Ⅳ－8 人口移動分析におけるMarkov Process Modelの応用に関する一考察 －特に斉時な場合について－

北海道大学大学院環境科学研究科　　正員　加　藤　修

Ⅰ. はじめに

この論文の目的は、マルコフ・プロセス・モデル（Markov Process Model： MPMと略記する。以下同じ）を人口移動分析に応用することにある。その応用へのアプローチとして、MPMが持つ基本的特性を人口移動の類型論のある視点から把え直すもので、特に推移確率が斉時的な場合に限って、考察をおこなうものである。

人の空間的移動（migration）は、人口現象であり、これは人口の一次過程（Primary demographic pr-ocess)、いわゆる、出生・死亡・移動（転入・転出）の一過程である。今、地球という全体をクローズド・システムとして考えるならば、出生・死亡の人口現象は必ずみられるという反面、人口移動過程は人口増減にまったく関与しないことから、本質的な過程とはいえないといわれてきた。[1] しかし、範域を限定してみるならば、地域間人口移動による人口拡散、その結果としての分布の偏り（maldistribution）によって、種々の地域問題が生じていることが事実としてある。従って、この種の問題へのアプローチを考えると、人口移動をたんに"非本質的、あるいは出生・死亡過程に対する攪乱要因"と規定することは現実的把え方、対応であるとはいえない。従って、このような地域問題へのアプローチの点からするならば、出生・死亡過程と同等、あるいはそれ以上に移動過程に対する責極的な研究が必要である。それは人口移動が一層複雑な現象としてあること。又、逆に規定されるものであることからも言える。さらに、計画的に社会変動をおこし社会の方向を誘導する立場からしても、人口移動によって生じる問題は重要なものである。これらの問題は、とりも直さず地域計画上の課題と考えられる。

ところで、この人口移動過程に対する理論は、他の過程に対して、今一つ研究が遅れている。ここでは、特に従来の人口移動理論と、マルコフ過程理論、なかでもマルコフ連鎖における推移確率が定常である場合、これら両者の関係性について考察を加えるものである。この意味で、この報告は人口移動に関する基本的な分析方法の設定を試みたものである。

Ⅱ. 人口移動理論

人口移動理論は概括すると、(1)社会的適応論、(2)類型論、(3)要因論に大きく分けることができる。[2]
(1)の社会的適応論は、移動する主体が到着地の社会的・経済的・文化的環境条件に適応（adjustment）し、それに同化してゆく過程、または不適応（maladjustment）の場合の問題に焦点を絞った研究である。(2)の類型論は、人口移動の一般理論ではないが移動の事実を分析し、認識するための基礎的作業に必要な用具として提唱されたものである。数多くあるなかでも、特に著名なものとして、ピーターセン（William Pete-rsen）の類型論がある。この理論については、マルコフ・モデルとの関連で後述する。(3)の要因論は、人口移動を起し、そのプロセス、形態、結果に影響を与える諸要因に関する理論であって、人口移動を理論的に究明するための基準枠を設定することに研究の主眼がおかれている。例えば、ボーグ（Donald J. Bogue）の人口移動の規定要因群があげられる。[3] 本報告では、以上の人口移動理論、なかでもピーターセンの類型

論との関係においてＭＰＭを論ずることとする。

●ピーターセンの人口移動類型論とＭＰＭとのつながり

人口移動一般を説明する基本的枠組として、よく援用されるものとして、プルプッシュ理論がある。これは、端的にいうと、地域間の生活格差によって人口移動がおこると説明するもので人口移動の要因として、外的条件に重点をおくものである。しかしながら、この理論により説明が不充分な人口移動が存在する。

ピーターセンは、歴史を概括して人口移動に関する５つの類型を設定しながら、さらに従来のプル・プッシュ理論の、いわゆる二極的な説明に対しての挑戦として〝慣性概念〞の導入をはかった。すなわち、彼は「人口移動という運動を力学的な考え方で説明しようとする場合、力の概念だけでなく、慣性の概念をも導入すべきである」と主張する。すなわち、彼は静止状態、あるいは動いている社会集団は、その変更を強いられなければ、そのままの状態を維持しようとするとのべ、その理由として、「存在しうるいかなる生活パターンにも、そのパターンを支持するような価値システムが発達するからである」としている。この考え方は、従来のプル・プッシュ理論を否定するものではなく、人口移動理論の一般化への拡充を示唆している。が、彼はこの慣性の概念による人口移動類型論の拡充をはかることはしなかった。この慣性の概念に注目したのが、兼清弘之である。彼は人口移動に関して、その人口の「重さ」とも云うべきものを考え、「それは、人びとがそのなかに現にある自己の社会への結びつきの強さだ」[4] と考え、この人口の「重さ」の大小により、外部から加えられる力がまったく同じでも、現われる移動という人口の運動の形態には、おのずと差別がうまれるとし、以上に取りあげた３つ、いわゆる慣性の力、プルの力、プッシュの力、これらの作用の総合としての人口の運動がおこるのであると考えた。そして、以上の三要素の作用の総合として、人口の差別移動を説明するという方向に人口移動力学の拡充的発展の可能性があるとの示唆を残している。

