

土質断面図の自動作成—ファジイクラスタリングとGAの利用—

三重大学 正会員 大野 研
アローコンサルタント(株) 横井英治.

1.まえがき

近年、建設 CALS や、GIS の発展に伴い、ボーリングデータを地図情報に埋め込む動きがある。しかし、ボーリングデータのデータベースができたからといって、任意の地点の地下の様子が判断できるようになるわけではない。ボーリング情報から、地層の連続性を判断しなければならない。コンピュータによる可視化技術の進歩により、いくつかのボーリングデータの Key 層を指定してやれば、それを基に3次元的な土質断面図を描くシステムは登場してきている。しかし、特に都市が多く存在するような沖積平野にはさほど特徴的な層は存在しないと思われるので、実際問題としては Key 層を指定するのは困難な問題であると思われる（もちろん近年提案されて来ているような詳細な観察を含む理学情報も存在すれば、容易に発見できる可能性は存在する）。したがって、人間が Key 層を指定しなくとも、ボーリングデータから自動的に地層の連続性を判断し、土質断面図を推定するようなシステムを構築できれば、簡便に任意地点の地下の様子が判断できるようになるうえに、人間の判断が介入しないことから、それらの土質断面図のレベルが一定し、客観性が向上すると思われる。

この種の研究としては、Toll ら(1991,1993)のものや、稲崎 (1991)、Inazaki (1994) のものがある。Toll らは、ある程度狭い範囲では、ボーリング孔内の土層の類似度に基づく土層の連結、広域的には、キイとなるマーカーベッドの発見を重要視している。稲崎は、Dynamic Depth Warping を使って、土層ごとの比較を行い“編集コスト”を算出し、最小編集距離を求めることによって土質断面図を得る方法と、エキスパートシステムを用いて層序を対比する方法を提案している。また我々も、ファジイ推論とGAを組み合わせ、土質断面図を自動的に生成する方法を提案してきている (1996,1997)。しかし、Toll ら(1991)のシステムは、土層間の類似の関係を表す類似度マトリクスの計算方法は示しているが最終的な土層の連結は人間が判断しなければならないものであり、Toll ら(1993)もマーカーベッドの発見後は人間が連結を行わなくてはならない。稲崎 (1991,1994) は最終的な土質断面図まで得られるものであるが、編集コストの定義が微妙であり、層の数が多くなると計算時間が莫大になるという欠点が存在する。我々のもの (Ohno(1996),大野 (1997)) は、GAを用いて層の数が多くなっても対応できるようになっている（すなわち、複雑な地層や3次元的な土層連結に向いている）が、やはり土層間の類似の程度を計算するファジイ推論の部分が単純でない。

そこで本研究では、土層間の類似の判断の部分の見通しを良くするために、ファジイ推論の代わりにファジイクラスタリングを用い、その後GAによる土層の連結を行うことで土質断面図を自動的に得る方法を試みた。通常のクラスタリングではなくファジイクラスタリングを用いることで、利用するボーリングデータに含まれる不確実な部分を吸収し、またデータの種類ごとの重みに注目することで、地域特性を導入できる可能性があると考えたからである。

2.方法

土質断面図の自動作成は、図 1-1 に示すフローチャートにしたがった。以下に、フローチャートの順に、解説を加える。

2-1 データ入力

最初にデータ入力をするようになるが、本システムでは、土質名、N値、層厚のみを使用した。以前のシステムでは、色調、相対密度、コンシステンシー等も利用していたが、どのボーリング記録にも確実に含まれている独立性の高い変数ということで、これら3つを選択した。

2-2 土質名の数値化、各層の中心深度の算出

入力されたデータを基に、土質名を数値化し、各層の中心深度を算出した。土質名は数値化しないそのままでは、クラスタリングが行いにくいので、稲崎（1992）の層相類似度マトリクスを参考にして数値化した（表 1-1 参照）。以前のシステムでは、例えば「砂混じりシルト」、「砂質シルト」、「シルト」を厳密に区別していたが、今回はこれを行えなかった。これは本システムの弱点と言える。また各層の中心深度は、これが同じであれば同じ地層である可能性が高いので、地表面の標高と層厚から計算し、クラスタリングに用いる第4の変数とした。

2-3 ファジィクラスタリング

クラスタリング手法としては、

ファジィ c-means 法（例えば古田・大野他（1992）参照）を使用した。

ファジィ c-means 法を簡単に説明すると以下のようなものである。まず分類対象を c 個のクラスターで分類するときのクラスターベクトル S を次式で定義する。

