

行動の系列分析に関する諸手法の展開

筑波大学大学院 (博) 心理学研究科 加藤 克紀

筑波大学心理学系 牧野 順四郎

Development of the methods for the sequential analysis of behavior

Katsunori Kato and Junshiro Makino (*Institute of Psychology, University of Tsukuba, Ibaraki 305, Japan*)

In describing behavior sequences the way to categorize acts, i.e., discrete units of behavior pattern, is important. Any behavior sequences are consisted of intra- and inter-individual behavior sequences. Various methods have been developed for recording them. Some statistical techniques for the sequential analysis are based on the assumption that any behavior sequences could be described as Markov chains. Most others have been developed to overcome some difficulties arising from this assumption. In some fields other than ethology, the sequential analysis has been extensively applied to experimental studies of instinctive behavior. Recently, however, it began to be used in studying learning behavior. Some students of human behavior have extended the concept of behavior sequence and view the sequential analysis as a method for analysing qualitative sequential data.

Key words : sequential analysis, behavior sequence, act, Markov chain, ethology, review.

はじめに

行動現象を“歩く”, “手を振る”といった行動パターンの系列, すなわち“行動系列 (behavior sequence)”として記述した場合にそれを分析するための定量的な手法は, 一般に“系列分析 (sequential analysis)”と呼ばれ, 主にエソロジーの分野で応用されてきた。行動現象を行動系列という形で記述し, それに分析を加えるという作業を心理学者が全く無視してきたわけではない (e.g., Miller & Frick, 1949; Lashley, 1951; Miller et al., 1960)。しかし多くの心理学者にとって実験場面における行動は, 刺激-反応図式における反応という, たった1個のカテゴリーに限定されていたので, 取替えて行動系列を取り扱う必要はなかったのである。それに対してエソロジストは, 本来何が起きているのか良く分からない自然場面での動物の行動現象全般を研究していたので, できる限りそれをそのまま記述し, そこになんらかの規則性を見いだすことを助けてく

れる手法が必要であった。しかもエソロジーが自然科学の一分野として地歩を固めていくためには, その手法は定量的であることが望まれた。そのような要請のもとに行動現象を行動系列として記述すると共に, その規則性についても直観や印象に留まらずに定量的な裏付けを与えるための分析法の必要が生じたのである。

本論文の目的は, そうした系列分析の諸手法を概観することにある。本論文では, 先ず最初に系列分析が扱うデータの記述の仕方について説明し, 次に系列分析の概要と各手法の特徴について述べる。そして最後に, エソロジー以外の諸分野における応用について簡単に触れることにする。

データの記述

系列分析は行動系列を“行動項目列”という形で受け入れる。行動項目列とは各行動パターンの記号, すなわち, “行動項目 (behavior item または behav-

ior category)”の列 (string) である。行動パターンは“行動型 (act)”とか“行動要素 (behavior element)”などと呼ばれることが多いが、ここでは、前者の名称を採用ことにする。

行動型

エソロジストの仕事は先ず野外の動物の行動を長期に渡って観察し、自分たちが用いる行動項目を確定することから始まる。つまり行動型をカテゴライズし、それに一定の記号を与え、そのリスト (行動目録 ethogram と呼ばれることもある) を作成する。この手続きは観察を行う場所が野外でなくとも系列分析を行う者にとって普遍的なものである。

ここでの大きな問題は行動型のカテゴライズにある。身体運動は時間軸上で連続しているため、一体どこで行動型の区切りをつけるかを決めなければならない。これは非常に重要である。なぜなら系列分析において行動型はその分析単位であり、行動型のカテゴライズの仕方が分析結果を左右するからである。研究者によっては身体運動を筋骨格系に基づく座標系で表現し、行動現象を記述しようとする者もいる (e.g., Golani, 1973) が、その作業に費される労力や記録のための諸条件を考えると一概に良いとばかりも言えない。

行動型のカテゴライズは観察者のパターン認識に依存している場合が一般的である。しかし、そうしたやり方は非難されるべきではない。行動型は本質的に我々の認識の産物であり、その区切り方が分析に先立って決定されるなどということはもともとありえないのである。むしろ重要なことは、行動型の記号である行動項目がその分野の研究者の間でどの程度共有されるか、すなわち間主観性の問題にある。つまり行動項目というものは、基本的にその分野の研究者のみによって理解されうる特殊な言語と見なされるべきなのである。

しかしながら行動項目あるいはそのリストは、極めて限定された言語である。なぜなら、それは、研究者間の間主観性を高めるために“直示的定義 (ostensive definition)”を必要とするからである。つまり原則として研究者は、ある時点での行動現象を指さすことによって各行動項目の意味を他の研究者に教えることができなければならないのである。そのためエソロジストが通常行なう行動型のカテゴライズは、身体運動の類似やその結果の同一性によっていることが多い (Hinde, 1982)。従って行動項目は日常言語のように多様な文脈に依存することはできない。

行動型のカテゴライズは分析単位を決定するが、そのことはまた用いる行動項目によって分析のレベルが設定されるということをも意味する。今日、行動現象が階層構造を持っているとする見方は一般的である (Rosenbaum et al., 1983) が、それは行動現象の認識にも当てはまることであり (van Dijk, 1980)、ある場合には大まかなカテゴライズを行い、ある場合にはより詳細なカテゴライズを行うことによって分析を効率良く実行することができる。但し行動項目に階層を導入する際には、その上下関係を明確にしておくことが望ましい。なぜなら、そうしておかないと、分析が効率良く行えないばかりでなく結果の解釈が困難になってしまう恐れがあるからである。

行動系列

行動系列の記述とは観察者が行動現象を行動項目列に変換する作業である。観察者は、その作業を異なる時刻に異なる場所で異なる個体や集団に対して行う。系列分析の多くは、そのようにして得られる行動項目列を、通常の統計処理と同様それぞれ1つの標本として扱う。ここでは、それを特に“標本系列 (sample sequence)”と呼んで区別する。

行動系列は、“個体内行動系列 (intra-individual behavior sequence)”と“個体間行動系列 (inter-individual behavior sequence)”とに大別される (Slater, 1973)。個体内行動系列は1個体の行動現象を記述し、個体間行動系列は“個体間相互行動 (dyadic interaction)”を記述する。そして分析においては通常、後者は前者から作り出される。

