

ファジィ理論とGAを利用した土質断面図の提案

三重大学生物資源学部 大野 研
愛知県 渡部 勉
富士開発(株) 内園立男

1. まえがき

土質断面図は、地盤調査の主要な結果の一つであり、そこにできる構造物の質を大きく左右する。そして、十分な地質学上の知識と多くの経験をもってしてはじめて、優秀な土質断面図が作成される。したがって、安定して高いレベルの土質断面図を作成するために、地質技術者の知識や経験を組み込んだコンピュータプログラムがあれば有効である。すなわち、そのようなコンピュータプログラムがあれば、土質断面図を作成しようとする技術者の地質学上の知識の未熟さや、経験不足を補うことができる。

このような考え方に基づいて、幾つかの知識ベースシステムが作られてきている。Tollら(1991)は、2つの土が似ている程度を定義するために、類似度という測度を導入した。これは、4つの変数、Soil type, Structure, Consistency, Colourの各々の類似度の計算の方針を示したものである。しかし、それらを総合して、2つの土の間の類似度を定義するまでには至っていない。さらにTollら(1993)は、広域的な土層の連結と局所的な2つのボーリング孔間での土層の連結の2つアプローチを組み合わせる戦略を提案している。広域的アプローチでは、キイとなるマーカーベットの発見を重要視した。ボーリング孔間アプローチは、前述した類似度を2つのボーリング孔間で計算するものである。ボーリング孔間アプローチで層のつながりの仮説をいくつか発生させ、広域的調査アプローチでその仮説の数を減らしていくのが、彼らの戦略である。しかし、それらの仮説は、コンピュータが自動的に発生させるものではなく、類似度を参考にして、技術者が発生させるものである。

本研究では、地盤調査結果から土の類似度を計算する際に、より人間の技術者の判断に近い計算ができるように、ファジィ理論を導入し、土層の連結の仮説をGAを用いて自動的に発生させるのが目的である。

2. 方法

土質断面図提案までのプロセスは、図1に示すように大きく2つに分かれる。すなわち、土の類似度を計算する部分と、類似度の高い土層を合理的に連結する部分である。もちろん地質技術者は、これほど単純な過程で土質断面図を提案しているわけではない。しかし例えて言えば、これはチェスコンピュータとチェスのチャンピオンの次の一手の選択の仕方の違いに似ていると思われる。すなわち、チェスコンピュータは次の一手として考えられる非常に多くの手を考え、その中から適当な評価関数によって一手を選ぶ。しかし、チェスのチャンピオンは、多くの知識・過去の経験や直感などから一手を選ぶ。我々のシステムはチェスコンピュータほど洗練されてい

Proposition of geological profiles using fuzzy theory and GA: Ken Ohno (Mie University), Tsutomu Watabe (Aichi Pref.) and Tatsuo Uchizono (Fuji Corporation)

ないと思われるが、地質技術者のやり方に倣って土の類似の程度（類似度）を計算し、ボーリング孔間で無数に考えられる土層の連結を考え、その中から適当と思われるものを我々が設定した評価関数に基づいて選択する。我々の提案する土質断面図は、優秀な地質技術者の提案する土質断面図には、明らかに劣ると思われる。しかし、幾つかの地質技術者の見落としのようなケースを提案する可能性もあるうえに、いつも安定したレベルでの土質断面図の提案が可能である。

2-1 土層ごとの類似度の計算と類似度の高い土層の連結の概説

土層ごとの類似度の計算の過程を、図2に示す。ボーリング記録に一般に記入されている6種類のデータ（土質区分、N値、層厚、色調、相対密度、相対ちよう度）を用いて、土層ごとの類似度の計算を行う。まず、それらのデータごとに個別に類似度を計算する。

