土質名を数値化したボーリング資料のスペクトル解析* — スペクトル地盤図の土質柱状図推定への利用 —

朝日 秀定**・弘原海 清***・塩野 清治***

Spectral Analysis of Numerized Soil Drilling-logs* — Application of Spectral Zoning Map to Estimation of Soil Condition —

Hideyasu ASAHI**, Kiyoshi WADATSUMI*** and Kiyoji SHIONO***

Abstract: The soil names of soil drilling-logs are processed numerically to assess the vertical variation of the soil and thickness of ground.

We analyzed soil drilling-logs down to 12 meters obtained from 149 locations in the eastern region of Muroran, Hokkaido, Japan.

Soil names are classified into 13 sequential categories and a set of numerical scale is given to each of them. The numerized drilling-logs are transformed to the spectra of Haar, Slant, Walsh function system. Using the most substantial function system, spectral zoning maps are drawn to understand the ground condition and to estimate categorized drilling-logs at arbitrary locations.

The results are as follows:

- 1) Haar function system provides the most abundant information on the ground condition. This function system was adopted in this study since it is most suitable for the spectral analysis.
- 2) In the average, 99% of numerized drilling-logs can be re-created from the 8 strongest spectra and almost 100% from 16 strongest ones.
- 3) D. C. spectrum component is most informative on the ground condition.
- 4) In the zoning map of D. C. spectrum component, zones with small fluctuation of numerized drilling-logs show extremely strong or weak spectrum intensity.

Key Words: Drilling, Numerize, Rectangular wave form function, Spectrum, Zoning map

1. はじめに

土質ボーリング資料はその再利用のために、多くの研究機関、研究者、関連業界で収集されている。これらのうちで最も身近な資料は各地の建築士会支部等で収集されたボーリング資料集であろう。その再利用法としては直接資料を参照にする以外に、 N 値がしばしば整理されて利用されている。 N 値が整理の対象になりやすいのは、それが数値であるため、取り扱いが容易なためであろう。それに引き替え土質は定性的な資料であり、整理が簡単ではないために、多量の資料を一度に整理するには困難が多い。

土質ボーリング資料を全面的に利用する手法としては、地盤の S 波速度を推定する太田・後藤(1976)の方法が知られており、地盤の S 波速度の推定によく用いられている。土質のみを解析利用する方法としては、単層の変化を岩相や土質を基に各層の推移確率からボーリング地点での層相変化を知るマルコフ解析、あるいはこの解析結果の情報エントロピーでの表現(Hattori, 1976; 渡辺, 1982)などが知られており、これらは地盤を構成する土質の深度方向への変化の頻度を数値で表示している。このほか、土質を数値に置き換えて取り扱う方法としては、土質を種々の利用目的に応じて数値の演算で統合し、地盤をモデル化する方法(大崎・阪口, 1972; Ohosaki and Sakaguchi, 1973), あるいは深度方向への土質変化に伴う数値の深度方向への変化を観察する方法(Vistelius, 1961), またはこのフーリエ変換により堆積の周期性を明瞭化する方法(Schwarzacher, 1964; Yamamoto and Nakagawa, 1974; 小池ほか, 1990)が知られている。同様に、土質の数値変化を方形波関数のスペクトルに変換し、この結果を利用し

* 日本情報地質学会 シンポジウム'94(1994年11月, 大阪)で一部講演。

** 室蘭工業大学材料物性工学科Dep. of Materials Science and Engineering, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran 050, Japan

*** 大阪市立大学理学部地球学教室Dep. of Geosciences, Faculty of Science, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558, Japan