個体内行動系列

個体内行動系列の記述は、原則的には“系列見本法 (sequence sampling method)” (Altmann, 1974) という方式を採用。この方式では、生起した行動型を観察開始時点から生起した順序に逐次記録していく。研究者の関心のある行動現象が、有限個の互いに排反の、すなわち同時には決して生起することのない行動型にカテゴライズされ尽くされている場合は、ある行動型の終わりは他の行動型の始まりであり、同一の行動型間の推移である自己推移 (auto-transition) は原理的に出現しない。またカテゴライズされ尽くされていない場合は、観察されている行動現象の中に無視される部分が登場する。以上どちらの場合も各行動型の持続時間が記録されることもある。なお持続時間を無視する記録法を特に“事象系列見本法 (event-sequential sampling method)”

と呼ぶことがある (Gottman & Notarius, 1978)。

また一定の時間枠を設定し、その枠内で生じた行動型を全て記録するという方式もある。それを“多重事象系列見本法 (multiple-event-sequential sampling method)”と呼ぶことにする。この方法では行動型の生起順序の他に、予め決められた時間枠を単位とする生起時間も記録できる。それに対して、1つの時間枠内での行動型の生起順序を無視する方式を“多重事象時間見本法 (multiple-event-time sampling method)”と称することにする (Gottman & Notarius, 1978)。

これらに対し、1つの時間枠には常に1つの行動型を記録すると予め決めておけば、その記録方式は“時間系列見本法 (time-sequential sampling method)”と呼ばれる (Gottman & Notarius, 1978)。この場合うまくその単位時間を設定してやれば、行動型が全て排反である限り、1つの時間枠に1つの行動型が記録されることになる。しかし行動型の最小持続時間が単位時間よりかなり短かったり、行動型が互いに排反でなかったりすると、1つの時間枠内に複数の行動型が入る可能性が生じる。さらに1つの行動型の始まりと終わりが時間枠の区切りとうまく一致する保証は全くないので、ある行動型の終わりや次の行動型の始まりが1つの時間枠の中間にあたりする場合もあるであろう。従って時間系列見本法においては、1つの時間枠内で生じた複数の行動型の内どれを記録するかという判定の問題が生じることになる。

これらの記録方式の内どれが最も良いかは、記録に必要とされる労力や研究の狙い、および分析法との兼ね合いを考慮しなければならず一概には言えない。労力的にみて最も大変な記録法は各行動型の持続時間も考慮した系列見本法であり、最も楽な手法は項目数が少なく判定の問題もさほど生じないような時間系列見本法であろう。行動型が互いに排反でない場合には多重事象時間見本法が特に有効である。

さて以上のような記録法によって記述された個体内系列に関して、一体どこからどこまでを1つの標本系列と見なすかという問題が生じる。もし記録された個体内系列が1つの連続した標本系列として分析にかけることができるのであれば特に問題はない。この問題は対象となっている行動現象がカテゴリズされ尽くされえない場合に重大となる。ラットの社会行動を扱った Grant (1963) は、ある行動型の終了後3秒経過しても次の行動型が生起しなかったならば、その時点でその個体内行動系列は終了したと見なした。こうした行動型間の経過時間はうまく設定

する必要があるが、そのための決め手はない。経過時間それ自体が研究の対象になるほどであり、Nelson (1964) は、ある種の魚の求愛行動の“系列間間隔 (inter-sequential interval)”について詳細に検討している。なお、このような判定や分析を行うためには持続時間も考慮した系列見本法によって観察を行わなければならないことは言うまでもない。

個体間行動系列

個体間系列は2個体の個体内系列から通常作り出される。個体間系列を個体内系列から構成する上で先ず前提となることは、2個体の個体内系列が同期して記録されていることである。つまり各個体の示す行動型の全てについて、個体間で少なくとも生起順序はつけられていなければならないのである。従って観察は、持続時間を考慮した系列見本法が事象系列見本法によって行われている必要があるが、実際には、この観察手続きの制限はかなり厳しいものである。例えば2個体が離れている場合などは、各個体の行動型の生起時刻を記録していない限り行動型間に生起順序をつけることは難しい。身体運動が比較的速い場合には、2個体の行動型を同期して記録することがその場では不可能なこともあり、ビデオ等の記録装置に頼らなければならない。

2個体の個体内系列が記述された後、各個体の行動型が交互に出現するという形で機械的に個体間系列を構成することになるが、ここでも個体内系列同様どこからどこまでを1つの標本系列と見なすかという問題が生じる。先に触れた Grant (1963) は個体内系列の場合と同じ基準を採用した。つまり一方の個体の行動型が終了してから3秒経過しても相手個体に新たな行動型が出現しないときには、個体間系列はそこで一旦途切れるとしたのである。この方法では先に述べたように、経過時間の設定に工夫がいるし、また観察は持続時間も考慮した系列見本法に基づかなければならない。しかし、こうした方法は実際にはかなり厄介である。なぜなら本質的に行動型というものは、その始点と終点がぼやけているものであり、特に身体運動の速い場合などは、行動型の持続時間を測定したり行動型間の微妙な前後関係の判定したりすることが困難になることはしばしばあるからである。

このような問題は、2個体の行動型間の因果関係を直接探ることを一旦諦め、より大まかなレベルで個体間相互行動を記述するという方策を採ることによって避けることができる。具体的には次の2つのやり方がある。第1は、2個体の身体運動を含むような行動型を最初からカテゴリズしておく、

それによって個体間相互行動を記述するという方法である。この場合、その行動型に含まれた身体運動間の関係は明らかにされないが、相互行動全体の規則性は分析を通じて示すことができる。当然、行動型のカテゴリライズにおける注意事項は守られなければならないが、記録方式に制限はない。第2は、行動型は個体についてカテゴリライズしておき、多重事象時間見本法に基づいて相互行動を記述するという方法である。この場合には、ある時間枠における2個体の行動型の出現パターンが第1の方法で用いられた行動型と同じ役割を果たすことになる。適用できる分析の自由度という点ではこちらの方が大きい。観察の労力もまたこちらの方が大きい。従って、どちらが良いかは一概に言えない。

