

# マルコフ連鎖モデルによる柱状図の類似性評価

名城大学理工学部  
名古屋大学大学院

板橋一雄  
山本忠久

## 1. まえがき

地盤調査結果には二つの原因によりばらつきが現れる。一つは地盤そのものが持つ固有のばらつきであり、もう一つは情報不足や人間の判断ミスである。前者の固有のばらつきとは、現象の不確実性に伴うものである。地盤は、鋼材のように厳重に管理された工場で作られたものではなく、複雑な自然現象の下で造り出されたものである。地盤の生成環境や生成過程が地域的に一様であり、時間的にも変化しなければ、均質・一様な地盤が形成されるであろう。しかし、日本のような狭隘な地域内で地震活動や火山活動のような激しい地殻変動が生じている場所では、そうしたことは望めそうもない。また、地盤の形成に大きく関係する一つの要因である海水準の変動も一定ではないので、なおさら均質・一様な地盤は形成されそうもない。

このように地盤の生成環境や生成過程が複雑なために、地盤を構成する材料は粘土のような微細粒子から巨礫まで、種々雑多の大きさの粒子となる。さらに、これらの土質材料に作用する応力やひずみの履歴も一様ではないために、地盤構成材料の力学的挙動も複雑になってくる。このように地盤が持つ固有のばらつきと言っても、地層の堆積層序という地盤の形状に類するものと、その地盤が示す力学的特性に関するものがある。

もう一方のばらつきの原因である情報の不完全性についても、地盤の形状に関するものとその力学的特性といった性質に類するものの二者が存在する。地盤の堆積構造は三次元的な広がりを持つにもかかわらず、我々がその地盤構造を知る手だての代表的な方法は、ある一地点での深度方向の地層分布しかわからないボーリング調査やある二次元的な地層分布がわかる露頭調査しかない。すなわち、現状の土質調査法では我々が三次元的な地盤の堆積構造を直接目で見ることは不可能であって、限られた土質調査結果から類推することが最善の策となる。また、ボーリング調査においても現れたすべての地層で土質試験を実施することは稀であって、現場技術者の判断により地層名が付けられる場合が多い。こうした場合には現場技術者の経験の違いがその調査結果に表れることになる。隣接する土質柱状図で地層名に若干の相違が表れるのはこうしたことが原因の一部になっている。さらに、サンプリングされた試料の土質試験結果には、試料の運搬、試験の実施手順、結果の整理法などの一連の作業の中に、技術者の経験の違いが現れ、土質試験結果に一定の傾向的な相違が出現する。

地盤の調査結果には上述した原因により、不確実性が必然的に含まれる。それでは、我々が地盤を利用する際には、その地盤の堆積構造や力学的な性質をどの程度知る必要があるのであろうか？ おそらく、それは地盤を利用する立場、構造物の種類や重要性などによって決められるのであろう。現在では、過去の経験に基づき構造物の種類ごとに地盤調査の種類や調査数量が決められている。しかし、我々がもし同じ程度の確からしさで地盤を知りたいことを望むならば、地盤の堆積構造が比較的均質・一様な場合にはその力学的性質も均質であることが想像できるので、地盤調査や土質試験の数量は少なくてもよいであろう。一方逆に、地盤構造が複雑な場合には多数のより詳細な地盤調査・土質試験が必要になる。こうした観点に基づけば、地盤堆積構造の複雑性を評価することが必要になる。すなわち、現行の調査法ではボーリング柱状図の類似の程度あるいは相違の程度を評価する手法が必要不可欠となる。

---

Similarity Evaluation of the Boring log based  
on Markov Model ; K. Itabashi (Meijo Univ. ),  
T. Yamamoto (Nagoya Univ. )

## 2. 土質柱状図の数学的記述

地盤に関わる設計においては、対象とする地盤の構造が非常に複雑なために、何等かの形でモデル化が行われる。同様に、地盤調査結果の土質柱状図も複雑であるから、そのままではその類似性や複雑性を評価することは困難であろう。そこで、客観的な何等かのモデル化手法が必要になる。著者らは、土質柱状図に現れる地層の繰り返しのみに着目したモデル化の方法を提案している<sup>1)</sup>。それは、地層(状態)の深度(時間)方向の変化を確率過程と考え、最も簡単な確率過程であるマルコフ連鎖を適用するものである。この方法の長所は、状態である地層名の分類を決め、一定の深度間隔で地層名を読み取れば、土質柱状図に対応した客観的なモデルを作成できることである。また、マルコフ連鎖の理論に基づき、この地盤モデルから種々の特性量が計算されるばかりではなく、仮説検定の考え方を応用して2本の土質柱状図の類似の程度を評価できることが最大の特徴である。そこで始めに、土質柱状図にマルコフ連鎖を当てはめる方法とそれから得られる特性量の物理的な意味、土質柱状図の比較手法について述べる。