第2表 関数パラメータと単位

	三角関数	Slant関数, Walsh関数	Haar関数
パラメータ	周波数	交差数	Haar
単 位	Hz	Zc	Ha

第3表 表示文字対照表

Slant関数, Walsh関数	Haar関数	交差数, Haar (Zc,Ha) i	地 盤 図 表 示
i	(n, m)		
0	(0, 0)	0	0
1	(0, 1)	1	1
2	(1, 1)	2	2
3	(1, 2)	3	3
4	(2, 1)	4	4
5	(2, 2)	5	5
6	(2, 3)	6	6
7	(2, 4)	7	7
8	(3, 1)	8	8
9	(3, 2)	9	9
10	(3, 3)	10	A
⋮	⋮	⋮	⋮
15	(3, 8)	15	F
16	(4, 1)	16	G
⋮	⋮	⋮	⋮
31	(4,16)	31	V
32	(5, 1)	32	W
33	(5, 2)	33	X
34	(5, 3)	34	Y
35	(5, 4)	35	Z
36	(5, 5)	36	a
⋮	⋮	⋮	⋮
61	(5,30)	61	z
62	(5,31)	62	\$
63	(5,32)	63	#
64	(6, 1)	64	0
⋮	⋮	⋮	⋮
73	(6,10)	73	9
74	(6,11)	74	A
⋮	⋮	⋮	⋮
99	(6,36)	99	Z
100	(6,37)	100	a
⋮	⋮	⋮	⋮
125	(6,62)	125	z
126	(6,63)	126	\$
127	(6,64)	127	#

第2図 方形波関数の波形例(8次)

以上のように尺度を利用して土質カテゴリを数値化し、この数値を深度方向に連ねると数値化した土質の柱状図が得られる。この例を第9図に示す。以後この柱状図を「数値化柱状図」と呼びカテゴリで表現した土質柱状図を「カテゴリ化柱状図」と呼ぶ。

2.2 数値化柱状図のスペクトルへの変換と逆変換

数値化柱状図はその形状が方形波になるので、方形波関数スペクトルによる特徴の抽出とスペクトルによるボーリング土質カテゴリの推定を行う。ここでは、直交方形波関数系として知られている Haar 関数、Slant 関数、Walsh 関数を比較検討する。第2図には比較検討した関数系の8次での波形を例示する。各関数を図の順に、 $h(n, m, t)$, $s(i, t)$, $wal(i, t)$ で示す。Haar 関数、Slant 関数については Coulon(1986)、伏見・赤井(1987)、森田(1984)等に述べられている。Walsh 関数については喜安(1980)に詳述されている。

Walsh 関数では+1から-1へと不連続に0をまたぐ回数 i を交差数と呼ぶので、本文では Slant 関数の場合にもその呼び方を使う。交差数の単位として Zc を用いる。Haar 関数では n は 2^n を示し、区間を 2^n 等分することを意味する。 m は $n=0$ の場合を除いて1から 2^n までの数である。Haar 関数では Walsh 関数における交差数に相当する呼び方が見あたらない。よってここでは Haar と表現し、単位としては Ha で表した。これらの表現を一般になじみのある三角関数と対比して第2表にまとめて示す。次に、Haar 関数では関数を (n, m) という2文字の変数で区別する。この表示は実際の計算上不便であるばかりではなく、式の表示も複雑になるので (n, m) を通し番号で表示するための対照表を第3表として示す。更に、同表には後で示す地盤図において、スペクトルを表示するにあたり、通し番号でも2桁以上を利用しなければならないので、1文字で表示するための文字を対応させて載せてある。通し番号 i と n, m の間には

$$i = 2^n + m - 1 \quad (1)$$

の関係がある。ちなみに第2図をみても分かるように Haar 関数において $i = 2^n$ ($n: 0, 1, 2, \dots$) の関数は区間の始めに始点をもっている。この関数は他2関数に比べて、値を持つ区間が関数ごとに変わっている。その値は $i = 2^n + 1 \sim 2^{n+1}$ ($n: 1, 2, 3, \dots$) ごとに 2^n 行の値の $\sqrt{2}$ 倍になる。

これらの関数系による Fourier 式の離散変換は、

$$A = \frac{1}{k} K X \quad (2)$$

更に逆行列を利用して X は

$$X = K^{-1} A \quad (3)$$

ここで

A : スペクトルの列ベクトル, $[a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots]^T$

k : 標本数 ($= 2^n, n: 2, 3, \dots$)

K : 関数系のマトリックス ($k \times k$)

X : 数値化した土質を解析深度の $1/k$ ごとに標本化した列ベクトル, $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots]^T$