系列分析のタイプ

一口に系列分析と言ってもその在方は多様であり、各手法が固有の特徴を持っている。従って実際の応用に当たっては、分析の目的と各手法の特徴を考え併せて適当に使い分けことが望ましい。場合によっては、複数の手法を組み合わせて使うことが有効なこともありうる (e.g., Halliday, 1975; Dawkins & Dawkins, 1976; Lefebvre & Joly, 1982)。系列分析に含まれる手法は、行動型間の推移行列に基づくものと基づかないものと大きく分けることができる。

推移行列に基づく手法

このタイプに属する手法は、行動系列を“斉時的な単純あるいは n 重マルコフ連鎖 (stationary first-order n th-order Markov chain)” (森村・高橋, 1979) と見なすという分析上の前提と深く結び付いている。それらの手法では、通常、データは互いに排反な行動型に基づいた系列見本法かあるいは多重事象系列見本法により記述されていなければならない。もし行動型が互いに排反でなく記述が多重事象時間見本法によっているならば、1つの時間枠内の行動型の生起パターンを改めて1つの行動型と見なし、それらが排反になるようにしなければならない。但し記録が時間系列見本法によっていればその必要はない。

推移分析

推移分析 (transition analysis) では行動系列は“斉時的な単純マルコフ連鎖”と見なされ、各標本系列毎に推移行列が作成される。そして、それらをいくつかプールした上で χ^2 検定が行われ、“系列依存性

(sequential dependency)”が有意に高い推移を“行動流れ図 (behavior flow-chart)”とか“行動図 (kinematic diagram)”と称されるグラフで示すことにより行動系列の持つ規則性が示される。 χ^2 検定の代わりに、残差分析 (residual analysis; Haberman, 1973; e.g., Bermond, 1982; Spruijt & Meyerson, 1987) を用いたり、頻度の少ない推移に対する χ^2 検定の検出力の低下を防ぐために χ^2 検定を特殊な方式で適用したりする方法 (Fagen & Mankovich, 1980) もあるが、現在のところ余り一般的ではない。また自己推移があるかどうかは統計的検定の際の期待値の算出の仕方に関わってくる (Lemon & Chatfield, 1971)。

この手法は非常に単純でその結果も分かり易いため、これまで最も広く用いられてきた (e.g., Grant, 1963; Nelson, 1964; Lemon & Chatfield, 1971; Coulon, 1971; Slater & Ollason, 1972)。しかし、それにはいくつかの難点がある。特に以下に述べる第1と第2の問題は、行動系列を斉時的な単純マルコフ連鎖と見なすという分析の前提に由来しており、非常に重要である (Slater, 1973)。

第1は、推移分析では標本系列が連続した2つの行動項目より成る対系列 (dyad) へ分解されてしまうので、より高次の系列依存性についての情報が失われてしまう可能性があることである。その分解によってどの程度情報が失われるかを事前に知るために、次に説明する情報量による分析を用いることができる。この手法は平均情報量によっているため、個々の高次の系列に依存性がないことが保証されるわけではないが、大雑把な目安にはなりうる。その結果もし情報の損失が大きければ、連続した3つの行動項目より成る3連子 (triad または triplet) への分解を考えなければならない。しかしながら、このようにして分解する系列を長くしていくことには制限がある。なぜなら統計的に有意な系列依存性を持った n 連子 (n -tuple, $n \geq 3$) を見いだすためには、 n が大きくなればなるほど多量の標本系列が必要とされるからである。そうした高次の系列依存性を避けるための方法も提案されている (Cane, 1978) が、その制約は推移分析の持つ最大の欠点と言える。

第2は、標本系列の斉時性に関するものであり、行動項目 a から b への推移確率 P_{ab} が時刻に依存してはならないということである。統計的検定のための期待値を求める際には各行動項目の生起確率の定常性も問題となる。この前提が守られていないと、行動系列の規則性を1つの推移行列に集約することはできず、推移分析は成り立たなくなってしまう。

標本系列の斉時性を調べるために、それをいくつかの部分系列に分け、その各々で推移行列を作成し、それらが等質であるかどうかを検討することが薦められている。しかし、そこで用いられた部分系列が十分長いとすれば、それ自体の斉時性が改めて問題となるであろうし、部分系列が短ければ、複数の標本系列の推移行列がプールされなければならない、それは必然的に次に述べる標本系列の等質性の問題と対立してしまう。また、ある標本系列が斉時的ではないということと、その系列に高次の系列依存性が存在しているということが本質的に区別できない、ということもこの問題を複雑にしている。

第3は、標本系列の等質性の問題である。推移行列に基づく分析は、この推移分析に限らず複数の標本系列から得られた推移行列をプールした上で行われるのが普通であり、その際それらは等質であることが望まれるのである。この問題は、ある標本系列をプールされる標本の数だけ分割した結果得られる部分系列の各々を各標本系列と見なすことにより、第2の標本系列の斉時性の問題に帰着させることができる。従って、その解決策もまた斉時性の問題のそれに準ずることになる。但し標本系列間の推移行列のプールに関しては、全ての研究者に是認されるような分析以前の基準が結構存在するという点が若干異なる。例えば性行動における雌雄の別や実験群と対照群の区別などはそうした基準の1つである。

第4に、統計的有意性の解釈の問題が挙げられる。この問題は実際には個々の研究の目的に依存しているのであるが、大まかに言えば個体内系列においては、有意に推移頻度の多い対系列 $a \rightarrow b$ の存在は、行動型 a 、 b が共通の外的刺激によって統制されているか、あるいは同一の動機づけないし動因を共有していると考えられることが多い。どちらの場合にも最終的な結論は統制された実験によって検証されなければならない。しかしながら、それ以前に後者の解釈には難点がある。一般に動機づけや動因といった概念は一定の持続した影響を行動にもたらすと考えられており、その意味では共通の動機づけあるいは動因を持つ複数の行動型は、“一続きの部分系列”として行動系列上に出現すると考えた方がむしろ自然である。ところが第1の問題として指摘したように、推移分析は、対系列よりも長い部分系列を直接扱うことができない。さらにこの解釈は深刻な問題を抱えている。それらの概念を行動系列に関係づけることは、観察時間全体に渡って同一の動機づけや動因が機能していなかったり、あるいはそのレベルが変化したりした場合、行動系列を斉時的マルコフ連鎖と見なすという推移分析の前提と矛盾して