### 2.1 マルコフ連鎖の当てはめ<sup>2)</sup>

マルコフ連鎖の挙動を規定するのは推移確率行列であるから、土質柱状図にマルコフ連鎖を適用するためには、現れる土質名の区分(状態空間)と土質を読み取る深度間隔 $\Delta z$ (パラメータ空間)を事前に決定しておく必要がある。この二点のみを決めておけば、1本の土質柱状図は深度 $\Delta z$ 間隔の土質状態の変化(たとえば、砂→粘土→砂→礫→…)として一意的に表現することができる。いま、土質名を $s$ 種類に区分したとして、ある状態 $i$ の $\Delta z$ 下に状態 $j$ が出現する回数(推移回数)を $n_{ij}$ とすれば、この推移回数は式(1)に示すように( $s$ 行 $\times$  $s$ 列)の行列 $N$ で表現できる。

$$N = \begin{matrix} & \begin{matrix} \textcircled{1} & \textcircled{2} & \dots & s \end{matrix} \\ \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \\ \vdots \\ s \end{matrix} & \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1s} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ n_{s1} & n_{s2} & \dots & n_{ss} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \dots\dots (1)$$

また、推移回数の各行の和を $n_i = \sum_j n_{ij}$ で表し、行列 $N$ の各要素をその行和で割ることによって、1本の土質柱状図が式(3)の行列 $P$ により表現できる。

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} \textcircled{1} & \textcircled{2} & \dots & s \end{matrix} \\ \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \\ \vdots \\ s \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1s} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{s1} & p_{s2} & \dots & p_{ss} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、  

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad \dots (3)$$
 である。

この $p_{ij}$ には  $0 \leq p_{ij} \leq 1$ 、 $\sum_j p_{ij} = 1$  の性質があり、この行列 $P$ は推移確率行列と呼ばれている。すなわち、1本の土質柱状図が $s$ 行 $s$ 列の確率行列で一意的に表現されたことになる。そして、この推移確率行列を用いれば、種々の特性量が計算できる。なお、式(2)は最尤推定法で得られる最尤推定値に等しくなっている。

### 2.2 特性量とその物理的意味<sup>2)</sup>

いま、深度 $\Delta z$ ごとに地層の状態を読み取るので、 $n \times \Delta z$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ )の深度で地層の状態が $i$ となる確率を $q_i(n)$ とし、式(4)で表す。

$$q_i(n) = \text{Prob} \{X_n = i\}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \dots (4)$$

これは状態の数 $s$ だけあるから、それを行ベクトルの形に並べた式(5)は深度( $n \times \Delta z$ )における各地層の出現する割合を表し、状態確率分布 $\pi(n)$ と呼ばれる。

$$\pi(n) = \{q_1(n), q_2(n), \dots, q_s(n)\} \quad \dots\dots (5)$$

特に、深度 $z = 0$ の地表面の状態確率分布のことを初期分布 $\pi(0)$ という。

この初期分布  $\pi(0)$  と推移確率行列  $P$  が与えられると、マルコフ連鎖の特性を用いれば、 $n = 1, 2, \dots$  に対応する各深度の地層の状態確率が次式で計算される。

$$\pi(n) = \pi(0) \times P^n = \pi(n-1) \times P \quad \dots\dots (6)$$

さらに、 $n \rightarrow \infty$  とした時の  $\pi(\infty)$  は極限分布  $\alpha$  と呼ばれる。この分布はマルコフ連鎖の特性より、初期分布  $\pi(0)$  をどのように仮定してもある一定の分布に近づくことがわかっている。そして、その分布は土質柱状図の地層の構成割合を示している。

また、砂礫層のような支持層が最下層にのみ現れ、その地層が連続するような土質柱状図については、最下層に現れる地層は吸収状態となり、吸収的マルコフ連鎖の特性が応用できる。この場合には式(2)で示される推移確率行列は特殊な形になる。いま、状態  $s$  を吸収状態の地層と考えると、その地層の下にはそれ自身が連続するので、式(2)は次式のようになる。

$$P = \begin{matrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \dots & s \\ \textcircled{1} & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1s} \\ \textcircled{2} & p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2s} \\ & \vdots & \vdots & & \vdots \\ s & 0 & 0 & \dots & 1 \end{matrix} = \begin{matrix} & T & A \\ T & Q & R \\ A & O & I \end{matrix} \quad \dots\dots (7)$$