なお、以上に示した関数系による Fourier 式の変換結果等を関数ごとに説明するにあたり、Haar 変換、Slant 変換、Walsh-Hadamard 変換として説明するが、Walsh-Hadamard 変換は以後 WH 変換と略記する。

2.3 関数系の比較方法

一般に原波形を完全に再現するにはどの関数を利用するにせよスペクトル強度0以外のすべてのスペクトルが必要である。しかし、本文のように土質カテゴリの推定や波形の特徴の抽出のためにスペクトル変換を利用しようとするときは、できるだけ少ない数のスペクトルで原波形を表現できることが望ましい。よって最適な関数系を選択するために以下のような方法で関数系の比較検討をした。

関数は直交関数系であるから次の Parseval の定理が成立する。

$$T = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^2 = \sum_{i=0}^{k-1} a_i^2 \quad (4)$$

この計算では T の値は標本列の平均値に大きく左右されるので、平均値を差し引いた標本列についても同様の値を求める。平均値はスペクトルでは直流成分 (a_0) であるから、標本値より平均値 $\bar{x}$ を差し引くと、

$$\sigma^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^{k-1} a_i^2 \quad (5)$$

となる。 T と σ^2 の2値は各標本列ごとに一定になるので、おのおのを標本列の総情報量とその分散と考える。このとき、各ボーリングで得られるスペクトルを T あるいは σ^2 で割った値は各スペクトルが原波形を説明する割合(情報比率)になる。情報比率 p , p^* は

$$p_i = a_i^2 / T \quad (i: 0, 1, 2, \dots, k-1) \quad (6)$$

$$p_i^* = a_i^2 / \sigma^2 \quad (i: 1, 2, 3, \dots, k-1) \quad (7)$$

となる。この値を百分率で示す。この値の大小は個々のスペクトル強度が、その標本列を説明する割合の大小になる。本文ではこの値を各変換ごとにスペクトルの大きな順に並べ、これを累積した値(累積情報比率 $S_g(S_g^*)$)を全ボーリングで平均した値で関数系の比較検討を行う。

累積情報比率 S_g, S_g^* は

$$S_g = \frac{1}{f} \sum_{n=1}^f \sum_{i=0}^g p_{ni} \quad (8)$$

$$S_g^* = \frac{1}{f} \sum_{n=1}^f \sum_{i=1}^g p_{ni}^* \quad (9)$$

で表される量である。

ここで、

g : 検討しようとしている情報比率の大きさの順番
(0, 1, 2, ...)

f : ボーリング本数 (=149)

p_{nl} : ボーリング n で大きさ l 番目のスペクトルのもつ
情報比率

l : スペクトル強度の順番

以後スペクトル強度を大きい順に取り扱う場合には、大きい順に第0成分、第1成分、第2成分、...と呼ぶ。

原波形の特徴を抽出する関数として、少数の大きな値を持つ p_i (または p_i^*) の占める割合が大きい関数系が有効である。その評価には次の情報エントロピーを用いた。

$$H = - \sum_{i=0}^{k-1} p_i \log p_i \tag{10}$$

$$H^* = - \sum_{i=1}^{k-1} p_i \log p_i \tag{11}$$

H または H^* の値が小さい直交関数系ほど少数のスペクトルに原波形に関する情報が込められていると考えられる。

3. ボーリング資料

解析に使用した資料は北海道室蘭市東部地域で実施された土質ボーリングの記録である。これらボーリング資料のうち地表からの深度が12m以深の記録があるもの149本について0~12mの記録を解析対象にした。12mまでを解析対象にしたのは、入手資料の数からこの深度程度で解析しなければ資料数が極端に少なくなるためである。第3図に

第3図 解析対象地とボーリング地点位置
○ボーリング点、●例示したボーリング地点

第4図 関数によるスペクトルの例 (N17点)

第4表 変換による情報エントロピー

変換の種類	情報エントロピー	
	H	H^*
Harr	0.805	2.312
Slant	0.861	2.930
WH	0.899	3.349

解析対象地域の案内図とボーリング位置を示した。解析には、各ボーリング土質記録の地表から0.09375m (=12m/128)ごとに土質をカテゴリ化し更にこれを数値化して解析資料とした。