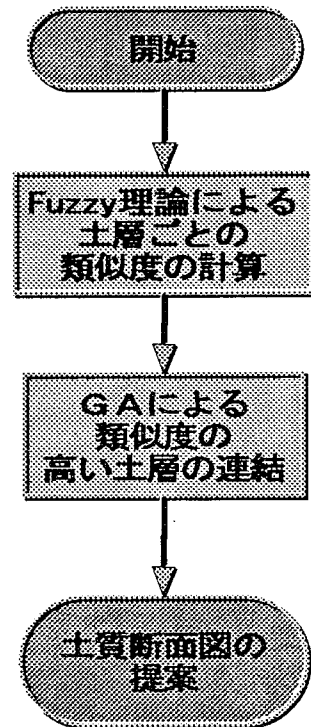


図1 土質断面図提案までの流れ図

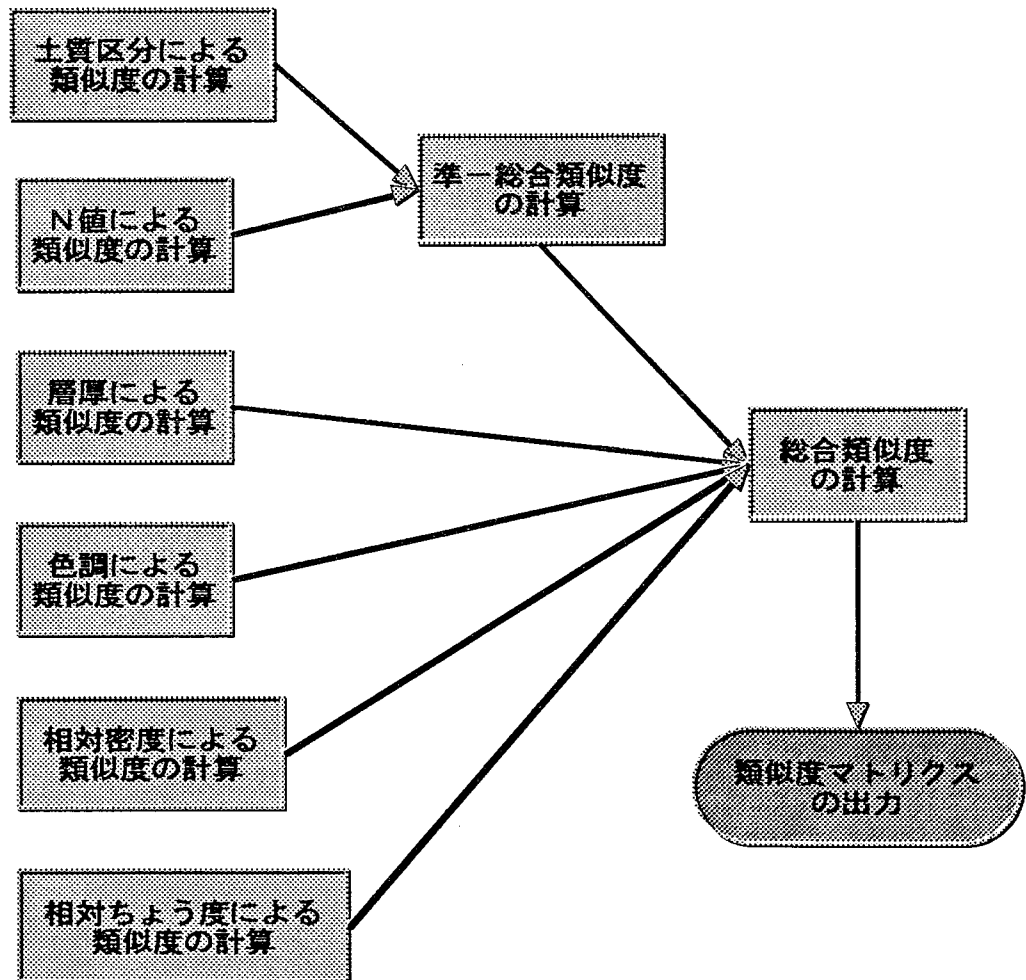


図2 類似度マトリクスの出力までの流れ図

土質区分とN値の2種類のデータは、他の4種類のデータよりも総合的な類似度の計算において重要性が高いと思われるので、まずこの2種類の類似度から、準一総合類似度を計算する。その後、残りの4種類の類似度で、この準一総合類似度を修正して、総合類似度とする。その結果、2つのボーリング孔間に類似度マトリクスが形成される。