さて、ここで以上のべて来た慣性の力について、限定して考える。ある人口集団が慣性で永続運動しているということは、力学的にその時には力が作用していない、すなわち時間に依存しないことを示すものである。ここに人口移動の現象が一つの確率過程をなすという前提のもとで、ＭＰＭとのつながりがでてくる。ところで、マルコフ連鎖において、推移確率が固定的、すなわち定常状態という時間に依存しない状態の場合を考えることができる。この場合、マルコフ連鎖の運動は、外的なプル・プッシュの力から捨象されたもので、内生的である。このように、マルコフ連鎖の推移確率が斉時的な場合というものは、ピーターセンが主張する人口移動類型論に導入された慣性の概念と対応する。これが、１対１に対応するということに関しては、今後検討の余地が残されるが、両者の関係は類似的である。また、推移確率が非斉時的であるとは、外的な力としてのプル・プッシュの力が作用する人口移動に対応する。以上のこのような関係を以下の表－１にまとめる。

表－１　人口移動理論とＭＰＭとの関係

<table>
<tr><th></th><th></th><th>作　用　力</th><th>検　　定</th><th>人口移動の推移確率（Pij）</th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="2">人口移動力学</td><td>慣性の概念</td><td>○慣　性　力
（inertia）</td><td rowspan="2">（マルコフ連鎖性）</td><td>$P_{ij} = \mathrm{const.}$
（斉時的）</td><td>内生的</td></tr>
<tr><td>力の概念</td><td>○外　　力
・プルの力（pull）
・プッシュの力
（push）</td><td>$P_{ij} = F_{ij}(t, d, x_3, x_4, \cdots\cdots, x_n)$
t：時間（非斉時的）
d：距離抵抗
$x_3 \cdots x_n$；人口移動の説明変数</td><td>外生的</td></tr>
</table>

Ⅲ. マルコフ・プロセス・モデル(MPM)

マルコフ性(property of Markov)をもつ、確率過程(stochastic process)において、時間に依存しない推移確率(transition probability)、そして確率過程が離散的な場合、すなわち斉時的マルコフ連鎖についてのべる。マルコフ連鎖モデルの社会科学への応用は、アンダーソン(G. W. Anderson)[5]にみられるように、1950年代初期より数多くの研究が試みられている。心理学においては、学習過程理論[6]に、社会学では社会移動モデル[7]にその成果がみられる。地理学においては、ハゲット(P. Haggett)が初めて指摘[8]し、地理的空間の動態過程モデル、たとえば土地利用変動に数多くの応用がみられる。一方、土木工学の分野では、佐々木綱が自動車の交通量分布の推定方法[9]に、あるいは水資源計画[10]にまで、多方面にわたって応用されるに至っている。さらに、人口移動分析に関して、事例研究をさかのぼってみると、初めてリッキネン(K. Rikkinen)が、フィンランドの人口分布の変動過程とその予測について応用[11]し、我が国においては神谷慶治[12]にはじまり、清水良平[13]が受け継ぎ、発展させ、地域の経済・人口分析に興味ある成果をあげている。マルコフ連鎖モデルにかかわるこの種の人口移動に関連する論文の中心をなす分析法は、1)推移確率が斉時的な場合についてであり、しかも2)単純な形、すなわち、マルコフ連鎖特有の基本的性質の利点を充分、有効に駆使して来ているとはいえない。又、簡便な利用の上に立ち、その他の指標(主に経済指標)との単相関分析にとどまっている。従って、それらの応用への過程で、

i) 人口移動理論との対応関係について論及していない。

ii) 斉時的マルコフ連鎖の基本的性質の有効な利用にいたっていない。

i)については、すでにMPMの導入の意図として、人口移動の類型論の慣性概念の視点からのべた。そこで、マルコフ連鎖について詳細にとりあげる。離散時点の確率過程$\{X_n\}$ ($n=0, 1, 2 \cdots\cdots$)を考え、任意の$n \geqq 1$と正の整数の組($i_0, i_1, \cdots\cdots, i_{n-1}$)と$j$に対して、

$$P[X_n=j \mid X_0=i_0, \cdots\cdots, X_{n-1}=i_{n-1}]$$
$$=P[X_n=j \mid X_n=i_{n-1}] \quad \text{——— (1)}$$