4. 関数の比較と選択

4.1 情報エントロピーの比較

第4図にボーリング番号N17の各関数による0~15Zc (Ha)のスペクトルを示す。Haar変換は部分的に大きなスペクトル成分を示し、それ以外の成分では極端に小さいかまたは0である。Slant変換やWH変換では交差数全般にわたりある程度の成分を示す。特にWH変換では高交差数での強度が平均に他2変換に比べ大きい。このように関数系によってスペクトルの偏り具合が異なることがわかる。原標本列のスペクトルが偏っているほど少数のスペクトルで標本列を復元できることが期待できる。そこで、全ボーリングでのスペクトルの偏り具合を知るために(10)、(11)式の情報エントロピーによる比較を行った。情報エントロピーの値を第4表に示す。同表よりHaar変換、Slant変換、WH変換の順にスペクトルの偏りが小さくなっていると考えられ、Haar変換のスペクトルは少数のスペクトルによる原標本列の再現に優れていると言える。

4.2 累積情報比率の比較

この傾向を陽な形で確認するとともに、次に示す地盤図の情報比率を知るために、(8)、(9)式から計算される累積

第5図 成分順に累積した情報比率(第0成分を含む)

第6図 成分順に累積した情報比率(第0成分を除く)

② ボーリング位置とHaar ● 文字、タイル中心

第7図 任意地点のHaarの決め方

情報比率で関数の比較を行う。(8)式の結果を第5図に示す。この図より Haar 変換による累積情報比率は第2成分以降3成分では常に他の2関数のそれより大きい。第3成分までだけで約97%を、第7成分までに99%以上を、第15成分ではほぼ100%に達する。Haar 変換が他2変換に比べ最も情報を少数のスペクトルに含んでいる。しかし、この図に示された値は直流成分の大きさに左右されている。その原因は利用している尺度の原点が任意であり、カテゴリに対応する尺度の最小値が+1で、最大値が+17あるため、標本値の平均が必ず正の値になることに関係している。この効果を除くために(9)式により得られる累積情報比率で各変換の比較を行った。この結果を第6図に示す。この図でも明らかに Haar 変換によるスペクトルは他2変換に比

較して累積情報比率が高い。Haar 変換により得られる累積情報比率がほぼ一定になり始める第7成分までの値と比較すると、他の2変換より約8~15%ほど累積情報比率が高い。第7成分までの累積比率は94%で、第15成分までにその値はほぼ100%に達している。

以上の結果から、少ない数のスペクトルで原波形の特徴を抽出するための方形波関数に Haar 関数が最適であると考えた。

5. スペクトルによる地盤図の作成と利用

まず Haar 変換スペクトルの地盤図の作成方法を示し、この地盤図を利用して、任意地点のカテゴリ柱状図を推定する方法を説明する。最後にスペクトル地盤図の解釈法を議論する。

5.1 地盤図の作成と表示

スペクトル地盤図とは第0成分、第1成分、第2成分のように各成分ごとにスペクトルの大きさとその Haar の分布を示した図のことである(第8図)。第 n 成分の地盤図で任意地点のスペクトルは、第7図に示すようにその地点に距離 l が最も近いボーリングの第 n 成分のスペクトルをもって充てた。色タイルと文字で各タイルの中心でのスペクトルと Haar を示した。各タイルの中心の位置に最も近いボーリング点のスペクトル情報以外は表示されない。この図には表現されないボーリング点のスペクトルもある。ここで、表示文字の大きさと表示地点、表示ボーリング等の関係を述べる。第8図に示した図は、解析地域を計算機の表示画面に一度に表示できる大きさで作成した。すなわち $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ を 48×48 の小領域に分割して表示した。使用文字と背景のタイルは 8×8 点で構成している。隣り合うタイルの中心と中心の距離は 103.7 m 間隔である。第7図に示したように、タイルの中心にあたる実際の点に最も近いボーリング点を求め、考えている成分のスペクトルを求める。しかし、表示上は画面の1ドット分にあわせるための四捨五入を行っている。タイル中心で最大で 6.25 m のずれを含んでいる。