ここに、 $A$  は吸収状態  $s$  を示し、 $T$  はその他の状態（一時的状態）をまとめて表している。したがって、 $Q$  は一時的状態から一時的状態へ推移する部分の行列 [  $(s-1)$  行  $(s-1)$  列 ]、 $R$  は一時的状態から吸収状態へ推移する部分の行列 [  $(s-1)$  行 1 列 ] を示している。また、 $O$  は 1 行  $(s-1)$  列のゼロベクトル、 $I$  は 1 のみの単位行列を示している。

上述の記号を用いれば、平均訪問回数  $M$ 、吸収確率  $B$ 、平均吸収深度  $\tau$  や高次のモーメントなどが行列の演算により計算できる。

$$\begin{aligned} \text{平均訪問回数} &: M = (I - Q)^{-1} \\ \text{吸収確率} &: B = M \times R \\ \text{平均吸収深度} &: \tau = M \times \xi \end{aligned} \quad \dots\dots (8)$$

ここに、 $( )^{-1}$  は逆行列、 $\xi$  は 1 の列ベクトルを示す。

吸収的マルコフ連鎖の場合には、吸収確率  $B$  は  $(s-1)$  行 1 列で、その要素がすべて 1 の列ベクトルになる。また、平均吸収深度  $\tau$  も  $(s-1)$  行 1 列の列ベクトルになる。いま、深度間隔は  $\Delta z$  であるから、 $(\Delta z \times \tau)$  の値は地表面に各一時的状態 1、2、 $\dots$ 、 $(s-1)$  が現れた場合の吸収状態  $s$ （支持層）が現れる平均深度を示している。式(8)で明らかのように、 $M$  はこの吸収的マルコフ連鎖の挙動を規定する行列であり、基本行列と呼ばれている。そして、 $(\Delta z \times M)$  の値は吸収状態の地層が現れるまでの間の各地層の厚さを表している。

### 2. 3 土質柱状図の比較手法<sup>3)</sup>

土質柱状図に上述のような単純なマルコフ連鎖のモデルを当てはめると、適合度検定を用いた仮説検定の方法を援用することによって、2本の土質柱状図を数学的に比較することができる。

まず、事前に与えられた推移確率行列  $P^0$  がある。そして、観測された土質柱状図の実現値から推移確率行列  $P$  が計算される。この  $P$  が推移確率行列  $P^0$  をもつマルコフ連鎖から生じるかどうか？を知ることは、帰無仮説  $H_0: P = P^0$  の仮説検定問題になる。すなわち、比較の基準となる土質柱状図の推移確率行列を  $P^0$  とし、比較したい土質柱状図のそれを  $P$  とすれば、式(9)で計算される値は帰無仮説が真の場合には、カイ2乗分布に従うことが知られている。

$$X^2 = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \frac{n_i (P_{ij} - P_{ij}^0)^2}{P_{ij}^0} \quad \dots\dots (9)$$

ここに、 $P_{ij}^0$  と  $P_{ij}$  はそれぞれ基準となる土質柱状図と比較したい土質柱状図の推移確率行列の  $(i,$

j) 要素、 $n_i$  は比較したい土質柱状図の第  $i$  行の推移回数の行和である。なお、カイ 2 乗分布の自由度は  $[s(s-1) - d]$  で計算される。ここに、 $s$  は分類した状態の数、 $d$  は基準の推移確率行列  $P^0$  のゼロ要素数を示す。

このカイ 2 乗計算値がカイ 2 乗理論値より小さければ、比較される土質柱状図が基準の  $P^0$  から生じるとみなしてもよいことになる。すなわち、計算された  $X^2$  の値が小さければ、二つの土質柱状図は類似しており、逆に、値が大きければ、類似の程度が低いことを示すことになる。

### 3. 土質柱状図の解析事例

#### 3.1 マルコフ連鎖の当てはめ

上述した方法を濃尾平野内で得られた土質柱状図に適用した。状態空間である土質名の分類は、土質柱状図に現れる土質名と日本統一土質分類法を考慮し、その中分類程度とした。また、パラメータ空間である深度間隔  $\Delta z$  は現れる地層の厚さを考え、20 cm とした。図-1 は、日光川河口付近 (a) と津島地区 (b) の代表的な土質柱状図である。式 (1) ~ (3) に基づき各々の推移確率行列を示すと次式となる。これらの土質柱状図は 4 種類の地層の繰り返しであるが、特徴的なのは (b) 図の砂礫層が最下層に現れ、吸収状態になっていることである。