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_c) \quad (1)$$

そして、各要素のベクトル x_i が各クラスターに属する度合いを表す所属関数 μ_{ij} の行列 U を次式で考える。

$$U = [\mu_{ij}] \quad (i = 1, 2, \dots, c; j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ij} = 1, \quad \mu_{ij} \geq 0 \quad (3)$$

そして次式の目的関数を最小化するのが、ファジィ c-means 法である。

$$J_m = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c (\mu_{ij})^m d_{ij}^2 G, \quad (1 \leq m \leq \infty) \quad (4)$$

ただし、

$$d_{ij}^2 G = (x_j - v_i)^T G (x_j - v_i) \quad (5)$$

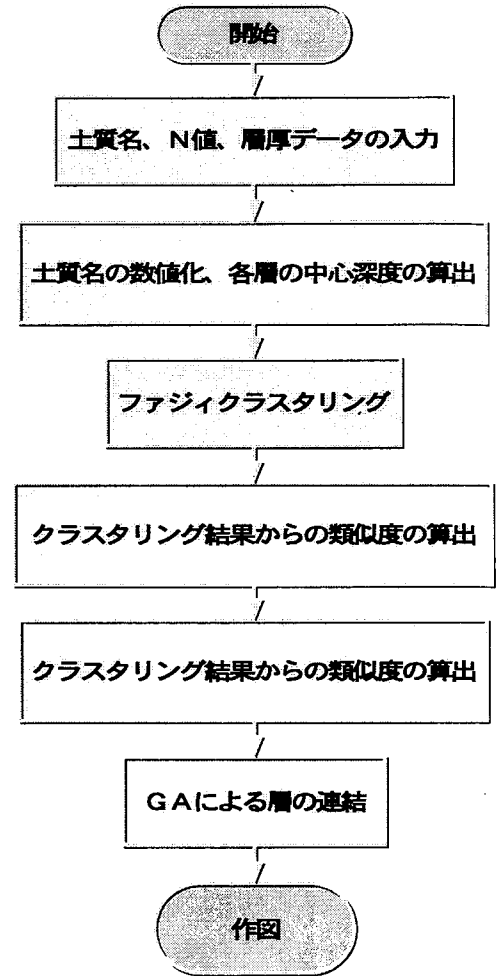


図 1-1 本システムのフローチャート

表 1-1 土質名の数値化

砂礫	粗砂	中砂	細砂	シルト	粘土
0	1	2	4	6	8

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\mu_{ij})^m x_j}{\sum_{j=1}^n (\mu_{ij})^m}, (1 \leq i \leq c) \quad (6)$$

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}^2}{d_{kj}^2}\right)^{\frac{1}{m-1}}} \quad (1 \leq i \leq c, 1 \leq j \leq n) \quad (7)$$

である。

2-5 クラスタリング結果からの類似度の算出

ファジィクラスタリング結果から、各層の類似度 A_{ij} を求めるために、以下の式を定義した。

$$A_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^c (\mu_{ik} \wedge \mu_{jk})}{\sum_{k=1}^c (\mu_{ik} \vee \mu_{jk})} \quad (8)$$

ここで、 \wedge は \min 演算を、 \vee は \max 演算を表す。

2-6 GAによる層の連結

そして、各層の類似度を基にして、層の連結をGAによって判断した。この部分は基本的に以前のシステムと同じなので、大野他（1997）を参考にされたい。

3. 計算例

本システムの有効性を示すために、実際のボーリングデータを用いた計算例を示す。データとしては、尾西市でおこなわれた9本のボーリングデータを用いた。その9本全部を使って、ファジィ c-means 法により、ファジィクラスタリングを行った。ただし、クラスタリングに用いたデータは、土質名、N値、層厚、中心深度の4種類で、各データを正規化後、土質名に0.5、N値に1.0、層厚に0.4、中心深度に1.0の重みを与えた。すなわち、 x_i に4次元のベクトルを考え、N値と中心深度を比較的信頼している。クラスタリング時に、 G に単位ベクトルを、 $m=2$ を与えている。またクラス数としては、濃尾地盤は大きく分けると6種類に分けられることが知られているので6を与えた（地盤工学会中部支部（1992）参照）。そして、9本のうちの3本のボーリング孔間の土質断面図を作図した。各ボーリング孔の間の距離は、500m程度である。その3本のボーリングデータを表2-1に示す。ファジィクラスタリングによる類似度の算定の結果を表3-1、3-2に、専門家の作成した土質断面図を図3-1、我々のシステムによる土質断面図を図3-2に示す。