この類似度マトリクスから、類似度の高い土層を連結して、土質断面図を提案する流れを図3に示す。すなわち、適当に土層を連結した土質断面図を発生させ、それを評価関数で評価し、GAにより、より評価値の高い土質断面図を発生させていく。十分な数の仮の土質断面図を発生させた後、評価値の大きい土質断面図が、コンピュータが提案する土質断面図となる。

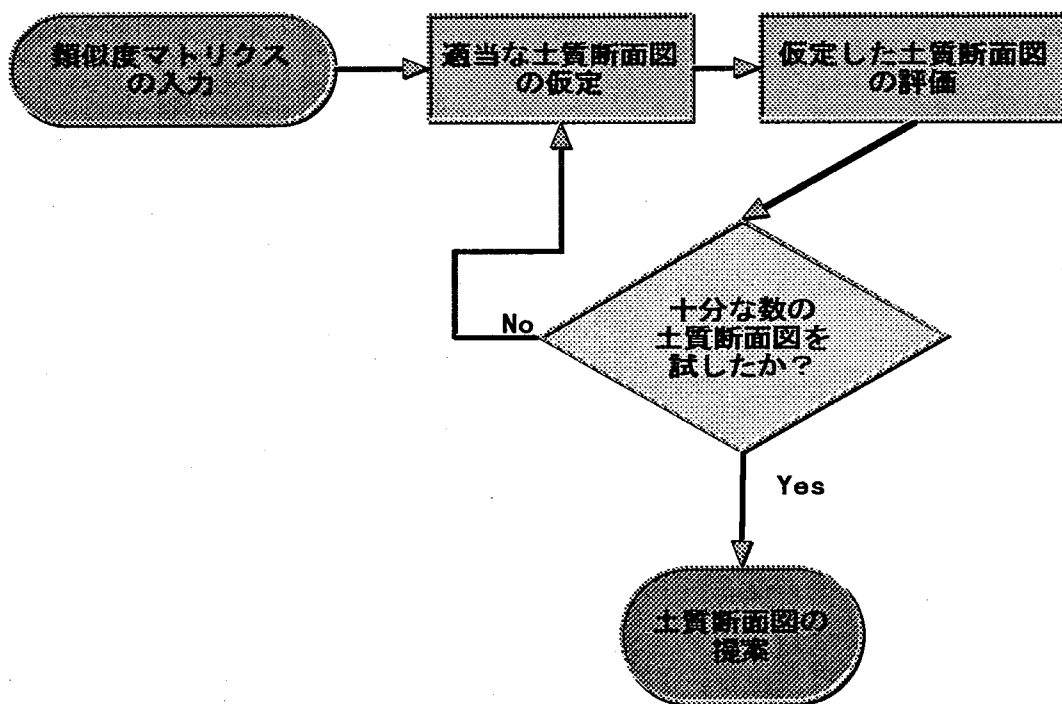


図3 類似マトリクスから土質断面図の提案までの流れ図

2-2 土層ごとの類似度の計算の詳細

土層ごとの類似度は、今述べたように、6種類のデータごとの個別の類似度の計算から始まる。以下に個別の類似度の計算方法とそれを総合する方法を示す。

(1) 土質区分

土質区分は、観測された2つの土がいかかに似ているかを判断するうえで、もっとも重要な情報である。土質区分から2つの土の類似度を決定する方法としては、Toll et al.(1991)の試みがある。彼らの方法は、以下のようなものである。まず、土質区分を対応する粒子サイズに変換する。粒子サイズ分布を数値的に比較して類似度を与える。土質区分に対する類似度は次の式によって計算する。

$$SIMILARITY_NUMBER = 100 - \frac{\sum \{Percentage_Difference\}}{5} \quad (1)$$

我々は、この方法を採用した。

(2) N値

砂に対しても、粘土に対して、N値と土質特性との間の関係が非線形であるのは明らかである。

例えば、N値3とN値7の間の差と、N値30とN値34の間の差は数字的には等しいものであるが、土質特性の差は明らかに異なっている。2つのN値を比較するためには、非線形な関係を定義する必要がある。したがって、この関係を定義するために、N値と類似度の間をファジィ推論で結びつけた。