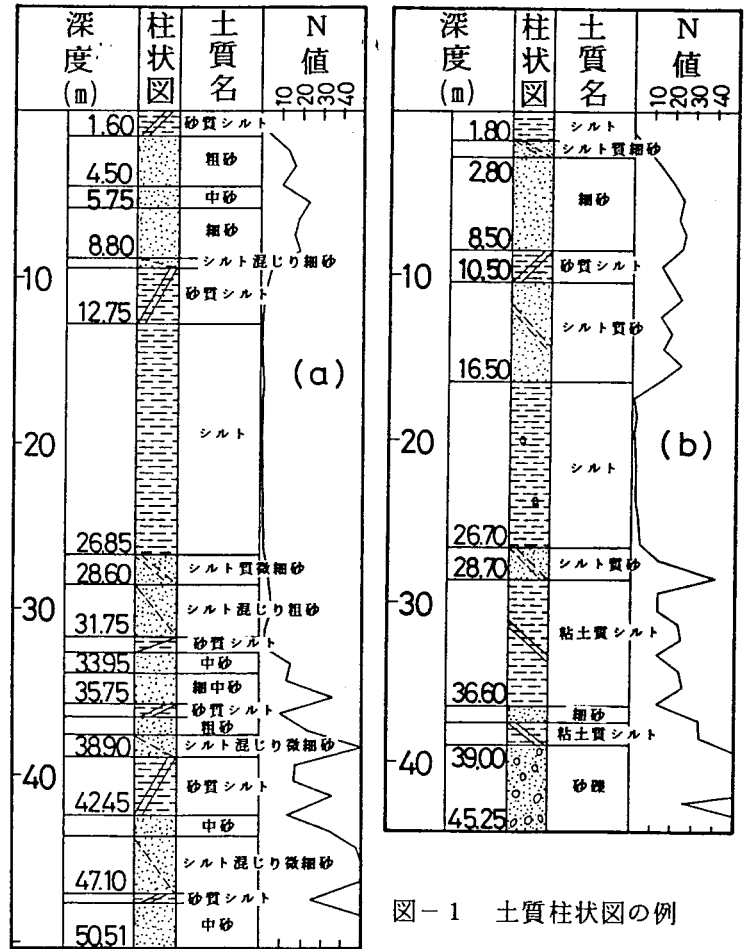


図-1 土質柱状図の例

$$P = \begin{bmatrix} \text{砂} & \text{混じり砂} & \text{砂質土} & \text{シルト} \\ 0.946 & 0.040 & 0.000 & 0.014 \\ 0.000 & 0.911 & 0.000 & 0.089 \\ 0.000 & 0.125 & 0.875 & 0.000 \\ 0.040 & 0.000 & 0.008 & 0.952 \end{bmatrix} \dots (10)$$

$$P = \begin{bmatrix} \text{砂} & \text{砂質土} & \text{シルト} & \text{砂礫} \\ 0.943 & 0.000 & 0.057 & 0.000 \\ 0.022 & 0.934 & 0.044 & 0.000 \\ 0.009 & 0.026 & 0.956 & 0.009 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix} \dots (11)$$

#### 3.2 特性量の計算

式 (4)、(5) に基づき、図-1 の各土質柱状図に対して各深度  $z$  の状態確率分布  $\pi(z)$  を求めて示した例が図-2、図-3 である。図-1 (a) に対応するものが図-2 であるが、(a) は地表面の地層を [砂] とした場合、(b) は [混じり砂] とした場合である。地表面の地層をどのように仮定しようと、深度 40 m ではほぼ一定の分布になっており、この分布が極限分布  $\alpha$  となる。この土質柱状図では、

$$\text{極限分布: } \alpha = (0.333 \quad 0.192 \quad 0.029 \quad 0.446)$$

となり、シルト層が約 4 割、残りは砂質系の地層から構成されていることがわかる。

一方、図-3 では、深度 40 m の状態確率分布は次のようになっている。

砂 砂質土 シルト 砂礫

状態分布:  $\pi(z=40\text{m}) = (0.076 \quad 0.093 \quad 0.221 \quad 0.610)$

この図から、[砂礫]の確率は徐々に増加し、その他の地層の確率は減少傾向にあることがわかる。これは、[砂礫]が吸収状態であるために、深度が増すほど[砂礫]が現れやすくなることを示している。また、式(11)では[砂礫]が吸収状態であるから、式(7)に対応して、行列QとRは式(12)、(13)となる。したがって、これらの行列を用いて式(8)を計算すると、式(14)~(15)が得られる。