4. 考察

全体的には、専門家の土質断面図と、我々のシステムによる土質断面図は、非常に良く似たものとなった。細部においては異なっている部分もあるが、濃尾平野の代表的な6種類（最上部堆積物、沖積上部砂層、沖積中部泥層、沖積下部砂層、濃尾層、基底礫層）のうち、最上部堆積物、沖積上部砂層、沖積中部泥層、基底礫層4つが、ほぼ専門家の土質断面図と一致した。専門家が細部の不一致を全体的に判断して層を連結しているのに対し、我々のシステムは細部の不一致を無視することができない。これが専門家と我々のシステ

ムの間の大きな違いである。

今回ここにデータをあげてはいないが、クリスプなクラスタリングに対して、ファジィクラスタリングを用いた結果大きな成果がでたケースが存在した。今回我々はクラスタリングを行う際に、6つのクラスに土層を分類した。しかし実際はどのクラスにもあまり所属しないような土層が存在した。我々が用いた4種類のデータが、6つのクラス分けを行うのに十分な情報量を持っているのかどうかは問題であるが、同じようなパターンで6つのクラスのどれにも取り立てて分類されない土層が存在した。そしてそれらの類似度を(8)式に従い計算してみると、大きな類似度を示し連結される場合が存在した。これは、クラスタリングだけでは発見できなかった連結であり、我々の方法が発見した連結である。

今後同一地域のもっと多量のボーリングデータを用いてクラスタリングを行い、それを専門家の判断と一致するようにクラスタリング時の重みなどをチューニングしていけば、我々のシステムの信頼性は向上するであろう。さらに逆に、各地域ごとに合理的な判断をするクラスタリング時の重みを比較していけば、地域ごとの地盤の特性が評価できると思われる。

謝辞

最後になりましたが、貴重なボーリングデータと土質断面図を提供していただいている富士開発(株)内園立男氏に感謝いたします。内園氏のご協力なくしては、本研究は行えておりません。

表2-1 ボーリングデータ

763701	土質名	N値	層厚(m)	中心深度
	初期標高		6.00	
	表土		2.50	4.75
1	砂混じりシルト	6	4.5	2.20
2	中砂	2	17.0	1.10
3	シルト	6	4.0	2.30
4	中砂	2	14.7	2.40
5	シルト混じり細砂	4	19.8	4.50
6	中砂	2	25.5	4.00
7	シルト混じり細砂	4	22.0	3.00
8	中砂	2	22.0	1.00
9	シルト質細砂	4	13.0	1.20
10	砂礫	0	50.0	2.10

763601	土質名	N値	層厚(m)	中心深度
	初期標高		5.80	
	表土		0.95	5.33
1	シルト	6	2.0	3.15
2	細砂	4	11.5	1.15
3	シルト	6	8.0	0.35
4	細砂	4	8.0	0.80
5	シルト質細砂	4	1.0	0.45
6	細砂	4	10.0	0.35
7	細中砂	4	16.0	0.45
8	細砂	4	21.4	7.30
9	シルト質細砂	4	7.0	0.65
10	細砂	4	13.0	0.95
11	砂質シルト	6	7.0	1.20
12	細砂	4	24.7	3.35
13	砂質シルト	6	9.0	0.60
14	シルト混じり細砂	4	20.0	0.35
15	砂礫	0	50.0	1.25

763602	土質名	N値	層厚(m)	中心深度
	初期標高		5.70	
	表土		0.60	5.40
1	砂質シルト	6	4.0	1.65
2	シルト質細砂	4	3.0	0.25
3	砂質シルト	6	1.5	2.30
4	シルト	6	1.0	0.60
5	シルト質細砂	4	8.0	1.40
6	シルト	6	3.0	0.60
7	中砂	2	23.0	8.55
8	砂質シルト	6	6.0	1.05
9	シルト質細砂	4	11.0	2.30
10	細砂	4	27.0	2.50
11	シルト	6	5.0	0.70
12	砂礫	0	50.0	0.80