(3) 層厚

2つの層の厚さを比較するために、層の厚さと類似度の間をファジィ推論で結びつけた。層厚と類似度の関係が非線形であることが明らかであるからである。

(4) 色調

色調表す言葉を計算機によって比較するのは困難である。Toll et al.(1991)が比較の方法を提案している。彼らは、土の色調は主色、従色、修飾でできていると定義した。各色は、色相、明度、彩度で表すことができる。この3つの要素の違いを、主色、従色、修飾で重み付けし、さらに各要素ごとの重要度で重みづけして類似度を計算する。我々は、色調に関してほとんどすべてを彼らの方法に倣ったが、色の3つの要素を総合するときには、ファジィ推論を用いた。

(5) 相対密度

相対密度は、砂に対するN値と技術者の観察を基にして、ボーリング記録の中に記録されている。このデータと次の相対ちょう度は、N値の類似度の計算に土質によらず同じ非線形の関数を用いていることを補うために使用している。通常相対密度は、とても密な、密な、中くらいの、緩い、非常に緩いなどと表されている。2つの土を比較する場合に、これらの組み合わせはただか25通りである。したがって、25通りの相対密度と類似度の関係を定義した。

(6) 相対ちょう度

相対ちょう度は、粘土に対するN値と技術者の観測を基にして、ボーリング記録の中に記録されている。通常は、とても硬い、硬い、中くらい、軟らかい、とても軟らかいなどと表されている。したがって、相対密度と同様に25個のルールがあれば、相対ちょう度と類似度を関連づけることができる。

(7) 個々の類似度から総合類似度の計算

前にも述べたように、もっとも重要な2つの類似度、土質区分の類似度とN値の類似度から、準-総合類似度を求めた。土質区分の類似度とN値の類似度から、準-総合類似度が計算できるようにファジィ推論を用いた。その後、この準-総合類似度を残りの類似度で改良する。残りの4つの類似度(層厚、色調、相対密度、相対ちょう度の類似度)は、準-総合類似度を0-5%の範囲で増減させる。この結果、総合類似度が計算される。

2-3 類似度の高い土層の連結の詳細

2つのボーリング孔で見つかった土層同士を組み合わせる場合の数は、驚くほど多い。例えば、5つの土層を持つAボーリング孔と4つの土層を持つBボーリング孔の間の土質断面図を考える。そして、各々のボーリング孔の土層を上から第1層、第2層と呼ぶことにする。すると、A孔の第1層に連結される可能性のあるB孔の層の組み合わせは、図4に示す16(2^4)通りも存在する。以下同様に、A孔の第2層以下にも16通りずつ存在するので、全部で考えられる土質断面図の場合の数は、 2^{20} (約100万)通り存在することになる。この程度なら、全ての場合について評価値を計算して、評価値の大きいものを提案する土質断面図としても良いのだが、もう少し層の数が増えると、非常に大変なことになる。そこで、GAを利用して、評価値の大きい土質断面図を効