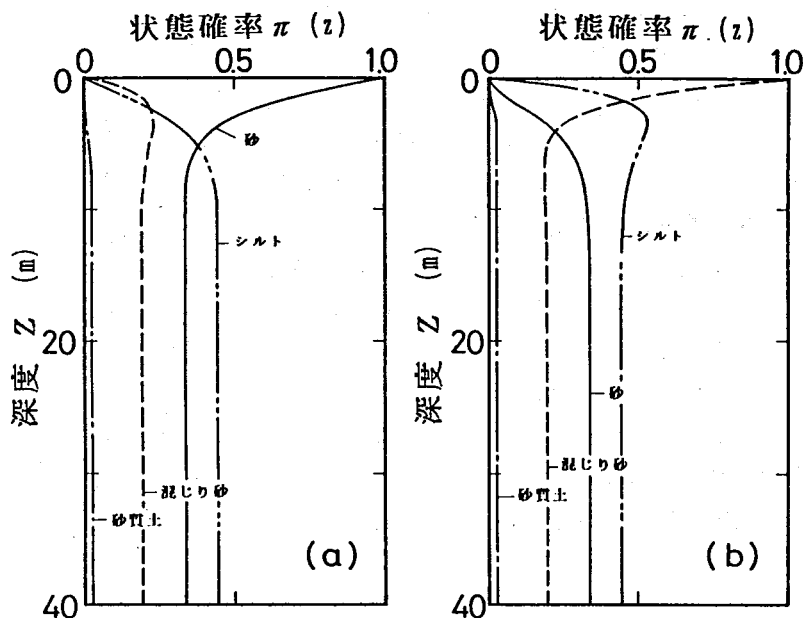


図-2 状態確率分布 (図-1 (a) の場合)

$$Q = \begin{matrix} \text{砂} \\ \text{砂質土} \\ \text{シルト} \end{matrix} \begin{matrix} \text{砂} & \text{砂質土} & \text{シルト} \\ \begin{bmatrix} 0.943 & 0.000 & 0.057 \\ 0.022 & 0.934 & 0.044 \\ 0.009 & 0.026 & 0.956 \end{bmatrix} \end{matrix} \dots (12)$$

$$R = \begin{matrix} \text{砂礫} \\ \text{砂質土} \\ \text{シルト} \end{matrix} \begin{matrix} \text{砂礫} \\ \begin{bmatrix} 0.000 \\ 0.000 \\ 0.009 \end{bmatrix} \end{matrix} \dots (13)$$

$$M = \begin{matrix} \text{砂} \\ \text{砂質土} \\ \text{シルト} \end{matrix} \begin{matrix} \text{砂} & \text{砂質土} & \text{シルト} \\ \begin{bmatrix} 10.5 & 9.0 & 23.0 \\ 8.2 & 12.0 & 23.0 \\ 7.0 & 9.0 & 23.0 \end{bmatrix} \end{matrix} \dots (14)$$

$$B = \begin{matrix} \text{砂} \\ \text{砂質土} \\ \text{シルト} \end{matrix} \begin{matrix} \text{砂礫} \\ \begin{bmatrix} 1.0 \\ 1.0 \\ 1.0 \end{bmatrix} \end{matrix} \dots (15)$$

$$\tau = \begin{matrix} \text{砂礫} \\ \text{砂質土} \\ \text{シルト} \end{matrix} \begin{matrix} \text{砂礫} \\ \begin{bmatrix} 42.5 \\ 43.2 \\ 39.0 \end{bmatrix} \end{matrix} \dots (16)$$

これらの結果は次のことを意味する。地表面が[砂]、[砂質土]、[シルト]のどの状態から始まっても、いつかは[砂礫]になることをベクトルBは示しており、その平均の深度が各々、42.5m、43.2m、39.0mであることをベクトルτが示している。さらに、行列Mは[砂礫]になるまでの地層の構成割合を表している。たとえば、その第一行では、[砂礫]が出現する平均深度42.5mの内、[砂]が10.5m、[砂質土]が9.0m、[シルト]が23.0mとなることを示している。