表3-1 763701-763601の類似度

		763601														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
763701	1	0.87	0.53	0.80	0.66	0.64	0.44	0.21	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03
	2	0.25	0.46	0.28	0.36	0.37	0.53	0.84	0.38	0.19	0.20	0.23	0.14	0.25	0.24	0.09
	3	0.89	0.70	0.96	0.86	0.84	0.59	0.32	0.10	0.11	0.11	0.12	0.07	0.11	0.11	0.05
	4	0.17	0.35	0.19	0.27	0.28	0.43	0.74	0.45	0.22	0.24	0.27	0.14	0.29	0.24	0.08
	5	0.09	0.25	0.12	0.18	0.19	0.32	0.54	0.58	0.20	0.22	0.24	0.16	0.27	0.26	0.08
	6	0.08	0.23	0.10	0.16	0.17	0.24	0.38	0.26	0.15	0.16	0.20	0.49	0.23	0.56	0.09
	7	0.07	0.15	0.09	0.13	0.13	0.16	0.20	0.13	0.12	0.14	0.18	0.74	0.23	0.56	0.08
	8	0.07	0.17	0.09	0.15	0.16	0.18	0.23	0.14	0.14	0.16	0.20	0.57	0.29	0.68	0.09
	9	0.05	0.10	0.07	0.09	0.09	0.11	0.12	0.10	0.10	0.11	0.15	0.10	0.52	0.33	0.07
	10	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.81

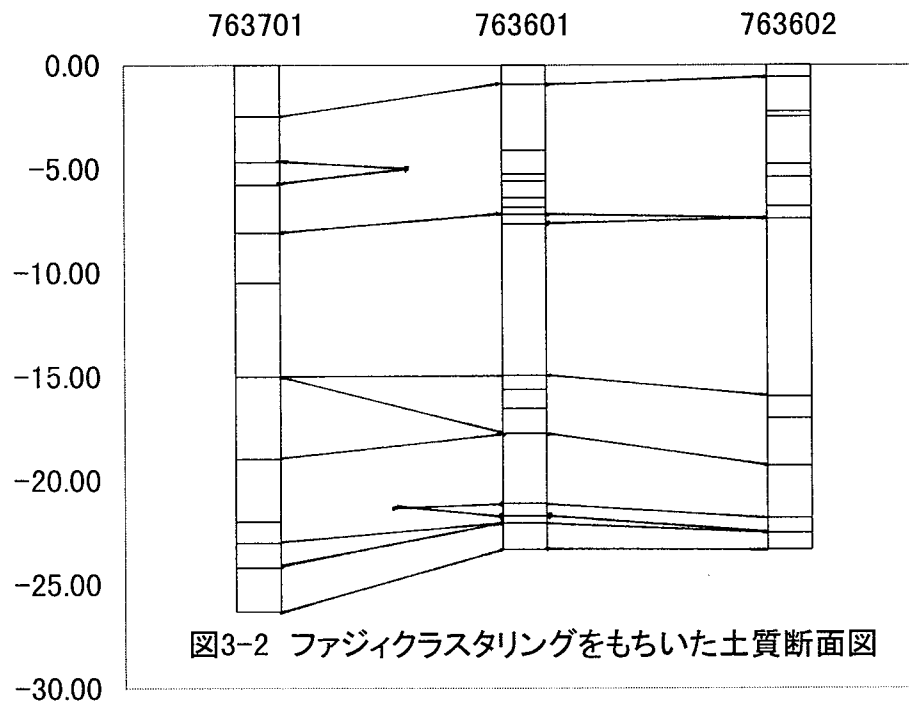
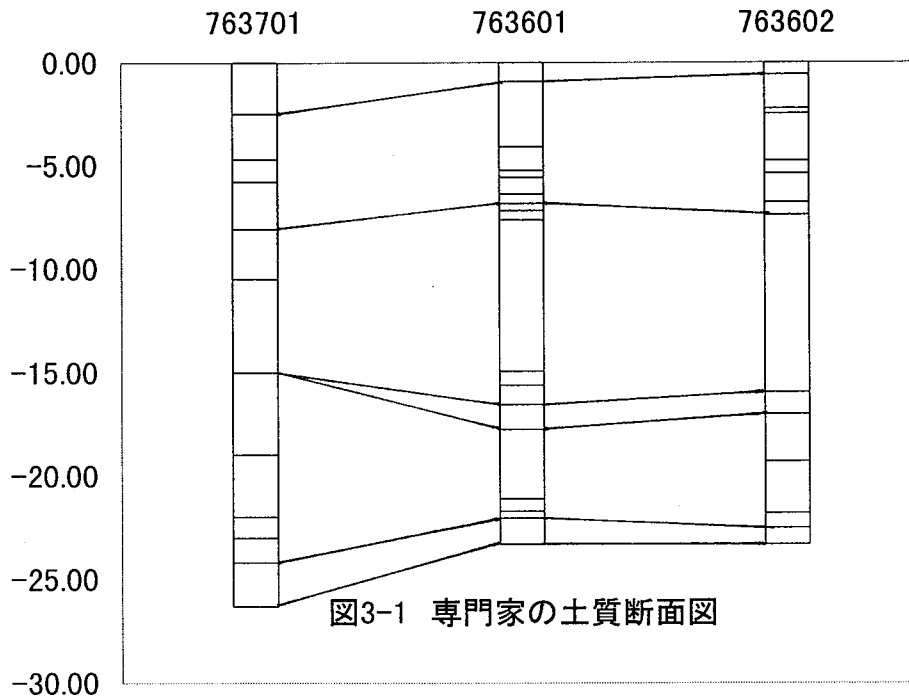
表3-2 763601-763602の類似度

