quad \cdots (15)$$

が得られる。これらを満足する p_{jj} と r_j の関係を図4に示す。式(9)–(11)から a_j 、 q_{ij} の値は推定されるが、データ数が少なく p_{jj} 、 r_j が安定的に推定できない場合には図4の範囲におさまらない可能性もある。その場合には、土地利用 j については安定地点は存在しないものと考え、QモデルではなくPモデルを採用すればよい。さらに、 $t=0 \sim 1$ と $t=1 \sim 2$ の土地利用遷移構造の間に大きな違いがある場合にも同様の問題が生じるが、遷移構造の定常性が仮定できない状況下では安易なモデルの適用は危険である。遷移構造が

図3 Qモデルのパラメータ推定

図4 パラメータの条件

時間とともに変化する場合への対応は今後の検討課題である。

4. 実データを用いた安定地点の面積の推定

ここでは、表1に示す現実のデータを用いて、Qモデルにより安定地点の面積の割合を推定し、安定地点の存在を確認することを試みる。

まず、図5に示した分析対象地域(A)の全域のデータを用いて、各土地利用項目別に安定地点の面積の割合 a_j を推定し、表2に示した。この結果、空地については $a_2=0.337$ と低く、ほとんどの空地は確率的に変化しやすく、安定地点は他の土地利用項目と比較して少ないことがわかる。一方、住宅用地は $a_3=0.938$ と非常に高く、安定地点の割合は高い。商業業務用地、公共用地はともに約0.86であり、住宅用地の値には及ばないものの、高い割合で安定地点が存在することがわかる。

以上の安定地点の割合は、都市空間内で必ずしも一様ではない可能性がある。そこで、都心からの距離によって安定地点の割合がどのように変化しているかを確認するため、距離圏別に土地利用の安定面積の推定を試みた(図6)。商業業務用地に注目すると、都心部に近づくほど a_4 の値は1.0に近づき、商業業務用地は安定的に存在していることがわかる。しかし、都心から遠ざかるにつれて安定地点の面積は減少し、さらに遠い地点で再び上昇する。これは、横浜や大宮、八王子などの商業集積地域がこの距離圏に含まれるためと推測される。一方、公共用地については、都心からの距離によらず8割以上の面積が安定的に存在している。住宅用地については、郊外で安定地点の面積が多いものの、都心では図4に示した条件は満足されず、 a_j の値は推定不能となった。住宅用地の遷移構造そのものが、分析対象とした時点内で変化している可能性がある。空地については、他の項目に比べ値は小さく、ほとんどの地点が確率的に変化しやすいことがあらわれている。特に、都心に近くなるほど値は小さく、都心寄りの空地ほど確率的に変化しやすいことを示唆している。

以上の結果から、確率過程に従わない安定地点が

表1 土地利用データの概要

使用データ：国土地理院発行細密数値情報 土地利用データ[1974, 79, 84] メッシュサイズは100m×100m		
番号	本研究における分類	細密数値情報の分類
1	山林農地	山林荒地 田 畑
2	空地	造成中地 空地
3	住宅用地	一般低層住宅地 密集低層住宅地 中高層住宅地
4	商業業務用地	商業業務用地
5	公共用地	道路 公園 公共公益用地
	(分析対象外)	工業用地 河川・湖沼等 その他 海

注) 本研究では細密数値情報の土地利用項目を上のように再分類した。ただし、「河川・湖沼等」、「海」、「その他」は除外した。また、「工業用地」については、パラメータを安定的に推定できなかったため、今回の分析では除外した。

図5 分析対象地域(A)

表2 首都圏全域での安定地点の割合

土地利用項目	1 山林農地	2 空地	3 住宅用地	4 商業業務	5 公共用地
安定地点の割合	0.620	0.337	0.938	0.860	0.867

多く存在することが確認でき、土地利用遷移予測の際には、安定地点の存在を考慮する必要性が高いことが明らかとなった。

5. PモデルとQモデルの比較

以下では、分析対象地域内に安定地点が存在する際に、従来のままPモデルを用いることの危険性と、Qモデルを用いることの有効性を、二つのモデル比較を通して確認する。なお、ここでは真の土地利用遷移を仮想的に作成することとした。作成方法は、まず図7に示す対象地域(B)に、「確率的に変化する地点」と「安定地点」を想定し、「確率的に変化する地点」内の現実のデータ(1974年、1984年)をもとに真の遷移確率 q_{ij}^* (表3)を作成した。そして、1974年の土地利用の状態を $t=-1$ の状態とし、 q_{ij}^* を用いて $t=0, 1, 2, \dots$ の状態の仮想データマップを作成した。さらに、 $t=1$ を現時点とみなして、Pモデルの遷移確率 p_{ij} は $t=0, 1$ の2時点のデータから推定し(表4)、Qモデルの遷移確率 q_{ij} は $t=-1, 0, 1$ の3時点のデータより推定し(表5)、各々の遷移確率を用いて、将来($t=2, 3, 4, \dots$)の土地利用予測を行った(図8)。