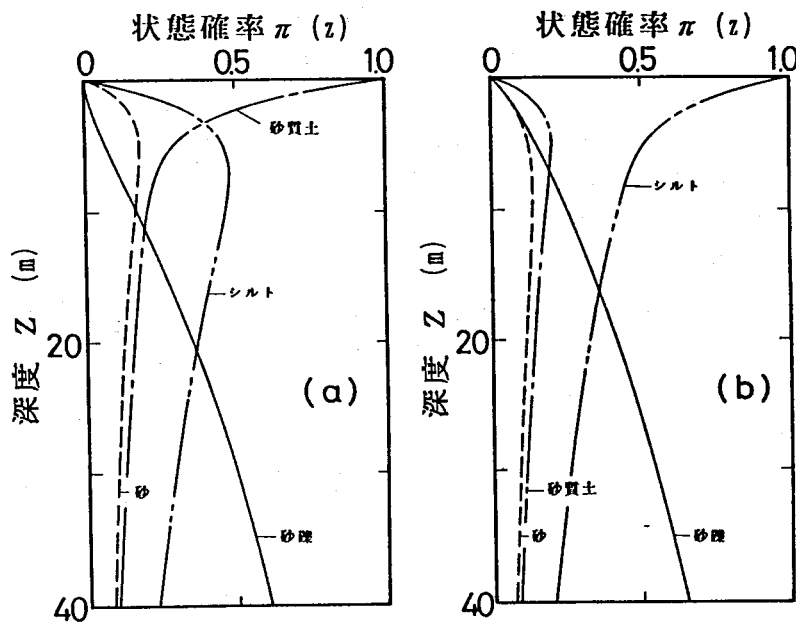


図-3 状態確率分布 (図-1 (b) の場合)

### 3.3 土質柱状図の比較

図-4 (a) ~ (f) は日光川河口付近の沖積地盤の土質柱状図である。この6本の土質柱状図の位置は南北に約 200~260 mの間隔でなっており、表面付近と最下部に砂層が卓越し、中間に厚いシルト層が連続している。土質の区分は中分類程度、深度間隔 $\Delta z$ は20 cmとし、マルコフ連鎖を当てはめた。そして、各土質柱状図から得られる推移確率行列を基準の推移確率行列 $P^0$ として、式(9)に基づいて各土質柱状図の推移確率行列を比較した。計算した $X^2$ 値と自由度を表-1に示した。なお、各基準の土質柱状図により、その自由度が異なるので、簡単には比較ができない。そこで、その自由度の危険率5%の $X^2$ 理論値と $X^2$ 計算値との比率(%)を括弧内に付記してある。また、表の最下覧にはすべての土質柱状図の推移確率行列の平均値を基準値 $P^0$ とした場合の値が示してある。

この表より、計算された $X^2$ 値は0.88~13.6の範囲にあり、理論値との比率では9.32~124%を示していることがわかる。また、危険率5%の $X^2$ 理論値を越える計算値は2例のみであり、ほとんどの土質柱状図は基準の柱状図の $P^0$ から生ずると見なししてもよいことになる。

この表の第一行目は基準の $P^0$ を土質柱状図(a)とした場合であるが、土質柱状図(b)と(c)あるいは(c)と(d)の間で計算された $X^2$ 値に大きなギャップが生じており、(a)と(d)(e)(f)の土質柱状図の推移確率行列が大幅に異なることを示している。このことは、基準の $P^0$ を土質柱状図(b)(d)(e)にした場合にも認められる。さらに、すべての土質柱状図の推移確率行列の平均値を基準値 $P^0$ とした場合には、計算された $X^2$ 値の小さい順位はb、f、e、d、a、cとなっており、これは土質柱状図の類似性の高い順序を表しているものと考えられる。