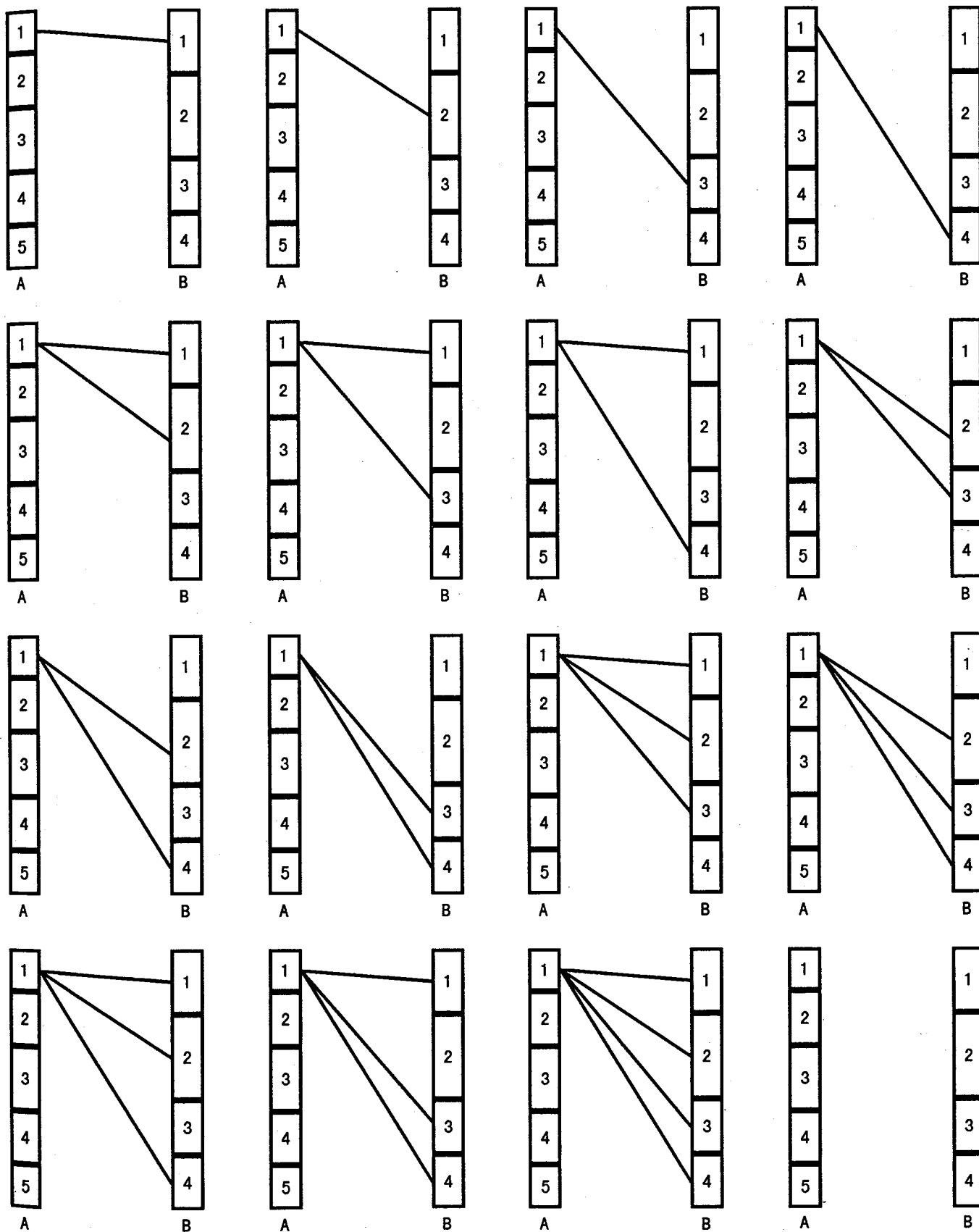


図4 A孔第1層に連結される可能性のあるB孔の組み合わせ

率よく求めることにした。我々の用いたGAの戦略を、図5に示す。いわゆるシンプルGAにエリート選択を組み合わせたものである。そして評価関数には類似度を利用した。

3. 計算例

我々のシステムを検証するために、尾西市で行われた実際のボーリング記録を用いることにした。我々のシステムが提案する土質断面図と、専門家が描いた土質断面図を比較するのが目的である。我々は、図6に示す位置の4つのボーリング孔からボーリング記録を得た。