Qモデルによる各土地利用項目ごとの安定地点の割合 a_j の推定結果(表6)から、安定地点の面積の割合 a_j がほぼ正確に推定されていることがわかる。しかし、式(11)をみてもわかるように、 p_{ij} の値が大きな(1に近い)場合には、式(11)の分母は非常に小さな値となり、 r_j の値がわずかに上下するだけでも q_{ij} の推定値は大きく変動してしまい、ひいては式(9)より求められる a_j の値も大きく変動してしまう。つまり、 p_{ij} の値が大きい場合には、 a_j の推定値は不安定になる危険性がある。このことは、 p_{ij} の値の大きな住宅用地(表4)の a_j の推定値 a_3 が、やや真の値から乖離していることにあらわれている。

さらに、図8に示した土地利用予測の結果をみると、Pモデルでは $t=3$ 以後において山林農地と住宅用地の構成比が逆転し、想定した真の推移にそぐわないが、Qモデルによれば、どの土地利用項目についても真の値に酷似した遷移を予測できることがわかる。

図8には、Qモデルによる予測値の信頼性を確認するため、予測伝播誤差に関する既往研究(青木ほか、1994)にもとづき、予測値の信頼区間も同時に示してある。従来の、いわば見せかけの遷移構造をもとに行った予測よりも、Qモデルによれば信頼性

図6 距離圏別の安定地点の面積割合の推定結果

図7 分析対象地域(B)

の高い予測が可能であることがわかる。

6. まとめ

本研究では、安定地点の存在を考慮しながら従来の遷移確率モデル(Pモデル)に改良を加え、新しい遷移確率モデル(Qモデル)を構築した。Qモデルを用いて土地利用における安定地点の割合を推定した結果、各土地利用項目において多くの安定地点が存在することが判明した。さらに、安定地点が存在する場合、従来のPモデルよりもQモデルの方が

表3 真の遷移確率行列 q^*_{ij}

$i \backslash j$	1 山林農地	2 空地	3 住宅用地	4 商業業務	5 公共用地
1 山林農地	0.662	0.073	0.017	0.015	0.003
2 空地	0.097	0.466	0.018	0.034	0.004
3 住宅用地	0.160	0.209	0.928	0.054	0.075
4 商業業務	0.029	0.057	0.019	0.882	0.013
5 公共用地	0.052	0.195	0.018	0.015	0.905

表4 対象地域全体で推定した遷移確率行列 p_{ij}

$i \backslash j$	1 山林農地	2 空地	3 住宅用地	4 商業業務	5 公共用地
1 山林農地	0.904	0.041	0.015	0.013	0.002
2 空地	0.028	0.702	0.016	0.030	0.003
3 住宅用地	0.045	0.116	0.937	0.047	0.055
4 商業業務	0.008	0.032	0.016	0.898	0.009
5 公共用地	0.015	0.109	0.016	0.012	0.931

表5 Qモデルを用いて推定した遷移確率行列 q_{ij}

$i \backslash j$	1 山林農地	2 空地	3 住宅用地	4 商業業務	5 公共用地
1 山林農地	0.661	0.074	0.016	0.015	0.003
2 空地	0.097	0.467	0.017	0.036	0.004
3 住宅用地	0.160	0.208	0.932	0.056	0.070
4 商業業務	0.029	0.057	0.017	0.878	0.011
5 公共用地	0.053	0.194	0.018	0.015	0.912

表6 安定地点の割合の推定値と真の値との比較

項目	山林農地	空地	住宅用地	商業業務	公共用地
真の値	0.715	0.442	0.120	0.141	0.265
推定値	0.716	0.441	0.069	0.166	0.212

正確な土地利用予測が可能である。したがって、土地利用予測の際には安定地点の存在を考慮したQモデルが有効である。

謝辞

本論文は、第4回地理情報システム学術研究発表大会での発表(大佛・倍田、1995)をもとに加筆、修正したものである。貴重なご意見、ご質問を頂いた方々に感謝の意を表します。

参考文献

青木義次・永井明子・大佛俊泰(1994)遷移確率行列を用いた土地利用分析における誤差評価、「日本建築学会計画系論文集」、第456号、171-177。
石坂公一(1992a)土地利用遷移行列の分析手法に関する考察、「日本建築学会計画系論文報告集」、第436号、59-69。
石坂公一(1992b)首都圏における距離帯別の土地利用変化動向、「日本建築学会計画系論文報告集」、第442号、97-107。
大佛俊泰・倍田賢一(1995)マルコフ連鎖型土地利用モデルの改良、「地理情報システム学会講演論文集」、第4号、71-74。
金 俊栄・萩島 哲・大貝 彰・岩尾 襄・黒瀬重幸(1991)土地利用遷移行列による都市の土地利用用途転移の分析、「日本建築学会計画系論文報告集」、第424号、69-78。

図8 PモデルとQモデルの予測比較