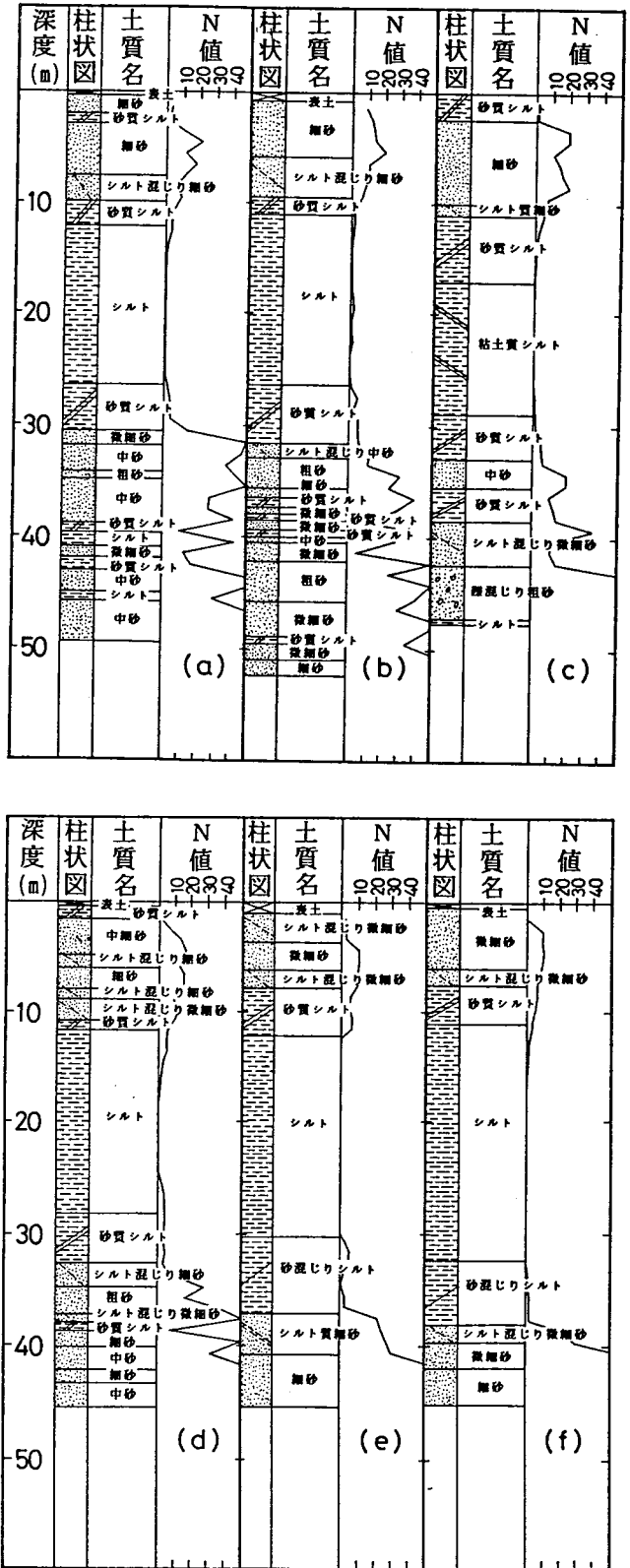


図-4 沖積地域の土質柱状図(日光川河口付近)

表-1 カイ2乗値の一覧表 (沖積地盤)

基準 P <sup>0</sup>	a	b	c	d	e	f	自由度
a	0.00(0.00)	1.49(15.7)	6.16(64.9)	11.8(124)	9.38(98.8)	8.99(94.8)	4
b	3.45(27.3)	0.00(0.00)	3.16(25.9)	11.5(91.6)	7.19(57.1)	6.56(52.1)	6
c	13.6(108)	4.75(37.7)	0.00(0.00)	5.39(42.8)	8.55(67.9)	3.98(31.6)	6
d	8.01(72.4)	4.42(39.9)	6.74(60.9)	0.00(0.00)	3.85(34.7)	4.95(44.8)	5
e	3.58(37.8)	2.03(21.4)	4.38(46.2)	2.45(26.2)	0.00(0.00)	1.96(20.5)	4
f	2.22(23.4)	0.88(9.32)	2.74(28.9)	3.89(41.0)	1.91(20.2)	0.00(0.00)	4
平均 P <sup>0</sup>	9.71(53.0)	3.20(17.5)	12.7(69.1)	7.75(42.3)	5.62(30.7)	4.52(24.7)	10

洪積地盤と沖積地盤の特性を比較することを目的として、洪積地盤の土質柱状図についても同様の解析を行った。図-5 (a) ~ (c) は洪積の熱田台地の土質柱状図である。これらの位置は間隔 20~40 m であり、同一敷地内の調査結果である。その X<sup>2</sup> 値を表-2 に示すが、計算された X<sup>2</sup> 値は 6.69~22.9 の範囲にあり、理論値との比率では 20.6~125% を示していることがわかる。また、危険率 5% の X<sup>2</sup> 理論値を越える計算値は 1 例のみであり、ほとんどの土質柱状図は基準の柱状図の P<sup>0</sup> から生ずると見なしてもよいことになる。