しまう可能性があるのである。逆に、その前提を満たすために同一の動機づけや動因が一定レベルで機能していると仮定するならば、そうした観点から分析を行う価値がなくなってしまう。従って動機づけや動因による解釈は、本質的に推移分析と馴染まないとも言えるのである。

統計的に有意な個体間対系列は、刺激-反応図式のもとで解釈され、期待頻度と実測頻度の比較によって促進的な影響と抑制的な影響を考えることができる。その場合ある行動型の生起が、その個体自身の先行する行動型によっても拘束されている可能性があることも考慮されるべきである。また、1つの行動型が刺激と反応の両者でありうることも注意されなければならない。個体内系列同様、そうした行動型間の影響は統制された実験により検証されるべきである。

最後に指摘しておきたい問題は結果の表示についてである。個体内系列の場合、分析の結果得られた統計的に有意な推移を行動流れ図といった形で示すことは、その数が多いほど繁雑にはなるが重大な困難は生じない。図が余りに込み入り過ぎて見にくいときは、研究の目的を損なわない程度に、検定の有意水準を厳しくするとか生起頻度や期待値と実測値の差ないし比に基準を設けるなどして、表示されるべき推移の数を減じることができる。それに対して、分析が n 連子 ($n \geq 3$) や個体間系列について行われたときに難題が生じる。立体グラフによるとか階層性を導入するとかいったことが考えられるが、決定的な解決策は残念ながら存在しない。

情報量による分析

この手法では行動型間の伝達情報量によって系列依存性を表わし、その伝達情報量が大きければ大きいほど系列依存性は高くなる。つまり先行する部分系列の在方が、それに後続する行動型の生起の仕方を拘束していることになるのである。もし伝達情報量が全くないならば、各行動型は時間軸上で独立に生起していることになる。この手法は、推移分析ほどではないが、相互行動あるいはコミュニケーションの分析を主体に広く用いられており (e.g., Altmann, 1965; Hazlett & Bossert, 1965; Dingle, 1969; Steinberg & Conant, 1974)、使い方によっては非常に有効である。一例を挙げれば、相互行動系列の全系列依存性を、自己の先行する部分系列によって規定される部分と相手個体の部分系列によって規定される部分とに分解することができる (van den Bercken & Cools, 1980)。

一般に情報量による分析は、統計的検定を行うこ

とがないため推移分析より高次の系列依存性を扱うことができる。しかしながら、それは推移分析同様、行動系列を斉時的なマルコフ連鎖と見なすことを前提としているので標本系列の斉時性の問題を抱えている。また情報量の計算に当たって複数の推移行列をプールすることが多いので、標本系列の等質性も問題となる。さらに、ある観点から見ると個々の行動項目への言及が全くできないということもこの手法の弱点と言える。つまり、この分析だけでは個々の行動項目間の推移の在方について何も語ることはできないのである。もしそうした分析を行いたければ、推移分析や後述するグラフによる分析に頼る他はない。

推移行列に基づく多変量解析

推移行列に基づく手法として、因子分析 (e.g., Wierkema, 1961), 主成分分析 (e.g., van Hooff, 1970), クラスター分析 (e.g., Maurus & Pruscha, 1973; Morgan et al., 1976; Dawkins, 1976; Smith & Fraser, 1978; Lefebvre, 1981) といった多変量解析の応用が挙げられる。これらは全て、様々な数学的操作を加えることによって推移行列を行動型間の相関行列や類似度行列に変換し、既存の分析法の適用を可能にしているものである。

これらの手法には、その結果が行動系列の規則性に基づいた行動型のグルーピングとなるため、行動系列の規則性それ自体の情報が直接は得られないという制約がある。また、それらは、プールされた推移行列を分析の土台にしているため推移分析の抱える問題点を結果の表示のそれを除いて全て持っている。特に結果の解釈については、それが動機づけの共通性によって行われることが多いだけに推移分析の場合よりも深刻であるように思われる。しかしながら、行動現象に階層構造を直接持ち込むことができる点は非常に魅力的である。

推移行列に基づかない方法

このタイプに含まれる分析法は、行動系列を斉時的なマルコフ連鎖と見なすという分析上の前提によって生じる制約を克服するために開発されたものが多く、そのため確率論的な前提を殆ど持っていない。それらには、行動型の推移という見方を離れて行動項目列それ自体の規則性を抽出し表示しようとする特徴が共通して見られる。しかしながら、そうした分析上の制約の少なさは、それらの手法を推移分析などに比べると、かなり探索的なものになっている。なお、それらの多くにおいては、用いる行動型

が排反である必要は特にないし、また行動系列の記述の仕方にも制限は殆どない。

相関分析

この手法では、脳波などの時系列データの分析に用いられる自己相関および相互相関が、殆どそのまま標本系列に適用される (e.g., Delius, 1969; Heiligenberg, 1973; van der Kloot & Morse, 1975)。同一の行動型間の相関は自己相関であり、異なる行動型間のそれは相互相関である。研究によっては、パワー・スペクトルやコヒーレンス・スペクトルを求めたり、行動型がランダムに生起していると仮定したときの理論的相関を求め実際に得られた相関と比較したりしている。

分析を行うに当たっては、一定区間内での行動型の生起頻度が各時点における値として用いられる。従ってその結果は用いる区間の長さによって左右されることになり、その区間を長くとればとるほど系列規則の詳細は無視されることになる。このことは、行動型間の拘束が強い場合には相関分析が適当でないことを意味している。また一般の時系列解析と同様に、分析される過程が定常的でないと結果の解釈が難しくなる。さらに相関分析を適切に実行するには多くの時点のデータが必要なので、長時間に渡る観察を行わなければならないことが多い。