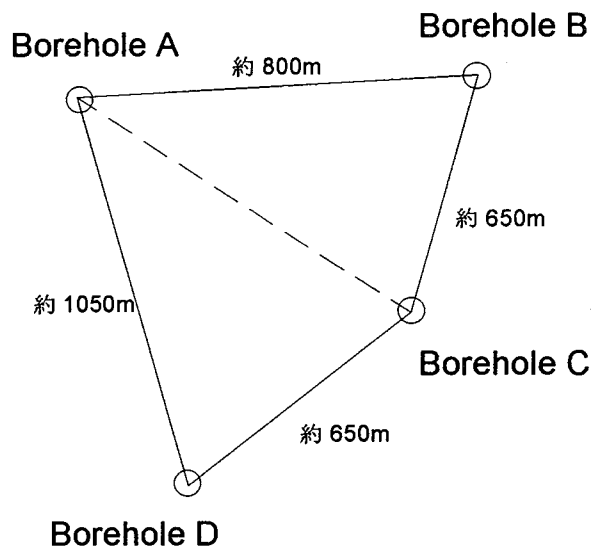


図6 ボーリング位置

表1に、それらのボーリング記録を示す。地表に近い土層から番号付けをした。

その後、図1の流れ図のように、まず各ボーリング孔間で類似度を計算した。その計算された類似度マトリクスの幾つかを表2に示す。

そして、専門家が予測したボーリング孔 A-B-C の間の土質断面図を図6に、本システムが予測したものを図7に示す。同様に、専門家が予測したボーリング孔 C-D-A の間の土質断面図を図8に、本システムが予測したものを図9に示す。

本システムでの予測は、専門家が予測したものと、全体的に傾向は一致しているが、細かい部分ではいくらかの不一致がある。この一つの原因としては、ボーリング記録では砂の区分が3段階(粗砂、中砂、細砂)存在しているにもかかわらず、我々のシステムでは、全て同じ砂として判断していることが考えられる。また、専門家は、同一ボーリング孔内で、幾つかの類似の土層グループを作成後、もう一つのボーリング孔と

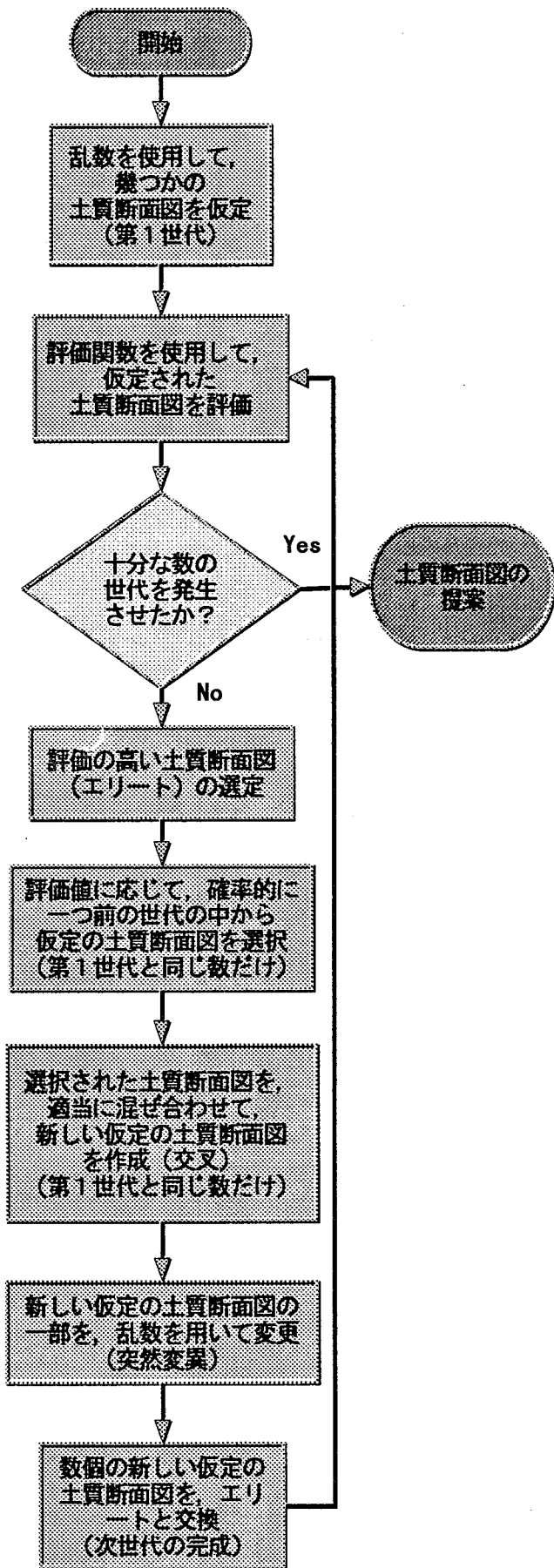


図5 我々の用いたGAの戦略

の連結を行っているようであるが、我々のシステムでは、まったくそのようなことが考えられていないことも、原因と思われる。したがって、これらの改良を加えていくことが今後の課題である。