表現の面から考えると、本文で用いた尺度ではスペクトルの第0成分は常に最大である。すなわち、値の範囲は2~16で、ほかのスペクトルと比較して値が大きく、全体に及ぼす影響が大きい。このことは第5図で示したように、第0成分だけではほぼ85%の情報比率をもつことから明らかである。したがって、スペクトル表示段階をできるだけ細かくし、第1成分以降のスペクトルと同程度の表現をする必要がある。第0成分のスペクトルは直流成分だけであるから、表示しなければならないのはスペクトル強度のみである。そこで、地盤図の表現方法を第0成分とそれ以外

(a) 第0成分地盤図

(b) 第1成分地盤図

(c) 第2成分地盤図

(d) 第3成分地盤図

第8図 成分ごとの地盤図

(a) : タイルの色で1刻みの値を、数字で0.1の位を表す。

(b), (c), (d) : 数字は Haar を表わす。□で囲んだ文字は64を加える。

白抜き文字はスペクトルの値が正の値を、黒文字はスペクトルの値が負であることを示す。

第5表 スペクトル強度の読みとり

成分	タイル色	表示 文字	Ha	文字 色	スペクトル 強度
0	水色	0	0	—	6.0
1	青灰色	8	8	黒	-0.75
2	淡青灰色	1	1	黒	-0.75
3	淡青灰色	4	4	黒	-0.5

のものとして変えた。直流成分は強度の領域が2～16で、1刻みで表現すると14区間である。一方、使用したプリンタで表現できる色のうち、肉眼で明確に識別できる色は丁度14種類が限界であった。このことより、14色を2～16に1刻みで当てはめた。0.1の位は簡単に1文字で表示できる0～9の数字で表した。

次に、直流成分以外の第1,2,3成分のスペクトルを Haar は文字で、スペクトル強度を色タイルで表現した(第8図(b),(c),(d))。スペクトル強度の符号は、正は文字を白抜きに、負は黒文字で表した。また、各 Haar は数字1文字ですべてを表示することができないので、各 Haar を第3表のように1文字に対応させた。64～127 Ha の表現は文字を□で囲み、この□で囲まれた文字に対応する Ha は0～63までの Haar 数に64を加えた値を Haar として示してある。

5.2 数値化土質柱状図の推定

ここでは、スペクトル順の地盤図を基に任意地点のカテゴリ柱状図の推定を行う方法を示す。まず、スペクトル強度を第8図の4面の図より読みとり列ベクトルで表示する。但し、読みとり値は各色見本に示した数値域の中央値にする。つぎに、(3)式により逆変換をおこなう。得られた計算結果を数値的に最も近いカテゴリの数値に置き直して、この値をカテゴリに読み変える。この手順を、第3図の N17 で示した点のボーリングを推定することで具体的に示す。

逆算例：第8図より N17での Haar とそのスペクトル強度は第5表のように読みとられる。第0成分と第1成分を例に読みとり方を示す。第0成分を表示する第8図(a)で、N17点のタイルの色は水色であるから、1の位のスペクトル強度は6である。また、表示文字が0であるから、小数点下第1位の値は0である。よって $a_0=6+0=6$ になる。次に、第1成分は第8図(b)の同地点表示文字は8で黒であるから Haar は8 Ha で強度は負になる。タイル色は青灰色であり、色見本でこの色に相当する強度は0.7～0.8であるので、推定強度 a_8 は-0.75になる。他成分も同様に読みとって推定スペクトルは

$\hat{A}^T=[6.0, -0.75, 0, 0, -0.5, 0, 0, 0, -0.75, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$
また直交関数系として16次の Haar 関数行列を選ぶ。逆行列は
 $K^{-1}=$