グラフによる分析

この分析には、“temporal graphical analysis” (Anderson, 1974), “lag-sequential analysis” (Sackett, 1974), および “pre-post state histogram (PPSH)” (Douglas & Tweed, 1979) というそれぞれ独自に開発された3つの手法が含まれている。しかしながら、それらは三者とも原理的には殆ど同じであり、相関分析と多くの点で類似している。まず a という行動型を定め、a が生起した時点の前後 n 単位時間 ($n = 1, 2, \dots$) に行動型 b が生起した数を調べる。そして、その時間のズレ (これを lag と呼ぶ) を横軸に、生起確率または生起頻度を縦軸にとり、各 lag における b の生起確率または生起頻度をプロットしグラフ化するのである。手法によっては、b がランダムに生起した場合に期待される生起確率または生起頻度の95ないし99%の信頼区間が書き込まれることもある。また経過時間よりも行動型の生起順序が重要であると考えられるならば、単位時間を a の前後に生起した行動型の数で置き換えれば良い。相関分析と同じく、a と b が同じ行動型である場合と異なる場合とが区別される。なお、それらの手法に最も適した記録方式は、lag とし

て単位時間を用いた場合には時間系列見本法と多重事象時間見本法であり、行動型の数を用いた場合には系列見本法である。

これらの手法では、行動系列を斉時的なマルコフ連鎖と見なすという前提を特に立てていないので、推移行列に基づく手法の抱えていた困難が本質的な制約となることはない。しかしながら分析結果が推移分析などに比べ多様になるため、その分、結果の解釈と統合に負担がかかることになる。また系列の斉時性の問題も、分析適用上の障害にはならないが、結果の解釈には依然として関わってくる。さらに最終的な結果の表示は、いくつかの標本系列がプールされて行われることが多いので、標本系列の等質性の問題も残ると言える。

推移行列に基づかない多変量解析

対系列への分解を経ることなく標本系列そのものに基づく多変量解析的手法として、MSA(multidimensional scalogram analysis; Lingoes, 1968)の応用を挙げることができる。(e.g., Guttman et al., 1969)。この手法では一定の長さの標本系列が、系列パターンの似かよったものは近く似ていないものは遠く、多次元ユークリッド空間内の点として位置づけられる。

従って、そこでは標本のグルーピングが行われることになり、行動系列の規則性に関する情報が直接得られない点は、推移行列に基づく多変量解析と同じ制約を受ける。しかしながら、MSAの応用には、標本系列の斉時性や等質性が問題にならないという大きな利点がある。唯一の制約は分析が基づく標本系列の長さであるが、それは分析に用いる変数の数を増やせば解決できることであり本質的な問題ではないと言える。MSAは質的データの多変量解析に属する手法の1つであり(林, 1974)、それらの応用は数量化も含めて系列分析の今後の発展にかなり重要ではないかと思われる。

文法による分析または直接法

これらの分析法は、推移分析に基づかない分析が採ってきた方向性の最も徹底された形態と言える。直接法では標本系列は純粋に1つの記号列と見なされ、その走査(scanning)を行うことによって規則性を見いだそうとする(e.g., Dawkins, 1976; Douglas & Tweed, 1979)。また文法による分析では標本系列は文と等価に考えられ、その規則性を文法として記述しようとする(e.g., Marshall, 1965; Kalmus, 1969; Bodnar & van Baren-Kets, 1974; Westman, 1977)。これらの手法は、分析の前提から

生じる制約が全くないため、推移行列に基づく分析法が一般に抱えていた問題点のほぼ全てを克服することができると同時に、マルコフ連鎖の仮定によっては扱うことのできなかった階層構造や入れ子構造といった行動現象の規則性を直接記述することを可能にする(Chomsky, 1957)。また結果の表示についても、文法による分析は様々な強力な方法を備えている。さらに、これらの方法が魅力的なもう1つの理由は、オートマトンや自然言語理解といったコンピュータ・サイエンスの諸領域(Hopcroft & Ullman, 1979; Winograd, 1983)と密接な関係を持つことができることにある。それは行動現象のコンピュータ・シミュレーションの可能性を生じさせる。実際、複数の文法が考えられうる場合、適切なものを選択するためには、それらによるシミュレーションの結果のデータへの当てはまりの良さを評価するしか方法はない(van Hooff, 1982)。

しかしながら、それらには重大な欠点がある。それは、それらが分析法に不可欠なアルゴリズムを欠いていることである。標本系列を記号列として走査するとしても、その走査の形式は決まっているわけではない。また標本系列を文と見なす場合でも、各行動項目が単語に対応することは一応諾けるにしても、文法を記述する上で不可欠である文法カテゴリーに一体何が対応するのか定かではないし、どのような文法を適用するのかも予め決められているわけではない。そうした事柄は全て研究者の創意に任されていると言って良い。その意味で、それらの手法を系列分析に含めることには些か無理があるかもしれない。むしろ文法による分析などは、他の系列分析の結果得られた情報に基づくモデル構成の手法と見た方が適切であるように思われる。

エソロジー以外の諸分野における系列分析の応用

エソロジー以外の分野への系列分析の展開は、1970年代に入ってから盛んになったようである。例えばHutt & Hutt (1970)は、脳障害児や自閉症児の研究を契機にエソロジー的方法の発達研究への応用を行ったが、その著書の1章を系列分析の説明に当てている。そこでは推移分析、情報量による分析、文法による分析の三者が紹介されているが、文法による分析の取り込みは他の研究者と比較すると非常に早かったように思われる。そして1970年代の後半になると、系列分析を含む行動現象の定量的な分析法の概論が相次いで出版されるようになる(e.g., Norton, 1977; Hazlett, 1977; Sackett, 1978; Gottman & Notarius, 1978; Colgan, 1978; Lehner, 1979;

Cairns, 1979; van Hooff, 1982; Clarke & Crossland, 1985; Bakeman & Gottman, 1986). それ以前にもそうした論文がなかったわけではない。しかし、Hinde & Stevenson (1969) は分析法に触れていないし、Slater (1973) にしてもその主体は推移分析であり、そのパースペクティブは余り広くなかった。それらに対して、この時期には分析法に重きを置いたより広範な、明らかに他の分野の研究者に向けて書かれたものが現れ始めたのである。