が成り立つとき、確率過程$\{X_n\}$はマルコフ性をもつといい、マルコフ性をもった状態空間が離散的な確率過程$\{X_n\}$をマルコフ連鎖(Markov Chain)という。式(1)の推移確率が時点nによらないとき推移確率は定常であるといい、マルコフ連鎖は斉時的であるという。

斉時的マルコフ連鎖$\{X_n\}$の推移確率を、

$$P_{ij}=P[X_n=j \mid X_n=i_{n-1}], \quad 1 \leq i, j \leq N \quad \text{—— (2)}$$

とおくと、Pijは確率であるから、

$$0 \leq P_{ij} \leq 1.0, \quad \sum_{j=1}^{N} P_{ij}=1.0 \quad \text{——— (3)}$$

が成立する。Pijを行列の要素と考え、

$$\mathbb{P}=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots\cdots & P_{1N-1} & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots\cdots & P_{2N-1} & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \cdots\cdots & P_{NN-1} & P_{NN} \end{bmatrix} \quad \text{——— (4)}$$

とおく。これを一次の推移確率行列(transition probability matrix)と呼ぶ。

これらのマルコフ連鎖モデルにおけるマルコフ性、及び推移確率の定常性の検定もマルコフ分析をおこなうに必要なことである。この検定はχ^2-検定を用いる。[14] 以上のマルコフ連鎖の基本性質に係わるものとして、基本行列、第一到達期間、その分散、標準偏差等は、次項でふれる。

Ⅳ. 人口移動とマルコフ連鎖モデルとの関係

人口移動理論との関係については、すでにのべた。ここでは人口移動をマルコフ分析するにあたっての基本事項を整理する。人口移動という社会現象は、いわば一つの確率過程とみることができる。この人口移動について、マルコフ性を検定したうえで、マルコフモデルを援用することができる。

地域間人口移動表（表－２）はｉ－地域からｊ－地域への移動量をn_{ij}（ただし、$n_{ii}=0.$）とし、ｉ－地域からの総移動量を$\sum_{j=1}^{N} n_{ij}$とする。したがって、地域間の人口移動推移確率（transition probability of interregional migration）は、

$$P_{ij} = n_{ij} \Big/ \sum_{j=1}^{N} n_{ij} \quad , \quad \sum_{j=1}^{N} P_{ij} = 1.0 \quad [i = 1, 2, 3 \cdots, N] \quad , \quad 0 \leq P_{ij} \leq 1.0 \qquad (5)$$

で与えられる。マルコフ性が成立するならば、以下のことが成立する。

$$\alpha \mathbb{P} = \alpha \qquad (6)$$

$$\lim_{n \to \infty} \mathbb{P}^n = A \qquad (7)$$

ただし、Ｐ：要素Pijからなる地域間人口移動の推移確率行列、α：人口の均衡確率（equbirium proba-bility）ベクトル、Ａ：同一の確率ベクトルαからなる固定ベクトル。

表－２　地域間人口移動表

i＼j	1	2	3	•• j •	N-1	N	
1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	•• •	n_{1N-1}	n_{1N}	
2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	•• •	n_{2N-1}	n_{2N}	$\sum_{j=1}^{N} n_{ij}$
3	n_{31}	n_{32}	n_{33}	•• •	n_{3N-1}	n_{3N}	
• i •	• •	• •	• •	• • n_{ij} • •	• •	• •	• •
N-1	n_{N-11}	n_{N-12}	n_{N-13}	• •	n_{N-1N-1}	n_{N-1N}	
N	n_{N1}	n_{N2}	n_{N3}	• •	n_{NN-1}	n_{NN}	