表1 尾西市でのボーリングデータ

Borehole A	土質名	N値	層厚(cm)	色調	相対密度	相対ちよう度
1	シルト質細砂	4	140	—	極粗	
2	砂質シルト	5	200	—		軟
3	シルト	2	90	—		極軟
4	シルトまじり細砂	7	220	—	粗	
5	砂まじり粘土	3	120	—		極軟
6	細中砂	22	820	—	中	
7	砂質シルト	9	80	—		中
8	シルトまじり細砂	7	70	—	粗	
9	細中砂	30	950	—	中	
10	シルト	9	180	—		中
11	砂礫	50	160	—	極密	
Borehole B	土質名	N値	層厚(cm)	色調	相対密度	相対ちよう度
1	砂質シルト	4	165	—		軟
2	シルト質細砂	3	25	—	極粗	
3	砂質シルト	2	230	—		極軟
4	シルト	1	60	—		極軟
5	シルト質細砂	8	140	—	粗	
6	シルト	3	60	—		極軟
7	中砂	23	855	—	中	
8	砂質シルト	6	105	—		軟
9	シルト質細砂	11	230	—	中	
10	細砂	27	250	—	中	
11	シルト	5	70	—		軟
12	砂礫	50	80	—	極密	
Borehole C	土質名	N値	層厚(cm)	色調	相対密度	相対ちよう度
1	シルト	3	270	—		極軟
2	シルト質細砂	3	40	—	極粗	
3	中砂	28	390	—	中	
4	粗砂	26	620	—	中	
5	細砂	28	530	—	中	
6	中砂	30	150	—	中	
7	砂礫	50	170	—	極密	
Borehole D	土質名	N値	層厚(cm)	色調	相対密度	相対ちよう度
1	シルト質細砂	8	35	—	粗	
2	細砂	14	295	—	中	
3	シルト	7	150	—		中
4	シルト質細砂	11	25	—	中	
5	細砂	13	430	—	中	
6	シルト質細砂	16	50	—	中	
7	細砂	22	360	—	中	
8	砂質シルト	18	30	—		硬
9	細砂	30	180	—	中	
10	シルト質細砂	20	25	—	中	
11	細砂	29	265	—	中	
12	シルト質細砂	26	30	—	中	
13	細砂	30	350	—	中	
14	シルト	37	25	—		極硬
15	細砂	28	180	—	中	
16	砂礫	50	155	—	極密	

表2 ボーリング孔 A-C,A-B,C-B 間の類似度マトリクス

A-C	1	2	3	4	5	6	7
1	72.20	89.92	53.23	52.11	53.25	54.32	38.30
2	85.97	71.98	50.22	49.61	50.22	50.07	34.82
3	94.53	75.60	44.45	43.50	44.45	44.96	33.80
4	70.66	81.85	57.49	58.44	57.49	56.40	38.09
5	85.55	70.58	39.98	39.14	39.99	40.45	21.20
6	43.63	46.95	85.00	87.12	85.00	80.67	60.58
7	75.85	71.26	61.46	63.66	61.46	60.09	40.19
8	69.87	83.35	56.89	57.14	56.89	56.99	38.51
9	43.63	46.95	84.06	84.78	84.06	80.67	66.70
10	76.71	70.77	61.00	63.15	61.00	59.66	39.25
11	33.40	37.85	70.28	67.75	70.29	71.81	90.03

A-B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	75.23	89.98	72.69	72.60	87.61	72.60	50.03	73.42	73.70	53.27	73.00	38.30
2	88.73	71.98	87.15	85.40	76.84	85.40	47.73	90.81	70.93	50.57	89.46	34.82
3	88.33	75.62	93.21	95.00	71.16	95.00	41.76	84.21	61.01	44.47	87.61	33.80
4	73.84	81.85	71.16	68.92	93.22	68.92	60.89	79.19	78.35	58.53	75.14	38.09
5	81.24	70.63	85.27	85.97	67.01	85.97	37.58	77.32	55.69	40.01	79.62	21.20
6	45.63	46.95	44.02	41.76	57.72	41.76	95.52	52.07	81.07	85.67	47.03	60.58
7	80.67	71.26	76.73	76.24	78.37	76.24	66.22	85.25	75.94	62.56	80.83	40.19
8	74.65	83.35	70.36	70.29	94.16	70.29	58.34	80.06	77.53	57.92	75.96	38.51
9	45.97	46.95	44.02	41.76	52.54	41.76	86.44	46.64	76.59	84.06	46.15	66.70
10	79.74	70.78	75.87	77.11	77.92	77.11	65.67	84.10	75.42	62.09	81.79	39.25
11	34.87	37.87	33.69	33.59	38.30	33.59	60.58	34.87	48.63	69.81	34.58	90.03