系列分析を含むエソロジーの方法論の応用は、動物を被験体として用いる領域においてはかなりの数にのぼる。例えば行動薬理学や行動生理学においてはその応用の歴史は古く、主に推移分析が用いられていた (e.g., Silverman, 1965; Bunnell et al., 1970; Kršiak & Borgesová, 1972; Lehman & Adams, 1977; Mackintosh et al., 1977; Kršiak & Přibík, 1978)。1980年代になると“ethopharmacology”という言葉さえ現れており (Dixon, 1982)、用いられる系列分析の種類も多様になり (Kruk, 1985)、推移行列に基づいたクラスター分析なども応用されている (e.g., Brain et al., 1985)。また、行動遺伝学の分野においても、推移分析 (e.g., Northup, 1977; Wood et al., 1980) や先述したMSA (Guttman et al., 1969) などが利用されている。ところで、そうした応用は、攻撃行動、性行動といった、いわゆる本能行動を扱う研究者に特に多く見られるが、近年、学習行動を扱うオペランティストの中に系列分析を使用する者 (e.g., Hann & Roberts, 1984; Iversen, 1986; Roberts, 1986) が出現したことは注目すべきことであると思われる。

また、ヒューマン・エソロジーの展開とは別に、系列分析を用いた人間行動の解析も行われており、推移分析 (e.g., Clarke, 1983; MacTurk et al., 1987) や情報量による分析 (e.g., Raush, 1965; Raush et al., 1974)、グラフによる分析 (e.g., Sackett, 1974; Gottman et al., 1977)、また文法による分析 (e.g., Bodnar & van Baren-Kets, 1974) などの応用がある。人間行動においては、相互行動に対する関心が非常に強いようである。

一方、行動系列という概念を拡張して、態度の変容といった問題も系列分析によって扱おうとする傾向も見られる。それは系列分析を、系列的な質的データの解析法と解釈する方向であり、本論文で先に行った行動型の定義では包括しかねるところである。そうした立場の研究者からは潜在構造分析の応用なども示唆されている (Dillon et al., 1983)。

最後に我国においては研究者の絶対数の問題もあり、系列分析を応用している研究はそれほど多くな

いようである。動物行動に関しては、推移分析と情報量による分析 (Torigoe, 1985)、推移分析 (小山, 1985)、推移分析と推移行列に基づいたクラスター分析 (加藤, 1986; 加藤・牧野, 1986) の応用がある。一方、人間行動については、厳密に言えば本論文で概観した手法には属さないのであるが、マルコフ連鎖を利用した授業分析 (松原ら, 1982) が行われている。しかしながら、最近、日本語による概論書 (粕谷・藤田, 1984) も出版されており、将来我国でも系列分析の応用が増加することが期待される。

要 約

系列分析の分析単位は行動系列を構成する行動型であり、そのカテゴリーが重大な問題となった。行動系列は個体内行動系列と個体間行動系列に大別され、前者は個体の行動を、後者は個体間の相互行動を記述するという違いがあり、一般に後者は前者から作り出された。行動系列の記録方式は多様であり、それらは研究の目的や分析法との兼ね合いを考慮して選択されるべきであること、1つの連続した行動系列を決める際には問題が生じることが指摘された。また個体間系列の記録において従来の方式に困難が生じる場合があり、その解決策が提示された。

系列分析は行動型間の推移行列に基づく手法と基づかない手法とに大きく分けられた。前者は行動系列を斉時的マルコフ連鎖と見なすという分析上の前提と深く結び付いていた。それに対して後者には、その前提によって生じる制約を克服するために工夫された手法が多かった。これらの手法の内、最も広範に利用されてきた推移分析が特に詳細に検討され、そこで指摘された問題に照らして他の手法の特徴が論じられた。

エソロジー以外の諸分野での系列分析の応用は、本能行動を扱う研究に顕著であったが、近年、学習行動研究にも見られるようになった。また、行動系列という概念を拡張して、系列分析を系列的な質的データの解析法と見る立場があることが指摘された。

引 用 文 献

- Altmann, J. 1974 Observational study of behavior: Sampling methods. *Behaviour*, **49**, 227-267.
- Altmann, S. A. 1965 Sociobiology of rhesus monkeys. II: Stochastics of social communication. *Journal of Theoretical Biology*, **8**, 490-522.
- Andersson, M. 1974 Temporal graphical analysis of behaviour sequences. *Behaviour*, **51**, 38-48.