1	1	$\sqrt{2}$	0	2	0	0	0	$\sqrt{8}$	0	0	0	0	0	0	0
1	1	$\sqrt{2}$	0	2	0	0	0	$-\sqrt{8}$	0	0	0	0	0	0	0
1	1	$\sqrt{2}$	0	-2	0	0	0	0	$\sqrt{8}$	0	0	0	0	0	0
1	1	$\sqrt{2}$	0	-2	0	0	0	0	$-\sqrt{8}$	0	0	0	0	0	0
1	1	$-\sqrt{2}$	0	0	2	0	0	0	0	$\sqrt{8}$	0	0	0	0	0
1	1	$-\sqrt{2}$	0	0	2	0	0	0	0	$-\sqrt{8}$	0	0	0	0	0
1	1	$-\sqrt{2}$	0	0	-2	0	0	0	0	0	$\sqrt{8}$	0	0	0	0
1	1	$-\sqrt{2}$	0	0	-2	0	0	0	0	0	$-\sqrt{8}$	0	0	0	0
1	-1	0	$\sqrt{2}$	0	0	2	0	0	0	0	0	$\sqrt{8}$	0	0	0
1	-1	0	$\sqrt{2}$	0	0	2	0	0	0	0	0	$-\sqrt{8}$	0	0	0
1	-1	0	$\sqrt{2}$	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	$\sqrt{8}$	0	0
1	-1	0	$\sqrt{2}$	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	$-\sqrt{8}$	0	0
1	-1	0	$-\sqrt{2}$	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	$\sqrt{8}$	0
1	-1	0	$-\sqrt{2}$	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	$-\sqrt{8}$	0
1	-1	0	$-\sqrt{2}$	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	$\sqrt{8}$
1	-1	0	$-\sqrt{2}$	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	$-\sqrt{8}$

両者の積をとって

$K^{-1}\hat{A}^T$
 $= [2.13 \ 6.37 \ 6.25 \ 6.25 \ 5.25 \ 5.25 \ 5.25 \ 5.25 \ 6.75$
 $6.75 \ 6.75 \ 6.75 \ 6.75 \ 6.75 \ 6.75 \ 6.75]^T$
 $\approx [2 \ 6 \ 6 \ 6 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7]^T$

を得る。得られた結果は1要素が0.75m(=12m/16)区間ごとの土質を示す。これらの各値を第3表の尺度値をもとにカテゴリに置き換えると、

- 0～0.75m：高有機質土、
- 0.75～3m：シルト、
- 3～6m：粘土、
- 6～12m：砂質土

のように深度とカテゴリが推定される。

この結果を第9図(a)に破線で示してある。

逆変換により得られる層厚をより詳細に表現するには使用関数(行列)の次数を高く、土質カテゴリを精度良く推定するには図面数(成分数)を多く、スペクトルのボーリング点ごとの値を知りたい場合には図面を文字に対して相対的に大きくすればよい。

5.2 地盤図の解釈

第5図に示したように、第0成分と第1成分だけで全情報比率の約84%が説明され、第6図に示す分散部分でも第1成分単独で約45%が説明できる。以下、第0、1成分を表現した地盤図第8図(a),(b)の解釈法を示す。なお第

第9図 ボーリング土質と数値化柱状図の例

第10図 第0成分-第1成分スペクトル強度の比較

2成分以降の(c), (d)図を考察するのは解釈が複雑になり、スペクトルに変換してボーリング土質を観察する利点が少なくなる。

第8図(a)は、すべてのスペクトル成分が直流成分で、地表から深度12mまでの平均値の分布を表すと解釈される。B85のある地域はタイル色が灰色で強度は2～3と低い。このように低い値を示す地域の土質構成は、小さい値の土質が占める割合が高いと解釈される。土質としては高有機質土、火山灰質粘性土のいずれかであろう。EX1を中心にした地域ではタイル色が紫色で強度は16～17と高い。このような地域での土質構成は、大きな値の土質が占める割合が高いことを示す。土質としては新第三系の凝灰岩類または岩類が主な構成土質であると解釈される。このような解釈は第10図に示した第0成分と第1成分のスペクトル強度の関係で確認できる。第0成分の強度が約3.5以下または15以上では第1成分の強度は、ほぼ+1～-1.5であ