洪積地盤では現れる地層が多いために、検定の自由度が大きくなるが、X<sup>2</sup> 値はさほど小さくなってはいない。また、危険率 5% の X<sup>2</sup> 理論値と X<sup>2</sup> 計算値との比率 (%) を見ても、20~30% と低く、土質柱状図の類似の程度は高いと思われる。

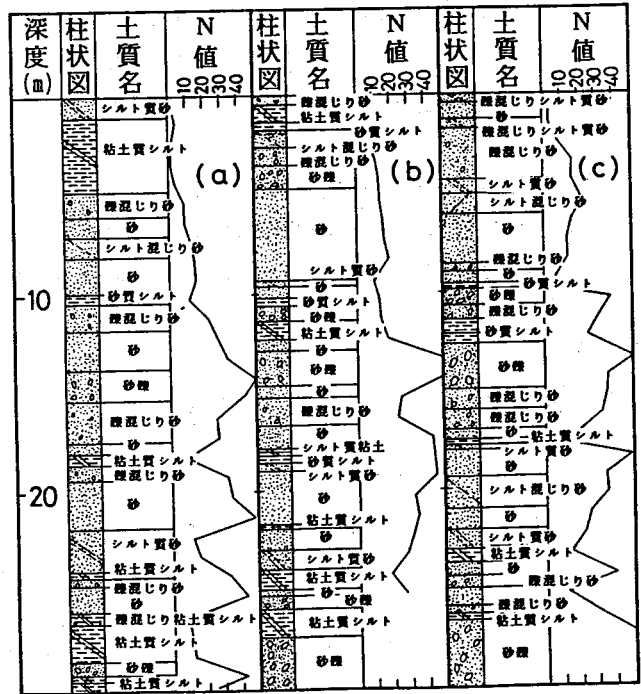


図-5 洪積地盤の土質柱状図

表-2 カイ2乗値の一覧表 (洪積地盤)

基準 P <sup>0</sup>	a	b	c	自由度
a	0.00(0.00)	7.51(41.0)	22.9(125)	10
b	9.56(45.5)	0.00(0.00)	17.5(83.4)	12
c	13.0(66.2)	10.1(51.5)	0.00(0.00)	11
平均 P <sup>0</sup>	5.14(20.6)	6.69(26.8)	7.51(30.0)	15

洪積地盤の方が地盤の生成環境は複雑であるから、土質柱状図の類似の程度が低いのではないかと考えていたが、図-5に示した土質柱状図は狭い敷地内に同一の調査者により、短期間に得られたものであるために、 $X^2$  計算値が低くなったと思われる。さらに、ここに取り上げた事例では、沖積地盤の場合には土質柱状図間の距離が約 200~260 mであるが、洪積地盤の場合にはその十分の一程度であり、この影響が強いものと思われる。

#### 4. あとがき

本研究では、マルコフ連鎖の理論に基づいた土質柱状図の表現方法について述べた。この方法の最大の特徴は地層名の区分と地層を読み取る深度間隔さえ決めておけば、土質柱状図に対応した客観的なモデルを作成することが可能なことである。地盤の構成割合や支持層などの現れる深度の期待値も比較的容易な計算により求められる。また、仮説検定の考え方を応用し、土質柱状図の比較も可能となる。

ここに取り上げた沖積地盤と洪積地盤の土質柱状図は対象地域の広さや解析の深度、さらには調査者が異なっている。したがって、まえがきに述べた2種類の不確実性が混在しているために、沖積地盤と洪積地盤の比較はできなかった。そこで今後の検討課題としては、次の項目が考えられる。

- ①同一の調査者が、比較的狭い地域（沖積地盤と洪積地盤）に多数本の地盤調査を行った資料の解析
- ②上記の地域に対して、他の調査者が行った資料の解析

最後に、本研究の土質柱状図に関しては基礎地盤コンサルタンツ（株）名古屋支店の古長孟彦氏ならびに（株）日建設計名古屋事務所の本郷智之氏にお世話になった。また、研究の遂行に当たっては名城大学4年生の子安正範君の協力を得た。記して、謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 板橋一雄：土質柱状図のモデル化に関する研究、地盤工学におけるリスク評価手法に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp. 1~6、1987
- 2) 森村英典、高橋幸雄：マルコフ解析（OAライブラリー18）、日科技連出版社、1979  
Bhat, U. N: Elements of Applied Stochastic Processes, John Wiley & Sons、1972
- 3) 山本忠久、子安正範、板橋一雄：マルコフ連鎖による土質柱状図の記述、昭和63年度研究発表会講演概要集、土木学会中部支部、pp. 320~321、1989