注；人口移動の単位は　人／年で、平均的な移動主体を扱う。

地域間人口移動の推移確率行列Ｐが正則エルゴード・マルコフ連鎖（regular ergordic Markov chain）、すなわち移動主体者がどの地域を出発にもっても、他のすべての地域への到着地を持つ移動であることを意味し、この時以下の関係式が成立する。このＭは平均第一到達期間（mean first passage time）で、要素m_{ij}は移動主体が地域－ｉから地域－ｊに最初に移動するのに要する期間の長さを示すもので、移動主体距離（migrant distance）である。これは地域間の人口移動の難易 ― ユークリッド距離ではないが、地域間のAccessibilityを代理できる指標 ― をあらわすものと考えることができる。

$$M = (I - Z + E \cdot Z_{dg}) \cdot D \qquad (8)$$

Ｚ：正則マルコフ連鎖の基本行列（fundamental matrix）、$(I - P + A)^{-1}$で各要素z_{ij}はP^n状態のＡからの偏差の総和。　Ｉ：単位行列（identity matrix）。

Ｅ：要素が全て1.0である行列。　Zdg：基本行列Ｚの対角要素を対角要素とする対角行列。

Ｄ：均衡行列Ａの対角行列の逆数を要素とする対角行列。

平均第一到達期間Ｍの分散Ｖ（v_{ij}を要素とする）は、以下の式であらわすことができる。

$$V = M \cdot (2 \cdot Z_{dg} \cdot D - I) + 2(Z \cdot M - E \cdot (Z \cdot M)_{dg}) - M_{sq} \qquad (9)$$

Msq：平均第一到達期間Ｍの各要素m_{ij}を自乗したものを要素とする行列。

式（８）のＭは、移動の難易を表わすものであるが、この対角要素である平均帰着期間（mean recurren-ce time）は、地域－ｉから出発して（全然移動しない場合もふくむ）、再び地域－ｉにもどってくるまでの平均期間である。したがって、この意味するところは人口の定着性をあらわすものといえる。つぎに、地

域－ｉを出発した移動者が、出発地と同じ地域－ｉにとどまりつづける期間の平均、平均人口滞留期間は以下の式で求める。

$$T_i = 1.0 / (1.0 - P_{ij}) \quad , \qquad (10)$$

$$\sigma^2 = P_{ij} / T_i^2 \qquad (11)$$

σ_i^2：平均人口滞留期間の分散。

以上の諸式(8)～(11)を用いて、閉システムとして考えたある多地域間の人口移動の諸特性、移動の難易の程度、地域相互間の機能的性質、また平均、分散の特性値を用いて閉システムとして考えた場合の他の地域との比較をすることができる。

次に、地域間の人口移動がマルコフ連鎖過程にしたがう前提で移動主体の第ｒ期の地域単位別の人口分布数の変動と予測は、以下の式であらわすことができる。

$$W^{(r)} = W^{(0)} \cdot \mathbb{P} \qquad (12)$$

ただし、$W^{(0)} = [\, W_1^{(0)}, W_2^{(0)}, \cdots\cdots, W_n^{(0)} \,]$は、初期の地域別人口分布。

以上、人口移動の分析の一方法として、マルコフ連鎖モデルの応用に関して述べてきたが、これらの前提条件をまとめてみる。

（１） 各一定期間毎の地域間人口移動推移確率は変化がなく、固定したものである（推移確率の斉時性）。

（２） 地域単位ｉ、ｊ間について第ｋ段階目における人口移動は第（ｋ－１）段階目における人口移動に依存する過程である（マルコフ性）。

（３） 対象地域外との交流にもとづく、人口移動主体数の変化、並びに対象地域内における移動主体数の変化はない（対象地域の閉システム性、人口の自然増加過程の捨象）。

（４） 個々の移動主体相互間には、流動性の差異がない（移動主体の平均性）。

以上にあげた前提条件のなかで厳しいものは、現実の人口移動データを用いての分析結果の信頼性をおとすことになる。したがって、以下のものが問題点となる。

(1)対象とする現象（人口移動）にマルコフ連鎖モデルの適用が妥当であるかないかの統計的検定法、特にχ^2－検定による方法の拡充が必要である。

(2)推移確率は固定的なものとしたが、推移確率行列をいかに適切に求めるか。又、現実にはこれ自体が変動する。さらに、人口移動における慣性力だけに見方を偏らせず、プル・プッシュ要因を導入できることが必要である。

(3)対象地域を閉システムとしたが、一般的には開システムとして地域はあり、移動がおこなわれている。したがって、開システムとした場合のより一般化のできた動態過程モデルへとすることである。