- Bakeman, R., & Gottman, J. M. 1986 *Observing Interaction: An Introduction to Sequential Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Baker, M. C. 1973 Stochastic properties of the foraging behavior of six species of migratory shorebirds. *Behaviour*, **45**, 242-270.
- Bermond, B. 1982 Effects of androgen treatment of full-grown puberally castrated rats upon male sexual behavior, intermale aggressive behavior and the sequential patterning of aggressive interactions. *Behaviour*, **80**, 143-173.
- Bodnar, F. A., & van Baren-Kets, E. J. 1974 Sequentiele analyse van gedragsobservaties bij jonge kinderen. *Nederlands Tijdschrift voor Psychologie*, **29**, 27-66.
- Brain, P. F., Smoothy, R., & Benton, D. 1985 An ethological analysis of the effects of tipluadom on social encounters in male albino mice. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, **23**, 979-985.
- Bunnell, B. N., Sodetz, F. J. Jr., & Shalloway, D. I. 1970 Amygdaloid lesions and social behavior in the golden hamster. *Physiology and Behavior*, **5**, 153-161.
- Cairns, R. B. (Ed.) 1979 *The Analysis of Social Interactions: Methods, Issues, and Illustrations*. Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cane, V. R. 1978 On fitting low-order Markov chains to behaviour sequences. *Animal Behaviour*, **26**, 332-338.
- Chomsky, N. 1957 *Syntactic Structures*. The Hague: Mouton.
- Clarke, D. D. 1983 *Language and Action: A Structural Model of Behaviour*. Oxford: Pergamon Press.
- Clarke, D. D., & Crossland, J. 1985 *Action Systems: An Introduction to the Analysis of Complex Behaviour*. London: Methuen.
- Colgan, P. W. (Ed.) 1978 *Quantitative Ethology*. New York: Wiley.
- Coulon, J. 1971 Influence de l'isolement social sur le comportement du cobaye. *Behaviour*, **38**, 93-120.
- Dawkins, R. 1976 Hierarchical organization: A candidate principle for ethology. In P. P. G. Bateson, & R. A. Hinde(Eds.), *Growing Points in Ethology*. Cambridge: Cambridge University Press. Pp.7-54.
- Dawkins, R., & Dawkins, M. 1976 Hierarchical organization and postural facilitation: Rules for grooming in flies. *Animal Behaviour*, **24**, 739-755.
- Delius, J. D. 1969 A stochastic analysis of the maintenance behaviour of skylark. *Behaviour*, **33**, 137-178.
- Dillon, W. R., Madden, T. J., & Kumar, A. 1983 Analyzing sequential categorical data on dynamic interaction: A latent structure approach. *Psychological Bulletin*, **94**, 564-583.
- Dingle, H. 1969 A statistical and information analysis of aggressive communication in the mantis shrimp *Gonodactylus bredini* Manning. *Animal Behaviour*, **17**, 561-575.
- Dixon, A. K. 1982 Ethopharmacology: A new way to analyse drug effects on behaviour. *Triangle*, **21**, 95-105.
- Douglas, J. M., & Tweed, R. L. 1979 Analysing the patterning of a sequence of discrete behavioural events. *Animal Behaviour*, **27**, 1236-1252.
- Fagen, R. M., & Mankovich, N. J. 1980 Two-act transitions, partitioned contingency tables, and the 'significant cells' problem. *Animal Behaviour*, **28**, 1017-1023.
- Golani, I. 1973 Non-metric analysis of behavioural interaction sequences in captive jackals (*Canis aureus* L.). *Behaviour*, **44**, 89-112.
- Gottman, J. M., & Notarius, C. 1978 Sequential analysis of observational data using Markov chains. In T. R. Kratochwill(Ed.), *Single Subject Research*. New York: Academic Press. Pp.237-285.
- Gottman, J. M., Markman, H., & Notarius, C. 1977 The topography of marital conflict: A sequential analysis of verbal and nonverbal behavior. *Journal of Marriage and Family*, **39**, 461-477.
- Grant, E. C. 1963 An analysis of the social behaviour of the male laboratory rat. *Behaviour*, **21**, 260-281.
- Guttman, R., Lieblich, I., & Naftali, G. 1969 Variation in activity scores and sequences in two inbred mouse strains, their hybrids, and backcrosses. *Animal Behaviour*, **17**, 374-385.
- Haberman, S. J. 1973 The analysis of residuals in cross-classified tables. *Biometrics*, **29**, 205-220.
- Halliday, T. R. 1975 An observational and experi-

- mental study of sexual behaviour in the smooth newt, *Triturus vulgaris* (Amphibia: Salamandridae). *Animal Behaviour*, **23**, 291-322.
- Hann, D. A., & Roberts, A. E. 1984 Free operant avoidance behavior in hooded rats: IRTs and response chains. *Animal Learning and Behavior*, **12**, 175-183.
- 林知己夫 1974 数量化の方法 東洋経済新報社.
- Hazlett, B. A. (Ed.) 1977 *Quantitative Methods in the Study of Animal Behavior*. New York: Academic Press.
- Hazlett, B. A., & Bossert, W. H. 1965 A statistical analysis of the aggressive communications systems of some hermit crabs. *Animal Behaviour*, **13**, 357-373.
- Heilingenberg, W. 1973 Random processes describing the occurrence of behavioural patterns in a cichlid fish. *Animal Behaviour*, **21**, 169-182.
- Hinde, R. A. 1982 *Ethology*. New York: Oxford University Press.
- Hinde, R. A., & Stevenson, J. G. 1969 Sequences of behavior. In D. S. Lehrman, R. A. Hinde, & E. Shaw (Eds.), *Advances in the Study of Behavior*. Vol. 2. New York: Academic Press. Pp. 267-296.
- Hopcroft, J. E., & Ullman, J. D. 1979 *Introduction to Automata Theory, Language and Computation*. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Hutt, S. J., & Hutt, C. 1970 *Direct Observation and Measurement of Behavior*. Springfield, Ill.: Charles C Thomas.
- Iversen, I. H. 1986 Time allocation, sequential, and kinematic analyses of behaviors controlled by an aperiodic reinforcement schedule. *The Psychological Record*, **36**, 239-255.
- Kalmus, H. 1969 Animal behaviour and theories of games and of languages. *Animal Behaviour*, **17**, 607-617.
- 粕谷英一・藤田和幸 1984 動物行動学のための統計学 東海大学出版会.
- 加藤克紀 1986 マウスの個体行動の対系列構造に対する隔離飼育の影響 動物心理学年報, **36**, 11-22.
- 加藤克紀・牧野順四郎 1986 マウスにおける相互行動の構造的記述 筑波大学心理学研究, **8**, 45-53.
- 小山幸子 1985 マウスにおける社会的剝奪の社会行動に及ぼす影響 動物心理学年報, **35**, 79-90.
- Kršiak, M., & Borgesová, M. 1972 Drugs and spontaneous behaviour: Why are detailed studies still so rare? *Activitas Nervosa Superior*, **14**, 285-293.
- Kršiak, M., & Přibík, V. 1978 Effect of amphetamine on sequences of behavioural activities in mice. *Activitas Nervosa Superior*, **20**, 9-11.
- Kruk, M. R. (Ed.) 1985 *Mathematical Methods and Representations in Ethological Aggressive Research: Ethological Description of Effects of Experimental Treatments*. Contribution to the ISRA workshop in Turku, 1984.
- Lashley, K. S. 1951 The problem of serial order in behavior. In L. A. Jeffres (Ed.), *Cerebral Mechanisms in Behavior*. New York: Wiley. Pp. 112-138.
- Lefebvre, L. 1981 Grooming in crickets: Timing and hierarchical organization. *Animal Behaviour*, **29**, 973-984.
- Lefebvre, L., & Joly, R. 1982 Organization rules and timing in kestrel grooming. *Animal Behaviour*, **30**, 1020-1028.
- Lehman, M. N., & Adams, D. B. 1977 A statistical and motivational analysis of the social behaviours of the male laboratory rat. *Behaviour*, **61**, 238-274.
- Lehner, P. N. 1979 *Handbook of Ethological Methods*. New York: Garland STPM Press.
- Lemon, R. E., & Chatfield, C. 1971 Organization of song in cardinals. *Animal Behaviour*, **19**, 1-17.
- Lingoes, J. C. 1968 The multivariate analysis of qualitative data. *Multivariate Behavioral Research*, **3**, 61-94.
- Mackintosh, J. H., Chance, M. R. A., & Silverman, A. P. 1977 The contribution of ethological technique to the study of drug effects. In L. L. Iversen, S. D. Iversen, & S. H. Snyder (Eds.), *Handbook of Psychopharmacology*. Vol. 7. Principles of Behavioral Pharmacology. New York: Plenum Press. Pp. 3-35.
- MacTurk, R. H., McCarthy, M. E., Vietze, P. M., & Yarrow, L. J. 1987 Sequential analysis of mastery behavior in 6- and 12-month-old infants. *Developmental Psychology*, **23**, 199-203.
- Marshall, J. C. 1965 *The syntax of reproductive behaviour in the male pigeon*. Unpublished research report, Medical Research Council, Psycholinguistics Unit, Oxford.