る。異種の土質があっても層厚はごく薄いであろう。

(b)図の解釈は次の通りである。例えばこの図の中央部上方の1Haでスペクトルが負の値をもつ地域は深度0～6mを構成する土質に対応する数値の平均が、6m以深を構成する土質に対応する値の平均より小さいことを表している。また、この図は数値変化の一番大きな深度と層厚を示している、例えば、EX1点が示す地点にはGが表示されているので、Haarは16Haになる。すなわち、地表から0.75m(=12m/16)の間に最大の土質変化があることを示している。また、Gの文字が黒文字で表されスペクトル強度が負であるから、上の層の数値は下の層に比べ値が小さいことが分かる。その変化の割合を示す数値は次のようである。この地点のスペクトル強度は灰色(=1.25)のタイルで表されている。いま注目しているのは第1成分だけであるから他スペクトル強度を0とおいて、

$$\hat{A}^T = [0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ -1.25 \ 0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0]^T \quad (14)$$

16個の0

とし、Kを32次以上の関数行列に選んで(3)式に代入する。(3)式で16Haにかかわる K^{-1} は17列だけであり、関数行列で17列を構成する要素は+4, -4のみである。実際の計算には、読みとったスペクトル強度にこのHaarに対応する関数行(逆行列では列)の要素(=4)を掛けて2倍し、正負の符号をつける。この例では $4 \times (-1.25) \times 2 = -10$ となり、数値化したカテゴリは数値で10以上離れているであろうことが推定される。

中間的な値を示す地域は第10図からもわかるように、土

質変化が多様で、土質の数値表現による変化が激しいこともあり、一定の解釈を与えることはできない(B155点、第9図(c))。このほか、第8図(b)図で白抜きになって示される地域は第0成分のみが存在するボーリングで表示されていることから、ほかのカテゴリに分類される土質を含まないと解釈できる。当然ながら、このボーリング記録では以降の高成分のスペクトル成分は無い。また、これらの図で注意しなければならないのは、面積的に多くを占める地域は、必ずしも同一土質構成のボーリングが散在していることを意味しない。その地域にボーリング点が1点しか無い、あるいはその地点より地図の外側の方向にボーリング点がないような地域である(EX1点)。このことは第8図と第3図のボーリング位置の対応を見比べると理解されるであろう。

6. まとめ

以上より次のような結論が得られた。

- 1) 深度方向への土質変化に伴う数値の変化を直交関数のスペクトルに変換したとき、Haar変換が最も情報比率が大きい。
- 2) Haar変換では、大きなスペクトルが8個で全標本列の99%、16個ではほぼ100%の原標本列の復元できる。
- 3) 利用した尺度では、スペクトルの直流成分が最大であり、直流成分には土質の状況について最も多くの情報が含まれる。
- 4) 直流成分の地盤図において、数値が極端に大きい地域または小さい地域では数値化柱状図の変化は小さい。

文 献

- 朝日秀定(1991) 土質名を数値化した土質ボーリング柱状図のスペクトル解析, 情報地質, **2**, 341-351.
- 朝日秀定・弘原海 清・塩野清治(1994) ボーリング記録における土質名の数値化と地盤区分, 情報地質, **5**, 211-221.
- Coulon, d. F. (1986) *Signal Theory and Processing*. Artech House, Inc., 618 p.
- 土質工学会基準部(1989) 土質工学会基準「土の工学的分類法(日本統一土質分類)」, 土と基礎, **37**, 83-85.
- 伏見康治・赤井 逸(1987) 直交関数系, 共立出版, 259p.
- Hattori, I. (1976) Entropy in Markov chain and discrimination of cyclic patterns in lithological successions. *Math. Geol.*, **8**, 477-487.
- 喜安善市(1980) アダマル行列とその応用, 電子通信学会, 406p.
- 小池克明・西山 孝・石田志郎・藤田和夫(1990) ボーリングデータベースを用いた大阪・京都・亀山盆地表層堆積物の層相解析, 第四紀研究, **29**, 395-404.
- 森田 清(1984) フーリエ変換と情報処理, オーム社, 269pp.
- 大崎順彦・阪口 理(1972) 地盤の基礎工学的分類 —日本の主要なチュウ積地の場合—. 第17回 土質工学シンポジウム — 調査・設計・施工における土の判別分類の諸問題 —, 59-64.
- Ohsaki Y. and Sakaguchi O. (1973) Major type of soil deposits in urban areas in Japan. 土質工学会論文報告集, **13**, 49-65.
- 太田 裕・後藤典俊(1976) S波速度を他の土質諸指標から推定する試み, 物理探鉱, **29**, 251-261.
- Schwarzacher, W. (1964) An application of statistical time-series analysis of a limestone-shale sequence. *Jour. of Geology*, **72**, 195-213.
- Vistelius, A. B. (1961) Sedimentation time trend function and their application for correlation of sedimentary deposits. *Jour. of Geology*, **16**, 703-728.
- Yamamoto K. and Nakagawa Y. (1974) Time trend analysis of the Plio - Pleistocene sequence in the central part of Kinki district, Japan. *Mem. of the Faculty of Sci., Kyoto University, Series of Geol. & Mineral.*, **40**, 45-65.
- 渡辺邦夫(1982) 推移確率とエントロピーを用いた平野部地下地質の定量的把握と地盤のモデル化, 応用地質, **23**, 33-45.