C-B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	87.40	74.11	94.16	93.23	70.34	93.23	43.63	83.32	61.67	44.96	86.72	33.40
2	74.34	95.52	74.68	76.42	84.31	76.42	46.95	70.84	66.06	49.06	72.18	37.87
3	48.50	49.06	45.35	43.81	56.31	43.81	85.00	49.92	78.77	87.41	49.54	70.32
4	47.49	48.29	44.91	43.35	56.65	43.35	87.12	50.28	79.05	87.38	48.89	67.75
5	48.50	49.06	45.35	43.81	56.33	43.81	85.00	49.93	78.77	87.41	49.54	70.32
6	49.41	49.99	44.87	44.69	56.47	44.69	80.67	50.13	77.97	85.56	49.60	71.81
7	34.87	37.87	33.69	33.59	38.30	33.59	60.58	34.87	48.63	69.81	34.58	90.03

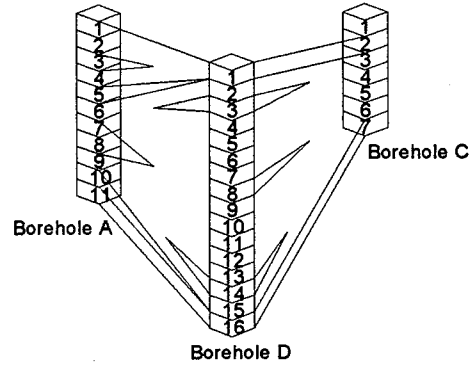
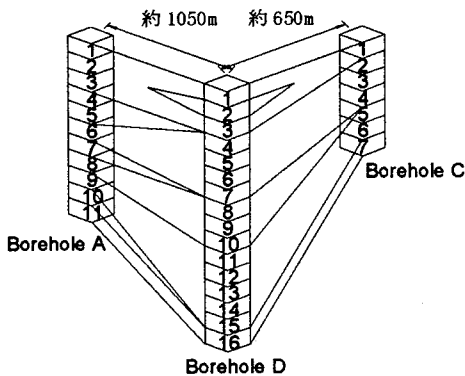


図7 専門家による土質断面図(A-B-C) 図8 本システムによる土質断面図(A-B-C)

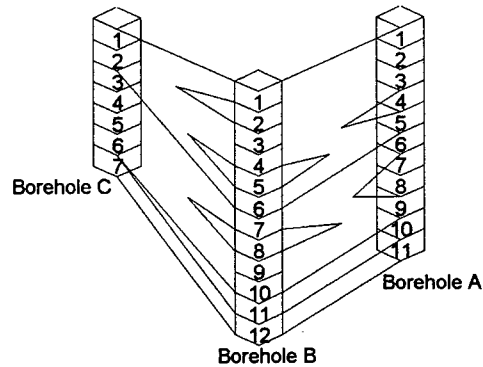
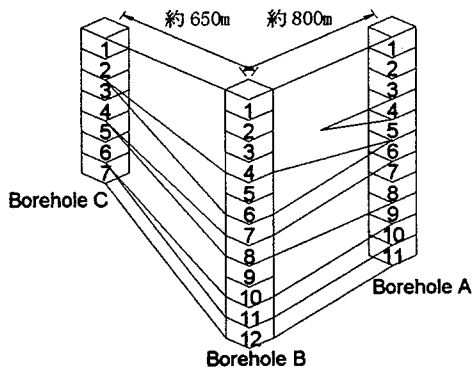


図9 専門家による土質断面図(C-D-A) 図10 本システムによる土質断面図(C-D-A)

参考文献

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