では、全般的にまとめてみると、式（８）で求めることができる機能的距離Ｍは、ユークリッド距離ではない、すなわち、ｉ→ｊとｉ←ｊに対応するｍが同値ではない。これは地域間の機能的結合、アクセシビリティを検討するうえの指標といえる。表－１で示した、人口移動理論と推移確率の斉時的、非斉時的な場合に関しての対応は、さらに理論的に精致化する必要がある。たとえば、地域相互間の関係式を導入することもより一般化の可能性を高めることができる。また、本研究では推移確率が斉時的である場合について検討したのであるが、非斉時的な推移確率として、$P_{ij} = F_{ij}(t, d, x_3, x_4, \cdots, x_n)$を設定し、非斉時状態を反映できる、より一般化したモデルとすることも考えられる。さらに、人口分布Ｗについてのべる。長期にわたっての人口分布の動態過程は、人口移動量だけで決定されるものではない。人口分布は人口移動に規定され、また人口移動は人口分布によって規定されもする。この人口分布の決定の内実は、出生・死亡過程をふくむ以上、人口分布Ｗの動態、予測にあたっては、以上の過程を導入し、より一般化したモデルとすることが必要である。また、コントロール概念の導入をはかり、その他の数理計画手法等を使える汎用性の高いものとすること、環境変動に対応するモデルへと発展させることも可能である。

以上、全般的な考察をしたが、実際の地域間人口移動データによる検討が必要である。これに関しては、事例地域として、苫小牧圏（苫小牧、白老、早来、厚真、鵡川の１市４町）をとりあげる。尚、この計算結果については、発表時におこなう。

V. おわりに

移動理論における人口の慣性力とマルコフ連鎖モデルとの関連、マルコフ連鎖モデルの基本的性質の検討、人口移動との関連性をのべ、人口移動分析の一手法となりうる意義を考察した。今後の課題としては、前項でのべた応用上の問題点がそのまま課題となる。人口移動全般に関しては、(1)移動という空間選好に際して、移動主体者の持つ空間的イメージよりつくられるメンタル・マップ、並びに実際人口移動マップとの接合点を計画学的視点からまとめること。(2)情報拡散の度合と人口移動特性との相互関係。(3)環境変動と人口移動規模量との相互関連。(4)人口移動理論とマルコフ連鎖モデルとの数理的つながりの拡充等があげられる。

最後に、本研究を進めるにあたり種々適切な御指導をいただいた北海道大学大学院環境科学研究科の山村悦夫教授、関清秀名誉教授に心より謝意を表します。さらに、種々の統計資料の作成に便宜をはかっていただきました苫小牧、白老、早来、厚真、鵡川町の関係各位にここに記して謝します。

尚、計算にあたっては、北海道大学大学院環境科学研究科のPANAFACOM U-1500システムを利用した。

注

1）舘　稔，『人口分析の方法』（形成選書），古今書院，1978.

2）富田富士雄，『人口社会学の基本問題』，新評論，1977.

3）Donald J. Bogue，"Internal Migration"，in Philip M. Hauser and Otis Duncan (eds.)，The Study of Population. 1959.

4）兼清弘文，『人の動きと社会的空間』，大明堂，1970，pp. 73.

5）Anderson，T. W.，Probability Models for Analyzing Time Change in Attitude. In Lazarsteld，P. F. (ed)，Mathematical Tinking in the Social Science，Free Press，1954.

6）印東太郎，『数理心理学』（講座心理学15），東大出版会，1969.

7）世代間移動にマルコフ連鎖モデルが適用できることを初めて示したのは、英国の統計学者，S. J. Prais，J. G. Kemeny，J. L. Snellである。

8）地理的現象にマルコフ連鎖が多くみられることを指摘。Haggett，P.，"Locational analysis in hu-man geography，St. Martin's Press，1965.

9）佐々木綱，「吸収マルコフ過程による交通量配分理論」，『土木学会論文報告集』，№21，1965.

10）竹内邦良，「水資源計画法－流量時系列シミュレーション」，『土木工学における数値解析』，サイエンス社.

11）Rikkinen，K.，"Makov Chain Analysis of Interprovincial Migration in FinLand"，1971.

12）神合慶活，「これからの人口分布」，『金融ジャーナル』，第４巻第８号，1963.

13）清水良平，「わが国における人口移動と産業の地域構造」，『農業経済研究』，第36巻，1964～65.

14）森村英典，高橋幸雄，『マルコフ解析』（ORライブラリー18），日科技連，1979.