要 旨

土質名を数値化したボーリング資料のスペクトル解析

— スペクトル地盤図の土質柱状図推定へ利用 —

： 朝日 秀定・弘原海 清・塩野 清治

本研究では、地盤の土質と層厚の変化を知るために土質ボーリングにおける土質名を数値処理する方法を示す。筆者等は北海道室蘭市東部で得られた149点での12mまでの土質を解析した。土質名は13の継次カテゴリに分類し、カテゴリに1組の尺度値を当てはめた。数値化した土質ボーリング記録は Haar, Slant, Walsh 関数系のスペクトルに変換した。最も情報を表現できる関数系を使って任意地点のカテゴリ化した柱状図の推定と地盤の土質状況を解釈するために、スペクトル地盤図を作成した。

得られた結果は以下の通りである：

- 1) 地盤の土質状況についての情報を最も豊富に与える関数は Haar 関数系である。
- 2) Haar 変換では、大きなスペクトルが8個で全標本列の99%，16個ではほぼ100%の原標本列の復元できる。
- 3) スペクトルの直流成分は地盤の土質の状況について最も多くの情報が含まれる。
- 4) 直流成分の地盤図において、数値が極端に大きい地域または小さい地域では数値土質柱状図の変化は小さい。

キーワード：ボーリング，数値化，方形波関数，スペクトル，地盤図

(1995年2月3日受付，1995年3月10日受理)

付 録 Haar 関数行列発生プログラムのリスト

```

100 DIM H(256)
110 INPUT "Haar関数の次数は 2^n ;n=3,... ";ID
120 JI=2^ID
130 FOR K=1 TO JI : H(K)=1! : NEXT K
140 FOR K=1 TO JI
150 PRINT USING"###.### ";H(K);
160 NEXT K
170 PRINT
180 FOR I=1 TO ID
190 WT=2^(ID-I+1) : WT1=1
200 FOR J=1 TO 2^(I-1)
210 WT2=WT1+WT/2-1
220 WT3=WT2+1
230 WT4=(WT1+WT-1)
240 FOR K=1 TO JI : H(K)=0! : NEXT K
250 FOR K=WT1 TO WT2
260 H(K)=SQR(2^(I-1))
270 NEXT K
280 FOR K=WT3 TO WT4
290 H(K)=-SQR(2^(I-1))
300 NEXT K
310 FOR K=1 TO JI
320 PRINT USING"###.### ";H(K);
330 NEXT K
340 PRINT
350 WT1=WT1+WT
360 NEXT J
370 NEXT I
380 END

```

このプログラムを実行すると関数の次数の入力を要求されるので、要求に3～8までの値を入力すると、 2 の n 乗の次数の Haar 関数の行列が得られる。配列を大きくすると、さらに高次の行列を得る。

出力例： $n=3$ を入力した結果。

```

1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000
1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 -1.0000 -1.0000 -1.0000 -1.0000
1.4142 1.4142 -1.4142 -1.4142 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 1.4142 1.4142 -1.4142 -1.4142
2.0000 -2.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 2.0000 -2.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 2.0000 -2.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 2.0000 -2.0000

```