- 松原伸一・吉本英夫・藤田廣一 1982 S-T 授業表示法における指数の利用法 日本教育工学雑誌, 7, 9-19.
- Maurus, M., & Pruscha, H. 1973 Classification of social signals in squirrel monkeys by means of cluster analysis. *Behaviour*, 47, 106-128.
- Miller, G. A., & Frick, F. C. 1949 Statistical behavioristics and sequences of responses. *Psychological Review*, 56, 311-324.
- Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. 1960 *Plans and the Structure of Behavior*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Morgan, B. J. T., Simpson, M. J. A., Hanby, J. P., & Hall-Craggs, J. 1976 Visualizing interaction and sequential data in animal behaviour: Theory and application of cluster-analysis methods. *Behaviour*, 56, 1-43.
- 森村英典・高橋幸雄 1979 マルコフ解析 日科技連.
- Nelson, K. 1964 The temporal patterning of courtship behaviour in the glandulocaudine fishes(Ostariophsi, Characidae). *Behaviour*, 24, 90-146.
- Northup, L. R. 1977 Temporal patterning of grooming in three lines of mice: Some factors influencing control levels of a complex behaviour. *Behaviour*, 61, 1-25.
- Norton, S. 1977 The study of sequences of motor behavior. In L. L. Iversen, S. D. Iversen, & S. H. Snyder(Eds.), *Handbook of Psychopharmacology*. Vol.7. *Principles of Behavioral Pharmacology*. New York: Plenum Press. Pp.83-105.
- Raush, H. L. 1965 Interaction sequences. *Journal of Personality and Social Psychology*, 2, 487-499.
- Raush, H. L., Barry W. A., Hertel, R. K., & Swain, M. A. 1974 *Communication, Conflict and Marriage*. San Francisco: Jossey-Bass.
- Roberts, A. E. 1986 The shuttle-avoidance response chains of rats. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 24, 163-165.
- Rosenbaum, D. A., Kenny, S. B., & Derr, M. A. 1983 Hierarchical control of rapid movement sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 86-102.
- Sackett, G. P. 1974 *A nonparametric lag sequential analysis for studying dependency among responses in observational scoring systems*. Unpublished manuscript, University of Washington.
- Sackett, G. P. (Ed.) 1978 *Observing Behavior. Vol. 2. Data Collection and Analysis Methods*. Baltimore: University Park Press.
- Silverman, A. P. 1965 Ethological and statistical analysis of drug effects on the social behaviour of laboratory rats. *British Journal of Pharmacology*, 24, 579-590.
- Slater, P. J. B. 1973 Describing sequences of behavior. In P. P. G. Bateson, & P. H. Klopfer(Eds.), *Perspectives in Ethology*. New York: Plenum Press. Pp.131-153.
- Slater, P. J. B., & Ollason, J. C. 1972 The temporal pattern of behaviour in isolated male zebra finches: Transition analysis. *Behaviour*, 44, 248-269.
- Smith, E. O., & Fraser, M. D. 1978 Social play in rhesus macaques(*Macaca mulatta*): A cluster analysis. In E. O. Smith(Ed.), *Social Play in Primates*. New York: Academic Press. Pp.79-112.
- Spruijt, B. M., & Meyerson, B. 1987 Sequential analysis of the copulatory behavior of young and aged rats. *Neuroscience Research Communications*, 1, 31-38.
- Steinberg, J. B., & Conant, R. C. 1974 An informational analysis of the inter-male behaviour of the grasshopper *Chortophaga viridifasciata*. *Animal Behaviour*, 22, 617-627.
- Torigoe, T. 1985 A sequential analysis of early development of behaviors in chicks. *The Annual of Animal Psychology*, 35, 23-30.
- van den Bercken, J. H. L., & Cools, A. R. 1980 Information-statistical analysis of social interaction and communication: An analysis-of-variance approach. *Animal Behaviour*, 28, 172-188.
- van der Kloot, W., & Morse, M. J. 1975 A stochastic analysis of the display behaviour of the red-breasted merganser(*Mergus serrator*). *Behaviour*, 54, 181-216.
- van Dijk, T. A. 1980 *Macrostructures*. Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- van Hooff, J. A. R. A. M. 1970 A component analysis of the structure of the social behaviour of a semi-captive chimpanzee group. *Experientia*, 26, 549-550.
- van Hooff, J. A. R. A. M. 1982 Categories and

- sequences of behavior: Methods of description and analysis. In K. R. Scherer, & P. Ekman(Eds.), *Handbook of Methods in Nonverbal Behavior Research*. Cambridge: Cambridge University Press. Pp.362-439.
- Westman, R. S. 1977 Environmental languages and the functional bases of animal behavior. In B. A. Hazlett(Ed.), *Quantitative Methods in the Study of Animal Behavior*. New York: Academic Press. Pp.145-201.
- Wiepkema, P. R. 1961 An ethological analysis of the reproductive behaviour of the bitterling(*Rhodeus amarus* bloch). *Archives Neerlandaises de Zoologie*, **14**, 103-199.
- Winograd, T. 1983 *Language as a Cognitive Process. Vol.1. Syntax*. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Wood, D., Ringo, J. M., & Johnson, L. L. 1980 Analysis of courtship sequences of the hybrids between *Drosophila melanogaster* and *Drosophila simulans*. *Behavior Genetics*, **10**, 459-466.