		763602											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
763601	1	0.98	0.96	0.95	0.97	0.74	0.80	0.06	0.09	0.07	0.02	0.09	0.04
	2	0.61	0.65	0.59	0.64	0.85	0.78	0.14	0.18	0.16	0.04	0.18	0.07
	3	0.90	0.97	0.88	0.95	0.80	0.87	0.07	0.11	0.09	0.03	0.11	0.05
	4	0.74	0.79	0.72	0.78	0.97	0.93	0.10	0.16	0.14	0.03	0.16	0.06
	5	0.72	0.77	0.70	0.76	0.96	0.92	0.09	0.17	0.15	0.03	0.17	0.06
	6	0.51	0.55	0.49	0.54	0.72	0.66	0.14	0.24	0.22	0.04	0.24	0.07
	7	0.26	0.28	0.25	0.28	0.40	0.36	0.25	0.29	0.28	0.06	0.33	0.08
	8	0.07	0.09	0.06	0.09	0.14	0.12	0.86	0.13	0.13	0.04	0.14	0.07
	9	0.07	0.09	0.06	0.09	0.13	0.13	0.07	0.80	0.77	0.03	0.29	0.05
	10	0.06	0.08	0.06	0.08	0.13	0.13	0.08	0.83	0.82	0.04	0.31	0.06
	11	0.08	0.10	0.07	0.09	0.15	0.15	0.08	0.97	0.93	0.04	0.38	0.07
	12	0.06	0.07	0.05	0.07	0.09	0.08	0.08	0.11	0.12	0.78	0.13	0.07
	13	0.07	0.09	0.06	0.09	0.14	0.14	0.09	0.37	0.39	0.06	0.93	0.07
	14	0.06	0.08	0.06	0.08	0.14	0.14	0.09	0.22	0.25	0.29	0.49	0.08
	15	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.04	0.08	0.97

参考文献

- 稲崎富士(1991)：断面図の自動作成法、地盤情報のデータベースに関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp.231-238
- 稲崎富士 (1992)：地中情報の利用技術の開発、地下空間の利用技術の開発報告書、第2分冊、建設省、pp.219-256
- 大野研他(1997)：ファジィ理論とGAを利用した土質断面図の提案、第9回地盤工学シンポジウム論文集、地盤工学会中部支部、pp.59-66
- 地盤工学会中部支部 (1996)：稲沢の地盤
- 古田均・大野研他(1992)：ファジィ理論の土木工学への応用、森北出版
- Inazaki, T (1994) "Automated borehole data correlation using dynamic depth warping technique and an expert system", Proc. Seventh International Congress International Association of Engineering Geology, A.A.Ballema, pp.4457-4465

(つづきあり)



参考文献のつづき

- Ohno, K(1996) "Geological Profiles by Fuzzy theory and GA", Proc. of International Conference on Intelligent Technologies in Human-Related Sciences, Universidad de Leon, pp.109-116
- Toll, D.G., N.Vaptismas and M.Moula (1991) "Comparing Soils Using Knowledge Based Systems", Proc. of Artificial Intelligence & Civil Engineering, 1991 Civil-Comp, pp.113-118
- Toll, D.G. and N.Vaptismas (1993) "Interpreting Borehole Information", Proc. of Knowledge Based Systems for Civil and Structural Engineering, 1993 Civil-Comp, pp.153-159